



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 TÉCNICO COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS
INALÁMBRICOS DE CUARTA GENERACIÓN (4G), WIRELESS
MAN-ADVANCED (IEEE 802.16M) Y LTE-ADVANCED**

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

JOSÉ DAVID ROMÁN REYES
davidr744@yahoo.com

DIRECTOR: PROF. ING. HUGO CARRIÓN ROBALINO
hugo.carrion@epn.edu.ec

Quito, Octubre 2013

DECLARACIÓN

Yo, José David Román Reyes, 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.

José David Román Reyes

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por José David Román Reyes, bajo mi supervisión.

Prof. Ing. Hugo Carrión Robalino
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por haberme guiado y enseñado a seguir siempre adelante. Por haber sido una luz en mi camino y permitirme ser una persona de bien.

A mis padres, por sus consejos, y ser ejemplo de lucha y perseverancia. Gracias por su confianza en mí.

A los profesores de la Escuela Politécnica Nacional, por su dedicación, enseñanza y ejemplo para ser mejores profesionales.

A mis compañeros y amigos con quienes se ha compartido momentos de alegría y por la amistad brindada.

Un especial agradecimiento al Profesor Ing. Hugo Carrión Robalino por su dedicación al presente proyecto de titulación, que con sus consejos y recomendaciones han sido de guía.

A mi familia y todas las personas que de una u otra manera brindaron su apoyo incondicional y confiaron en mí.

DEDICATORIA

A mis padres por creer en mí y brindarme su apoyo en cada etapa de la vida, y ser ejemplo de constancia y dedicación.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|-------------------------|------|
| ÍNDICE DE FIGURAS | viii |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | x |
| RESUMEN | xii |
| PRESENTACIÓN..... | xiv |

CAPÍTULO 1

| | |
|--|----------|
| 1. EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE TELEFONÍA MÓVIL Y LAS TELECOMUNICACIONES MÓVILES INTERNACIONALES-AVANZADAS (IMT-ADVANCED) | 1 |
| 1.1 EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE TELEFONÍA MÓVIL | 1 |
| 1.1.1 PRIMERA GENERACIÓN (1G) | 1 |
| 1.1.2 SEGUNDA GENERACIÓN (2G) | 3 |
| 1.1.3 EVOLUCIÓN DE SEGUNDA A TERCERA GENERACIÓN | 5 |
| 1.1.4 TERCERA GENERACIÓN (3G) Y SU DESARROLLO | 5 |
| 1.1.5 CUARTA GENERACIÓN (4G)..... | 10 |
| 1.2 TELECOMUNICACIONES MÓVILES INTERNACIONALES-AVANZADAS (IMT-ADVANCED)..... | 11 |
| 1.2.1 UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT)..... | 11 |
| 1.2.1.1 Sector de Radiocomunicaciones de la UIT (UIT-R)..... | 12 |
| 1.2.1.1.1 Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones (CMR)..... | 12 |
| 1.2.1.1.2 Asambleas de Radiocomunicaciones (AR) | 12 |
| 1.2.1.1.3 Comisiones de Estudio de Radiocomunicaciones | 13 |
| 1.2.1.1.4 Comisión de Estudio 5 - Study Group 5 (SG 5)..... | 13 |
| 1.2.1.2 Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT (UIT-T)..... | 13 |
| 1.2.1.3 Sector de Desarrollo de las Telecomunicaciones de la UIT (UIT-D)..... | 14 |
| 1.2.2 TELECOMUNICACIONES MÓVILES INTERNACIONALES (IMT) | 14 |
| 1.3 REQUERIMIENTOS DE LAS IMT-AVANZADAS | 15 |
| 1.3.1 FUNCIONAMIENTO TÉCNICO | 16 |
| 1.3.1.1 Eficiencia espectral de la celda (<i>Cell spectral efficiency</i>)..... | 17 |
| 1.3.1.2 Eficiencia espectral máxima (<i>Peak spectral efficiency</i>)..... | 18 |
| 1.3.1.3 Ancho de banda (<i>Bandwidth</i>) | 18 |

| | | |
|-----------|--|----|
| 1.3.1.4 | Eficiencia espectral de usuario en el borde de la celda (<i>Cell edge user spectral efficiency</i>)..... | 19 |
| 1.3.1.5 | Latencia | 19 |
| 1.3.1.5.1 | Latencia de plano de control (<i>Control plane latency</i>) | 19 |
| 1.3.1.5.2 | Latencia de plano de usuario (<i>User plane latency</i>) | 20 |
| 1.3.1.6 | Movilidad (<i>Mobility</i>) | 20 |
| 1.3.1.7 | Tiempo de interrupción handover (handoff)..... | 21 |
| 1.3.1.8 | Capacidad <i>VoIP</i> | 22 |
| 1.3.2 | SERVICIOS | 22 |
| 1.3.3 | BANDAS DE FRECUENCIA DE LAS IMT | 24 |
| 1.3.3.1 | Bandas de Frecuencia asignadas para las IMT en el Ecuador..... | 27 |
| 1.3.4 | BANDAS DE FRECUENCIA DE LAS 3 OPERADORAS DE TELEFONÍA MÓVIL CELULAR EN EL ECUADOR | 28 |
| 1.3.5 | TECNOLOGÍAS DE TRANSMISIÓN POR RADIOFRECUENCIA | 30 |
| 1.3.5.1 | Métodos de acceso múltiple..... | 30 |
| 1.3.5.2 | Métodos Dúplex..... | 32 |
| 1.3.5.3 | Control de errores | 33 |
| 1.3.5.4 | Técnicas avanzadas de antena (<i>MIMO, Multiple-Input Multiple-Output</i>) | 34 |

CAPÍTULO 2

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2. | ESTUDIO DEL SISTEMA WIRELESS MAN-ADVANCED (IEEE 802.16M) CON SUS RESPECTIVAS TECNOLOGÍAS | 36 |
| 2.1 | INTRODUCCIÓN | 36 |
| 2.2 | GRUPO DE TRABAJO IEEE 802.16 | 36 |
| 2.2.1 | ESTÁNDARES IEEE 802.16 | 37 |
| 2.2.1.1 | Estándar IEEE 802.16m..... | 38 |
| 2.3 | WIMAX FORUM..... | 39 |
| 2.3.1 | INTRODUCCIÓN A WIMAX..... | 39 |
| 2.3.2 | TOPOLOGÍAS DE RED | 39 |
| 2.3.2.1 | Punto-a-Punto (PTP)..... | 40 |
| 2.3.2.2 | Punto-a-Multipunto (PMP)..... | 40 |
| 2.3.2.3 | Malla (<i>Mesh</i>)..... | 41 |
| 2.3.3 | WIMAX MÓVIL | 41 |
| 2.4 | WIMAX 2.0..... | 42 |
| 2.4.1 | MODELO DE REFERENCIA DE RED | 42 |
| 2.4.1.1 | Estación Móvil Avanzada (AMS)..... | 43 |

| | | |
|-----------|--|----|
| 2.4.1.2 | Red de Servicio de Acceso (ASN)..... | 43 |
| 2.4.1.2.1 | Estación Base Avanzada (ABS)..... | 44 |
| 2.4.1.2.2 | ASN-Gateway (ASN-GW)..... | 45 |
| 2.4.1.3 | Red de Servicio de Conectividad (CSN)..... | 45 |
| 2.4.1.4 | Puntos de Referencia | 46 |
| 2.4.1.4.1 | AAA (Authentication, Authorization and Accounting) | 48 |
| 2.4.1.5 | IP Móvil..... | 48 |
| 2.5 | WIRELESS MAN-ADVANCED | 49 |
| 2.5.1 | FUNCIONAMIENTO TÉCNICO | 49 |
| 2.5.1.1 | Ancho de banda | 49 |
| 2.5.1.2 | Latencia | 49 |
| 2.5.1.3 | Movilidad..... | 52 |
| 2.5.1.4 | Handover | 53 |
| 2.5.2 | BANDAS DE FRECUENCIA DE WIRELESS MAN-ADVANCED | 55 |
| 2.6 | CAPA FÍSICA (PHY) | 56 |
| 2.6.1 | MÉTODOS DÚPLEX | 58 |
| 2.6.2 | MÉTODOS DE ACCESO MÚLTIPLE..... | 60 |
| 2.6.3 | ESTRUCTURA DE TRAMA..... | 62 |
| 2.6.4 | MODULACIÓN / CODIFICACIÓN..... | 68 |
| 2.6.5 | TÉCNICAS AVANZADAS DE ANTENA..... | 69 |
| 2.6.5.1 | Downlink MIMO | 69 |
| 2.6.5.2 | Uplink MIMO..... | 71 |
| 2.6.6 | CANALES DE CONTROL | 73 |
| 2.6.6.1 | Canales de control del enlace descendente | 73 |
| 2.6.6.1.1 | Cabecera de la supertrama (SFH) | 74 |
| 2.6.6.1.2 | Advanced-MAP (A-MAP)..... | 74 |
| 2.6.6.2 | Canales de control del enlace ascendente | 75 |
| 2.6.6.2.1 | Canal de realimentación rápida (FBCH) | 75 |
| 2.6.6.2.2 | Canal de realimentación HARQ | 75 |
| 2.6.6.2.3 | Canal de sondeo | 75 |
| 2.6.6.2.4 | Canal de determinación de la distancia..... | 76 |
| 2.6.6.2.5 | Canal de petición de ancho de banda (BR)..... | 76 |
| 2.6.7 | CONTROL DE POTENCIA..... | 77 |
| 2.6.7.1 | Control de Potencia del enlace descendente | 77 |
| 2.6.7.2 | Control de Potencia del enlace ascendente | 77 |
| 2.7 | RETRANSMISIÓN | 78 |

| | |
|--|----|
| 2.8 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE WIMAX MÓVIL (IEEE 802.16E) Y WIMAX 2.0 (IEEE 802.16M) | 79 |
|--|----|

CAPÍTULO 3

| | |
|--|-----------|
| 3. ESTUDIO DEL SISTEMA LTE-ADVANCED CON SUS RESPECTIVAS TECNOLOGÍAS | 82 |
| 3.1 INTRODUCCIÓN | 82 |
| 3.2 3GPP (3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT) | 82 |
| 3.2.1 PROCESO DE ESTANDARIZACIÓN EN 3GPP | 83 |
| 3.2.1.1 Evolución de las versiones de tecnologías y sistemas 3GPP | 84 |
| 3.3 LONG TERM EVOLUTION (LTE) | 85 |
| 3.4 LTE-ADVANCED | 86 |
| 3.4.1 FUNCIONAMIENTO TÉCNICO | 86 |
| 3.4.1.1 Ancho de banda | 86 |
| 3.4.1.2 Latencia | 87 |
| 3.4.1.3 Movilidad..... | 88 |
| 3.4.1.4 Handover | 88 |
| 3.4.1.5 Métodos Dúplex..... | 91 |
| 3.4.1.5.1 Tecnología de la Interfaz Radioeléctrica (RIT) FDD | 91 |
| 3.4.1.5.2 Tecnología de la Interfaz Radioeléctrica (RIT) TDD..... | 93 |
| 3.5 ARQUITECTURA DE RED | 94 |
| 3.5.1 EVOLVED PACKET CORE (EPC)..... | 96 |
| 3.5.2 RED DE ACCESO E-UTRAN | 97 |
| 3.5.3 EQUIPO DE USUARIO (UE)..... | 99 |
| 3.6 CAPA FÍSICA | 100 |
| 3.6.1 MÉTODOS DE ACCESO MÚLTIPLE..... | 100 |
| 3.6.1.1 OFDMA..... | 100 |
| 3.6.1.2 SC-FDMA | 101 |
| 3.6.2 ESTRUCTURA DE TRAMA..... | 102 |
| 3.6.3 MODULACIÓN / CODIFICACIÓN..... | 104 |
| 3.6.4 TÉCNICAS AVANZADAS DE ANTENA..... | 105 |
| 3.6.4.1 Downlink MIMO | 105 |
| 3.6.4.2 Uplink MIMO | 106 |
| 3.6.5 CONTROL DE POTENCIA..... | 107 |
| 3.6.5.1 Control de potencia en el enlace ascendente..... | 107 |
| 3.6.6 CANALES FÍSICOS | 108 |
| 3.7 CANALES UTILIZADOS EN LA CAPA MAC | 109 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 3.7.1 | CANAL DE TRANSPORTE..... | 109 |
| 3.7.2 | CANAL LÓGICO..... | 111 |
| 3.7.2.1 | Canal de control..... | 111 |
| 3.7.2.2 | Canal de tráfico..... | 112 |
| 3.8 | REDES HETEROGÉNEAS (HETNET)..... | 113 |
| 3.9 | RETRANSMISIÓN..... | 114 |
| 3.10 | AGREGACIÓN DE PORTADORAS EN LTE-ADVANCED..... | 117 |
| 3.11 | COORDINATED MULTIPOINT (COMP) TRANSMISSION AND RECEPTION..... | 118 |

CAPÍTULO 4

| | | |
|-----------|--|------------|
| 4. | ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS WIRELESS MAN-ADVANCED (WIMAX 2) Y LTE-ADVANCED | 121 |
| 4.1 | INTRODUCCIÓN..... | 121 |
| 4.2 | ESTUDIO Y ANÁLISIS COMPARATIVO..... | 121 |
| 4.2.1 | FUNCIONAMIENTO TÉCNICO..... | 124 |
| 4.2.1.1 | Eficiencia espectral..... | 125 |
| 4.2.1.1.1 | <i>Eficiencia espectral máxima</i> | 125 |
| 4.2.1.1.2 | <i>Eficiencia espectral de la celda y de usuario en el borde de la celda...</i> | 126 |
| 4.2.1.2 | Ancho de banda..... | 129 |
| 4.2.1.3 | Latencia..... | 130 |
| 4.2.1.4 | Movilidad y handover..... | 131 |
| 4.2.2 | SERVICIOS Y APLICACIONES..... | 133 |
| 4.2.3 | BANDAS DE FRECUENCIA..... | 138 |
| 4.2.4 | ARQUITECTURA DE RED..... | 140 |
| 4.2.5 | CAPA FÍSICA..... | 143 |
| 4.2.5.1 | Métodos Dúplex..... | 143 |
| 4.2.5.2 | Métodos de Acceso Múltiple..... | 144 |
| 4.2.5.3 | Estructura de trama..... | 146 |
| 4.2.5.4 | Modulación / Codificación..... | 146 |
| 4.2.5.5 | Técnicas avanzadas de antena..... | 147 |
| 4.3 | CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE WIRELESSMAN-ADVANCED Y LTE-ADVANCED..... | 149 |
| 4.4 | PRINCIPALES DIFERENCIAS ENTRE WIRELESSMAN-ADVANCED Y LTE-ADVANCED..... | 150 |

CAPÍTULO 5

| | |
|--|----------------|
| 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 152 |
| 5.1 CONCLUSIONES | 152 |
| 5.2 RECOMENDACIONES | 156 |
| REFERENCIAS | 157 |

ANEXOS

ANEXO A

LISTA DE ACRÓNIMOS

ANEXO B

RECOMENDACIÓN UIT-R M.2012 (ITU-R)

“Especificaciones detalladas de las interfaces radioeléctricas terrenales de las telecomunicaciones móviles internacionales-avanzadas (IMT-Avanzadas)”

ANEXO C

REPORT ITU-R M.2134 (ITU-R)

“Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s)”

ANEXO D

REPORT ITU-R M.2135-1 (ITU-R)

“Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced”

ANEXO E

Report ITU-R M.2198 (ITU-R)

“The outcome of the evaluation, consensus building and decision of the IMT-Advanced process (Steps 4 to 7), including characteristics of IMT-Advanced radio interfaces”

ANEXO F

Doc. IMT-ADV/4-E

“ACKNOWLEDGEMENT OF CANDIDATE SUBMISSION FROM IEEE UNDER STEP 3 OF THE IMT-ADVANCED PROCESS (IEEE TECHNOLOGY)”

ANEXO G

Doc. IMT-ADV/8-E

“ACKNOWLEDGEMENT OF CANDIDATE SUBMISSION FROM 3GPP PROPONENT (3GPP ORGANIZATION PARTNERS OF ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TTA AND TTC) UNDER STEP 3 OF THE IMT-ADVANCED PROCESS (3GPP TECHNOLOGY)”

ANEXO H

Recommendation ITU-R M.1036-4 (ITU-R)

“Frequency arrangements for implementation of the terrestrial component of International Mobile Telecommunications (IMT) in the bands identified for IMT in the Radio Regulations (RR)”

ANEXO I

TECHNICAL REPORT 3GPP TR 36.912 (3GPP)

“3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Feasibility study for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced) (Release 10)”

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. Teléfono móvil DynaTAC 8000X | 2 |
| Figura 1.2. Estructura de red UMTS | 8 |
| Figura 1.3. Evolución de tecnologías de la familia 3GPP | 11 |
| Figura 1.4. Logotipo de IMT (International Mobile Telecommunications) | 14 |
| Figura 1.5. Asignación de recursos en OFDM y OFDMA | 31 |
| Figura 1.6. Estructura OFDMA..... | 32 |
| Figura 1.7. Ilustración de los métodos dúplex..... | 33 |
| Figura 1.8. Esquema MIMO (Multiple Input Multiple Output) | 35 |

CAPÍTULO 2

| | |
|---|----|
| Figura 2.1. Logotipo de IEEE 802.16..... | 37 |
| Figura 2.2. Logotipo de WiMAX Forum | 39 |
| Figura 2.3. Esquema WiMAX..... | 40 |
| Figura 2.4. Evolución de la tecnología WiMAX Móvil | 42 |
| Figura 2.5. Modelo de referencia de red WiMAX..... | 43 |
| Figura 2.6. Modelo de Referencia ASN | 44 |
| Figura 2.7. Modelo para el cálculo de la latencia de plano de usuario | 51 |
| Figura 2.8. Procedimiento handover en IEEE 802.16m | 54 |
| Figura 2.9. Stack de protocolos IEEE 802.16m | 57 |
| Figura 2.10. Ejemplo de dispositivo multi-radio | 58 |
| Figura 2.11. Ilustración de métodos dúplex en IEEE 802.16m | 59 |
| Figura 2.12. Estructura en tiempo de símbolo OFDMA | 60 |
| Figura 2.13. Estructura básica de la trama para anchos de banda de canal de 10, 15 y 20 MHz..... | 63 |
| Figura 2.14. Estructura de trama TDD para anchos de banda de canal de 5, 10 y 20 MHz con $CP = 1/8 T_b$ | 64 |
| Figura 2.15. Estructura de trama FDD para un ancho de banda de canal de 7 MHz con $CP = 1/8 T_b$ | 64 |
| Figura 2.16. Estructura de trama TDD para un ancho de banda de canal de 8.75 MHz con $CP = 1/8 T_b$ | 65 |
| Figura 2.17. Estructura de trama TDD y FDD para anchos de banda de canal de 5, 10 y 20 MHz con $CP = 1/16 T_b$ | 66 |
| Figura 2.18. Estructura de trama TDD y FDD para anchos de banda de canal de 5, 10 y 20 MHz con $CP = 1/4 T_b$ | 67 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.19. Procedimientos de codificación y modulación..... | 68 |
| Figura 2.20. Arquitectura MIMO del enlace descendente..... | 69 |
| Figura 2.21. Arquitectura MIMO del enlace ascendente..... | 72 |
| Figura 2.22. Cobertura extendida con RS..... | 78 |
| Figura 2.23. Conexiones de retransmisión | 79 |

CAPÍTULO 3

| | |
|--|-----|
| Figura 3.1. Logotipo de 3GPP..... | 82 |
| Figura 3.2. Logotipo de LTE-Advanced | 86 |
| Figura 3.3. Procedimiento de handover-S1 | 89 |
| Figura 3.4. Procedimiento de handover-X2..... | 90 |
| Figura 3.5. Arquitectura de Red de LTE | 94 |
| Figura 3.6. Arquitectura básica HeNB | 95 |
| Figura 3.7. Acceso radioeléctrico E-UTRAN | 98 |
| Figura 3.8. Estructura de trama en FDD y TDD | 103 |
| Figura 3.9. Procesamiento de la capa física para DL-SCH | 104 |
| Figura 3.10. Configuración del canal descendente..... | 108 |
| Figura 3.11. Configuración del canal ascendente..... | 108 |
| Figura 3.12. Esquema de Redes Heterogéneas (HetNet)..... | 114 |
| Figura 3.13. Representación de una red de retransmisión | 116 |
| Figura 3.14. Agregación de Portadora en LTE-Advanced | 117 |
| Figura 3.15. Principio básico CoMP | 119 |

CAPÍTULO 4

| | |
|--|-----|
| Figura 4.1. Acceso Múltiple OFDMA y SC-FDMA | 145 |
|--|-----|

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1. Bandas de frecuencia utilizadas en GSM para los enlaces uplink y downlink | 4 |
| Tabla 1.2. Eficiencia espectral de la celda..... | 18 |
| Tabla 1.3. Eficiencia espectral de usuario en el borde de la celda..... | 19 |
| Tabla 1.4. Latencia de plano de control..... | 19 |
| Tabla 1.5. Latencia de plano de usuario | 20 |
| Tabla 1.6. Clases de movilidad..... | 20 |
| Tabla 1.7. Tasas de datos del enlace del canal de tráfico | 21 |
| Tabla 1.8. Tiempo de interrupción handover..... | 21 |
| Tabla 1.9. Capacidad Voz sobre IP | 22 |
| Tabla 1.10. Clasificación de servicios de las IMT | 23 |
| Tabla 1.11. Disposición de frecuencias en la banda de 450 - 470 MHz..... | 24 |
| Tabla 1.12. Disposición de frecuencias en la banda de 698 - 960 MHz..... | 25 |
| Tabla 1.13. Disposición de frecuencias en la banda de 1710 - 2200 MHz..... | 26 |
| Tabla 1.14. Disposición de frecuencias en la banda de 2300 - 2400 MHz..... | 26 |
| Tabla 1.15. Disposición de frecuencias en la banda de 2500 - 2690 MHz..... | 27 |
| Tabla 1.16. Disposición de frecuencias en la banda de 3400 - 3600 MHz..... | 27 |
| Tabla 1.17. Bandas de frecuencia asignadas para las IMT en el Ecuador | 28 |

CAPÍTULO 2

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1. Latencia de plano de control..... | 50 |
| Tabla 2.2. Latencia de plano de usuario | 52 |
| Tabla 2.3. Tasas de datos del enlace del canal de tráfico para FDD y TDD..... | 52 |
| Tabla 2.4. Tiempo de interrupción handover..... | 54 |
| Tabla 2.5. Bandas de frecuencia de WirelessMAN-Advanced..... | 56 |
| Tabla 2.6. Parámetros de OFDMA..... | 61 |
| Tabla 2.7. Modos MIMO DL | 71 |
| Tabla 2.8. Modos MIMO UL | 73 |
| Tabla 2.9. Características de IEEE 802.16e e IEEE 802.16m | 81 |

CAPÍTULO 3

| | |
|--|-----|
| Tabla 3.1. Latencia de plano de control para FDD y TDD | 87 |
| Tabla 3.2. Tasas de datos del enlace del canal de tráfico para FDD y TDD..... | 88 |
| Tabla 3.3. Tiempo de interrupción handover..... | 91 |
| Tabla 3.4. Bandas de frecuencia de LTE-Advanced en FDD..... | 92 |
| Tabla 3.5. Bandas de frecuencia de LTE-Advanced en TDD..... | 93 |
| Tabla 3.6. Categorías de UE en LTE Release 8 y Release 10 | 99 |
| Tabla 3.7. Canales físicos en el enlace descendente..... | 109 |
| Tabla 3.8. Canales físicos en el enlace ascendente..... | 109 |

CAPÍTULO 4

| | |
|---|-----|
| Tabla 4.1. Eficiencia espectral máxima de WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced | 126 |
| Tabla 4.2. Eficiencia espectral de la celda en FDD para DL y UL..... | 128 |
| Tabla 4.3. Eficiencia espectral del usuario en el borde de la celda para FDD en DL y UL..... | 128 |
| Tabla 4.4. Latencia | 130 |
| Tabla 4.5. Tiempo de interrupción handover..... | 132 |
| Tabla 4.6. Resumen de funcionamiento técnico de WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced | 133 |
| Tabla 4.7. Bandas de frecuencia de las IMT..... | 138 |
| Tabla 4.8. Bandas de frecuencia comunes en WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced | 140 |
| Tabla 4.9. Entidades básicas de WiMAX 2 y LTE-Advanced | 140 |
| Tabla 4.10. Resumen de las características principales de la capa física en WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced..... | 149 |

RESUMEN

El objetivo del presente Proyecto de Titulación fue estudiar y comparar los sistemas inalámbricos de cuarta generación “International Mobile Telecommunications-Advanced”, que permitirán brindar servicios de banda ancha móvil a usuarios finales.

En el primer capítulo se realiza una introducción sobre la evolución de los sistemas de telefonía móvil, desde la primera hasta la cuarta generación. Se describe el desarrollo de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales- Avanzadas así como los requerimientos establecidos por la UIT a través del Sector de Radiocomunicaciones (UIT-R).

El estudio realizado a los sistemas WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced es en base al funcionamiento técnico: Eficiencia espectral de la celda, eficiencia espectral máxima, ancho de banda, eficiencia espectral de usuario en el borde de la celda, latencia, movilidad y handover. También los servicios que soportarían los dos sistemas, las bandas de frecuencia, arquitectura de red. Las características de la capa física: Métodos de acceso múltiple, modulación, codificación, métodos dúplex, estructura de trama, técnicas de antena avanzadas.

En el segundo capítulo se realiza el estudio del Sistema WirelessMAN-Advanced basado en el estándar IEEE 802.16m, se trata los aspectos de funcionamiento técnico, se describe las bandas de frecuencia y características de la capa física.

En el tercer capítulo se realiza el estudio del sistema LTE-Advanced basado en LTE *Release* 10 desarrollado por 3GPP, se trata los aspectos de funcionamiento técnico, se describe las bandas de frecuencia y características de la capa física.

En el cuarto capítulo se realiza el análisis comparativo de WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced tomando como base los parámetros establecidos por la UIT para

las IMT-Avanzadas: funcionamiento técnico, servicios, bandas de frecuencia, etc. También lo referente a aspectos de la capa física y arquitectura de red. Así como las principales características de los dos sistemas y sus diferencias.

En el Capítulo 5 se plantean las Conclusiones y Recomendaciones del estudio realizado.

PRESENTACIÓN

La evolución de las telecomunicaciones móviles con sus innovaciones tecnológicas, permitirán satisfacer las necesidades de los usuarios de obtener mayores velocidades de transmisión en sus dispositivos móviles y tener mayor variedad de servicios de telecomunicaciones que brinden los sistemas 4G.

Los sistemas de cuarta generación "IMT-Advanced" son definidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones, por lo cual ha ratificado a WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced como sistemas de cuarta generación, que cumplen con todos los requerimientos establecidos para las Telecomunicaciones Móviles Internacionales-Avanzadas.

Para el despliegue a nivel mundial, en países en los cuales están implementadas redes móviles LTE de la familia de tecnologías 3GPP permitirá una rápida migración a LTE-Advanced, al igual que las redes WiMAX Móvil y su migración a WiMAX 2.

Los sistemas móviles de cuarta generación superan a las capacidades ofrecidas por las IMT-2000, el incremento en sus velocidades de transmisión de 100 Mbps para usuarios con alta movilidad y 1 Gbps para baja movilidad, aplicaciones multimedia y mejora en la calidad de servicio.

El estudio comparativo de los dos sistemas de cuarta generación WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced, permite conocer las ventajas que se tiene con cada uno de los sistemas, principalmente en el funcionamiento técnico de la interfaz radioeléctrica como la eficiencia espectral, control de potencia, métodos dúplex, latencia; también lo referente a bandas de frecuencia de operación, servicios; características de la capa física como estructura de trama, modulación, codificación, etc.

CAPÍTULO 1

EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE TELEFONÍA MÓVIL Y LAS TELECOMUNICACIONES MÓVILES INTERNACIONALES-AVANZADAS (IMT-ADVANCED)

1. EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE TELEFONÍA MÓVIL Y LAS TELECOMUNICACIONES MÓVILES INTERNACIONALES-AVANZADAS (IMT-ADVANCED)

1.1 EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE TELEFONÍA MÓVIL

En las tres últimas décadas, las tecnologías móviles han evolucionado de forma rápida. En sus inicios fueron analógicas, brindaban servicios únicamente de voz mediante la utilización de conmutación de circuitos y movilidad limitados; evolucionando a tecnologías digitales a partir de la segunda generación, incluyendo mejoras en la tercera (IMT-2000). Las tecnologías en la cuarta generación están basadas en conmutación de paquetes y totalmente IP¹, los sistemas son robustos y mejoran las capacidades dando lugar a las Telecomunicaciones Móviles Internacionales-Avanzadas.

1.1.1 PRIMERA GENERACIÓN (1G) [13, 77]

En la primera generación de telefonía móvil se utiliza tecnología analógica, basada en Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA, por sus siglas en inglés) y modulación de frecuencia (FM²) [20].

En 1973, cuando Martin Cooper trabajaba para Motorola, introduce el primer teléfono portátil. A inicios de los años 80, se implementa el sistema *AMPS* (*Advanced Mobile Phone System*) utilizado principalmente en EE.UU. En 1983 el modelo DynaTAC 8000X de Motorola recibió la aprobación de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC³, por sus siglas en inglés) como primer teléfono móvil comercial [82].

¹ IP: *Internet Protocol* (Protocolo de Internet)

² FM: *Frequency Modulation*

³ FCC: *Federal Communications Commission*



Figura 1.1. Teléfono móvil DynaTAC 8000X⁴

El sistema *AMPS* basado en FDMA operaba con un ancho de banda de canal de 30 kHz en el rango de frecuencias de 869 a 894 MHz para DL⁵ (enlace descendente), y de 824 a 849 MHz para UL⁶ (enlace ascendente) con una separación de 45 MHz entre los canales (*downlink* y *uplink*).

Otros estándares 1G fueron: *ETACS* (*Extended Total Access Communications System*) implementado principalmente en el Reino Unido, *NMT* (*Nordic Mobile Telephone*) en los países nórdicos, *C-450* utilizado en Alemania.

El sistema *ETACS* basado en FDMA cuyo año de introducción fue en 1985, operaba en el rango de frecuencias de 935 a 960 MHz para DL (*forward*), y para UL (*reverse*) en el rango de 890 a 915 MHz, y con un ancho de banda de canal de 25 kHz.

NMT 450, operaba en la banda de 450 MHz, utilizaba FDMA con ancho de banda de canal de 25 kHz y empleaba Dúplex por División de Frecuencia (FDD, por sus siglas en inglés), el rango de frecuencias que operaba era de 463 a 468 MHz para DL y de 453 a 458 MHz para UL con modulación de frecuencia en cada canal por la calidad de audio obtenida.

⁴ Fuente: <<http://www.abadiadigital.com/articulo/dynatac-8000x-el-primer-movil-de-la-historia/>>

⁵ DL: *Downlink* (enlace de estación base a estación móvil)

⁶ UL: *Uplink* (enlace de estación móvil a estación base)

NMT 900, también de primera generación operaba en la banda de 900 MHz, utilizaba FDMA con ancho de banda de canal de 12.5 kHz y empleaba FDD, el rango de frecuencias que operaba era de 935 a 960 MHz para DL y 890 a 915 MHz para UL con modulación de frecuencia en cada canal.

1.1.2 SEGUNDA GENERACIÓN (2G) [13]

La segunda generación de telefonía móvil surgió a inicios de la década de los 90. Utiliza tecnología digital para transmisión de voz y datos, se brinda servicios de mensajes cortos (*SMS, Short Message Service*) con tasas de transmisión desde 9.6 hasta aprox. 30 kbps, y las tecnologías de acceso se basaron en TDMA y CDMA, dependiendo de la multiplexación utilizada.

Estándares 2G predominantes:

- *GSM (Global System for Mobile communications)* desarrollado por ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*); siendo su tecnología de radio, arquitectura de red y descripciones técnicas definidas por 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), están basadas en las especificaciones: *serie TS 45*⁷, *TS 23.002*⁸ y *TS 41.101*⁹ respectivamente. Opera en el esquema de acceso TDMA, utiliza Dúplex por División de Frecuencia (FDD) y modulación GMSK¹⁰. Utiliza *cifrado*¹¹ para mantener la confidencialidad en las comunicaciones [18].

Bandas de frecuencia utilizadas en GSM:

De las bandas de frecuencia descritas en la Tabla 1.1, GSM 900 es utilizada en Europa, el ancho de banda de canal es de 200 kHz con 125 canales dúplex, la tasa de transmisión es de 270.8 kbps.

⁷ 3GPP serie TS 45: Disponible en <<http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/45-series.htm>>

⁸ 3GPP TS 23.002: Disponible en <<http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/23002.htm>>

⁹ 3GPP TS 41.101: Disponible en <<http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/41101.htm>>

¹⁰ GMSK: *Gaussian Minimum Shift Keying*

¹¹ Cifrado: En criptografía, es un método que utiliza un algoritmo con una clave, para que la información no sea comprensible. Para conocer dicha información se requiere la respectiva clave de descifrado y su algoritmo de descifrado

| Banda | Uplink | Downlink |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| GSM 900 | 890 - 915 MHz | 935 - 960 MHz |
| EGSM 900 | 880 - 915 MHz | 925 - 960 MHz |
| GSM 850 | 824 - 849 MHz | 869 - 894 MHz |
| DCS 1800 | 1710 - 1785 MHz | 1805 - 1880 MHz |
| PCS 1900 | 1850 - 1910 MHz | 1930 - 1990 MHz |

Tabla 1.1. Bandas de frecuencia utilizadas en GSM para los enlaces uplink y downlink¹²

- IS¹³-95 (conocido como *cdmaOne* o *TIA*¹⁴-*EIA*¹⁵-95) es el primer estándar CDMA propuesto por Qualcomm, utiliza *Dúplex por División de Frecuencia* (FDD). Las bandas de frecuencia usadas son, para el enlace *uplink* de 824 a 849 MHz y para el enlace *downlink* de 869 a 894 MHz. El ancho de banda de canal es de 1250 kHz y tiene una velocidad de transmisión de 9.6 kbps.

El esquema de modulación utilizado es *QPSK*¹⁶, el tipo de codificación usada es *QCELP*¹⁷. Operaba en modo dual (*AMPS/CDMA*), mejora sus capacidades con respecto al sistema *AMPS*.

La revisión IS-95A describe: control de potencia, *handoff*, conmutación de circuitos y tasa de transmisión a 14.4 kbps para datos. En la revisión IS-95B los servicios de datos incrementa en promedio a 64 kbps [20, 7, 60].

- *Digital AMPS (D-AMPS)*: IS-54 e IS-136, implementado principalmente en EE.UU. y Canadá, se basa en TDMA. Es la evolución digital del sistema analógico *AMPS* y es compatible con el mismo. Utiliza el esquema FDD, y

¹² Fuente: 3GPP TS 45.005 (*Technical Specification*), 3rd Generation Partnership Project

¹³ IS: *Interim Standard*

¹⁴ TIA: *Telecommunications Industry Association*

¹⁵ EIA: *Electronic Industries Alliance*

¹⁶ QPSK: *Quadrature Phase Shift Keying*

¹⁷ QCELP: *Qualcomm Code-Excited Linear Predictive*

modulación $\pi/4$ DQPSK¹⁸. La banda de frecuencia para UL es 824 a 849 MHz y para DL es 869 a 894 MHz, con un ancho de banda de canal de 30 kHz, y tiene una velocidad de transmisión de 48.6 kbps.

1.1.3 EVOLUCIÓN DE SEGUNDA A TERCERA GENERACIÓN

Si bien 2.5G y 2.75G no son estándares reconocidos por la UIT, representan la transición de segunda a tercera generación como son: GPRS (*General Packet Radio Service*) y EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*), respectivamente; son posteriores a GSM y pertenecen a la familia de tecnologías 3GPP.

GPRS¹⁹ fue estandarizado inicialmente por la ETSI, luego por 3GPP (*Release 97*), utiliza conmutación de paquetes, soporta tasas de datos de bajada de hasta 115 kbps, siendo típico de 40 kbps. Comparable con otra tecnología como CDMA2000 1x; los principales servicios ofertados son: SMS, Servicio de Mensajería Multimedia (MMS), *Push-to-talk sobre celular (PoC)*, aplicaciones de Internet mediante WAP (*Wireless Application Protocol*) [92].

EDGE²⁰, conocido también como *Enhanced GPRS (EGPRS)* es estandarizado por 3GPP (*Release 98*), forma parte de la familia GSM. Con respecto a la tecnología antecesora, existe un aumento en la tasa de transmisión de hasta 384 kbps, siendo típico de 144 kbps [84].

1.1.4 TERCERA GENERACIÓN (3G) Y SU DESARROLLO

IMT-2000 (Telecomunicaciones Móviles Internacionales-2000), es el estándar mundial establecido por la UIT para sistemas terrestres y satelitales de tercera generación.

¹⁸ DQPSK: *Differential Quadrature Phase Shift Keying*

¹⁹ GPRS: Servicio General de Paquetes por Radio

²⁰ EDGE: Tasas de Datos Optimizadas para la Evolución GSM

Las interfaces radioeléctricas terrenales IMT-2000 [44, 33] son:

a) *IMT-2000 CDMA Direct Spread*

“*CDMA Direct Spread*” utiliza duplexación *FDD*. Las tecnologías de acceso desarrolladas por 3GPP son:

UTRA FDD (W-CDMA²¹ *FDD*), *UMTS* (utiliza W-CDMA *FDD*), también *HSPA* y *HSPA+*²² (son la actualización de W-CDMA); y, *E-UTRA FDD* (LTE *FDD*).

b) *IMT-2000 CDMA Multi-Carrier*

“*CDMA Multi-Carrier*” utiliza duplexación *FDD* y *TDD*. Las tecnologías de acceso desarrolladas por 3GPP2 son:

cdma2000, cdma2000 1X (*Spreading Rate 1*), cdma2000 1xEV-DV (*1X Evolution - Data and Voice*), cdma2000 1xEV-DO (*1X Evolution - Data Optimized*) y UMB²³.

c) *IMT-2000 CDMA TDD (time-code)*

“*CDMA TDD*” utiliza duplexación *TDD*. Las tecnologías de acceso desarrolladas por 3GPP son:

UTRA TDD, *UMTS* (utiliza *UTRA TDD*), también *HSPA* y *HSPA+* (basados en *TDD*); y, *E-UTRA TDD* (LTE *TDD*).

d) *IMT-2000 TDMA Single-Carrier*

“*TDMA Single-Carrier*” utiliza duplexación *FDD*. La tecnología de acceso es *EDGE Evolution* (*EDGE II* o *Evolved EDGE*), sucesor de *EDGE* y estandarizado en 3GPP *Release 7*. Con características principales como: Reducción de latencias a 100 ms; por lo tanto, mejora la eficiencia

²¹ W-CDMA: *Wideband-CDMA*

²² HSPA+: HSPA evolucionado

²³ UMB: *Ultra Mobile Broadband*

espectral. También incremento del *throughput*²⁴ en 1.3 Mbps para el enlace de bajada y 653 kbps para el enlace de subida.

e) *IMT-2000 FDMA/TDMA (frequency-time)*

“*FDMA/TDMA*” utiliza duplexación *TDD*. Las tecnologías de acceso FDMA, TDMA son descritas por un conjunto de estándares ETSI. La interfaz radioeléctrica utilizada es: DECT (*Digital Enhanced Cordless Telecommunications*).

DECT utiliza tecnología FDMA/TDMA y modo dúplex TDD. Los esquemas de modulación utilizados son: GFSK, 4-PSK, 8-PSK, 16-QAM y 64-QAM. Provee tasas de datos entre 840 kbps y 5 Mbps. Opera en la banda de frecuencias de 1800 a 1900 MHz en Europa [17].

f) *IMT-2000 OFDMA TDD WMAN*

“*OFDMA TDD WMAN*” es un “*caso particular*” de *WirelessMAN-OFDMA* opera en los modos dúplex *TDD* y *FDD*, es la interfaz radioeléctrica del sistema WiMAX Móvil basado en IEEE 802.16e para las IMT-2000 [41].

En WiMAX 1.5, evolución de WiMAX Móvil, está basado en el estándar IEEE 802.16-2009, define la interfaz radioeléctrica en los modos dúplex *TDD* y *FDD*. *OFDMA TDD WMAN* engloba tanto a 802.16e como 802.16-2009.

WiMAX Móvil, si bien no cumple con todos los requisitos establecidos para las IMT-Avanzadas, es considerada tecnología pre-4G debido a que tiene grandes avances que permitirán dar el salto hacia la 4ta. Generación.

➤ Evolución de tecnologías 3GPP de tercera generación [59]:

²⁴ Throughput: Cantidad de información transferida efectivamente por unidad de tiempo en un canal de transmisión. Sus unidades están en [bps]

UMTS es el primer estándar de tercera generación de la familia de tecnologías 3GPP, opera en los modos dúplex FDD y TDD, utiliza como esquema de acceso CDMA y la velocidad de transmisión es de hasta 384 kbps (la tasa de bits máxima teórica es de 2 Mbps), en la Fig. 1.2 se representa la estructura de red UMTS.

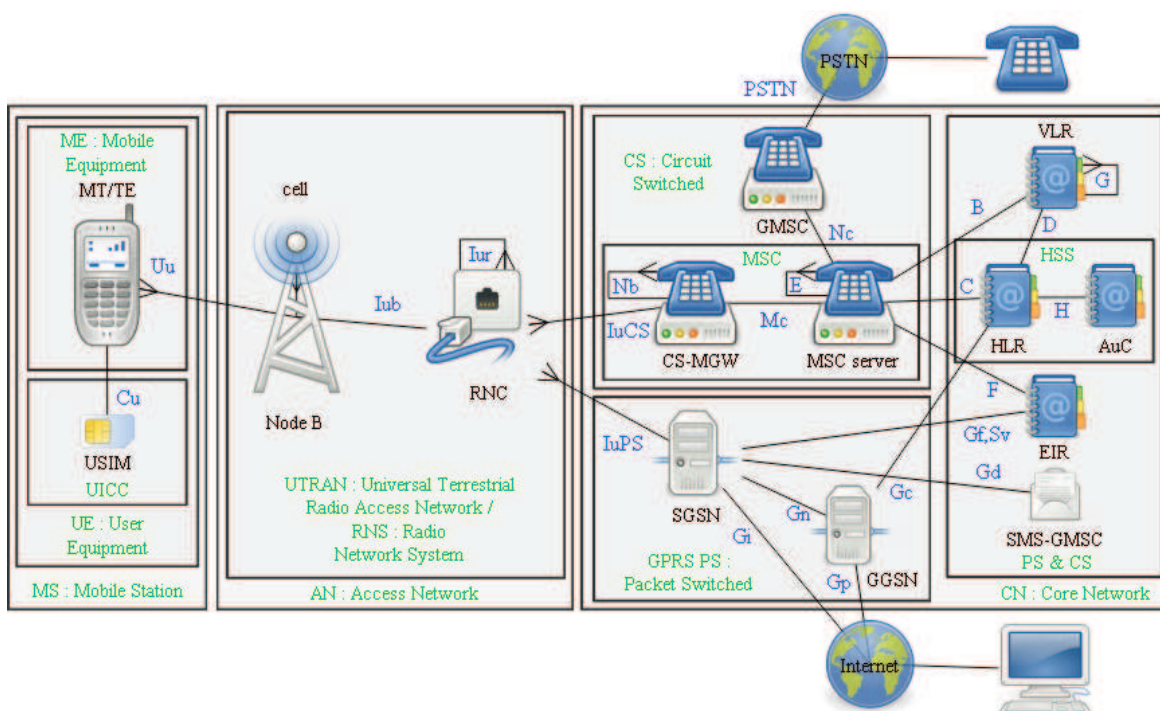


Figura 1.2. Estructura de red UMTS²⁵

Donde:

MT: *Mobile Terminal*

TE: *Terminal Equipment*

USIM: *Universal Subscriber Identity Module*

UICC: *Universal Integrated Circuit Card*

RNC: *Radio Network Controller*

PSTN: *Public Switching Telephone Network*

GMSC: *Gateway Mobile Switching Centre*

MSC: *Mobile Switching Centre*

CS-MGW: *Circuit Switched-Media Gateway*

GGSN: *Gateway GPRS Support Node*

VLR: *Visited Location Register*

²⁵ Fuente: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:UMTS_structures.svg>

HSS: *Home Subscriber Server*

HLR: *Home Location Register*

AuC: *Authentication Center*

EIR: *Equipment Identity Register*

SMS-GMSC: *SMS Gateway Mobile Switching Center*

HSDPA²⁶ es una mejora de UMTS, la modulación utilizada es 16-QAM y la tasa de transmisión es de 14.4 Mbps, utiliza *HARQ*. HSUPA²⁷ al igual que HSDPA utiliza *HARQ*, provee bajas latencias entre la estación base y la estación móvil, puede proveer una tasa de datos teórica de hasta 5.7 Mbps. HSPA es la combinación de las características de HSDPA y HSUPA, representando mejoras en *downlink* y *uplink*.

HSPA+ (*High Speed Packet Access Plus*) es la evolución de la tecnología HSPA, permite compatibilidad con sistemas antecesores hasta UMTS evolucionado. Comprende mejoras en las tecnologías como *MIMO* y utiliza modulación 64-QAM para DL y 16-QAM para UL, disminuye la latencia en la transmisión.

