

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**INTEGRACIÓN DE LAS REDES ÓPTICAS PASIVAS ETHERNET
EPON/GPON CON LA TECNOLOGÍA WiMAX**

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

JORGE ISRAEL LOGROÑO GÓMEZ
jjsrat@hotmail.com

DIRECTOR: MSc. MARÍA SOLEDAD JIMÉNEZ
mjimenez@mailfie.epn.edu.ec

Quito, Septiembre 2008

DECLARACIÓN

Yo, Jorge Israel Logroño Gómez, 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.

Jorge Israel Logroño Gómez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por, Jorge Israel Logroño Gómez, bajo mi supervisión.

MSc. María Soledad Jiménez
DIRECTOR DE PROYECTO

“Cuando por los años no puedas correr, trota; cuando no puedas trotar, camina; cuando no puedas caminar usa el bastón. ¡¡Pero no te detengas!!”.
HÉCTOR ALVAREZ (Monterrey, México).

“La tecnología es positiva solo si la sabemos aprovechar, utilizándola para nuestras más profundas y valiosas intenciones”.
ANÓNIMO

“Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque el Señor tu Dios estará contigo en dondequiera que vayas”.
JOSUÉ 1:9

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi mamita Marcy que con su valor, esfuerzo y dedicación ha logrado que pueda culminar una meta más en mi vida, este trabajo es para ti madre linda.

Igualmente a mi querida hermana Vivianita, que por su comprensión, aprecio, tolerancia y principalmente su amor ha llenado de luz y alegría desde el momento que llegaste a nuestras vidas.

Esto también es gracias a ti abuelita (Rosa Amelia) te lo dedico de corazón desde donde quiera que te encuentres junto a Dios.

Como olvidarme de ti padre, a pesar de las diferentes circunstancias has llenado mi vida de felicidad gracias por todo tu apoyo, este trabajo te lo dedico de todo corazón.

Jorge Logroño

Agradecimiento

Agradecer eternamente a Dios por enseñarme que sólo “Él es el camino, la verdad y la vida”; y por darme una familia tan imperfectamente, perfecta.

A MSc. María Soledad Jiménez mi directora por todo el tiempo y dedicación para transmitirme y compartir sus conocimientos y experiencias.

A MSc. Fabián Corral por su apoyo y aliento para la culminación de éste proyecto.

A todos los profesores que me formaron como ingeniero, estoy eternamente agradecido.

A mis tíos: Pepe, Waldina, Galo, Marlene, Luis y Laura.

A mis primos: Patty, Mónica, Dayanara, Jhon Jairo, Danilo (Sandra), Yadira, Galo, Byron (Ximena, Danielito y Emily), Jessica y Laurita, los quiero mucho primasos.

A mis hermanos de padre: David y Amelia.

A Gustavo Llerena por sus enseñanzas en mi infancia y mi adolescencia te estoy eternamente agradecido querido Tavolin.

A la familia Villarroel Ronquillo por brindarme su hogar y su apoyo incondicional.

A Nelson y Xavier Logroño por sus importantes ayudas en estos últimos años de mi carrera mil gracias.

A toda mi familia cuencana que ha estado ahí cuando más los he necesitado.
Muchas Gracias.

A mis vecinos Victor, Mariana, Patricio, Adriana, Jorge, Nelly y Mery por sus aprecio, enseñanzas y el cariño incondicional que siempre me han demostrado.

A mis amigos de grupo que me han acompañado durante toda esta carrera: Jorge, Christian O., César, Christian M., Nelson, Paúl M., Leonel, Eduardo, Beto, Naty, Paúl S., Victor, Germán, Diego O., Dibu, Xavier, Rebeca, Joven, Lucho, Vale, Patricio, Fernando P., Rodrigo, Oscar N.,y a todos aquellos que no están nombrados los llevo en el corazón.

Mil Gracias a toda la gente que me ha brindado su apoyo y amor de manera incondicional durante todos estos años, ustedes saben quienes son.

Como no finalizar con un agradecimiento muy pero muy especial a PAULINA VILLARROEL por su ayuda y apoyo incondicional en mi vida universitaria, gracias a ti no lo hubiese logrado con, dedicación y esfuerzo; toda mi vida te lo estaré agradecido, por y para siempre "gordita".

Jorge Logroño

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
PRESENTACIÓN	ix
RESUMEN	x

CAPÍTULO I ESTUDIO DE LA CONVERGENCIA FIJO MÓVIL

1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 NOCIONES BÁSICAS SOBRE CONVERGENCIA FIJO MÓVIL	2
1.2.1 DEFINICIÓN.....	2
1.2.2 OBJETIVOS DE LA CONVERGENCIA	2
1.2.3 RAZONES PARA LA CONVERGENCIA FIJO MÓVIL.....	3
1.2.4 FACILITADORES Y ELEMENTOS CLAVE PARA LA CFM	5
1.2.5 CARACTERÍSTICAS DE LA CONVERGENCIA FIJO-MÓVIL.....	6
1.2.6 ETAPAS DE LA CONVERGENCIA FIJO MÓVIL.....	7
1.3 TIPOS DE CONVERGENCIA AFINES CON LA CFM	10
1.3.1 CONVERGENCIA DE SERVICIOS	11
1.3.2 CONVERGENCIA DE VENTAS (MERCADO).....	12
1.3.3 CONVERGENCIA DE TERMINALES.....	13
1.3.4 CONVERGENCIA DE RED	13
1.4 TECNOLOGÍAS DE ACCESO FIJO, MÓVIL Y PORTÁTIL DE BANDA ANCHA	14
1.5 TECNOLOGÍA WiMAX	16
1.5.1 INTRODUCCIÓN	16
1.5.2 CARACTERÍSTICAS DE LA TECNOLOGÍA WiMAX.....	18
1.5.3 PERSPECTIVAS DE LAS DIFERENTES VARIANTES DEL ESTÁNDAR IEEE 802.16.....	19
1.6 WiMAX MÓVIL	20
1.6.1 CARACTERÍSTICAS DE WiMAX MÓVIL.....	20
1.6.1.1 OFDMA (<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>).....	20
1.6.1.2 Canales de anchos de banda escalables	21
1.6.1.3 TDD (<i>Time Division Duplex</i>) y FDD (<i>Frequency Division Duplex</i>).....	21
1.6.1.4 Planificación selectiva de frecuencia y subcanalización	21
1.6.1.5 Hybrid-Automatic Repeat Request (<i>H-ARQ</i>)	22
1.6.1.6 Mecanismos de múltiples trasposos (<i>handoff</i>):	22
1.6.1.7 Servicios de Multicast y Broadcast (<i>MBS</i>).....	22
1.6.1.8 Múltiples Entradas Múltiples Salidas (<i>MIMO, Multiple Input, Multiple Output</i>) y <i>beamforming</i>	22
1.6.1.9 Sistemas de antenas avanzados (<i>AAS, Adaptive Antenna System also Advanced Antenna System</i>)	23
1.6.1.10 Reuso de frecuencia fraccional	23

1.6.1.11 Red de core IP	23
1.6.1.12 IMS (IP Multimedia Subsystem) y MMD (Multimedia Messaging Service)	24
1.6.1.13 Roaming global	24
1.6.1.14 Tamaño de la trama de 5 milisegundos.....	25
1.6.1.15 Soporte de Calidad de Servicio (QoS)	25
1.6.1.16 Seguridad	28
1.6.2 SERVICIOS Y APLICACIONES	28
1.6.3 AVANCES DEL DESARROLLO DE LA CERTIFICACIÓN WiMAX MÓVIL.....	29
1.6.4 VISIÓN A FUTURO DE WiMAX MÓVIL	31
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

CAPÍTULO II

ESTUDIO DE LOS ESTÁNDARES EPON/GPON

2.1 INTRODUCCIÓN.....	35
2.1.1 REDES DE ACCESO DE PRÓXIMA GENERACIÓN.....	35
2.1.1.1 Arquitectura de la red de acceso óptico.....	37
2.1.2 VISIÓN GENERAL DE LAS PON.....	40
2.1.2.1 Combinadores /divisores ópticos.....	40
2.1.2.2 Topologías PON	41
2.1.2.3 <i>Transceivers</i> en modo-ráfaga.....	42
2.2 GPON (GIGABIT CAPABLE PASSIVE OPTICAL NETWORK).....	44
2.2.1 INTRODUCCIÓN	44
2.2.1.1 Evolución de la Normalización GPON	44
2.2.1.2 Configuración de referencia de un sistema GPON.....	46
2.2.1.2.1 <i>Interfaz de nodo de servicio</i>	46
2.2.1.2.2 <i>Interfaz en los puntos de referencia S/R y R/S</i>	47
2.2.1.3 Servicios, interfaz usuario-red e interfaz de nodo de servicio.....	47
2.2.1.3.1 <i>Servicios</i>	47
2.2.1.3.2 <i>Interfaz usuario-red (UNI) e interfaz de nodo de servicio (SNI)</i>	47
2.2.2 ESPECIFICACIÓN DE LA CAPA DEPENDIENTE DE LOS MEDIOS FÍSICOS (PMD).....	48
2.2.2.1 Características generales	48
2.2.2.2 Interacción entre la capa PMD de la GPON y la capa TC	49
2.2.2.2.1 <i>Corrección de errores en recepción</i>	50
2.2.2.2.2 <i>Overhead</i> de la capa física en sentido ascendente.....	50
2.2.3 ESPECIFICACIÓN DE LA CAPA DE CONVERGENCIA DE TRANSMISIÓN TC	51
2.2.3.1 Relación entre el método de entramado del servicio de datos y GEM.....	51
2.2.3.2 Arquitectura de multiplexación	52
2.2.3.3 Recursos de control de tráfico en la unidad de red óptica (ONU) en sentido ascendente	54
2.2.3.4 Arquitectura del sistema G-PON.....	55
2.2.3.4.1 <i>Configuración de referencia</i>	55
2.2.3.4.2 <i>Tipos conectables de OLT y ONU</i>	56
2.2.3.5 Bloques funcionales	56
2.2.3.5.1 <i>Terminación de línea óptica (OLT)</i>	57
2.2.3.5.2 <i>Red de distribución óptica (ODN)</i>	58

2.2.3.5.3 Unidad de red óptica (ONU).....	58
2.2.3.6 Interoperabilidad entre G-PON y B-PON	59
2.2.3.7 Visión general de la convergencia de transmisión (TC) de la GTC.....	59
2.2.3.7.1 General.....	59
2.2.3.7.2 Pila de protocolos en los planos C/M	60
2.2.3.7.3 Pila de protocolos en el plano-U	62
2.2.3.7.4 Funciones clave de la convergencia de transmisión de G-PON.....	64
2.2.3.7.5 Funciones de las subcapas en GTC	65
2.2.3.7.6 Flujos de tráfico y calidad de servicio (QoS).....	67
2.2.3.7.7 Especificaciones de la asignación dinámica de ancho de banda (DBA).....	69
2.2.3.8 Trama de Convergencia de Transmisión (TC) GTC	72
2.2.3.9 Mensajes GTC.....	75
2.2.3.10 Seguridad.....	76
2.2.3.11 Corrección de errores en recepción	77
2.2.3.12 Mecanismo de transporte de la OMCI	77
2.3 EPON (ETHERNET PASSIVE OPTICAL NETWORK)	79
2.3.1 POR QUÉ <i>ETHERNET</i> ?	79
2.3.2 EVOLUCIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE 802.3ah	80
2.3.3 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN	81
2.3.4 FORMATO DE TRAMAS	85
2.3.4.1 Trama MAC (Ethernet)	85
2.3.4.2 Formato de tramas EPON.....	86
2.3.5 POSICIONAMIENTO DE LA EPON DENTRO DE LA ARQUITECTURA IEEE 802.3	88
2.3.5.1 Subcapas P2MP.....	89
2.3.5.2 Protocolo de Control de Acceso al Medio Multipunto (MPCP)	90
2.3.5.3 Subcapa de Reconciliación (RS) e interfaces independientes del medio	90
2.3.5.4 Sistemas de señalización de capa física	90
2.3.5.5 Administración	91
2.3.5.6 Transmisión unidireccional	91
2.3.6 SUBCAPA DEPENDIENTE DEL MEDIO FÍSICO (PMD) EPON 1000BASE-PX10 Y 1000BASE-PX20	92
2.3.6.1 Posicionamiento de la PMD establecida en la arquitectura IEEE 802.3	93
2.3.6.2 Interfaz de servicio de la subcapa dependiente del medio físico (PMD)	93
2.3.6.3 Especificaciones funcionales de la PMD	94
2.3.7 CONTROL MAC MULTIPUNTO	94
2.3.7.1 Operación del Control MAC Multipunto	98
2.3.7.2 Fundamentos del control MAC multipunto.....	99
2.3.7.2.1 Procesos de Ranging y Timing	101
2.3.7.3 Control de transmisión multipunto, Control Parser y Control Multiplexer.....	102
2.3.7.3.1 Fundamentos del Protocolo de Control Multipunto	104
2.3.7.3.2 Consideraciones de compatibilidad	105
2.3.7.4 Protocolo de Control Multipunto (MPCP)	104
2.3.8 OPERACIÓN, ADMINISTRACIÓN Y MANTENIMIENTO (OAM)	106
2.3.8.1 Posicionamiento de OAM dentro de la arquitectura IEEE 802.3.....	107
2.3.8.2 Consideraciones de compatibilidad.....	107
2.3.9 RENDIMIENTO EPON.....	108
2.3.10 SEGURIDAD.....	109
2.3.10.1 Amenaza de Escucha Indebida.....	110
2.3.10.2 Robo de servicios	111
2.3.10.3 Encriptación como alternativa de solución.....	111

2.3.11 CALIDAD DE SERVICIO.....	113
2.4 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LAS REDES EPON Y GPON.....	115
2.4.1 Relación GPON/EPON	116
2.4.2 Diferencias entre EPON y GPON	118
2.4.3 Manejo de QoS en GPON	119
2.4.4 Costo de QoS en EPON versus GPON	122
2.4.5 Caracterizaciones erróneas sobre las redes EPON/GPON	124
2.5 DIFERENCIAS ENTRE LAS TECNOLOGÍAS EPON/GPON CON WiMAX.....	126
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132

CAPÍTULO III

INTEGRACIÓN DE EPON/GPON-WiMAX (ARQUITECTURAS, PLANEAMIENTO Y FUNCIONAMIENTO)

3.1 INTRODUCCIÓN.....	135
3.2 TECNOLOGÍAS DE ACCESO CLAVES.....	138
3.2.1 Características fundamentales para que EPON/GPON se integre con WiMAX.....	139
3.2.2 Características fundamentales para que WiMAX se integre con EPON/GPON.....	141
3.2.2.1 <i>Mecanismos de Demanda y Asignación de Ancho de Banda</i>	143
3.3 INTEGRACIÓN DE EPON/GPON Y WiMAX.....	145
3.3.1 ARQUITECTURAS.....	145
3.3.1.1 Arquitecturas independientes	146
3.3.1.2 Arquitecturas Híbridas	147
3.3.1.3 Arquitecturas orientadas a conexión unificadas.....	149
3.3.1.4 Arquitecturas de microondas sobre fibra.....	155
3.4 REDES MULTIETAPA EPON/GPON Y WiMAX	161
3.5 DISEÑO Y OPERACIÓN	163
3.5.1 IMPLEMENTACIÓN ÓPTIMA DE FIBRA.....	164
3.5.2 ASIGNACIÓN DEL ESPECTRO INALÁMBRICO	166
3.5.2.1 Bandas de Frecuencias para WiMAX	167
3.5.2.1.1 <i>Bandas Licenciadas (10-66 GHz) (WiMAX Fijo)</i>	167
3.5.2.1.2 <i>Frecuencias Bajo los 11 GHz</i>	168
3.5.2.1.3 <i>Bandas no Licenciadas Bajo los 11 GHz</i> <i>(Principalmente 5-6 GHz) (WiMAX Fijo)</i>	168
3.5.2.2 Re-uso de Frecuencia para OFDMA	169
3.5.3 DIRECCIONAMIENTO Y REENVÍO DE PAQUETES.....	170
3.5.4 ASIGNACIÓN DE ANCHO DE BANDA Y SOPORTE DE QoS.....	173
3.5.5 HANDOVER	175
3.5.6 FIABILIDAD.....	177
3.5.6.1 Posibles tipos de conmutación	178
3.5.6.2 Posibles configuraciones y características de la GPON dúplex	179
3.5.7 APLICACIONES DE BANDA ANCHA DE LAS REDES INTEGRADAS EPON/GPON CON LA TECNOLOGÍA WiMAX A LAS TELECOMUNICACIONES	182
3.5.8 CONVERGENCIA FIJO MÓVIL (CFM) Y LA RED INTEGRADA.....	182
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	184

CAPÍTULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES.....	186
4.2 RECOMENDACIONES.....	188

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y DEFINICIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ANEXO A	A.1
ANEXO B	Ver CD
ANEXO C	Ver CD
ANEXO D	Ver CD

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1.1 Modelo de Convergencia Fijo Móvil	6
Figura 1.2 Evolución de la Convergencia Fijo móvil	8
Figura 1.3 Etapas de desarrollo de la CFM	9
Figura 1.4 Convergencia Fijo-Móvil	11
Figura 1.5 Convergencia Alámbrica e Inalámbrica	12
Figura 1.6 Convergencia de Dispositivos	13
Figura 1.7 Evolución hacia nuevas formas de comunicación	15
Figura 1.8 Modelos de uso de la banda ancha inalámbrica	16
Figura 1.9 Rol de IMS en una red con 3G, WiFi y WiMAX	23
Figura 1.10 Red de Servicios IMS	24
Figura 1.11 Soporte de QoS para WiMAX Móvil	27
Figura 1.12 Características de la Certificación “Wave 1” y Certificación “Wave 2”	30
Figura 1.13 Acercamientos variados para terminales personales de banda ancha	31
Figura 1.14 Las tecnologías móviles están convergiendo	32

CAPÍTULO II

Figura 2.1 Despliegue de escenarios fibra al hogar (FTTH)	36
Figura 2.2 Arquitectura de red	37
Figura 2.3 Ejemplo de utilización de las arquitecturas de redes ópticas	39
Figura 2.4 Acopladores 8x8 creados a partir de múltiples acopladores 2x2	40
Figura 2.5 Topologías PON	41
Figura 2.6 Ilustración del problema <i>near-far</i> en una TDM-PON	43
Figura 2.7 Configuración de referencia para GPON	46
Figura 2.8 Ganancia óptica efectiva G alcanzada con FEC	50
Figura 2.9 GEM integrada	52
Figura 2.10 Multiplexación en el servicio ATM	52
Figura 2.11 Multiplexación en el servicio GEM	53
Figura 2.12 Multiplexación combinada en una PON	53
Figura 2.13 Multiplexación combinada en una ONU	54
Figura 2.14 Recursos de control de tráfico en la ONU	54
Figura 2.15 Configuración del sistema G-PON	56
Figura 2.16 Diagrama de bloques funcionales de la OLT	57
Figura 2.17 Diagrama de bloques funcionales de la ONU	58
Figura 2.18 Pila de protocolos del sistema GTC	60
Figura 2.19 Bloques funcionales de los planos C/M	61
Figura 2.20 Pila de protocolos del plano-U	63
Figura 2.21 Concepto de control de acceso al medio TC GTC	64
Figura 2.22 Resumen del funcionamiento de SR-DBA	71
Figura 2.23 Estructura de la trama de convergencia de transmisión (TC) GTC	72
Figura 2.23a Trama descendente de TC GTC	73
Figura 2.23b Formato de celda ATM (Interfaz usuario-red)	73
Figura 2.23c Encabezado y estructura de trama GEM	74
Figura 2.23d Trama ascendente GTC	74
Figura 2.24 Grupo de trabajo 802.3ah EFM en la IEEE 802	81
Figura 2.25 Tráfico <i>Downstream</i> en EPON	82
Figura 2.26 Tráfico <i>Upstream</i> en EPON	83
Figura 2.27 Formato de trama IEEE 802.3	85

Figura 2.28 Formato de trama <i>Downstream</i> en EPON	87
Figura 2.29 Formato de trama <i>Upstream</i> en EPON	88
Figura 2.30 EFM para tecnologías punto a multipunto	89
Figura 2.31 PMDs P2MP relación del modelo de referencia OSI y el modelo LAN IEEE 802.3 CSMA/CD	94
Figura 2.32 Ejemplo de topología PON	95
Figura 2.33 Relación del Control MAC Multipunto y la pila de protocolos OSI	97
Figura 2.34 Diagrama de bloques funcional del control MAC multipunto	99
Figura 2.35 Cálculo del tiempo de viaje RTT	102
Figura 2.36 Interfaces del Servicio de Control de Transmisión Multipunto	102
Figura 2.37 Interfaces de servicio de <i>Control Parser</i>	103
Figura 2.38 Interfaces de servicio de <i>Control Multiplexer</i>	103
Figura 2.39 Relación de OAM dentro del modelo ISO/OSI	107
Figura 2.40 Preámbulo de la trama con enlaces ID encajados	113
Figura 2.41 Relación entre la UIT-T y EFM	117
Figura 2.42 Relación de capas entre la EPON y GPON	117
Figura 2.43 Encapsulación de tramas <i>Ethernet</i>	120
Figura 2.44 Transmisión de una trama <i>Ethernet</i> de baja prioridad	121
Figura 2.45 Diferencias en la estructura de entramado –Tráfico <i>downstream</i>	122
Figura 2.46 Arquitectura QoS EPON vs GPON	123
Figura 2.47 Diferencias de implementación EPON/GPON	125
Figura 2.48 Cuadro comparativo entre tecnologías alámbricas e inalámbricas	127
Figura 2.49 Ventanas de operación de las EPON/GPON	128
Figura 2.50 Proyecciones del número de suscriptores de las PON y WiMAX	131
Figura 2.51 Tecnologías emergentes	131

CAPÍTULO III

Figura 3.1 Estructura de la trama WiMAX	142
Figura 3.2 Arquitecturas para la integración EPON/GPON y WiMAX	146
Figura 3.3 Módulos funcionales y arquitectura de la ONU-BS	148
Figura 3.4 Aplicando la capa MAC WiMAX a EPON/GPON sentido <i>down/up stream</i>	151
Figura 3.5 Demanda y asignación de ancho de banda (Modo Jerárquico)	152
Figura 3.6 Modos para el cambio de información de control	153
Figura 3.7 Jerarquía de ancho de banda de conexiones	155
Figura 3.8 Arquitectura de integración Microonda sobre fibra	156
Figura 3.9 Arquitectura de integración Microonda sobre fibra bajo WDM-	158
Figura 3.10 Esquema del espectro de señal portadora en el sistema	159
Figura 3.11 Redes de acceso de banda ancha integradas multietapa	162
Figura 3.12 Diseño óptico para dos longitudes de onda en una EPON/GPON	165
Figura 3.13 Diseño óptico para tres ventanas de transmisión en una EPON/GPON	166
Figura 3.14 Configuración con re-uso de 1, 3 sectores por celda	169
Figura 3.15 Re-uso de Frecuencia	170
Figura 3.16 Reenvío de Paquete/trama en una red de acceso integrada	171
Figura 3.17 Mapeo de QoS entre flujos WiMAX y colas de prioridad G/EPON	174
Figura 3.18 Red de acceso integrada fiable	177
Figura 3.19 Modelo del sistema dúplex	178
Figura 3.20 Sistema GPON dúplex: sistema de fibras dúplex	179
Figura 3.21 Sistema GPON dúplex: sistema dúplex únicamente en la OLT	180
Figura 3.22 Sistema GPON dúplex: sistema dúplex completo	181
Figura 3.23 Sistema GPON dúplex: configuración dúplex parcial	181
Figura 3.24 Convergencia Fijo Móvil de la red integrada	183

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

Tabla 1.1 Capas de CFM	10
Tabla 1.2 Características de la tecnología WiMAX	18
Tabla 1.3 Diferencias entre los estándares WiMAX	19
Tabla 1.4 Calidad de Servicio y Aplicaciones de WiMAX Móvil	27
Tabla 1.5 Clases de Aplicaciones WiMAX	29
Tabla 1.6 Cronología de WiMAX	30

CAPÍTULO II

Tabla 2.1 Características técnicas generales del sistema GPON	49
Tabla 2.2 <i>Overhead</i> de la capa física en sentido ascendente en la GPON	51
Tabla 2.3 Tipo de nodos soportados en las OLT y ONU	56
Tabla 2.4 Funcionalidades de la DBA G-PON	68
Tabla 2.5 Características generales de los tipos de T-CONT	69
Tabla 2.6 Modos de funcionamiento de la DBA	70
Tabla 2.7 Resumen de sistemas de señalización de capa física de EFM	91
Tabla 2.8 Tipos de PMD especificados	93
Tabla 2.9 Comparación entre servicios ATM y SDH y EPON	114
Tabla 2.10 Diferencias entre EPON y GPON	126
Tabla 2.11 Diferencias entre EPON/GPON con la tecnología WiMAX	130

PRESENTACIÓN

Hoy en día, el sector de las telecomunicaciones es uno de los más activos, con una alta tasa de crecimiento, sobre todo en los países más desarrollados. La disponibilidad de nuevas infraestructuras, mejoras y aumentos de capacidades en los terminales, redes y servicios hacen vaticinar que esta tendencia continuará.

La integración de las tecnologías de acceso de última milla, ya sean éstas alámbricas o inalámbricas, de banda ancha habilitan las estrategias para mejorar la capacidad de asignaciones de ancho de banda y soporte de QoS.

La integración de EPON/GPON y WiMAX posibilita la tan anhelada Convergencia Fijo-Móvil, y se espera que reduzca significativamente el coste operacional de las redes de acceso de banda ancha de nueva generación.

El presente proyecto es un aporte que permitirá familiarizarse con las redes de acceso EPON/GPON propuestas por la IEEE y la UIT-T respectivamente y los beneficios que éstas aportan con la integración de un medio inalámbrico como lo es WiMAX.

RESUMEN

A continuación, se presenta una breve descripción de los principales puntos estudiados en el presente proyecto de titulación, resumiendo el contenido de cada uno de los capítulos.

En el primer capítulo se realiza un estudio de las características generales sobre la Convergencia Fijo-Móvil (CFM), sus razones en este proceso de continuo cambio en las telecomunicaciones y de manera general las características del desarrollo de la tecnología WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) como tecnología de acceso de banda ancha inalámbrica.

El segundo capítulo contiene el estudio de los estándares GPON (*Gigabit Passive Optical Network*) basadas en la Recomendación G.984/1/2/3/4 y EPON (*Ethernet Passive Optical Network*) basadas en la norma IEEE 802.3ah se describe las características de operación, asignación de ancho de banda, QoS, seguridad, entre otras. Además, se aborda el análisis comparativo entre estos dos estándares y diferencias generales de las tecnologías de accesos de banda ancha inalámbricos y cableados entre GPON/EPON y WiMAX.

En el tercer capítulo se desarrolla el estudio de las posibles arquitecturas que podrán ser implementadas para la integración de las tecnologías de acceso de banda ancha GPON/EPON y WiMAX, y cómo éstas facilitarán llegar a una Convergencia Fijo-Móvil. Adicionalmente se describe los requerimientos de instalación, direccionamiento, fiabilidad, entre otras para el despliegue de las redes integradas

En el cuarto capítulo, se indican las conclusiones y recomendaciones que fueron obtenidas en el desarrollo de este Proyecto de Titulación. Así mismo se incluye en los anexos archivos (.pdf) de los estándares (IEEE 802.3ah y G.984.1/2/3/4), Recomendaciones para la instalación y gestión de las redes EPON/GPON.

CAPÍTULO I

ESTUDIO DE LA CONVERGENCIA FIJO-MÓVIL

1.1 INTRODUCCIÓN ^[1]

Con el surgimiento de nuevas tecnologías de la Información y la Comunicación, han aparecido también diferentes servicios y productos que exigen mayor velocidad de comunicación, movilidad y seguridad. La introducción oportuna de los avances tecnológicos, permite encontrar en los mercados en competencia, alternativas de comunicación de bajo costo y de uso del público, en general para acceder a servicios que transportan cada vez más información. Sirve también para ir acortando la brecha digital que existe entre los que tienen acceso a la información, a las redes de comunicación, y los que no cuentan con ningún tipo de servicio, además ayudan a construir el camino para acceder a la sociedad de la información.

Las nuevas tecnologías incrementaron gradualmente el número de canales de comunicación disponibles, habilitando así no solo la transmisión de voz sino la de datos, video, entre otras. Esto ocurrió con el desarrollo de las máquinas de fax, el advenimiento de la Internet, el correo electrónico y la computarización en masa, teléfonos móviles, cámaras digitales, *music players*, *CD players* y recientemente *MP3 players*. Pero durante la última década, el mercado tecnológico ha venido ofreciendo servicios individuales, es decir el usuario ha tenido que comprar una cámara digital, un teléfono, un computador, etc. de forma independientemente y recibir los servicios de varios operadores.

En la actualidad este proceso de convergencia ha desarrollado cambios; cada vez más, los proveedores de servicios están ligando varios servicios juntos y las múltiples plataformas existentes pueden brindar diversos productos. Por ejemplo, es posible conseguir un teléfono móvil que ofrezca correo electrónico, Internet, MP3, cámara de fotos, etc. Para el consumidor, las ventajas son obvias: los

costos de los equipos terminales cada vez más reducidos, mayor movilidad y mayor conveniencia con el fin de satisfacer sus necesidades.

En este capítulo se aborda el caso de la Convergencia Fijo Móvil (CFM) desde una perspectiva general.

1.2 NOCIONES BÁSICAS SOBRE CONVERGENCIA FIJO MÓVIL ^[2]

1.2.1 DEFINICIÓN

Resulta difícil tener una definición única de convergencia fijo-móvil, evidentemente según se aplique a uno u otro contexto, se la puede visualizar de diferentes puntos de vista ya sean éstos por parte del regulador, del operador y del usuario, sin embargo se la puede definir como:

“La provisión de capacidades de redes y servicios, independientemente de la técnica de acceso utilizada. No necesariamente implica la convergencia física de las redes, pero ha despertado interés por el desarrollo de redes convergentes que soporten diferentes estándares y capacidades. El conjunto de estándares podrá ser usado para ofrecer servicios que utilicen accesos fijos, móviles o redes públicas, fijas/móviles, o privadas”¹.

1.2.2 OBJETIVOS DE LA CONVERGENCIA

Antes que nada hay que tener en cuenta las diferentes perspectivas que implican la convergencia es decir actualizadas desde el punto de vista de la industria y del cliente.

Industria: Para la industria lo más importante es el desarrollo de sinergias y por tanto la reducción de costos, impulsar mecanismos alternativos de crecimiento ante la saturación del mercado, mejorar la cobertura en el interior de la vivienda o la oficina, haciendo que el equipo terminal se conecte desde sus propios hogares y oficinas, también fomentar el uso de los servicios de datos, acostumbrando así al usuario a la utilización de estos servicios y sobre todo ofrecer paquetes

¹ Fuente: ETSI FMC ad hoc Workgroups docs, www.item.ntnu.no/fag/ttm7/Lectures06/topic_7.ppt, 2007.

conjuntos de ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), PON (*Passive Optical Network*) y móvil, de gran interés para operadores convergentes.

Cliente (Usuario, Abonado): Según el cliente lo más importante es la reducción de los precios de sus comunicaciones y servicios al igual que una mayor comodidad, con todos los servicios centralizados en un único dispositivo.

Requerimientos de un mayor ancho de banda de acceso a los servicios desde su teléfono cuando está en el domicilio, al utilizar la conexión fija en lugar de la móvil, accesibilidad total a todo tipo de servicios: comunicación, multimedia, productividad, entre otros.

Los requerimientos y necesidades ya sean éstas de la industria o el cliente crecen conjuntamente para así generar un modelo de negocio integrado y sobre todo interrelacionado.

1.2.3 RAZONES PARA LA CONVERGENCIA FIJO MÓVIL¹

El mercado de voz ha cambiado significativamente a raíz de la rápida difusión de los teléfonos móviles. El teléfono móvil se ha convertido en una herramienta de comunicación personal tal que en muchos hogares cada miembro de la familia tiene su propio terminal. Estos cambios han afectado al mercado de la telefonía fija y han provocado además la demanda, por parte de los consumidores, de nuevas facilidades en la oferta de los servicios telefónicos.

Al mismo tiempo que estos cambios en las normas de uso están impactando en los operadores de telefonía fija, aparecen un nuevo frente de competencia desde la VoIP² y la voz sobre Banda Ancha (VoB), lo que está haciendo que los operadores fijos intenten incursionar en el campo de los móviles. Por otro lado los operadores móviles se enfrentan a una situación de saturación de mercado en la segunda generación de móviles y una reducción paulatina de los ARPU³,

¹ Fuente: Situación de la Convergencia Fijo Móvil en Latinoamérica, V Foro Iberoamericano AHCET Móvil, 2007.

² Voz sobre Protocolo de Internet, también llamado Voz sobre IP, es un grupo de recursos que hacen posible que la señal de voz se transmita a través de Internet empleando un protocolo IP (*Internet Protocol*).

³ ARPU (*Average Revenue per User*, Ingreso medio por usuario), es la media o promedio de ingresos por usuario que obtiene, en un periodo de tiempo, una compañía de servicios con una amplia base de usuarios. Se calcula dividiendo el total de ingresos obtenidos en el periodo de tiempo, por el total de usuarios activos de la empresa.

además también se enfrentan a la competencia que suponen las llamadas que se realizan sobre Internet y/o nuevas redes como WiFi o WiMAX. Se espera que esta competencia vaya en aumento con la aparición de terminales móviles que incorporen acceso WiFi-MAX y soporten servicios de VoIP, tales como *Skype*¹.

En este contexto, la CFM (Convergencia Fijo Móvil) es un medio que los operadores de telecomunicaciones establecidos utilizan para hacer frente y diferenciar sus servicios de los proporcionados por los nuevos operadores quienes aplican tarifas más competitivas como medida para aumentar su cuota de mercado.

Las ventajas que la CFM representa para unos y otros pueden resumirse en las siguientes:

Desde el punto de vista del operador fijo:

- Generación de nuevos ingresos.
- Proporcionar una “ventanilla única” para las necesidades de fijo y móvil de sus clientes.
- Defensa efectiva frente al efecto de sustitución fijo móvil.

Desde el punto de vista del operador móvil:

- Convencer a los usuarios aún ligados a la línea fija a desconectarse.
- Reducir el precio de las llamadas y acceso a datos por el uso de terminales móviles a través de la provisión de servicios duales móvil/WiFi-MAX.

Desde la perspectiva de ambos:

- Obtención de sinergias y economías de escala que hagan que los servicios sean más competitivos.

¹ Es un software para realizar llamadas sobre Internet, fundada en 2003 por los suecos Niklas Zennström y Janus Friis, los creadores de Kazaa. Los usuarios de Skype pueden hablar entre ellos gratuitamente. Se puede profundizar en: <http://www.skype.com/intl/es>.

- Cambiar hacia una arquitectura de red todo IP que reduzca los costos de mantenimiento de largo plazo y permita la provisión de servicios de alto valor añadido a través del empaquetamiento.
- Reducir la pérdida de clientes a través del empaquetamiento y provisión de un amplio rango de servicios demandados por los clientes (Ventanilla Única).

Aunque exista la posibilidad de que los servicios CFM puedan reducir los ingresos provenientes del mercado de voz, principalmente por la disminución de los precios de las llamadas móviles, al mismo tiempo se espera que los nuevos servicios, tales como los multimedia, ayuden a incrementar el ARPU, especialmente cuando se produzcan ofertas de *Quad Play*¹. Si a ello se adiciona la esperada reducción de costes con las redes de nueva generación, se podrá dar un aumento de la rentabilidad por parte de los operadores.

1.2.4 FACILITADORES Y ELEMENTOS CLAVE PARA LA CFM

La convergencia entre servicios fijos y móviles abarca áreas que hasta ahora han existido separadas en las redes tradicionales constituyendo un delicado “ecosistema” en el cual se entrelazan una variedad de factores que incluyen aquellos que posibilitan y facilitan la convergencia desde un punto de vista tecnológico y otros clave que contemplan la evolución en los comportamientos y expectativas de los usuarios finales (Servicios a ofertar) así como a la regulación que se adopte para estos nuevos servicios.

En este circuito Tecnología – Servicios – Regulación, ninguno de los factores por sí solo es capaz de lograr el objetivo convergente, todos están interrelacionados, si falla uno de los elementos no será posible el desarrollo de la CFM.

En la figura 1.1 se visualiza gráficamente este modelo de convergencia:

¹ Cuádruple Play (también denominado *Quad Play*) agrega servicios de convergencia fijo móvil (CFM), provee una solución empaquetada para voz, video/TV, y servicios móviles, sobre múltiples dispositivos (teléfonos fijos, móviles, TV&PC). Se puede profundizar en: www.fixedmobileconvergence.net/whitepapers/fmc-incode.pdf

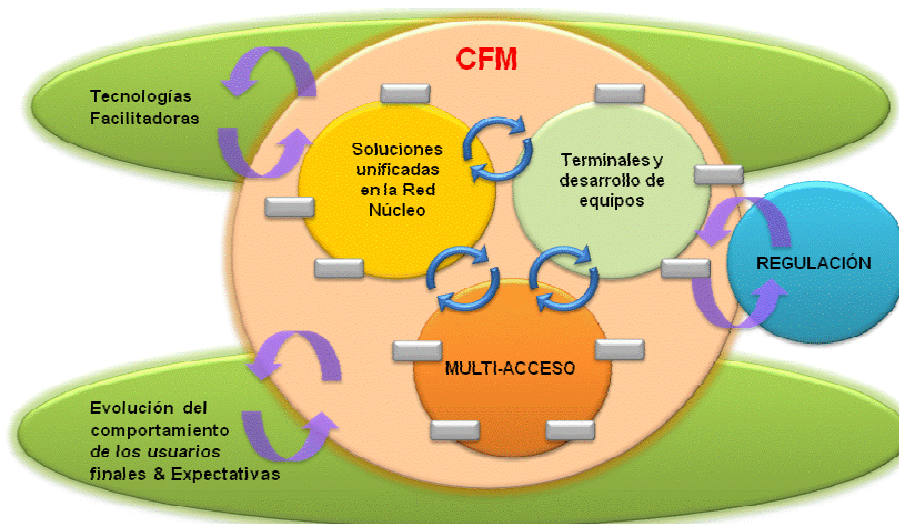


Figura 1.1 Modelo de Convergencia Fijo Móvil ^[1]

1.2.5 CARACTERÍSTICAS DE LA CONVERGENCIA FIJO-MÓVIL

Un servicio fijo móvil convergente comúnmente tendrá una o más de las características siguientes:

- **Flexibilidad para el usuario en los métodos de acceso:** Los servicios de convergencia y dispositivos permitirán a los clientes usar las tecnologías de acceso más apropiadas, como WiFi, WiMAX, celular, PON, etc. basadas de acuerdo a criterios tales como la situación actual, aplicaciones requeridas, calidad de servicio y tarifas de llamada.
- **Equipo convergente para el usuario (CPE, Converged Customer Premise Equipment):** La disponibilidad de CPE permitirá a los clientes desplazarse entre diferentes tipos de acceso más fácilmente. En gran parte de los países, los usuarios actuales generalmente tienen un teléfono fijo con costos bajos en las llamadas, acceso a Internet, un teléfono móvil para llamadas de voz y algunas aplicaciones básicas de datos como SMS¹. El CPE dará a los usuarios una identidad unificada.

¹ El servicio de mensajes cortos o SMS (*Short Message Service*) es un servicio disponible en los teléfonos móviles que permite el envío de mensajes cortos.

- **Seamlessness:** Se habla de transparencia a nivel de terminal, arquitectura y/o servicio, a nivel de terminal y de red por medio de *handover*¹, llamadas originadas en la red fija pueden pasar a la red móvil y viceversa, o entre diferentes redes inalámbricas como Wi-Fi y 2G, sin interrupción o cambio de la operación que se esté realizando, por ejemplo una llamada telefónica.

A nivel de arquitectura se transfieren aplicaciones desde una plataforma de red a otra, sin la necesidad de procedimientos complicados.

- **Personalización:** Para los usuarios finales, las comunicaciones están esencialmente dirigidas hacia la personalización, la idea que perciben es: “tener acceso a mis propios datos por medio de mi terminal preferido, cuando quiera y donde quiera”.

Una herramienta que puede utilizarse para incrementar el concepto de personalización, es el uso de una aplicación de red donde el usuario final tiene un control completo y personalizado, como ejemplo, un usuario puede enviar su ubicación hacia “todas partes” enviando un mensaje instantáneo a otro usuario para notificarle la reubicación de la llamada.

La personalización de hoy en día principalmente se le asocia con el mundo móvil, como terminales móviles que incluyen una gran variedad de opciones de personalización que los terminales fijos. La CFM traerá la personalización en el ambiente de los teléfonos fijos.

1.2.6 ETAPAS DE LA CONVERGENCIA FIJO MÓVIL

Cada país tiene áreas propias de comunicaciones, con diferentes modelos de competencia, regulación, disponibilidad de infraestructura y exigencias de usuario. Esto ha permitido una proliferación de una variedad de modelos para los desarrollos de CFM a través del mundo, cada uno se ajusta a su respectivo

¹ *Handover* (también denominado *Handoff*) utilizado en comunicaciones móviles celulares con el objetivo de transferir el servicio de una estación base a otra cuando la calidad del enlace es insuficiente. Este mecanismo garantiza la realización del servicio cuando un móvil se traslada a lo largo de su zona de cobertura.

ambiente nacional. Sin embargo, la característica común del desarrollo de CFM, sin tener en cuenta el país, es el proceso evolutivo continuo a través de varias etapas.

En la Figura 1.2, se ilustran los tres pasos principales que los operadores están tomando hacia CFM, y los beneficios de los clientes que cada paso aporta. La primera fase se define como la pre-convergencia, que sin ser realmente convergencia se trata de la comercialización conjunta de servicios. La segunda fase se define como la convergencia intermedia, a aquellas ofertas de productos y servicios convergentes como terminales únicos, facturación única u otros servicios convergentes básicos. La tercera fase se define como la convergencia a aquella integración total ya sea de redes, sistemas y servicios, sin barreras a las etapas anteriores.

El camino a la convergencia dará una serie de experiencias de comunicaciones personalizadas más unificadas al usuario final, al recopilar el estado del arte y experiencias sobre las ofertas Fijo Móvil bajo cualquier modalidad (etapas de desarrollo) que proporcionan:

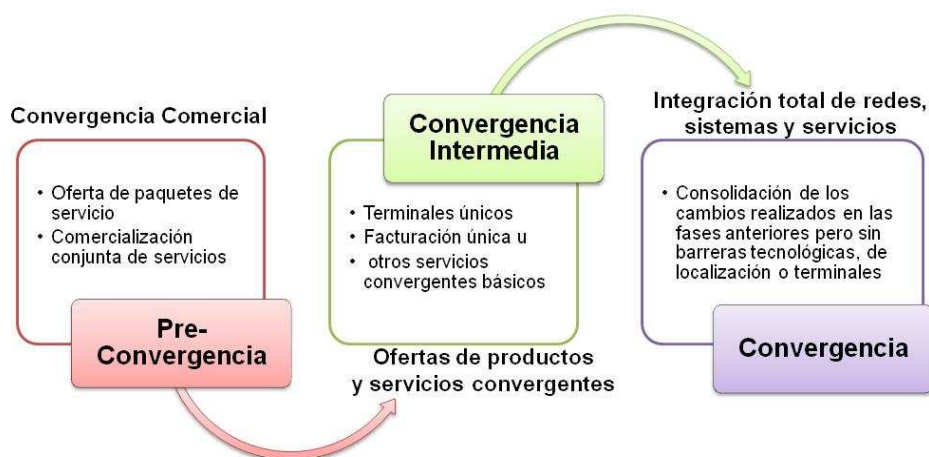


Figura 1.2 Evolución de la Convergencia Fijo móvil [2]

En una primera etapa de **pre-convergencia** se tiene accesos independientes pero que comparten un empaquetamiento de los servicios tanto para redes fijas (utilizando un teléfono convencional) como móviles (utilizando un celular). En una segunda etapa denominada de **convergencia intermedia** se presenta una interrelación entre los accesos fijo-móvil ofreciendo así la unificación de los

servicios y por tanto de su facturación obteniendo una gestión inteligente solo en las llamadas entrantes. En la tercera etapa, denominada de **convergencia tecnológica**, se tiene un solo tipo de acceso ya sean estos equipos terminales fijos, portátiles y móviles que se integran totalmente en una sola red prestando diferentes tipos de servicios y sobre todo una gestión inteligente por parte de las llamadas ya sean éstas entrantes o salientes.

En la Figura 1.3 se muestra de manera gráfica las etapas de desarrollo de la convergencia y sus interpretaciones.

Los operadores integrados que operan ambas redes fijas y móviles juntas están próximos a la Alianza de Convergencia Fijo-móvil (FMCA, *Fixed Mobile Convergence Alliance*) para promover la CFM a una industria más desarrollada. Hay una firme creencia de otros tipos de mercados tales como equipos y proveedores de aplicaciones que serán tan importantes como los *carriers* de la CFM que alcanzan totalmente su potencial.

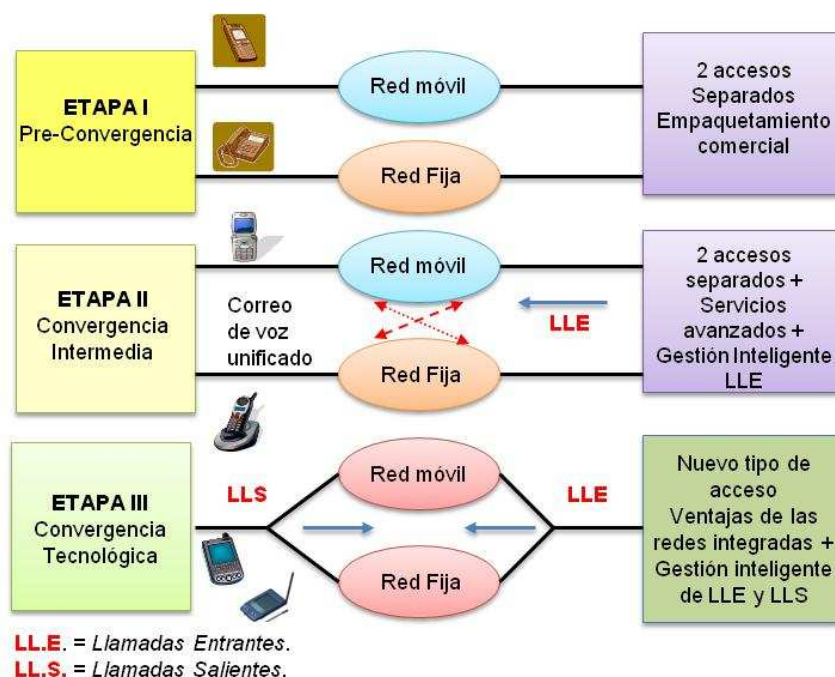


Figura 1.3 Etapas de desarrollo de la CFM ^[3]

La Tabla 1.1 proporciona un resumen del desarrollo de las etapas de la CFM en forma de capas de acuerdo a los escenarios presentes.

		ESTIMACIÓN →			
CAPAS DE CONVERGENCIA	ETAPAS DE LA CONVERGENCIA FIJO-MÓVIL	Empaquetamiento fijo existente, banda ancha, WiFi y servicios celulares	Los operadores convergen lo fijo existente, la banda ancha, WiFi y servicios celulares	Los operadores emprenden nuevos servicios convergentes	Proliferación de la convergencia fijo-móvil
	CARACTERÍSTICAS DE SERVICIOS	El empaquetamiento aparece ofreciendo múltiples servicios con factura única de un operador en las múltiples redes	Los servicios surgen ofreciendo roaming de voz y datos entre redes celulares y WiFi	Aparecen nuevos servicios multimedia para dar ventajas a la convergencia fijo-móvil	Seamless multimedia servicios roaming
	CARACTERÍSTICAS DE DISPOSITIVOS	Separar dispositivos para cada red y servicio	Modo dual WiFi/ celular, voz y datos cuyos dispositivos empiezan a emerger	Los dispositivos celulares/WiFi se desarrollan en el mercado de los handsets. Proliferan las opciones multimedia	Mercado de dispositivos totalmente convergentes con variedad de modelos
	CARACTERÍSTICAS DE RED	Fijo, banda ancha y redes WiFi	La capa-IP promueve la convergencia entre lo fijo, banda ancha, WiFi y redes celulares	WiMAX y las redes Mesh (Malla) llegan a ser parte de la red convergente	Una sola convergencia de red IP
		← TIEMPO			PROLIFERACIÓN DE LA CFM

Tabla 1.1 Capas de CFM ^[4]

1.3 TIPOS DE CONVERGENCIA AFINES CON LA CFM ^[3]

La convergencia presenta una variedad de escenarios que facilitarán a futuro tener la capacidad tecnológica, comercial, jurídica y reglamentaria para integrar estructuras industriales, mercados o tecnologías que anteriormente estaban separados.