LTE, considerada tecnología pre-4G, permitirá migrar a la 4ta. Generación (LTE-Advanced). Opera en los modos FDD y TDD, se basa en OFDMA para el enlace *forward* y SC-FDMA para el enlace *reverse*. El ancho de banda de canal es de máximo 20 MHz, los esquemas de modulación utilizados son: QPSK, 16-QAM y 64-QAM.

➤ Evolución de tecnologías 3GPP2 de tercera generación [59, 10]:

Cdma2000 1X, es el primer estándar de tercera generación de la familia de tecnologías 3GPP2, la interfaz radioeléctrica cdma2000 es la evolución de las normas IS-95 (CDMA) pertenecientes a la segunda generación. El término "1X" hace referencia a que el sistema utiliza una portadora de 1.25 MHz. Cdma2000

²⁶ HSDPA: *High Speed Downlink Packet Access*

²⁷ HSUPA: *High Speed Uplink Packet Access*

1X tuvo como principal función proveer servicios de voz y datos a 307 kbps para DL y 153 kbps para UL con una portadora de 1.25 MHz. En lo posterior dando lugar a dos sistemas, el primero denominado “1X EV-DV” en las Revisiones C y D de cdma2000, y el segundo “1X EV-DO”.

A los sistemas 1X EV-DO se les denomina también HRPD (*High Rate Packet Data*); en 1X EV-DO Revisión 0, se brinda servicios simultáneos de voz y datos, los esquemas de modulación utilizados son 8-PSK y 16-QAM, las tasas de datos son de hasta 2.4 Mbps para DL y 153 kbps para UL.

1X EV-DO Rev. A provee tasas de datos de 3.1 Mbps para el enlace descendente y 1.8 Mbps para el enlace ascendente, adicionalmente la latencia disminuye. 1X EV-DO Rev. B utiliza el esquema de modulación 64-QAM proporcionando velocidades de transmisión de 73.5 Mbps para DL y 27 Mbps para UL. La Revisión C provee mayores tasas de datos y utiliza MIMO, la tasa máxima de datos en UL es de 129 Mbps con un ancho de banda de 20 MHz.

El sistema UMB es la evolución a los sistemas de tercera generación de 3GPP2, el cual provee mayores tasas de datos tanto para DL como UL, el ancho de banda de canal dinámico escalable es entre 1.25 y 20 MHz. La tasa de datos máxima es de 260 Mbps para el enlace descendente y 70 Mbps para el enlace ascendente; los esquemas de modulación utilizados son: QPSK, 8-PSK, 16-QAM y 64-QAM.

1.1.5 CUARTA GENERACIÓN (4G)

IMT-Advanced (International Mobile Telecommunications-Advanced), es la norma mundial para sistemas de cuarta generación establecido por la UIT. A partir del cual se proporciona acceso a una gran cantidad de servicios de telecomunicaciones, soportando aplicaciones de baja a alta movilidad y ofreciendo una mejora en la calidad de servicio [34].

Los estándares aprobados y ratificados por la UIT para las IMT-Avanzadas [39] son: *WirelessMAN-Advanced* (IEEE 802.16m-2011) y *LTE-Advanced* (LTE 3GPP

Release 10 y posteriores). Los mismos que se tratarán a mayor detalle en los Capítulos 2 y 3, respectivamente.

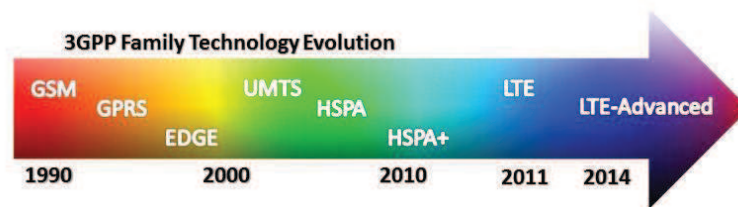


Figura 1.3. Evolución de tecnologías de la familia 3GPP²⁸

1.2 TELECOMUNICACIONES MÓVILES INTERNACIONALES-AVANZADAS (IMT-ADVANCED)

Las Telecomunicaciones Móviles Internacionales-Avanzadas (IMT-Advanced), suponen un progreso con respecto a las IMT-2000. Para lo cual, el sector de Radiocomunicaciones de la UIT (UIT-R) inició el proceso para cumplir con el objetivo de mejorar las capacidades de las IMT.

1.2.1 UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT)

A la UIT inicialmente se la denominó “Unión Telegráfica Internacional”. Se formó en la primera reunión realizada el 17 de mayo de 1865 en París, Francia. Desde 1932 adquirió el nombre de “Unión Internacional de Telecomunicaciones” con el que se le conoce hasta la actualidad [32]. En el año 1947, pasó a formar parte de la ONU (Organización de las Naciones Unidas) como organismo especializado, siendo la organización más importante con respecto a las TIC²⁹.

La UIT está formada por 3 sectores:

- Sector de Radiocomunicaciones de la UIT (UIT-R)
- Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT (UIT-T)

²⁸ Fuente: <www.4gamericas.org>

²⁹ TIC: Tecnologías de la Información y la Comunicación

- Sector de Desarrollo de las Telecomunicaciones de la UIT (UIT-D)

1.2.1.1 Sector de Radiocomunicaciones de la UIT (UIT-R) [53, 30, 54]

“La misión del Sector de Radiocomunicaciones de la UIT es, entre otras cosas, la de garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los que emplean órbitas de satélites, así como la de realizar estudios y adoptar Recomendaciones sobre las radiocomunicaciones.”³⁰

El Sector de Radiocomunicaciones de la UIT, es el ente encargado de establecer las características técnicas y procedimientos operativos del servicio inalámbrico [30]. También de la elaboración de normas denominadas “Recomendaciones UIT-R” propuestas a la gestión del espectro radioeléctrico.

El *Reglamento de Radiocomunicaciones (RR)* [30], es un conjunto de normas que conforman un “*tratado internacional*” vinculante para el control de la utilización del espectro radioeléctrico y las órbitas de satélites.

1.2.1.1.1 Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones (CMR)

Las CMR se realizan cada 3 o 4 años, en las cuales se analiza y modifica de ser necesario el *Reglamento de Radiocomunicaciones*.

La última Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (CMR-12) se llevó a cabo en Ginebra del 23 de enero al 17 de febrero de 2012.

1.2.1.1.2 Asambleas de Radiocomunicaciones (AR)

Las Asambleas de Radiocomunicaciones se llevan a cabo cada 3 o 4 años, en las cuales se realizan estudios de radiocomunicaciones. Además de aprobar y

³⁰ Tomado del portal: Sector de Radiocomunicaciones (UIT-R), Misión
<<http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=information&rlink=mission-statement&lang=es>> [54]

publicar *Recomendaciones UIT-R* y *Cuestiones*³¹ *UIT-R* realizadas por las Comisiones de Estudio de Radiocomunicaciones.

1.2.1.1.3 Comisiones de Estudio de Radiocomunicaciones

Las Comisiones de Estudio de Radiocomunicaciones son creadas por la Asamblea de Radiocomunicaciones, la cual asigna *Cuestiones* a estudiar, con el objeto de redactar proyectos de *Recomendaciones* para que sean aprobados por los Estados Miembros de la UIT.

1.2.1.1.4 Comisión de Estudio 5 - Study Group 5 (SG 5)

La Comisión de Estudio 5, se especializa en servicios terrenales. Los mismos que comprenden: Sistemas y redes de los servicios fijo, móvil, de radiodeterminación, de aficionados y de aficionados por satélite [30].

El Grupo de Trabajo 5D (GT 5D) o Working Party 5D (WP 5D) es uno de los Grupos de Trabajo de la Comisión de Estudio 5, el cual se encarga de los Sistemas IMT (Telecomunicaciones Móviles Internacionales). Principalmente de los aspectos radioeléctricos, en cuanto a las *Recomendaciones* de la componente terrenal tanto técnico como de funcionamiento.

1.2.1.2 Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT (UIT-T)

El UIT-T es el ente encargado de la estandarización de las telecomunicaciones, antes conocido como CCITT (Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico).

Entre las normas que elabora el UIT-T, es la disminución de la brecha digital, sistemas de comunicaciones de emergencia, cambio climático, NGN (Redes de próxima generación), entre otros [28].

³¹ Una *Cuestión* es un enunciado de un problema técnico, de explotación o de procedimiento, con miras, generalmente a la formulación de una Recomendación, un Manual o un Informe; de acuerdo a la UIT

1.2.1.3 Sector de Desarrollo de las Telecomunicaciones de la UIT (UIT-D)

El UIT-D [52] se formó principalmente para que exista mayor acceso a las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC). A través de la Oficina de Desarrollo de las Telecomunicaciones (BDT), interactúa con el sector privado para el desarrollo comercial, en base a las demandas de los países en vías de desarrollo.

1.2.2 TELECOMUNICACIONES MÓVILES INTERNACIONALES (IMT)



Figura 1.4. Logotipo de IMT (International Mobile Telecommunications)³²

Las Telecomunicaciones Móviles Internacionales son sistemas de banda ancha móvil, basados en *conmutación de paquetes*. El término “IMT” comprende tanto a las IMT-2000 como las IMT-Avanzadas en conjunto, conforman las componentes terrenales y de satélite. Para el estudio del presente proyecto, se realizará con respecto a la componente terrenal [50, 49].

La evolución de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales, de acuerdo con la Recomendación UIT-R M.1645 [37], engloban tanto la Red de acceso radioeléctrico (Recomendación UIT-R M.1645) como la Red Central (Recomendación UIT-T Q.1702).

³² Fuente: <<http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=information&rlink=imt-advanced&lang=en>>

El Grupo de Trabajo 5D perteneciente a la Comisión de Estudio 5, de acuerdo a la Asamblea de Radiocomunicaciones de 2007, es el ente encargado de las actividades de las IMT y del desarrollo de las IMT-Avanzadas [31].

1.3 REQUERIMIENTOS DE LAS IMT-AVANZADAS [45]

El desarrollo de las IMT-Avanzadas dio inicio con la Recomendación UIT-R M.1645³³ [37], en la cual se plantean los objetivos que han de cumplir los sistemas posteriores a las IMT-2000. Los mismos que incluyen mejoras en las capacidades como proveer una amplia variedad de servicios y aplicaciones, y que sean de alta calidad. También debe permitir el *interfuncionamiento* entre distintos sistemas de acceso radioeléctrico; y, que el dispositivo de usuario pueda ser utilizado a nivel mundial, también que los equipos de las IMT-Avanzadas soporten altas tasas de datos en baja y alta movilidad. Como siguiente paso, la visión de mercado, servicios, tecnología y espectro [31]; lo que permitirá tener las bases para el desarrollo de las IMT-Avanzadas. Una vez considerados los aspectos anteriormente mencionados, el siguiente procedimiento es la identificación de las bandas de frecuencia.

La UIT dio inicio al proceso para las IMT-Avanzadas con la *Carta Circular 5/LCCE/2* y posteriormente con sus anexos [29]. Para lo cual, realizó la invitación a las entidades correspondientes para que se presenten propuestas para las tecnologías de la interfaz radioeléctrica (RIT, por sus siglas en inglés) o conjunto de tecnologías de la interfaz radioeléctrica (SRIT, por sus siglas en inglés), y posteriormente iniciar el proceso de evaluación de los proponentes de las tecnologías [31, 36].

³³ Recomendación UIT-R M.1645: "*Marco y objetivos generales del desarrollo futuro de las IMT-2000 y de los sistemas posteriores*"

Los requerimientos de las IMT-Avanzadas son descritos en el Informe UIT-R M.2133³⁴ [45] y el Informe UIT-R M.2134³⁵ [46], los cuales comprenden:

- Funcionamiento técnico
- Servicios
- Bandas de frecuencia

La evaluación de las RIT o SRIT para IMT-Advanced, de acuerdo con el Informe UIT-R M.2135³⁶ y el Documento IMT-ADV/3³⁷ (Informe UIT-R M.2135-1), son conforme los métodos: Simulación, Analítico e Inspección.

1.3.1 FUNCIONAMIENTO TÉCNICO [46]

Los requerimientos de funcionamiento técnico de las tecnologías de la interfaz radioeléctrica o conjunto de las mismas, para las IMT-Avanzadas son detallados en el Informe UIT-R M.2134, y descritos a continuación:

- Eficiencia espectral de la celda
- Eficiencia espectral máxima
- Ancho de banda
- Eficiencia espectral de usuario en el borde de la celda
- Latencia
- Movilidad
- Tiempo de interrupción *handover*
- Capacidad VoIP

Los ambientes de prueba para las RIT (o SRIT) de acuerdo al UIT-R son [46, 47]:

a) Interiores (*Indoor*)

³⁴ Report ITU-R M.2133: “Requirements, evaluation criteria and submission templates for the development of IMT-Advanced”

³⁵ Report ITU-R M.2134: “Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s)”

³⁶ Report ITU-R M.2135: “Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced”

³⁷ Document IMT-ADV/3: “Correction of typographical errors and provision of missing texts of IMT-Advanced channel models in Report ITU-R M.2135” <<http://www.itu.int/md/R07-IMT.ADV-C-0003/en>>

Las pruebas para ambientes en *Interiores* son respecto a *celdas* pequeñas y usuarios con alto *throughput* como los ubicados en edificios, en el cual los usuarios tienen una posición fija o son peatones. El escenario se denomina: *Indoor hotspot (InH)*.

b) Microcelular (*Microcellular*)

Las pruebas para ambiente *Urbano microcelular* son respecto a *celdas* pequeñas y con alta densidad de usuarios como en centros de ciudades y áreas urbanas. Los usuarios son peatones o se encuentran en vehículos con baja rapidez. El escenario se denomina: *Urban micro-cell (UMi)*.

c) Base de cobertura urbana (*Base coverage urban*)

Las pruebas en *Base de cobertura urbana* son respecto a *celdas* grandes y cobertura continua en ambientes urbano *macro-celular*, para peatones y usuarios en vehículos con alta rapidez, las BSs por lo general están ubicadas en lo alto de los edificios y los usuarios de las MSs se encuentran en exteriores (*outdoor*). El escenario se denomina: *Urban macro-cell (UMa)*.

d) Alta rapidez (*High speed*)

Las pruebas en ambientes de *Alta rapidez* son respecto a *celdas* grandes y cobertura continua, debe soportar a usuarios en vehículos con alta velocidad en una amplia área de cobertura, o a su vez, que se encuentren en medios de transporte como trenes que viajen a una rapidez de hasta 350 km/h. El escenario se denomina: *Rural macro-cell (RMa)*.

1.3.1.1 Eficiencia espectral de la celda³⁸ (*Cell spectral efficiency*) [46]

Se define como el *throughput* de todos los usuarios, dividido por el ancho de banda de canal, dividido por el número de celdas.

Las unidades de la eficiencia espectral de la celda están expresadas en: [bps/Hz/celda].

³⁸ Celda: Es el área geográfica que una estación base proporciona cobertura, llamada también célula. Teóricamente tiene forma hexagonal

En la Tabla 1.2 se representa los requerimientos mínimos para los cuatro entornos de prueba en *downlink* y *uplink*. Para los valores descritos, la configuración de antenas asumida es de: 4×2 (DL) y 2×4 (UL).

| Entorno de prueba | <i>Downlink</i> [bps/Hz/celda] | <i>Uplink</i> [bps/Hz/celda] |
|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Interiores (InH) | 3 | 2.25 |
| Microcelular (UMi) | 2.6 | 1.80 |
| Base de cobertura urbana (UMa) | 2.2 | 1.40 |
| Alta rapidez (RMa) | 1.1 | 0.70 |

Tabla 1.2. Eficiencia espectral de la celda [46]

1.3.1.2 Eficiencia espectral máxima (*Peak spectral efficiency*) [46]

La eficiencia espectral máxima, es la mayor tasa de datos teórica normalizada por ancho de banda transmitida a una estación móvil, asumiendo que sea libre de errores.

Los requerimientos mínimos son:

- 15 [bps/Hz] para *downlink*, configuración de antenas asumida: 4×4
- 6.75 [bps/Hz] para *uplink*, configuración de antenas asumida: 2×4

1.3.1.3 Ancho de banda (*Bandwidth*) [46]

La Tecnología de la Interfaz de Radioeléctrica (*RIT*, por sus siglas en inglés) de las IMT-Avanzadas, debe soportar un ancho de banda de hasta 40 MHz por una o varias portadoras de radiofrecuencia (RF) y hasta 100 MHz mediante Agregación de Portadoras.

1.3.1.4 Eficiencia espectral de usuario en el borde de la celda (*Cell edge user spectral efficiency*) [46]

El *throughput* de usuario normalizado, se define como el *throughput* de usuario promedio (número de bits correctamente recibidos por los usuarios, dividido por el ancho de banda del canal).

En la Tabla 1.3 se representa los requerimientos mínimos para los cuatro entornos de prueba en *downlink* y *uplink*. Para los valores descritos, la configuración de antenas asumida es de: 4×2 (DL) y 2×4 (UL).

| Entorno de prueba | Downlink [bps/Hz] | Uplink [bps/Hz] |
|--------------------------------|-------------------|-----------------|
| Interiores (InH) | 0.100 | 0.070 |
| Microcelular (UMi) | 0.075 | 0.050 |
| Base de cobertura urbana (UMa) | 0.060 | 0.030 |
| Alta rapidez (RMa) | 0.040 | 0.015 |

Tabla 1.3. Eficiencia espectral de usuario en el borde de la celda [46]

1.3.1.5 Latencia [46]

1.3.1.5.1 Latencia de plano de control (*Control plane latency*)

La latencia de plano de control es el tiempo de transición entre diferentes estados de conexión. El tiempo de transición del modo *IDLE*³⁹ al modo *ACTIVO*, debe ser menor que 100 milisegundos (< 100 ms).

| Transición de estado | Latencia |
|---|----------|
| Estado <i>IDLE</i> a Estado <i>ACTIVO</i> | < 100 ms |

Tabla 1.4. Latencia de plano de control [46]

³⁹ Modo *IDLE*: Es un estado del dispositivo móvil donde la MS puede estar disponible para el tráfico de *broadcast* del enlace descendente sin necesidad de registro con una BS específica. Durante este estado, el terminal móvil está en un modo de ahorro de energía de la batería [2]

1.3.1.5.2 Latencia de plano de usuario (User plane latency)

La latencia de plano de usuario o conocida también como retardo de transporte, es el tiempo de transporte entre un paquete *SDU* (*Service Data Unit*) en la capa *IP* desde la *BS*⁴⁰ o la *MS*⁴¹ y la disponibilidad del paquete *PDU* (*Protocol Data Unit*) en la capa *IP* hacia la *MS* o la *BS*, respectivamente. En condiciones sin carga (solo *header*, sin *payload*) debe ser menor que 10 milisegundos para DL y UL.

| Enlace | Latencia |
|-----------------|----------|
| <i>Uplink</i> | < 10 ms |
| <i>Downlink</i> | < 10 ms |

Tabla 1.5. Latencia de plano de usuario [46]

1.3.1.6 Movilidad (*Mobility*) [46]

En la Tabla 1.6 se representa las clases de movilidad que han de soportar las IMT-Avanzadas para cada entorno de prueba.

| Clases de movilidad | Rapidez [km/h] | Entorno de prueba |
|------------------------|----------------|--|
| Fijo | 0 | Interiores, Microcelular, Base de cobertura urbana |
| Peatonal | > 0 a 10 | Interiores, Microcelular, Base de cobertura urbana |
| Vehicular | 10 a 120 | Microcelular, Base de cobertura urbana |
| Alta rapidez vehicular | 120 a 350 | Alta rapidez |

Tabla 1.6. Clases de movilidad [46]

⁴⁰ *BS: Base Station*

⁴¹ *MS: Mobile Station*

Las tasas de datos para el canal de tráfico, normalizado por ancho de banda en el enlace ascendente, considerando la máxima rapidez para cada clase de movilidad se indica en la Tabla 1.7, tomando en cuenta que, para el ambiente microcelular la rapidez máxima es vehicular de hasta 30 km/h [46].

| Tasas de datos del enlace del canal de tráfico | | Rapidez |
|--|-------------|----------|
| Interiores (InH) | 1 bps/Hz | 10 km/h |
| Microcelular (UMi) | 0.75 bps/Hz | 30 km/h |
| Base de cobertura urbana (UMa) | 0.55 bps/Hz | 120 km/h |
| Alta rapidez (RMa) | 0.25 bps/Hz | 350 km/h |

Tabla 1.7. Tasas de datos del enlace del canal de tráfico [46]

1.3.1.7 Tiempo de interrupción handover (handoff) [46]

El tiempo de interrupción *handover*, es la duración en que la MS (estación móvil) no puede intercambiar paquetes de *plano de usuario (User plane)* con cualquier BS (estación base).

Los sistemas IMT-Advanced facilitan un servicio continuo para los dispositivos móviles entre *celdas*, sistemas, frecuencias, y en capas altas entre subredes IP. En la Tabla 1.8 se presentan los valores del tiempo de interrupción *handover* para *Intra-frecuencia* e *Inter-frecuencia*.

| Tipo de Handover | Tiempo de interrupción [ms] |
|----------------------------------|-----------------------------|
| a) Intra-frecuencia | 27.5 |
| b) Inter-frecuencia | |
| Dentro de una banda del espectro | 40 |
| Entre bandas del espectro | 60 |

Tabla 1.8. Tiempo de interrupción handover [46]

1.3.1.8 Capacidad VoIP [46]

La capacidad Voz sobre IP es la mínima capacidad calculada para UL o DL, la misma que es dividida por el ancho de banda efectivo del enlace ascendente o descendente, respectivamente. En la Tabla 1.9 se representa los requerimientos de capacidad VoIP [46] para los cuatro entornos de prueba; se asume un *códec* de 12.2 kbps con un factor de actividad del 50%.

| Ambiente de prueba | Capacidad VoIP mín. [usuarios activos/sector/MHz] |
|--------------------------------|--|
| Interiores (InH) | 50 |
| Microcelular (UMi) | 40 |
| Base de cobertura urbana (UMa) | 40 |
| Alta rapidez (RMa) | 30 |

Tabla 1.9. Capacidad Voz sobre IP [46]

Los sistemas IMT-Advanced son proyectados para proporcionar acceso inalámbrico de banda ancha móvil *ubicuo*⁴² en *arquitectura celular*, como: macro, micro y pico *-celdas*. Además para ambientes en interiores y exteriores Sin Línea de Vista (NLOS).

1.3.2 SERVICIOS [38]

De acuerdo con el Informe UIT-R M.2133, no especifica los servicios requeridos para las IMT-Avanzadas, no obstante las tecnologías deben brindar una amplia gama de servicios, en especial el conversacional básico y con bajo retardo. Conforme la Recomendación UIT-R M.1822⁴³, los servicios a soportar las IMT-Avanzadas serán en base a requisitos que han de cumplir considerando al usuario final, como los indicados a continuación [38]:

- Conectividad sin fisuras

⁴² Ubicuo: Término utilizado para indicar “en cualquier momento y en cualquier lugar”

⁴³ Recomendación UIT-R M.1822: “Marco para los servicios soportados por las IMT”

- Seguridad
- Establecimiento de prioridades
- Ubicación
- Radiodifusión/multidistribución
- Presencia
- Usabilidad

Los servicios que han de soportar las IMT son en base a parámetros y clasificación. Los parámetros de los servicios de telecomunicaciones tienen su enfoque en el usuario final, por lo que la calidad en las comunicaciones es uno de los aspectos a considerar, especialmente en la transmisión de la información, también a nivel de conexión se debe tomar en cuenta la latencia. Otro parámetro es el grado de asimetría, debido a que tanto en aplicaciones en DL como en UL se requiere de óptimas tasas de transferencia como por ejemplo para videoconferencia o subir ficheros; y, proporcionar servicios tanto en baja como en alta movilidad [38].

En la Tabla 1.10 se muestra las clases de servicios de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales-Avanzadas conforme las experiencias de usuario.

| De acuerdo al usuario | Clases de servicios |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| Conversacional | Conversacional básica |
| | Conversacional enriquecida |
| | Conversacional con escaso retardo |
| Interactiva | Interactiva con gran retardo |
| | Interactiva con escaso retardo |
| Transmisión secuencial | Transmisión secuencial en directo |
| | Transmisión secuencial diferida |
| Funcionamiento interno | Funcionamiento interno |

Fuente: Recomendación UIT-R M.1822

Tabla 1.10. Clasificación de servicios de las IMT

1.3.3 BANDAS DE FRECUENCIA DE LAS IMT [40]

Las bandas de frecuencia para la componente terrestre de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales mostradas en las Tablas 1.11 a 1.16 son con base en la Recomendación UIT-R M.1036-4, y permitirán el despliegue evolutivo de los sistemas IMT.

- En la Tabla 1.11 se muestra la disposición de frecuencias en la banda de 450 - 470 MHz; en el arreglo D8 con el rango de frecuencias de 450-470 MHz es asignado para TDD al igual que el rango de 457.5-462.5 MHz.

| Orden de frecuencias | Arreglo FDD | | | Arreglo TDD [MHz] |
|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------|
| | Transmisión MS [MHz] | Separación dúplex [MHz] | Transmisión BS [MHz] | |
| D1 | 450.000-454.800 | 10 | 460.000-464.800 | - |
| D2 | 451.325-455.725 | 10 | 461.325-465.725 | - |
| D3 | 452.000-456.475 | 10 | 462.000-466.475 | - |
| D4 | 452.500-457.475 | 10 | 462.500-467.475 | - |
| D5 | 453.000-457.500 | 10 | 463.000-467.500 | - |
| D6 | 455.250-459.975 | 10 | 465.250-469.975 | - |
| D7 | 450.000-457.500 | 12.5 | 462.500-470.000 | - |
| D8 | | | | 450.000-470.000 |
| D9 | 450.000-455.000 | 15 | 465.000-470.000 | 457.500-462.500 |
| D10 | 451.000-458.000 | 10 | 461.000-468.000 | - |

Tabla 1.11. Disposición de frecuencias en la banda de 450 - 470 MHz [40]

- En la Tabla 1.12 se muestra la disposición de frecuencias en la banda de 698 - 960 MHz; para el arreglo A3 en modo FDD la dirección dúplex no es en el sentido convencional, lo que implica que la estación móvil transmite en bandas altas y la estación base transmite en bandas bajas, permitiendo tener

condiciones favorables para la prestación de servicios de difusión. En el arreglo A4 se puede emplear las bandas en FDD o TDD, también se podría utilizar en combinación TDD y FDD con separación dúplex fija. El arreglo A6 es utilizado para TDD [40].

| Orden de frecuencias | Arreglo FDD | | | Arreglo TDD [MHz] |
|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------|
| | Transmisión MS [MHz] | Separación dúplex [MHz] | Transmisión BS [MHz] | |
| A1 | 824-849 | 45 | 869-894 | - |
| A2 | 880-915 | 45 | 925-960 | - |
| A3 | 832-862 | 41 | 791-821 | - |
| A4 | 698-716 776-793 | 30 30 | 728-746 746-763 | 716-728 |
| A5 | 703-748 | 55 | 758-803 | - |
| A6 | | | | 698-806 |

Tabla 1.12. Disposición de frecuencias en la banda de 698 - 960 MHz [40]

- En la Tabla 1.13 se muestra la disposición de frecuencias en la banda de 1710 - 2200 MHz, hace referencia a las bandas 1710-2025 MHz y 2110-2200 MHz en conjunto (sin considerar las frecuencias entre 2025 y 2110 MHz). Los arreglos básicos de frecuencia B1, B2 y B3 mediante combinaciones, dan lugar a los arreglos recomendados en B4 y B5 que a su vez permitirán un uso eficaz del espectro [40].

| Orden de frecuencias | Arreglo FDD | | | Arreglo TDD [MHz] |
|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|
| | Transmisión MS [MHz] | Separación dúplex [MHz] | Transmisión BS [MHz] | |
| B1 | 1920-1980 | 190 | 2110-2170 | 1880-1920 2010-2025 |
| B2 | 1710-1785 | 95 | 1805-1880 | - |
| B3 | 1850-1910 | 80 | 1930-1990 | 1910-1930 |

Tabla 1.13. Disposición de frecuencias en la banda de 1710 - 2200 MHz (*continúa*)

| Orden de frecuencias | Arreglo FDD | | | Arreglo TDD [MHz] |
|--|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| | Transmisión MS [MHz] | Separación dúplex [MHz] | Transmisión BS [MHz] | |
| B4 (armonizado con B1 y B2) | 1710-1785 1920-1980 | 95 190 | 1805-1880 2110-2170 | 1880-1920 2010-2025 |
| B5 (armonizado con B3 y segmentos de B1 y B2) | 1850-1910 1710-1770 | 80 400 | 1930-1990 2110-2170 | 1910-1930 |

Tabla 1.13. Disposición de frecuencias en la banda de 1710 - 2200 MHz [40]

- La disposición de frecuencias en la banda de 2300 - 2400 MHz es presentada en la Tabla 1.14, el arreglo E1 es asignado para TDD. De acuerdo a la revisión de la Resolución 223 de la CMR-12 [42], invita al UIT-R a que estudie las consecuencias de compartición con otros servicios y aplicaciones, también a elaborar disposiciones de frecuencias armonizadas para el funcionamiento del componente terrenal de la banda en mención, tomando en cuenta los resultados de los estudios de compartición.

| Orden de frecuencias | |
|----------------------|-----------------------|
| E1 | 2300 - 2400 [MHz] TDD |

Tabla 1.14. Disposición de frecuencias en la banda de 2300 - 2400 MHz [40]

- La disposición de frecuencias en la banda de 2500 - 2690 MHz es presentada en la Tabla 1.15, el rango de frecuencias 2570-2620 MHz en el arreglo C1 es asignado para TDD, y en el arreglo C2 es utilizado para FDD DL externo. En

C3 se puede utilizar la banda 2500-2690 MHz para FDD o TDD, también se podría utilizar en combinación TDD y FDD con separación dúplex fija [40].

| Orden de frecuencias | Arreglo FDD | | | Arreglo TDD [MHz] |
|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------|
| | Transmisión MS [MHz] | Separación dúplex [MHz] | Transmisión BS [MHz] | |
| C1 | 2500-2570 | 120 | 2620-2690 | 2570-2620 TDD |
| C2 | 2500-2570 | 120 | 2620-2690 | 2570-2620 FDD DL externo |
| C3 | FDD/TDD Flexible | | | |

Tabla 1.15. Disposición de frecuencias en la banda de 2500 - 2690 MHz [40]

- En la Tabla 1.16 se muestra la disposición de frecuencias en la banda de 3400 - 3600 MHz, el arreglo F1 es asignado para TDD y F2 para FDD.

| Orden de frecuencias | Arreglo FDD | | | Arreglo TDD [MHz] |
|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------|
| | Transmisión MS [MHz] | Separación dúplex [MHz] | Transmisión BS [MHz] | |
| F1 | | | | 3400-3600 |
| F2 | 3410-3490 | 100 | 3510-3590 | - |

Tabla 1.16. Disposición de frecuencias en la banda de 3400 - 3600 MHz [40]

1.3.3.1 Bandas de Frecuencia asignadas para las IMT en el Ecuador [11]

En la Tabla 1.17 se presentan las bandas de frecuencia asignadas para las IMT para los servicios fijo y móvil en el Ecuador de acuerdo con el Plan Nacional de Frecuencias 2012.

| Bandas de frecuencia IMT en Ecuador |
|--|
| 698 - 806 MHz |
| 824 - 849 MHz |
| 869 - 894 MHz |
| 1710 - 2025 MHz |
| 2110 - 2200 MHz |
| 2500 - 2690 MHz |

Tabla 1.17. Bandas de frecuencia asignadas para las IMT en el Ecuador [11]

1.3.4 BANDAS DE FRECUENCIA DE LAS 3 OPERADORAS DE TELEFONÍA MÓVIL CELULAR EN EL ECUADOR

➤ **CONECEL S.A. (CLARO)**

La concesión de bandas de frecuencia a CONECEL S.A. son en los rangos de frecuencia de la Banda A: 824 a 835 MHz, 845 a 846.5 MHz, 869 a 880 MHz, 890 a 891.5 MHz.⁴⁴ Y en la banda de 1900 MHz [6] (sub-banda E-E'): 1885 a 1890 MHz y 1965 a 1970 MHz.⁴⁵

➤ **OTECEL S.A. (MOVISTAR)**

La concesión de bandas de frecuencia a OTECEL S.A. son en los rangos de frecuencia de la Banda B: 835 a 845 MHz, 846.5 a 849 MHz, 880 a 890 MHz y 891.5 a 894 MHz.⁴⁶ Y en la banda de 1900 MHz (sub-banda D-D'): 1865 a 1870 MHz y 1945 a 1950 MHz.

⁴⁴ Fuente: Ing. Hugo Carrión Robalino, Revista SIDEN, Telefonía Móvil Celular. A Propósito de la Renovación de los Contratos de los Servicios de Telefonía Móvil Celular (STMC)

⁴⁵ Fuente: Resolución 496-21-CONATEL-2006

⁴⁶ Fuente: Reglamento para el servicio de telefonía móvil celular. Resolución No. 421-27-CONATEL-98

➤ CNT E.P.

La concesión de bandas de frecuencia a CNT E.P. (antes a TELECSA S.A.) son en los rangos de frecuencia de la Banda C: 1895 a 1910 MHz y 1975 a 1990 MHz; y, en la sub-banda F-F': 1890 a 1895 MHz y 1970 a 1975 MHz.⁴⁷

Para el despliegue de LTE, CNT E.P. realizó las solicitudes pertinentes a la Secretaría Nacional de Telecomunicaciones, mediante los oficios 20121228 y 20121265 para la adjudicación de frecuencias dentro de la banda de 700 MHz y de AWS, respectivamente.

De acuerdo con el Art. 2 de la RESOLUCIÓN TEL-804-29-CONATEL-2012, se resuelve: *"Adoptar el esquema de segmentación o arreglo B5 para la banda de AWS 1700/2100 MHz y el esquema de segmentación C1 para la banda de 2.5 GHz, recomendados por la UIT."* [12].

Conforme el Art. 4, se resuelve: *"Autorizar a la empresa pública CNT E.P. en la banda de 700 MHz los bloques G - G', H - H' e I - I' correspondientes a los rangos 733 - 748 MHz (UP LINK) y 788 - 803 MHz (DOWN LINK) a nivel nacional, [...]"* [12].

Y de acuerdo con el Art. 5, resuelve: *"Asignar y autorizar a la empresa pública CNT E.P. en la banda de AWS 1700/2100 MHz los bloques A - A', B - B', C - C' y D - D' correspondientes a los rangos 1710 - 1730 MHz (UP LINK) y 2110 - 2130 MHz (DOWN LINK) a nivel nacional, [...]"* [12].

Las asignaciones son realizadas conforme a la canalización adoptada en el Art. 3 de la misma Resolución.

⁴⁷ Fuente: Resolución TEL-678-24-CONATEL-2012

1.3.5 TECNOLOGÍAS DE TRANSMISIÓN POR RADIOFRECUENCIA

1.3.5.1 Métodos de acceso múltiple [2, 13, 27]

Los primeros esquemas de acceso múltiple utilizados en telefonía móvil se basaron en tiempo, frecuencia, código, y su evolución en las últimas tecnologías a OFDMA.

- *TDMA* (Acceso Múltiple por División de Frecuencia)

En TDMA la frecuencia es dividida en *slots* de tiempo mejorando la capacidad espectral, en la cual un usuario puede acceder completamente al canal durante un período, el mismo que puede ser usado por otros usuarios en diferentes horarios. TDMA es utilizado ampliamente en sistemas móviles celulares de segunda generación como IS-54, IS-136 en EE.UU., y también GSM en Europa.

- *FDMA* (Acceso Múltiple por División de Frecuencia)

FDMA es un método de acceso, en el cual se divide el ancho de banda del canal en rangos de frecuencia (subdivisiones). Cada subdivisión es utilizada para canal de voz. Utilizado en comunicaciones móviles de primera y segunda generación.

- *CDMA* (Acceso Múltiple por División de Código)

CDMA es un método de acceso al canal que utiliza tecnología de espectro ensanchado (*spread spectrum*), permitiendo a varios usuarios ocupar el mismo ancho de banda al mismo tiempo.

- *OFDMA* (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal) [2]

OFDMA es un esquema de acceso múltiple (variante de OFDM), en el cual se asignan sub-portadoras a varios usuarios, permite obtener mayor eficiencia espectral y disminución a interferencias [19]. Como se muestra en la Fig. 1.5 las sub-portadoras están divididas en grupos, a cada grupo se denomina bloque de recursos. A su vez los grupos de bloques de recursos representan la subcanalización.

En el enlace descendente se asigna a varios usuarios un bloque de recursos, y en el enlace ascendente se asigna uno o más bloques de recursos a cada usuario.

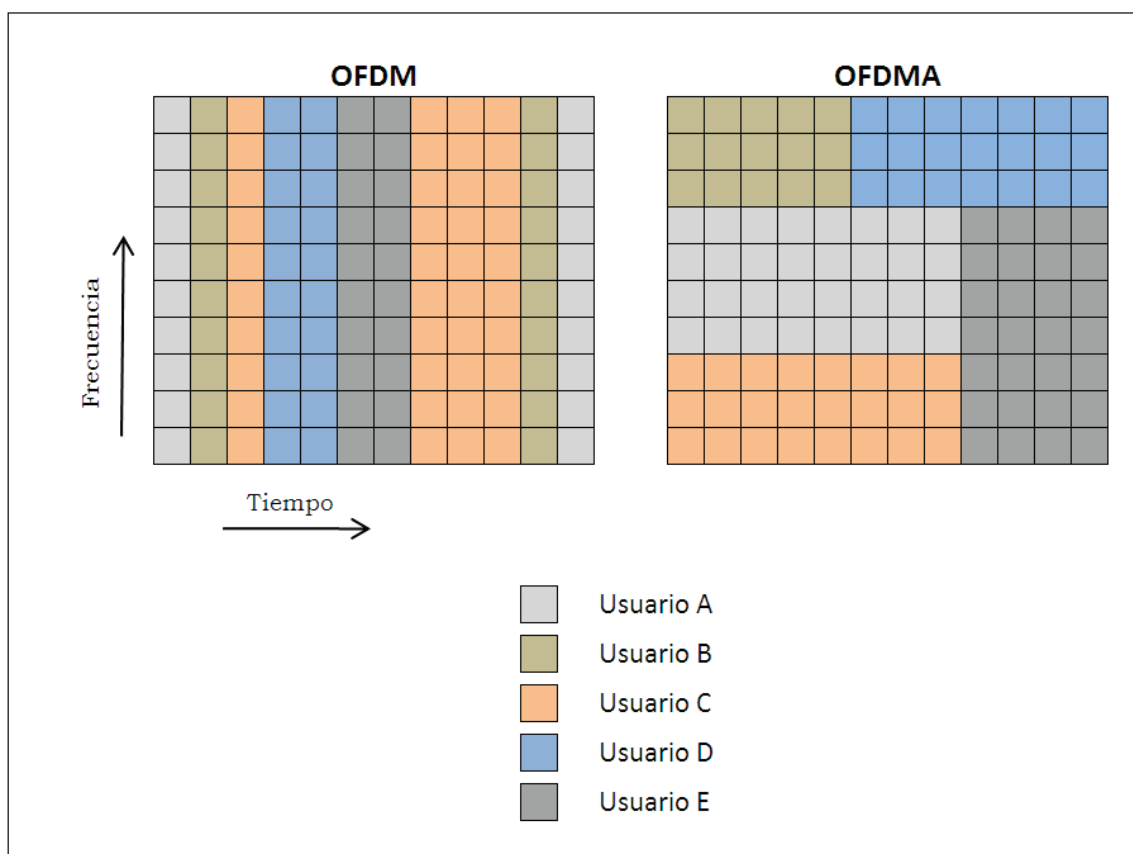


Figura 1.5. Asignación de recursos en OFDM y OFDMA⁴⁸

En la Fig. 1.6 se muestra la estructura OFDMA, donde:

- *Data Sub-carriers:* Son sub-portadoras para transmisión de datos

⁴⁸ Gráfico realizado por el autor con base en [2]

- *Pilot Sub-carriers*: Son sub-portadoras para sincronización
- *Sub-portadoras nulas*: Son sub-portadoras que no transmiten, usadas para *bandas de guarda* y *DC*

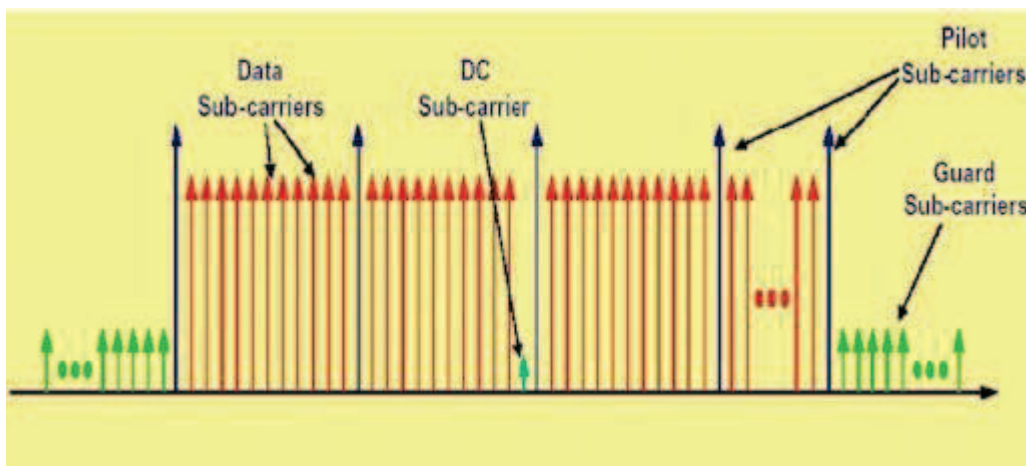


Figura 1.6. Estructura OFDMA⁴⁹

1.3.5.2 Métodos Dúplex [2]

Los esquemas *dúplex* que han de soportar las IMT-Avanzadas son descritos a continuación, y representados en la Fig. 1.7.

- TDD (*Dúplex* por división de tiempo)

En el esquema dúplex TDD, las transmisiones del enlace ascendente y descendente se producen en diferentes tiempos compartiendo la misma frecuencia.

- FDD (*Dúplex* por división de frecuencia)

En el esquema dúplex FDD, las transmisiones del enlace ascendente y descendente se producen simultáneamente en frecuencias diferentes, siendo amplia su separación.

⁴⁹ Fuente: <http://www.oas.org/en/citel/infocitel/2009/septiembre/wimax_i.asp>

- H-FDD (*Half-duplex FDD*)

H-FDD es un esquema dúplex, en el cual las transmisiones del enlace ascendente y del enlace descendente utilizan frecuencias diferentes, y no se producen al mismo tiempo.

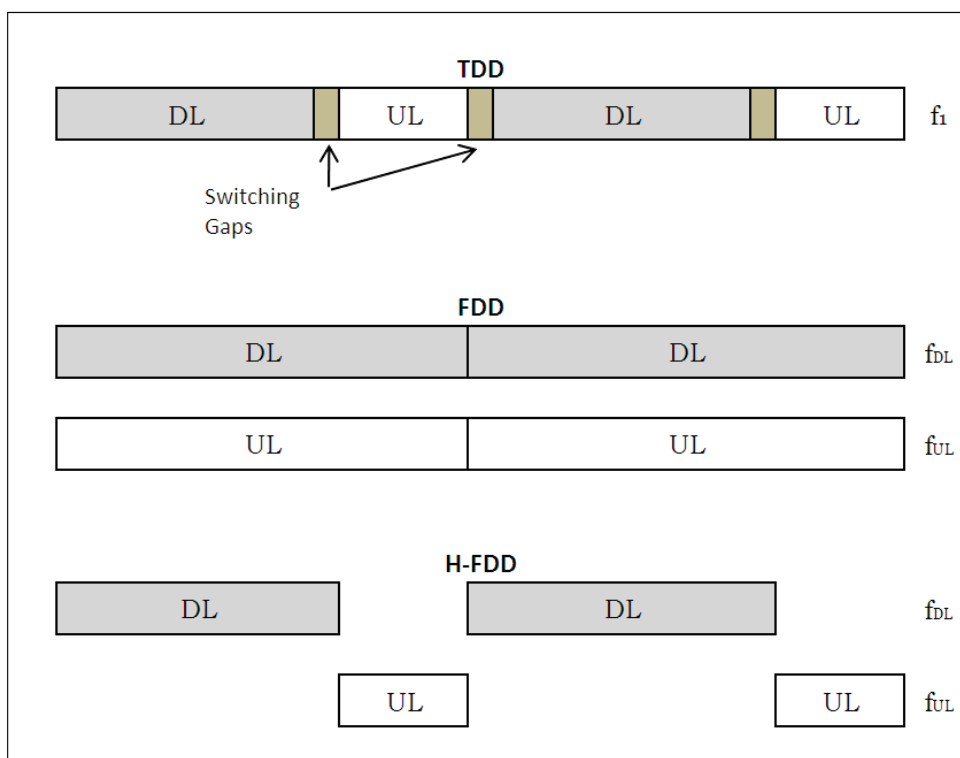


Figura 1.7. Ilustración de los métodos dúplex⁵⁰

1.3.5.3 Control de errores

La detección y corrección de errores, son técnicas que permiten la entrega confiable de datos en canales de comunicación.

- ✓ *Automatic Repeat Request (ARQ)*

ARQ es un método de control de errores mediante "acuses de recibo" y "tiempos de espera". El receptor utiliza código de detección de errores,

⁵⁰ Gráfico realizado por el autor con base en [2]

normalmente CRC⁵¹ (Comprobación de Redundancia Cíclica); los acuses de recibo positivos (ACK⁵²) y acuses de recibo negativos (NAK⁵³), son mensajes enviados del receptor al transmisor para indicar que los paquetes de datos recibidos son correctos o incorrectos, respectivamente; si el receptor detecta el error, descarta el paquete y envía acuse de recibo negativo para su retransmisión.

El tiempo de espera, es el lapso predeterminado en que el receptor envía los acuses de recibo (positivos y negativos). El transmisor en este tiempo, sí recibe notificación, retransmite el paquete nuevamente hasta recibir la confirmación [2].

✓ *Forward Error Correction (FEC)*

FEC es un mecanismo de control de errores, en recepción mediante código de detección y corrección de errores, se obtiene el mensaje original transmitido por la fuente.

✓ *Hybrid ARQ (HARQ)*

HARQ es una combinación de FEC y ARQ, el número de retransmisiones se reduce frente a ARQ e incrementa información redundante, utiliza FEC para control de errores en el receptor.

1.3.5.4 Técnicas avanzadas de antena (*MIMO, Multiple-Input Multiple-Output*) [90]

MIMO es la capacidad de implementar múltiples antenas para incrementar la tasa de transmisión. Para lo cual en un mismo enlace, sea *uplink* o *downlink*, el arreglo de antenas es: $N \times M$, como se representa en la Fig. 1.8.

Donde: N, es el número de antenas transmisoras

M, es el número de antenas receptoras

⁵¹ CRC: *Cyclic Redundancy Check*

⁵² ACK: *Acknowledgment*

⁵³ NAK: *Negative Acknowledgment*

Los sistemas IMT-Advanced soportarán técnicas avanzadas de antena (múltiples-entradas múltiples-salidas); lo que supone un incremento en la eficiencia espectral.

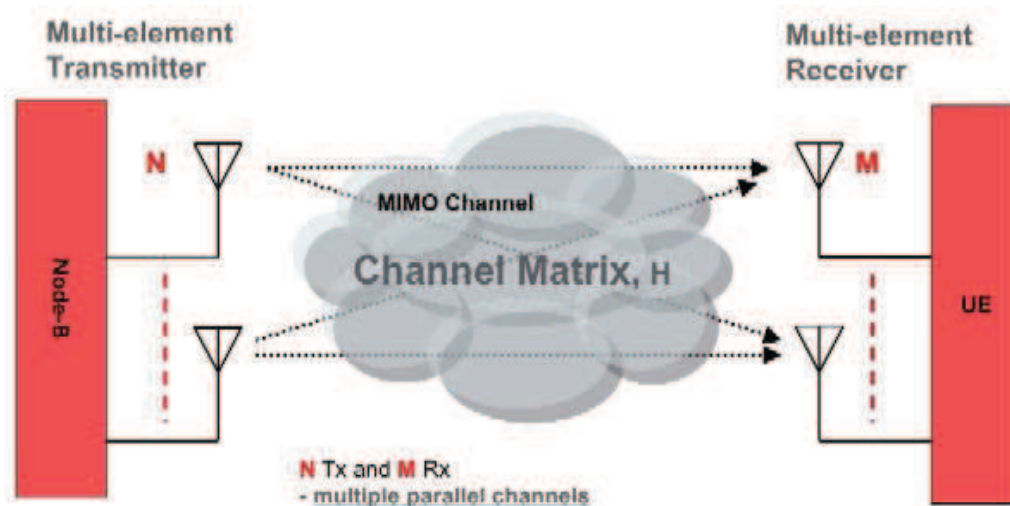


Figura 1.8. Esquema MIMO (Multiple Input Multiple Output)⁵⁴

Los requerimientos mínimos de configuración de antenas para IMT-Advanced son:

Para la estación base (BS), mínimo 2 antenas transmisoras y 2 receptoras.

Para la estación móvil (MS), mínimo 1 antena transmisora y 2 receptoras.

Dando lugar a una configuración de antenas mínima:

- 2×2 para *downlink*
- 1×2 para *uplink*

⁵⁴ Fuente: <http://connectedplanetonline.com/wireless/technology/How_MIMO%20works.jpg>

CAPÍTULO 2

ESTUDIO DEL SISTEMA WIRELESS MAN-ADVANCED (IEEE 802.16M) CON SUS RESPECTIVAS TECNOLOGÍAS

2. ESTUDIO DEL SISTEMA WIRELESS MAN-ADVANCED (IEEE 802.16M) CON SUS RESPECTIVAS TECNOLOGÍAS

2.1 INTRODUCCIÓN

La Recomendación UIT-R M.2012 [39], especifica las interfaces radioeléctricas terrenales de las IMT-Avanzadas desarrolladas por la UIT, en cooperación con los *Proponentes de las Especificaciones básicas globales* (GCS¹, por sus siglas en inglés) y las *Organizaciones de Transposición*.

Conforme el Anexo 2 de la Recomendación UIT-R M.2012 “Especificación de la tecnología de la interfaz radioeléctrica *WirelessMAN-Advanced*²”, el *Proponente de las Especificaciones básicas globales* es: IEEE³; y, las *Organizaciones de Transposición* son: IEEE, ARIB⁴, TTA⁵ y WiMAX⁶ Forum.

2.2 GRUPO DE TRABAJO IEEE 802.16 [25]

El *Grupo de Trabajo* IEEE 802.16 desarrolla estándares para redes inalámbricas de área metropolitana “*WirelessMAN*” referente a los sistemas de acceso de banda ancha, sus actividades empezaron en 1998.

Las especificaciones se refieren básicamente a la capa física, sub-capas MAC, calidad de servicio (QoS) de la interfaz aire, etc.

¹ GCS: *Global Core Specifications*

² *WirelessMAN-Advanced: Redes Inalámbricas de Área Metropolitana Avanzadas*

³ IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos)

⁴ ARIB: *Association of Radio Industries and Businesses*

⁵ TTA: *Telecommunications Technology Association*

⁶ WiMAX: *Worldwide Interoperability for Microwave Access*

Los estándares IEEE 802.16 se desarrollaron inicialmente con tecnologías inalámbricas fijas con línea de vista (LOS⁷), pasando a tecnologías inalámbricas móviles sin línea de vista (NLOS⁸) [2].



Figura 2.1. Logotipo de IEEE 802.16⁹

2.2.1 ESTÁNDARES IEEE 802.16

El Estándar IEEE 802.16 es desarrollado por el *Grupo de Trabajo IEEE 802.16*. La norma, define la interfaz aire para los sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha, para redes de área metropolitana y redes de área local [39].

Las primeras versiones del Estándar IEEE 802.16 (enmiendas: *a* y *d*) eran especificaciones para acceso inalámbrico fijo. A partir de IEEE 802.16e, incluye nuevas funcionalidades y mejoras como la calidad de servicio (QoS), movilidad y seguridad [16].

- *Estándar IEEE 802.16*

Es la primera versión de la Norma de interfaz aire con línea de vista (LOS) y el rango de frecuencias utilizado es entre 10 y 66 GHz.

⁷ LOS (*Line of Sight*): Propagación de la señal de mayor energía del transmisor que viaja en línea directa al receptor

⁸ NLOS (*Non-Line of Sight*): Propagación de la señal del transmisor que no viaja de forma directa al receptor, sino con reflexiones y refracciones

⁹ Fuente: <<http://www.ieee802.org/16/>>

- *Estándar IEEE 802.16a*

Es la versión de acceso inalámbrico fijo sin línea de vista (NLOS) en frecuencias menores a 11 GHz.

- *Estándar IEEE 802.16d (IEEE Std 802.16-2004)*

Especifica la interfaz aire para acceso inalámbrico fijo en el rango de frecuencias entre 2 y 66 GHz.

- *Estándar IEEE 802.16e-2005*

Se incluyen mejoras a nivel de capa física y MAC, es la versión que se basa WiMAX Móvil *Release 1.0*; soporta *movilidad*, esquemas de múltiples antenas y OFDMA escalable.

- *Estándar IEEE 802.16-2009*

Esta versión especifica el interfaz aire para sistemas de acceso de banda ancha fijo y móvil, permite la prestación de múltiples servicios, e incluye mejoras en la capa física (PHY) y control de acceso al medio (MAC).

2.2.1.1 Estándar IEEE 802.16m

El Estándar IEEE 802.16m-2011, es la enmienda al Estándar IEEE 802.16-2009. Define la “*Norma IEEE para las redes de área metropolitana y local - Parte 16: Interfaz aérea para los sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha - Enmienda 3: interfaz aérea avanzada*” [24].

WirelessMAN-Advanced es la interfaz radioeléctrica que cumple con los requerimientos de las IMT-Avanzadas del UIT-R, se basa en la especificación *WirelessMAN-OFDMA* de la Norma IEEE 802.16.

2.3 WIMAX FORUM [78]

WiMAX Forum es una organización que certifica y fomenta la *compatibilidad* e *interoperabilidad* de productos de banda ancha inalámbrica, basados en el Estándar IEEE 802.16 (con sus enmiendas y revisiones), siendo su objetivo el desarrollo de tecnologías WiMAX a escala mundial. Los productos que cumplan con las pruebas reciben la nominación de “*WiMAX Forum Certified*” [79].

WiMAX Forum [16], especifica los estándares de red WiMAX referente a la arquitectura de red extremo-a-extremo y definiciones al sistema de interfaz aire.



Figura 2.2. Logotipo de WiMAX Forum¹⁰

El *Grupo de Trabajo IEEE 802.16* y *WiMAX Forum*, definen sistemas extremo-a-extremo para una red WiMAX Móvil.

2.3.1 INTRODUCCIÓN A WIMAX

WiMAX (Interoperabilidad mundial para acceso por microondas) es una tecnología de acceso de banda ancha inalámbrica (BWA¹¹, por sus siglas en inglés), basada en los Estándares de la familia IEEE 802.16. Utiliza multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), soporta aplicaciones inalámbricas móviles, nómadas y fijas. Opera en bandas de frecuencia licenciadas y no licenciadas.

2.3.2 TOPOLOGÍAS DE RED

Las topologías soportadas por WiMAX son: Punto-a-Punto, Punto-a-Multipunto y Malla. En la Fig. 2.3, se presenta un ejemplo del esquema WiMAX.

¹⁰ Fuente: <<http://www.wimaxforum.org/>>

¹¹ BWA: *Broadband Wireless Access*

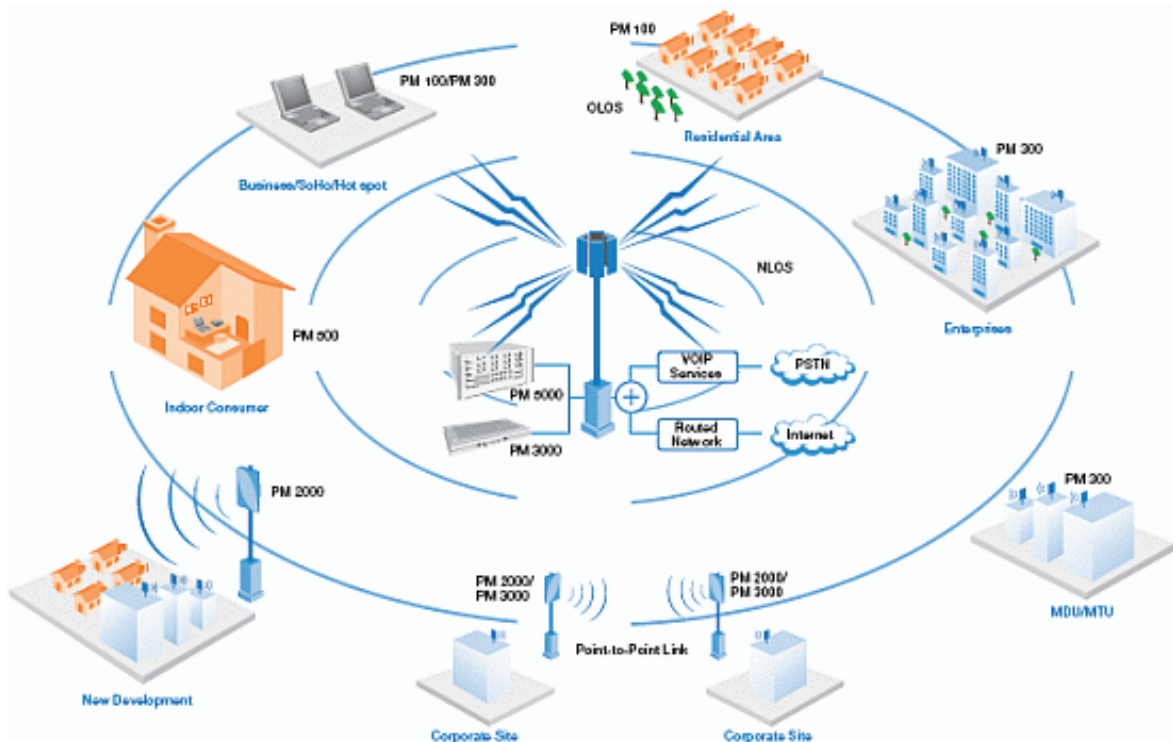


Figura 2.3. Esquema WiMAX¹²

2.3.2.1 Punto-a-Punto (PTP)¹³

En la topología Punto a Punto (PTP) la comunicación se realiza directamente entre dos dispositivos. Las estaciones base se pueden comunicar entre sí utilizando microondas, o a su vez la estación base se puede comunicar directamente con la estación suscriptor.

2.3.2.2 Punto-a-Multipunto (PMP)¹⁴

En la topología Punto a MultiPunto (PMP), la comunicación se realiza entre la estación base central y varias estaciones suscriptoras para proveer acceso de banda ancha de última milla, conexión entre distintos sitios y conectividad de

¹² Fuente: <<http://wikitel.info/wiki/WiMAX>>

¹³ PTP: *Point-To-Point*

¹⁴ PMP: *Point-to-MultiPoint*

*backhaul*¹⁵ inalámbrico entre diferentes puntos. Puede operar con línea de vista (LOS) o sin línea de vista (NLOS) [65].

2.3.2.3 Malla (*Mesh*)

Las redes *mesh* son una solución para el despliegue de una red, a través de una BS se puede cubrir una amplia área geográfica por medio de estaciones suscriptoras interconectadas entre sí por nodos, incrementando su cobertura.

2.3.3 WIMAX MÓVIL [2, 35]

WiMAX 1.0, se basa en el Estándar IEEE 802.16e-2005. La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT celebrada en el 2007 (AR-07) incluyó a la tecnología WiMAX, como la sexta interfaz radioeléctrica terrenal IMT-2000 "*IMT-2000 OFDMA TDD WMAN*" [35].

WirelessMAN-OFDMA, especifica la interfaz radioeléctrica interoperable (*OFDMA TDD WMAN*) de la capa física de la Norma IEEE 802.16 para las Telecomunicaciones móviles internacionales-2000. La capa física de WiMAX 1.0 [2] se basa en OFDMA, los anchos de banda de canal soportados son: 5, 7, 8.75 y 10 MHz en las bandas licenciadas 2.3, 2.5, 3.3 y 3.5 GHz; el esquema de duplexación utilizado es TDD, la trama tiene una longitud de 5 ms, utiliza tecnología *MIMO* y soporta VoIP.

WiMAX 1.5, evolución de WiMAX 1.0, se basa en el Estándar IEEE 802.16-2009, utiliza duplexación TDD y FDD. En la Fig. 2.4 se muestra el progreso de WiMAX Móvil desde su primera versión hasta la segunda, el cual consiste tanto a nivel de la interfaz aire, como de red del sistema.

Los esquemas de modulación utilizados son:

- Modulación en DL: QPSK, 16-QAM, 64-QAM
- Modulación en UL: QPSK, 16-QAM

¹⁵ *Backhaul*: Enlace entre la red central o red *backbone* y subredes de borde

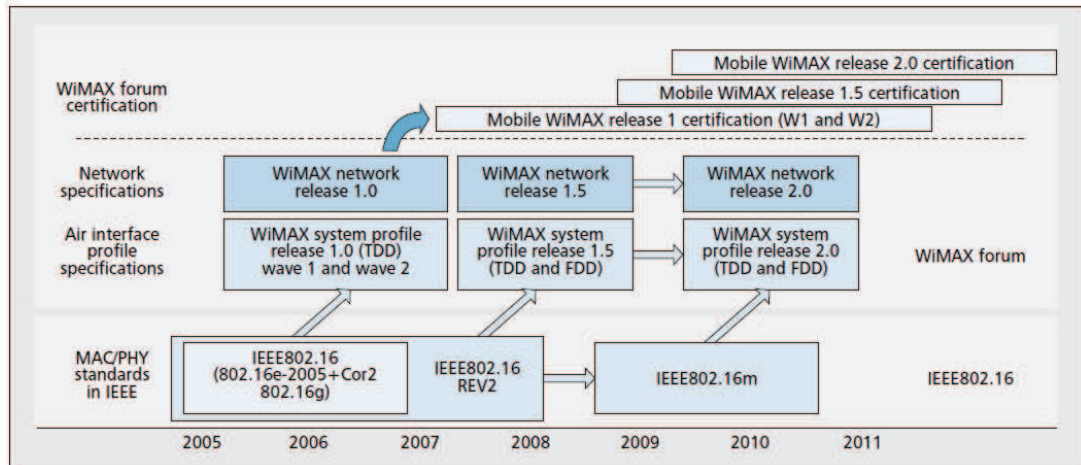


Figura 2.4. Evolución de la tecnología WiMAX Móvil [15]

2.4 WIMAX 2.0

WiMAX 2 es el sistema extremo-a-extremo desarrollado por *WiMAX Forum*, se basa en la especificación de la interfaz radioeléctrica *WirelessMAN-Advanced* [39]. El sistema mejora en sus capacidades y permite la compatibilidad con versiones predecesoras.

2.4.1 MODELO DE REFERENCIA DE RED [2, 81]

El *Grupo de Trabajo de Red* de *WiMAX Forum* (NWG) [8] establece las especificaciones de red para sistemas WiMAX fijos, nómadas, portátiles y móviles. La arquitectura de red WiMAX para sistemas móviles está basada totalmente en IP (*all-IP*) y utiliza *conmutación de paquetes*.

La Arquitectura de Red WiMAX, es representada *lógicamente* por el Modelo de Referencia de Red, formado básicamente por las entidades:

- Estación Móvil Avanzada (AMS¹⁶)
- Red de Servicio de Acceso (ASN¹⁷)
- Red de Servicio de Conectividad (CSN¹⁸)

Y por los Puntos de Referencia, interfaces R1-R6 y R8.

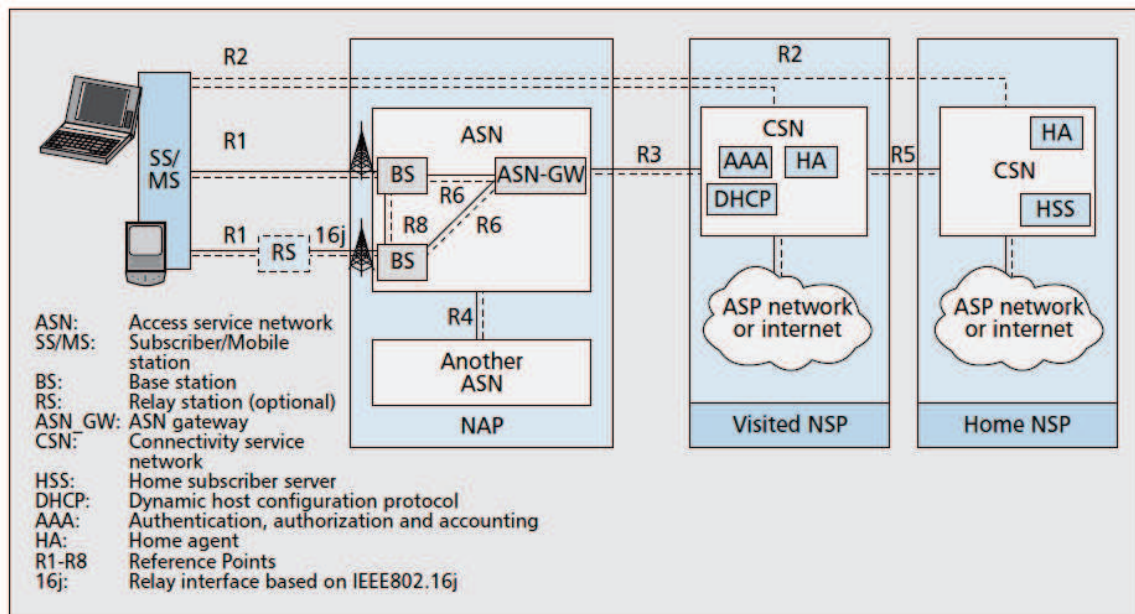


Figura 2.5. Modelo de referencia de red WiMAX [15]

2.4.1.1 Estación Móvil Avanzada (AMS)

La Estación Móvil Avanzada, es el dispositivo que permite la comunicación mediante conexión inalámbrica con la Estación Base Avanzada (ABS¹⁹) o con la predecesora BS, y soporta la interfaz aire WirelessMAN-Advanced.

2.4.1.2 Red de Servicio de Acceso (ASN)

La Red de Servicio de Acceso, proporciona al terminal móvil el punto de entrada de radio a la red WiMAX. Como se muestra en la Fig. 2.6, la ASN comprende elementos de red como una o varias Estaciones Base Avanzadas (ABS), BS, y

¹⁶ AMS: *Advanced Mobile Station*

¹⁷ ASN: *Access Service Network*

¹⁸ CSN: *Connectivity Service Network*

¹⁹ ABS: *Advanced Base Station*

ASN-Gateways (ASN-GW); para distintas estaciones móviles, una ABS o BS puede conectarse *lógicamente* a más de una ASN-GW.

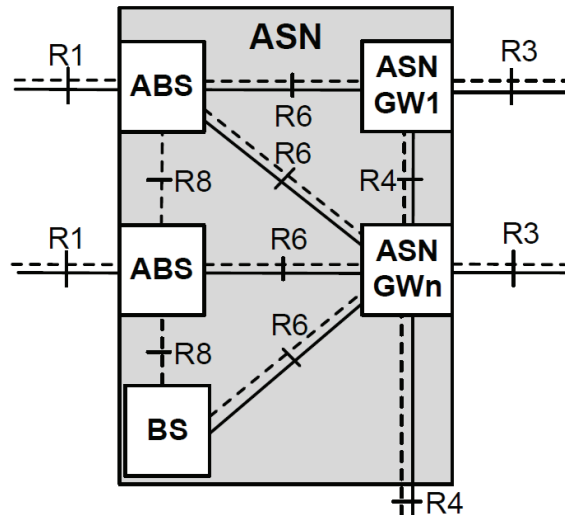


Figura 2.6. Modelo de Referencia ASN [81]

La Red de Servicio de Acceso provee entre sus funciones principales:

- ✓ Conectividad a nivel de capa 2 con la estación móvil
- ✓ Transferencia de mensajes AAA²⁰ al suscriptor *H-NSP*²¹
- ✓ Administración del Recurso Radioeléctrico (RRM²²)

2.4.1.2.1 Estación Base Avanzada (ABS)

Es la estación base que soporta la interfaz aire WirelessMAN-Advanced. La cual es una entidad de red lógica, realiza la función de interfaz entre la Red de Servicio de Acceso (ASN) y la AMS de acuerdo con las especificaciones de IEEE 802.16 y parámetros definidos por el *WiMAX Forum*; en la red, la ABS es conectada lógicamente a una o varias *ASN-Gateways*.

²⁰ AAA: Autenticación, autorización y contabilidad

²¹ H-NSP: *Home Network Service Provider*

²² RRM: *Radio Resource Management*

2.4.1.2.2 ASN-Gateway (ASN-GW)

La ASN-GW es una entidad lógica que representa una adición de funciones de control que están asociadas con una función correspondiente en la ASN, también realiza enrutamiento de portadora o funciones de puente [2]. Además en WiMAX Release 2 [81], se incorporan funcionalidades adicionales como acceso de autenticación con algoritmos con derivación de clave IEEE 802.16m, formato de mensaje con Identificador *TLV M-Zone*²³, función de modo Idle y No registro con Retención de Contexto (DCR).

2.4.1.3 Red de Servicio de Conectividad (CSN) [2, 81]

La CSN es un conjunto de funciones de red que permiten a la estación móvil (MS o AMS) tener conectividad IP. El modelo de referencia CSN está conformado por: el Servidor o Proxy AAA, Agente Local (HA), Suscriptor *billing*, *Router*, Bases de Datos de los usuarios, Conectividad de Servicios.

- ✓ *Proxy AAA*, permite el enrutamiento y procesamiento de mensajes AAA, entre un cliente y un servidor AAA
- ✓ *Server AAA*, es el equipo que desempeña los servicios AAA
- ✓ Agente Local (HA), registra información de “nodos móviles” que permanecen en la red del agente local; y, el Agente Externo (FA) registra información de “nodos móviles” que se encuentran en su red
- ✓ Las Bases de datos de usuarios, contienen información de entidades de red IMS y perfiles de los suscriptores

La Red de Servicio de Conectividad provee entre sus funciones principales:

- ✓ Direccionamiento IP a la AMS o MS

²³ M-Zone: Es el número de subtramas durante la comunicación entre la ABS y las AMS (o ARS)

- ✓ Acceso a Internet
- ✓ Soporta *tunneling* entre ASN y CSN
- ✓ Conectividad Inter-CSN
- ✓ Movilidad Inter-ASN

2.4.1.4 Puntos de Referencia [81]

En el Modelo de Referencia de Red de WiMAX *Release 2*, los Puntos de Referencia son interfaces lógicas entre funciones y protocolos de una ASN, CSN o MS/AMS. Los Puntos de Referencia R1 a R8 son descritos a continuación, a excepción de R7 que fue desaprobado en WiMAX *Release 1.5* y por consiguiente no considerado en *Release 2*.

a) *Punto de Referencia R1*

El Punto de Referencia R1 consiste de protocolos y procedimientos de la interfaz radioeléctrica entre la AMS/MS y la ASN.

b) *Punto de Referencia R2*

El Punto de Referencia R2 consiste de protocolos y procedimientos entre la AMS/MS y la CSN asociada con autenticación en el H-NSP²⁴. También permitiría soportar gestión de configuración de host IP entre la AMS/MS y la CSN por parte del H-NSP o V-NSP²⁵.

c) *Punto de Referencia R3*

El Punto de Referencia R3 consiste en protocolos de control entre la ASN y la CSN. Soporta gestión de movilidad, aplicación de políticas y AAA; realiza métodos para acceso de datos para su transferencia entre la ASN y la CSN.

d) *Punto de Referencia R4*

²⁴ H-NSP: *Home Network Service Provider*

²⁵ V-NSP: *Visited Network Service Provider*

El Punto de Referencia R4 comprende un conjunto de protocolos de plano de control y de datos en el *ASN-Gateway*, coordinando la movilidad de la AMS entre las Redes de Servicio de Acceso (ASN) y los *ASN-Gateways*.

e) *Punto de Referencia R5*

El Punto de Referencia R5 comprende un conjunto de protocolos de plano de control y de usuario para la interconexión de redes entre CSNs.

f) *Punto de Referencia R6*

El Punto de Referencia R6 consiste en un conjunto de protocolos de plano de control y de usuario para la comunicación entre la ABS/BS y el ASN-GW en una Red de Servicio de Acceso.

g) *Punto de Referencia R8*

El Punto de Referencia R8 comprende un conjunto de mensajes de control entre ABS y BS, o entre ABSs en una ASN asegurando *handover* entre las estaciones base.

El modelo de referencia de red WiMAX representado en la Fig. 2.5 identifica las siguientes entidades comerciales [2]:

a. Proveedores de Acceso de Red (NAP)

El Proveedor de Acceso de Red proporciona la infraestructura de acceso radioeléctrico WiMAX al NSP y está constituido por una o varias ASN's.

b. Proveedores de Servicio de Red (NSP)

El Proveedor de Servicio de Red proporciona conectividad IP y servicios a suscriptores de WiMAX; adicionalmente puede establecer acuerdos de *roaming* con otros NSP. El NSP se divide en Local (H-NSP) y Visitado (V-NSP).

2.4.1.4.1 AAA (Authentication, Authorization and Accounting)

AAA especifica los procedimientos de autenticación, autorización y contabilidad; asociados con servicios suscritos a la estación terminal. Los protocolos AAA proveen los servicios de:

- Autenticación de dispositivo, de usuario o ambos.
- Autorización como la entrega de información, movilidad, calidad de servicio (QoS), entre otras.
- Contabilidad, para entrega de información de facturación.

2.4.1.5 IP Móvil [2]

IETF (*Internet Engineering Task Force*) es una *comunidad internacional abierta* de diseñadores de red, operadores, proveedores e investigadores del correcto funcionamiento y la arquitectura de Internet; su labor se enmarca en Grupos de Trabajo en distintas áreas como enrutamiento, seguridad, etc. [26].

IP móvil (MIP, *Mobile Internet Protocol*) es un protocolo IETF, que permite al dispositivo móvil mantener su dirección IP al pasar de una red a otra. Las versiones del protocolo IP móvil son: IPv4²⁶ móvil, descrito en RFC²⁷ 5944²⁸, e IPv6²⁹ móvil, descrito en RFC 2460³⁰ y RFC 6275³¹.

El protocolo IP móvil define el registro de un “nodo móvil” con el Agente Local (HA), a su vez los nodos pueden cambiar su punto de conexión a Internet manteniendo su dirección IP permitiendo una conexión estable al estar en movimiento.

²⁶ IPv4: *Internet Protocol version 4*

²⁷ RFC: *Request for Comments*

²⁸ RFC 5944: IP Mobility Support for IPv4, Revised <<http://tools.ietf.org/html/rfc5944>>

²⁹ IPv6: *Internet Protocol version 6*

³⁰ RFC 2460: Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification
<http://datatracker.ietf.org/doc/rfc2460/?include_text=1>

³¹ RFC 6275: Mobility Support in IPv6 <<https://tools.ietf.org/html/rfc6275>>

Entre sus características principales, se puede mencionar: Escalabilidad a través de Internet e interoperabilidad con dispositivos con protocolos IP convencionales.

La Arquitectura de Red WiMAX [2] soporta los esquemas CMIP (*Client MIP*) y PMIP (*Proxy MIP*). Los protocolos Cliente IP Móvil (CMIP, por sus siglas en inglés) son definidos por el IETF; permiten conservar la dirección IP del dispositivo móvil, mantienen la conexión durante la movilidad de una red a otra y proveen una capa IP común de movilidad a diferentes tecnologías de acceso. El Proxy IP Móvil (PMIP, por sus siglas en inglés) también definido por el IETF; realiza la administración de movilidad de conformidad con la red, reduciendo su complejidad y costo.

2.5 WIRELESS MAN-ADVANCED

WirelessMAN-Advanced es la tecnología de la interfaz radioeléctrica que cumple con los requerimientos de las IMT-Avanzadas establecidos por la UIT, descritos en el Capítulo 1. Y el cumplimiento de las especificaciones del funcionamiento técnico se detalla en el *Documento UIT-R IMT-ADV/4-E* [55].

2.5.1 FUNCIONAMIENTO TÉCNICO

2.5.1.1 Ancho de banda

WirelessMAN-Advanced, soporta anchos de banda de: 5, 7, 8.75, 10 y 20 MHz con una portadora, y hasta 100 MHz con agregación de portadoras (con máx. 5 portadoras de 20 MHz).

2.5.1.2 Latencia

La latencia en IEEE 802.16m es reducida frente a sistemas anteriores y se toma en cuenta aspectos como el enlace, retardo en la transición de estados, de acceso y *handover* [21].

A) Latencia de plano de control

En 802.16m se emplea el Estado Idle, el mismo que mantiene de manera óptima los niveles de potencia de la batería en la estación móvil. La latencia de plano de control es el tiempo de transición del *Estado Idle* al *Estado Activo* en el momento en que los datos son intercambiados con la red en un canal de tráfico. En el *Estado Idle* se realiza el registro y autenticación, también el monitoreo al canal de control [22, 21].

La transición entre los dos estados puede ser iniciada por el terminal móvil o la red. Cuando es iniciado por el terminal móvil, se realiza en dos fases: Alineamiento y Reingreso a la red. En la etapa de alineamiento, el equipo ajusta los parámetros de transición, y en el reingreso a la red en cambio establece lo relacionado a los estados de conexión.

Por otra parte, cuando es iniciado por la red, la transición se realiza en tres fases: Transmisión de indicación de radiobúsqueda, Alineamiento y Reingreso a la red. En el primer caso, la estación base transmite un mensaje de indicación de radiobúsqueda que cuenta con la información de identificación del Estado Idle del equipo, mientras que las dos etapas restantes son como las detalladas en el punto anterior [22].

En la Tabla 2.1 se presenta el valor de la latencia en el plano de control de WirelessMAN-Advanced [55], la misma que cumple con los requerimientos de las IMT-Avanzadas siendo menor que 100 ms.

| Transición de estado | Latencia |
|---|----------|
| Estado <i>IDLE</i> a Estado <i>ACTIVO</i> | < 81 ms |

Tabla 2.1. Latencia de plano de control [55]

B) Latencia de plano de usuario

Para el cálculo de la latencia de plano de usuario así como de control, de acuerdo con el *Documento IMT-ADV/4-E* [55] se asume una trama radioeléctrica de 5 ms que contiene ocho subtramas de 0.617 ms y el intervalo de tiempo de transmisión (TTI) es igual a una subtrama, también se asume que la BS y la MS procesan 3 subtramas (TTI), o sea tres subtramas de 0.617 ms. El procesamiento HARQ es entre el 10 y el 30%. El HARQ RTT³² en el modo TDD asume la razón DL:UL=5:3 (5 subtramas DL y 3 subtramas UL).

Como se muestra en la Fig. 2.7, para el cálculo de la latencia, el proceso inicia en la MS, como se indicó anteriormente la MS procesa 3 subtramas TTI (3×0.617 ms), luego pasa al bloque TTI y de alineamiento que es de 0.31 ms para FDD (0.617 ms + 0.31 ms) y 2.5 ms para TDD; luego se tiene la retransmisión HARQ con el 10% para los cálculos indicados en la Tabla 2.2, y por último, el Procesamiento de retraso ABS (3×0.617 ms) [55, 2].

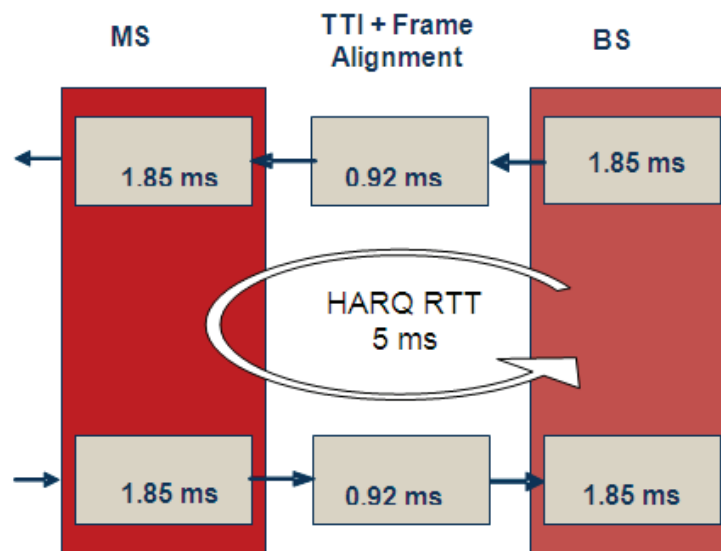


Figura 2.7. Modelo para el cálculo de la latencia de plano de usuario [55]

³² RTT: Round-Trip Time

| Descripción | Probabilidad de retransmisión HARQ del 10% | |
|--|--|----------------------------|
| | FDD | TDD |
| Tiempo de activación de AMS | Implementación dependiente | Implementación dependiente |
| Procesamiento de retraso AMS | $3 \times 0.617 = 1.85$ ms | $3 \times 0.617 = 1.85$ ms |
| <i>Queuing/Frame Alignment</i> | 0.31 ms | 2.5 ms |
| TTI para paquete de datos UL | 0.617 ms | 0.617 ms |
| Retransmisión HARQ | 0.1×5 ms = 0.5 ms | 0.1×5 ms = 0.5 ms |
| Procesamiento de retraso ABS | $3 \times 0.617 = 1.85$ ms | $3 \times 0.617 = 1.85$ ms |
| Total de retardo de acceso unidireccional | 5.13 ms | 7.32 ms |

Tabla 2.2. Latencia de plano de usuario [55]

2.5.1.3 Movilidad

En IEEE 802.16m se soportará alta movilidad, siendo eficiente en las clases fijo y peatonal con una rapidez de hasta 10 km/h (baja movilidad), también su funcionamiento será en vehicular entre 10 y 120 km/h con una leve degradación, y mantendrá la comunicación en alta rapidez vehicular entre 120 y 350 km/h pero con degradación principalmente con la rapidez máxima, la movilidad en 802.16m supera ampliamente a la máx. soportada en 802.16e [21].

En la Tabla 2.3 se presentan los valores de eficiencia espectral para los escenarios UIT-R *Indoor hotspot (InH)* y *Rural macro-cell (RMa)* del enlace ascendente NLOS en FDD y TDD, de acuerdo a lo establecido en [55], siendo muy similares los valores obtenidos en los dos métodos dúplex y alcanzando tasas de datos teóricas máximas de 356 Mbps y 127 Mbps en baja y alta movilidad, respectivamente, con un ancho de banda de canal asumido de 100 MHz.

| Escenario | Métodos Dúplex | | Movilidad |
|------------|----------------|-------------|-----------|
| | FDD | TDD | |
| <i>InH</i> | 3.56 bps/Hz | 3.41 bps/Hz | baja |
| <i>RMa</i> | 1.27 bps/Hz | 1.23 bps/Hz | alta |

Tabla 2.3. Tasas de datos del enlace del canal de tráfico para FDD y TDD [55]

2.5.1.4 Handover [23, 24]

Una AMS para utilizar los servicios de una ABS en particular escanea la información transmitida desde ABS vecinas, inclusive lo podría realizar sin interrumpir la comunicación con la *ABS en servicio*; siendo la selección de acuerdo a la información como el tipo de *celda*, localización, entre otros.

El procedimiento *handover* es iniciado por la ABS o la AMS. Por una parte, al iniciar la ABS (en servicio), transmite a la AMS un *mensaje de control de comando HO*. Y por otra, al iniciar la AMS como se muestra en la Fig. 2.8, transmite el *mensaje de iniciación HO* a la *ABS en servicio*, la misma que contesta con *mensajes de comando HO*.

Tanto en la ABS como en la AMS, los *mensajes de comando HO* son transmitidos a las *ABS objetivo*. La AMS al transmitirlos a una *ABS objetivo*, el procedimiento *handover* es realizado de forma directa. Y por otro lado, al transmitir a dos o más *ABS objetivo*, la AMS selecciona una ABS informando previamente a la *ABS en servicio* para su traspaso.

IEEE 802.16m soporta cuatro escenarios de *handover* [23]:

- *Handover* desde una *BS en servicio (Serving BS)* a una *BS objetivo (Target BS)*
- *Handover* desde una *ABS en servicio* a una *BS objetivo*
- *Handover* desde una *BS en servicio* a una *ABS objetivo*
- *Handover* desde una *ABS en servicio* a una *ABS objetivo*

Hay tres etapas *handover* a considerar: de inicio, de preparación y de ejecución. Al completar la última etapa, la AMS efectúa el reingreso a la red (*network re-entry*) con la *ABS objetivo*. Se podría optimizar el reingreso a la red con la *ABS objetivo* mediante la información obtenida por la *ABS en servicio* mediante una red *backbone* [23].

En IEEE 802.16m también soporta *handover* con otras tecnologías de acceso no-802.16m como por ejemplo con 3GPP, por lo cual la AMS obtiene información de otras redes vecinas y desde una ABS intercambia información del sistema.

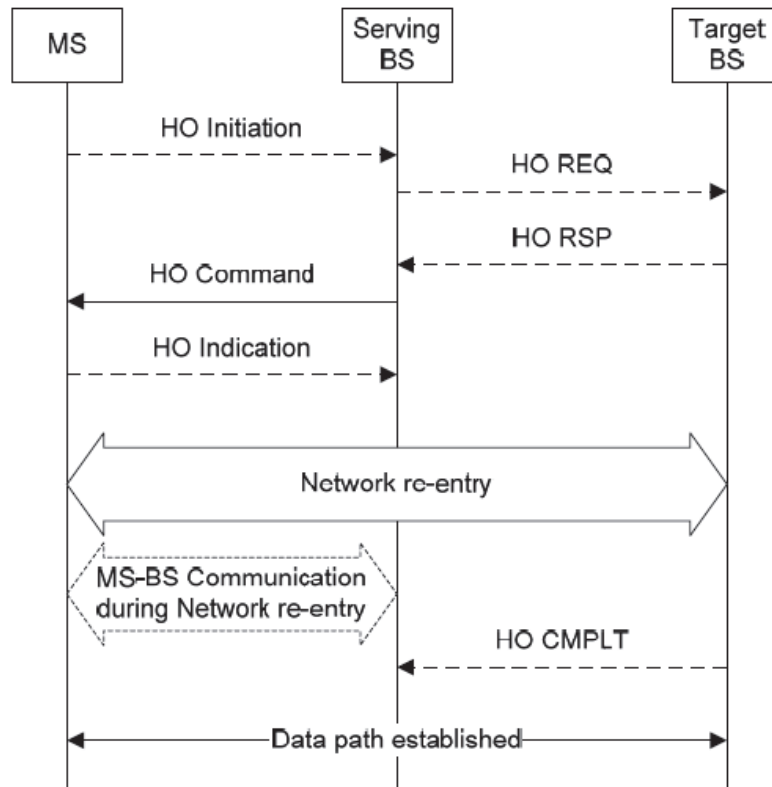


Figura 2.8. Procedimiento handover en IEEE 802.16m [23]

Los valores del tiempo de interrupción *handover* descritos en la Tabla 2.4 cumplen satisfactoriamente los requerimientos de las IMT-Avanzadas tanto para *intra-frecuencia* (*soft-handover*) como para *inter-frecuencia* (*hard-handover*).

| Tipo de handover | Tiempo de interrupción |
|----------------------------------|------------------------|
| a) Intra-frecuencia | 5 a 10 ms |
| b) Inter-frecuencia | |
| Dentro de una banda del espectro | 5 a 35 ms |
| Entre bandas del espectro | 5 a 35 ms |

Tabla 2.4. Tiempo de interrupción handover [55]

2.5.2 BANDAS DE FRECUENCIA DE WIRELESS MAN-ADVANCED

Las bandas de frecuencia soportadas por WirelessMAN-Advanced, son las identificadas para las IMT conforme el Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT [40], adicionalmente soporta bandas de frecuencia por debajo de los 6 GHz que no son parte de las IMT lo que permitirá un mayor despliegue.

| Transmisión AMS UL [MHz] | Transmisión ABS DL [MHz] | Modo Dúplex |
|-----------------------------|-----------------------------|----------------|
| 2300-2400 | 2300-2400 | TDD |
| 2305-2320 | 2305-2320 | TDD |
| 2345-2360 | 2345-2360 | |
| 2345-2360 | 2305-2320 | FDD |
| 2496-2690 | 2496-2690 | TDD |
| 2496-2572 | 2614-2690 | FDD |
| 3300-3400 | 3300-3400 | TDD |
| 3400-3600 | 3400-3600 | TDD |
| 3400-3500 | 3500-3600 | FDD |
| 3600-3800 | 3600-3800 | TDD |
| 1710-1770 | 2110-2170 | FDD |
| 1920-1980 | 2110-2170 | FDD |
| 1710-1755 | 2110-2155 | FDD |
| 1710-1785 | 1805-1880 | FDD |
| 1850-1910 | 1930-1990 | FDD |
| 1710-1785 | 1805-1880 | FDD |
| 1920-1980 | 2110-2170 | |
| 1850-1910 | 1930-1990 | FDD |
| 1710-1770 | 2110-2170 | |
| 698-862 | 698-862 | TDD |
| 776-787 | 746-757 | FDD |
| 788-793 | 758-763 | FDD |
| 793-798 | 763-768 | |

Tabla 2.5 Bandas de frecuencia de WirelessMAN-Advanced (*continúa*)

| Transmisión AMS UL [MHz] | Transmisión ABS DL [MHz] | Modo Dúplex |
|---|---|----------------|
| 788-798 | 758-768 | FDD |
| 698-862 | 698-862 | TDD/FDD |
| 824-849 | 869-894 | FDD |
| 880-915 | 925-960 | FDD |
| 698-716 776-793 | 728-746 746-763 | FDD |
| 1785-1805 1880-1920 1910-1930 2010-2025 1900-1920 | 1785-1805 1880-1920 1910-1930 2010-2025 1900-1920 | TDD |
| 450-470 | 450-470 | TDD |
| 450.0-457.5 | 462.5-470.0 | FDD |

Fuente: IEEE Std 802.16m-2011

Tabla 2.5. Bandas de frecuencia de WirelessMAN-Advanced

2.6 CAPA FÍSICA (PHY) [2, 24, 39, 23]

La capa física (Capa 1), como se muestra en la Fig. 2.9 es la más baja del *stack* de protocolos IEEE 802.16m, es el medio físico de la interfaz aire para el procesamiento de señales en banda base, para su transmisión y recepción. Especifica los parámetros de modulación, codificación, métodos de acceso múltiple, métodos dúplex, entre otros [2].

La Interfaz Aire Avanzada [24] está diseñada para operar sin línea de vista (NLOS) en bandas de frecuencia licenciadas por debajo de 6 GHz.