Se pueden desarrollar varias formas de CFM según las redes existentes y la demanda del usuario principalmente se basa a nivel comercial, de servicios o de red. Algunos de los elementos se relacionan a los usuarios, plataformas, infraestructuras, terminales, servicios y contenidos como se puede apreciar en la figura 1.4.

Otros elementos que aportan a la convergencia fijo-móvil, son: el enorme crecimiento de servicios inalámbricos, la economía, la reducción en el costo de varios servicios gracias a tecnologías de banda ancha, la VoIP, etc.

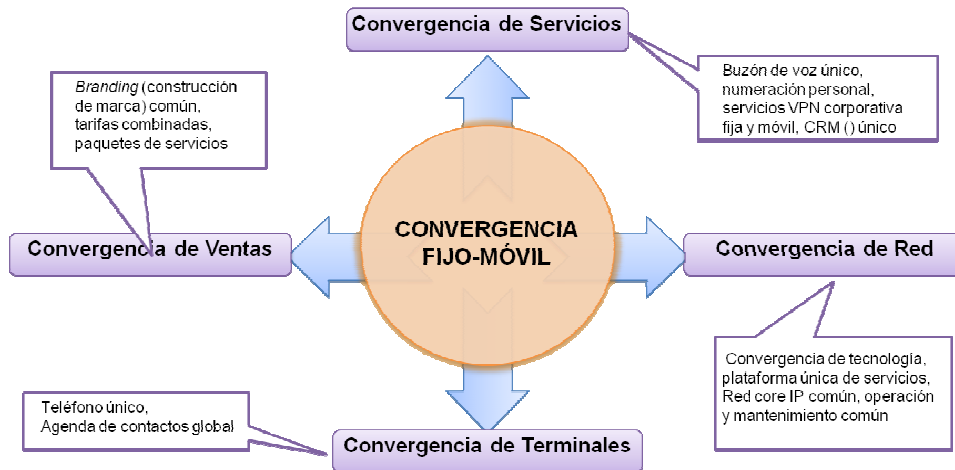


Figura 1.4 Convergencia Fijo-Móvil [5]

1.3.1 CONVERGENCIA DE SERVICIOS

Hablar de una convergencia de servicios es hablar de simples presentaciones, puesto que las redes actualmente se están construyendo bajo el concepto de IMS (*IP Multimedia Subsystem*) e IP (*Internet Protocol*); es decir se pretende que varios servicios sean ofrecidos bajo un mismo equipo terminal y por ende requerir un solo pago por dichos servicios por ejemplo: la telefonía fija y móvil será ofrecida por un mismo operador necesitando el pago de una sola factura.

La similitud de los servicios y aplicaciones de sistemas diferentes es beneficiosa para los usuarios, y ello ha estimulado la tendencia actual hacia la convergencia. Además, una experiencia general similar de los usuarios con diversos sistemas conduce a la adopción en gran escala de productos, servicios, aplicaciones, contenidos comunes, mayor facilidad y eficacia de uso. No obstante, esa convergencia no debe obstaculizar las posibilidades de competencia en la innovación. El acceso a un servicio o aplicación puede llevarse a cabo a través de un sistema o con ayuda de varios sistemas simultáneamente.

Hoy por hoy existen muchos debates por lo que será el “*Triple Play*¹ & *Quad Play*” como propuestas de convergencia de servicios.

¹ Actualmente los usuarios demandan, cada vez más, servicios multimedia basados principalmente en video de calidad además de los ya existentes de acceso de Internet y voz, lo que comúnmente se agrupa en el término “*Triple Play*”.

Es muy importante tener en cuenta los servicios y la regulación de éstos.

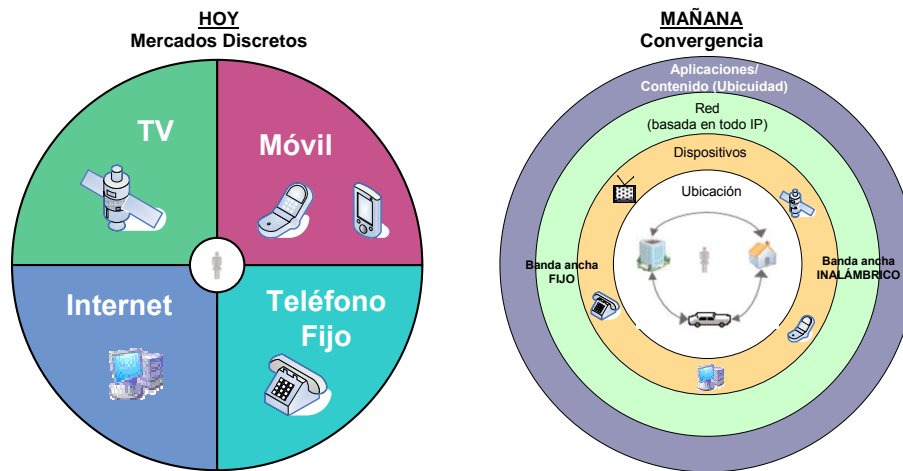


Figura 1.5 Convergencia Alámbrica e Inalámbrica [6]

Quad Play es el primer paso en la evolución de sistemas alámbricos e inalámbricos convergentes tal cual como se aprecia en la figura 1.5, que representa el avance de los sistemas de telecomunicaciones desde un esquema individual a uno convergente. Los servicios que promete *Quad Play* son:

- Video/TV.
- Voz.
- Alta velocidad de datos o Internet de Banda Ancha.
- Servicios inalámbricos.

1.3.2 CONVERGENCIA DE VENTAS (MERCADO)

Nace de la idea de las fusiones, adquisiciones sucesivas y alianzas de unas empresas con otras para generar nuevos segmentos de mercado cada vez más competitivos para obtener ganancias.

Un aspecto clave de la convergencia en este plano se encuentra en la oferta de servicios, puesto que éstos son los que definen un mercado común. Otro aspecto se relaciona a lo que el usuario percibe realmente como convergencia (único proveedor, única factura).

1.3.3 CONVERGENCIA DE TERMINALES

La convergencia a nivel del terminal es la capacidad de entregar servicios fijos y móviles en un solo dispositivo o por un solo número (ver figura 1.6). La personalización en un terminal único que ofrezca movilidad, altas prestaciones multimedia, sistemas operativos abiertos y acceso multimodal independientemente del tipo de red a utilizarse.



Figura 1.6 Convergencia de Dispositivos ^[7]

Fruto de la convergencia fijo-móvil surgen terminales **duales móviles-inalámbricos** que resuelven las comunicaciones personales de forma transparente al usuario, de acuerdo a parámetros fijados en muchos casos por el operador, seleccionando la red fija o móvil optimizando en función de criterios como son la calidad de la comunicación, el ancho de banda disponible o el precio de la llamada. Los terminales duales incluyen todas las funcionalidades de los terminales móviles y encaminan las llamadas por una u otra red en función del coste y la calidad. Son teléfonos que incluyen conexión inalámbrica WiFi (802.11b), WiMAX (802.16), además de Bluetooth y capacidad 3G.

1.3.4 CONVERGENCIA DE RED

La convergencia de red se relaciona al proceso en el cual se combinan diferentes redes ya sean éstas de voz, datos, video, entre otras, para crear una infraestructura de red común. Esta convergencia presenta características como:

- Señalización independiente del Transporte, Control unificado de sesiones Multimedia, estandarizadas e interoperables.

- Transporte unificado sobre IP para todas las Redes y Servicios, con calidad de Servicio, sobre *Ethernet* en Redes Ópticas.
- Se difuminan las diferencias entre Operadores Fijo y Móvil. Ampliación y generalización de la Banda Ancha.

1.4 TECNOLOGÍAS DE ACCESO FIJO, MÓVIL Y PORTÁTIL DE BANDA ANCHA ^[4]

Los años recientes han sido testigos de cambios vertiginosos en aspectos como la tecnología, el diseño y las aplicaciones comerciales de las diferentes redes sean éstas fijas¹, portátiles² o móviles³.

Los desarrollos que prometen a futuro accesos de banda ancha están básicamente enfocados a una integración de las arquitecturas para llegar a una convergencia fijo-móvil. Como se puede observar en la Figura 1.7, la tecnología que brinda tasas de datos altas en el ámbito móvil-portátil es WiMAX móvil (ofrece OFDMA⁴, *Orthogonal Frequency Division Multiplex Access*), en tanto que en el ámbito fijo son las redes ópticas pasivas, por lo que en el presente proyecto de titulación se mostrará la integración de ambas tecnologías y como éstas aportan a la CFM.

El presente capítulo seguirá con una explicación del desarrollo de la Tecnología WiMAX en tanto que las redes ópticas pasivas (EPON/GPON) se abordarán en el capítulo 2.

Al considerar las nuevas tecnologías inalámbricas de banda ancha, en particular WiMAX, y los agentes que entran en juego se debe analizar los diferentes escenarios en que pueden participar:

¹ Acceso Fijo, se asume que el dispositivo del usuario está fijo en una sola ubicación geográfica durante la duración de su suscripción a la red.

² Acceso Portátil, el dispositivo del usuario mantendrá una sesión operacional a medida que se mueve a velocidades pedestres dentro de un área de cobertura limitada.

³ Acceso de Movilidad, el dispositivo del usuario mantendrá una sesión operacional a medida que se mueve a velocidades de vehículos dentro del área de cobertura de la red.

⁴ OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal) es un esquema de multiplexación / acceso-múltiple que proporciona operaciones multiplexadas de flujos de datos desde múltiples usuario.

- WiMAX como tecnología de acceso fijo para la **última milla**, especialmente en zonas de difícil cobertura, como pueden ser los entornos rurales.
- WiMAX como tecnología para la **red de transporte**, en redes de operadores fijos (convencionales o que usen nuevas tecnologías como WiFi) o móviles.
- WiMAX como banda ancha **en movilidad** (en un primer entorno portable y luego móvil), dando lugar a una “red ubicua”¹ a partir de la unión de “hot zones”² de cobertura WiFi/WiMAX.

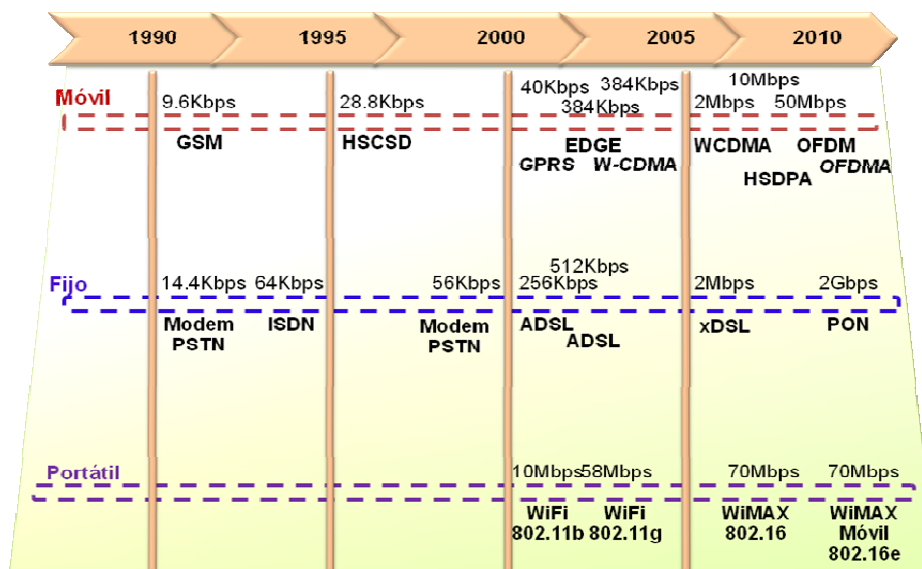


Figura 1.7 Evolución hacia nuevas formas de comunicación [8]

La UIT y la Comisión Europea han adoptado una decisión sobre el espectro radioeléctrico, vinculante para los Estados Miembros, mediante la que se armoniza la utilización del espectro radioeléctrico en la banda de 5 GHz con miras a su uso para sistemas de acceso inalámbrico, incluidas las redes radioeléctricas de área local. En cualquier caso, se debe considerar que las tecnologías inalámbricas difícilmente permitirán crear redes alternativas a las redes de los

¹ Red ubicua: La palabra “Ubicuo” define la cualidad de “existir en cualquier lugar simultáneamente”. Las redes ubicuas permitirán a los usuarios acceder a Internet desde cualquier sitio y en cualquier momento, esta característica introduce una nueva serie de problemas en el uso de las telecomunicaciones, la multidifusión y la efectividad de los modelos de negocio actuales.

² HotZone: Es un punto de acceso a internet inalámbrico que se puede instalar en áreas públicas, escuelas, comercios, oficinas, hoteles, etc, para que la gente pueda conectarse fácil y rápidamente a internet a través de una tarjeta de red, sin necesidad de cables o conexiones. A diferencia de los HotSpots, los HotZones tienen una cobertura superior de aproximadamente 500m² a 40km².

operadores fijos y móviles. Más bien se configurarán escenarios donde tecnologías fijas, celulares e inalámbricas se combinarán para ofrecer servicios a los clientes. No es previsible que surjan grandes operadores alternativos basados únicamente en tecnologías inalámbricas, sino más bien los operadores combinarán las diferentes tecnologías en busca de soluciones efectivas en coste y prestaciones.

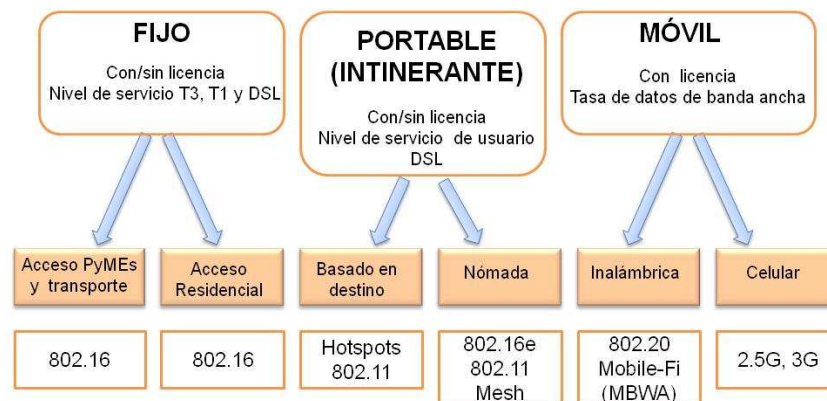


Figura 1.8 Modelos de uso de la banda ancha inalámbrica [9]

1.5 TECNOLOGÍA WiMAX [5]

1.5.1 INTRODUCCIÓN

WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) creado en el 2001 por un grupo de la Industria (aproximadamente 400 compañías), se formó para promover el estándar IEEE 802.16 y desarrollar especificaciones para garantizar interoperabilidad.

Así, WiMAX es una tecnología de clase operador que proporciona a la población servicios multimedia de gran calidad en materia de acceso inalámbrico en banda ancha. Las tendencias actuales en el desarrollo del acceso inalámbrico se caracterizan por la prestación de servicios múltiples y, por consiguiente, de banda ancha.

Teóricamente, un usuario moderno no debería tener restricciones en ningún servicio actualmente accesible mediante conexiones de cable, como SDH o

Ethernet. Se da por supuesto que los últimos sistemas con certificación, como WiMAX, permitirán a los operadores de redes de acceso en banda ancha prestar a los usuarios servicios tales como IP y E1, y sustituir la infraestructura del acceso ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) y las correspondientes líneas asignadas.

Inicialmente fue diseñada como una solución de conectividad fija en la categoría de banda ancha inalámbrica. Actualmente, su versión móvil (IEEE 802.16e-2005) ha venido desarrollándose, robusteciéndose y probándose en diferentes partes del mundo.

La enmienda 802.16, que también es llamada red metropolitana inalámbrica (MAN, por sus siglas en inglés), permitirá a una sola estación base ofrecer banda ancha móvil y fija. WiMAX intenta superar la brecha entre las redes WLAN y las redes celulares, en otras palabras, WiMAX está evolucionando en una gran variedad de perfiles para una gran variedad de necesidades.

La necesidad de promover y certificar la compatibilidad así como la interoperabilidad de productos inalámbricos de banda ancha ha propiciado una creciente demanda de la certificación a nivel mundial de la interoperabilidad para accesos a la Red a través de tecnología inalámbrica (o WiMAX) basada en estándares de la familia IEEE 802.16. Sin embargo, los continuos retrasos en el proceso de certificación WiMAX están suponiendo un verdadero desafío para el crecimiento del mercado de estos servicios.

Es importante, de todas maneras, mencionar que el cambio está lejos de haberse producido completamente. El rol de WiMAX ha sido considerablemente engrandecido en los últimos años frente a la prominencia de Wi-Fi. El potencial de WiMAX para mejorar el de Wi-Fi con servicios de *backhaul* para los *hotspots* simplemente es el área de cobertura, por tanto en algunas condiciones le ha dado a WiMAX un mercado mucho más amplio.

1.5.2 CARACTERÍSTICAS DE LA TECNOLOGÍA WiMAX

La siguiente tabla resume las principales características de esta tecnología inalámbrica:

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Sin Línea de Vista (NLOS)	No necesita línea de vista entre la antena y el equipo del suscriptor.
Modulación OFDM (<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>)	Permite la transmisión simultánea de múltiples señales a través de cable o aire en diversas frecuencias; usa espaciamiento ortogonal de las frecuencias para prevenir interferencias.
Topología Punto a Multipunto (PMP) y de malla (<i>Mesh</i>)	Soporta dos topologías de red, servicio de distribución multipunto y de malla para comunicaciones entre suscriptores
Calidad de Servicio (QoS)	Califica la operación NLOS sin que la señal se distorsione severamente por la existencia de edificios, por las condiciones climáticas ni el movimiento vehicular.
Seguridad	Incluye medidas de privacidad y criptografía inherentes en el protocolo. El estándar 802.16 agrega autenticación de instrumentos con certificados x.509 usando DES en modo CBC (<i>Cipher Block Chaining</i>) (Ver Glosario).
Antenas Inteligentes	Soporta mecanismos de mejora de eficacia espectral en redes inalámbricas y diversidad de antenas.
FDM (<i>Frequency Division Multiplexing</i>) TDM (<i>Time Division Multiplexing</i>)	Tipos de Multiplexaje que soporta para propiciar la interoperabilidad con sistemas celulares (FDM) e inalámbricos (TDM).
TDD (<i>Time Division Duplex</i>) FDD (<i>Frequency Division Duplex</i>)	Esquemas de Duplexación, (TDD) para operadores que no disponen de pares de canales y (FDD) requerimiento de dos canales.
Bandas libres (sin licencia)	Opera en banda libre en 5.8 GHz, 8 GHz y 10.5 GHz para transmisiones externas en largas distancias.
Bandas bajo licencia	Opera en banda licenciada en 2.4 GHz y 3.5 GHz para transmisiones externas en largas distancias.
Canalización	De 5 y 10 MHz.
Modulación	QPSK, QAM Adaptiva.
Acceso al medio	Mediante TDMA dinámico.
Corrección de Errores	ARQ (Retransmisión inalámbrica).
Tamaño del Paquete	Ajuste dinámico del tamaño del paquete
Aprovisionamiento	Aprovisionamiento dinámico de usuarios mediante DHCP y TFTP (Ver Anexo A).
Espectro de Frecuencia	<ul style="list-style-type: none"> • IEEE 802.16a entre 2-11 GHz (LOS) para comunicaciones entre antenas. • IEEE 802.16b entre 5-6 GHz con QoS. • IEEE 802.16c entre 10-66 GHz. • IEEE 802.16e entre 2-6 GHz (NLOS) para distribución a suscriptores, móvil.
Tasa de Transmisión	Hasta 75 Mbps con canales entre 1.25 MHz a 20 MHz.
Potencia de Transmisión	Controla la potencia de transmisión.
Alcance	50 Km sin línea de vista (NLOS).

Tabla 1.2 Características de la tecnología WiMAX¹

¹ Fuente: <http://www.intel.com/netcomms/technologies/wimax/index.htm>

1.5.3 PERSPECTIVAS DE LAS DIFERENTES VARIANTES DEL ESTÁNDAR IEEE 802.16

En la siguiente tabla se muestra el crecimiento que ha tenido el estándar IEEE 802.16 desde su forma inicial (fijo) a su forma actual (móvil).

	802.16	802.16-2004	802.16e-2005
Estado	Completado Diciembre 2001	Completado Junio 2004	Completado Diciembre 2005
Espectro	10GHz-66GHz	2GHz-11GHz	2GHz-11GHz para aplicaciones fijas 2GHz-6GHz para aplicaciones móviles
Aplicación	LOS Fijo	NLOS Fijo	NLOS Fijo y móvil
Canales	20MHz, 25MHz, 28 MHz	1.75 MHz, 3.5 MHz, 7 MHz, 14 MHz, 1.25 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 8.75 MHz	1.75 MHz, 3.5 MHz, 7MHz, 14 MHz, 1.25MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 8.75 MHz
Arquitectura MAC	Punto a Multipunto, Malla	Punto a Multipunto, Malla	Punto a Multipunto, Malla
Esquema de transmisión	Sola una portadora	Una portadora, 256 OFDM o 2048 OFDM	Una portadora, 256 OFDM o escalable OFDM con 128, 512, 1024, o 2048 subportadoras
Tasa de Transmisión	32 Mbps-134.4 Mbps	1 Mbps-75 Mbps	1 Mbps-75 Mbps
Modulación	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Multiplexación	Ráfagas TDM/TDMA	Ráfagas TDM/TDMA/OFDMA	Ráfagas TDM/TDMA/OFDMA
Duplexación	TDD y FDD	TDD y FDD	TDD y FDD
Designación Interfaz-aire	WirelessMAN- SC	WirelessMAN-SCa WirelessMAN-OFDM WirelessMAN-OFDMA WirelessHUMAN ¹	WirelessMAN-SCa WirelessMAN-OFDM WirelessMAN-OFDMA WirelessHUMAN
Implementación WiMAX	Ninguna	256-OFDM como WiMAX Fijo	Escalable OFDMA como WiMAX Móvil
Radio típico de la celda	1-3 Millas	4-6 Millas, si se considera la altura de las torres, la ganancia de las antenas y su potencia de transmisión se puede lograr un rango máximo de 30 Millas	1-3 Millas

Tabla 1.3 Diferencias entre los estándares WiMAX²

¹ WirelessHUMAN (*Wireless High-Speed Unlicensed MAN*) es similar a OFDM-PHY (Capa física) con disposición de selección dinámica de frecuencia para bandas exentas de licencia.

² Fuente: Jeffrey G. Andrews, Rias Muhamed, *Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking*, Prentice Hall Communication Engineering an Emerging Technologies Series, 2007.

1.6 WiMAX MÓVIL ^{[6], [7]}

El estándar IEEE 802.16 (interfaz de radio) actualmente es el único estándar aprobado globalmente que ofrece OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access*). WiMAX móvil basado en la enmienda IEEE 802.16e-2005 del estándar IEEE 802.16, la revisión más reciente es el estándar IEEE 802.16-2004. Desde esa revisión, la enmienda IEEE 802.16e, aprobada por la IEEE en diciembre del 2005, WirelessMAN-OFDMA refuerza la interfaz de radio para proveer soporte a terminales móviles. Específicamente, define las características importantes necesarias para entregar servicios de banda ancha móviles a velocidades vehiculares superiores a los 120Km/h manteniendo una QoS comparable a las alternativas de accesos de banda ancha alámbricos. Estas características y atributos incluyen:

1.6.1 CARACTERÍSTICAS DE WiMAX MÓVIL

1.6.1.1 OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access*)

OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal) es una versión multiusuario de la conocida multiplexación por división de frecuencias ortogonales. Se utiliza para conseguir que un conjunto de usuarios de un sistema de telecomunicaciones puedan compartir el espectro de un cierto canal para aplicaciones de baja velocidad. El acceso múltiple se consigue dividiendo el canal en un conjunto de subportadoras que se reparten en grupos en función de la necesidad de cada uno de los usuarios, brinda altos *throughput* y mayor capacidad a los operadores de red, gran flexibilidad en la gestión de los recursos del espectro y mejora de la cobertura en interiores. OFDMA ha surgido como una opción para las redes móviles de próxima generación.