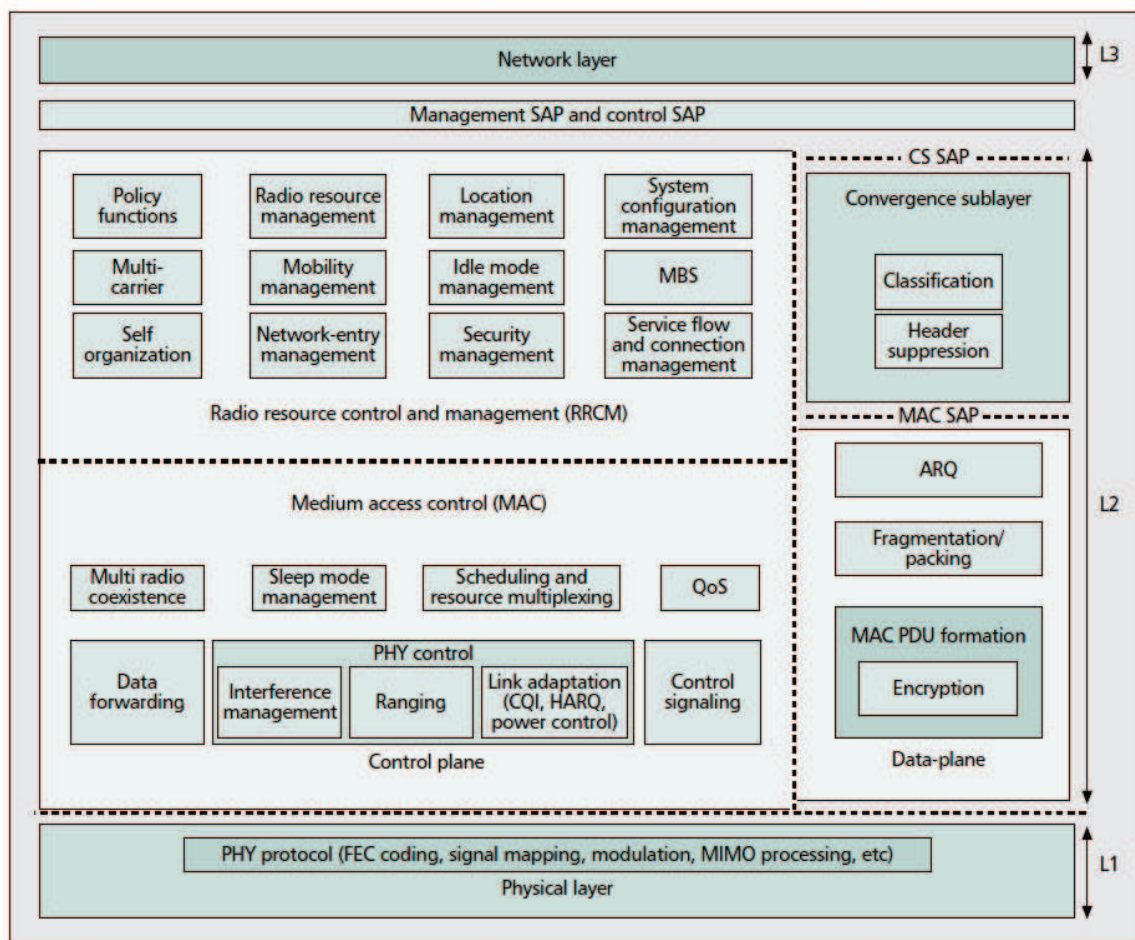


Figura 2.9. Stack de protocolos IEEE 802.16m [1]

En la Capa 2, la subcapa MAC está dividida en:

- Subcapa de convergencia
- Subcapa de parte común

La subcapa de parte común (*Common Part sublayer*), a su vez está conformada por funciones de Control y Administración de Recursos de Radio (RRCM³³) en el Plano de control, y funciones de Control de Acceso al Medio (MAC) en el Plano de control y Plano de datos.

El RRCM entre sus funciones, realiza *handover* a través del bloque de Administración de Movilidad (*Mobility Management*). Busca estaciones base (BS, ABS) o estaciones retransmisoras (RS, ARS) para decidir la ejecución de la

³³ RRCM: *Radio Resource Control and Management*

operación *handover* en la AMS. También se realizan procesos de encriptación, autenticación y autorización para la seguridad en las comunicaciones a través del bloque de Administración de Seguridad (*Security Management*). Adicionalmente se realiza procedimientos de retransmisión entre una ABS y una ARS.

Las funciones de MAC en el plano de control [23], mediante el bloque de control de capa física (*PHY control*) realiza alineamiento (*ranging*), procedimientos de adaptación del enlace, también estimación de calidad de canal, ajuste de potencia. Otra función es la de Coexistencia multi-radio, como se muestra en el ejemplo de la Fig. 2.10 un mismo dispositivo puede soportar operaciones radioeléctricas IEEE 802.16m, IEEE 802.11 e IEEE 802.15.1 lo que permitirá a la AMS obtener información de características adicionales a las obtenidas en dispositivos 802.16m.

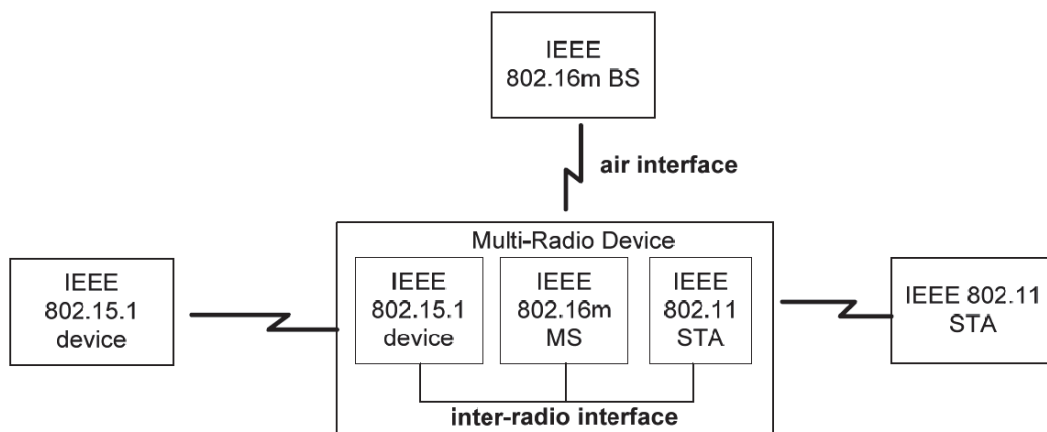


Figura 2.10. Ejemplo de dispositivo multi-radio [23]

2.6.1 MÉTODOS DÚPLEX [80, 2]

Los esquemas dúplex soportados por IEEE 802.16m (WiMAX 2) son:

- TDD (Dúplex por división de tiempo)
- FDD (Dúplex por división de frecuencia)
- H-FDD (*Half-duplex FDD*) de las estaciones móviles en redes FDD

En la Fig. 2.11 se muestran los esquemas dúplex utilizados en IEEE 802.16m. En el esquema FDD, se transmite simultáneamente en el enlace ascendente (UL) y descendente (DL) a diferentes frecuencias. Por otra parte, en el esquema H-FDD las transmisiones del enlace ascendente y descendente, se realizan en dos frecuencias diferentes pero no simultáneamente. Y el esquema TDD soporta transmisiones *downlink* y *uplink* en diferentes tiempos a una misma frecuencia.

En WirelessMAN-Advanced, el procesamiento en banda base es común en los esquemas FDD y TDD; por su parte H-FDD disminuye la complejidad de implementación, así como el costo de los dispositivos y también el aumento en la reutilización de elementos funcionales en banda base. El esquema H-FDD en 802.16m no es el clásico como el mostrado en la representación de la Fig. 1.7 (del Cap. 1), debido a que los recursos radioeléctricos no son utilizados de una forma eficaz en DL y UL, por lo que se realiza la agrupación complementaria de usuarios como se muestra en la Fig. 2.11, utilizando los recursos eficientemente [2].

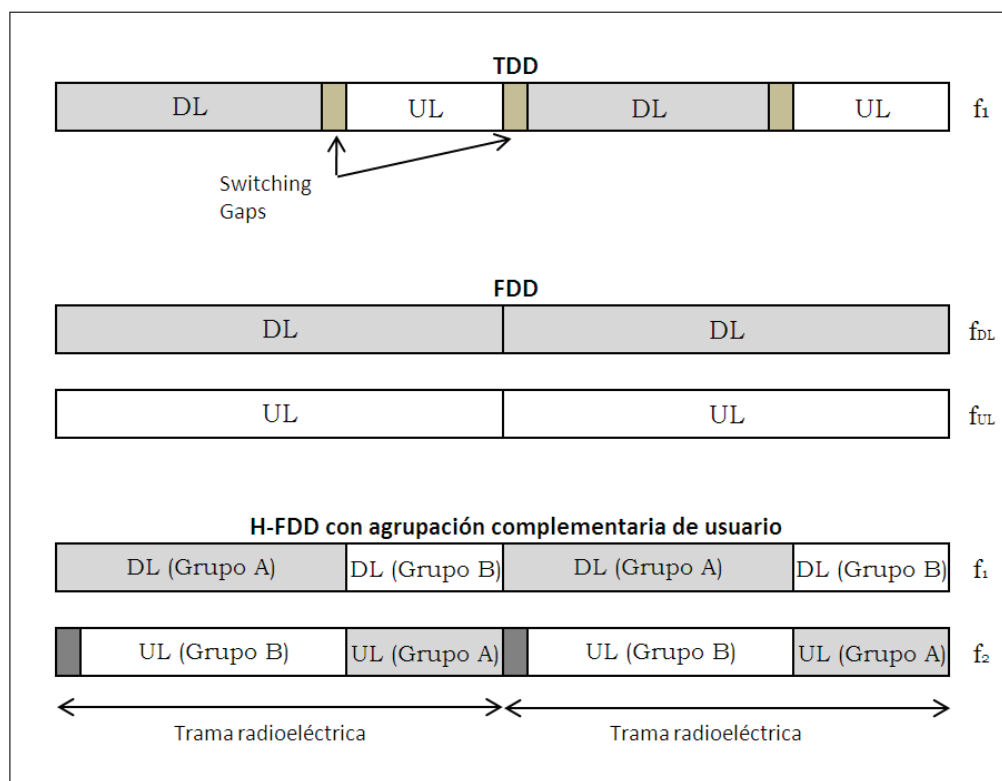


Figura 2.11. Ilustración de métodos dúplex en IEEE 802.16m³⁴

³⁴ Gráfico realizado por el autor con base en [2]

2.6.2 MÉTODOS DE ACCESO MÚLTIPLE [24]

WirelessMAN-Advanced, utiliza el esquema de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA) para el enlace DL y el enlace UL, obteniendo mayor eficiencia espectral y disminución a interferencias.

En la Fig. 2.12, se muestra la estructura en tiempo de símbolo OFDMA (T_s), el mismo que está formado por la duración del tiempo útil de símbolo (T_b), y el tiempo de guarda (T_g) denominado Prefijo Cíclico (CP), que es una copia del último período T_g del tiempo útil de símbolo, es utilizado para acoplar multitrayectorias, manteniendo la ortogonalidad de los tonos.

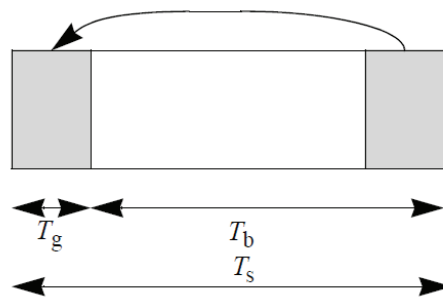


Figura 2.12. Estructura en tiempo de símbolo OFDMA [24]

El símbolo OFDMA está formado por subportadoras, como se trató en el Capítulo 1, los tipos son: Subportadoras de datos, Subportadoras piloto y Subportadoras nulas. El número de subportadoras indica el tamaño FFT³⁵ utilizado.

En la Tabla 2.6 se indican los parámetros OFDMA, de acuerdo al ancho de banda nominal de canal utilizado (BW) y al número de subportadoras utilizadas (N_{used}).

³⁵ FFT: *Fast Fourier Transform*

| | | | | | | | |
|--|---|---|---------|-------|-------|---------|---------|
| Ancho de banda nominal del canal (BW) [MHz] | | 5 | 7 | 8.75 | 10 | 20 | |
| Factor de muestreo (n) | | 28/25 | 8/7 | 8/7 | 28/25 | 28/25 | |
| Frecuencia de muestreo (F_s) [MHz] | | 5.6 | 8 | 10 | 11.2 | 22.4 | |
| Tamaño de la FFT (N_{FFT}) | | 512 | 1024 | 1024 | 1024 | 2048 | |
| Espaciado de la subportadora (Δf) [kHz] | | 10.94 | 7.81 | 9.77 | 10.94 | 10.94 | |
| Tiempo útil de símbolos (T_u) [μs] | | 91.4 | 128 | 102.4 | 91.4 | 91.4 | |
| CP $T_g=1/8$ T_b | Número de subtramas (en una trama) | | 8 | 5 | 7 | 8 | 8 |
| | Tiempo de símbolos T_s [μs] | | 102.857 | 144 | 115.2 | 102.857 | 102.857 |
| | FDD | Número de símbolos OFDMA por trama de 5 ms | 48 | 34 | 43 | 48 | 48 |
| | | Reposo (μs) | 62.857 | 104 | 46.40 | 62.857 | 62.857 |
| | TDD | Número de símbolos OFDMA por trama de 5 ms | 47 | 33 | 42 | 47 | 47 |
| | | TTG + RTG [μs] | 165.714 | 248 | 161.6 | 165.714 | 165.714 |
| CP $T_g=1/16$ T_b | Número de subtramas (en una trama) | | 8 | 6 | 7 | 8 | 8 |
| | Tiempo de símbolos T_s [μs] | | 97.143 | 136 | 108.8 | 97.143 | 97.143 |
| | FDD | Número de símbolos OFDMA por trama de 5ms | 51 | 36 | 45 | 51 | 51 |
| | | Reposo [μs] | 45.71 | 104 | 104 | 45.71 | 45.71 |
| | TDD | Número de símbolos OFDMA por trama de 5ms | 50 | 35 | 44 | 50 | 50 |
| | | TTG + RTG [μs] | 142.853 | 240 | 212.8 | 142.853 | 142.853 |
| CP $T_g=1/4$ T_b | Número de subtramas (en una trama) | | 7 | 5 | 6 | 7 | 7 |
| | Tiempo de símbolos T_s [μs] | | 114.286 | 160 | 128 | 114.286 | 114.286 |
| | FDD | Número de símbolos OFDMA por trama de 5 ms | 43 | 31 | 39 | 43 | 43 |
| | | Reposo [μs] | 85.694 | 40 | 8 | 85.694 | 85.694 |
| | TDD | Número de símbolos OFDMA por trama de 5 ms | 42 | 30 | 37 | 42 | 42 |
| | | TTG + RTG [μs] | 199.98 | 200 | 264 | 199.98 | 199.98 |

Tabla 2.6. Parámetros de OFDMA [24]

Donde:

- Factor de muestreo (n), es el parámetro que determina el espaciado de la subportadora y el tiempo útil de símbolo, tomando en cuenta BW y N_{used} : $n = F_S / BW$
- Frecuencia de muestreo (F_S), es la frecuencia central del sistema de transmisión: $F_S = (n \times BW / 8000) \times 8000$
- Espaciado de la subportadora (Δf) = F_S / N_{FFT}
- Tiempo útil de símbolo (T_b) = $1 / \Delta f$
- G : Es la relación del tiempo CP y el tiempo útil de símbolo; los valores soportados son: 1/8, 1/16 y 1/4
- Tiempo CP: $T_g = G \times T_b$
- Tiempo de muestreo: T_b / N_{FFT}
- TTG³⁶ representa pausas de transición en transmisión
- RTG³⁷ representa pausas de transición en recepción

2.6.3 ESTRUCTURA DE TRAMA [24]

En la Fig. 2.13 se representa la estructura básica de la trama de la interfaz aire avanzada. La supertrama es el conjunto de cuatro tramas de 5 ms, a su vez las tramas radioeléctricas se dividen en subtramas, con el fin de disminuir la latencia en el acceso aéreo.

A cada subtrama le corresponde un número entero de símbolos, de acuerdo a su tipo:

- *Subtrama del tipo-1* contiene seis símbolos OFDMA
- *Subtrama del tipo-2* contiene siete símbolos OFDMA
- *Subtrama del tipo-3* contiene cinco símbolos OFDMA

³⁶ TTG: Transmit/Receive Transition Gap

³⁷ RTG: Receive/Transmit Transition Gap

- *Subtrama del tipo-4* contiene nueve símbolos OFDMA, únicamente para UL con un ancho de banda de canal de 8.75 MHz para tramas OFDMA TDD WMAN

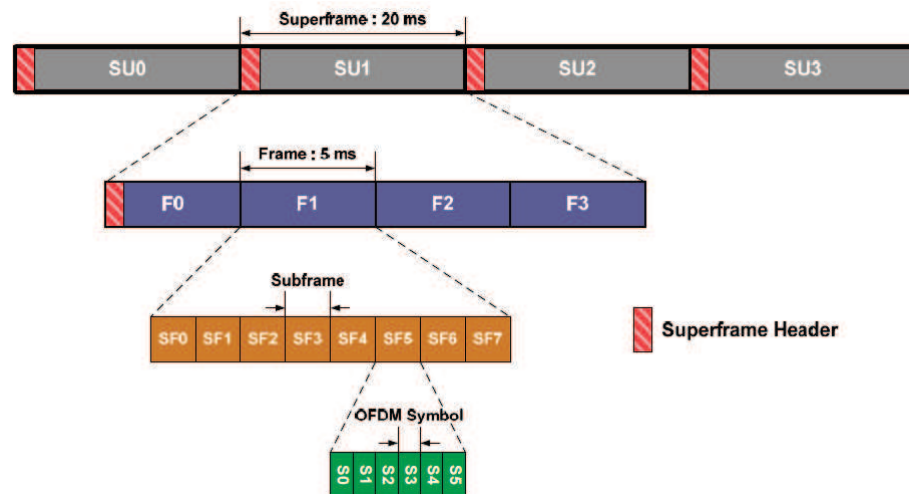


Figura 2.13. Estructura básica de la trama para anchos de banda de canal de 10, 15 y 20 MHz [23]

Donde:

- Longitud de la supertrama: 20 ms
- Longitud de la trama radioeléctrica: 5 ms
- Longitud de la subtrama: depende del ancho de banda del canal, longitud del prefijo cíclico y del tipo de subtrama (tipo- 1, 2, 3 o 4)

A continuación se presentan estructuras de trama para $CP = 1/8 T_b$, $1/16 T_b$ y $1/4 T_b$:

A) *Estructura de trama para $CP = 1/8 T_b$*

- ✓ Para anchos de banda de canal de 5, 10 y 20 MHz (8 subtramas):

Una trama IEEE 802.16m con anchos de banda nominal de canal de 5, 10 y 20 MHz, consta de 8 subtramas del tipo-1 para FDD. Para TDD la trama está formada por 7 subtramas del tipo-1 y 1 subtrama del tipo-3 (8 subtramas en total); la relación DL/UL es 6:2 (6 subtramas para DL y 2

subtramas para UL), 5:3, 4:4 o 3:5. En la Fig. 2.14 se muestra un ejemplo de estructura de trama con relación DL/UL=5:3.

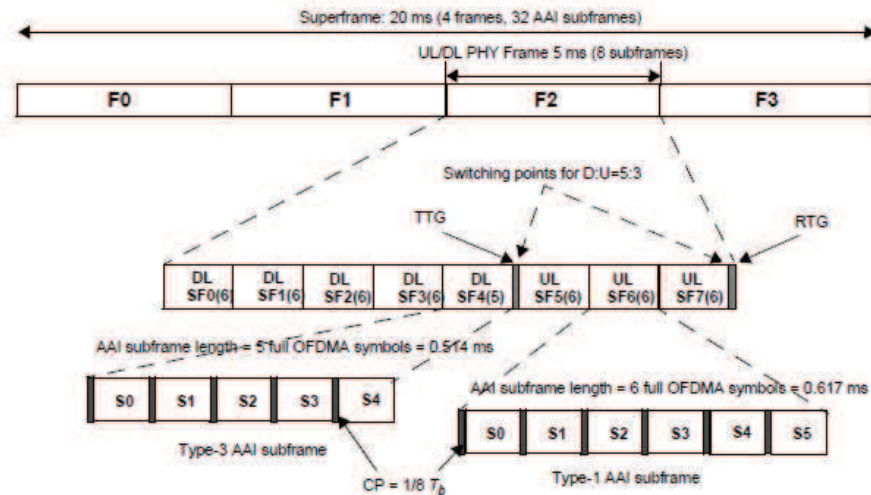


Figura 2.14. Estructura de trama TDD para anchos de banda de canal de 5, 10 y 20 MHz con $CP = 1/8 T_b$ [24]

- ✓ Para un ancho de banda de canal de 7 MHz (5 subtramas):

La trama que opera en FDD está formada por 4 subtramas del tipo-2 y una subtrama del tipo-1, como se muestra en la Fig. 2.15. Para TDD la trama consta de 5 subtramas con relación DL/UL de 3:2 (3 subtramas para DL y 2 subtramas para UL) o 2:3.

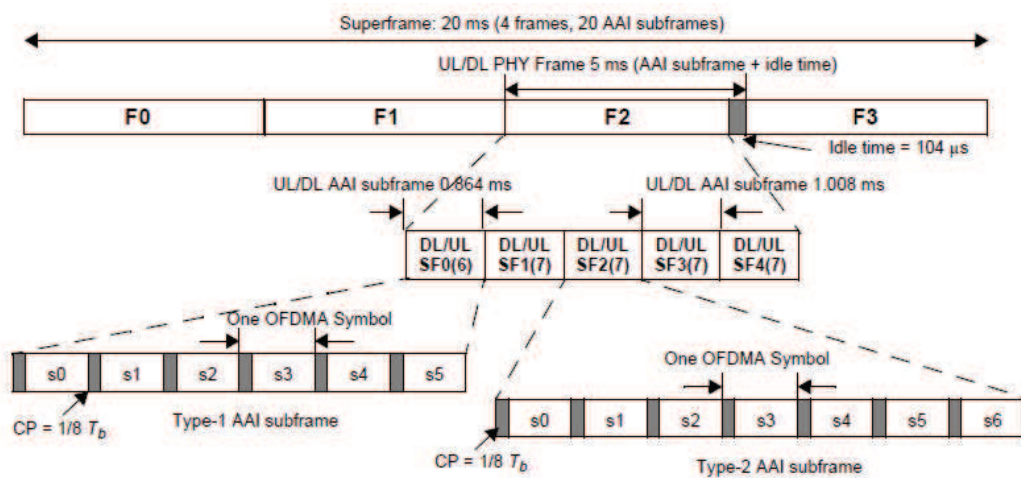


Figura 2.15. Estructura de trama FDD para un ancho de banda de canal de 7 MHz con $CP = 1/8 T_b$ [24]

- ✓ Para un ancho de banda de canal de 8.75 MHz (7 subtramas):

La trama que opera en FDD está formada por 1 subtrama del tipo-2 y 6 subtramas del tipo-1. Para la trama TDD, la relación DL/UL es de 5:2 (5 subtramas para DL y 2 subtramas para UL), 4:3 o 3:4. En la Fig. 2.16 se muestra un ejemplo de estructura de trama con relación DL/UL=5:2.

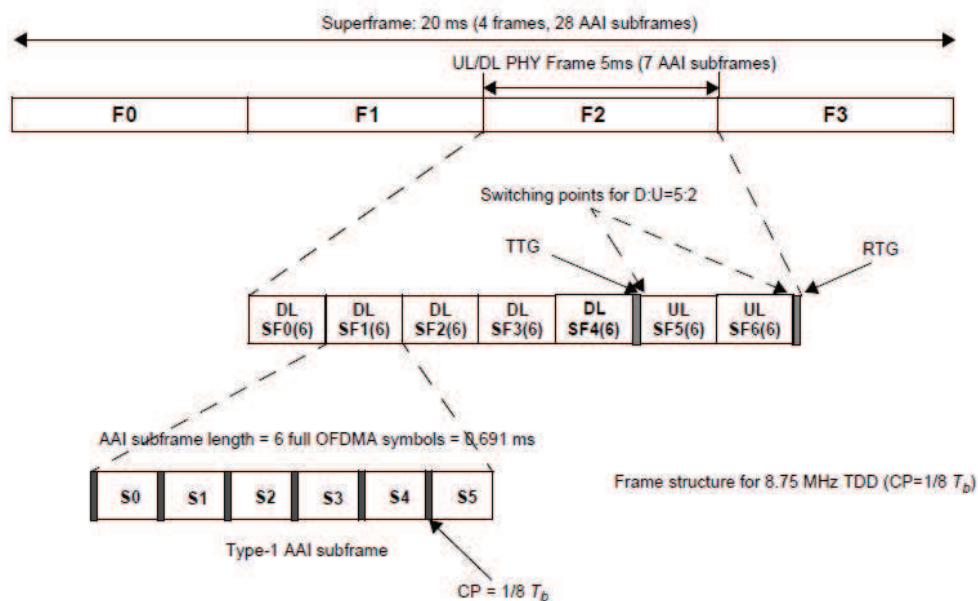


Figura 2.16. Estructura de trama TDD para un ancho de banda de canal de 8.75 MHz con $CP = 1/8 T_b$ [24]

B) Estructura de trama para $CP = 1/16 T_b$

- ✓ Para anchos de banda de canal de 5, 10 y 20 MHz (8 subtramas):

La trama IEEE 802.16m para anchos de banda nominal de canal de 5, 10 y 20 MHz consta de 5 subtramas del tipo-1 y 3 subtramas del tipo-2 para FDD, y para TDD está formada por 6 subtramas del tipo-1 y 2 subtramas del tipo-2. En la Fig. 2.17 se representa la trama para TDD y FDD respectivamente.

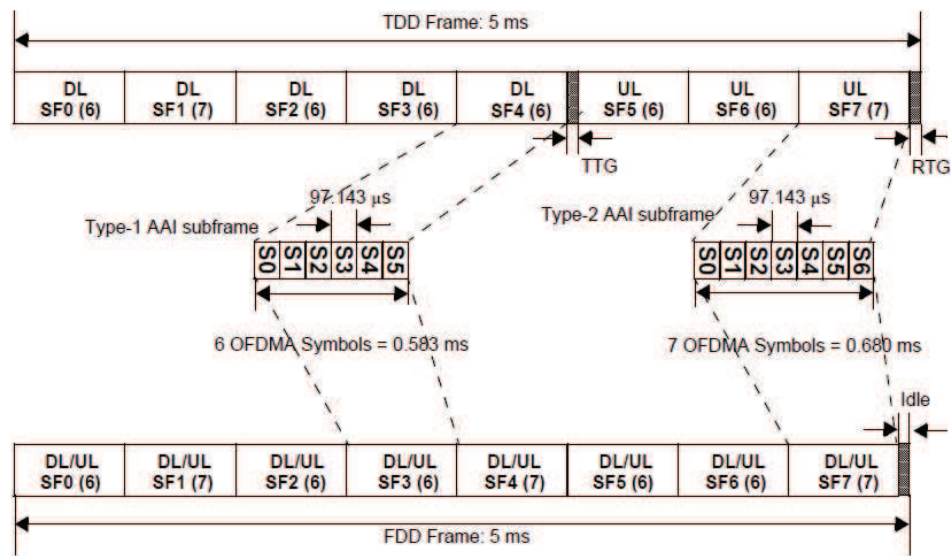


Figura 2.17. Estructura de trama TDD y FDD para anchos de banda de canal de 5, 10 y 20 MHz con $CP = 1/16 T_b$ [24]

- ✓ Para un ancho de banda de canal de 7 MHz (6 subtramas):

La trama IEEE 802.16m para un ancho de banda nominal de canal de 7 MHz que opera en FDD consta de 6 subtramas del tipo-1, y para TDD está formada por 5 subtramas del tipo-1 y 1 subtrama del tipo-3.

- ✓ Para un ancho de banda de canal de 8.75 MHz (7 subtramas):

La trama que opera en FDD está formada por 4 subtramas del tipo-1 y 3 subtramas del tipo-2, y para TDD consta de 5 subtramas del tipo-1 y 2 subtramas del tipo-2.

C) Estructura de trama para $CP = 1/4 T_b$

Los parámetros OFDMA de IEEE 802.16m, soportan grandes tamaños de celda y bandas de frecuencia menores a 1 GHz para $CP=1/4 T_b$.

- ✓ Para anchos de banda de canal de 5, 10 y 20 MHz (7 subtramas):

La trama IEEE 802.16m consta de 6 subtramas del tipo-1 y una subtrama del tipo-2 para FDD, y para TDD consta de 7 subtramas del tipo-1. En la Fig. 2.18 se representa la trama para TDD y FDD respectivamente.

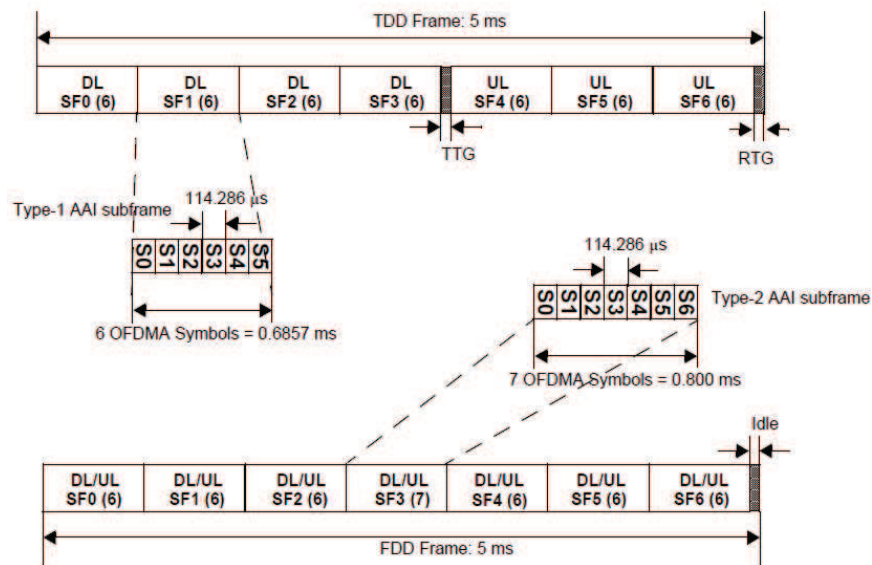


Figura 2.18. Estructura de trama TDD y FDD para anchos de banda de canal de 5, 10 y 15 MHz con $CP = 1/4 T_b$ [24]

- ✓ Para un ancho de banda de canal de 7 MHz (5 subtramas):

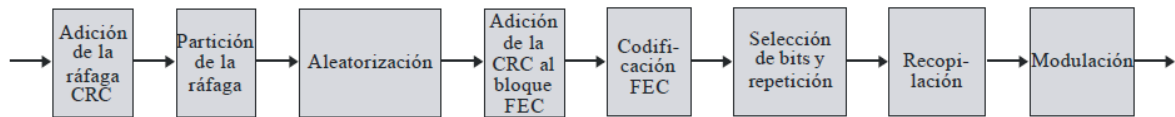
La trama IEEE 802.16m que opera en FDD está formada por 4 subtramas del tipo-1 y 1 subtrama del tipo-2, y para TDD consta de 5 subtramas del tipo-1.

- ✓ Para un ancho de banda de canal de 8.75 MHz (6 subtramas):

La trama está formada por 3 subtramas del tipo-1 y 3 subtramas del tipo-2 para FDD, y para TDD consta de 5 subtramas del tipo-1 y 1 subtrama del tipo-2.

2.6.4 MODULACIÓN / CODIFICACIÓN [2, 24, 39]

En la Fig. 2.19 se muestra el procesamiento en la capa física de IEEE 802.16m.



Tomado de: Recomendación UIT-R M.2012

Figura 2.19. Procedimientos de codificación y modulación

Se añade CRC (comprobación de redundancia cíclica) a los datos de la capa física (*ráfaga*), para luego realizar la partición a la *ráfaga*. El tamaño máximo del bloque FEC es de 4800 bits; la *ráfaga* incluida la CRC en caso de ser mayor al tamaño máximo del bloque FEC, se la divide (en sub-bloques FEC) para que cada uno sea codificado, previamente a su vez sea añadido CRC [24].

WirelessMAN-Advanced utiliza el código turbo convolucional (CTC) con velocidad de código mínima de 1/3, el cual se extiende para que soporte tamaños adicionales del bloque FEC.

La selección y repetición de bits utilizada por 802.16m, permite ajustar la velocidad. El número de bits seleccionados al ser menor que los bits transmitidos, realiza una repetición. El máximo tamaño de la *memoria intermedia circular*, es el número total de bits de información, bits de paridad y los bits de código matriz, formados por el codificador FEC.

Las constelaciones de modulación para IEEE 802.16m son: QPSK, 16-QAM y 64-QAM.

WirelessMAN-Advanced, utiliza *Hybrid ARQ* de redundancia incremental (HARQ-IR) y *HARQ* con combinación de repetición (HARQ-CC). La diversidad de frecuencia de canal es utilizada en retransmisiones HARQ, donde los bits o símbolos pueden ser transmitidos en distinto orden.

2.6.5 TÉCNICAS AVANZADAS DE ANTENA [2, 24, 23]

Las técnicas avanzadas multiantena *MIMO* (Múltiples Entradas Múltiples Salidas) utilizadas en 802.16m [2], tienen esquemas de un usuario (*SU-MIMO*) y multiusuario (*MU-MIMO*). En *SU-MIMO* se proyecta un usuario por unidad de recurso³⁸, son esquemas punto-a-punto, se obtiene desde la coordinación de procesamiento entre los transmisores y receptores. En *MU-MIMO* se puede planificar múltiples usuarios por unidad de recurso.

2.6.5.1 Downlink MIMO

La arquitectura *MIMO* del enlace descendente del transmisor [23] se muestra en la Fig. 2.20. Está formada principalmente por el *codificador MIMO* al cual ingresan las *capas MIMO*, que son la entrada al trayecto de codificación y modulación al codificador, a su vez, a la salida del codificador se forman los *trenes (streams) MIMO*, que ingresan al precodificador y realizan la correspondencia con las antenas para la generación de datos específicos de la antena conforme el índice de modo *MIMO* seleccionado como se indica en la Tabla 2.7.

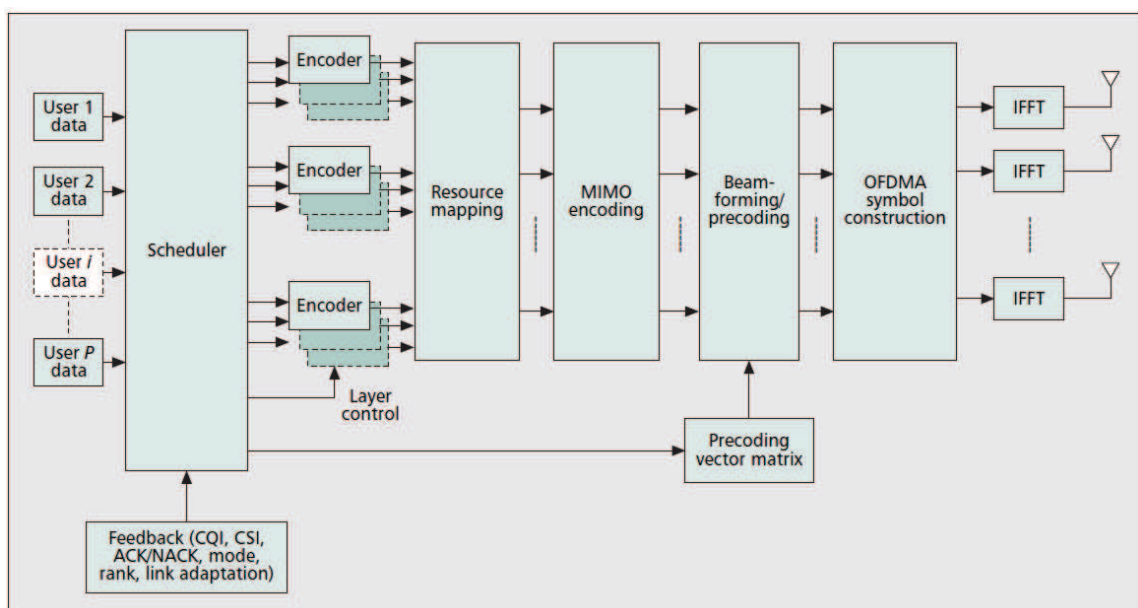


Figura 2.20. Arquitectura MIMO del enlace descendente [1]

³⁸ Unidad de recurso: Tiempo, frecuencia o espacio

La ABS para adaptar la velocidad, transmite la realimentación CQI³⁹ y el rango; en la multiplexación espacial, el rango es el número de *streams* empleados por cada usuario. En *SU-MIMO* de bucle cerrado, la precodificación es realizada en base al *codebook unitario*, así también como la realimentación de información desde la AMS a la ABS [39].

En la *codificación MIMO* del enlace descendente se emplean 4 formatos [23]:

- Codificación del bloque espacio-frecuencia (SFBC⁴⁰)
- Codificación Vertical (VE⁴¹)
- Codificación Horizontal (HE⁴²)
- Repetición de datos conjugados (CDR⁴³)

En *SU-MIMO* se asigna esquemas de transmisión; en la diversidad de transmisión se utiliza VE o SFBC, y la multiplexación espacial emplea VE con una capa. En *MU-MIMO* la estación base utiliza HE con múltiples capas [23].

La configuración de antenas soportadas en la estación base avanzada (ABS) para DL es de 2, 4 u 8 antenas transmisoras, y de la estación móvil avanzada (AMS) mínimo 2 antenas receptoras. Dando lugar a una configuración máxima de 8×8 [2].

Los modos utilizados en la transmisión *downlink MIMO*, son descritos en la Tabla 2.7. De lo cual la precodificación no adaptiva es soportada por los modos 0, 1, 3 y 5 (bucle abierto), y la precodificación adaptiva es soportada por los modos 2 y 4 (bucle cerrado).

³⁹ CQI: *Channel Quality Indicator*

⁴⁰ SFBC: *Space-frequency block coding*

⁴¹ VE: *Vertical encoding*

⁴² HE: *Horizontal encoding*

⁴³ CDR: *Conjugate data repetition*

| Índice de Modo | Descripción | Formato de codificación MIMO |
|----------------|--|--|
| Modo 0 | SU-MIMO de bucle abierto (diversidad en transmisión) | Codificación del bloque espacio-frecuencia |
| Modo 1 | SU-MIMO de bucle abierto (multiplexación espacial) | Codificación vertical |
| Modo 2 | SU-MIMO de bucle cerrado (multiplexación espacial) | Codificación vertical |
| Modo 3 | MU-MIMO de bucle abierto (multiplexación espacial) | Codificación horizontal |
| Modo 4 | MU-MIMO de bucle cerrado (multiplexación espacial) | Codificación horizontal |
| Modo 5 | SU-MIMO de bucle abierto (diversidad en transmisión) | Repetición de datos conjugados |

Tabla 2.7. Modos MIMO DL [24]

2.6.5.2 Uplink MIMO

La arquitectura *MIMO* del enlace ascendente del transmisor [23] se muestra en la Fig. 2.21. Al *codificador MIMO* ingresa la *capa* que es el trayecto de codificación y modulación, y a la salida del codificador se forman los *trenes (streams) MIMO* que ingresan al bloque precodificador, el mismo que realiza la correspondencia con las antenas para la generación de datos específicos de la antena conforme el índice de modo *MIMO* seleccionado como se indica en la Tabla 2.8.

La ABS realiza la distribución de usuarios a bloques de recursos, también establece el nivel de modulación y los parámetros *MIMO*. Soporta *codebook unitario* en la diversidad de transmisión [39].

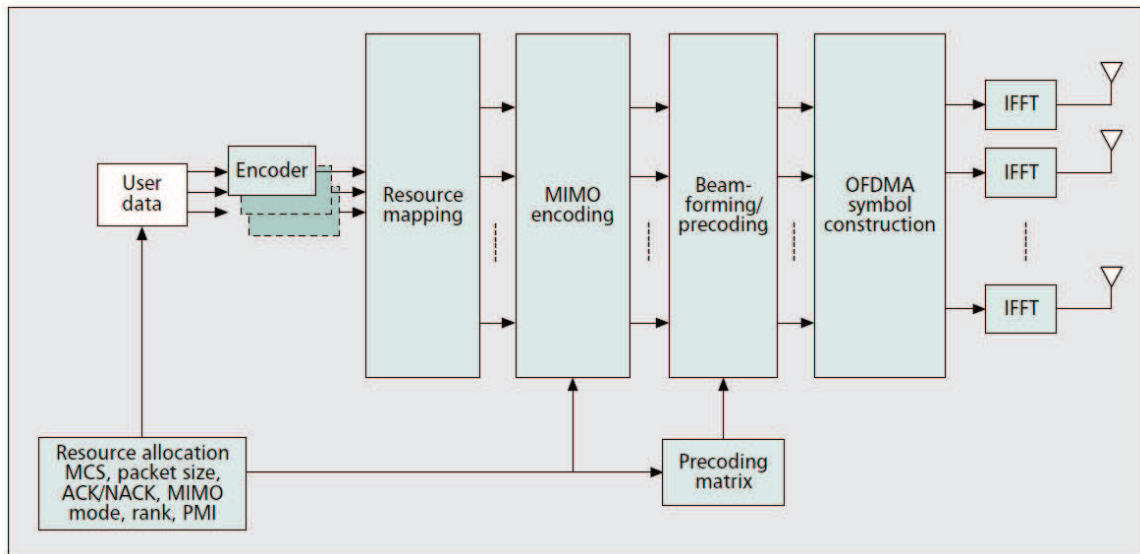


Figura 2.21. Arquitectura MIMO del enlace ascendente [1]

La configuración de antenas soportadas en la AMS para UL es de 1, 2 o 4 antenas transmisoras, y de la ABS mínimo 2 antenas receptoras. Dando lugar a una configuración máxima de 4×4 [2].

En la *codificación MIMO* de UL se emplean 2 formatos [23]:

- Codificación del bloque espacio-frecuencia (SFBC)
- Codificación Vertical (VE)

Los modos utilizados en la transmisión *uplink MIMO*, son descritos en la Tabla 2.8. De lo cual la precodificación no adaptiva es soportada por los modos 0, 1 y 3 (bucle abierto), y la precodificación adaptiva es soportada por los modos 2 y 4 (bucle cerrado).

| Índice de Modo | Descripción | Formato de codificación MIMO |
|----------------|--|--|
| Modo 0 | SU-MIMO de bucle abierto (diversidad en transmisión) | Codificación del bloque espacio-frecuencia |

Tabla 2.8. Modos MIMO UL (*continúa*)

| Índice de Modo | Descripción | Formato de codificación MIMO |
|----------------|---|------------------------------|
| Modo 1 | SU-MIMO de bucle abierto (multiplexación espacial) | Codificación vertical |
| Modo 2 | SU-MIMO de bucle cerrado (multiplexación espacial) | Codificación vertical |
| Modo 3 | Multiplexación espacial en colaboración y bucle abierto (MU-MIMO) | Codificación vertical |
| Modo 4 | Multiplexación espacial en colaboración y bucle cerrado (MU-MIMO) | Codificación vertical |

Tabla 2.8. Modos MIMO UL [24]

2.6.6 CANALES DE CONTROL [2, 39, 24]

La señalización de control del sistema para DL y UL en la Norma IEEE 802.16-2009, es desarrollada con elementos de información DL y UL incluidos en mensajes de administración *MAP (Medium Access Protocol)*. Con un sistema de transmisión robusto, los elementos de información de los usuarios activos de la *celda* son codificados y transmitidos, y multiplexados en TDM con datos; en sistemas IEEE 802.16m, los *MAP's* son codificados individualmente y son más eficientes, se multiplexan en FDM con datos [2].

2.6.6.1 Canales de control del enlace descendente [39]

Los canales de control del enlace descendente transmiten información fundamental para el funcionamiento del sistema. Los parámetros de configuración del sistema son transmitidos en intervalos de supertrama, y la señalización de

control referente a datos del usuario se transmite en intervalos de trama o subtrama.

2.6.6.1.1 Cabecera de la supertrama (SFH⁴⁴)

La cabecera de la supertrama contiene parámetros fundamentales del sistema e información de configuración del sistema.

La SFH [39] se divide en:

- Cabecera de supertrama primaria (P-SFH)
- Cabecera de supertrama secundaria (S-SFH)

Los mismos que se localizan en la primera subtrama de la supertrama y son multiplexados en TDM con *preámbulo avanzado*. La P-SFH es transmitida en cada supertrama y la S-SFH es transmitida en una o varias supertramas.

La cabecera de supertrama primaria se transmite con esquema de modulación y codificación predeterminadas, la cabecera de supertrama secundaria se transmite con esquema de modulación predeterminada y codificación indicado en la P-SFH.

Para una mejora en la cobertura, P-SFH y S-SFH son transmitidos en dos secuencias espaciales y con codificación de bloque espacio-frecuencia. En S-SFH la información es transmitida en tres subpaquetes: El subpaquete 1 consta con información para la reentrada a la red, el subpaquete 2 consta con información para la entrada inicial en la red y el subpaquete 3 contiene la información necesaria para la comunicación con la estación base.

2.6.6.1.2 Advanced-MAP (A-MAP⁴⁵)

A-MAP contiene información de control del usuario, siendo la misma específica o no específica. La información de control específica de usuario, contiene

⁴⁴ SFH: *Superframe Header*

⁴⁵ A-MAP: *Advanced-Medium Access Protocol*

información para uno o más usuarios como la asignación de planificación, y la realimentación de HARQ. La información de control no específica de usuario, a diferencia de la anterior, contiene información para decodificación de la señalización de control del usuario.

2.6.6.2 Canales de control del enlace ascendente

2.6.6.2.1 Canal de realimentación rápida (FBCH⁴⁶)

Los tipos de canales de realimentación rápida UL son:

- Canal primario de realimentación rápida UL (P-FBCH)
- Canal secundario de realimentación rápida UL (S-FBCH)

El P-FBCH incluye 6 bits de información para una alta calidad del canal de banda ancha y banda estrecha, y realimentación *MIMO*. El S-FBCH incluye de 7 a 24 bits de información, soporta CQI (Indicador de la calidad del canal) a una alta velocidad de código, el número de bits puede ser adaptativo. Los canales son multiplexados por división de frecuencia (FDM).

2.6.6.2.2 Canal de realimentación HARQ

El canal de realimentación HARQ se utiliza para acuse de recibo positivo o negativo (ACK o NAK, respectivamente) para las transmisiones de datos en DL. En el enlace ascendente empieza con un desplazamiento determinado respecto a la transmisión del canal DL correspondiente, el mismo es multiplexado en FDM con otros canales de control y datos.

2.6.6.2.3 Canal de sondeo

El canal de sondeo es utilizado por la MS para la transmisión de señales de referencia de sondeo, que permitan a la BS evaluar las condiciones del canal UL,

⁴⁶ FBCH: *Fast feedback channel*

tal que la BS puede configurar a la MS para la transmisión de señales de sondeo del enlace ascendente sobre subportadoras. Este canal se multiplexa ortogonalmente con otros canales de control y datos.

2.6.6.2.4 Canal de determinación de la distancia

El canal de determinación de la distancia, es utilizado para la sincronización del enlace ascendente (UL).

Se clasifica de acuerdo a la determinación de la distancia para la MS:

- Canal de determinación de la distancia no sincronizado (NS-RCH)
- Canal de determinación de la distancia sincronizado (S-RCH)

El canal de determinación NS-RCH es utilizado para la entrada inicial en la red y *handover*. Por otro lado, el canal de determinación S-RCH es utilizado para la determinación periódica de la distancia. En una *femtocelda*, el dispositivo móvil realizará una determinación inicial de la distancia, determinación de la distancia *handover* y determinación periódica de la distancia utilizada por el S-RCH.

2.6.6.2.5 Canal de petición de ancho de banda (BR⁴⁷)

A través del canal de petición de ancho de banda, se solicita la concesión del enlace ascendente (UL), las peticiones son transmitidas por medio de un *preámbulo BR* por el *canal BR* y utiliza acceso aleatorio. Los *mensajes BR* pueden incluir información sobre el tráfico en la estación móvil. El *canal BR* es multiplexado en FDM con otros canales de control y datos UL. Varios *preámbulos BR* pueden ser transmitidos por un canal usando CDM.

⁴⁷ BR: *Bandwidth Request*

2.6.7 CONTROL DE POTENCIA [2, 24, 39]

Control de Potencia, es un mecanismo en que la potencia de transmisión de la estación base (BS) para DL, y la estación móvil (MS) para UL, ajustan los canales de control o tráfico mediante instrucciones, reduciendo la interferencia entre usuarios y estaciones base. El aumento en la potencia de transmisión, incrementa la relación señal a ruido (SNR) en recepción, disminuyendo la tasa de bits errados por lo que mejora la eficiencia espectral.

2.6.7.1 Control de Potencia del enlace descendente

El control de potencia DL es soportado en los modos *SU-MIMO* y *MU-MIMO*. La BS permite controlar la potencia de transmisión por usuario y por subtrama, y la MS recibe información específica de cada usuario o información de control con nivel de potencia controlado. *Advanced-MAP* del enlace descendente puede controlar la potencia mediante la realimentación de calidad del canal UL del dispositivo móvil.

2.6.7.2 Control de Potencia del enlace ascendente

El control de potencia UL permite compensar la pérdida de trayecto, el sombreado (*shadowing*), desvanecimiento rápido y pérdidas de implementación. Las estaciones móviles que soporten el control de potencia UL, reciben la información necesaria a través del canal de control o mensajes transmitidos por la BS. Adicionalmente permite disminuir el nivel de interferencia intra-celda e inter-celda; y el proceso *handover* es llevado a cabo a través del intercambio de información entre la estación base en servicio y estaciones base vecinas; el control de potencia es considerado en los modos de transmisión *MIMO*.

2.7 RETRANSMISIÓN

Para la ampliación de la cobertura, como alternativa se podría incrementar el número de estaciones base o repetidores, dado las altas tasas de datos requeridas para las IMT-Avanzadas, las BSs al tener un elevado costo y los repetidores al presentar el problema del incremento de interferencia. Por lo tanto una solución costo-efectiva es la utilización de Estaciones Retransmisoras (RS, por sus siglas en inglés) que permiten el incremento de la cobertura como se muestra en la Fig. 2.22 [21].

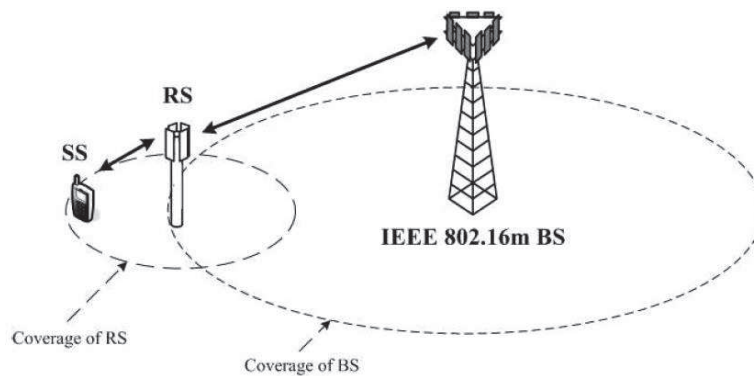


Figura 2.22. Cobertura extendida con RS [21]

En la Fig. 2.23 se representan las conexiones de retransmisión utilizadas en un sistema WiMAX [23], por lo cual una AMS o una MS pueden comunicarse con una ABS sea de forma directa, o por medio de una ARS o de una RS, respectivamente. Es factible la comunicación entre dos RSs entre sí, caso contrario a lo que sucede entre dos ARSs e igualmente entre una ARS y una RS que no se interconectan. Adicionalmente, se puede comunicar una RS con una MRBS (*Multihop Relay Base Station*) que es definida en la Norma IEEE 802.16j.

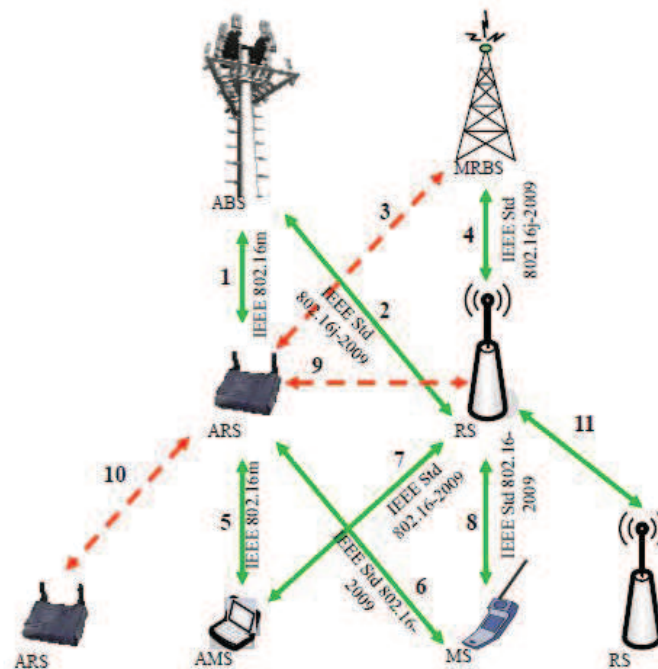


Figura 2.23. Conexiones de retransmisión [23]

2.8 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE WIMAX MÓVIL (IEEE 802.16E) Y WIMAX 2.0 (IEEE 802.16M) [2, 8, 21]

En WiMAX Móvil (IEEE 802.16e) el esquema de duplexación utilizado es TDD, debido a que DL y UL se encuentran en un solo canal de frecuencia, lo que permite de una manera más eficaz la adaptación del enlace, también soporta técnicas avanzadas de antena como conformación de haz (*beamforming*), y permite una mejor distribución en el espectro con mayor flexibilidad [8]. IEEE 802.16m utiliza los esquemas TDD y FDD, lo que implica facilitar la implementación y disminuir costos; el esquema H-FDD soporta las operaciones de transmisión en DL y UL en frecuencias diferentes y no al mismo tiempo [2].

Tanto en *Mobile WiMAX Release 1* como en *Release 2*, los esquemas de acceso múltiple utilizados son OFDMA para DL y UL, lo que permite la compatibilidad entre la nueva versión y la antecesora. La multiplexación utilizada en 802.16e es TDM, y en 802.16m es FDM. Las bandas de frecuencia de operación en ambos

casos son bandas licenciadas menores a 6 GHz, los esquemas de modulación utilizados en 802.16e y 802.16m son QPSK, 16-QAM y 64-QAM debido a la demanda de altas tasas de transmisión.

802.16m soporta anchos de banda de canal de hasta 100 MHz con agregación de portadoras; otro aspecto a considerar es la configuración de antenas máxima, siendo de 4×4 en 802.16e incrementado a 8×8 en 802.16m para DL, y de 2×2 en 802.16e a 4×4 en 802.16m para UL, lo que implica un incremento en la velocidad de transmisión de acuerdo con los requerimientos de las IMT-Avanzadas.

La tasa de datos máx. en DL para 802.16e es de 30 Mbps considerando una configuración de antenas 2×2 , y para 802.16m es de 1 Gbps con una configuración de antenas de 4×4 . La cobertura en 802.16e es entre 2 y 5 km, en cuanto que en 802.16m es máximo de 100 km siendo óptimo hasta 5 km.

La trama en IEEE 802.16m tiene una longitud fija de 5 ms, la misma que puede contener entre 5 a 8 subtramas como se trató en el literal 2.6.3 del presente capítulo, además admite prefijos cíclicos de 1/4, 1/8 y 1/16. Soporta supertramas de 20 ms de longitud, conformadas por cuatro tramas consecutivas permitiendo incrementar la tasa de datos, también permite soportar tramas IEEE 802.16e.

La arquitectura de red de WiMAX Móvil [8] es basada en *todo-IP*, formada básicamente por la estación suscriptora (SS), la red de servicio de acceso (ASN) que describe las entidades lógicas y las funcionalidades referentes al servicio de acceso, y por la red de servicio de conectividad (CSN) que proporciona los servicios de conectividad en la red como Internet, además permite soportar *handover*, movilidad basada tanto en IPv4 como IPv6 y *roaming*.

En la Tabla 2.9 se muestra las características principales de *IEEE 802.16e-2005* e *IEEE 802.16m-2011*.

| PARÁMETROS | IEEE 802.16e | IEEE 802.16m |
|---------------------------------------|--|--|
| Duplexación | TDD | TDD, FDD |
| Esquema de acceso múltiple | OFDMA (en DL y UL) | OFDMA (en DL y UL) |
| Multiplexación | TDM | FDM |
| Bandas de frecuencia | Bandas licenciadas por debajo de 6 GHz | Bandas licenciadas por debajo de 6 GHz |
| Modulación | QPSK, 16-QAM, 64-QAM | QPSK, 16-QAM, 64-QAM |
| Ancho de Banda de canal | 5, 7, 8.75 y 10 MHz | 5, 7, 8.75, 10, 20 MHz (hasta 100 MHz) |
| Configuración máx. MIMO | 4×4 (en <i>downlink</i>) | 8×8 (en <i>downlink</i>) |
| | 2×2 (en <i>uplink</i>) | 4×4 (en <i>uplink</i>) |
| Tasa de transmisión máx. en DL | 30 Mbps | 1 Gbps |
| Longitud de la trama | 5 ms | 5 ms |
| Supertrama | No soportada | 20 ms (con 4 tramas consecutivas) |
| Cobertura | 2 a 5 km | Máx. 100 km (óptimo hasta 5 km) |
| Códigos Turbo | CTC con tasa de código mín. 1/3 | CTC con tasa de código mín. 1/3 |
| Movilidad | Hasta 120 km/h | Hasta 350 km/h |

Tabla 2.9. Características de IEEE 802.16e e IEEE 802.16m [2, 8, 21]

CAPÍTULO 3

ESTUDIO DEL SISTEMA LTE-ADVANCED CON SUS RESPECTIVAS TECNOLOGÍAS

3. ESTUDIO DEL SISTEMA LTE-ADVANCED CON SUS RESPECTIVAS TECNOLOGÍAS

3.1 INTRODUCCIÓN

La Recomendación UIT-R M.2012, especifica las interfaces radioeléctricas terrenales de las IMT-Avanzadas desarrolladas por la UIT, en cooperación con los *Proponentes de las Especificaciones básicas globales* (GCS, por sus siglas en inglés) y las *Organizaciones de Transposición*.

Conforme el Anexo 1 de la Recomendación UIT-R M.2012 [39] “Especificación de la tecnología de la interfaz radioeléctrica *LTE¹-Advanced*”, el *Proponente de las Especificaciones básicas globales* es: 3GPP (representado por: ARIB², ATIS³, CCSA⁴, ETSI⁵, TTA⁶, TTC⁷) y las *Organizaciones de Transposición* son: ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TTA, TTC.

3.2 3GPP (3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT) [93]



Figura 3.1. Logotipo de 3GPP⁸

¹ LTE: *Long Term Evolution*

² ARIB: *Association of Radio Industries and Businesses*

³ ATIS: *Alliance for Telecommunications Industry Solutions*

⁴ CCSA: *China Communications Standards Association*

⁵ ETSI: *European Telecommunications Standards Institute*

⁶ TTA: *Telecommunications Technology Association*

⁷ TTC: *Telecommunication Technology Committee*

⁸ Fuente: <<http://www.3gpp.org/3GPP-Logo-use>>

3GPP [83] es un conjunto de organizaciones de estandarización de telecomunicaciones, conocidas como "Socios de la Organización" que está conformado por:

- ARIB (Asociación de Industrias y Empresas de Radiocomunicaciones)
- ATIS (Alianza para Soluciones de la Industria de Telecomunicaciones)
- CCSA (Asociación de Estándares de Comunicaciones de China)
- ETSI (Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones)
- TTA (Asociación de Tecnología de Telecomunicaciones)
- TTC (Comité de Tecnología de Telecomunicación)

3GPP tenía como objetivo inicial elaborar especificaciones e informes técnicos para un sistema de tercera generación (3G) con base en la evolución de GSM y tecnologías de acceso de radio como UTRA (*Universal Terrestrial Radio Access*) tanto para FDD como TDD. En lo posterior fue modificado para que incluya el mantenimiento y desarrollo de especificaciones técnicas e informes técnicos de GSM con tecnologías de radio evolucionadas como GPRS y EDGE [83].

3GPP se divide en cuatro Grupos de Especificación Técnica (TSG) [86]:

- TSG Radio Access Network (RAN)
- TSG Service & Systems Aspects (SA)
- TSG Core Network & Terminals (CT)
- TSG GSM/EDGE Radio Access Network (GERAN)

3.2.1 PROCESO DE ESTANDARIZACIÓN EN 3GPP

El proceso de estandarización en 3GPP [2] inicia con el desarrollo de un documento de requerimientos, en el cual se especifican los objetivos a cumplir. Luego se determina la arquitectura del sistema, y varios grupos de trabajo participan en el desarrollo de las especificaciones detalladas como la interfaz y el protocolo de señalización.

LTE 3GPP define la evolución de la familia de estándares UMTS que soportan comunicaciones de voz y datos en conmutación de circuitos y conmutación de paquetes a sistemas todo-IP (*all-IP*).

3.2.1.1 Evolución de las versiones de tecnologías y sistemas 3GPP [93]

- *GSM* descrito en 3GPP Phase 1, Phase 2, Release 96, Release 97, Release 98.
- *GPRS* especificado en 3GPP Release 97.
- *EDGE* especificado en 3GPP Release 98.
- *UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)* especificado en 3GPP Release 99.
- *HSDPA (High Speed Downlink Packet Access)* definido en 3GPP Release 5.
- *HSUPA (High Speed Uplink Packet Access)* definido en 3GPP Release 6.
- *HSPA (HSDPA y HSUPA)* definido en 3GPP Release 7.
- *HSPA+* especificado en 3GPP Release 8, 9 y 10.
- *LTE* inició con 3GPP Release 8 y posteriormente 3GPP Release 9.
- *LTE-Advanced* especificado a partir de 3GPP Release 10.

3.3 LONG TERM EVOLUTION (LTE)

LTE [85] tuvo sus inicios en el año 2004, con el objetivo de mejorar el Acceso Radioeléctrico Terrestre Universal (UTRA, por sus siglas en inglés) y la optimización de la arquitectura de radio 3GPP. En las especificaciones de la *Serie 36* del 3GPP se define el Acceso Radioeléctrico Terrestre Universal Evolucionado (E-UTRA⁹, por sus siglas en inglés); basado totalmente en conmutación de paquetes. La primera versión de LTE es *3GPP Release 8*, la cual tiene como objetivos el incremento en la tasa de transmisión y mejora en la calidad de servicio, así también una mayor eficiencia en el sistema de conmutación de paquetes, facilidad de implementación y disminución en los costos.

LTE es desarrollado, junto con la evolución del sistema de arquitectura (*System Architecture Evolution, SAE*) que incluye la red EPC (*Evolved Packet Core*). Conformando LTE y SAE el Sistema de Paquetes Evolucionado (EPS) basado en conmutación de paquetes [66].

La interfaz radioeléctrica de LTE, está basada en el esquema de acceso múltiple OFDMA para DL y SC-FDMA para UL, opera en los modos dúplex FDD y TDD, utiliza tecnología *MIMO* con una configuración de antenas máx. 4×4 para DL. Son sistemas de baja latencia, utiliza ancho de banda adaptativo de hasta 20 MHz, la modulación utilizada es QPSK, 16-QAM, 64-QAM. La tasa de transmisión máxima es de aprox. 300 Mbps para DL y 170 Mbps para UL [85].

En alta movilidad la máxima rapidez soportada es de 120 km/h para obtener un desempeño óptimo en las comunicaciones; la máxima cobertura de la *celda* es de 30 km con una leve degradación [70].

⁹ E-UTRA: *Evolved Universal Terrestrial Radio Access*

3.4 LTE-ADVANCED

LTE-Advanced (*LTE Release 10 y posteriores*) incluye todas las características de *LTE Release 8 y 9*, e incorpora nuevas funcionalidades como *agregación de portadoras*, técnicas avanzadas *MIMO*, MultiPunto Coordinado (CoMP), Redes Heterogéneas y Retransmisión, que se tratarán más adelante. La cobertura de LTE-Advanced es de máximo 100 km, siendo óptimo 5 km y hasta 30 km con una mín. degradación en el *performance* [72].



Figura 3.2. Logotipo de LTE-Advanced¹⁰

3.4.1 FUNCIONAMIENTO TÉCNICO

LTE-Advanced es la tecnología de la interfaz radioeléctrica que cumple con los requerimientos de las IMT-Avanzadas establecidos por la UIT, y el cumplimiento de las especificaciones del funcionamiento técnico se detalla en el *Documento UIT-R IMT-ADV/8-E* [56].

3.4.1.1 Ancho de banda

LTE-Advanced soporta anchos de banda de: *1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz*, y con agregación de portadoras de 20 MHz para obtener anchos de banda de *40 MHz* hasta *100 MHz* (con máx. 5 “componentes de portadora” de 20 MHz).

¹⁰ Fuente: <<http://www.3gpp.org/IMG/pdf/lte-and-lte-advanced-logo-guidelines.pdf>>

3.4.1.2 Latencia

A) Latencia de plano de control

La latencia del plano de control en LTE *Release* 10, es el tiempo de transición del modo Idle al modo Conectado, considerando las latencias de la Red de acceso y Red central sin la latencia correspondiente de la interfaz S1. LTE-Advanced soporta varios mecanismos para disminuir la latencia [71, 72]:

- Combinación de solicitud de conexión RRC y Servicio NAS¹¹, que combina los mensajes a ser procesados en el *eNodeB* y el MME, disminuyendo la latencia aproximadamente a 20 ms.
- Reducción del procesamiento de retardos, la reducción es realizada en varios nodos.

En la Tabla 3.1 se representa el valor de la latencia de plano de control de LTE-Advanced, el cual ha sido definido de acuerdo con [71] y cumple con los requerimientos de las IMT-Avanzadas.

| Transición de estado | Latencia |
|--|----------|
| Modo <i>IDLE</i> a Modo <i>CONECTADO</i> | 50 ms |

Tabla 3.1. Latencia de plano de control para FDD y TDD [56]

B) Latencia de plano de usuario

La latencia de plano de usuario es fundamental que sea mínima, especialmente para servicios en tiempo real como videoconferencia; la latencia puede ser calculada de acuerdo a la señalización. Siendo el tiempo promedio entre la transmisión de un paquete de datos y la recepción del acuse de recibo (*acknowledgment*) en la capa física, también se considera la retransmisión HARQ. En LTE la latencia en la capa física del paquete de datos, al igual que en IEEE 802.16m es en un sentido, sea DL o UL siendo lo óptimo que sea menor a 5 ms

¹¹ NAS: *Non-Access Stratum*

[66]. La latencia de plano de usuario cumple con los requerimientos del UIT-R, siendo de 4.9 ms para TDD y de 4 ms para FDD [56].

3.4.1.3 Movilidad

LTE-Advanced soportará movilidad de hasta 350 km/h, como por ejemplo de usuarios que viajen en tren a gran velocidad, superando a la soportada en LTE *Release* 8, no obstante, su mejor desempeño será entre 0 y 10 km/h, los requerimientos de *handover* entre celdas deben ser óptimos para mantener la comunicación, por lo que la prestación de servicios tanto de voz como de datos no deben tener interrupción [66, 72], sin embargo se debe considerar que al alcanzar altas velocidades la calidad en la comunicación será inferior que la obtenida en baja movilidad.

Los valores de eficiencia espectral para los escenarios UIT-R *Indoor hotspot (InH)* y *Rural macro-cell (RMa)* son mostrados en la Tabla 3.2 en FDD y TDD, de acuerdo a lo establecido en [56]; las tasas de datos teóricas máximas alcanzadas son de 315 Mbps y 145 Mbps en baja y alta movilidad, respectivamente, con un ancho de banda de canal asumido de 100 MHz.

| Escenario | Métodos Dúplex | | Movilidad |
|------------|------------------|------------------|-----------|
| | FDD | TDD | |
| <i>InH</i> | 2.56-3.15 bps/Hz | 2.63-3.11 bps/Hz | baja |
| <i>RMa</i> | 1.22-1.45 bps/Hz | 1.03-1.38 bps/Hz | alta |

Tabla 3.2. Tasas de datos del enlace del canal de tráfico para FDD y TDD [56]

3.4.1.4 Handover [66]

Los procedimientos de *handover* en LTE son de dos tipos:

- Caso A: Procedimiento de *handover-S1*
- Caso B: Procedimiento de *handover-X2*

En la Fig. 3.3 se muestra el procedimiento para el caso A, el cual es efectuado al no tener el interfaz X2 entre dos *eNodeB*'s o al ser configurado el *eNodeB fuente* para que el procedimiento *handover* sea iniciado con un *eNodeB objetivo* en específico. El procedimiento consiste de una etapa de *preparación* en la Red Central (*Core*) siendo los recursos primeramente preparados, como siguiente etapa la *ejecución* y finalmente la etapa de *complemento*, siendo similar a la utilizada en UMTS. Se incluye el mensaje ‘*STATUS TRANSFER*’ transmitido desde el *eNodeB fuente* y es alineado con el mensaje ‘*STATUS TRANSFER*’ de X2 en el *eNodeB objetivo*, siendo un mismo *mensaje* para el UE. El mensaje ‘*HANDOVER NOTIFY*’ es enviado por el *eNodeB objetivo* una vez que su llegada es confirmada por el UE, es enviada por el MME para la actualización en el S-GW al *eNodeB objetivo*.

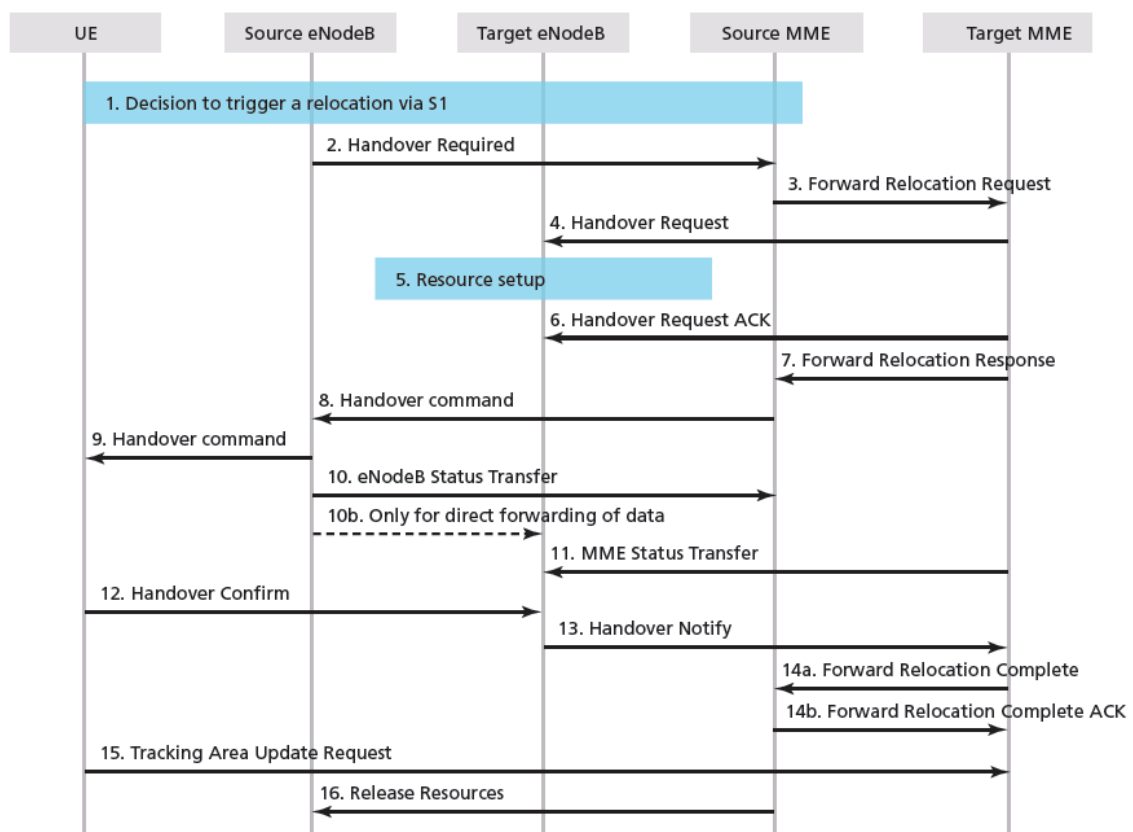


Figura 3.3. Procedimiento de handover-S1 [4]

En el caso B, el procedimiento de *handover* es realizado a través del interfaz X2 entre dos *eNodeB*'s (*fuentes* y *objetivos*) con la “preparación” previa, al final del

procedimiento, se informa al MME. El *eNodeB* transmite *mensajes de comando* al UE y mensajes '*STATUS TRANSFER*' al *eNodeB objetivo*, como se muestra en la Fig. 3.4.

La *Preparación múltiple* es una de las nuevas características con respecto a procedimientos de *handover* de sistemas 3GPP previos. En la cual el *eNodeB fuente* prepara el procedimiento de *handover* hacia varios *eNodeB's objetivo*, de los cuales al tener el indicado y de ser el caso que el UE falle, realiza un rápido restablecimiento y se conecta con otro *eNodeB* previamente seleccionado. En cualquier caso, el *eNodeB objetivo* transmite el mensaje '*RELEASE RESOURCE*' al *eNodeB fuente* [66].

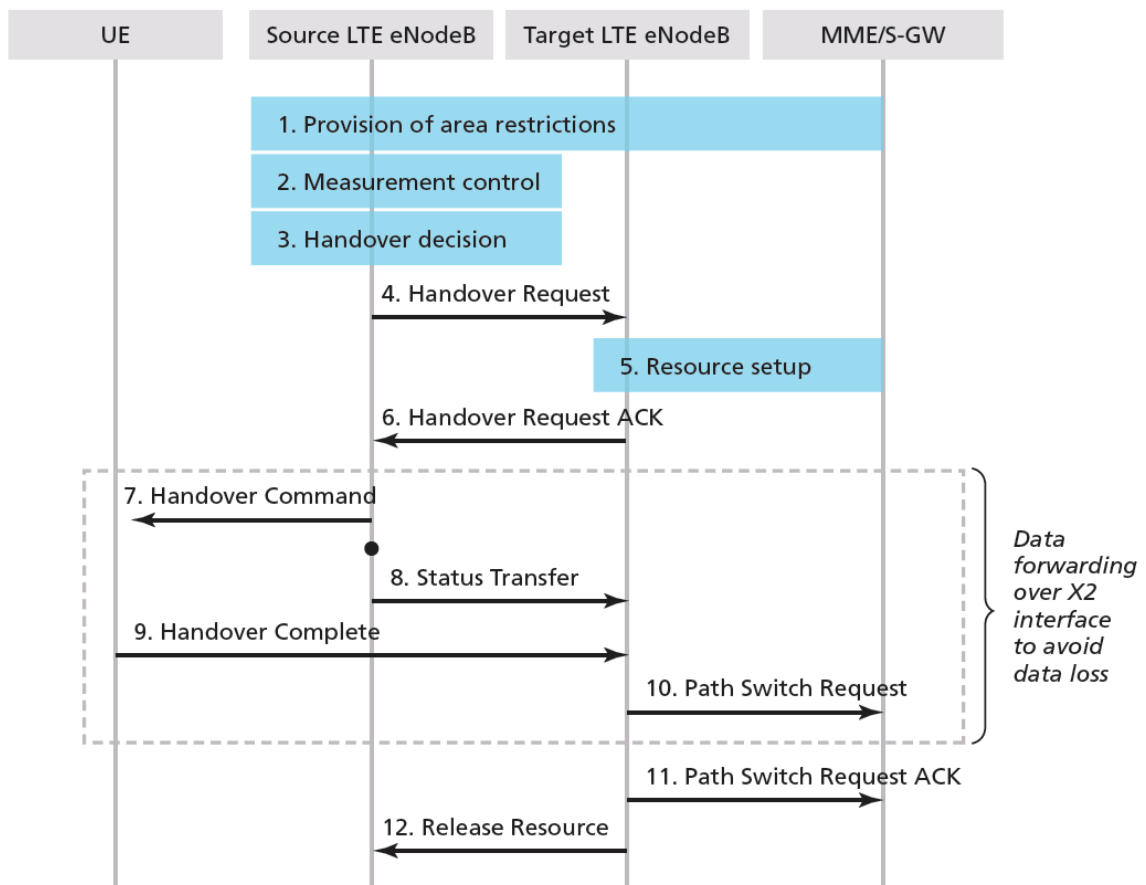


Figura 3.4. Procedimiento de handover-X2 [4]

En LTE, para el proceso *handover* con UMTS, es realizado mediante el Procedimiento de *handover-S1* indicado anteriormente, tomando en cuenta la no utilización de mensajes '*STATUS TRANSFER*'.

En la Tabla 3.3, se presentan los valores del tiempo de interrupción *handover* de acuerdo a lo descrito en [56] para los modos dúplex FDD y TDD, cumpliendo con los requerimientos de IMT-Advanced tanto para *inter-frecuencia* como para *intra-frecuencia*.

| Tipo de handover | Tiempo de interrupción |
|---|------------------------------|
| a) Intra-frecuencia | TDD: 12.5 ms FDD: 10.5 ms |
| b.1) Inter-frecuencia Dentro de una banda del espectro | TDD: 12.5 ms FDD: 10.5 ms |
| b.2) Inter-frecuencia Entre bandas del espectro | TDD: 12.5 ms FDD: 10.5 ms |

Tabla 3.3. Tiempo de interrupción handover [56]

3.4.1.5 Métodos Dúplex

El conjunto de tecnologías de la interfaz radioeléctrica (SRIT) de LTE-Advanced está conformado por: *RIT FDD* y *RIT TDD*, los cuales cumplen con los requerimientos establecidos por la UIT para las IMT-Avanzadas.

3.4.1.5.1 Tecnología de la Interfaz Radioeléctrica (RIT) FDD [66, 39]

La *RIT FDD* es la evolución de LTE FDD, opera en modo dúplex por división de frecuencia siendo su funcionamiento en espectro de frecuencias en pares (en portadoras UL y DL separadas) para evitar interferencias; opera tanto en FDD *full-*

duplex como en FDD *half-duplex (H-FDD)*. En la Tabla 3.4 se muestra las bandas de frecuencia de operación de LTE Release 10 para el modo dúplex FDD, las bandas 15 y 16 son utilizadas en Europa y fueron introducidas por la ETSI. En FDD, debido a la transmisión y recepción de señales en un instante de tiempo se emplea duplexores, los mismos que a través de filtros dividen en frecuencias diferentes las señales entrantes y salientes en la antena [66].

| Banda de operación | Transmisión UE UL [MHz] | Transmisión eNB DL [MHz] |
|--------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1 | 1920-1980 | 2110-2170 |
| 2 | 1850-1910 | 1930-1990 |
| 3 | 1710-1785 | 1805-1880 |
| 4 | 1710-1755 | 2110-2155 |
| 5 | 824-849 | 869-894 |
| 6 | 830-840 | 865-875 |
| 7 | 2500-2570 | 2620-2690 |
| 8 | 880-915 | 925-960 |
| 9 | 1749.9-1784.9 | 1844.9-1879.9 |
| 10 | 1710-1770 | 2110-2170 |
| 11 | 1427.9-1447.9 | 1475.9-1495.9 |
| 12 | 698-716 | 728-746 |
| 13 | 777-787 | 746-756 |
| 14 | 788-798 | 758-768 |
| 15 | Reservado | Reservado |
| 16 | Reservado | Reservado |
| 17 | 704-716 | 734-746 |
| 18 | 815-830 | 860-875 |
| 19 | 830-845 | 875-890 |
| 20 | 832-862 | 791-821 |
| 21 | 1447.9-1462.9 | 1495.9-1510.9 |
| 22 | 3410-3500 | 3510-3600 |

Tabla 3.4. Bandas de frecuencia de LTE-Advanced en FDD [71]

3.4.1.5.2 Tecnología de la Interfaz Radioeléctrica (RIT) TDD [66, 39]

La *RIT TDD* o *TD-LTE-Advanced* es la evolución de LTE TDD, opera en modo dúplex por división en el tiempo, permite flexibilidad de atribución de recursos en DL y UL; su funcionamiento es en un espectro de frecuencias no en pares (es decir, en portadoras UL y DL en una misma frecuencia) brindando altas tasas de datos y amplia eficiencia espectral, también permite incrementar el *throughput* del usuario en el borde de la *celda*. En la Tabla 3.5 se muestra las bandas de frecuencia de operación de LTE *Release* 10 para el modo dúplex TDD.

El diseño de los equipos es menos complejo que en FDD debido a que no utilizan duplexores, disminuyendo sus costos. La conmutación entre las funciones de transmisión y recepción en el equipo de usuario se establece de UL a DL, y en el *eNodeB* de DL a UL; para evitar el solapamiento, se emplea un período de guarda entre transmisión y recepción en el *eNodeB* para asegurar sincronización [66, 9].

| Banda de operación | Transmisión UE UL [MHz] | Transmisión eNB DL [MHz] |
|--------------------|-------------------------|--------------------------|
| 33 | 1900-1920 | 1900-1920 |
| 34 | 2010-2025 | 2010-2025 |
| 35 | 1850-1910 | 1850-1910 |
| 36 | 1930-1990 | 1930-1990 |
| 37 | 1910-1930 | 1910-1930 |
| 38 | 2570-2620 | 2570-2620 |
| 39 | 1880-1920 | 1880-1920 |
| 40 | 2300-2400 | 2300-2400 |
| 41 | 3400-3600 | 3400-3600 |

Tabla 3.5. Bandas de frecuencia de LTE-Advanced en TDD [71]

3.5 ARQUITECTURA DE RED [66]

LTE al utilizar conmutación de paquetes, provee conectividad IP entre el equipo de usuario y la Red de paquetes de datos (PDN¹², por sus siglas en inglés) para proporcionar mayores tasas de transmisión. De igual manera implica una evolución en la Red de acceso radioeléctrico terrestre universal (E-UTRAN¹³), que junto con el sistema SAE¹⁴ comprenden la Red Central de Paquetes Evolucionado (EPC¹⁵) [66].

El sistema EPS (*Evolved Packet System*) está conformado por E-UTRAN y SAE, en el cual el tráfico es direccionado al equipo de usuario a través de la PDN permitiendo acceso a Internet, entre otros servicios basados en IP; también soporta servicios de voz IMS con VoIP, y permite el *interfuncionamiento* con servicios de voz basados en conmutación de circuitos. En la Fig. 3.5 se representa la Arquitectura de Red LTE, la misma que está conformada básicamente por la Red Central o Core (EPC), la Red de Acceso (E-UTRAN) y el Equipo de Usuario (UE).

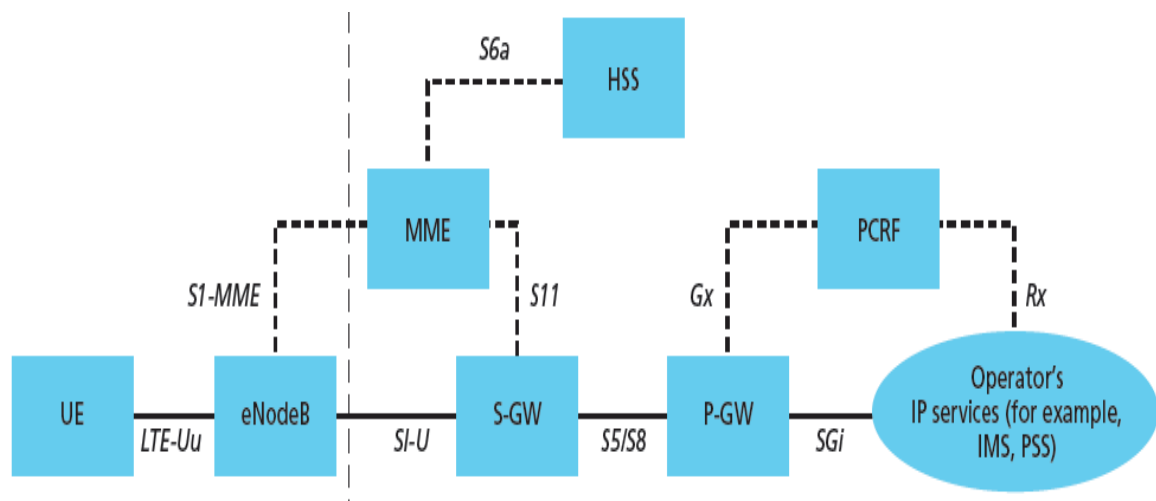


Figura 3.5. Arquitectura de Red de LTE [4]

¹² PDN: *Packet Data Network*

¹³ E-UTRAN: *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*

¹⁴ SAE: *System Architecture Evolution*

¹⁵ EPC: *Evolved Packet Core*

En LTE-Advanced se incorporan nuevas funcionalidades como requerimientos regulatorios, llamadas de emergencia y ubicación del terminal móvil, también lo referente al mejoramiento en *celdas* pequeñas como *pico-celdas* y *femto-celdas* que son controladas por *pico-eNodeB* y *HeNB (Home eNodeB)*, respectivamente. El *pico-eNodeB* por lo general controla varias *celdas* pequeñas, las mismas que son desplegadas en menor cantidad comparado con *macro-celdas*. Por su parte, el *HeNB* controla únicamente una *celda* y su despliegue es de acuerdo al usuario final solicitante. Las *femto-celdas* son celdas de pequeñas dimensiones que están limitadas a un grupo específico de usuarios, la transmisión es en baja potencia comparada con *pico-celdas* y su cobertura es generalmente en una casa u oficina [66].

En la Fig. 3.6 se muestra la arquitectura lógica de “HeNB”, el *HeNB Gateway (HeNB GW)* realiza las funciones de administración del *HeNB*, está conectado con el S-GW a través del interfaz S1-U o también se puede conectar directamente el *HeNB* en el Plano de Usuario con el S-GW, cabe indicar que los *HeNB* no están interconectados entre sí con el interfaz X2 como los *eNodeB*, como se verá más adelante. El *HeNB GW* también tiene la función de concentrador en el Plano de Control, que es conectado a través del interfaz S1-MME con la entidad MME, la interfaz S1 en la Fig. 3.6 representa las interfaces S1-MME y S1-U en conjunto [66, 62].

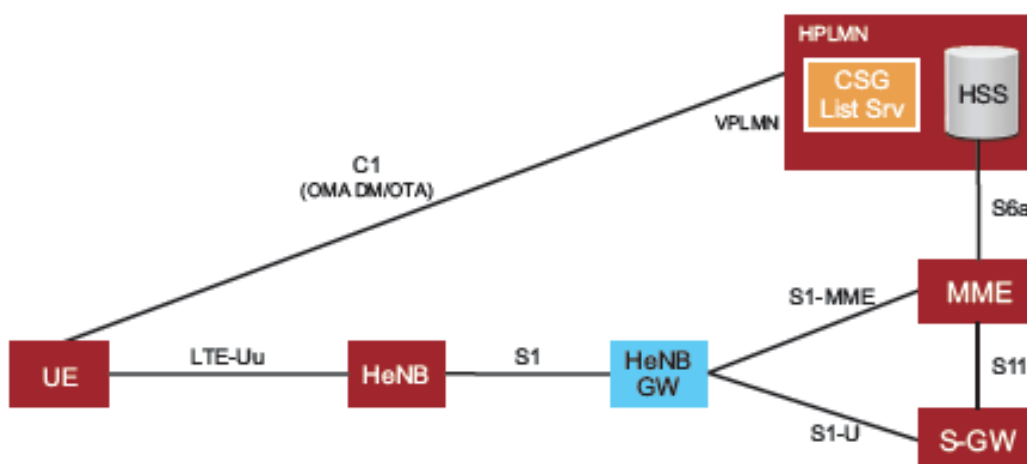


Figura 3.6. Arquitectura básica HeNB¹⁶

¹⁶ Fuente: <<http://www.polarisnetworks.net/henb-gw.html>>

El *HeNB* conectado a un EPC tiene funcionalidades similares que un *eNodeB*, con la diferencia de que el *HeNB* soporta únicamente una celda, su operación es en tres modos [66]:

- Modo de acceso cerrado, presta servicios a uno o más grupos de usuarios específicos.
- Modo de acceso híbrido, permite el acceso a todos los usuarios de un grupo específico, pero ofrece un trato preferencial a usuarios miembros del CSG (Grupo cerrado de suscriptores) que se tratará más adelante.
- Modo de acceso abierto, es similar a un *eNodeB*.

3.5.1 EVOLVED PACKET CORE (EPC) [66, 2]

La implementación de nuevas tecnologías que permitan mejoras en la movilidad, así también la disminución en las latencias, ha dado lugar a la Red central de paquetes evolucionado (EPC) que disminuye el número de elementos de red respecto a sistemas 3GPP antecesores, facilitando su desempeño y teniendo como objetivo la no complejidad en el sistema y permitiendo su funcionamiento con un espectro flexible.

Sus principales componentes son [66]:

- *PDN Gateway (P-GW)*

Asigna direcciones IP a los equipos de usuario y brinda servicios QoS, también adapta las políticas de control de PCRF de acuerdo con perfiles de usuarios para el acceso a diferentes redes, adicionalmente asegura el *interfuncionamiento* con redes no-3GPP como WiMAX o redes 3GPP2.

- *Serving Gateway (S-GW)*

El S-GW permite el flujo de paquetes IP y asegura la movilidad del terminal móvil al pasar de un *eNodeB* a otro, adicionalmente ejecuta funciones administrativas

en una red no local. También asegura el *interfuncionamiento* con otras tecnologías 3GPP como UMTS.

- *Entidad de Administración de Movilidad (MME¹⁷)*

Realiza el control a los procedimientos de señalización entre la Red Central (CN¹⁸) y el terminal móvil, administra el estado Idle del UE, así como identidades o asignaciones. Entre sus principales funciones está el establecer la conectividad, y seguridad entre la red y el equipo de usuario.

- *Centro de localización móvil de servicio evolucionado (E-SMLC¹⁹)*

Realiza la coordinación y programación de recursos con el fin de localizar el equipo de usuario en la red E-UTRAN.

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

Administra la realización de políticas de control en el P-GW, así como de la calidad de servicio (QoS).

- *Home Subscriber Server (HSS)*

Contiene las bases de datos de los suscriptores e información de redes PDN que el usuario accede, realiza procedimientos de autenticación y autorización, adicionalmente provee información de localización de la estación suscriptora y también posee información de identificación del MME en el cual el usuario es registrado [66, 2].