3GPP (*3G Partnership Project*) tiene incorporado OFDMA en sus especificaciones LTE (*Long Term Evolution*) y 3GPP2 (*3G Partnership Project 2*) se está moviendo en la misma dirección.

El modo Wireless MAN OFDMA IEEE 802.16e se basa en el concepto de OFDMA escalable (S-OFDMA), soportando un amplio rango de anchos de banda para dirigir flexiblemente la necesidad de varias asignaciones de espectro y uso de requerimientos.

1.6.1.2 Canales de anchos de banda escalables

A pesar de una economía cada vez más globalizada, los recursos del espectro para aplicaciones inalámbricas de banda ancha mundiales siguen siendo bastante dispares en sus asignaciones.

Por consiguiente la tecnología WiMAX Móvil fue diseñada para ser escalable, capaz de trabajar en canalizaciones diferentes desde 1.25 hasta 20 MHz para cumplir con variedad de requerimientos mundiales así como proseguir en esfuerzos para lograr una armonización del espectro en el término más largo.

Esto también permite diversas economías, es decir, aprovechando los beneficios ofertados por la tecnología WiMAX Móvil, aumentar así con las necesidades de ciertos sectores geográficamente específicas; como proporcionar servicios de Internet de bajos costos.

1.6.1.3 TDD (Time Division Duplex) y FDD (Frequency Division Duplex)

Los estándares IEEE 802.16e-2005 y ETSI HiperMAN soportan ambos mecanismos de duplexación. Sin embargo, el foro WiMAX inicialmente perfiló un solo soporte TDD para WiMAX móvil, así este modo de duplexación está preparado para mejores aplicaciones de datos y tecnologías de antenas avanzadas.

1.6.1.4 Planificación selectiva de frecuencia y subcanalización

Con múltiples opciones de permutación (AMC, *Adaptive Modulation and Coding* y PUSC, *Partially Used Sub-Carrier*) para proporcionar a WiMAX móvil la habilidad

de perfeccionar la calidad de conexión basadas en señales robustas en una base de conexión-por-conexión.

1.6.1.5 Hybrid-Automatic Repeat Request (H-ARQ)

Todos los sistemas WiMAX móvil mantienen a H-ARQ¹ como una manera importante para proveer robustez de transmisión de datos con las condiciones de trayectorias rápidamente cambiantes en situaciones de alta movilidad.

1.6.1.6 Mecanismos de múltiples trasposos (handoff²):

Las implementaciones WiMAX soportan una variedad de mecanismos de *handoff* que permiten a los dispositivos de los usuarios mantener una conexión, cuando éstos se desplazan de un lugar a otro a velocidades vehiculares.

1.6.1.7 Servicios de Multicast y Broadcast (MBS)

Combinan las características de DVB-H (*Digital Video Broadcasting Handheld*) y 3GPP E-UTRA³ (*Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access*).

1.6.1.8 Múltiples Entradas Múltiples Salidas (MIMO, Multiple Input, Multiple Output) y beamforming⁴

Los avances tecnológicos de las antenas brindan una mejoría sustancial en la cobertura y el *throughput*.

¹ *Hybrid ARQ (H-ARQ)* es una variación del método de control de error ARQ. En ARQ, los bits de información de detección de error están añadidos a los datos a transmitirse (tal como, CRC, *Cyclic Redundancy Check*). En *Hybrid ARQ*, también se añaden los bits de corrección de errores hacia adelante (FEC, *Forward Error Correction*) a los existentes bits de corrección de errores tales como, Códigos Reed-Solomon o Turbo códigos. HARQ puede usarse en modo parada y espera o en modo selectivo. "Stop & Wait" es el más simple, pero la espera del acuse de recibo del receptor reduce la eficiencia. A menudo, múltiples procesos HARQ Stop & Wait se realizan paralelamente, así en la práctica: cuando un proceso HARQ está esperando por un acuse de recibo, otro proceso puede usar el canal para enviar más datos.

² *Handoff*: Habilidad de mantener una conexión al moverse entre los límites de la celda es un pre-requisito para movilidad. Se ofrecen varios tipos de *handoffs* y es decisión del operador escoger entre ellos.

³ E-UTRA (Acceso Universal Radioeléctrico Terrestre Evolucionado), el sistema de acceso radioeléctrico de Servicios Universales de Telecomunicaciones Móviles (UMTS, *Universal Mobile Telecommunications Services*), soportará las operaciones con una alta eficiencia espectral y calidad de servicio.

⁴ *Beamforming*: Método de conformación de haces que consiste en la formación de una onda de señal reforzada mediante el desfase en distintas antenas. Sus principales ventajas son una mayor ganancia de señal además de una menor atenuación con la distancia.

1.6.1.9 Sistemas de antenas avanzados (AAS, Adaptive Antenna System also Advanced Antenna System)

Soporta asistencia para subcanalización y recíprocamente canales que permiten mejorar el rango y capacidad del sistema al adaptar la configuración de la antena y concentrar su radiación a cada suscriptor individual incluyendo MIMO, métodos de conformación de haces, codificación tiempo-espacio¹ (STC, *Space Time Coding*) y multiplexación espacial² (SM, *Spatial Multiplexing*).

1.6.1.10 Reuso de frecuencia fraccional

Controla la interferencia co-canal³ (CCI, *Co-Channel Interference*) para soporte del reuso de frecuencia universal con mínima degradación en la eficiencia espectral.

1.6.1.11 Red de core IP

El uso de una plataforma IP común facilita las interconexiones de otras tecnologías inalámbricas y cableadas.

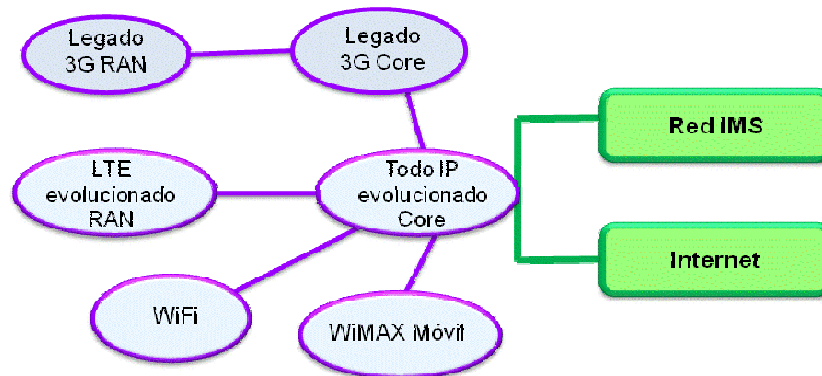


Figure 1.9 Rol de IMS en una red con 3G, WiFi y WiMAX ^[10]

¹Codificación tiempo espacio: Son una serie de técnicas que se emplean en medios en los que por alguna razón solo se puede emplear un único canal, codificando la transmisión mediante espaciado en el tiempo y la diversidad de señales disponibles dando lugar al código espacio-tiempo. La emisión desde varias antenas basándose en principios de ortogonalidad es aprovechada para aumentar la diversidad de la señal.

² Multiplexación Espacial: Consiste en la multiplexación de una señal de mayor ancho de banda en señales de menor ancho de banda iguales transmitidas desde distintas antenas. Si estas señales llegan con la suficiente separación en el tiempo al receptor, éste es capaz de distinguirlas creando así múltiples canales en anchos de banda mínimos. Esta es una buena técnica para aumentar la tasa de transmisión, sobre todo en entornos de nivel de relación señal a ruido bajos.

³La interferencia co-canal son señales interferentes que se presentan en la misma banda de frecuencia que la señal útil, con lo que resultan particularmente perjudiciales.

1.6.1.12 IMS (IP Multimedia Subsystem) y MMD (Multimedia Messaging Service)

Con IMS y MMD (Ver figura 1.10), los operadores de red pueden desarrollar aplicaciones independientemente de la tecnología de acceso ya que posee una arquitectura flexible por lo que acelera la creación y provisión de servicios.

La solución IMS y MMD permite ahorros significativos en costos y mejoras en los rendimientos, gracias a la unificación de operaciones fijas y móviles.

Al acoger la integración con otras tecnologías, el foro WiMAX ha establecido un grupo de trabajo de gestión de red que estrechamente colabora con los proveedores de servicio (IEEE, ETSI, 3GPP y 3GPP2) para asegurar una arquitectura de red unificada que facilite *interworking*, *roaming* y que comparta una sola infraestructura con el avance de las tecnologías celulares y cableadas (alámbricas).

1.6.1.13 Roaming global

Permite a los usuarios el acceso a diferentes redes usando un mismo dispositivo y una interfaz individual o familiar. El foro WiMAX está trabajando hacia una estructura que fomentará las relaciones de establecimiento del *roaming* global con los proveedores de servicio.

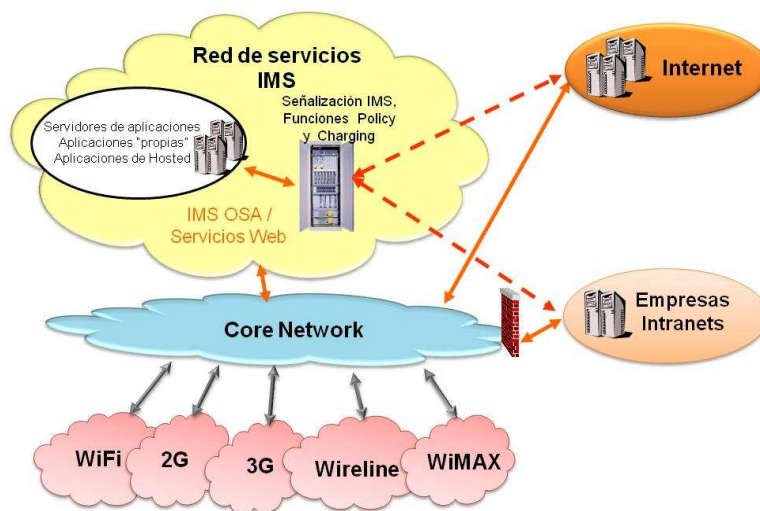


Figura 1.10 Red de Servicios IMS ^[11]

1.6.1.14 Tamaño de la trama de 5 milisegundos

Este tamaño de trama proporciona un óptimo cambio en la cabecera de la trama y soluciona problemas relacionados con la latencia.

Una evaluación del rendimiento de WiMAX móvil basada en la metodología de evaluación¹ 1xEV-DV² predice el *throughput* de la sección de red DL (*Downlink*) para un ancho de banda de canal de 10 MHz y a velocidades superiores a los 13Mbps, en el cual se concluye que para el tráfico en sentido DL respecto al tráfico en sentido UL (*Uplink*) se tiene una proporción de 3 a 1. Con este rendimiento de *throughput*, sus atributos y las características ya mencionadas, WiMAX móvil puede entregar rentablemente:

- Servicios de banda ancha de valor añadido incluyendo, datos y servicios de video así como VoIP.
- Soporte para modelos de uso fijo, nómada, portátil y móvil.
- Cobertura ubicua en condiciones sin línea de vista (NLOS) en una amplia gama de ambientes demográficos.

1.6.1.15 Soporte de Calidad de Servicio (QoS)

WiMAX Móvil puede reunir requerimientos de QoS para varios servicios tales como la transmisión de datos, audio, video, aplicaciones, etc, gracias a las características que presenta:

- Un enlace de aire rápido
- Capacidad de enlaces uplink/downlink
- Mecanismo de asignación de recursos flexible
- Pequeña desigualdad de recursos

En la capa MAC de WiMAX Móvil, la QoS es proporcionada vía flujo de servicios como se ilustra en la figura 1.11. Este es un flujo unidireccional de paquetes que

¹ Ver con detalle en: 3GPP2 C.R1002-0, CDMA2000 Evaluation Methodology, December 2004.

² CDMA2000 1xEV-DV (*1x Evolution-Data/Voice*), soporta una velocidad de datos en el enlace de bajada (*forward link*) de hasta 3,1 Mbps y una velocidad de datos en el enlace de subida (*reverse link*) de hasta 1,8 Mbps. Se puede profundizar en: www.cdg.org/resources/white_papers/files/Motorola_1xEV-DV_technical_overview_CDG1.pdf.

es suministrado con un conjunto particular de parámetros de QoS. Antes de proporcionar un cierto tipo de servicio de datos, la estación base y el usuario terminal establecen primero un enlace lógico unidireccional entre las MACs pares (correspondientes) que intervienen en una conexión. La MAC que sale asocia entonces los paquetes que atraviesan la interfaz MAC en un flujo para ser entregado sobre la conexión. Los parámetros de QoS asociados con el flujo de servicio definen el pedido y planificación de la transmisión en la interfaz aire.

Por consiguiente la QoS orientada a conexión, puede proporcionar control preciso sobre la interfaz aire. Puesto que la interfaz aire es usualmente el cuello de botella, la QoS orientada a conexión puede efectivamente permitir el control de QoS extremo a extremo. Los parámetros de flujo de servicio pueden ser administrados dinámicamente a través de mensajes MAC para ajustar la demanda dinámica de servicio.

El flujo de servicio basado en mecanismo de QoS aplica a ambos sentidos DL y UL para proveer QoS mejorada en las dos direcciones.

WiMAX Móvil soporta un amplio rango de servicios de datos y aplicaciones con variedad de requerimientos de QoS. Éstos son resumidos en la tabla 1.11.

El planificador MAC maneja transporte de datos en una base conexión por conexión. Cada conexión asociada con un solo servicio de datos con un conjunto de parámetros de QoS que cuantifica los aspectos de su conducta.

Con la capacidad de asignación dinámica de recursos en ambos sentidos DL y UL, el planificador puede proveer QoS superior para ambos tráficos DL y UL.

Particularmente con la planificación de enlace ascendente, los recursos del enlace ascendente son asignados más eficientemente, el rendimiento es más predecible, y la QoS es de mejor esfuerzo.

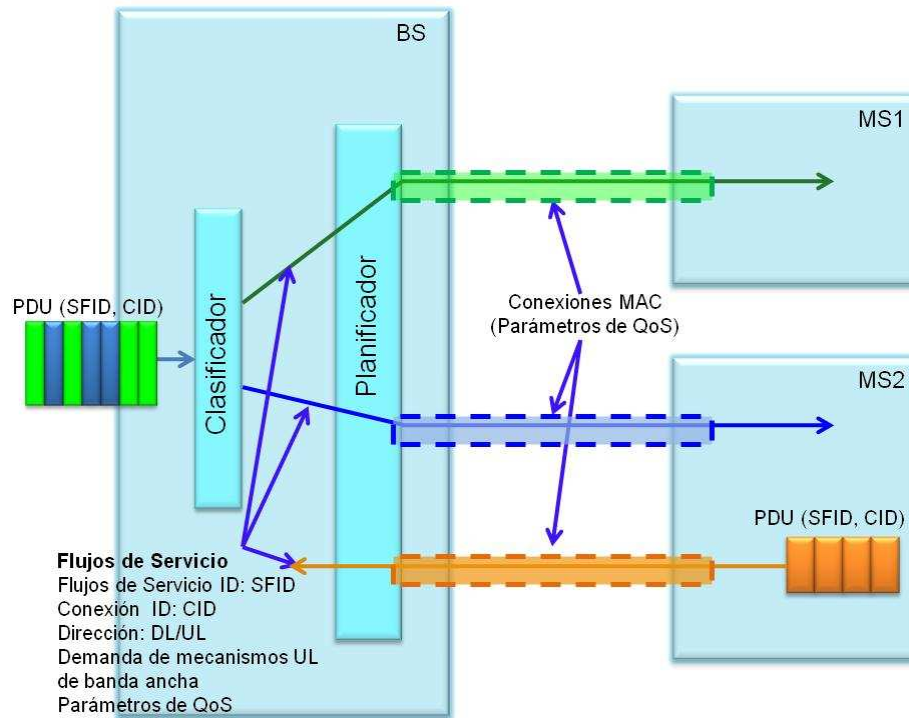


Figura 1.11 Soporte de QoS para WiMAX Móvil [12]

Categoría de QoS	Aplicación	Especificaciones de QoS
UGS Servicios de Concesión no Solicitado	VoIP	<ul style="list-style-type: none"> - Tasa Máxima soportada - Máxima Tolerancia al Retardo (Latencia) - Tolerancia al <i>Jitter</i>
RtPS Servicio de Sondeo en Tiempo Real	Flujo de Video o Audio	<ul style="list-style-type: none"> - Tasa Máxima Reservada - Tasa Máxima Soportada - Máxima Tolerancia al Retardo - Prioridad de Tráfico
ErtPS Servicio de Sondeo en Tiempo Real Extendido	Voz con Detección de Actividad (VoIP)	<ul style="list-style-type: none"> - Tasa Máxima Reservada - Tasa Máxima soportada - Máxima Tolerancia al Retardo (Latencia) - Tolerancia al <i>Jitter</i> - Prioridad de Tráfico
NrtPS Servicio de Sondeo en Tiempo no Real	Protocolo de Transferencia de Archivo (FTP)	<ul style="list-style-type: none"> - Tasa Máxima Reservada - Tasa Máxima soportada - Prioridad de Tráfico
BE Servicio del Mejor Esfuerzo	Transferencia de Datos Navegación	<ul style="list-style-type: none"> - Tasa Máxima soportada - Prioridad de Tráfico

Tabla 1.4 Calidad de Servicio y Aplicaciones de WiMAX Móvil¹

1.6.1.16 Seguridad

¹ Fuente: "Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation", WiMAX Forum, 2006.

WiMAX Móvil soporta mejor las características de seguridad por adoptar la mejor tecnología disponible actualmente.

El soporte en seguridad existe para autenticación mutua equipo/usuario, protocolo de administración flexible de clave, encriptación fuerte de tráfico, protección del mensaje del plano de control y administración y optimización del protocolo de seguridad para *handovers* rápidos.

1.6.2 SERVICIOS Y APLICACIONES

La tecnología WiMAX será la base de las Redes Metropolitanas de acceso a Internet, servirá de apoyo para facilitar las conexiones en zonas rurales, y se utilizará en el mundo empresarial para implementar las comunicaciones internas. Además, su popularización supondrá el despegue definitivo de otras tecnologías, como VoIP (llamadas de voz sobre el protocolo IP).

WiMAX está pensado principalmente como tecnología de “última milla” y se puede usar para enlaces de acceso, MAN o incluso WAN. Destaca WiMAX por su capacidad como tecnología portadora, sobre la que se puede transportar IP, TDM, T1/E1, ATM y *Frame Relay*, lo que la hace perfectamente adecuada para entornos de grandes redes corporativas de voz y datos así como para operadores de telecomunicaciones.

“El estándar IEEE 802.16 tiene definido cuatro métodos de solicitud de reserva de ancho de banda, para cuatro tipos de servicio diferentes:

- Servicio garantizado no solicitado: la estación base asigna periódicamente espacio disponible en el enlace ascendente para cada conexión de este tipo que se haya establecido.
- Servicio con sondeo en tiempo real: diseñado para el soporte de conexiones en tiempo real que generan paquetes de tamaño variable según intervalos de tiempo constantes.

- Servicio con sondeo en tiempo diferido: diseñado para el soporte de conexiones que no presenta requisitos en tiempo real.
- Servicios de mejor esfuerzo: pensado para el tráfico de este tipo, como podría ser el acceso a Internet.”

El foro WiMAX ha identificado algunas aplicaciones para sistemas basados en 802.16e. Estas aplicaciones pueden ser clasificadas en cinco clases principales. Estas clases de aplicaciones son resumidas en la tabla 1.5, junto con los valores de latencia y *jitter* correspondientes.

Clase	Aplicación	Requerimiento de ancho de banda		Requerimiento de Retardo		Requerimiento de Jitter	
1	Juegos Interactivos Multijugador	Bajo	50Kbps	Bajo	< 25 ms	-	
2	VoIP y Video Conferencia	Bajo	De 32 a 64 Kbps	Bajo	< 160 ms	Bajo	< 50ms
3	Streaming Media	De Bajo a Alto	De 5 Kbps a 2 Mbps	-		Bajo	< 100ms
4	Navegación Web y Mensajería Instantánea	Moderado	De 10 Kbps a 2 Mbps	-		-	
5	Descarga de Contenido	Alto	>2 Mbps	-		-	

Tabla 1.5 Clases de Aplicaciones WiMAX¹

1.6.3 AVANCES DEL DESARROLLO DE LA CERTIFICACIÓN WiMAX MÓVIL

Operadores importantes ya han anunciado planes para desplegar WiMAX móvil, sistemas basados en WirelessMAN-OFDMA y servicios basados en WiMAX móvil, tal es el caso de los servicios WiBro (*Wireless Broadband*) lanzados en Korea en la banda de 2.3-2.4 GHz a mediados del 2006. La cronología para productos WiMAX basados en OFDMA se resume en la tabla 1.6.

¹ Fuente: “*Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation*”, WiMAX Forum, 2006.

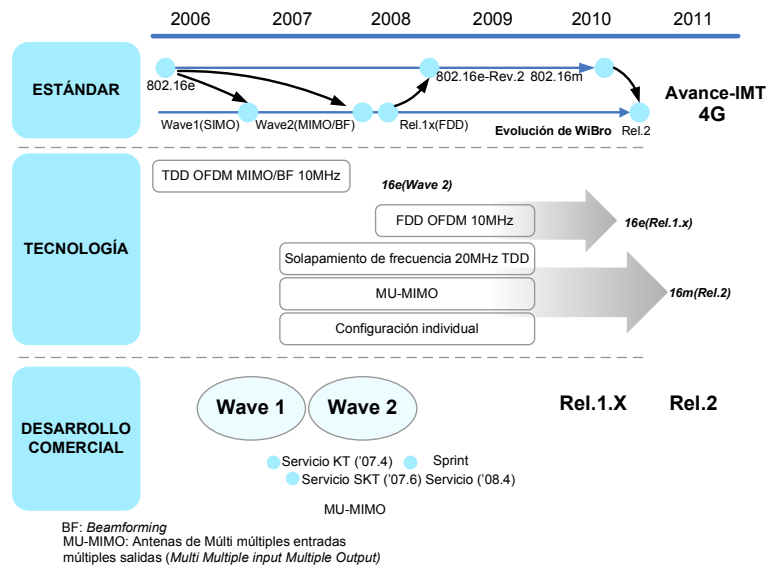


Tabla 1.6 Cronología de WiMAX¹

Perfiles del sistema Release-1 aprobado para WiMAX móvil cubre el rango de frecuencia que va de 2.3 a 2.7 GHz y de 3.3 a 3.8 GHz. Actualmente todos los perfiles del sistema aprobados están basados en duplexación por división de tiempo (TDD). Las bandas 2.3 a 2.7 GHz cubren el espectro asignados para servicios WiBro en Korea así como la banda de 2.5 a 2.7 GHz.



Figura 1.12 Características de la Certificación “Wave 1” y Certificación “Wave 2” [13]

La justificación de la certificación de productos WiMAX móvil “Wave 1” emprendió su certificación en la primera mitad del 2007. Como consecuencia, se llevó a cabo

¹ Fuente: *Mobile WiMAX Handbook, Telecoms Korea, Momo Seoul, 2008.*

las pruebas adicionales de la certificación para certificar las características agregadas soportadas por WiMAX. La comprobación de la certificación “Wave 2” se llevó a cabo en la segunda mitad del 2007 e incluye adelantos de las características como MIMO y *Beamforming*. Éstas y otras características agregadas mejoran los márgenes del enlace, *throughput* y añaden otros adelantos para soportar servicios adicionales de banda ancha.

1.6.4 VISIÓN A FUTURO DE WiMAX MÓVIL

Mientras que WiMAX Móvil ha evolucionado desde una visión centrada en los servicios de datos de banda ancha, las tecnologías celulares lo han hecho desde los servicios de voz. Aunque sus enfoques iniciales son distintos tal como se ilustra en la Figura 1.13, hay un sentido de convergencia cada vez más evidente, WiMAX va tras el aumento tanto de la movilidad como de la portabilidad de los terminales, mientras que los operadores móviles van tras más servicios de valor agregado que requieren mayores tasas de datos. Si esta tendencia continúa, las diferencias entre estos tipos de tecnologías serán cada vez menores.