3.5.2 RED DE ACCESO E-UTRAN [66, 2]

Como se muestra en la Fig. 3.7, la arquitectura E-UTRAN está formada por *eNodeB's* interconectados entre sí a través del interfaz X2, que también cumple

¹⁷ MME: *Mobility Management Entity*

¹⁸ CN: *Core Network*

¹⁹ E-SMLC: *Evolved Serving Mobile Location Centre*

con la función de Gestión de recursos radioeléctricos (*RRM*²⁰, por sus siglas en inglés). Por otra parte, el interfaz S1 conecta al *eNodeB* con la EPC en dos interfaces: Plano de Usuario (*S1-u*) y Plano de Control (*S1-c*), por lo que en la Red Central, la Entidad de gestión de movilidad (MME) se conecta a través del interfaz de Plano de Control *S1-c* y el *Gateway* de servicio (S-GW) a través del interfaz de Plano de Usuario *S1-u*.

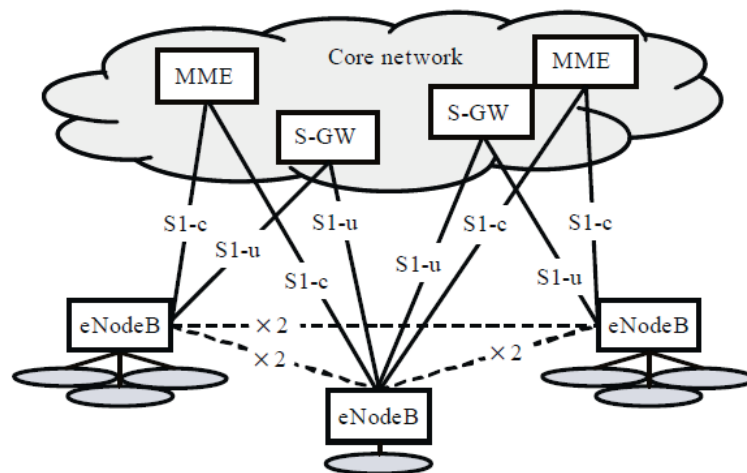


Figura 3.7. Acceso radioeléctrico E-UTRAN [39]

El *eNodeB*, permite la comunicación entre usuarios de una misma red y realiza las siguientes funciones:

- Gestión de los recursos radioeléctricos, administrando todo lo referente a radio como la gestión de movilidad y control de admisión radioeléctrica.
- Encriptación de la información, por lo que brinda seguridad en las comunicaciones.
- Compresión de la Cabecera (*Header*), para un uso más eficiente de la interfaz radioeléctrica en la transmisión de paquetes IP.
- Ruteo de datos en el Plano de Usuario, lo que implica una mejor eficiencia y disminución de latencias.

²⁰ RRM: *Radio Resource Management*

3.5.3 EQUIPO DE USUARIO (UE) [66]

Es el dispositivo que proporciona al suscriptor conectividad con el sistema LTE-Advanced, el mismo que puede ser *smartphone*, PDA's, *Tablets* o *modems* que permitan accesibilidad a sus redes. El UE se conecta con el *eNodeB* a través del interfaz *LTE-Uu*.

También es importante considerar que los UE proveen distintas capacidades de acuerdo con la demanda de mercado, cada uno con sus prioridades como por ejemplo soportar altas tasas de datos para las distintas aplicaciones, costo del UE, tiempo de vida de la batería, entre otros.

En la Tabla 3.6 se muestran las categorías de los equipos de usuario tanto de LTE *Release 8* como de *Release 10*. Por su parte, en *Release 8* los UE's fueron diseñados en cinco categorías de acuerdo al costo de los terminales y capacidades. En *Release 10* se implementan tres nuevas categorías de UE (cat. 6, 7 y 8) de acuerdo a los requerimientos de LTE-Advanced mejorando así sus capacidades, por ejemplo en *downlink* soportan la modulación 64-QAM, y en *uplink* únicamente soporta el UE de cat. 8.

| PARÁMETROS | Cat. Release 8 | | | | | Cat. Release 10 | | |
|--------------------------------|----------------|----|-----|-----|-----|-----------------|-----|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Tasa de datos aprox. DL [Mbps] | 10 | 50 | 100 | 150 | 300 | 300 | 300 | 3000 |
| Tasa de datos aprox. UL [Mbps] | 5 | 25 | 50 | 50 | 75 | 50 | 100 | 1500 |
| Número de capas MIMO (DL) | 1 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 4 | 8 |

Tabla 3.6. Categorías de UE en LTE Release 8 y Release 10 [66]

3.6 CAPA FÍSICA [39, 73]

La capa física (PHY) tiene entre sus funciones, modular y demodular los canales físicos, depende principalmente del ambiente radioeléctrico como de los requerimientos de eficiencia del espectro. Realiza la codificación y decodificación FEC de los canales de transporte, a través de los cuales la capa física provee servicios a la capa MAC. Efectúa la sincronización de frecuencia y tiempo, también realiza el procesamiento de radiofrecuencia (RF) [73].

3.6.1 MÉTODOS DE ACCESO MÚLTIPLE

LTE-Advanced utiliza el esquema de acceso múltiple basado en OFDMA²¹ con prefijo cíclico para el enlace descendente y SC-FDMA²² con prefijo cíclico para el enlace ascendente.

3.6.1.1 OFDMA [66, 2]

OFDMA se basa en la transmisión de múltiples subportadoras ortogonales moduladas independientemente en un instante de tiempo y se asigna un grupo de forma aleatoria a cada usuario, obteniendo una mayor eficiencia. Es utilizado en sistemas de comunicaciones multiusuario, en el cual los terminales móviles pueden recibir datos simultáneamente, proporcionando altas tasas de datos y canales de frecuencia selectivos.

En OFDMA se utiliza prefijos cíclicos evitando la interferencia entre símbolos, por lo cual en DL, la separación entre subportadoras (Δf) es de 15 kHz y el *prefijo cíclico normal* es de aprox. 4.7 μ s en una cobertura de hasta 700 m permitiendo alta movilidad, adicionalmente se puede utilizar un *prefijo cíclico extendido* de aprox. 16.7 μ s en una cobertura de 2.5 km empleado principalmente en *celdas de área suburbana y rural*, en sistemas de transmisión *multicelda* como la Red de

²¹ OFDMA: Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal

²² SC-FDMA: *Single-Carrier Frequency Division Multiple Access*

difusión *multimedia* de una frecuencia (MBSFN²³) donde el terminal móvil recibe señales de varias celdas, evitando la interferencia inter-símbolo (ISI) [66, 2].

3.6.1.2 SC-FDMA [66]

En LTE uno de los objetivos en el enlace ascendente es reducir la interferencia entre *celdas*, además de utilizar un bajo *Peak-to-Average Power Ratio (PAPR)*²⁴ minimizando el costo y el consumo de potencia del PA²⁵ en el UE, también incrementa la tasa de datos en el borde de la *celda*.

SC-FDMA distribuye el ancho de banda en múltiples sub-portadoras ortogonales preservando la selectividad de frecuencia en los canales utilizando prefijo cíclico (CP) para evitar la interferencia inter-símbolo (ISI).

LTE utiliza SC-FDMA en el dominio de la frecuencia (conocido como *DFT-S-OFDM*²⁶) que tiene características similares a OFDMA, por lo que puede utilizar parámetros como los manejados en el enlace descendente como el espaciamiento de sub-portadora, la longitud del prefijo cíclico, entre otros [66, 2].

La señal es modulada en una sub-portadora, transmitiendo simultáneamente todos los datos, las sub-portadoras transmitidas en SC-FDMA son moduladas en una componente de cada símbolo de datos, siendo la característica principal de SC-FDMA para una portadora (*single carrier*).

En LTE *Release* 10 existen mejoras en cuanto al método de acceso múltiple en UL con respecto a las versiones predecesoras 8 y 9. Emplea un esquema SC-FDMA mejorado, por lo que se plantea la utilización de los esquemas *clustered DFT-S-OFDM* y SC-FDMA múltiple. Por una parte, *clustered DFT-S-OFDM* se basa en una operación DFT desde un *cluster* a varios *clusters* dando lugar a una

²³ MBSFN: *Multicast Broadcast Single Frequency Network*

²⁴ PAPR: Es la relación entre la potencia máxima y promedio, e indica la magnitud máxima de la forma de onda transmitida [69]

²⁵ PA: Amplificador de Potencia (*Power Amplifier*)

²⁶ DFT-S-OFDM: *Discrete Fourier Transform-Spread-OFDM*

forma de onda con un bajo CM, y por otra, SC-FDMA múltiple se basa en varias operaciones DFT, dando lugar a una forma de onda con mayores niveles de CM con respecto a *clustered DFT-S-OFDM* con un mismo número de *clusters*. Como consecuencia de los esquemas considerados, en LTE-Advanced se utiliza el esquema *clustered DFT-S-OFDM* para un máximo de dos *clusters* con un equipo de usuario *Release 10* [66].

Similar que en DL, la trama radioeléctrica en *uplink* es de 10 ms y está conformada por 10 subtramas de 1 ms; la separación entre sub-portadoras es de 15 kHz y utiliza *prefijo cíclico normal* de aprox. 4.7 μ s y *prefijo cíclico extendido* de aprox. 16.7 μ s.

3.6.2 ESTRUCTURA DE TRAMA

En 3GPP LTE la duración de una trama radioeléctrica es de 10 ms para transmisiones DL y UL. Cada trama de LTE-Advanced en el dominio del tiempo está compuesta por 10 subtramas de 1 ms y cada *subtrama* consta de dos intervalos (*time slots*) de 0.5 ms cada uno, a su vez cada intervalo contiene símbolos OFDMA [39].

Soporta dos tipos de estructura de trama:

- *Tipo 1*: utilizada en esquemas dúplex FDD
- *Tipo 2*: utilizada en esquemas dúplex TDD

En la Fig. 3.8 se muestra las tramas de *Tipo 1* y *Tipo 2* respectivamente.

a) La trama de *Tipo 1* (con funcionamiento FDD) tiene una duración de 10 ms, soporta dos frecuencias de portadora:

- f_{UL} para la transmisión en el enlace ascendente (UL)
- f_{DL} para la transmisión en el enlace descendente (DL)

Las transmisiones DL y UL están separadas en el dominio de la frecuencia, la trama está dividida en 10 subtramas de 1 ms para DL y UL [74].

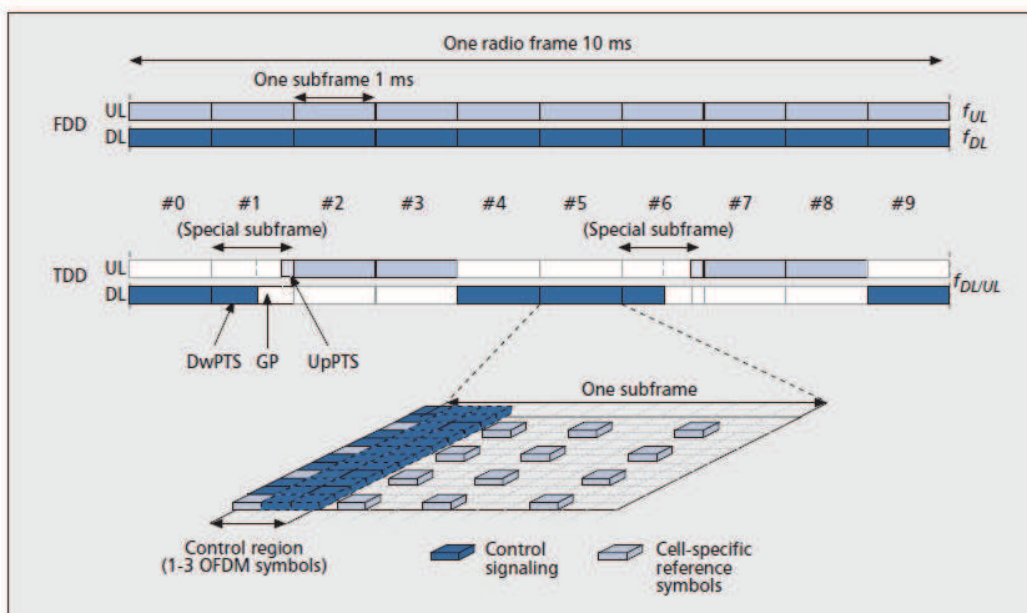


Figura 3.8. Estructura de trama en FDD y TDD [61]

- b) La trama de *Tipo 2* (con funcionamiento TDD) cuenta con una frecuencia de portadora para transmisiones DL y UL separadas en el tiempo. Adicionalmente consta de 8 subtramas con 1 ms de longitud cada una, y cuenta con dos *subtramas especiales* que proveen un *tiempo de guarda* para la conmutación entre DL y UL, la *subtrama especial* tiene un período de duración de 1 ms y está localizada en la posición #1 y #6 como se muestra en la Fig. 3.8, está conformada por tres campos: $UpPTS^{27}$ (*Uplink Pilot Time Slot*), $DwPTS^{28}$ (*Downlink Pilot Time Slot*) y GP^{29} es el período de guarda [74].

La coexistencia en sistemas LTE TDD con “sistemas TDD no-LTE” es posible mediante la alineación de puntos de conmutación con la configuración de la *subtrama especial* y asimetría adecuados [39].

²⁷ UpPTS: Es un *slot* de tiempo en la subtrama especial utilizado en UL, tiene la longitud de 1 o 2 símbolos SC-FDMA y es utilizado en el canal RACH o en SRS [67]

²⁸ DwPTS: Es un *slot* de tiempo en la subtrama especial utilizado en DL, tiene una longitud variable, conforme los períodos de conmutación DL-UL configurados [67]

²⁹ GP: *Guard Period*

3.6.3 MODULACIÓN / CODIFICACIÓN [39, 66]

El procesamiento de codificación y modulación del enlace descendente se representa en la Fig. 3.9. Para la transmisión de datos, se añade CRC a los bloques de transporte en el enlace descendente (o ascendente) utilizando Codificación Turbo con velocidad mínima de 1/3 complementada por HARQ para detección y corrección de errores, y se realiza el ajuste de velocidad. El Código Turbo fue previamente estandarizado en UMTS y mejorado en versiones 3GPP posteriores, brindando mayores tasas de datos soportadas en LTE y LTE-Advanced [66].

Los bits codificados son aleatorizados en el canal físico para luego ser modulados y después asignados a distintas capas de transmisión; los esquemas de modulación soportados para *downlink* y *uplink* son: QPSK, 16-QAM y 64-QAM, para todas las categorías de UE tratadas anteriormente, tomando en cuenta que 64-QAM en UL es soportado únicamente por el UE categoría 8.

Para la transmisión, se realiza la correspondencia de símbolos de la modulación precodificados con los recursos de tiempo-frecuencia.

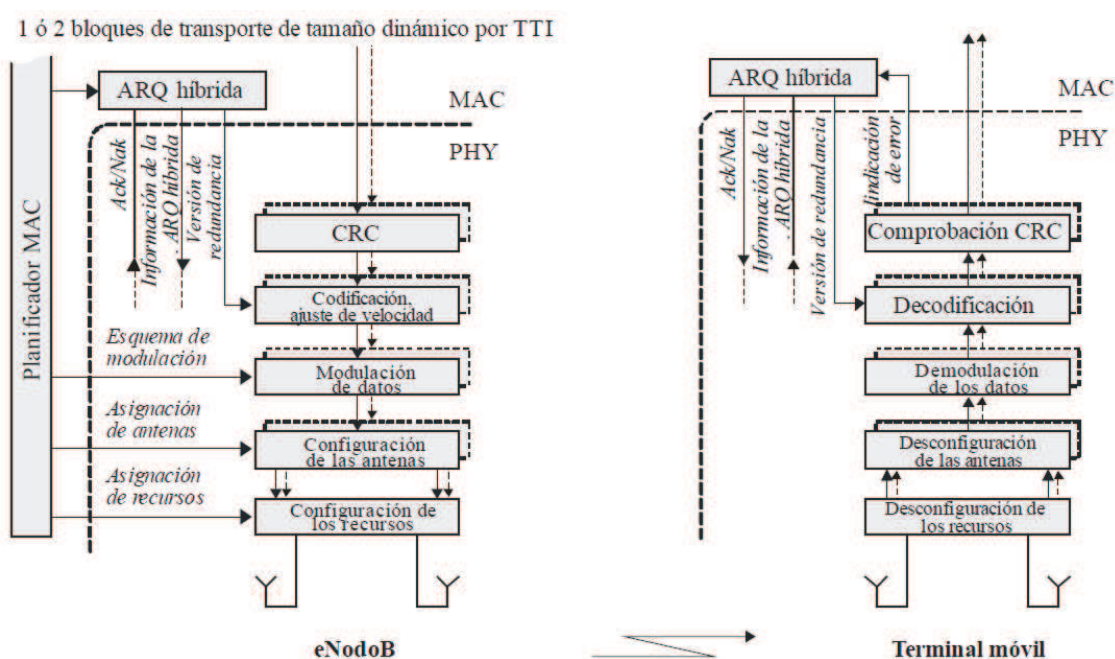


Figura 3.9. Procesamiento de la capa física para DL-SCH [39]

3.6.4 TÉCNICAS AVANZADAS DE ANTENA [66]

LTE-Advanced utiliza técnicas multiantena tanto para *downlink* como para *uplink*. Las mismas que tienen como objetivo soportar elevadas tasas de transmisión, así como alta eficiencia espectral para cumplir con los requerimientos de las IMT-2000 y las IMT-Avanzadas; por lo cual, LTE *Release* 8 y luego en versiones posteriores utilizan las técnicas *MIMO*. El esquema *MIMO* de un usuario (*SU-MIMO*) es desarrollado principalmente en LTE *Release* 8 y el esquema *MIMO* multi-usuario (*MU-MIMO*) en los *Releases* 9 y 10 [66].

3.6.4.1 Downlink MIMO [66, 90]

En LTE-Advanced se amplía el número de capas de transmisión siendo máximo de 8 y soporta el esquema *MU-MIMO* que permite incrementar la eficiencia espectral. En LTE *Release* 10 se incorpora el *Modo de Transmisión 9 (TM9)* a los ocho establecidos en las versiones 8 y 9 de LTE incrementando el número de *capas* de 4 a 8; adicionalmente en el *Release* 11 se incluye el *Modo de Transmisión 10 (TM10)* dando lugar a la implementación de la transmisión/recepción MultiPunto Coordinado (CoMP) [91].

Se utiliza los modos de operación en bucle abierto (*open loop*) y bucle cerrado (*closed loop*), los mismos que son empleados para realimentación en el equipo de usuario de acuerdo a la movilidad o condiciones de radio. También provee una nueva característica, la cual a través de la diversidad de transmisión en bucle cerrado es especialmente utilizada en canales de mala calidad o escenarios con baja movilidad [3].

LTE *Release* 10 tiene una nueva estructura de Señales de Referencia (RS), las mismas que son utilizadas por los equipos de usuario (UE) para la demodulación de los datos; también se estima el desempeño del canal, por lo cual el UE obtiene

la Información del estado de canal (CSI³⁰, por sus siglas en inglés) dando lugar al nuevo Punto de referencia CSI-RS que sondea el canal obteniendo información de su calidad en distintas frecuencias asignadas a un terminal móvil [66, 3].

LTE-Advanced en DL puede ocupar 1, 2, 4 u 8 antenas transmisoras en el *eNodeB*, y 2, 4 u 8 antenas receptoras en el UE, siendo la configuración máxima de 8 antenas transmisoras y 8 antenas receptoras (máx. 8×8 para DL).

3.6.4.2 Uplink MIMO

Para mayores tasas de datos en UL de acuerdo con lo establecido para sistemas 4G, LTE-Advanced emplea el esquema *SU-MIMO* utilizando multiplexación espacial; uno de los objetivos de *SU-MIMO* es la compatibilidad de LTE *Release* 10 con versiones anteriores (8 y 9) y mantener un bajo *cubic metric*³¹ (CM), adicionalmente utiliza los modos de bucle abierto y bucle cerrado [3].

En LTE *Release* 10, las señales de referencia DM-RS³² y SRS³³ son mejoradas respecto a *Release* 8, así como el incremento de hasta 4 capas espaciales y el mejoramiento en el canal de sondeo.

Para la recepción de datos y control se realiza la estimación del canal a través de la Señal de Referencia DM-RS ortogonal, lo que permite el proceso de demodulación, reduciendo la complejidad de estimación del canal y dando lugar a la precodificación de DM-RS igual que el canal PUSCH. La Señal de Referencia de Sondeo (SRS) soporta recursos dinámicos en UL. En *Release* 8, el sondeo es realizado desde una antena transmisora, por otra parte, en *Release* 10 el sondeo es realizado desde múltiples antenas UL [66, 68].

³⁰ CSI: *Channel State Information*

³¹ Parámetro definido como la comparación entre la potencia cúbica (de tercer orden) de una señal específica con una de referencia [3]

³² DM-RS: *DeModulation Reference Signals*

³³ SRS: *Sounding Reference Signals*

La configuración de antenas para UL es de máximo 4 antenas transmisoras y 4 antenas receptoras (4×4).

3.6.5 CONTROL DE POTENCIA

3.6.5.1 Control de potencia en el enlace ascendente [66]

El control de potencia en una red móvil celular presenta diferentes niveles de transmisión. Las principales características del control de potencia en el enlace ascendente son las siguientes:

- Mantener óptima la calidad de servicio (QoS)
- Maximizar el tiempo de vida de la batería del terminal móvil
- Disminuir la interferencia *inter-celda*

LTE emplea control de potencia en bucle abierto (OLPC³⁴) y en bucle cerrado (CLPC³⁵). En CLPC se requiere de realimentación para la estimación de potencia en la transmisión; en tanto OLPC se basa en la estimación de la pérdida de trayectoria.

El control de potencia UL en sistemas LTE-Advanced, define la potencia promedio de un símbolo *DFT-S-OFDM* transmitido en el canal físico, incrementando la eficiencia del amplificador de potencia en el UE. Así también, al emplear agregación de portadoras, el control de potencia UL actúa de forma independiente para cada componente de portadora. En LTE *Release* 10 se emplea *PHR*³⁶ para informar al *eNodeB* en servicio, de los niveles de potencia máxima y estimada del UE para la transmisión a través de PUSCH, o a través de PUSCH y PUCCH conjuntamente, para lo cual hay dos tipos de PHR a ser considerados: En el Tipo 1, únicamente se considera la potencia de transmisión PUSCH, y el Tipo 2, indica la potencia de PUSCH y PUCCH [66, 39].

³⁴ *Open-loop power control*

³⁵ *Closed-loop power control*

³⁶ *PHR: Power Headroom Reporting*

En las figuras 3.10 y 3.11 se muestra la configuración del canal descendente y ascendente, respectivamente.

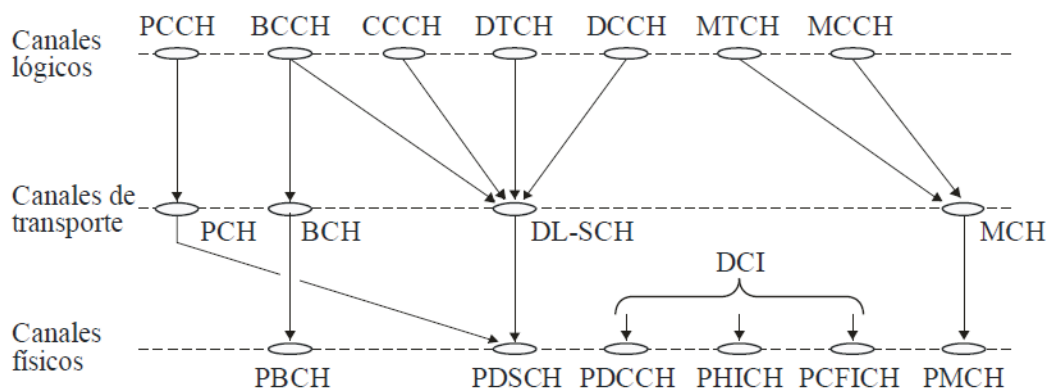


Figura 3.10. Configuración del canal descendente [39]

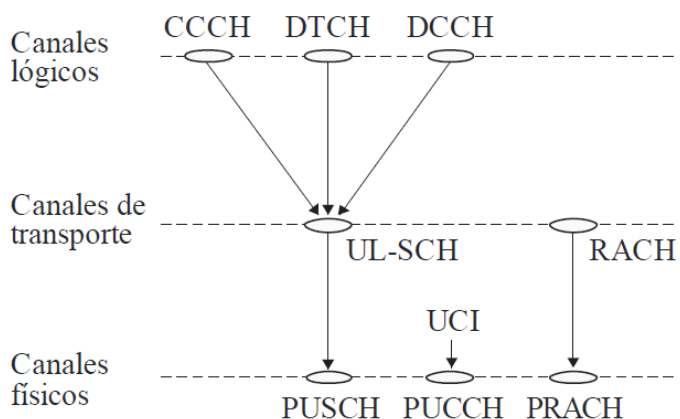


Figura 3.11. Configuración del canal ascendente [39]

3.6.6 CANALES FÍSICOS [39]

En las Tablas 3.7 y 3.8 se muestran los canales físicos correspondientes a los enlaces descendente y ascendente:

| Canales | Descripción |
|----------------------|--|
| PDSCH ³⁷ | Utilizado para la transmisión de los servicios de datos en el Plano de Usuario y Plano de Control |
| PMCH ³⁸ | Utilizado para la transmisión de servicios de difusión en el Plano de Usuario y Plano de Control por las subtramas MBSFN |
| PDCCH ³⁹ | Utilizado para la transmisión de información de control |
| PBCH ⁴⁰ | Utilizado para transportar celdas, así como información específica del sistema |
| PCFICH ⁴¹ | Indica al equipo de usuario (UE) el formato de control de la subtrama actual |
| PHICH ⁴² | Transporta la información de acuse de recibo positivo (ACK) o acuse de recibo negativo (NAK) de las transmisiones del enlace ascendente recibidas por el <i>eNodeB</i> |

Tabla 3.7. Canales físicos en el enlace descendente [39]

| Canales | Descripción |
|---------------------|---|
| PRACH ⁴³ | Utiliza un preámbulo para la activación de un procedimiento de acceso aleatorio en el <i>eNodeB</i> |
| PUSCH ⁴⁴ | Transporta datos de usuario e información de control |
| PUCCH ⁴⁵ | Transporta información de control |

Tabla 3.8. Canales físicos en el enlace ascendente [39]

3.7 CANALES UTILIZADOS EN LA CAPA MAC

3.7.1 CANAL DE TRANSPORTE [39]

La capa MAC utiliza los servicios de la capa física por medio de los *canales de transporte*, los cuales definen como se transmite la información por la interfaz radioeléctrica y con qué características.

³⁷ PDSCH: *Physical Downlink Shared Channel*

³⁸ PMCH: *Physical Multicast Channel*

³⁹ PDCCH: *Physical Downlink Control Channel*

⁴⁰ PBCH: *Physical Broadcast Channel*

⁴¹ PCFICH: *Physical Control Format Indicator Channel*

⁴² PHICH: *Physical Hybrid ARQ Indicator Channel*

⁴³ PRACH: *Physical Random Access Channel*

⁴⁴ PUSCH: *Physical Uplink Shared Channel*

⁴⁵ PUCCH: *Physical Uplink Control Channel*

Tipos de canal de transporte en *downlink*:

a) Canal de difusión (BCH⁴⁶)

El canal BCH tiene un formato fijo predefinido, es utilizado para la difusión en el área de cobertura de la *celda*. Utilizado para la transmisión del bloque de información maestro (MIB) del sistema BCCH.

b) Canal de radiobúsqueda (PCH⁴⁷)

El canal PCH se utiliza para transmitir información de radiobúsqueda del canal lógico PCCH, y también permite el ahorro de energía de la batería del UE, debido a que se activa en instantes determinados.

c) Canal multidifusión (MCH⁴⁸)

El canal MCH soporta el MBMS⁴⁹ (*Multimedia Broadcast/Multicast Service*), también un formato de transporte semiestático y planificación semipermanente.

d) Canal compartido del enlace descendente (DL-SCH⁵⁰)

El canal DL-SCH en LTE-Advanced es utilizado para la transmisión de datos en DL, soporta HARQ, adaptación de velocidad dinámica y recepción discontinua (*DRX*).

Tipos de canal de transporte en *uplink*:

a) Canal compartido del enlace ascendente (UL-SCH⁵¹)

El canal UL-SCH en LTE-Advanced es utilizado para la transmisión de datos en UL, soporta HARQ y adaptación de velocidad dinámica.

⁴⁶ BCH: *Broadcast Channel*

⁴⁷ PCH: *Paging Channel*

⁴⁸ MCH: *Multicast Channel*

⁴⁹ MBMS: *Difusión Multimedia/Servicio Multidifusión*

⁵⁰ DL-SCH: *Downlink Shared Channel*

⁵¹ UL-SCH: *Uplink Shared Channel*

b) Canal de acceso aleatorio (RACH⁵²)

El canal RACH es utilizado en el enlace ascendente para responder al mensaje de radiobúsqueda.

3.7.2 CANAL LÓGICO [39]

La capa MAC *ofrece servicios* al Control de Radioenlace (RLC⁵³) utilizando *canales lógicos* de acuerdo al tipo de información que se transporta, están formados por el *canal de control* y *canal de tráfico*.

3.7.2.1 Canal de control

El canal de control es utilizado para transmitir información de control y la configuración para el funcionamiento del sistema LTE-Advanced.

El canal de control está formado por:

a) Canal de control de difusión (BCCH⁵⁴)

El canal BCCH es utilizado en el canal descendente para información de control en sistemas de difusión.

b) Canal de control de radiobúsqueda (PCCH⁵⁵)

El canal PCCH es utilizado en el canal descendente para la notificación de variaciones de información del sistema y la radiobúsqueda del equipo de usuario (UE) cuando la red no conoce su posición.

c) Canal de control común (CCCH)

El canal CCCH es utilizado en el canal descendente y ascendente para la transmisión de información entre el equipo de usuario y la red, al no existir conexión RRC (Control de recursos radioeléctricos) del equipo de usuario.

⁵² RACH: *Random Access Channel*

⁵³ RLC: *Radio Link Control*

⁵⁴ BCCH: *Broadcast Control Channel*

⁵⁵ PCCH: *Paging Control Channel*

d) Canal de control dedicado (DCCH⁵⁶)

El canal DCCH es utilizado en el canal descendente y ascendente para la transmisión de la información de control hacia el UE (para DL) o desde el UE (para UL), al existir conexión RRC del equipo de usuario.

e) Canal de control multidifusión (MCCH⁵⁷)

El canal MCCH es utilizado en el canal descendente para la transmisión de la información de control requerida para la recepción del MTCH⁵⁸ (Canal de tráfico multidifusión).

3.7.2.2 Canal de tráfico

El canal de tráfico es utilizado para la transmisión de datos de los usuarios. Está formado por:

a) Canal de tráfico dedicado (DTCH⁵⁹)

El canal DTCH es utilizado en el canal descendente y ascendente para la transmisión de datos de los usuarios hacia el UE (para DL) y desde el UE (para UL). En el enlace descendente transmite todos los datos de usuario no-MBSFN⁶⁰.

b) Canal de tráfico de multidifusión (MTCH⁶¹)

El canal MTCH es utilizado en el enlace descendente para la transmisión de servicios MBMS.

⁵⁶ DCCH: *Dedicated Control Channel*

⁵⁷ MCCH: *Multicast Control Channel*

⁵⁸ MTCH: *Multicast Traffic Channel*

⁵⁹ DTCH: *Dedicated Traffic Channel*

⁶⁰ MBSFN: Red de frecuencia única de difusión-multidifusión

⁶¹ MTCH: *Multicast Traffic Channel*

3.8 REDES HETEROGÉNEAS (HETNET)

Las Redes Heterogéneas permiten incrementar la capacidad y cobertura en las redes móviles; están formadas por estaciones base con distintos niveles de potencia de transmisión, variadas arquitecturas y tecnologías de acceso radioeléctrico. Para mayores exigencias de transmisión de datos, es una buena alternativa, debido a que las proyecciones de tráfico de datos aumentan junto con la evolución de nuevas y mejoradas tecnologías [14, 9].

En 3GPP *Release 10* se incluye nuevos tipos de estación base [64]:

- En *picocelda*: *Local area BS (Local area eNodeB)*
- En *femtocelda*: *Home BS (Home eNodeB)*
- *Relay Node*

Con el fin de incrementar la cobertura en la red móvil celular se puede implementar diferentes estaciones base ocupando una misma frecuencia, lo que implica la utilización de nuevos escenarios que a su vez requerirían de coordinación para evitar interferencias *co-canal*.

Para el despliegue, el Grupo abierto de suscriptores (OSG⁶²) en el cual el operador en una *red macro*, amplía la cobertura con “*local area BS*” para brindar una mayor capacidad en lugares requeridos como por ejemplo en un centro comercial, permitiendo al usuario desplazarse entre la *red macro* y la *local area BS*, siendo ubicada en el centro del área a cubrir.

Por otra parte, el Grupo cerrado de suscriptores (CSG⁶³) es desplegado con “*home BS*”, siendo su acceso limitado a un grupo específico de usuarios brindando mejores servicios, es óptimo en áreas con baja densidad de usuarios ya que al aumentar el número de suscriptores existiría mayor interferencia por lo cual debe utilizar varios canales en la *home BS* y la *red macro* para disminuir la interferencia entre estaciones base adyacentes [64].

⁶² OSG: *Open Subscriber Group*

⁶³ CSG: *Closed Subscriber Group*

LTE *Release* 10 define dos métodos para soportar redes heterogéneas [88]:

- Mediante agregación de portadoras, se evita la interferencia del canal PDCCH entre la *macrocelda* y *celda pequeña*.
- Mediante no agregación de portadoras, define subtramas ABS (*almost blank subframes*) permitiendo transmisiones sin el canal PDCCH y PDSCH.

En la Fig 3.12, se muestra un esquema de redes heterogeneas con distintos tipos de estaciones base en macro, micro y pico *celdas*, así como WiFi brindando soluciones a las demandas de tráfico.



Figura 3.12. Esquema de Redes Heterogéneas (HetNet) [89]

3.9 RETRANSMISIÓN [66]

LTE-Advanced introduce una nueva característica que es la de retransmisión, la misma que complementa a una red celular ampliando la cobertura y su capacidad, también reduciendo el costo de implementación frente al *eNodeB*. En sistemas como UMTS, el repetidor cumple la función de amplificar las señales recibidas de una estación base. Por otro lado, los retransmisores a través del Nodo de Retransmisión (RN, *Relay Node*) se conectan al "*eNodeB* donante" y dependen de la Red de acceso radioeléctrico (RAN) teniendo capacidades similares a la de

un *eNodeB*, a diferencia del repetidor que amplifica la señal mas no la procesa. El procesamiento en el RN depende del número de equipos de usuario a ser soportados y también si es desplegado en interiores o exteriores [66].

Los nodos de retransmisión (RN) conforme el uso del espectro se clasifican en [66, 71]:

- *Inband*: El enlace *eNodeB-RN*, opera en la misma frecuencia portadora del enlace *RN-UE*. El RN, al operar en *full-duplex* provee una mejor capacidad que en *half-duplex* debido a que existiría inconvenientes en la operación.
- *Outband*: El enlace *eNodeB-RN*, no opera en la misma frecuencia portadora del enlace *RN-UE*. Incrementa la capacidad de la *celda* de retransmisión.

La implementación del RN frente al *eNodeB* presenta beneficios como una infraestructura menos compleja y disminución en costos; que a diferencia del *eNodeB*, no requiere de cableado o conexión de *backhaul* por microondas, lo que a su vez implica en reducción de costos tanto en equipos como lo referente a la licencia de frecuencias de operación, siendo más significativo si opera en *inband* debido a que no necesitaría de una frecuencia adicional para su operación; así también el RN tiene inconvenientes comparado con el *eNodeB* como el aumento en los retardos en la transmisión o disminución en la capacidad [66].

En la Fig. 3.13 se muestra la conexión entre el Nodo de Retransmisión y el *eNodeB*, a través de la interfaz *Un*, y el Nodo de Retransmisión con el equipo de usuario a través de la interfaz *Uu*.

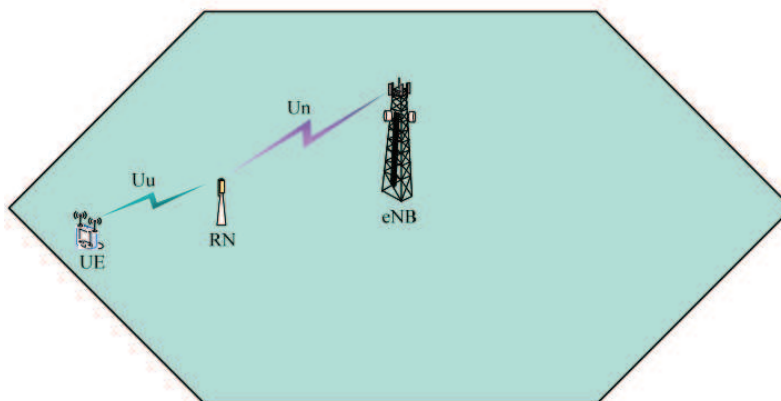


Figura 3.13. Representación de una red de retransmisión [88]

Los RN's pueden operar en Capa 1, 2 o 3 como se describe a continuación [57]:

- En la retransmisión de Capa 1, la tecnología empleada es un repetidor que amplifica las señales recibidas del *eNodeB* al UE en *downlink* y de igual manera en *uplink* las señales son amplificadas, la implementación es de bajo costo y los retardos son cortos en la retransmisión, puede ser usado en sistemas móviles antecesores como por ejemplo en tercera generación. Es principalmente utilizado en áreas urbanas; por otra parte, entre los inconvenientes de su implementación se tiene la interferencia *inter-celda* y degradación en la señal.
- En la retransmisión de Capa 2, las señales emitidas por el *eNodeB* son demoduladas y decodificadas en la estación retransmisora, y después son moduladas y codificadas para su transmisión al UE. Al igual que en el anterior caso existe retardos básicamente por el procesamiento realizado. Frente a la retransmisión de Capa 1 se disminuye la interferencia *inter-celda* y el ruido.
- La retransmisión de Capa 3 es especificada en LTE *Release* 10, en la estación retransmisora se realiza la demodulación y decodificación, así también el procesamiento de regeneración de datos del usuario para luego ser modulados, codificados y transmitidos. Al igual que en el caso anterior disminuye la interferencia *inter-celda* y el ruido, adicionalmente incorpora

funcionalidades similares a la de un *eNodeB*; se incrementa los retardos por el aumento en el procesamiento en la estación retransmisora [57].

3.10 AGREGACIÓN DE PORTADORAS EN LTE-ADVANCED

La agregación de portadoras permite el incremento del ancho de banda hasta 100 MHz con máximo 5 “componentes de portadora” de 20 MHz para obtener mayores tasas de datos como 1 Gbps para DL y 500 Mbps para UL. En la Fig. 3.14 se ilustra un ejemplo de agregación de portadoras en LTE-Advanced, que de acuerdo a su localización en diferentes bandas de frecuencia (A y B), se divide en:

i) *Agregación intra-banda* con portadoras contiguas conformado por las componentes de portadora #2 y #3; y, ii) *Agregación inter-banda* conformado por las componentes #1 y #4 [61, 5].

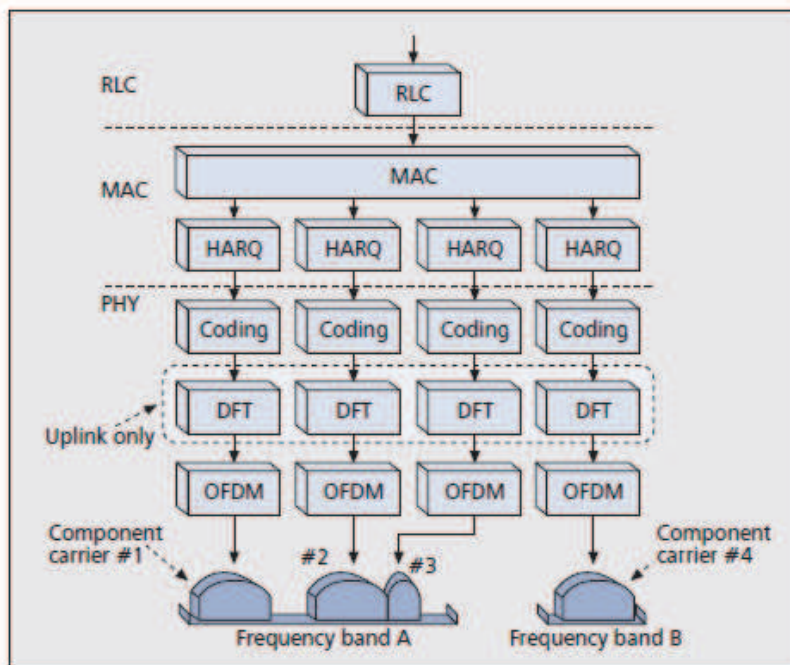


Figura 3.14. Agregación de Portadora en LTE-Advanced [61]

La agregación de portadoras provee ventajas adicionales como el uso más eficiente del espectro, y la utilización de diferentes arreglos de las componentes

de portadora con iguales o diferentes anchos de banda. También la compatibilidad de LTE-Advanced (*Release* 10) con dispositivos LTE (*Release* 8), por lo cual las componentes de portadora deben ser configuradas a portadoras LTE *Release* 8, tomando en cuenta que no necesariamente todas las componentes son compatibles [63].

Para el esquema dúplex FDD, el número de componentes de portadora en UL puede ser diferente que en DL. Por otro lado, en TDD las componentes de portadora y su ancho de banda podrían ser iguales en UL y DL. La agregación de portadoras también permitirá la utilización de redes heterogéneas tratado anteriormente [66].

3.11 COORDINATED MULTIPOINT (COMP) TRANSMISSION AND RECEPTION

En la Fig. 3.15 se muestra el principio básico de *CoMP*, es una nueva característica desarrollada en 3GPP *Release* 11, la cual provee mejoras en la coordinación de recursos radioeléctricos, considerada como una ampliación de la tecnología *MIMO*. La técnica *CoMP* permite la cooperación en las comunicaciones a través de varios puntos de transmisión/recepción, los cuales son coordinados entre sí. Emplea técnicas de múltiples antenas desde distintas localidades; se divide en: *DL CoMP* y *UL CoMP* [58, 61, 9].

En *CoMP* del enlace descendente (DL), varias estaciones base transmiten señales coordinadamente a estaciones móviles, los tipos de *CoMP* analizados son:

- *Coordinated Scheduling/Coordinated Beamforming*
Una BS en un clúster asume las funcionalidades de planificación de todas las estaciones base reduciendo la interferencia *inter-celda*, por lo que la información del estado de canal (CSI) en DL desde las BSs a un equipo de

usuario es necesaria, la comunicación es realizada entre una BS y una MS.

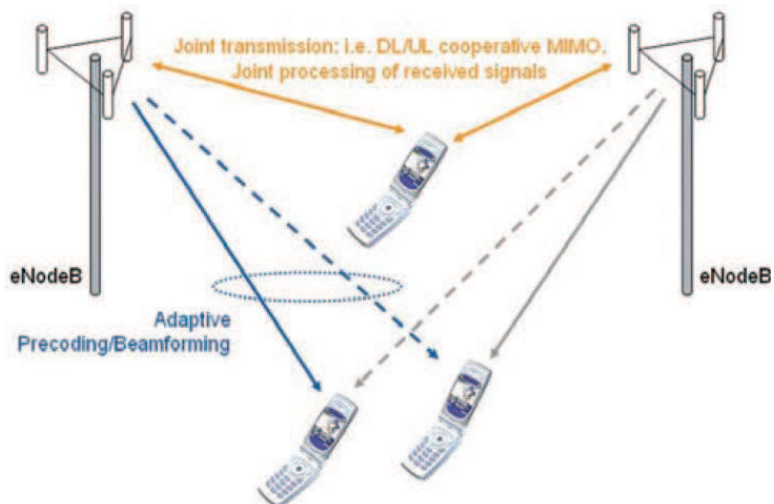


Figura 3.15. Principio básico CoMP⁶⁴

- *Joint Transmission*

Comprende transmisiones simultáneas de datos desde múltiples puntos de transmisión hacia uno o varios terminales móviles, la transmisión debe ser de baja latencia para brindar conectividad rápida entre los puntos de transmisión. Los escenarios a ser desplegados comprenden en *eNodeB*⁶⁵ (eNB) con RRH (*Remote Radio Heads*) o Redes Heterogéneas, las RRH son implementadas de acuerdo a los requerimientos de capacidad o cobertura y son conectados a uno o varios *host eNodeB* siendo administrado por uno. Puede ser utilizado principalmente en ambientes *indoor* o *hot-spot*⁶⁶ [58, 66].

En *CoMP* del enlace ascendente (UL) se incrementa el *throughput* del usuario en el borde de la *celda*, los terminales móviles transmiten señales a varias estaciones base, lo que implica mecanismos de coordinación de planificadores de las estaciones base [3, 88].

⁶⁴ Fuente: Artículo: *LTE (Long Term Evolution): El siguiente nivel*, Rohde & Schwarz

⁶⁵ eNodeB: *Evolved NodeB*

⁶⁶ Zona en la que se puede acceder a Internet inalámbricamente, por lo general en lugares públicos

De acuerdo con el Reporte Técnico *3GPP TR 36.912 V10.0.0* [71] el terminal LTE-Advanced con capacidades de transmisión y recepción para agregación de portadoras, puede en múltiples componentes de portadora transmitir y recibir simultáneamente.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS WIRELESS MAN-ADVANCED (WiMAX 2) Y LTE-ADVANCED

4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS WIRELESS MAN-ADVANCED (WIMAX 2) Y LTE-ADVANCED

4.1 INTRODUCCIÓN

En el estudio desarrollado se tomó información de los Capítulos 1, 2 y 3 del presente Proyecto de Titulación para realizar una comparación de las características de los sistemas International Mobile Telecommunications-Advanced (IMT-Advanced): *WirelessMAN-Advanced* y *LTE-Advanced*, que permitirán brindar servicios de banda ancha móvil a usuarios finales.