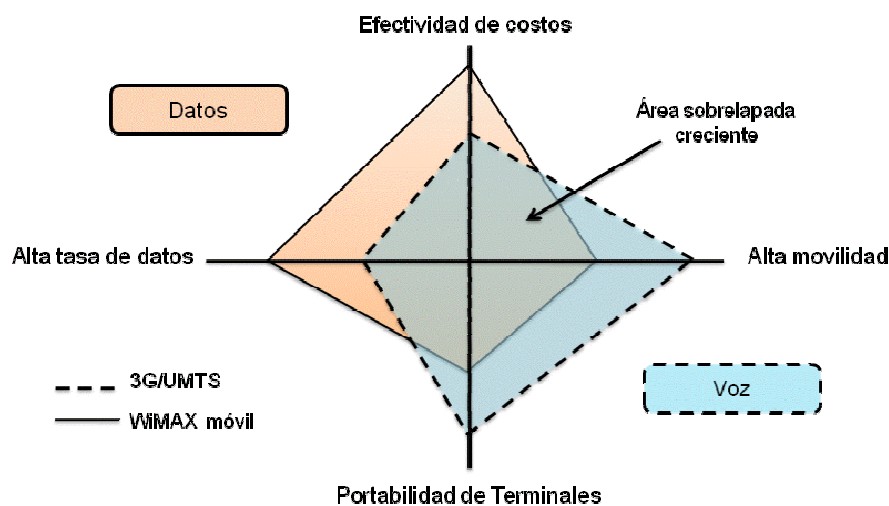


Figura 1.13 Acercamientos variados para terminales personales de banda ancha ^[14]

En el corto plazo, WiMAX móvil continuará evolucionando (ver figura 1.14), como perfil adicional del sistema y las características definidas por el Foro WiMAX, dirigidas a los requisitos y oportunidades específicas de mercado. Estas

características y capacidades se añadirán, ya que actualmente están soportadas por la IEEE STD 802.16 pero no incluidas en los perfiles del sistema *Release-1*.

Se espera que la evolución a largo plazo de WiMAX investigue las mejoras al estándar IEEE 802.16. Numerosos proyectos reformados están aconteciendo en el grupo de trabajo 802.16, y planes más ambiciosos se plantean en la enmienda IEEE 802.16m¹. El Foro WiMAX considera a IEEE 802.16m como el vehículo para soportar la convergencia entre WiMAX y otras tecnologías móviles.

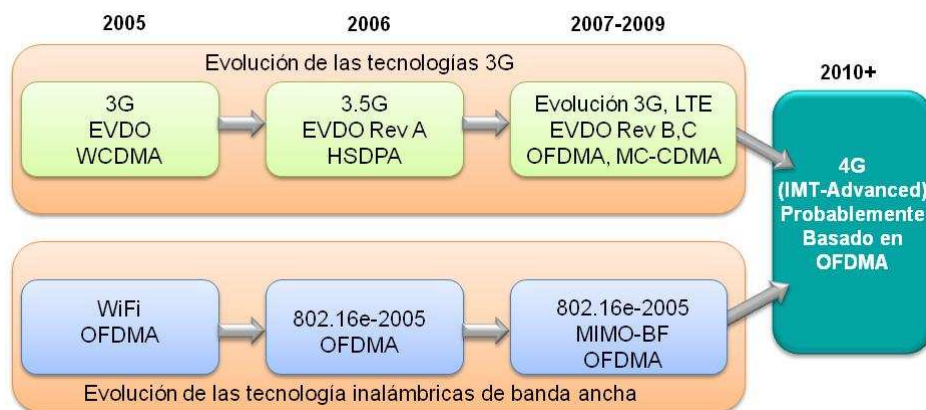


Figura 1.14 Las tecnologías móviles están convergiendo ^[15]

¹ 802.16m es un estándar de nueva generación superior al 802.16e-2005 y será adoptado por el Foro WiMAX una vez que la norma sea completada a finales del 2009. A 802.16m se lo considera como un fuerte candidato para tecnologías 4G. La IEEE ha definido parámetros para 802.16m, los cuales se pueden ver con detalle en su sitio Web.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CONTENIDO

[1] Repercusión de las nuevas tecnologías en las redes de telecomunicación, UIT (Oficina de Desarrollo de las telecomunicaciones), *Sofía (Bulgaria)*, 2006.

[2] <http://www.ahciet.net/CFMLATAMv4.doc>

[3] <http://www.fixedmobileconvergencealliance.com>

[4] Comunicaciones Móviles e Inalámbricas, GAPTEL (Grupo de Análisis y Prospectiva del Sector de las Telecomunicaciones), Septiembre 2005.

[5] <http://www.intel.com/netcomms/technologies/wimax/index.htm>

[6] “*Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation*”, *WiMAX Forum website*, 2006.

[7] *WiMAX and IMT-2000*, *WiMAX Forum website*, January 22, 2007.

FIGURAS

[1, 3] <http://www.ahciet.net/CFMLATAMv4.doc>

[4] *Fixed-Mobile Convergence: Unifying the Communications Experience*, an IDC White Paper, November 2005.

[5] *Convergencia Fijo-Móvil (FMC)*, SIEMENS, 2007.

[6] *The “Quad Play” The First Wave of the Converged Services Evolution*, in *Code Analysis*, 2006.

[7] Welcome to the World of Convergence, The Nation True, March 2007.

[8] ETSI, *Technical and Economic Drivers for Convergence Drivers for Convergence*, Adrian Scrase, 2007.

[9] Comunicaciones Móviles e Inalámbricas, GAPTEL (Grupo de Análisis y Prospectiva del Sector de las Telecomunicaciones), Septiembre 2005.

[10] *Mobile WiMAX: The Best Personal Broadband Experience*, WiMAX Forum, June 2006.

[11] *Mobile WiMAX "Mobile Internet Ready for Global Deployment"*, Dean S.K. Chang, WiMAX Forum website, 2006.

[12] *"Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation"*, WiMAX Forum website, 2006.

[13, 14, 15] *WiMAX and IMT-2000*, WiMAX Forum website, January 22, 2007.

CAPÍTULO II

ESTUDIO DE LOS ESTÁNDARES EPON/GPON

2.1 INTRODUCCIÓN ^[1]

Los últimos años han sido testigos de cambios vertiginosos en aspectos como la tecnología, el diseño y las aplicaciones comerciales de las redes de acceso de banda ancha. Una de las principales características de esta evolución es la introducción de toda una gama de nuevos esquemas en redes de alta velocidad utilizando tecnologías de fibra óptica.

El presente capítulo tiene como objetivo el estudio de los estándares EPON/GPON a fin de conocer las diferentes características que poseen en el empleo de múltiples prestaciones, flexibilidad, escalabilidad, calidad de servicio, entre otras. De esta manera, aportar dichas características al proceso de integración con la tecnología WiMAX.

2.1.1 REDES DE ACCESO DE NUEVA GENERACIÓN

La fibra óptica es capaz de entregar un gran ancho de banda, integrando servicios *Triple Play* (voz, datos y video) a distancias superiores a los 20 Km en la red de acceso del suscriptor. Una vía lógica para desplegar la fibra óptica en las redes de acceso local es usar una topología punto a punto (P2P, PtP), con fibras dedicadas desde la oficina central (CO, *Central Office*) para cada suscriptor (usuario final) como se muestra en la figura 2.1a. Al ser ésta una arquitectura simple, en la mayoría de los casos se considera un alto costo debido a que se requiere una implementación externa de fibra de longitud considerable, así también varios puntos de terminación de los conectores de fibra en el intercambio local. Considerando N suscriptores a una distancia promedio de L Km desde la oficina central, un diseño PtP requiere $2N$ *transceivers* y una longitud total de fibra $N*L$ (asumiendo que se usa una fibra para transmisiones bidireccionales).

Para reducir el despliegue de fibra, es posible instalar un conmutador remoto (concentrador) cerca del barrio, que posibilita reducir el consumo de fibra a sólo L Km (asumiendo la distancia despreciable entre el conmutador y los usuarios), pero esto aumenta el número de *transceivers* a $2N+2$, tal como se muestra en la figura 2.1b, además, la arquitectura de la red conmutada a la manzana (FTTH) requiere de potencia eléctrica, así también como, la potencia de *backup*¹ en el conmutador (*curb switch*).

Actualmente, para los Portadores de Telecomunicaciones del mercado uno de los costos más altos es el mantenimiento y el suministro de potencia eléctrica en el bucle local.

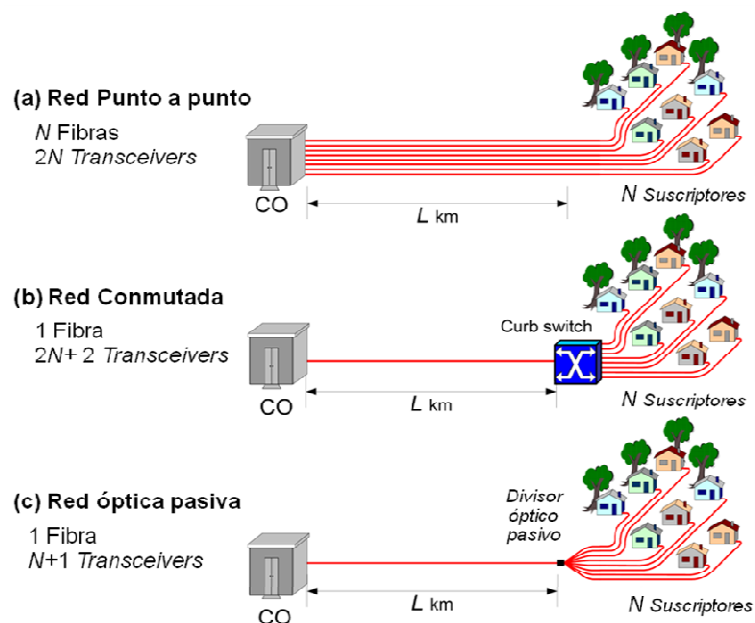


Figura 2.1 Despliegue de escenarios fibra al hogar (FTTH) ^[1]

Por consiguiente, es lógico reemplazar el conmutador activo por un económico divisor óptico pasivo². Las redes ópticas pasivas (PON) son una tecnología considerada por muchos como una solución atractiva al problema de última milla³; una PON minimiza el número de *transceivers* ópticos, terminaciones de la oficina central e implementación de fibra. Una PON es una red óptica punto a multipunto

¹ *Backup*: Una fuente de poder alternativa que mantiene un sistema de alarma operacional en caso de que el suministro de potencia falle.

² En algunos textos el divisor óptico pasivo es conocido como *splitter*.

³ Fuente: B. Lung, "PON architecture 'futureproofs' FTTH," *Lightwave, PennWell*, vol. 16, no. 10, pp. 104–107.

(P2MP, PtMP) con elementos no activos en la trayectoria de las señales desde la fuente al destino. Los únicos elementos usados en una PON son los componentes ópticos pasivos, tales como: fibra óptica, empalmes y divisores. Una red de acceso PON basada sólo en una fibra requiere $N+1$ *transceivers* y L Km de fibra, como en la figura 2.1c.

2.1.1.1 Arquitectura de la red de acceso óptico

La sección óptica de un sistema de red de acceso local puede ser activa o pasiva y su arquitectura puede ser punto a punto o punto a multipunto como se mencionó anteriormente. La figura 2.2 muestra las arquitecturas disponibles: fibra hasta la vivienda (FTTH, *Fiber To The Home*), fibra hasta el edificio o la acometida (FTTB/C, *Fiber To The Building/Curb*) y la fibra hasta el armario (FTTCab, *Fiber To The Cabinet*). La red de acceso óptico (OAN, *Optical Access Network*) es común a todas las arquitecturas presentadas en la figura 2.2; por consiguiente, la uniformidad de este sistema ofrece la posibilidad de generar grandes volúmenes de acceso del sistema de Telecomunicaciones a escala mundial.

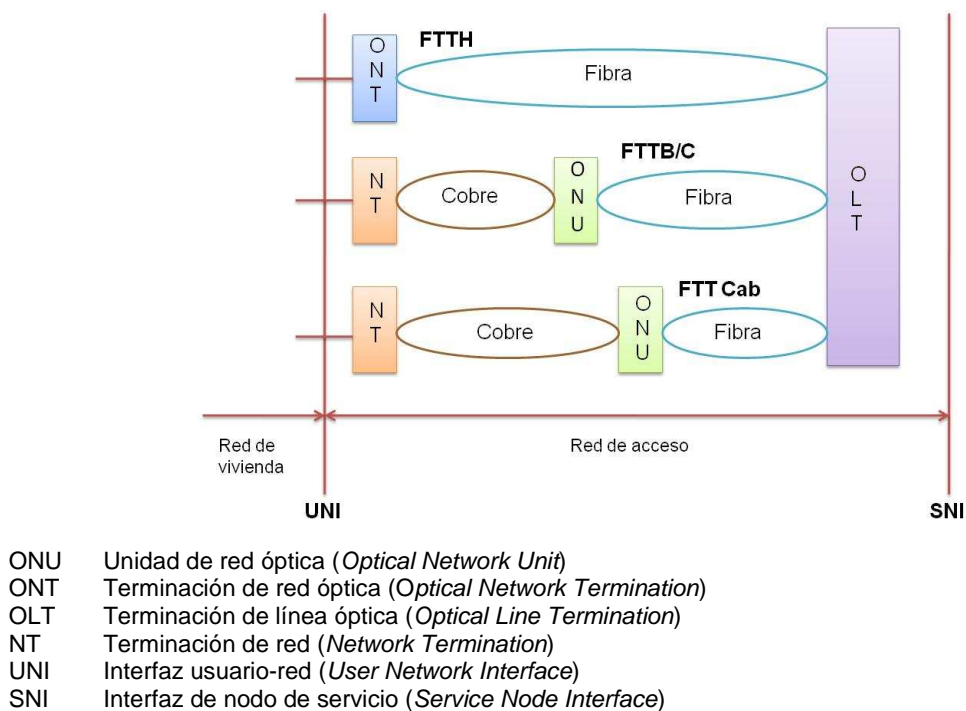


Figura 2.2 Arquitectura de red ^[2]

a) Escenario FTTB

Este escenario se divide a su vez en dos escenarios, uno para las unidades multivivienda (MDU, *Multi-Dwelling Unit*), y el otro para las empresas. Cada escenario tiene las siguientes categorías de servicio:

✓ FTTB para MDU

- Servicios de banda ancha asimétricos (por ejemplo, servicios de difusión digital, vídeo por demanda (VoD, *Video On Demand*), descarga de ficheros, etc.).
- Servicios de banda ancha simétricos (por ejemplo, difusión de contenidos, correo electrónico, intercambio de ficheros, cursos a distancia, telemedicina, juegos en línea, etc.).
- Servicio telefónico ordinario (POTS, *Plain Old Telephone Service*) y red digital de servicios integrados (RDSI). La red de acceso ofrece, de una manera flexible, servicios telefónicos de banda estrecha con la temporización adecuada para el acceso.

✓ FTTB para empresas

- Servicios de banda ancha simétricos (por ejemplo, programas informáticos de grupo, difusión de contenidos, correo electrónico, intercambio de ficheros, etc.).
- Servicio telefónico ordinario (POTS) y red digital de servicios integrados (RDSI). La red de acceso ofrece, de una manera flexible, servicios telefónicos de banda estrecha con la temporización adecuada para el acceso.
- Línea privada. La red de acceso proporciona, de una manera flexible, servicios de línea privada con distintas velocidades.

b) Escenarios FTTC y FTTCab

En estos escenarios se incluyen las siguientes categorías de servicio:

- Servicios de banda ancha asimétricos (por ejemplo, servicios de difusión digital, vídeo por demanda, descarga de ficheros, juegos en línea, etc.).

- Servicios de banda ancha simétricos (por ejemplo, difusión de contenido, correo electrónico, intercambio de ficheros, cursos a distancia, telemedicina, etc.).
- Servicio telefónico ordinario (POTS) y red digital de servicios integrados (RDSI). La red de acceso ofrece, de una manera flexible, servicios telefónicos de banda estrecha con la temporización adecuada para el acceso.
- Red de retroceso xDSL (*x Digital Subscriber Line*)¹.

c) Escenario FTTH

En este escenario se incluyen las siguientes categorías de servicio:

- Servicios de banda asimétricos (por ejemplo, servicios de difusión digital, vídeo por demanda, telecarga de ficheros, etc.).
- Servicios de banda ancha simétricos (por ejemplo, difusión de contenidos, correo electrónico, intercambio de ficheros, cursos a distancia, telemedicina, juegos en línea, etc.).
- Servicio telefónico ordinario (POTS) y red digital de servicios integrados (RDSI). La red de acceso ofrece de una manera flexible, servicios telefónicos de banda estrecha con la temporización adecuada para el acceso.

En la siguiente figura se puede apreciar los diferentes tipos de arquitecturas de las redes ópticas presentadas anteriormente.

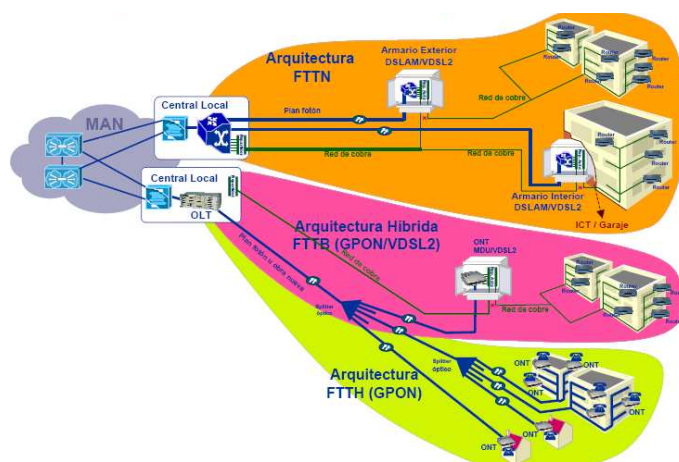


Figura 2.3 Ejemplo de utilización de las arquitecturas de redes ópticas [3]

¹ Consiste en una línea digital de alta velocidad, sobre el par trenzado de cobre que lleva la línea telefónica convencional o línea de abonado. (x puede ser simétrico, asimétrico, etc.).

2.1.2 VISIÓN GENERAL DE LAS PON

A finales de los años noventa, PON comenzó a ser considerado, tanto por los operadores como por los suministradores, como una interesante solución para ofrecer acceso de fibra óptica hasta los usuarios residenciales. Su naturaleza punto a multipunto, posibilita ahorros significativos en la instalación de la fibra óptica y en interfaces ópticas. Además, PON no requiere de dispositivos electrónicos u optoelectrónicos activos para la conexión entre el abonado y el operador y, lo que implica menor inversión y menores costes de mantenimiento.

2.1.2.1 Combinadores /divisores ópticos

Una red óptica pasiva emplea un dispositivo pasivo (que no requiere potencia) para dividir la señal óptica (potencia) de una fibra en varias fibras y recíprocamente, para combinar señales ópticas de múltiples fibras en una, este dispositivo es un acoplador óptico. En su forma más simple, un acoplador óptico consta de dos fibras fusionadas. La potencia de la señal recibida en cualquier puerto de entrada es dividida entre ambos puertos de salida. La proporción de repartición de un divisor puede ser controlada por la longitud de la región fusionada y por tanto conseguir un parámetro constante.

Acopladores $N \times N$ son elaborados por múltiples acopladores 2×2 (figura 2.4) o empleando tecnología de guía de ondas planar¹.

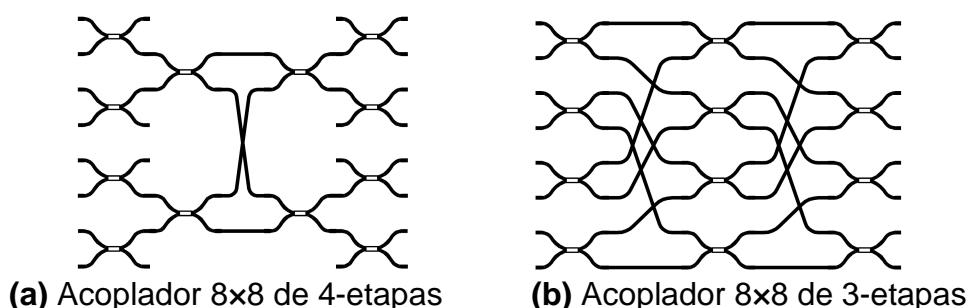


Figura 2.4 Acopladores 8x8 creados a partir de múltiples acopladores 2×2 ^[4]

¹Las Guías de onda Planar (*Planar Waveguide*) son guías de ondas con una geometría planar, la cual encamina la luz sólo en una dimensión. Para profundizar ver: <http://www.patentstorm.us/patents/6621959-fulltext.html>.

Muy a menudo, los acopladores se fabrican para tener sólo una entrada o sólo una salida. Un acoplador con una sola entrada se refiere a un divisor. Un acoplador con una sola salida se denomina combinador.

Algunas veces, los acopladores 2x2 se fabrican de manera altamente asimétricos (con proporciones divisorias 5/95 o 10/90). Este tipo de acopladores se utilizan para bifurcar una porción pequeña de señal de potencia, por ejemplo, para propósito de monitoreo¹.

2.1.2.2 Topologías PON

Lógicamente, la primera milla es una red P2MP (Point to Multi-Point), con una CO sirviendo a múltiples suscriptores. Existen distintas topologías multipunto apropiadas para la red de acceso, incluyendo árbol, árbol y ramas, anillo, o bus (Figura 2.5). Usando acopladores ópticos *tap* y divisores ópticos 1:N, las PONs pueden ser flexiblemente instaladas en cualquiera de estas topologías. Además, las PONs pueden desplegarse en configuraciones redundantes tales como doble anillos o doble árboles; o la redundancia puede ser añadida a una sola parte de la PON, es decir tronco del árbol (Figura 2.5d) (referida también a más topologías redundantes).

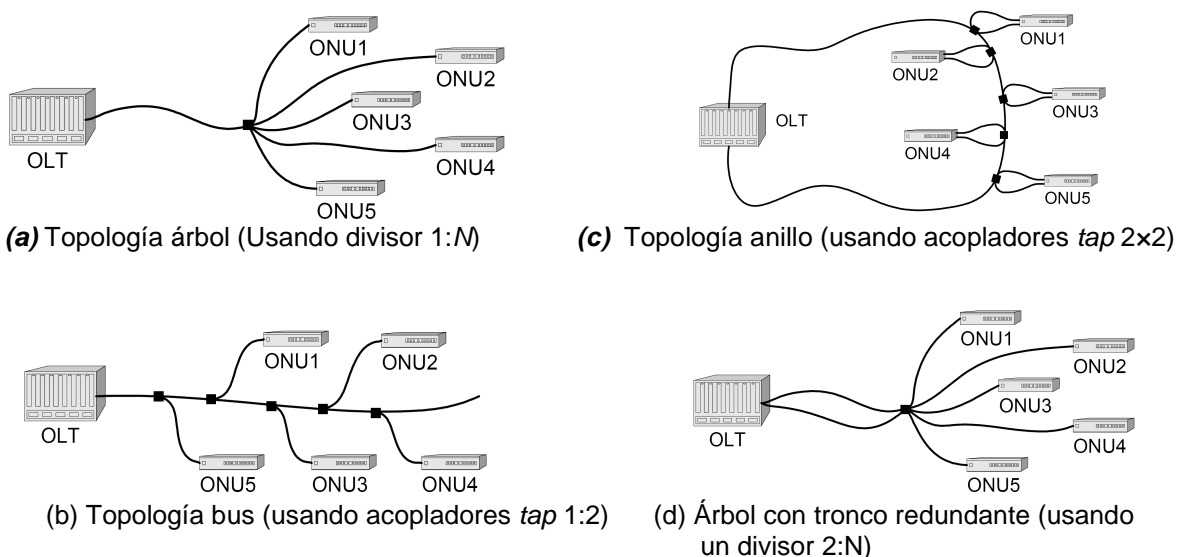


Figura 2.5 Topologías PON [5]

¹Tales dispositivos se denominan acopladores *Tap* o acoplador direccional, estructura con 1 puerto de entrada y 2 puertos de salida. La diferencia entre un *splitter* y un *Tap* es el elevado coeficiente acoplamiento en este último.

Todas las transmisiones en una PON se realizan entre un terminal de línea óptica (OLT, *Optical Line Terminal*) y unidades de red óptica (ONUs, *Optical Network Units*) (Figura 2.5). La OLT reside en la CO y conecta la red de acceso óptico a la red de área metropolitana (MAN) o a la red de área extendida (WAN) también conocida como la red de *backbone* o *long-haul*. La ONU está localizada en la posición de usuario final (FTTH, FTTB o FFTC).

Las ventajas de usar las PONs en redes de acceso para suscriptores son numerosas:

- Las PONs permiten largo alcance entre la CO y el establecimiento del usuario, operando a distancias sobre los 20 Km.
- Las PONs minimizan la instalación de fibra tanto en la CO como en el bucle local.
- Las PONs proveen un gran ancho de banda debido a una penetración más profunda de fibra, ofreciendo soluciones de gigabits por segundo.
- Operando en sentido descendente como una red de difusión, las PONs permiten difusión para video ya sea como video IP o video analógico.
- Las PON eliminan la necesidad de instalar multiplexores activos en los sitios divisorios, usan pequeños divisores ópticos pasivos, localizados en la infraestructura de los empalmes, e instalados como parte de la planta del cable de fibra óptica.
- Siendo ópticamente transparentes de extremo a extremo, las PONs permiten mejorar las altas tasas de bits o longitud de onda adicionales.

2.1.2.3 Transceivers en modo-ráfaga

Debido a las distancias desiguales entre la CO y las ONUs, la atenuación de la señal óptica en la PON no es la misma para cada ONU. El nivel de potencia admitido por la OLT será diferente para cada *slot* (ranura) de tiempo (llamado el problema *near-far*). La figura 2.6 describe niveles de potencia de cuatro *slots* de tiempo recibidos por la OLT desde cuatro diferentes ONUs en una PON TDM¹.

¹ Multiplexación por división en el tiempo (TDM, *Time Division Multiplexing*) es una técnica que generalmente se utiliza para multiplexar secuencias de voz digitalizadas y secuencias de datos a

Como se muestra, la intensidad de una señal ONU es inferior en la OLT probablemente debido a las largas distancias. Si el receptor en la OLT es ajustado para recibir fielmente señales de potencia altas cerca de la ONU, equivocadamente puede leer unos y ceros cuando reciba señales débiles de una ONU distante. En el caso opuesto, si el receptor está instruido a recibir señales débiles, éste podría leer tanto los unos como los ceros al recibir señales fuertes. Para detectar correctamente el flujo de bits entrantes, el receptor OLT debe poder ajustarse rápidamente al umbral de ceros-unos al comienzo de cada *slot* de tiempo recibido, ejemplo, debe operar en modo de ráfaga. Un receptor en modo de ráfaga es necesario sólo en la OLT. Las ONUs leen un continuo flujo de bits (datos o *idles*) enviados por la OLT y no necesitan rápidamente un reajuste.

Hay que tener en cuenta que la unidad localizada a mayor distancia de la OLT puede degradar el funcionamiento de todas las ONUs en funcionamiento, por tanto se requiere de un protocolo especial de señalización para realimentar de la OLT a cada ONU, esto implica que la ONU posea un hardware más complicado. Un acercamiento alternativo es permitir a las ONUs ajustar su potencia de transmisión tal que los niveles de potencia recibidos por la OLT desde todas las ONUs lleguen a ser los mismos como solución del problema.

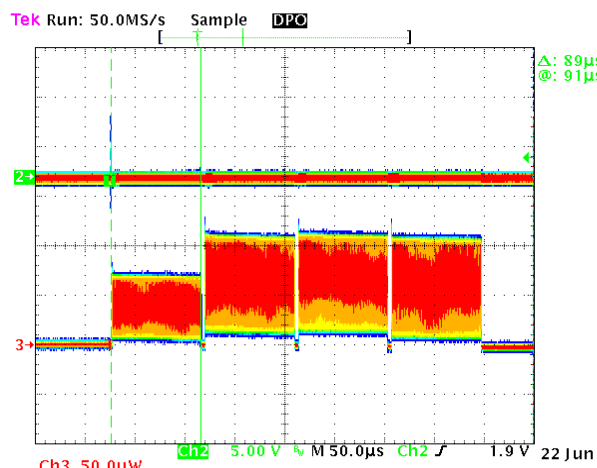


Figura 2.6 Ilustración del problema *near-far* en una TDM-PON: una toma instantánea del nivel de potencia recibido de cuatro *slots* de tiempo (*timeslots*) [6]

través de una única ruta de transmisión mediante la mezcla temporal de partes de cada una de las señales.

Otro asunto radica en que no es suficiente con prohibir que las ONUs envíen datos; el problema es que, aún en ausencia de datos, los láseres generan ruido espontáneo de emisión. El ruido espontáneo de emisión para varias ONUs localizadas cerca a la OLT fácilmente puede oscurecer la señal de una ONU remota (efecto captura). Así, una ONU debe apagar su láser entre los *slots* de tiempo, ya que un láser se enfría cuando está apagado, y se calienta cuando está encendido, su potencia emitida puede fluctuar al principio de una transmisión. Es importante que el láser pueda estabilizarse rápidamente después de encenderse.

2.2 GPON (GIGABIT CAPABLE PASSIVE OPTICAL NETWORK) ^[2]

2.2.1 INTRODUCCIÓN

La recomendación G.984, estandarizada por el sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-T), creada por la Comisión de Estudio 15 aprobada en 2003, conocida genéricamente como GPON, que posibilita la explotación de las redes PON con el fin de describir una red de acceso flexible de fibra óptica con capacidad para soportar las necesidades de ancho de banda de los servicios para empresas y particulares, soportando los protocolos *Ethernet*, ATM y TDM.

2.2.1.1 Evolución de la Normalización GPON

Conforme con los avances dados por la Comisión de Estudio 15 de la UIT-T, surge:

- La Recomendación UIT-T **G.984.1** (16 marzo 2003), describe las características generales de un sistema PON con capacidad de *gigabits*.
- La Recomendación UIT-T **G.984.2** (16 marzo 2003), describe la especificación de la capa dependiente de los medios físicos PMD de una red de acceso óptico.
 - ✓ La enmienda 1 a la Recomendación ITU-T G.984.2 .aceptada el 17 de febrero de 2006.

- La Recomendación UIT-T **G.984.3** (22 febrero 2004), describe la especificación de la capa de convergencia de transmisión TC (*Transmission Convergence*), para transportar diversos servicios entre la interfaz usuario-red y la interfaz del nodo de servicios ya sean datos, video, circuitos arrendados, POTS y servicios distribuidos.
 - ✓ La enmienda 1 a la Recomendación UIT-T G.984.3 aprobada el 14 de julio de 2005.
 - ✓ La enmienda 2 a la Recomendación UIT-T G.984.3 aprobada el 29 de marzo de 2006.
 - ✓ La enmienda 3 a la Recomendación UIT-T G.984.3 aprobada el 14 de diciembre de 2006.

- La Recomendación UIT-T **G.984.4**¹ (13 junio 2004), describe la especificación de la interfaz de control y gestión de la terminación de red óptica, abarca la gestión de configuración, la gestión de averías y la gestión de calidad de funcionamiento de dicha terminación óptica no solo para la explotación del GPON sino también para diversos servicios, tales como las capas de adaptación ATM 1, 2 y 5, GEM (*G-PON Encapsulation Method*), servicios de emulación de circuitos, servicios *Ethernet*, servicios de voz, multiplexación por división de onda, entre otros.
 - ✓ La enmienda 1 a la Recomendación UIT-T G.984.4 aprobada el 29 de junio de 2005.
 - ✓ La enmienda 2 a la Recomendación UIT-T G.984.4 aprobada el 29 de marzo de 2006.
 - ✓ La enmienda 3 a la Recomendación UIT-T G.984.4 aprobada el 14 de diciembre de 2006.

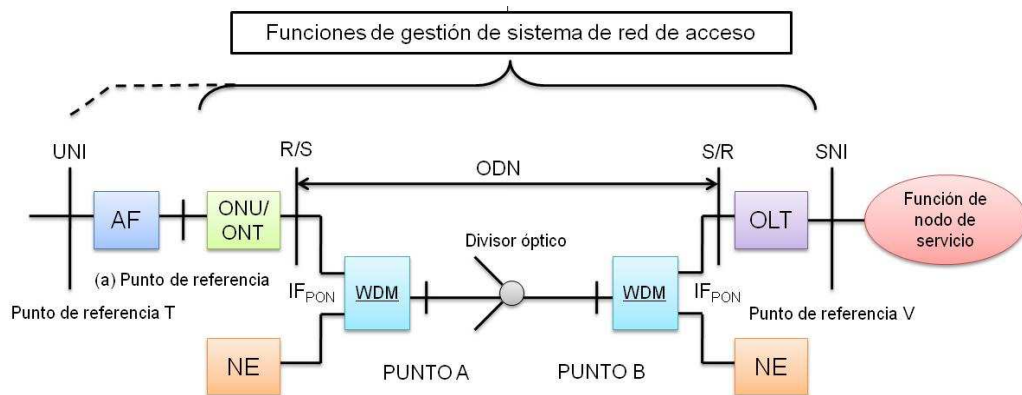
¹ NOTA: La Recomendación UIT-T G.984.4 y todas sus enmiendas, a partir de Febrero del 2008 han sido desechadas y posteriormente reformadas, razón por la cual, en la dirección electrónica correspondiente a la norma GPON presenta pre-publicaciones para los miembros de la UIT-T mas no para uso público.

- La Recomendación UIT-T **G.984.5** (22 de septiembre 2007), describe la banda de ampliación de las redes de acceso óptico con capacidad de *gigabits*.
- La Recomendación UIT-T **G.984.6**¹ (marzo 2008), describe mejoras en el alcance para redes ópticas pasivas con capacidad de *gigabits*.

2.2.1.2 Configuración de referencia de un sistema GPON

La configuración de referencia se ilustra en la figura 2.7. Las definiciones de las diferentes componentes que presenta esta configuración de referencia se muestran en el glosario.

La transmisión en sentido descendente y la transmisión en sentido ascendente pueden tener lugar en la misma fibra y en los mismos componentes (funcionamiento dúplex), o en fibras y componentes distintos (funcionamiento simplex).



ONU	Unidad de red óptica
ONT	Terminación de red óptica
ODN	Red de distribución óptica
OLT	Terminación de línea óptica
WDM	Módulo de multiplexación por división de longitud de onda (esta función no es necesaria si no se emplea WDM)
NE	Elemento de red que utiliza las distintas longitudes de onda de la OLT y de la ONU
AF	Función de adaptación (algunas veces incluida en la ONU)
SNI	Interfaz de nodo de servicio
UNI	Interfaz usuario-red
S	Punto en la fibra óptica justo después del punto de conexión óptico OLT (sentido descendente)/ONU (sentido ascendente) (es decir, conector óptico o empalme óptico)

¹ La Recomendación UIT-T G.984.6 presenta solo pre-publicaciones para los miembros de la UIT-T mas no para uso público.

R	Punto en la fibra óptica justo antes del punto de conexión óptico ONU (sentido descendente)/OLT (sentido ascendente) (es decir, conector óptico o empalme óptico)
(a) Punto de referencia	Si la ONU incluye la AF, este punto no es necesario
PUNTO A/B	Si no se utiliza WDM, no son necesarios estos puntos

Figura 2.7 Configuración de referencia para GPON [7]

2.2.1.2.1 Interfaz de nodo de servicio

Los sistemas GPON se caracterizan en general por un sistema de terminación de línea óptica (OLT, *Optical Line Termination*) y una unidad de red óptica (ONU, *Optical Network Unit*) o una terminación de red óptica (ONT, *Optical Network Termination*) con una red de distribución óptica (ODN, *Optical Distribution Network*) pasiva que los interconecta. Por lo general, existe una relación de tipo uno a muchos entre la OLT y las ONU/ONT respectivamente.

2.2.1.2.2 Interfaz en los puntos de referencia S/R y R/S

Esta interfaz en los puntos de referencia S/R y R/S se define como IF_{PON} . Se trata de una interfaz específica de la PON que soporta todos los elementos de protocolo necesarios para permitir la transmisión entre la OLT y las ONUs.

2.2.1.3 Servicios, interfaz usuario-red e interfaz de nodo de servicio

2.2.1.3.1 Servicios

Es necesario que la GPON, dada su capacidad de banda ancha, soporte todos los servicios existentes y además los nuevos servicios en desarrollo para los abonados particulares y empresas.

Algunos operadores tienen más claro que otros, el tipo de servicios específicos que deben ofrecer, aunque esto dependerá en gran medida de las condiciones reglamentarias particulares de los mercados de cada operador y de las posibilidades que ofrece su propio mercado. La forma de ofrecer estos servicios de manera rentable depende de las condiciones jurídicas y además de otros

factores, en particular la infraestructura de telecomunicaciones existente, la distribución de las viviendas y la proporción de clientes particulares y empresas.

2.2.1.3.2 Interfaz usuario-red (UNI) e interfaz de nodo de servicio (SNI)

Como se ilustra en la figura 2.7 la ONU/ONT tiene una UNI, así como la OLT tiene una SNI. El interfaz UNI/SNI¹ depende de los servicios ofrecidos por el operador de servicio (tabla 2.1).

2.2.2 ESPECIFICACIÓN DE LA CAPA DEPENDIENTE DE LOS MEDIOS FÍSICOS (PMD)

En esta capa se centran principalmente los servicios de soporte de red con requisitos de ancho de banda, con capacidad suficiente para transportar dichos servicios entre la interfaz usuario-red y la interfaz del nodo de servicio, se describe una arquitectura basada en el modo de transferencia asíncrono (ATM, *Asynchronous Transfer Mode*) por una red óptica pasiva. La finalidad de estas adiciones y modificaciones es soportar velocidades de datos más altas, especialmente para el transporte de servicios de datos.

2.2.2.1 Características generales

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Estándar	UIT-T G.984.1/2/3/4/5.
Sentidos de Transmisión	Ascendente (<i>Upstream</i>): De la ONU a la OLT. Descendente (<i>Downstream</i>): De la OLT a la ONU.
Tasa de Transmisión	<i>Upstream</i> : 155,52Mbps, 622,08Mbps, 1244,16Mbps, 2488,32Mbps. <i>Downstream</i> : 1244,16 Mbps, 2488,32 Mbps.
Combinaciones de Velocidad de Transmisión	Asimétrico (Mbps): 155,52-1244,16; 622,08-1244,16; 155,52-2488,32; 622,08-2488,32; 1244,16-2488,32. Simétrico (Mbps): 1244,16-1244,16; 2488,32-2488,32.
Código de línea	<i>Upstream</i> : NRZ (<i>Non Return to Zero</i>) (+ pseudoaleatorizado, se define en la especificación de la capa TC). <i>Downstream</i> : NRZ (+ pseudoaleatorizado).
Medio de Transmisión	Tanto <i>Upstream</i> como <i>Downstream</i> basado en la

¹ Ver Anexo C, Recomendación UIT-T G.984.1.

	Recomendación UIT-T G.652.
Método de Transmisión	Bidireccional (WDM, <i>Wavelength Division Multiplexing</i>) en una fibra.
	Unidireccional en dos fibras.
Longitud de onda de trabajo	<i>Upstream</i> : 1260-1360nm.
	<i>Downstream</i> : 1480-1550nm (Sistemas de una sola fibra). 1260-1360nm (Sistemas de dos fibras).
Alcance Físico	10 Km y 20 Km.
Alcance Lógico	60 Km.
Retardo medio máximo de transferencia de la señal	La GPON debe dar cabida a servicios que requieren un retardo de valor medio máximo de transferencia de la señal de 1,5 ms (menor a 1,5ms entre T-V figura 2.7).
Relación de división	1:16/32/64 Capa PMD (<i>Physical Medium Dependent</i>). 1:128 Capa TC (<i>Transmission Convergence</i>).
Tipo de Fuentes	Láseres en modo multilongitudinal (MLM, <i>Multi-Longitudinal Mode</i>) y los láseres en modo monolongitudinal (SLM, <i>Single-Longitudinal Mode</i>).
Soporte de Servicios	<i>Ethernet</i> (IP, VoIP, MPEG2/4,etc), POTS, RDSI, T1, DS3, E1, E3, ATM, video digital, etc.
Servicios UNI (<i>User Network Interface</i>)	<i>Ethernet</i> , RDSI, PDH (T1, DS3, E1), STM-1,4(ATM), etc.
Servicios SNI (<i>Service Node Interface</i>)	1000BASE-X (<i>Ethernet</i>), PDH (DS3, ATM, E1, E3), POTS, RDSI, etc.
Seguridad	AES (<i>Advanced Encryption Standard</i>).
Tasa de bits errados (BER, <i>Bit error ratio</i>)	Menor a 10^{-10} .
Gama de atenuación¹ (Rec. UIT-T G.982)	Clase A: 5-20 dB. Clase B: 10-25 dB. Clase C: 15-30 dB.
OMA (<i>Operations, Administration and Maintenance</i>)	PLOAM (<i>Physical Layer OAM</i>) + OMCI (<i>ONT Management and Control Interface</i>).

Tabla 2.1 Características técnicas generales del sistema GPON

El estándar describe varios requisitos importantes de la capa dependiente del medio físico (PMD, *Physical Medium Dependent*) para la GPON (tabla 2.1); en el presente proyecto de titulación no se toman en cuenta las características que requieren las interfaces ópticas de acuerdo a las velocidades y sentidos de transmisión para el diseño y operación de los sistemas GPON; sin embargo se

¹ Para las especificaciones de atenuación se han supuesto valores de caso más desfavorable, incluyendo pérdidas debidas a los empalmes, conectores, atenuadores ópticos (si se utilizan) u otros dispositivos ópticos pasivos, y todo margen adicional relativo al cable.

puede chequear con mayor detalle los cuadros, figuras, etc, detalladas en la Recomendación correspondiente¹.

2.2.2.2 Interacción entre la capa PMD de la GPON y la capa TC (*Transmission Convergence*)

Como se indicó en la tabla 2.1, se describen las características generales de la capa PMD de una red de acceso óptico (OAN) con capacidad para transportar diversos servicios entre la interfaz usuario-red y la interfaz del nodo de servicio. Sin embargo, algunas de las funcionalidades de la GPON pertenecen a las dos capas, PMD y TC, o tienen repercusión sobre ambas. Se describe las funcionalidades y se explica la relación entre la capa PMD de la GPON y la capa TC.

2.2.2.2.1 Corrección de errores en recepción

Los sistemas que utilizan la corrección de errores en recepción (FEC, *Forward Error Correction*) podrán soportar las gamas de atenuación (ver tabla 2.1) para la ODN con transmisores y receptores de calidad inferior de funcionamiento.

La ganancia óptica efectiva G de los sistemas que utilizan FEC se define como la diferencia de potencia óptica a la entrada del receptor, con y sin FEC, para un BER de 1×10^{-10} . Los sistemas que emplean FEC con una ganancia óptica efectiva G , expresada en dB, pueden utilizar cualquiera de las dos variantes de calidad de funcionamiento (pero no ambas, para facilitar el interfuncionamiento) siguientes:

- Las potencias mínima y máxima del transmisor pueden reducirse en G , o
- La sensibilidad mínima del receptor puede disminuirse en G .

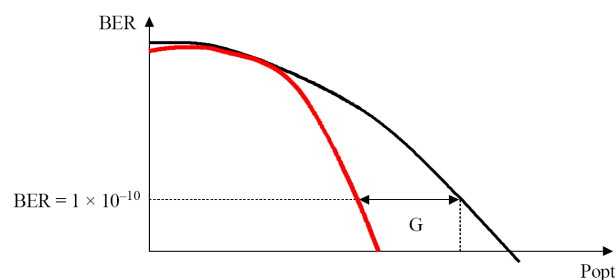


Figura 2.8 Ganancia óptica efectiva G alcanzada con FEC [8]

¹ Se puede profundizar en: Anexo C Recomendación UIT-T G.984.2.

Alternativamente, se puede utilizar la ganancia G de codificación óptica efectiva para lograr un alcance físico mayor o una relación de división más alta cuando se emplea un láser MLM en la ONU.

2.2.2.2.2 *Overhead* de la capa física en sentido ascendente

La estructura de la trama GPON se describe en la especificación de la capa TC descrita en la sección 2.2.3.8. No obstante, se antepone a las ráfagas en sentido ascendente (*upstream*) un *overhead* de capa física apropiada, para acomodar varios procesos físicos en la GPON. En la tabla 2.2 se muestra la longitud del *overhead* de la capa física para todas las velocidades binarias en sentido ascendente que se especifican.

Velocidad binaria en sentido ascendente	Bytes de <i>overhead</i>
155,52 Mbps	4
622,08 Mbps	8
1244,16 Mbps	12
2488,32 Mbps	24

Tabla 2.2 *Overhead* de la capa física en sentido ascendente en la GPON

2.2.3 ESPECIFICACIÓN DE LA CAPA DE CONVERGENCIA DE TRANSMISIÓN TC

Se describe la capa de convergencia de transmisión de las redes ópticas pasivas con capacidad de *gigabits* (red de acceso flexible, capaz de proporcionar una gama de servicios de banda ancha y de banda estrecha). Incluye las especificaciones de trama, mensajes, determinación de distancia, funcionalidad OAM y seguridad de la convergencia de transmisión de las PON con capacidad de *gigabits* (GTC, *Gigabit Transmission Convergence*).

La serie de Recomendaciones UIT-T G.984 (GPON) difiere de la serie G.983 (BPON) principalmente en que se describen velocidades binarias de línea superiores. Como consecuencia, la serie G.984 abarca numerosos aspectos y

características técnicas de forma diferente a la serie G.983. Ambos sistemas no son interoperables.¹

2.2.3.1 Relación entre el método de entramado del servicio de datos y GEM

Una de las principales características de GPON es su método de encapsulado de GEM² (*G-PON Encapsulation Method*), similar a otros métodos de entramado de servicios de datos desde el punto de vista de la estructura de trama. Sin embargo, GEM está integrado en la sección de la PON, y es independiente de los tipos de interfaces de nodo de servicio (SNI) que existan en la OLT, o de los tipos de UNI en la ONU, tal como se muestra en la figura 2.9.

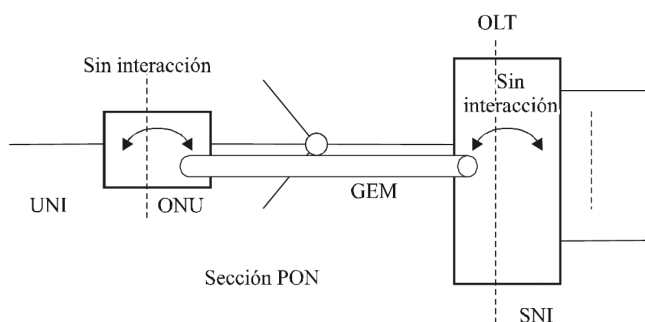


Figura 2.9 GEM integrada ^[9]

2.2.3.2 Arquitectura de multiplexación

Para esta capa se presentan dos mecanismos de multiplexación: el uno basado en ATM y el otro basado en GEM. Ambos conceptos se representan en las figuras 2.10 y 2.11 respectivamente.

¹ NOTA: Hay que tener en cuenta que desde el punto de vista de la funcionalidad de la capa TC de la GPON, la ONT y la ONU son idénticas. Por lo que la palabra "ONU" hace referencia a ambas, excepto en los casos en que se hacen indicaciones específicas.

² El método de encapsulación GEM permite soportar cualquier tipo de servicio (*Ethernet*, TDM, etc.) en un protocolo de transporte síncrono basado en tramas periódicas de 125µs. GEM se basa en el estándar GFP (*Generic Framing Procedure*) del UIT-T G.7041, con modificaciones menores para optimizarla para las tecnologías PON.