4.2 ESTUDIO Y ANÁLISIS COMPARATIVO

Las IMT-Avanzadas permitirán dar acceso a servicios de telecomunicaciones soportados tanto por redes fijas como móviles, lo cual indica que los sistemas tendrán una mejora significativa en cuanto a prestación de servicios, y tienen como características principales: la compatibilidad de funcionamiento a nivel mundial, mayores velocidades de transmisión que las obtenidas con los sistemas actuales, entre otros. Así también, los sistemas de 4ta. Generación permitirán dar acceso a una gran variedad de servicios y aplicaciones *multimedia* en baja o alta movilidad, los mismos que serán de alta calidad [39].

Las principales características de los sistemas son [39]:

- Compatibilidad de servicios con redes fijas
- Alta calidad de servicio
- Dispositivo móvil apropiado para uso a nivel mundial
- Velocidades de datos máximas de 100 Mbps para alta movilidad y 1 Gbps para baja movilidad, de acuerdo con la Recomendación UIT-R M.1645

Debido a la gran demanda de servicios móviles, en especial en los últimos años, ha dado lugar a que se mejoren las características de los sistemas móviles celulares. Tomando en cuenta estudios realizados tanto a nivel nacional como internacional, los equipos móviles superan en cantidad a los dispositivos de telefonía fija, debido entre otras cosas a la posibilidad de acceder a Internet en cualquier momento y en cualquier lugar, también el gran desarrollo que han tenido las tecnologías, lo que ha permitido que los usuarios puedan estar conectados con mucha mayor facilidad, sea mediante mensajería instantánea o plataformas de VoIP y videoconferencia, y la utilización de las redes sociales. De acuerdo con el informe de la UIT “*Medición de la Sociedad de la Información 2012*” [51], los países en desarrollo tienen el mayor crecimiento en el mercado de las telecomunicaciones, reduciendo así la brecha digital.

En los países en desarrollo es importante tomar en cuenta que el usuario accede a Internet con banda ancha fija a velocidades generalmente cercanas a 2 Mbps lo que implica menor calidad en los servicios y aplicaciones. En la actualidad los sistemas de banda ancha móvil permiten incrementar la cobertura y brindar movilidad pero con bajas velocidades de datos, permitiendo el acceso a servicios como correo electrónico y páginas web limitados, mas no son sustitutos de la banda ancha fija, principalmente para usuarios que requieren mayor prestación de servicios. Por lo cual las IMT-Avanzadas permitirán brindar servicios de telecomunicaciones móviles conforme las exigencias de los usuarios siendo una alternativa a la banda ancha fija [51].

Otro aspecto a considerar en el informe de la UIT de acuerdo a lo establecido por la Comisión de Banda Ancha, es la disminución de la “brecha digital” y también el “acceso universal a Internet” para el 2015, teniendo como una de las metas la accesibilidad a banda ancha y tomando en cuenta que los precios a nivel mundial en el mercado de las telecomunicaciones han disminuido, sin embargo aún son altos, por lo que su acceso continúa siendo limitado [51]. La evolución de los dispositivos como *smartphones* y *tablets* aumentaría el número de abonados de banda ancha móvil, lo que conlleva a un mayor requerimiento en la demanda de mayores tasas de datos.

El desarrollo de las IMT-Avanzadas es considerado desde varias perspectivas como del usuario final, proveedor de servicios y contenidos, operadores de red y fabricantes. Desde el punto de vista del usuario final, hay una creciente demanda de servicios y aplicaciones, entre ellas que sean de alta calidad, también que permitan *ubicuidad* y una amplia variedad de dispositivos móviles.

Desde el punto de vista del operador de red, se requiere que los recursos como por ejemplo el de espectro sean eficientes, también que permita flexibilidad en la configuración de la red, que la transición desde sistemas IMT-2000 a IMT-Advanced sea gradual y que la autenticación sea única [37, 2].

Asimismo, las IMT-Avanzadas proveerán características mejoradas como mayores tasas de transmisión de acuerdo con las demandas de los usuarios y bajas latencias [2]. Por lo cual, para lograr los objetivos de las IMT-Avanzadas, las tecnologías deben cumplir con los requerimientos establecidos por la UIT.

El estudio comparativo de los sistemas WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced, es en base a:

Funcionamiento técnico:

- Eficiencia espectral
- Ancho de banda
- Latencia
- Movilidad
- Handover

Servicios

Bandas de frecuencia:

- Bandas de frecuencia de WirelessMAN-Advanced
- Bandas de frecuencia de LTE-Advanced

Arquitectura de red:

- Arquitectura de red 3GPP LTE-Advanced
- Arquitectura de red de WiMAX 2 (IEEE 802.16m)

Capa Física:

- Métodos de Acceso Múltiple
- Modulación / Codificación
- Métodos Dúplex
- Estructura de trama
- Técnicas avanzadas de antena

Tomando en cuenta que LTE-Advanced comprende “*LTE 3GPP Release 10 y posteriores*”, el presente estudio es realizado de acuerdo a *LTE 3GPP Release 10*.

4.2.1 FUNCIONAMIENTO TÉCNICO

El estudio del funcionamiento técnico de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales-Avanzadas (IMT-Advanced) [48], es conforme a los requerimientos de la UIT descritos en el Capítulo 1, basados en el Informe UIT-R M.2133 [45] y el Informe UIT-R M.2134 [46], y sus evaluaciones de acuerdo con el Informe UIT-R M.2135-1 [47].

El funcionamiento técnico de WirelessMAN-Advanced, es referente al *Documento IMT-ADV/4-E* [55] del UIT-R descrito en el Capítulo 2, y el funcionamiento técnico de LTE-Advanced, es referente al *Documento IMT-ADV/8-E* [56] del UIT-R descrito en el Capítulo 3.

Los escenarios considerados para las especificaciones de funcionamiento técnico de la interfaz radioeléctrica IMT-Advanced son¹:

¹ Descritos en el Capítulo 1 del presente Proyecto de Titulación

- a) El escenario para ambientes de prueba en Interiores (*Indoor*) es *Indoorhotspot (InH)*
- b) El escenario para ambientes de prueba en Microcelular (*Microcellular*) es *Urban micro-cell (UMi)*
- c) El escenario para ambientes de prueba en Base de cobertura urbana (*Base coverage urban*) es *Urban macro-cell (UMa)*
- d) El escenario para ambientes de prueba en Alta rapidez (*High speed*) es *Rural macro-cell (RMa)*

4.2.1.1 Eficiencia espectral

4.2.1.1.1 Eficiencia espectral máxima

En la Tabla 4.1 se presentan los valores de eficiencia espectral máxima en base a los parámetros establecidos por el UIT-R para las IMT-Avanzadas, obtenidos mediante el método analítico realizado por el IEEE y el 3GPP del sistema WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced, respectivamente.

Los parámetros definidos por el UIT-R para la configuración de antenas es de 4×4 en *downlink* y de 2×4 en *uplink*, para los cuatro escenarios de prueba UIT-R descritos en el Capítulo 1, los métodos dúplex FDD y TDD son evaluados de forma independiente.

En WirelessMAN-Advanced para el modo FDD se asume un ancho de banda de 20 MHz y la relación DL/UL es 1:1; y, en TDD el ancho de banda asumido es de 2×20 MHz (40 MHz), la longitud de la FFT es de 2048, el prefijo cíclico es de 1/16 para DL y UL, con esquema de modulación 64-QAM, se consideran 4 y 2 *streams* con 4 antenas transmisoras para DL y 2 para UL. En tanto que en LTE-Advanced, para el enlace descendente, se considera un ancho de banda de 20 MHz, 1 símbolo OFDM para señalización de control DL, señales de referencia de celda

específica correspondiente a 1 y 4 puertos de antena, utiliza *SU-MIMO* con multiplexación espacial de 4 capas (4×4), configuración DL/UL (2 subtramas DL, 2 subtramas UL y 1 subtrama especial) para TDD; y, en el enlace ascendente se asume un ancho de banda de 20 MHz, la misma configuración DL/UL empleada para *downlink* y multiplexación espacial de 2 capas [55, 56, 2].

Las velocidades teóricas máximas que se obtendría con cada uno de los sistemas, de acuerdo con los datos indicados en la Tabla 4.1 son: con WirelessMAN-Advanced para DL de aproximadamente 1.7 Gbps y en UL de 900 Mbps, y con LTE-Advanced para DL una tasa de aprox. 1.6 Gbps y en UL de 800 Mbps; considerando un ancho de banda de canal de 100 MHz. Los dos sistemas alcanzarían elevadas tasas de datos máximas superando ampliamente a las ofrecidas en los sistemas de segunda y tercera generación, sin embargo hay que considerar que los valores indicados nos brindarían una idea de lo que se esperaría lograr con los sistemas pertenecientes a las IMT-Avanzadas.

| Parámetros | Enlace | Requerimientos IMT-Advanced | Modo Dúplex | WirelessMAN-Advanced | LTE-Advanced |
|--------------------------------------|--------|-----------------------------|-------------|----------------------|--------------|
| Eficiencia espectral máxima [bps/Hz] | DL | 15 | TDD | 16.96 | 16.00 |
| | | | FDD | 17.79 | 16.30 |
| | UL | 6.75 | TDD | 9.22 | 8.10 |
| | | | FDD | 9.40 | 8.40 |

Tabla 4.1. Eficiencia espectral máxima de WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced [55, 56]

4.2.1.1.2 Eficiencia espectral de la celda y de usuario en el borde de la celda

Al igual que en el caso anterior, los parámetros para los dos sistemas son establecidos por el UIT-R en base a las Recomendaciones antes mencionadas, la diferencia con respecto al método utilizado en el punto anterior es que se realiza mediante simulaciones con parámetros de configuración determinados para los cuatro entornos de prueba. En las Tablas 4.2 y 4.3 se presentan los valores de eficiencia espectral de la celda y de usuario en el borde de la celda, respectivamente, obtenidos por los dos sistemas.

Los parámetros definidos por el UIT-R para la Eficiencia espectral de la celda y la Eficiencia espectral de usuario en el borde de la celda son los mismos. Considerando las definiciones de cada uno, descritos en el Capítulo 1. Las configuraciones de antenas asumidas son de 4×2 para *downlink* y de 2×4 para *uplink*, en los cuatro escenarios de prueba.

En WirelessMAN-Advanced, los parámetros asumidos fueron con tráfico de datos *full-buffer*² para FDD y TDD, la configuración de antenas utilizada en el enlace descendente es *MU-MIMO* 4×2 y en el enlace ascendente *MU-MIMO* 2×4 . La relación DL/UL es 5:3, siendo 5 subtramas DL y 3 subtramas UL utilizadas para el modo TDD y con prefijo cíclico de 1/16 [55, 2].

Por otra parte, en LTE-Advanced, las simulaciones fueron realizadas por varias compañías integrantes de 3GPP. Las configuraciones de antenas son especificadas en el Reporte Técnico 3GPP TR 36.912, en términos generales las configuraciones consideradas para *downlink* son: 4×2 y 8×2 (con *SU-MIMO*, *MU-MIMO*, *CS/CB*³ *CoMP* y *JP*⁴ *CoMP*); y, para *uplink*: 1×4 , 2×4 , 1×8 y 2×8 (con *SIMO*, *MU-MIMO*, *SU-MIMO* y *CoMP*) acorde a cada uno de los cuatro escenarios UIT-R [56, 2].

De acuerdo con los valores de Eficiencia espectral de la celda de los sistemas indicados en la Tabla 4.2 para FDD, se tendría velocidades máximas de transmisión en la *celda* superiores a 650 Mbps para DL (con un ancho de banda asumido de 100 MHz) en escenarios *Indoor (InH)*, y en el escenario *Rural macro-cell (RMa)* sería mayor al triple del valor requerido en IMT-Advanced tanto para DL como UL, siendo superior a 300 Mbps para *downlink*; lo cual supone una mejora significativa en los sistemas de comunicaciones debido a que en el último escenario en particular se consideran altas velocidades en el desplazamiento.

² El modelo de tráfico *full-buffer*, supone que todos los usuarios en el sistema transmiten y reciben datos en cualquier momento

³ CS/CB: *Coordinated Scheduling/Coordinated Beamforming*

⁴ JP: *Joint Processing*

| Parámetros | Escenario | Requerimientos IMT-Advanced | WirelessMAN- Advanced | LTE-Advanced |
|--------------------------------------|------------|--------------------------------|--------------------------|--------------|
| Enlace downlink [bps/Hz/celda] | <i>InH</i> | 3 | 6.87 | 4.10-6.60 |
| | <i>UMi</i> | 2.6 | 3.27 | 2.80-4.50 |
| | <i>UMa</i> | 2.2 | 2.41 | 2.40-3.80 |
| | <i>RMa</i> | 1.1 | 3.15 | 1.80-4.10 |
| Enlace uplink [bps/Hz/celda] | <i>InH</i> | 2.25 | 6.23 | 3.30-5.80 |
| | <i>UMi</i> | 1.80 | 2.72 | 1.90-2.50 |
| | <i>UMa</i> | 1.40 | 2.69 | 1.50-2.10 |
| | <i>RMa</i> | 0.7 | 2.77 | 1.80-2.30 |

Tabla 4.2. Eficiencia espectral de la celda en FDD para DL y UL [55, 56]

Los valores de Eficiencia espectral de usuario en el borde de la celda obtenidos por WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced indicados en la Tabla 4.3, superan en el doble a los requerimientos de las IMT-Avanzadas en escenarios *Indoor (InH)*, y en *Rural macro-cell (RMa)*, tanto en UL como en DL. Lo que brindaría tasas de transmisión muy aceptables, tomando en cuenta que en el borde de la *celda* es donde más dificultades hay en la comunicación.

| Parámetros | Escenario | Requerimientos IMT-Advanced | WirelessMAN- Advanced | LTE-Advanced |
|--------------------------------------|------------|--------------------------------|--------------------------|--------------|
| Enlace downlink [bps/Hz/celda] | <i>InH</i> | 0.1 | 0.253 | 0.190-0.260 |
| | <i>UMi</i> | 0.075 | 0.097 | 0.087-0.150 |
| | <i>UMa</i> | 0.06 | 0.069 | 0.066-0.100 |
| | <i>RMa</i> | 0.04 | 0.091 | 0.057-0.130 |
| Enlace uplink [bps/Hz/celda] | <i>InH</i> | 0.07 | 0.444 | 0.230-0.420 |
| | <i>UMi</i> | 0.05 | 0.119 | 0.073-0.086 |
| | <i>UMa</i> | 0.03 | 0.114 | 0.062-0.099 |
| | <i>RMa</i> | 0.015 | 0.124 | 0.082-0.130 |

Tabla 4.3. Eficiencia espectral del usuario en el borde de la celda para FDD en DL y UL [55, 56]

4.2.1.2 Ancho de banda

De acuerdo con los requerimientos del UIT-R, los sistemas IMT-Advanced deben soportar ancho de banda escalable y una o varias portadoras, pudiendo operar hasta 40 MHz, los anchos de banda para los dos sistemas son presentados a continuación.

Los anchos de banda soportados por WirelessMAN-Advanced son:

- 5 MHz
- 7 MHz
- 8.75 MHz
- 10 MHz
- 20 MHz
- desde 40 hasta 100 MHz

Los anchos de banda soportados por LTE-Advanced son:

- 1.4 MHz
- 3 MHz
- 5 MHz
- 10 MHz
- 15 MHz
- 20 MHz
- desde 40 hasta 100 MHz

Los anchos de banda hasta 20 MHz son con una portadora, y a partir de 40 MHz con agregación de portadoras. En ambos casos se soportaría anchos de banda de hasta 100 MHz (con agregación de máx. 5 portadoras de 20 MHz), brindando escalabilidad y superando a los establecidos en los requerimientos de las IMT- Avanzadas, permitiendo obtener mayores velocidades de transmisión de acuerdo a los objetivos de los sistemas 4G. La semejanza en los anchos de banda soportados por WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced son de 5, 10, 20, 40 y 100 MHz, siendo las bandas múltiplo de 5 MHz generalmente más utilizadas en los sistemas móviles celulares. WirelessMAN-Advanced además utiliza los anchos

de banda de 7 y 8.75 MHz, y LTE-Advanced los anchos de banda de 1.4, 3 y 15 MHz.

4.2.1.3 Latencia

La latencia en WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced es más eficiente que en los sistemas predecesores tanto en el Plano de Usuario como en el Plano de Control como se muestra en la Tabla 4.4, lo que permitirá brindar servicios especialmente en tiempo real ya que los retardos serán mínimos y casi imperceptibles para el usuario. La diferencia entre los dos sistemas radica principalmente en el procesamiento realizado en cada red, debido a que cada uno utiliza procedimientos diferentes, como se trató en los Capítulos 2 y 3.

Para la latencia de Plano de Control y de Usuario, en ambos casos se parte de las especificaciones establecidas en el Informe UIT-R M.2134, y de acuerdo con el Informe UIT-R M.2135-1 para su evaluación se emplea el método analítico; por lo que cada “*Proponente*”, en este caso IEEE y 3GPP, puede proveer los elementos para el cálculo de la latencia de Plano de Control y de Usuario, así como la probabilidad de retransmisión, los valores obtenidos en cada caso son mostrados en la Tabla 4.4.

| Parámetros | Requerimientos IMT-Advanced | WirelessMAN-Advanced | LTE-Advanced |
|-------------------------------|-----------------------------|----------------------|--------------|
| Latencia del plano de control | < 100 ms | < 81 ms | 50 ms |
| Latencia del plano de usuario | < 10 ms | TDD: 7.32 ms | TDD: 4.90 ms |
| | | FDD: 5.13 ms | FDD: 4.00 ms |

Tabla 4.4. Latencia [55, 56]

4.2.1.4 Movilidad y handover

IEEE 802.16m y LTE-Advanced soportan altos valores de movilidad, en ambos casos la rapidez máxima es de 350 km/h, siendo uno de los puntos principales de las IMT-Avanzadas, que de acuerdo a sus objetivos debe alcanzar elevadas velocidades de transmisión tanto en baja como en alta movilidad, como se pudo observar en las secciones 2.5.1.3 y 3.4.1.3.

El procedimiento *handover* en 802.16m consta de tres etapas básicas: inicio, preparación y ejecución; en cuanto que en LTE-Advanced las etapas básicas son: preparación, ejecución y complemento. En las dos redes, las etapas conceptualmente son similares, difieren en el funcionamiento del procedimiento *handover* en cada sistema.

En ambos casos se incluyen mejoras en el procedimiento *handover*, en 802.16m por ejemplo, para el reingreso a la red se podría optimizar a través de la red *backbone* con la *ABS objetivo* mediante la información obtenida por la *ABS en servicio*. En LTE-Advanced se emplea la “*preparación múltiple*”, con la cual se tienen varios *eNodeB's objetivo* que en el caso de una falla en el UE podrá conectarse con un *eNodeB objetivo* seleccionado.

Ambas redes permiten *handover* tanto con redes predecesoras, como con otras tecnologías de acceso, siendo la última una característica fundamental para la coexistencia entre redes LTE-Advanced y WiMAX 2. En términos generales, LTE se difiere de IEEE 802.16m debido a que dos tipos de procedimiento *handover* son utilizados a través de los interfaces S1 y X2, en cuanto que en IEEE 802.16m es menos complejo.

Como se puede apreciar en la Tabla 4.5, los dos sistemas cumplen satisfactoriamente los requerimientos del UIT-R, siendo más significativo en el procedimiento *handover inter-frecuencia*, y en *intra-frecuencia* tienen valores muy similares, a pesar de que difieran en su funcionamiento como se indicó anteriormente.

| Tipo de Handover | Requerimientos IMT-Advanced | WirelessMAN- Advanced | LTE-Advanced | |
|---|--------------------------------|--------------------------|--------------|---------|
| | | | TDD | FDD |
| <i>a) Intra-frecuencia</i> | 27.5 ms | 5 a 10 ms | 12.5 ms | 10.5 ms |
| <i>b.1) Inter-frecuencia Dentro de una banda del espectro</i> | 40 ms | 5 a 35 ms | 12.5 ms | 10.5 ms |
| <i>b.2) Inter-frecuencia Entre bandas del espectro</i> | 60 ms | 5 a 35 ms | 12.5 ms | 10.5 ms |

Tabla 4.5. Tiempo de interrupción handover [55, 56]

En la Tabla 4.6, se resumen los valores de funcionamiento técnico obtenidos por WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced, en el cual se incluye los requerimientos de las IMT-Avanzadas.

| Parámetros | Enlace | Requerimientos IMT-Advanced | WirelessMAN- Advanced | LTE- Advanced | Observaciones |
|--|--------|--------------------------------|--------------------------|------------------|--|
| <i>Eficiencia espectral máxima [bps/Hz]</i> | DL | 15 | 17.79 | 16.30 | En modo FDD |
| | UL | 6.75 | 9.40 | 8.40 | |
| <i>Eficiencia espectral de la celda [bps/Hz]</i> | DL | 3 | 6.87 | 4.10-6.60 | Escenario <i>InH</i> , Modo dúplex FDD |
| | UL | 2.25 | 6.23 | 3.30-5.80 | |

Tabla 4.6. Resumen de funcionamiento técnico de WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced
(continúa)

| Parámetros | Enlace | Requerimientos IMT-Advanced | WirelessMAN-Advanced | LTE-Advanced | Observaciones |
|---|--------|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| Eficiencia espectral de usuario en el borde de la celda [bps/Hz] | DL | 0.1 | 0.253 | 0.190-0.260 | Escenario <i>InH</i> , Modo dúplex FDD |
| | UL | 0.07 | 0.444 | 0.230-0.420 | |
| Ancho de banda | - | Hasta 40 MHz | 5, 7, 8.75, 10, 20, hasta 100 MHz | 1.4, 3, 5, 10, 15, 20, hasta 100 MHz | Desde 40 hasta 100 MHz con agregación de portadoras |
| Latencia del plano de control | - | < 100 ms | 81 ms | 50 ms | - |
| Latencia del plano de usuario | - | < 10 ms | 5.13 ms | 4.00 ms | En modo FDD |
| Movilidad | - | Hasta 350 km/h | Máximo 350 km/h | Máximo 350 km/h | - |

Tabla 4.6. Resumen de funcionamiento técnico de WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced [55, 56]

4.2.2 SERVICIOS Y APLICACIONES

En los últimos años, la demanda cada vez mayor de servicios móviles ha implicado una evolución especialmente en la familia de tecnologías 3GPP desde GSM (2G), y de IEEE con 802.16e (WiMAX Móvil) hasta llegar a las redes 4G LTE-Advanced y WirelessMAN-Advanced (WiMAX 2), respectivamente, lo cual conlleva mejoras en sus tecnologías como la disminución de la latencia, también el incremento en las tasas de datos debido a la demanda existente de aplicaciones y para proveer una mejor experiencia en cuanto a servicios al usuario final. Desde los sistemas móviles de tercera generación ha existido un progreso significativo debido a los parámetros establecidos en las IMT-2000 por la UIT.

La prestación de servicios de telecomunicaciones que han de soportar WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced serán similares, tomando en cuenta que las redes de cuarta generación permitirán brindar acceso de banda ancha móvil a usuarios finales con altas tasas de transmisión y mínima latencia, como por ejemplo el acceso a Internet desde los terminales móviles en menor tiempo que en la actualidad. Sin embargo hay que tener en cuenta que uno de los objetivos de las IMT-Avanzadas es soportar una amplia variedad de servicios y aplicaciones a los usuarios, mas no definir un conjunto, por lo que se debe considerar los parámetros y la clasificación de servicios, como se indicó en el literal 1.3.2 del Capítulo 1 [38].

A continuación se citan varios servicios que han de ser ofrecidos por las IMT [38] en común, la diferencia sería en algunos servicios adicionales que se prestaría con cada tecnología:

✓ **Mensajería**

Los servicios de mensajería como SMS (*Short Message Service*) o correo electrónico (*e-mail*); permiten a los usuarios finales intercambiar información entre sus dispositivos móviles, servicios como el correo electrónico son ampliamente utilizados tanto en el ámbito laboral como personal.

✓ **Telefonía vocal**

Comunicación mediante la voz entre dos o más usuarios, siendo la VoIP⁵ (Voz sobre IP) también parte del servicio.

✓ **Presione para hablar (*PTT, Push-To-Talk*)**

Es un servicio que permite la comunicación en modo *half-duplex*⁶, que brindará acceso instantáneo y simple, sin pretender suplir las llamadas normales por voz.

⁵ VoIP, descrita en la Recomendación UIT-T H.323

⁶ Half-duplex: Comunicación en 2 direcciones no simultáneas, una a la vez

✓ **Telefonía vídeo de elevada calidad**

Son comunicaciones audiovisuales en tiempo real y modo *full-duplex*⁷ permitiendo la participación de varios usuarios.

✓ **Videoconferencia**

Las altas tasas de datos y los mínimos retardos ofrecerán comunicaciones audiovisuales en tiempo real y modo *dúplex*⁸ de buena calidad, en el cual participan dos o más usuarios. La videoconferencia mediante redes IP es descrito en las Recomendaciones UIT-T F.702 y UIT-T F.733.

✓ **Navegación en Internet**

A través de la navegación en Internet se accede a páginas web, para obtener información mediante el dispositivo móvil con menores retardos que en los sistemas actuales. El Internet, al ser una herramienta que en el transcurso del tiempo ha llegado a tener importancia tanto en el ámbito laboral, educativo como social y recreacional, por lo que el acceso de los usuarios a banda ancha inalámbrica desde su dispositivo móvil, permitirá tener características mejoradas como alta movilidad.

✓ **Juegos interactivos**

Los servicios prestados para juegos interactivos, es mediante la transmisión de datos entre equipos conectados a un *server*, o entre sí; pudiendo ser los mismos en tiempo real.

✓ **Multimedia**

Multimedia se puede definir como la combinación de audio, texto, gráficos, animación y video en una misma aplicación.⁹ La comunicación *multimedia*, es utilizada esencialmente para información o entretenimiento, siendo de gran importancia en las IMT.

⁷ Full-duplex: Comunicación en 2 direcciones de forma simultánea

⁸ Dúplex o *Full-Duplex*

⁹ Fuente: Diccionario de Informática, Nuevo Milenio, 2003, Edita: Cultural S.A., ISBN: 84-8055-663-3

✓ **Telecolaboración**

Mediante la telecolaboración, se podrá compartir archivos en tiempo real mediante un servidor o equipo de usuario, lo que brindará facilidades en la transferencia de archivos, los mismos que podrán ser utilizados por varios usuarios que requieran cierta información para un determinado proyecto o fin.

✓ **Radiodifusión/multidistribución móvil**

Mediante la transmisión de contenidos *multimedia* en redes móviles.

✓ **Máquina a máquina (M2M)**

La transferencia de datos entre máquinas se realiza sin necesidad de la intervención humana, como ejemplo se tiene: telesensor¹⁰.

✓ **Portabilidad de número**

La portabilidad numérica, permite que usuarios conserven el número de teléfono móvil, independientemente del proveedor del servicio.

✓ **Servicios basados en la ubicación**

Permite a los usuarios localizar tanto a personas como vehículos, laptops u otros mediante información de la ubicación geográfica.

Por su parte, de acuerdo con [55], los servicios a ofrecer WirelessMAN-Advanced entre otros son:

- Servicios de difusión (*broadcast*) y de multidifusión (*multicast*), proveen en un sistema de comunicaciones transmisión de datos a varios usuarios con topología PMP en un área definida. En los servicios de difusión los contenidos son transmitidos a todos los usuarios, y en servicios de multidifusión los contenidos son transmitidos a un grupo específico de usuarios, por ejemplo

¹⁰ Telesensor: Dispositivo que permite registrar mediciones y transmitir las

puede ser utilizado para aplicaciones *multimedia*, video *streaming*¹¹, *webcasts*¹² e IP-TV¹³ [23].

- Servicios basados en localización, permitiría emplear aplicaciones como mapas interactivos, aplicaciones de navegación y servicios de GPS. También es importante el avance de las tecnologías en cuanto a situaciones de emergencia, debido a que el sistema 802.16m con la red apropiada para esta clase de servicios, permitiría conocer la ubicación de la AMS que realiza la llamada de emergencia [55, 23].
- La baja latencia y los mínimos tiempos de interrupción *handover* permitirán aplicaciones en tiempo real como por ejemplo colaboración en línea, mensajería instantánea y juegos interactivos [55].
- Las bajas latencias y la alta eficiencia espectral logradas con las Telecomunicaciones Móviles Internacionales-Avanzadas, permitirán soportar servicios de datos basados en IP como navegación web, correo electrónico, y transferencia de archivos [55].

Asimismo los servicios que ha de soportar LTE-Advanced son de acuerdo a la clasificación de servicios como consta en la Recomendación UIT-R M.1822 [71]. También la prestación de nuevos servicios son desarrollados, como VoLTE (*Voice over LTE*) que provee servicios de voz de alta calidad, también la transferencia de archivos tanto para DL como UL, debido al incremento de la demanda de usuarios para acceder a videos en alta resolución, presentaciones o información; los dispositivos móviles brindarán acceso a una amplio rango de aplicaciones de video en tiempo real como videoconferencia o telepresencia [88].

¹¹ Transmisión secuencial

¹² Transmisión en vivo vía Internet

¹³ Transmisión de señales de TV o video sobre el protocolo IP

4.2.3 BANDAS DE FRECUENCIA

Tanto en WiMAX como en LTE, las bandas de frecuencia asignadas para los dos sistemas fueron establecidas en las IMT-2000, teniendo como objetivo la compatibilidad a futuro.

En la Tabla 4.7, se muestran las bandas de frecuencia identificadas para la componente terrestre de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales (IMT-2000 e IMT-Avanzadas) de acuerdo con el Reglamento de Radiocomunicaciones (RR).

| Bandas de frecuencia de las IMT |
|--|
| Por debajo de 1 GHz: |
| 450 - 470 MHz |
| 698 - 960 MHz |
| Por encima de 1 GHz: |
| 1710 - 2025 MHz |
| 2110 - 2200 MHz |
| 2300 - 2400 MHz |
| 2500 - 2690 MHz |
| 3400 - 3600 MHz |

Fuente: Recomendación UIT-R M.1036-4

Tabla 4.7. Bandas de frecuencia de las IMT

Hay que tomar en cuenta que en las últimas Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones (CMR-07 y CMR-12) se han incorporado nuevas bandas de frecuencia, en el caso de la CMR-07 se incluyen las bandas [2]:

- 450 - 470 MHz (en las 3 Regiones de la UIT)
- 698 - 806 MHz (en la Región 2 y parte de la Región 3)
- 790 - 862 MHz (en la Región 3 y parte de la Región 1)
- 2.3 - 2.4 GHz (en las 3 Regiones de la UIT)
- 3.4 - 3.6 GHz (en gran parte de las Regiones 1 y 3)

En LTE *Release* 10 las bandas de frecuencia para FDD se incluyen tanto en bandas por debajo de 1 GHz como por encima de 1 GHz, para TDD se incorpora la banda de 3.4 a 3.6 GHz. Se debe tomar en cuenta que en versiones posteriores las bandas tanto para FDD como para TDD pueden aumentar.

IEEE 802.16m ha incorporado principalmente en la disposición de frecuencias de 1710-2200 MHz para los modos dúplex FDD y TDD, y también en bandas inferiores a 1 GHz como es el caso de las bandas 450-470 MHz y 698-960 MHz para los esquemas FDD y TDD.

Es importante tomar en cuenta que en los dos sistemas se ha tomado en consideración principalmente las bandas inferiores a 1 GHz, siendo conveniente su utilización en países en desarrollo debido a que puede ser una solución económica y se puede implementar en zonas rurales o poco habitadas [43].

Los grupos de frecuencias comunes en WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced son indicados en la Tabla 4.8, lo que permitiría la compatibilidad entre los dos sistemas, que es uno de los objetivos de las IMT-Avanzadas para su despliegue.

| Transmisión en UL [MHz] | Transmisión en DL [MHz] | Modo Dúplex |
|-------------------------|-------------------------|-------------|
| 698-716 | 728-746 | FDD |
| 824-849 | 869-894 | FDD |
| 880-915 | 925-960 | FDD |
| 1710-1755 | 2110-2155 | FDD |
| 1710-1770 | 2110-2170 | FDD |
| 1710-1785 | 1805-1880 | FDD |
| 1850-1910 | 1930-1990 | FDD |
| 1920-1980 | 2110-2170 | FDD |
| 1880-1920 | 1880-1920 | TDD |
| 1900-1920 | 1900-1920 | TDD |

Tabla 4.8. Bandas de frecuencia comunes en WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced
(*continúa*)

| Transmisión en UL [MHz] | Transmisión en DL [MHz] | Modo Dúplex |
|-------------------------|-------------------------|-------------|
| 1910-1930 | 1910-1930 | TDD |
| 2010-2025 | 2010-2025 | TDD |
| 2300-2400 | 2300-2400 | TDD |
| 3400-3600 | 3400-3600 | TDD |

Tabla 4.8. Bandas de frecuencia comunes en WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced¹⁴

4.2.4 ARQUITECTURA DE RED

WiMAX 2 y *LTE-Advanced* utilizan arquitecturas de red basadas totalmente en IP. La arquitectura de red de *WiMAX 2* es desarrollada por el *WiMAX Forum* basada en la interfaz radioeléctrica *WirelessMAN-Advanced*, y de *LTE-Advanced* es desarrollada por 3GPP, en la Tabla 4.9 se presenta las entidades básicas de ambos sistemas de acuerdo con sus funcionalidades.

| Funcionalidad | WiMAX 2 | LTE-Advanced |
|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| Red de Acceso | Red de Servicio de Acceso (ASN) | Red de Acceso E-UTRAN |
| Red Central | Red de Servicio de Conectividad (CSN) | Evolved Packet Core (EPC) |
| Terminal móvil | Estación Móvil Avanzada (AMS) | Equipo de Usuario (UE) |

Tabla 4.9. Entidades básicas de *WiMAX 2* y *LTE-Advanced*

➤ Arquitectura de red en *WiMAX 2*

La arquitectura de red en *WiMAX 2* se basa en conmutación de paquetes, brindando conectividad IP para tener acceso a Internet a alta velocidad. Además la red es escalable, por lo que ofrecerá un mayor despliegue tanto en cobertura como capacidad.

¹⁴ Tabla realizada en base a las bandas de frecuencia indicadas en los Capítulos 2 y 3 del presente Proyecto de Titulación

La Red de Servicio de Acceso (ASN) es la encargada de brindar conectividad y administración del recurso radioeléctrico. Está conformada por una o varias *ABS* (también admite *BS*) que cumplen con la función de interfaz entre la ASN y la AMS, y la *ASN-GW* realiza funciones de control en la ASN; las mismas están *conectadas lógicamente* de la siguiente manera: las estaciones base (sean *ABS* o *BS*) están interconectadas a través del Punto de Referencia R8, las *ASN-Gateways* están conectadas entre sí a través del Punto de Referencia R4, y las *ABS/BS* se conectan con las *ASN-GW* a través del Punto de Referencia R6.

La Red CSN brinda conectividad IP a las estaciones suscriptoras y movilidad, también tiene como funciones realizar el direccionamiento IP a la AMS, proveer conectividad a Internet así como con otras redes. Está conformada por el Servidor o Proxy AAA, Agente Local (HA), Suscriptor *billing*, *Router*, Bases de Datos de los usuarios, Conectividad de Servicios.

Otro aspecto a tomar en cuenta es lo referente a la seguridad, soporta mecanismos de autenticación para la estación móvil mediante estándares de seguridad IEEE 802.16, y autenticación a nivel de red local o visitada; también brinda confidencialidad en la comunicación y protección en la transmisión de datos empleando mecanismos como VPNs (Redes Privadas Virtuales).

La red WiMAX tiene la capacidad de realizar *handover* entre distintas tecnologías como son 3GPP y 3GPP2, también soporta IPv4 e IPv6 móvil asignando varias direcciones IP a la AMS. Se puede implementar en diferentes escenarios como en áreas urbanas, suburbanas o rurales; también permite la coexistencia entre usuarios fijos y móviles, así como la integración con redes no pertenecientes a WiMAX como la Red Central EPC de 3GPP [2].

La arquitectura admite la integración entre distintos tipos de estaciones base como pico, micro y macro-BSs siendo una solución para ampliaciones tanto de cobertura como capacidad, por lo que su implementación es de acuerdo a los escenarios que se desea cubrir. Una de las ventajas de la arquitectura de WiMAX

Móvil es la eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico a través de la integración de funciones de la ASN [2].

➤ Arquitectura de red en LTE-Advanced

Por su parte, LTE-Advanced tiene una arquitectura basada en IP conectando el UE con la PDN y provee calidad de servicio, por lo que para la transmisión de voz se emplea principalmente VoIP.

La Red de Acceso E-UTRAN mejora el *throughput* de los usuarios, la capacidad y disminuye las latencias, brindando al usuario mayor movilidad. Está conformada por *eNodeB*'s que administran los recursos radioeléctricos y brindan seguridad en las comunicaciones, son interconectados a través del interfaz X2, y a su vez el *eNodeB* es conectado con la Red EPC con el interfaz S1, específicamente con el S-GW a través del interfaz de Plano de Usuario *S1-u* y con la MME a través del interfaz de Plano de Control *S1-c*.

La Red EPC tiene como objetivos la disminución de elementos en la red con respecto a sistemas 3GPP antecesores, siendo la utilización de un espectro más flexible y la movilidad, los principales [2]. Entre los componentes de la Red EPC se encuentra la P-GW que entre sus funciones asigna direcciones IP a los UEs y permite el acceso a los usuarios con redes no-3GPP como WiMAX, así también el *Gateway* de servicio (S-GW) asegura la movilidad del UE y el *interfuncionamiento* con otras tecnologías 3GPP; y, la Entidad de gestión de movilidad (MME) que se encarga de la conectividad y brinda seguridad entre el UE y la red [66].

De acuerdo a lo descrito en los dos puntos anteriores, se puede concluir que las dos redes cuentan con arquitecturas similares, sin embargo se diferencian en la mayoría de sus funcionalidades, como por ejemplo, el encaminamiento del tráfico en la puerta de enlace (*gateway*) en WiMAX 2 es llevado a cabo por la entidad *ASN-Gateway*, en cambio que en LTE-Advanced divide en Plano de Usuario y Plano de Control, a través de S-GW y MME, respectivamente.

También es importante tomar en cuenta que ambos sistemas proveen compatibilidad con redes antecesoras, por una parte, en WiMAX 2 con redes WiMAX Móvil, y por otra, en LTE-Advanced con redes LTE. Adicionalmente cabe indicar que WiMAX 2 y LTE-Advanced son interoperables.

4.2.5 CAPA FÍSICA

El estudio de la capa física, es con base en la Recomendación UIT-R M.2012 que especifica las interfaces radioeléctricas terrenales de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales-Avanzadas (IMT-Advanced), en el Anexo 1 (de la Recomendación) se describe la tecnología de la interfaz radioeléctrica LTE-Advanced y en el Anexo 2, la tecnología de la interfaz radioeléctrica WirelessMAN-Advanced.

4.2.5.1 Métodos Dúplex

Existe semejanza en los métodos dúplex soportados por WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced, los cuales son: TDD, FDD y H-FDD lo que permite una mejor utilización del espectro.

En IEEE 802.16m los esquemas FDD y TDD maximizan el procesamiento en banda base, y puede utilizar el esquema H-FDD en estaciones móviles en redes FDD, reduciendo así sus costos. También en H-FDD se utiliza los recursos de una forma más eficaz en la cual dos grupos pueden transmitir realizando “agrupación complementaria de usuarios”.

En LTE-Advanced se utiliza tramas de 10 ms para FDD y TDD. En el esquema FDD las tramas utilizan dos frecuencias de portadora, una para DL y otra para UL. En el modo H-FDD su operación es en bandas de frecuencia en pares, es decir, las utilizadas para FDD, este esquema es utilizado también en redes GSM; hay que tomar en cuenta que la transmisión y recepción en el equipo de usuario es en diferentes tiempos [66].

Por otro lado, en TDD se utiliza una frecuencia de portadora para la transmisión en DL y UL, realizando la conmutación entre los dos enlaces en las *subtramas especiales* que están conformadas por tres componentes: *DwPTS*, *GP* y *UpPTS* que en conjunto tienen una longitud de 1 ms. En TDD al igual que en H-FDD, el UE no transmite y recibe simultáneamente [66, 39].

La principal diferencia entre los modos dúplex soportados por los dos sistemas radica en el procesamiento del esquema dúplex por división de frecuencia para WirelessMAN-Advanced, y del esquema dúplex por división en el tiempo para LTE-Advanced. Como se indicó anteriormente, el modo H-FDD en 802.16m a diferencia del tradicional, optimiza su utilización transmitiendo por grupos de usuarios; en cuanto que en LTE *Release* 10, TDD utiliza *subtramas especiales* que proveen el tiempo de guarda adecuado para la transición entre los enlaces DL y UL.

4.2.5.2 Métodos de Acceso Múltiple

Las IMT-Avanzadas en sus requerimientos deben soportar altas tasas de datos tanto para *downlink* como para *uplink*, así también permitir la compatibilidad con sistemas previos (IMT-2000); en cumplimiento de los requerimientos, los sistemas WiMAX 2 y LTE-Advanced utilizan técnicas multi-portadora brindando robustez en el sistema de comunicaciones. El esquema de acceso múltiple utilizado en IEEE 802.16m es OFDMA para el enlace descendente y el enlace ascendente. Por su parte, LTE *Release* 10 utiliza el esquema OFDMA en *downlink* y para *uplink* emplea SC-FDMA.

En ambos sistemas se emplea para DL el esquema OFDMA, al ser una técnica multiusuario en la cual se asigna grupos de sub-portadoras a cada usuario; a diferencia de OFDM que asigna las sub-portadoras a un usuario, como se trató en el Capítulo 1. Por lo que el ancho de banda del canal es dividido en grupos con un número determinado de sub-portadoras como se muestra en la Fig. 4.1. Entre sus ventajas, se tiene mayor eficiencia espectral, así como disminución en la interferencia.

Por otra parte, en UL los dos sistemas utilizan métodos de acceso múltiple diferentes; por un lado, en 802.16m se define el esquema OFDMA, y por otro, LTE *Release* 10 utiliza SC-FDMA; entre los objetivos de LTE para el enlace ascendente está el disminuir el nivel de *PAPR*, lo cual implica minimizar el consumo de potencia en el equipo de usuario prolongando así el tiempo de vida de la batería, también obtener mayores tasas de datos en el borde de la celda. La modulación en SC-FDMA es realizada mediante la combinación de todos los símbolos simultáneamente.

Otro aspecto a considerar es la diversidad de frecuencia, soportar técnicas avanzadas de antenas y mejorar la capacidad. LTE y por consiguiente LTE-Advanced no emplean OFDMA en *uplink* tomando en cuenta que era una alternativa viable por su utilización en los dos sentidos de los enlaces (DL y UL), debido a que no posee un bajo *PAPR* y además modula los símbolos de los datos de cada portadora de forma independiente [66]. Para la transmisión de cada usuario, se emplean anchos de banda diferentes manteniendo la ortogonalidad, por lo que a cada uno le corresponde un conjunto de sub-portadoras, como se muestra en la Fig. 4.1. Es importante indicar que de acuerdo a los métodos de acceso múltiple adoptados en IEEE 802.16m y LTE *Release* 10, permitirán la compatibilidad e interoperabilidad con IEEE 802.16-2009 y LTE *Release* 8, respectivamente.

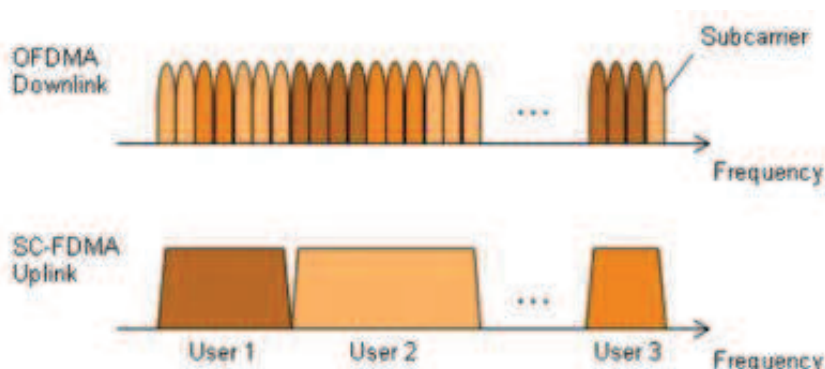


Figura 4.1. Acceso Múltiple OFDMA y SC-FDMA¹⁵

¹⁵ Fuente: <<http://www.3gpp.org/LTE>>

4.2.5.3 Estructura de trama

En WirelessMAN-Advanced la longitud de la trama es de 5 ms y soporta 4 tipos de subtramas que dependen del ancho de banda del canal; la longitud de la supertrama es de 20 ms y está conformada por cuatro tramas radioeléctricas, las subtramas soportadas son:

- Subtrama del tipo 1: contiene 6 símbolos OFDMA
- Subtrama del tipo 2: contiene 7 símbolos OFDMA
- Subtrama del tipo 3: contiene 5 símbolos OFDMA
- Subtrama del tipo 4: contiene 9 símbolos OFDMA

En LTE-Advanced la longitud de la trama es de 10 ms y utiliza símbolos OFDMA, las tramas utilizadas en modo dúplex FDD son de Tipo 1 y las tramas utilizadas en modo dúplex TDD son de Tipo 2. La trama de Tipo 1 utiliza dos frecuencias de portadora, f_{UL} para *uplink* y f_{DL} para *downlink*; y, en la trama de Tipo 2 se emplea una frecuencia de portadora para DL y UL.

La diferencia entre las tramas de WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced es la longitud que soporta cada una. Las tramas en IEEE 802.16m tienen una longitud de 5 ms, para los esquemas FDD y TDD utilizan un número de subtramas específico y su longitud es de acuerdo con el ancho de banda del canal, prefijo cíclico y del tipo de subtrama como los indicados anteriormente; también soporta supertramas de 20 ms. Por otra parte, en LTE *Release 10* la trama tiene una longitud de 10 ms y está conformada por 10 subtramas de 1 ms, en FDD utilizan dos frecuencias de portadoras para DL y UL; y, en TDD cada trama está formada por 8 “subtramas normales” de 1 ms de longitud, y por dos “subtramas especiales” con 1 ms de duración, las cuales administran un período de guarda (GP) para la conmutación entre DL y UL.

4.2.5.4 Modulación / Codificación

Los sistemas móviles celulares para mejorar tanto la capacidad como la cobertura utilizan Modulación y Codificación Adaptativa (AMC). En el esquema de

modulación, la de menor orden como QPSK es la más robusta, también entre sus ventajas soporta altos niveles de interferencia y opera con bajas tasas de transmisión. Por otra parte, la modulación de mayor orden como 64-QAM opera con altas tasas de transmisión, pero es más susceptible a interferencias y ruido, siendo utilizado preferentemente con un alto valor de SINR¹⁶.

En el esquema de codificación, la tasa de código depende de las condiciones del radioenlace; un bajo valor de tasa de código es utilizado en condiciones de canal no tan favorables, y con un alto valor de tasa de código, es utilizado en condiciones con un alto nivel de SINR [66].

La principal semejanza entre WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced es la utilización de los esquemas de modulación QPSK, 16-QAM y 64-QAM para los enlaces descendente y ascendente. La codificación utilizada en WirelessMAN-Advanced es Código Turbo Convolutacional (CTC) con velocidad mínima de 1/3, por su parte el CTC soporta bloques FEC adicionales. Y LTE-Advanced utiliza Código Turbo con velocidad mínima de 1/3 complementada por HARQ, el codificador turbo utiliza un Código convolutacional concatenado en paralelo con *encoders* de 8 estados y un código turbo interno. Considerando que en 802.16m el codificador CTC utiliza un doble código binario CRSC¹⁷ que es formado por dos códigos RSC concatenados, lo que brinda mejores características que con el Código Turbo convencional, como mayor convergencia en la decodificación, disminución en la latencia y mayor robustez [2, 66].

4.2.5.5 Técnicas avanzadas de antena

Las técnicas avanzadas de antena, permiten el incremento de la velocidad de transmisión a través de múltiples antenas. El requerimiento mínimo para IMT-Advanced en la configuración de antenas es de: 2×2 para DL y 1×2 para UL.

¹⁶ SINR: *Signal-to-Interference plus Noise Ratio*

¹⁷ CRSC: *Circular Recursive Systematic Convolutional*

IEEE 802.16m y LTE *Release* 10 utilizan técnicas *MIMO* mejoradas para cumplir con los requerimientos establecidos en las IMT-Avanzadas como obtener altas tasas de transmisión tanto para DL como para UL, y eficiencia espectral mejorada.

IEEE 802.16m soporta esquemas multi-antena avanzadas de un usuario (*SU-MIMO*) y multi-usuario (*MU-MIMO*). En el enlace descendente los esquemas *MIMO* soportados son: *SU-MIMO* con codificación vertical, *MU-MIMO* con codificación horizontal, así también, precodificación adaptativa con bucle cerrado y precodificación no adaptativa con bucle abierto; y, también diversidad de transmisión no adaptativa con SFBC y CDR. En cuanto que en el enlace ascendente, los esquemas *MIMO* soportados son: *SU-MIMO* y multiplexación espacial en colaboración (*MU-MIMO*) con codificación vertical (adaptativa y no adaptativa) y diversidad de transmisión no adaptativa con SFBC.

LTE-Advanced soporta el esquema *SU-MIMO* en modo de bucle abierto y bucle cerrado, *MU-MIMO*, y el esquema de diversidad de transmisión. El UE en modo de bucle cerrado provee al eNB realimentación de CQI, Indicadores de Rango e Indicadores de la matriz de precodificación (PMI), siendo su utilización conveniente en escenarios de baja movilidad. En bucle abierto, por su parte, es aplicable en escenarios de alta movilidad, tomando en cuenta que el PMI no es considerado [91].

En *downlink*, LTE *Release* 10 incrementa el número de capas de transmisión siendo implementado en el *Modo de Transmisión 9*, dando lugar a una configuración máxima de 8 antenas transmisoras y 8 antenas receptoras. Y en UL, la multiplexación espacial de un usuario es transmitida desde el UE con máximo dos bloques de transporte con esquema de modulación y codificación propios, y cada bloque con 1 o 2 capas de transmisión. El rango de transmisión, es establecido dinámicamente [2].

En ambas redes se tienen las siguientes configuraciones de antenas: para el enlace descendente: 2×2, 2×4, 4×2, 4×4, 8×8; y, para el enlace ascendente: 1×2,

1×4, 2×4, 4×4 [2]. Siendo las configuraciones máximas: 8×8 para DL y 4×4 para UL. La diferencia radica en el modo de operación y utilización de los esquemas MIMO en cada caso.

4.3 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE WIRELESSMAN-ADVANCED Y LTE-ADVANCED

En la Tabla 4.10 se muestra un resumen de las principales características de la capa física descritos anteriormente.

| Parámetros | WirelessMAN-Advanced | LTE-Advanced |
|-------------------------------|--|---|
| Estándar | IEEE 802.16m-2011 | LTE 3GPP Release 10 |
| Métodos de acceso múltiple | OFDMA (para DL) OFDMA (para UL) | OFDMA (para DL) SC-FDMA (para UL) |
| Modulación | QPSK 16-QAM 64-QAM | QPSK 16-QAM 64-QAM |
| Codificación | Código turbo convolucional (CTC) con velocidad 1/3 | Codificación Turbo con velocidad 1/3 complementada por HARQ |
| Métodos Dúplex | TDD FDD H-FDD | TDD FDD H-FDD |
| Estructura de trama | Supertrama: 20 ms Trama: 5 ms | Trama: 10 ms Subtrama: 1 ms |
| Configuración máx. de antenas | 8×8 para DL | 8×8 para DL |
| | 4×4 para UL | 4×4 para UL |

Tabla 4.10. Resumen de las características principales de la capa física en WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced

4.4 PRINCIPALES DIFERENCIAS ENTRE WIRELESSMAN-ADVANCED Y LTE-ADVANCED

En LTE-Advanced se utiliza Redes Heterogéneas, lo que permite obtener una mayor cobertura y mejores capacidades en este tipo de redes, las distintas estaciones base utilizan diferentes niveles de potencia de transmisión y con múltiples tecnologías de acceso. Los métodos para soportar redes heterogéneas son mediante agregación de portadoras y sin agregación de portadoras.

WirelessMAN-Advanced tiene como principales funcionalidades la utilización de estaciones base para femtoceldas, también soporta estaciones de retransmisión lo que permite incrementar la cobertura, servicios basados en la localización (*LBS, Location Based Service*), servicios de multidifusión (*E-MBS, Enhanced Multicast Broadcast Service*).

Una de las diferencias es referente a la estructura de trama, en WirelessMAN-Advanced la longitud de trama es de 5 [ms] y en LTE-Advanced es de 10 [ms].

LTE-Advanced para el enlace ascendente utiliza el acceso múltiple SC-FDMA, y WirelessMAN-Advanced utiliza el acceso múltiple OFDMA.

Por último cabe indicar que el paso de sistemas pre-4G (WiMAX Móvil y LTE) hacia sistemas de cuarta generación *IMT-Advanced* se da principalmente por mejoras a nivel de la interfaz radioeléctrica, funcionamiento técnico, capa física, y nuevas y mejoradas características a las utilizadas en sistemas predecesores; entre las cuales se puede mencionar:

- Evolución en las capacidades *MIMO* con una configuración máxima de 8×8 para *downlink* y de 4×4 para *uplink*.

- Agregación de portadoras, incrementando el ancho de banda del canal a 100 MHz (con 5 *componentes de portadora* de 20 MHz).
- Mayores tasas de transmisión teóricas de 100 Mbps con alta movilidad y 1 Gbps con baja movilidad, que superan ampliamente a las actuales y brindando así mejores servicios a los usuarios.
- Incremento en la eficiencia espectral y disminución en las latencias de Plano de Usuario y Plano de Control.

Adicionalmente se menciona las mejoras logradas con los 2 sistemas:

Los esquemas de retransmisión es una de las características importantes a considerar en WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced (LTE-A), debido a que a través de Estaciones de Retransmisión (RS) y Nodos de Retransmisión (RN), respectivamente, se incrementa la cobertura. En LTE-A la interfaz *Un* es utilizada para la interconexión entre el *eNodeB* y el Nodo de Retransmisión; y la interfaz *Uu* para la interconexión entre el equipo de usuario y el Nodo de Retransmisión.

En las técnicas avanzadas de antena, adicional a *MIMO* mejorado, se emplea en LTE-Advanced la técnica de transmisión y recepción multipunto coordinado (CoMP) es desarrollado en el *Release* 11, y en WiMAX 2, la conformación de haz (*beamforming*).

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Uno de los objetivos de las IMT-Avanzadas, es tener un espectro de frecuencias común a nivel mundial, para lo cual WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced, deben operar en las bandas de frecuencia establecidas por la UIT, permitiendo que el usuario final al desplazarse de un continente a otro, no necesite adquirir otro dispositivo para que se pueda comunicar, sino lo realice con el terminal móvil avanzado.
- Las IMT-Avanzadas permitirán la compatibilidad entre sus redes, pudiendo utilizar dispositivos móviles LTE-Advanced en redes WirelessMAN-Advanced, y viceversa; por lo que no estarían limitados a sus propias redes.
- Una de las ventajas que tendría LTE *Release* 10 es la compatibilidad con el antecesor *Release* 8, por la posibilidad de utilizar dispositivos móviles LTE en redes LTE-Advanced, lo que implica que el cambio de dispositivo móvil evolucionado del usuario final puede ser paulatino, para en el futuro poder obtener los beneficios que brindaría la red de cuarta generación.
- Las velocidades de transmisión a soportar por las IMT-Avanzadas y los menores retardos, brindarán un mejor desempeño de los equipos móviles de los usuarios finales, tales como la navegación en Internet con un menor tiempo de acceso a páginas web, mensajería instantánea, videoconferencia y juegos en línea. Esto permitirá que los usuarios puedan tener mayor acceso a servicios de banda ancha móvil, disminuyendo la brecha digital, especialmente en países en vías de desarrollo.

- LTE-Advanced mejora sus capacidades con la utilización de Redes Heterogéneas (HetNet) incrementando la cobertura. La utilización de este tipo de redes permite al usuario final contar en su dispositivo móvil con mayores velocidades de transmisión. Otra de las ventajas ofrecidas es la utilización de Nodos de Retransmisión para brindar una mayor cobertura. Así también, la utilización de la transmisión y recepción Multipunto Coordinada (CoMP).
- La eficiencia espectral máxima obtenida por los dos sistemas, es de aproximadamente 16 bps/Hz para DL y superior a 8 bps/Hz para UL con configuraciones de antena de 4×4 y 2×4 para *downlink* y *uplink*, respectivamente. Las cuales indican las máximas tasas de datos teóricas, en el caso de WirelessMAN-Advanced sería de aprox. 1.7 Gbps (en DL) y 940 Mbps (en UL); y, en LTE-Advanced sería de 1.6 Gbps (en DL) y 840 Mbps (en UL), considerando un ancho de banda de 100 MHz; en ambos casos se obtienen velocidades muy similares.
- La eficiencia espectral de la celda en los dos sistemas supera con el doble a los requerimientos de las IMT-Avanzadas en *Indoor*, y con el triple en escenarios *Rural Macrocell*, obteniendo altas velocidades de transmisión siendo superiores a 650 Mbps para *downlink* y de aprox. 300 Mbps para *uplink*, lo que significa que en los dos escenarios se obtendrían tasas de datos muy altas aún en escenarios de alta velocidad.
- El máximo ancho de banda soportado por ambos sistemas es de 100 MHz con agregación de hasta 5 componentes de portadora de 20 MHz, superando a los 40 MHz de los requerimientos de las IMT-Avanzadas, lo que permitirá brindar elevadas velocidades de transmisión.
- Otro aspecto a considerar es la latencia, las dos tecnologías proveen bajos niveles de latencia tanto de Plano de Usuario como de Plano de Control, siendo más significativo en LTE-Advanced, alcanzando 4 ms (en FDD) y 50

ms, respectivamente, lo que da lugar a un retardo mínimo en la prestación de servicios y sin mayores pausas que en los sistemas actuales.

- Las bandas de frecuencia de operación de WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced son similares en un 40%, en su mayoría son bandas por encima de 1 GHz, debido principalmente a que las bandas inferiores a 1 GHz han sido incorporadas en las IMT en los últimos años, dando lugar a una amplia diversidad y flexibilidad en el espectro.
- Las arquitecturas de WiMAX 2 y LTE-Advanced se basan en conmutación de paquetes, son sistemas todo-IP; las entidades básicas en los dos sistemas son: Red de Acceso, Red Central y Terminal Móvil. La diferencia entre ambos sistemas radica en las funcionalidades de cada uno, principalmente en el *gateway*, debido a que en WiMAX 2 es realizado por la entidad ASN-GW, y por otro lado, en LTE-Advanced se divide en Plano de Usuario con S-GW y en el Plano de Control con MME.
- Una de las semejanzas entre WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced es referente a los esquemas de modulación soportados, los cuales son: QPSK, 16-QAM y 64-QAM. También los métodos dúplex soportados por los dos sistemas: TDD, FDD y H-FDD; la diferencia se da en el procesamiento, por una parte IEEE 802.16m en el modo H-FDD optimiza su utilización mediante la transmisión por grupo; y por otra, en LTE *Release 10* para el esquema TDD se emplean *subtramas especiales* para el tiempo de guarda en la transición entre DL y UL.
- El esquema de acceso múltiple utilizado por los dos sistemas para el enlace descendente es OFDMA, brindando ventajas como mayor eficiencia espectral y baja latencia. La diferencia radica en el enlace ascendente, en 802.16m se emplea OFDMA, y LTE-Advanced emplea SC-FDMA, debido a que entre los objetivos de LTE para UL, está minimizar el nivel de PAPR brindando una mayor vida útil del UE.

- Las tramas en LTE-Advanced tienen una longitud de 10 ms y están conformadas por 10 subtramas de 1 ms, en TDD cada trama está compuesta por 8 subtramas de 1 ms y dos *subtramas especiales* con 1 ms de duración cada una. A diferencia de WirelessMAN-Advanced, que las tramas tienen una duración de 5 ms, soporta supertramas de 20 ms, y las subtramas son de longitud variable.

- Debido a las mejoras incorporadas en las tecnologías, los dos sistemas soportan esquemas multi-antena como *SU-MIMO* y *MU-MIMO*, también multiplexación espacial y diversidad de transmisión. En ambos sistemas, la configuración de antenas máx. es de 8×8 para DL y de 4×4 para UL, teniendo como diferencia el modo de operación y los esquemas utilizados, brindando altas tasas de datos.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda complementar el estudio de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales-Avanzadas, analizando las especificaciones de las interfaces radioeléctricas de satélite.
- Se recomienda analizar las versiones posteriores de LTE 3GPP Release 10 y las enmiendas posteriores al Estándar IEEE 802.16m, debido a las capacidades que proporcionan las Telecomunicaciones Móviles Internacionales-Avanzadas, son sujetas a mejoras.
- Tomando en cuenta las mejoras en las características de los sistemas de telecomunicaciones móviles de cuarta generación, se recomienda que tanto operadores como usuarios conozcan los beneficios de la utilización de los sistemas en mención y su importancia en la disminución de la brecha digital.
- Para una futura implementación de las Telecomunicaciones móviles internacionales-avanzadas en el país, los operadores deberán tomar en cuenta la situación actual de las redes, y la compatibilidad en caso de utilizar tecnologías de una misma familia, sea 3GPP para LTE-Advanced o IEEE para WirelessMAN-Advanced (WiMAX 2).
- Se recomienda realizar un estudio económico sobre la infraestructura de las 2 redes WirelessMAN-Advanced y LTE-Advanced, el mismo que permitirá conocer a mayor detalle la inversión que se realizaría con cada uno de los sistemas.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

- [1] S. Ahmadi. "An Overview of Next-Generation Mobile WiMAX Technology," *IEEE Communications Magazine*, June 2009.
- [2] S. Ahmadi. *Mobile WiMAX: A Systems Approach to Understanding IEEE 802.16m Radio Access Technology*. Elsevier, 2011.
- [3] I. F. Akyildiz *et al.* "The evolution to 4G cellular systems: LTE-Advanced". *Physical Communication Journal*, Vol. 3, 2010, <http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/surveys/ltea.pdf>.
- [4] The LTE Network Architecture. Alcatel-Lucent Strategic White Paper.
- [5] P. Bhat *et al.* "LTE-Advanced: An Operator Perspective," *IEEE Communications Magazine*, Feb. 2012.
- [6] H. Carrión Gordón. "Entorno Regulatorio de las Telecomunicaciones. Regulación e inversión en telecomunicaciones. Estudio de caso para el Ecuador". IMAGINAR, Ecuador, 2007.
- [7] CDMA Development Group (CDG). cdmaOne. [En línea] <http://www.cdg.org/technology/cdmaone.asp> [último acceso, Nov. 2012].
- [8] K.-C. Chen and J. R. de Marca. *Mobile WiMAX*. Wiley - IEEE, 2008.
- [9] S. Chen *et al.* "Technical Innovations Promoting Standard Evolution: From TD-SCDMA to TD-LTE and Beyond," *IEEE Wireless Communications*, Vol. 19, No. 1, Feb. 2012.

- [10] CITELE. Como CDMA2000 1X, EV-DO Rev. A y VoIP darán satisfacción a la demanda de servicios de telecomunicaciones accesibles. [En línea] <http://www.oas.org/en/citel/infocitel/2007/febrero/cdg_e.asp> [último acceso, Oct. 2012].
- [11] CONATEL. Plan Nacional de Frecuencias (PNF), Ecuador 2012.
- [12] CONATEL. Resolución TEL-804-29-CONATEL-2012.
- [13] L. Couch, II. *Sistemas de comunicación digitales y analógicos*. Pearson Educación, 7ma. Edición, México, 2008.
- [14] Heterogeneous networks - increasing cellular capacity. <http://www.ericsson.com/res/thecompany/docs/publications/ericsson_review/2011/heterogeneous_networks.pdf>, 2011. ERICSSON REVIEW.
- [15] K. Etemad. "Overview of Mobile WiMAX Technology and Evolution," *IEEE Communications Magazine*, Oct. 2008.
- [16] K. Etemad and M.-Y. Lai. *WiMAX Technology and Network Evolution*. Wiley - IEEE Press, 2010.
- [17] ETSI (European Telecommunications Standards Institute). DECT. [En línea] <<http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/dect>> [último acceso, Dic. 2012].
- [18] ETSI. Mobile Technologies GSM. [En línea] <<http://www.etsi.org/website/technologies/gsm.aspx>> [último acceso, Nov. 2012].
- [19] FCC (Federal Communications Commission). TECH TOPIC 22: Application of Emerging Wireless Broadband Technology for Public Safety

- Communications. [En línea]
<<http://transition.fcc.gov/pshs/techtomics/techtomics22.html>> [último acceso, Nov. 2012].
- [20] V. Garg. *Wireless Communications and Networking*. Elsevier, 1st Edition, 2007.
- [21] IEEE 802.16m-07/002r10, "IEEE 802.16m System Requirements", 2010, <http://ieee802.org/16/tgm/docs/80216m-07_002r10.pdf>.
- [22] IEEE 802.16m-08/004r5, "IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document (EMD)", 2009, <<http://grouper.ieee.org/groups/802/16/tgm/core.html>>.
- [23] IEEE 802.16m-09/0034r4, "IEEE 802.16m System Description Document (SDD)", 2010, <<http://ieee802.org/16/tgm/core.html>>.
- [24] IEEE Std. 802.16m-2011. *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems - Amendment 3: Advanced Air Interface*.
- [25] IEEE. The IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless Access Standards. [En línea] <<http://www.ieee802.org/16/>> [último acceso, Ene. 2013].
- [26] IETF. About. [En línea] <<http://www.ietf.org/about/>> [ultimo acceso, Feb. 2013].
- [27] ITU. About mobile technology and IMT-2000. [En línea] <<http://www.itu.int/osg/spu/imt-2000/technology.html>> [último acceso, Oct. 2012].

- [28] Brochure UIT-R. 2010. <http://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/gen/T-GEN-OVW-2010-PDF-S.pdf>. ITU.
- [29] ITU. Circular Letter 5/LCCE/2. *“Invitation for submission of proposals for candidate radio interface technologies for the terrestrial components of the radio interface(s) for IMT-Advanced and invitation to participate in their subsequent evaluation”*. <<http://www.itu.int/md/R00-SG05-CIR-0002>>.
- [30] Comisiones de Estudio del UIT-R. Junio de 2010. <http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/0A/0E/R0A0E0000010001PDFS.pdf>. ITU.
- [31] ITU. Desarrollo de las IMT-Avanzadas: El enfoque EMeRT. [En línea] <<http://www.itu.int/itu-news/manager/display.asp?lang=es&year=2008&issue=10&ipage=39&ext=html>> [último acceso, Sept. 2012].
- [32] ITU. Historia. [En línea] <<http://www.itu.int/es/about/Pages/history.aspx>> [último acceso, Oct. 2012].
- [33] ITU. IMT-2000 radio interface expanded with OFDMA technology. [En línea] <http://www.itu.int/newsroom/press_releases/2007/12.html> [último acceso, Jun. 2012].
- [34] ITU. ITU global standard for international mobile telecommunications ‘IMT-Advanced’. [En línea] <<http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=information&rlink=imt-advanced&lang=en>> [último acceso, Nov. 2012].
- [35] ITU. La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT adopta nuevas medidas en relación con sus normas 3G. [En línea]

http://www.itu.int/newsroom/press_releases/2007/30-es.html> [último acceso, Ene. 2013].

- [36] ITU. Presentación de las IMT-Avanzadas y proceso de evaluación. [En línea] <http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=study-groups&rlink=rsg5-imt-advanced&lang=es>> [último acceso, Oct. 2012].
- [37] ITU. Recomendación UIT-R M.1645, “Marco y objetivos generales del desarrollo futuro de las IMT-2000 y de los sistemas posteriores”, 2003.
- [38] ITU. Recomendación UIT-R M.1822, “Marco para los servicios soportados por las IMT”, 2007.
- [39] ITU. Recomendación UIT-R M.2012, “Especificaciones detalladas de las interfaces radioeléctricas terrenales de las telecomunicaciones móviles internacionales-avanzadas (IMT-Avanzadas)”, 2012.
- [40] ITU. Recommendation ITU-R M.1036-4, “Frequency arrangements for implementation of the terrestrial component of International Mobile Telecommunications (IMT) in the bands identified for IMT in the Radio Regulations (RR)”, 2012.
- [41] ITU. Recommendation ITU-R M.1801-2, “Radio interface standards for broadband wireless access systems, including mobile and nomadic applications, in the mobile service operating below 6 GHz”, 2013, http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1801-2-201302-I!!PDF-E.pdf>.
- [42] ITU. Reglamento de Radiocomunicaciones (RR). RESOLUCIÓN 223 (Rev.CMR-12), “Bandas de frecuencias adicionales identificadas para las IMT”. Resoluciones y Recomendaciones, Volumen III, Edición de 2012.

- [43] ITU. Reglamento de Radiocomunicaciones (RR). RESOLUCIÓN 224 (Rev.CMR-12), “Bandas de frecuencias para el componente terrenal de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales por debajo de 1 GHz”. Resoluciones y Recomendaciones, Volumen III, Edición de 2012.
- [44] ITU. Report ITU-R M.2039-2, “Characteristics of terrestrial IMT-2000 systems for frequency sharing/interference analyses”, Nov. 2010.
- [45] ITU. Report ITU-R M.2133, “Requirements, evaluation criteria and submission templates for the development of IMT-Advanced”, 2008.
- [46] ITU. Report ITU-R M.2134, “Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s)”, 2008.
- [47] ITU. Report ITU-R M.2135-1, “Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced”, 2009.
- [48] ITU. Report ITU-R M.2198, “The outcome of the evaluation, consensus building and decision of the IMT-Advanced process (Steps 4 to 7), including characteristics of IMT-Advanced radio interfaces”, Nov. 2010.
- [49] ITU. Resolución UIT-R 17-4, “Integración de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales (IMT-2000 e IMT-Avanzadas) en las redes existentes”, 2012.
- [50] ITU. Resolución UIT-R 56-1, “Denominación de la telecomunicaciones móviles internacionales”, 2012.
- [51] Resumen Ejecutivo de “*Medición de la Sociedad de la Información*”, Ed. 2012. <http://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/ind/D-IND-ICTOI-2012-SUM-PDF-S.pdf>. ITU.

- [52] ITU. Sector de Desarrollo de las Telecomunicaciones (UIT-D). [En línea] <<http://www.itu.int/en/publications/ITU-D/Pages/default.aspx>> [último acceso, Nov. 2012].
- [53] ITU. Sector de Radiocomunicaciones (UIT-R). [En línea] <<http://www.itu.int/es/ITU-R/Pages/default.aspx>> [último acceso, Nov. 2012].
- [54] ITU. Sector de Radiocomunicaciones (UIT-R), *Misión*. [En línea] <<http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=information&rlink=mission-statement&lang=es>> [último acceso, Nov. 2012].
- [55] ITU-R. Document IMT-ADV/4-E, “Acknowledgement of Candidate Submission from IEEE under Step 3 of the IMT-Advanced Process (IEEE Technology)”, 2009. <<http://www.itu.int/md/R07-IMT.ADV-C-0004/en>>.
- [56] ITU-R. Document IMT-ADV/8-E, “Acknowledgement of Candidate Submission from 3GPP Proponent (3GPP Organization Partners of ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TTA and TTC) under Step 3 of the IMT-Advanced Process (3GPP Technology)”, 2009. <<http://www.itu.int/md/R07-IMT.ADV-C-0008/en>>.
- [57] M. Iwamura *et al.* "Relay Technology in LTE-Advanced," *NTT DOCOMO Technical Journal*, Vol. 12 No. 2, 2010, <http://www.nttdocomo.co.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical_journal/bn/vol12_2/vol12_2_029en.pdf>.
- [58] D. Lee *et al.* “Coordinated Multipoint Transmission and Reception in LTE-Advanced: Deployment Scenarios and Operational Challenges,” *IEEE Communications Magazine*, Feb. 2012.

- [59] P. Lescuyer and T. Lucidarme. *Evolved Packet System (EPS): the LTE and SAE evolution of 3G UMTS*. John Wiley & Sons, England, 2008.
- [60] NATIONAL INSTRUMENTS. IS-95 (CDMA) and GSM (TDMA). [En línea] <<http://www.ni.com/white-paper/7107/en>> [último acceso, Nov. 2012].
- [61] S. Parkvall, A. Furuskar, and E. Dahlman. “Evolution of LTE toward IMT-Advanced,” *IEEE Communications Magazine*, Feb. 2011.
- [62] LTE Release 9 Technology Introduction. Dec. 2011. <http://cdn.rohde-schwarz.com/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma191/1MA191_0E_LTE_release_9_technology.pdf>. Rohde & Schwarz White Paper.
- [63] LTE-Advanced Technology Introduction. Aug. 2012. <http://cdn.rohde-schwarz.com/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma169/1MA169_3e_LTE-Advanced_technology.pdf>. Rohde & Schwarz White Paper.
- [64] M. Rumney. “*LTE and the Evolution to 4G Wireless: Design and Measurement Challenges*”, Chapter 8: Looking Towards 4G: LTE-Advanced. (PDF Version *online*), John Wiley & Sons, 2nd Ed., 2013, <http://www.home.agilent.com/upload/cmc_upload/All/Agilent-LTE-Book-Chap8-Looking-Towards-4G-LTE-Advanced-2294001.pdf?&cc=EC&lc=eng>.
- [65] K. Scarfone, C. Tibbs, and M. Sexton. *Guide to Securing WiMAX Wireless Communications*. <csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-127/sp800-127.pdf>, 2010. National Institute of Standards and Technology.

- [66] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker. *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons, 2nd Ed., 2011.
- [67] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker. *LTE - The UMTS Long Term Evolution: A Pocket Dictionary of Acronyms*. John Wiley & Sons, 2009, <http://www.wiley.com//legacy/wileychi/sesia_theumts/supp/LTE-A_Pocket_Dictionary_of_Acronyms.pdf>.
- [68] C. Sungchung *et al.* "Evolution of Uplink MIMO for LTE-Advanced," *IEEE Communications Magazine*, Feb. 2011.
- [69] H. Taoka *et al.* "MIMO and CoMP in LTE-Advanced," *NTT DOCOMO Technical Journal*, Vol. 12 No. 2, 2010, <http://www.nttdocomo.co.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical_journal/bn/vol12_2/vol12_2_020en.pdf>.
- [70] 3GPP. Technical Report, 3GPP TR 25.913, "Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN)" Release 8, 2008.
- [71] 3GPP. Technical Report, 3GPP TR 36.912, "Feasibility study for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced)" Release 10, 2011.
- [72] 3GPP. Technical Report, 3GPP TR 36.913, "Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced)" Release 10, 2011.
- [73] 3GPP. Technical Specification, 3GPP TS 36.201, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE physical layer; General description" Release 10, 2011.

- [74] 3GPP. Technical Specification, 3GPP TS 36.211, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation” Release 10, 2012.
- [75] 3GPP. Technical Specification, 3GPP TS 36.212, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding” Release 10, 2012.
- [76] 3GPP. Technical Specification, 3GPP TS 36.300, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), Overall description, Stage 2” Release 10, 2012.
- [77] TELECOM DICTIONARY. Wiley Publishing, Inc., 2008.
- [78] WiMAX Forum. About the WiMAX Forum. [En línea]
<<http://www.wimaxforum.org/about>> [último acceso, Ene. 2013].
- [79] WiMAX Forum. WiMAX Forum Certification Program. [En línea]
<<http://www.wimaxforum.org/certification>> [último acceso, Ene. 2013].
- [80] WiMAX Forum, Air Interface Requirements (WMF-T21-003-R020v02). Requirements for WiMAX Air Interface System Profile Release 2.
<http://resources.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/technical_document/2013/04/WMF-T21-003-R020v02_Air-Interface-Requirements.pdf>, 2010.
- [81] WiMAX Forum, Network Architecture, Stage2-Base (WMF-T32-001-R020v01). Architecture Tenets, Reference Model and Reference Points.
<http://resources.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/technical_document/2012/04/WMF-T32-001-R020v01_Network-Stage2-Base.pdf>, 2012.

- [82] WIRELESS MUSEUM. 1983 Motorola releases the first commercial portable cellular. [En línea]
<<http://www.wirelessmuseum.org/archives/134>> [último acceso, Nov. 2012].
- [83] 3GPP. About 3GPP. [En línea] <<http://www.3gpp.org/About-3GPP>> [último acceso, Feb. 2013].
- [84] 3GPP. GPRS & EDGE. [En línea]
<<http://www.3gpp.org/Technologies/Keywords-Acronyms/article/gprs-edge>> [último acceso, Oct. 2012].
- [85] 3GPP. LTE. [En línea] <<http://www.3gpp.org/LTE>> [último acceso, Feb. 2013].
- [86] 3GPP. Specification Groups. [En línea]
<<http://www.3gpp.org/Specification-Groups>> [último acceso, Feb. 2013].
- [87] UTRA-UTRAN Long Term Evolution (LTE) and 3GPP System Architecture Evolution (SAE).
<ftp://ftp.3gpp.org/Inbox/2008_web_files/LTA_Paper.pdf>. 3GPP.
- [88] 4G Mobile Broadband Evolution: 3GPP Release 10 and Beyond - HSPA+, SAE/LTE and LTE-Advanced. Jan. 2012. 4G AMERICAS White Paper.
- [89] Aceleración de la Banda Ancha en Las Américas. Dic. 2012. 4G AMERICAS White Paper.
- [90] MIMO and Smart Antennas for Mobile Broadband Systems. Oct. 2012. 4G AMERICAS White Paper.

- [91] MIMO and Smart Antennas for Mobile Broadband Systems. June 2013. 4G AMERICAS White Paper.
- [92] 4G AMERICAS. GPRS: General Packet Radio Service. [En línea] <<http://www.4gamericas.org/index.cfm?fuseaction=page§ionid=243>> [último acceso, Oct. 2012].
- [93] 3GPP (3rd Generation Partnership Project). [En línea] <<http://www.3gpp.org/>> [último acceso, Feb. 2013].
- [94] 3GPP2 (Third Generation Partnership Project 2). [En línea] <www.3gpp2.org> [último acceso, Feb. 2013].
- [95] 4G AMERICAS. [En línea] <<http://www.4gamericas.org>> [último acceso, Julio 2013].
- [96] ITU (International Telecommunication Union). [En línea] <<http://www.itu.int>> [último acceso, Ago. 2013].
- [97] WINNER+. [En línea] <<http://projects.celtic-initiative.org/winner+/WINNER+%20Evaluation%20Group.html>> [último acceso, Mar. 2013].

ANEXOS

ANEXO A

LISTA DE ACRÓNIMOS

LISTA DE ACRÓNIMOS

| | |
|---------------|--|
| 3GPP: | 3rd Generation Partnership Project (Proyecto Asociación de Tercera Generación) |
| 3GPP2: | 3rd Generation Partnership Project 2 (Proyecto Asociación de Tercera Generación 2) |
| 4G: | Fourth Generation (Cuarta Generación) |
| AAA: | Authentication, Authorization and Accounting (Autenticación, autorización y contabilidad) |
| ABS: | Advanced Base Station (Estación Base Avanzada) |
| ACK: | Acknowledgment (Acuse de recibo positivo) |
| AIEE: | American Institute of Electrical Engineers (Instituto Americano de Ingenieros Eléctricos) |
| AMPS: | Advanced Mobile Phone System (Sistema Telefónico Móvil Avanzado) |
| AMS: | Advanced Mobile Station (Estación Móvil Avanzada) |
| ARIB: | Association of Radio Industries and Businesses (Asociación de Industrias y Empresas de Radiocomunicaciones) |
| ARQ: | Automatic Repeat Request (Petición de Repetición Automática) |
| ARS: | Advanced Relay Station (Estación retransmisora avanzada) |

| | |
|----------------|---|
| ASN: | Access Service Network (Red de Servicio de Acceso) |
| ASN-GW: | ASN Gateway (Puerta de entrada de la Red de Servicio de Acceso) |
| ATIS: | Alliance for Telecommunications Industry Solutions (Alianza para Soluciones de la Industria de Telecomunicaciones) |
| BCCH: | Broadcast Control Channel (Canal de control de difusión) |
| BCH: | Broadcast Channel (Canal de difusión) |
| BR: | Bandwidth Request (Canal de petición de ancho de banda) |
| BS: | Base Station (Estación Base) |
| BWA: | Broadband Wireless Access (Acceso Inalámbrico de Banda Ancha) |
| CCSA: | China Communications Standards Association (Asociación de Estándares de Comunicaciones de China) |
| CDMA: | Code Division Multiple Access (Acceso Múltiple por División de Código) |
| CN: | Core Network (Red Central) |
| CQI: | Channel Quality Indicator (Indicador de Calidad de Canal) |
| CRC: | Cyclic Redundancy Check (Comprobación de Redundancia Cíclica) |
| CSN: | Connectivity Service Network (Red de Servicio de Conectividad) |

| | |
|----------------|---|
| D-AMPS: | Digital AMPS (Sistema Telefónico Móvil Avanzado-Digital) |
| DCCH: | Dedicated Control Channel (Canal de control dedicado) |
| DECT: | Digital Enhanced Cordless Telecommunications (Telecomunicaciones inalámbricas digitales mejoradas) |
| DL: | Downlink (Enlace descendente) |
| DL-SCH: | Downlink Shared Channel (Canal compartido del enlace descendente) |
| DTCH: | Dedicated Traffic Channel (Canal de tráfico dedicado) |
| EDGE: | Enhanced Data rates for GSM Evolution (Tasas de Datos Optimizadas para la evolución de GSM) |
| EIA: | Electronic Industries Alliance (Alianza de Industrias Electrónicas) |
| EPS: | Evolved Packet System (Sistema de paquetes evolucionado) |
| ETACS: | Extended Total Access Communications System (Sistema de Comunicaciones de Acceso Total Extendido) |
| ETSI: | European Telecommunications Standards Institute (Instituto Europeo de Normalización de las Telecomunicaciones) |
| FA: | Foreign Agent (Agente Externo) |
| FCC: | Federal Communications Commission (Comisión Federal de Comunicaciones) |
| FDD: | Frequency Division Duplex (Dúplex por División de Frecuencia) |

| | |
|---------------|--|
| FDMA: | Frequency Division Multiple Access (Acceso Múltiple por División de Frecuencia) |
| FEC: | Forward Error Correction (Corrección de errores hacia adelante) |
| FM: | Frequency Modulation (Modulación de frecuencia) |
| GCS: | Global Core Specifications (Especificaciones básicas globales) |
| GERAN: | GSM/EDGE Radio Access Network (Red de Acceso Radioeléctrico GSM/EDGE) |
| GPRS: | General Packet Radio Service (Servicio General de Paquetes por Radio) |
| GSM: | Global System for Mobile Communications (Sistema Global para Comunicaciones Móviles) |
| HA: | Home Agent (Agente Local) |
| HARQ: | Hybrid Automatic Repeat Request (Petición de Repetición Automática Híbrida) |
| H-NSP: | Home Network Service Provider (Proveedor de Servicio de Red en el Hogar) |
| HSPA: | High Speed Packet Access (Acceso de Paquetes a Alta Velocidad) |
| HSPA+: | Evolved HSPA (Acceso de Paquetes a Alta Velocidad Evolucionado) |
| IEEE: | Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) |
| IETF: | Internet Engineering Task Force (Grupo Especial sobre Ingeniería de Internet) |

| | |
|---------------|--|
| IMS: | IP Multimedia Subsystem (Subsistema Multimedia IP) |
| IMT: | International Mobile Telecommunications (Telecomunicaciones Móviles Internacionales) |
| IP: | Internet Protocol (Protocolo de Internet) |
| IRE: | Institute of Radio Engineers (Instituto de Ingenieros Radioeléctricos) |
| IS: | Interim Standard (Estándar Interino) |
| ISO: | International Organization for Standardization (Organización Internacional para la Estandarización) |
| ITU: | International Telecommunication Union (Unión Internacional de Telecomunicaciones) |
| LLC: | Logical Link Control (Control de Enlace Lógico) |
| LOS: | Line of Sight (Línea de vista) |
| LTE: | Long Term Evolution (Evolución a largo plazo) |
| MAN: | Metropolitan Area Network (Red de Área Metropolitana) |
| MAP: | Medium Access Protocol (Protocolo de Acceso al Medio) |
| MBSFN: | Multicast-Broadcast Single Frequency Network (Red de frecuencia única de difusión-multidifusión) |
| MCCH: | Multicast Control Channel (Canal de control multidifusión) |

| | |
|----------------|---|
| MCH: | Multicast Channel (Canal multidifusión) |
| MIMO: | Multiple Input Multiple Output (Múltiples Entradas Múltiples Salidas) |
| MME: | Mobility Management Entity (Entidad de gestión de movilidad) |
| MMS: | Multimedia Messaging Service (Servicio de Mensajería Multimedia) |
| MS: | Mobile Station (Estación Móvil) |
| MTCH: | Multicast Traffic Channel (Canal de tráfico de multidifusión) |
| NAK: | Negative Acknowledgment (Acuse de recibo negativo) |
| NGN: | Next Generation Networks (Redes de próxima generación) |
| NLOS: | Non-Line of Sight (Sin línea de vista) |
| NMT: | Nordic Mobile Telephone (Telefonía móvil nórdica) |
| NS-RCH: | Non-Synchronized Ranging Channel (Canal de determinación de la distancia no sincronizado) |
| NWG: | Network Working Group (Grupo de Trabajo de Red) |
| OFDMA: | Orthogonal Frequency Division Multiple Access (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal) |
| OSI: | Open Systems Interconnection (Interconexión de Sistemas Abiertos) |

| | |
|----------------|---|
| PBCH: | Physical Broadcast Channel (Canal físico de difusión) |
| PCCH: | Paging Control Chanel (Canal de control de radiobúsqueda) |
| PCFICH: | Physical Control Format Indicator Channel (Canal físico del indicador de formato de control) |
| PCH: | Paging Channel (Canal de radiobúsqueda) |
| PDCCH: | Physical Downlink Control Channel (Canal físico de control del enlace descendente) |
| PDSCH: | Physical Downlink Shared Channel (Canal físico compartido del enlace descendente) |
| PDU: | Protocol Data Unit (Unidad de datos de protocolo) |
| P-FBCH: | Primary - Fast feedback control channel (Canal primario de realimentación rápida) |
| PHICH: | Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (Canal físico indicador de ARQ Híbrida) |
| PLMN: | Public Land Mobile Network (Red móvil terrestre pública) |
| PMCH: | Physical Multicast Channel (Canal físico multidifusión) |
| PMP: | Point-to-MultiPoint (Punto a MultiPunto) |
| PRACH: | Physical Random Access Channel (Canal físico de acceso aleatorio) |
| PSTN: | Public Switching Telephone Network (Red Telefónica Pública Conmutada) |

| | |
|---------------|--|
| PTP: | Point-To-Point (Punto a Punto) |
| PTT: | Push-To-Talk (Presione para hablar) |
| PUCCH: | Physical Uplink Control Channel (Canal físico de control del enlace ascendente) |
| PUSCH: | Physical Uplink Shared Channel (Canal físico compartido del enlace ascendente) |
| QAM: | Quadrature Amplitude Modulation (Modulación de amplitud en cuadratura) |
| QoS: | Quality of Service (Calidad de servicio) |
| QPSK: | Quadrature Phase Shift Keying (Modulación por desplazamiento de fase) |
| RACH: | Random Access Channel (Canal de acceso aleatorio) |
| RAN: | Radio Access Network (Red de Acceso Radioeléctrico) |
| RIT: | Radio Interface Technology (Tecnología de la interfaz radioeléctrica) |
| RN: | Relay Node (Nodo de retransmisión) |
| RS: | Relay Station (Estación retransmisora) |
| SAE: | System Architecture Evolution (Evolución de la arquitectura del sistema) |
| SDU: | Service Data Unit (Unidad de servicio de datos) |

| | |
|----------------|---|
| SFH: | Superframe header (Cabecera de la supertrama) |
| S-FBCH: | Secondary - Fast feedback control channel (Canal secundario de realimentación rápida) |
| SIP: | Session Initiation Protocol (Protocolo de Iniciación de Sesión) |
| SMS: | Short Message Service (Servicio de mensajes cortos) |
| SNR: | Signal-to-Noise Ratio (Relación señal a ruido) |
| S-RCH: | Synchronized Ranging Channel (Canal de determinación de la distancia sincronizado) |
| SRIT: | Set Radio Interface Technology (Conjunto de tecnologías de la interfaz radioeléctrica) |
| SS: | Subscriber Station (Estación Suscriptora) |
| TACS: | Total Access Communications System (Sistema de Comunicaciones de Acceso Total) |
| TDD: | Time Division Duplex (Dúplex por División de Tiempo) |
| TDMA: | Time Division Multiple Access (Acceso Múltiple por División de Tiempo) |
| TIA: | Telecommunications Industry Association (Asociación de la Industria de Telecomunicaciones) |
| TSG: | Technical Specifications Groups (Grupos de Especificación Técnica) |
| TTA: | Telecommunications Technology Association (Asociación de Tecnología de Telecomunicaciones) |

| | |
|-----------------|---|
| TTC: | Telecommunication Technology Committee (Comité de Tecnología de Telecomunicación) |
| UE: | User equipment (Equipo de usuario) |
| UL: | Uplink (Enlace ascendente) |
| UL-SCH: | Uplink Shared Channel (Canal compartido del enlace ascendente) |
| UMTS: | Universal Mobile Telecommunications System (Sistema universal de telecomunicaciones móviles) |
| U-Plane: | User plane (Plano de Usuario) |
| UTRA: | Universal Terrestrial Radio Access (Acceso Radioeléctrico Terrestre Universal) |
| VoIP: | Voice over IP (Voz sobre IP) |
| WAP: | Wireless Application Protocol (Protocolo de aplicación inalámbrica) |
| WiMAX: | Worldwide Interoperability for Microwave Access (Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas) |
| WLAN: | Wireless Local Area Network (Redes Inalámbricas de Área Local) |
| WMAN: | Wireless Metropolitan Area Network (Redes Inalámbricas de Área Metropolitana) |
| WPAN: | Wireless Personal Area Network (Redes Inalámbricas de Área Personal) |
| WRAN: | Wireless Regional Area Network (Redes Inalámbricas de Área Regional) |