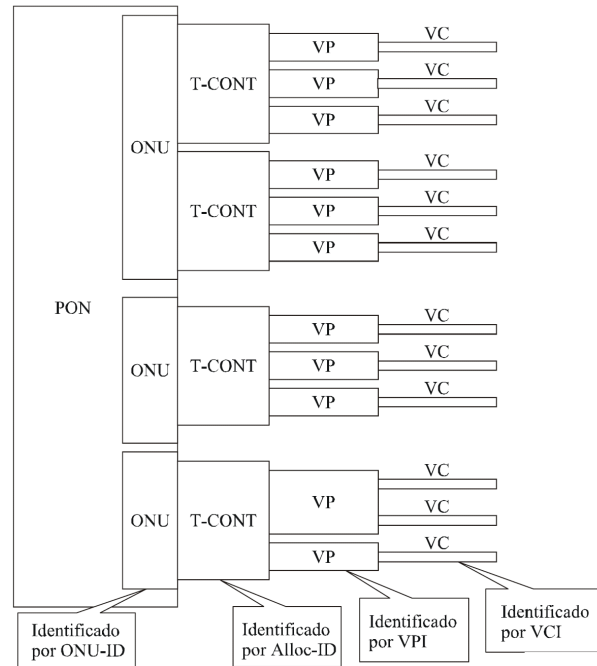


Figura 2.10 Multiplexación en el servicio ATM ^[10]

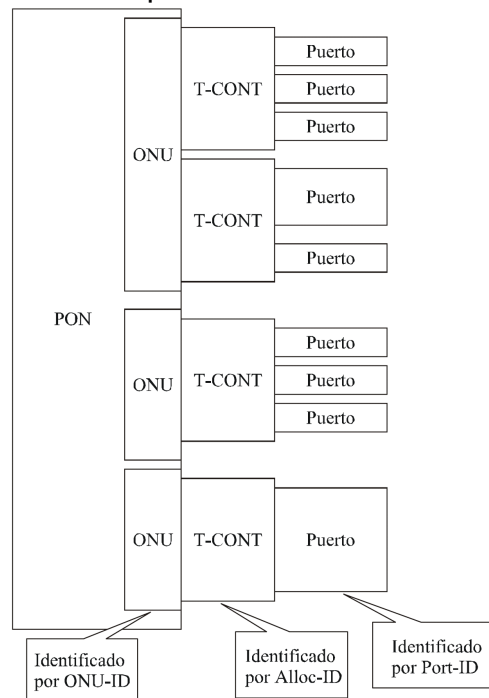


Figura 2.11 Multiplexación en el servicio GEM ^[11]

En la capa TC de la G-PON, la unidad de control básica es un T-CONT identificado mediante Alloc-ID. El concepto de puerto, identificado mediante Port-ID, se utiliza para la multiplexación de flujos de tráfico sobre un T-CONT en el servicio GEM. Los conceptos de trayectos virtuales/circuitos virtuales,

identificados mediante los VPI/VCI, se utilizan para la multiplexación de flujos de tráfico en ATM.

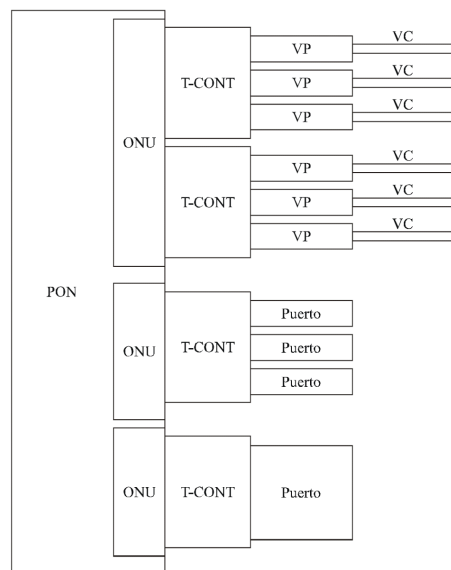


Figura 2.12 Multiplexación combinada en una PON ^[12]

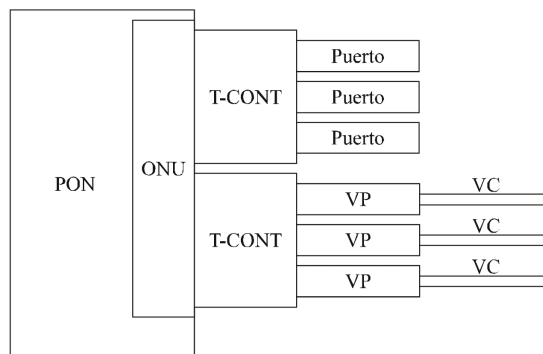


Figura 2.13 Multiplexación combinada en una ONU ^[13]

Además, tal como se muestra en las figuras 2.12 y 2.13 es posible utilizar configuraciones que son una combinación de ambos modos.

2.2.3.3 Recursos de control de tráfico en la unidad de red óptica (ONU) en sentido ascendente

Como se muestra en la figura 2.14, los flujos de tráfico en un puerto pueden controlarse mediante los recursos disponibles en la unidad de red óptica (ONU, *Optical Network Unit*). Facultativamente, los flujos de tráfico pueden conformarse a través de descriptores de tráfico para cada puerto.

Posteriormente, los flujos conformados pueden hacerse corresponder con un T-CONT¹ (*Transmission Containers*) y transferirse a la OLT sometidos al control de atribución.

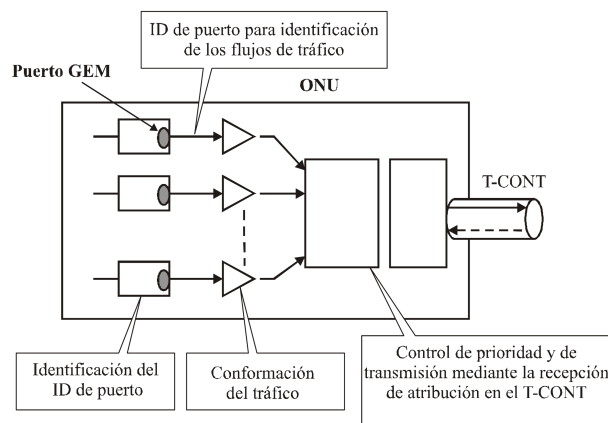


Figura 2.14 Recursos de control de tráfico en la ONU [14]

Para el tráfico GEM, el flujo de tráfico en cada puerto en sentido ascendente puede controlarse con arreglo a PIR², o PIR y SIR³. PIR debería ser igual o mayor que SIR. Para el tráfico ATM, el flujo de tráfico en cada conexión en sentido ascendente puede controlarse con arreglo a PCR⁴, o PCR y SCR⁵.

Estos parámetros están proporcionados a través de la interfaz OMCI (*ONU Management and Control Interface*).

2.2.3.4 Arquitectura del sistema G-PON

2.2.3.4.1 Configuración de referencia

Se definen las mismas velocidades de transmisión asimétricas mencionadas en la tabla 2.1. Sin embargo, este sistema no permite la interconexión con 0,15552

¹ Los T-CONT se utilizan para la gestión de la atribución del ancho de banda ascendente en la sección PON de la capa de convergencia de transmisión (TC). Los T-CONT se utilizan principalmente para mejorar el ancho de banda ascendente utilizada en la PON.

² Velocidad de información de cresta (PIR, *Peak Information Rate*): Se trata de la velocidad máxima de transmisión de los bytes de los paquetes GEM. La unidad que se emplea es "bytes/s". Este parámetro es análogo al de velocidad de células de cresta que se aplica en ATM.

³ Velocidad de información sostenible (SIR, *Sustained Information Rate*): Se trata de la velocidad comprometida de transmisión de los bytes de los paquetes GEM a largo plazo. La unidad que se emplea es "bytes/s". Este parámetro es análogo al de velocidad de células sostenible que se utiliza en ATM.

⁴ Velocidad de celda de cresta (PCR, *Peak Cell Rate*): Es el máximo número de celdas/seg que el usuario puede transmitir.

⁵ Velocidad de celda sostenible (SCR, *Sustained Cell Rate*): Es el número de celdas/seg promedio, o medida durante un intervalo largo de tiempo, en relación al tiempo de vida de la conexión.

Gbit/s y 0,62208 Gbit/s para el flujo ascendente y/o descendente, y con 1,24416 Gbit/s para el sentido descendente incluido en las especificaciones de B-PON. La figura 2.15 muestra la configuración del sistema G-PON, que consta de una OLT, varias ONUs, un divisor óptico y fibras. La fibra óptica conectada a la OLT se ramifica en el divisor óptico en hasta 64 fibras, conectándose dichas fibras a las ONUs. En la capa TC de la G-PON, se define que el máximo alcance lógico es de 60 km, mientras que la máxima diferencia de distancia de fibra entre la ONU más lejana y la más cercana debe ser 20 km.

Esta diferencia está limitada para que el tamaño de la ventana de determinación de distancia no sea superior a lo permitido por la calidad de servicio. En lo que se refiere al grado de división posible, la capa TC permite 128 divisiones, anticipando la evolución futura de los módulos ópticos.

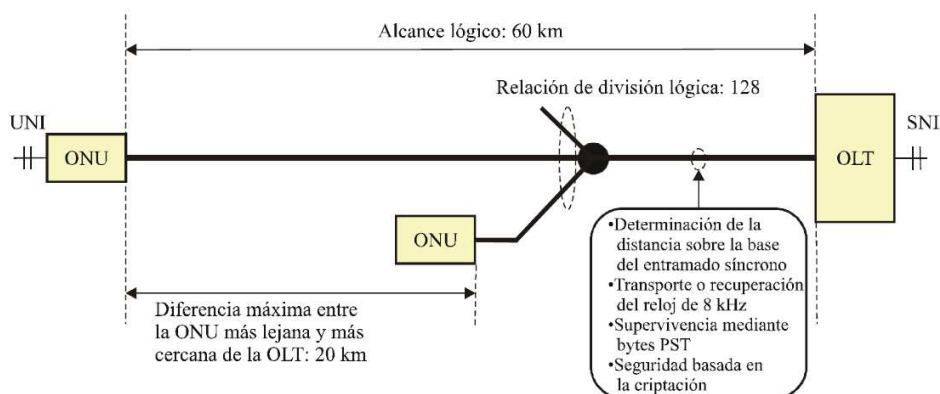


Figura 2.15 Configuración del sistema G-PON ^[15]

Debido a la naturaleza multidifusión de la PON, las tramas descendentes precisan algún mecanismo de seguridad en la capa de TC.

2.2.3.4.2 Tipos conectables de OLT y ONU

Las OLT y las ONU se clasifican en varios tipos, tales como ATM, GEM y de modo Dual. Este estándar permite todos los tipos de equipos, aunque deben tenerse en cuenta las posibilidades de interfuncionamiento entre los mismos. En la tabla 2.3 se muestran las posibles combinaciones, indicando mediante una "X" las combinaciones que interfuncionan. No existen nodos OLT y ONU obligatorios, sino que el interfuncionamiento depende de la propia implementación.

		OLT		
		GEM	Dual	ATM
ONU	GEM	X	X	N/A
	Dual	X	X	X
	ATM	N/A	X	X

Tabla 2.3 Tipo de nodos soportados en las OLT y ONU

2.2.3.5 Bloques funcionales

El sistema G-PON consta de tres componentes: OLT, ONU y ODN. Se proporcionan directrices típicas para la configuración de cada componente.

2.2.3.5.1 Terminación de línea óptica (OLT)

La OLT se conecta a la red conmutada mediante interfaces normalizados. En el lado de la distribución, presenta interfaces de acceso ópticos de conformidad con ésta y otras normas G-PON, en términos de velocidad binaria, balance de potencia, fluctuación de fase, etc.

La OLT consta de tres partes principales:

- Función de interfaz de puerto de servicio.
- Función de conexión cruzada.
- Interfaz de red de distribución óptica (ODN, *Optical Distribution Network*).

En la siguiente figura se muestra un diagrama de bloques funcional típico de una OLT.

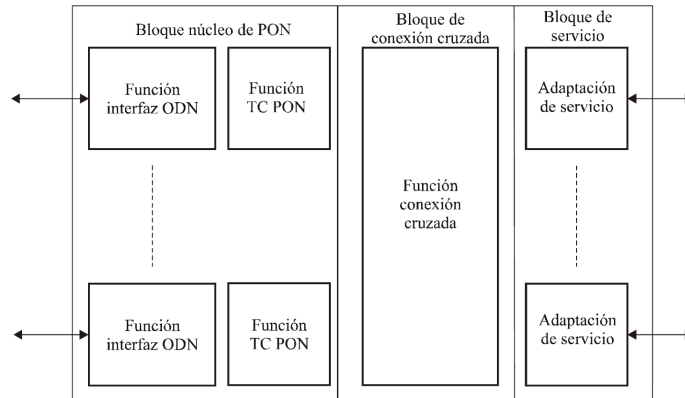


Figura 2.16 Diagrama de bloques funcionales de la OLT [16]

Bloque núcleo de PON: Este bloque consta de dos partes, la función de interfaz ODN, y la función de TC PON. La función de TC PON incluye el entramado, el control de acceso al medio, operación administración y mantenimiento (OAM, *Operation, Administration and Maintenance*), asignación de ancho de banda dinámica (DBA, *Dynamic Bandwidth Assignment*), la alineación de las unidades de datos de protocolo (PDU, *Protocol Data Unit*) para la función de conexión cruzada, y la gestión de la ONU. Cada TC PON selecciona un modo de entre ATM, GEM y Dual.

Bloque de conexión cruzada: El bloque de conexión cruzada proporciona un trayecto de comunicación entre el bloque núcleo de PON y el bloque de servicio. Las tecnologías para la conexión de este trayecto son función de los servicios, la arquitectura interna de la OLT y de otros factores. La OLT proporciona la funcionalidad de conexión cruzada de conformidad con el modo seleccionado, ya sean GEM, ATM o Dual.

Bloque de servicio: Este bloque proporciona la traducción entre las interfaces de servicio y el interfaz de trama TC de la sección PON.

2.2.3.5.2 Red de distribución óptica (ODN)

Este componente conecta una OLT y una o más ONUs mediante un dispositivo óptico pasivo.

2.2.3.5.3 Unidad de red óptica (ONU)

Los bloques constitutivos funcionales de la ONU G-PON son en lo esencial similares a los bloques constitutivos funcionales de la OLT. Puesto que la ONU funciona con una única interfaz PON (o un máximo de dos interfaces con fines de protección), puede omitirse la función de conexión cruzada.

Sin embargo, para el manejo del tráfico, en lugar de esta función, se especifica la función MUX y DMUX de servicio. En la figura 2.17 se describe la configuración típica de una ONU. Cada TC PON selecciona un modo de entre ATM, GEM y Dual.

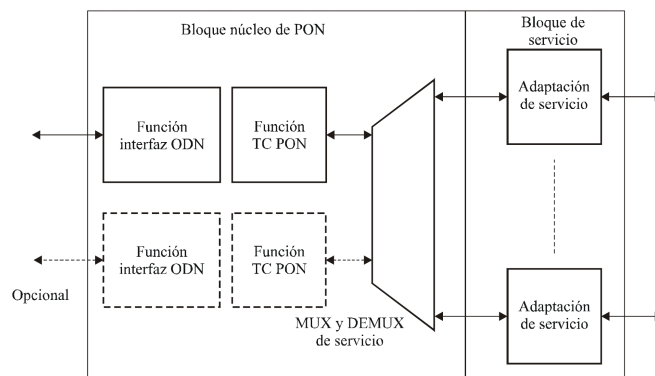


Figura 2.17 Diagrama de bloques funcionales de la ONU ^[17]

2.2.3.6 Interoperabilidad entre G-PON y B-PON

El sistema G-PON especificado en la recomendación G.984, no proporciona interoperabilidad con un sistema B-PON, ni con otros, aunque se utilice el modo ATM con los valores de velocidad binaria incluidos en las especificaciones de B-PON.

2.2.3.7 Visión general de la convergencia de transmisión (TC) de la GTC

2.2.3.7.1 General

Se describe la arquitectura de la capa TC de un sistema G-PON. La figura 2.18 muestra la pila genérica de protocolos del sistema de la capa TC de la G-PON (GTC, G-PON *Transmission Convergence*). La capa GTC se compone de dos subcapas:

- La subcapa de entramado GTC.
- La subcapa de adaptación TC.

Desde otro punto de vista, la GTC consta de dos planos:

- Un plano C/M (*Control/Management*), que gestiona flujos de tráfico de usuario, la seguridad y funcionalidades de OAM.
- Un plano U¹ (*User*) que transporta el tráfico de usuario.

Tal como se muestra en la figura 2.18, en la subcapa de entramado GTC, la partición ATM, la partición GEM, la partición de OAM integrada y de PLOAM (*Physical Layer OAM*) se reconocen según su ubicación en la trama GTC.

Solamente la OAM integrada se termina en esta capa para el control de la subcapa, debido a que la información de la OAM integrada está incluida directamente en el encabezamiento de la trama GTC. La información PLOAM se procesa en el bloque PLOAM, que se sitúa como cliente de esta subcapa. La unidad de datos de servicio (SDU, *Service Data Unit*) de las particiones ATM y GEM se convierten en unidades de datos de protocolo (PDU, *Protocol Data Unit*) convencionales ATM y GEM en cada subcapa de adaptación, respectivamente. Además, estas PDUs incluyen datos del canal OMCI². Estos datos también se reconocen en esta subcapa y se intercambian desde/hacia entidades OMCI. La OAM integrada, PLOAM y OMCI se clasifican en planos C/M. Las SDUs, excepto para OMCI en particiones ATM y GEM, se consideran del plano U.

¹ El plano-U proporciona la comunicación entre clientes ATM o clientes GEM

² OMCI (*ONU Management and Control Interface*), es la interfaz de control y gestión de las ONU, es un servicio de OAM que proporciona una forma normalizada para detectar las capacidades de la ONU, gestionarlas y controlarlas.

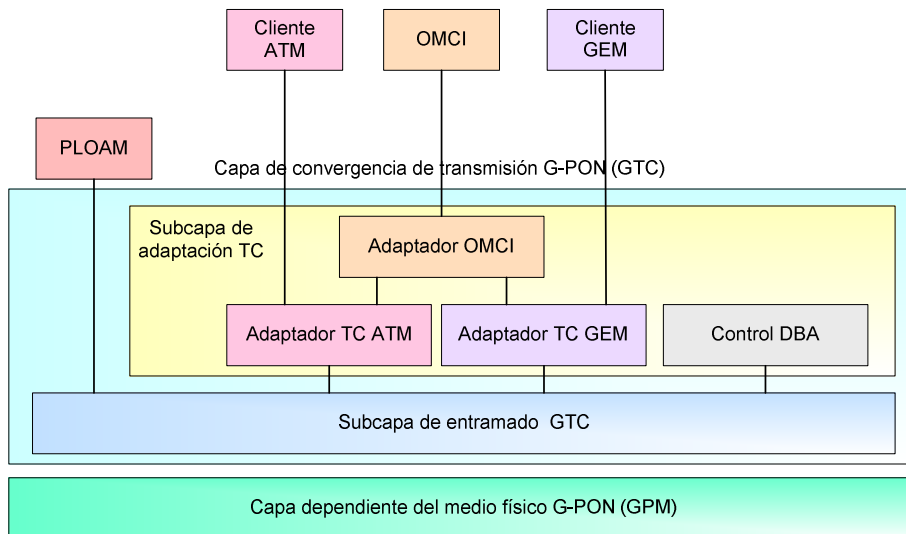


Figura 2.18 Pila de protocolos del sistema GTC ^[18]

La capa de entramado GTC tiene visibilidad global de todos los datos transmitidos, y la capa de entramado GTC de la OLT tiene una relación directa del mismo nivel con todas las capas de entramado GTC de las ONU. Además, el bloque de control DBA se especifica como bloque funcional común.

2.2.3.7.2 Pila de protocolos en los planos C/M

Los planos de control y de gestión del sistema GTC constan de tres partes: OAM integrada, PLOAM y OMCI. Los canales de OAM integrada y de PLOAM gestionan las funciones de las capas dependiente del medio (PMD) y GTC. La OMCI proporciona un sistema uniforme de gestión de capas superiores (que definen los servicios).

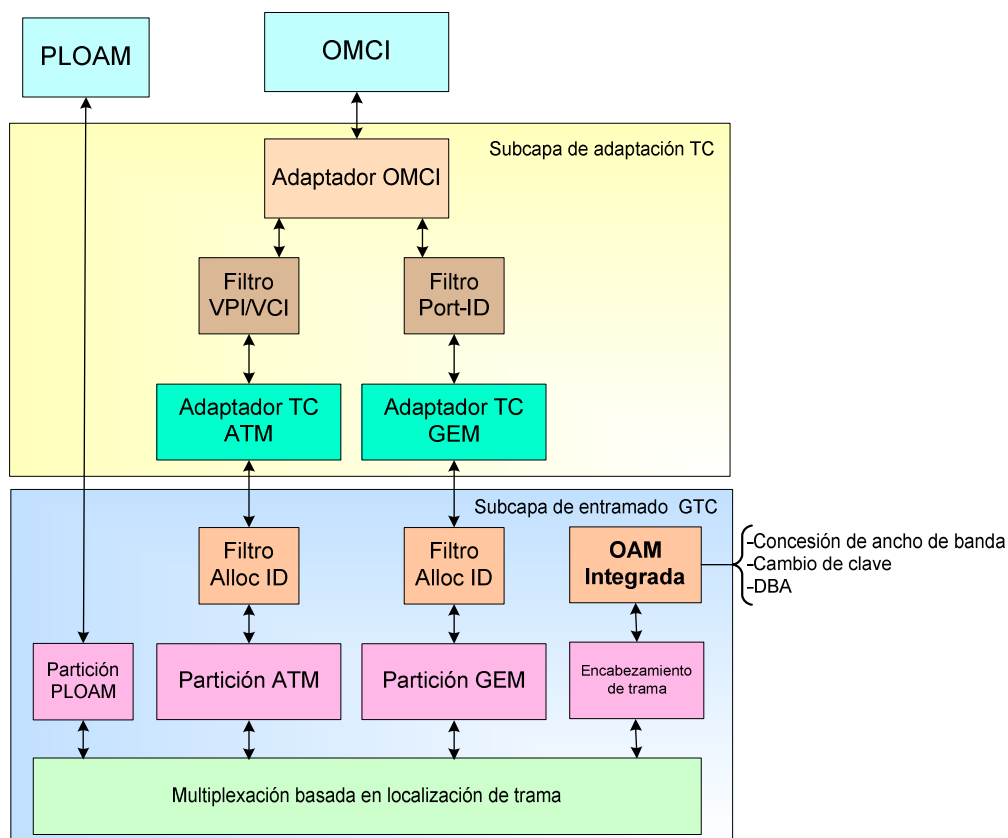


Figura 2.19 Bloques funcionales de los planos C/M ^[19]

El canal de OAM integrado se constituye mediante información de campos formateados en el encabezamiento de la trama GTC. Este canal proporciona un trayecto de baja latencia para información urgente de control, ya que cada información se hace corresponder con un campo específico de la cabecera de la trama GTC. Las funciones que utiliza este canal son, entre otras, las siguientes: concesión de ancho de banda, cambio de clave y señalización de asignación dinámica de ancho de banda.

El canal PLOAM es un sistema basado en mensajes formateados transportados en un espacio dedicado para ello en la trama GTC. Este canal se utiliza para toda la información de gestión PMD y GTC no enviada a través del canal OAM integrado.

El canal OMCI se utiliza para gestionar las capas que definen el servicio por encima de la GTC. Sin embargo, la GTC debe proporcionar una interfaz de transporte para este tráfico, existiendo dos alternativas para el mismo, a saber,

ATM o GEM. La función GTC proporciona los medios necesarios para configurar estos canales opcionales a fin de que se adapten a las capacidades del equipo, incluida la especificación de los identificadores de flujos del protocolo de transporte (VPI/VCI o Port-ID).

2.2.3.7.3 Pila de protocolos en el plano-U

Los flujos de tráfico en el plano-U se identifican por el tipo de tráfico que transportan ya sean éstos los modos ATM o GEM y por su Port-ID o VPI. En la figura 2.20 se indica cómo se realiza la identificación por tipo de tráfico y Port-ID/VPI. El tipo de tráfico viene implícitamente indicado por la partición descendente o por el ID de atribución (Alloc-ID) ascendente que transporta los datos. El Port-ID de 12 bits se utiliza para identificar los flujos en caso de tráfico GEM. El VPI se utiliza para identificar los flujos en caso de tráfico ATM. Además, se utiliza el concepto de T-CONT. El T-CONT se identifica mediante el Alloc-ID y constituye una unidad de agrupación para flujos de tráfico. La asignación de ancho de banda y el control de la calidad de servicio (QoS) se realizan en cada T-CONT mediante la atribución de ancho de banda con un control basado en un número variable de intervalos de tiempo. Hay que tener en cuenta que los tráficos encapsulados en modo ATM y GEM no pueden corresponderse en un único T-CONT y no pueden tener el mismo Alloc-ID.

A continuación se resumen las operaciones para cada tipo de tráfico:

1) ATM en GTC: En sentido descendente, las células¹ se transportan en la partición ATM, y llegan a todas las ONUs. La subcapa de entramado de la ONU extrae las células, y el adaptador de TC ATM filtra las células en función de su VPI. Solamente pasan a la función cliente ATM las células que tienen los VPI adecuados. En sentido ascendente, el tráfico ATM se transporta en uno o más T-CONT. Cada T-CONT se asocia con tráfico ATM o GEM, por lo que no existe ambigüedad en la multiplexación.

¹ El modo de transferencia asíncrono (ATM) hace uso de celdas de tamaño fijo, las cuales constan de 5 bytes de cabecera y de un campo de información de 48 bytes.

La OLT recibe la transmisión asociada con el T-CONT identificado por el Alloc-ID, enviándose las células al adaptador de TC ATM y, a continuación, al cliente ATM.

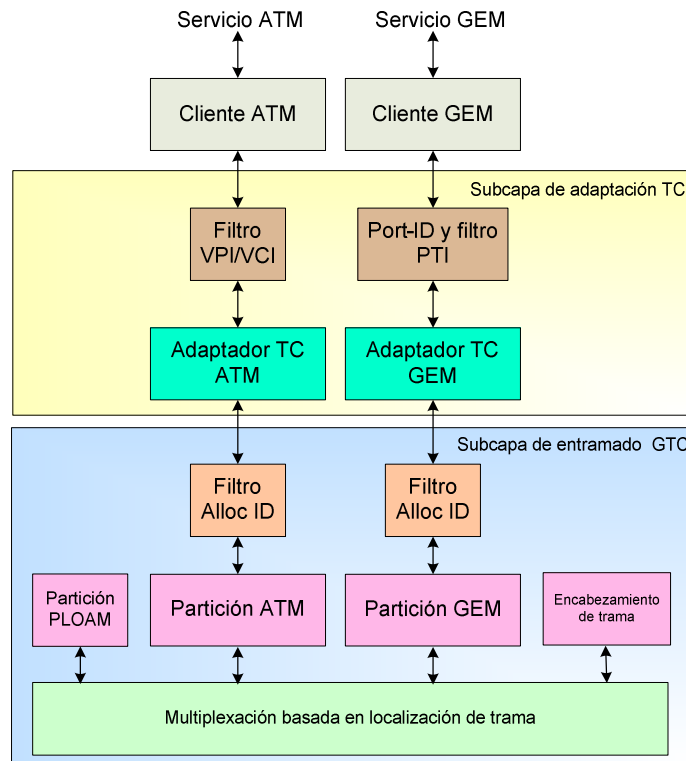


Figura 2.20 Pila de protocolos del plano-U e identificación mediante partición y Port-ID o VPI [20]

2) GEM en GTC: En sentido descendente, las tramas GEM se transportan en la partición GEM, y llegan a todas las ONUs. La subcapa de entramado de la ONU extrae las tramas, y el adaptador de TC GEM filtra las células en base a su Port-ID de 12 bits. Solamente pasan a la función cliente GEM las tramas que tienen los Port-ID adecuados. En el sentido ascendente, el tráfico GEM se transporta en uno o más T-CONT. Cada T-CONT se asocia con tráfico ATM o GEM, por lo que no existe ambigüedad en la multiplexación. La OLT recibe la transmisión asociada con el T-CONT identificado, enviándose las tramas al adaptador de TC GEM y, a continuación, al cliente GEM.

2.2.3.7.4 Funciones clave de la convergencia de transmisión de G-PON (GTC)

Se resumen dos funciones importantes del sistema GTC.

1) Flujo de control del acceso al medio

El sistema GTC proporciona el control de acceso al medio para tráfico ascendente. En su concepción básica, “las tramas descendentes indican cuáles son las posiciones permitidas para tráfico ascendente en las tramas ascendentes sincronizadas con tramas descendentes”.

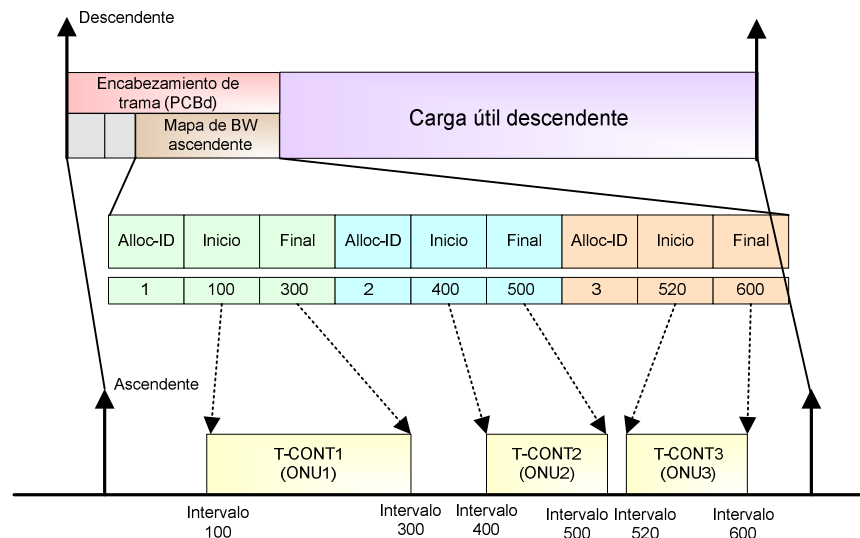


Figura 2.21 Concepto de control de acceso al medio TC GTC (caso de un T-CONT por ONU) ^[21]

El concepto de control de acceso al medio de este sistema se ilustra en la figura 2.21. La OLT envía punteros en el bloque de control físico descendente (PCBd, *Physical Control Block Downstream*), los cuales indican el instante en el que cada ONU puede comenzar y terminar su transmisión ascendente. De esta forma, en un momento dado, sólo una ONU puede acceder al medio, no existiendo contención en el funcionamiento normal. Los punteros se expresan en unidades de bytes, permitiendo a la OLT controlar el medio con una granularidad de ancho de banda estática efectiva de 64 Kbps. No obstante, los implementadores de OLT pueden optar por fijar los valores de los punteros con una granularidad mayor, y conseguir un control fino de ancho de banda mediante programación dinámica.

Este control de acceso al medio se realiza en cada T-CONT, aunque para clarificar este concepto en la figura 2.21 sólo se muestra el funcionamiento

cuando cada ONU sólo tiene un T-CONT. Más adelante se describen las operaciones que se llevan a cabo.

2) Registro de la ONU

El registro de la ONU se realiza mediante el procedimiento de autodetección. Existen dos métodos para el registro de la ONU:

- "Configuración-S/N", el número de serie de la ONU se registra en la OLT mediante el sistema de gestión (por ejemplo, el sistema de gestión de red (NMS, *Network Management System*) y/o el sistema de gestión de elemento (EMS, *Element Management System*¹)).
- "Descubrimiento-S/N", el sistema de gestión no registra en la OLT el número de serie de la ONU.

2.2.3.7.5 Funciones de las subcapas en GTC

Visión general de la subcapa de entramado GTC

La subcapa de entramado GTC tiene las tres funcionalidades siguientes:

1) Multiplexación y demultiplexación

Las porciones PLOAM, ATM y GEM se multiplexan en una trama TC descendente de conformidad con la información de límites incluida en el encabezamiento de trama. Cada porción se extrae del flujo ascendente de acuerdo con el indicador del encabezamiento.

2) Creación y decodificación del encabezamiento

El encabezamiento de la trama TC se crea y se configura en una trama descendente. Se decodifica el encabezamiento de la trama ascendente. Además, se lleva a cabo OAM integrada.

3) Función de encaminamiento interno en función del Alloc-ID

¹ Se puede profundizar en: Anexo C Recomendaciones UIT-T Conmutación y señalización.

El encaminamiento basado en el *Alloc-ID* se realiza para los datos hacia/desde los adaptadores de TC de ATM y de GEM.

Visión general de la subcapa de adaptación GTC y de la interfaz para entidades superiores

La subcapa de adaptación proporciona tres adaptadores de TC, a saber: el adaptador de TC ATM, el adaptador de TC GEM y el adaptador OMCI. Los adaptadores de TC ATM y GEM delimitan las PDU ATM y GEM a partir de cada partición en la subcapa de entramado GTC, haciendo corresponder dichas PDUs con cada una de las particiones.

Estos adaptadores proporcionan las interfaces siguientes con las entidades de capa superior.

1) *Interfaz ATM*: La subcapa de entramado GTC y el adaptador de TC ATM asociado proporciona una interfaz ATM normalizada para servicios ATM. En general, las entidades de capa ATM ordinarias pueden utilizarse como cliente ATM.

2) *Interfaces GEM*: El adaptador de TC GEM puede configurarse para adaptar estas tramas a diversas interfaces de transporte de trama. Además, estos adaptadores reconocen el canal OMCI de conformidad con un VPI/VCI específico en el caso ATM y con un Port-ID específico en el caso GEM. El adaptador OMCI puede intercambiar datos del canal OMCI para los adaptadores de TC ATM y GEM. El adaptador OMCI acepta datos de dichos adaptadores de TC y los transfiere a la entidad OMCI. Por otro lado, transfiere datos desde la entidad OMCI a dichos adaptadores de TC.

Visión general de PLOAM

La subcapa de entramado GTC proporciona una interfaz para el intercambio de mensajes PLOAM.¹ En los siguientes enunciados se puede apreciar la estructura de la trama PLOAM.

2.2.3.7.6 Flujos de tráfico y calidad de servicio (QoS)

¹ Se puede profundizar los mensajes PLOAM: Anexo C Recomendación de la UIT-T G.984.3 cláusula 9.

A continuación se indican las relaciones entre la GTC y los flujos de tráfico de usuario, así como las características de QoS en una PON controlada mediante la GTC.

Relaciones entre la GTC y los datos de usuario controlados

1) *Servicio ATM*: En general, el sistema GTC tiene en cuenta la gestión del tráfico de los T-CONT, identificándose cada T-CONT mediante un Alloc-ID. Cada T-CONT puede incluir uno o más trayectos virtuales, y cada VP (*Virtual Path*) puede incluir uno o más VC (*Virtual Channel*). La OLT supervisa la carga (*payload*) de tráfico en cada T-CONT, y realiza los ajustes necesarios de las atribuciones de ancho de banda para distribuir adecuadamente los recursos de la PON. El sistema GTC no observa ni mantiene las relaciones de QoS de los respectivos VP o VC, ya que son los clientes ATM situados a ambos lados de la PON los que deben hacerlo.

2) *Servicio GEM*: En general, el sistema GTC tiene en cuenta la gestión del tráfico de los T-CONT, identificándose cada T-CONT mediante un Alloc-ID. Cada T-CONT puede incluir uno o más Port-ID de GEM. La OLT supervisa la carga de tráfico en cada T-CONT, y realiza los ajustes necesarios de las atribuciones de ancho de banda para distribuir adecuadamente los recursos de la PON. El sistema GTC no observa ni mantiene las relaciones de QoS de los respectivos Port-ID, ya que son los clientes GEM situados a ambos lados de la PON los que deben hacerlo.

Conceptos para la atribución de recursos

Los recursos se asignan a cada enlace lógico de forma dinámica o estática. En el caso de atribución dinámica de recursos, la OLT investiga el estado de congestión examinando los informes de DBA (*Dynamic Bandwidth Assignment*) de la ONU y/o supervisando el tráfico entrante, pudiendo entonces atribuir de forma adecuada los recursos, tal como se muestra en el siguiente cuadro.

En caso de atribución estática, la OLT asigna ancho de banda de conformidad con los recursos provisionados.

G-PON DBA	
Unidad de control	T-CONT
Identificación de T-CONT	<i>Alloc-ID</i>
Unidad de información	Célula ATM para ATM Bloque de longitud fija (48 bytes por defecto) para GEM
Mecanismo de información	Los métodos por defecto son el del campo OAM integrado (el DBRu ¹) en modo 0 y los informes de estado tipo de T-CONT. Los informes de DBRu en los modos 1 y 2, y el informe de DBA de la ONU completo son métodos opcionales
Procedimiento de negociación	G-PON OMCI

Tabla 2.4 Funcionalidades de la DBA G-PON²

Garantía de QoS

Las funcionalidades DBA proporcionan varios tipos de calidad de servicio (QoS). La capa TC de G-PON especifica cinco tipos de T-CONT (tipos 1, 2, 3, 4 y 5)³, ver en la tabla 2.5.

En caso de ATM, de acuerdo con los requisitos de QoS, cada tipo de T-CONT puede transportar VCC (Virtual Channel Connection) o VPC (Virtual Path Connection) conformados por diversos descriptores de tráfico. Los operadores gestionan este esquema de correspondencia.

En caso de GEM, "Célula ATM" se sustituye por "Bloque de longitud fija", tal como se define en el siguiente literal las conexiones GEM identificadas por el puerto pueden ser conformadas mediante determinados descriptores de tráfico que están en estudio, y pueden también ser transportadas en un tipo de T-CONT.

T-CONT	Definición	Aplicaciones	Descriptor de tráfico
--------	------------	--------------	-----------------------

¹ Informe de ancho de banda dinámico ascendente (DBRu, *Dynamic Bandwidth Report Upstream*), es un informe de DBA que consta de un mensaje de 1, 2 ó 4 bytes, que especifica el volumen de datos en espera en la memoria intermedia del T-CONT correspondiente al Alloc-ID que ha generado la transmisión del DBRu. Se puede profundizar en la Recomendación UIT-T G.984.3 Enmienda 1 (Ver Anexo C).

² Fuente: Recomendación UIT-T G.984.3 (Ver Anexo C).

³ Los tipos de T-CONT 1, 2, 3, 4 y 5 se especifican con mayor detalle en la Recomendación de la UIT-T para redes ópticas pasivas de banda ancha (BPON) G.983.4 mas no en el estándar G.984.

(Ancho de banda)			
Tipo 1	Utiliza únicamente ancho de banda fijo	Acepta cualquier QoS de ATC (ATM, <i>Transfer Capability</i>)	Fijo: Suministrado
Tipo 2	Utiliza únicamente ancho de banda asegurado (ancho de banda promedio fijo en cierto intervalo de tiempo especificado)	Acepta todas las clases de QoS de la ATC con la excepción de la clase 1, que corresponde a los servicios que no se efectúan en tiempo real	Asegurado: Suministrado
Tipo 3	Tiene ancho de banda asegurado y ancho de banda no asegurado	Acepta la transmisión a velocidad binaria variable con clases de QoS con la excepción de la clase 1	Asegurado: Suministrado No asegurado: Dinámico Máximo: Suministrado
Tipo 4	Tiene únicamente ancho de banda residual y no tiene ancho de banda garantizado	Acepta clases no específicas	Residual: Asignación dinámica Máximo: Suministrado
Tipo 5	Es el super conjunto de todos los tipos de T-CONT	Acepta cualquier aplicación incluidas las aplicaciones en tiempo real o de recurso garantizado	Fijo: Suministrado Asegurado: Suministrado No asegurado: Dinámico Residual: Asignación dinámica Máximo: Suministrado

Tabla 2.5 Características generales de los tipos de T-CONT

2.2.3.7.7 Especificaciones de la asignación dinámica de ancho de banda (DBA)

Requisitos para la DBA

Las funcionalidades de DBA se realizan en cada T-CONT. Las funcionalidades de la DBA se clasifican de la siguiente manera:

- 1) Detección del estado de congestión por la OLT y/o la ONU.
- 2) Informe del estado de congestión a la OLT.
- 3) Actualización del ancho de banda asignado por la OLT de conformidad con los parámetros provisionados.
- 4) La OLT genera concesiones de conformidad con el ancho de banda actualizado y los tipos de T-CONT.
- 5) Aspectos relativos a la gestión para las operaciones de DBA.

Parámetros operacionales

La unidad de los parámetros operacionales se especifica de la siguiente manera:

- ATM: el número de células.
- GEM: el número de bloques de longitud fija¹.

Visión general de las operaciones de asignación dinámica de ancho de banda (DBA)

Existen dos modos de funcionamiento de la DBA. DBA con información de estado (SR-DBA), y DBA sin información de estado (NSR-DBA) en cada T-CONT. Dado que la función de información de DBA es opcional para la ONU, pueden considerarse todas las combinaciones de equipos. Todas las OLTs deben soportar sistemas con información de estado y sin información de estado, de forma que todas las ONU dispongan de algún nivel de funcionalidad DBA. Estos modos se especifican por las prestaciones de la ONU, tal como se muestra en la tabla 2.6, y por la situación del servicio.

	SR ONU	NSR ONU
DBA OLT	SR-DBA y/o NSR-DBA	NSR-DBA

Tabla 2.6 Modos de funcionamiento de la DBA²

El funcionamiento de cada modo se resume a continuación:

1) DBA con informe de estado (SR-DBA): Para informar del estado de congestión del T-CONT, cuando un T-CONT transmite datos en sentido ascendente desde la ONU a la OLT, se utiliza el campo DBA de Informe de ancho de banda dinámico ascendente (DBRu, *Dynamic Bandwidth Report Upstream*), u otro método, a fin de establecer el número de células o de bloques de la memoria intermedia del T-CONT. Si la OLT no permite la transmisión de datos en sentido ascendente a un T-CONT, la OLT sólo puede asignar tiempo para DBRu o utilizar otro método. No obstante, incluso si la OLT recibe el informe, no siempre lo aplica para actualizar el ancho de banda. Por otro lado, si por cualquier motivo un T-CONT no puede informar del número de células o bloques almacenados en su

¹ En GEM, la longitud del bloque es negociada por la OMCI de G-PON, siendo el valor por defecto 48 bytes.

² Fuente: Recomendación UIT-T G.984.3 (Ver Anexo C).

memoria intermedia, responde a la OLT con un código no válido en el campo DBA. En la figura 2.22 se resumen dichas operaciones.

En este modo, la transmisión del campo DBA es obligatorio si la OLT lo requiere, ya que si el campo DBA no existe, no puede reconocerse el formato de los datos en sentido ascendente.

2) DBA sin informe de estado (NSR-DBA): La OLT reconoce el estado de congestión de cada T-CONT supervisando los flujos de tráfico entrantes. En este modo, nunca se envía el campo DBA en DBRu, ya que la OLT no debería solicitarlo. En el caso excepcional de que la OLT solicite la DBRu, la ONU debe enviarla, aunque la OLT ignore su contenido.

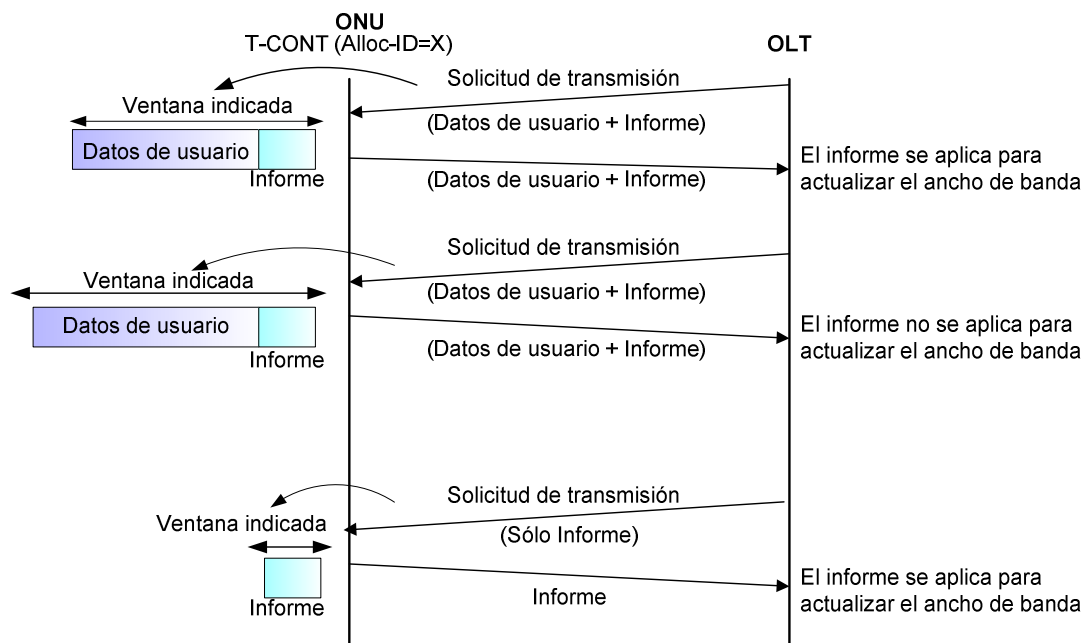


Figura 2.22 Resumen del funcionamiento de SR-DBA [22]

Aspectos de gestión

Para el funcionamiento de la DBA, las funcionalidades de gestión deben proveer o negociar determinados parámetros. Mediante dichos medios, la OLT y la ONU acuerdan el modo de funcionamiento DBA, y responden correctamente a las solicitudes que se realizan mutuamente.

La OMCI G-PON debe proveer o negociar todos los parámetros de la DBA.

2.2.3.8 Trama de Convergencia de Transmisión (TC) GTC

La figura 2.23 muestra la estructura de trama de TC GTC en los sentidos descendente y ascendente. La trama descendente consta de bloque de control físico descendente (PCBd, *Physical Control Block Downstream*), partición ATM y partición GEM. La trama ascendente consta de múltiples ráfagas de transmisión. Cada ráfaga ascendente contiene como mínimo el *overhead* de la capa física (PLOu, *Physical Layer Overhead Upstream*).

Además de la carga útil, también puede contener las secciones PLOAMu, PLSu, y DBRu¹. La trama descendente proporciona la referencia de tiempo común para la PON, y proporciona la señalización de control común para el sentido ascendente.

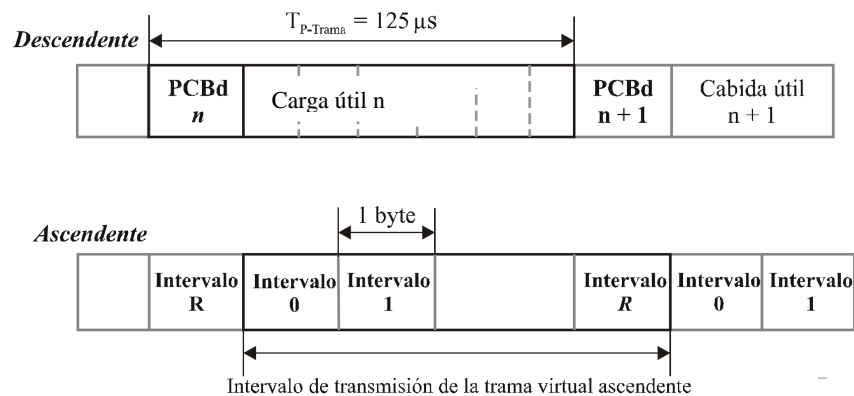


Figura 2.23 Estructura de la trama de convergencia de transmisión (TC) GTC [23]

Formato de trama Downstream

La longitud de la trama downstream se fija a $125 \mu s$. lo cual proporciona una base de sincronización de la señal para todo el sistema. La trama está compuesta de un Bloque de control físico descendente (*PCBd, Physical Control Block downstream*) y la carga útil (*Payload*) como se aprecia en la figura 2.23a. El PCBd contiene la información de control y la longitud de la trama, en tanto que su *payload* consiste de una partición ATM y una partición del método de encapsulación genérico GEM, por tanto, el sistema GPON es capaz de soportar dos tipos de tráfico simultáneamente en la misma trama.

¹ PLOAMu: PLOAM ascendente (*PLOAM upstream*).

PLSu: Secuencia de nivelación de potencia ascendente (*Power Levelling Sequence Upstream*).

DBRu: Informe de ancho de banda dinámico ascendente (*Dynamic Bandwidth Report Upstream*).

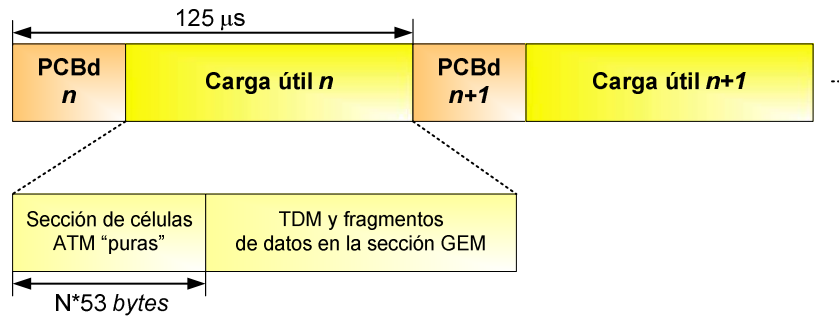


Figura 2.23a Trama descendente de TC GTC [24]

Sección de Células ATM:

La partición ATM contiene un número de células ATM de 53 *bytes*. La partición ATM contiene un número de células ATM de 53 *bytes* (ver figura 2.23b).

El flujo de células descendente se filtra en la ONU en función del VPI contenido en cada célula. Las ONTs se configuran para poder reconocer los VPI que les pertenecen y las células que pertenecen a la ONU se transfieren al proceso cliente ATM.

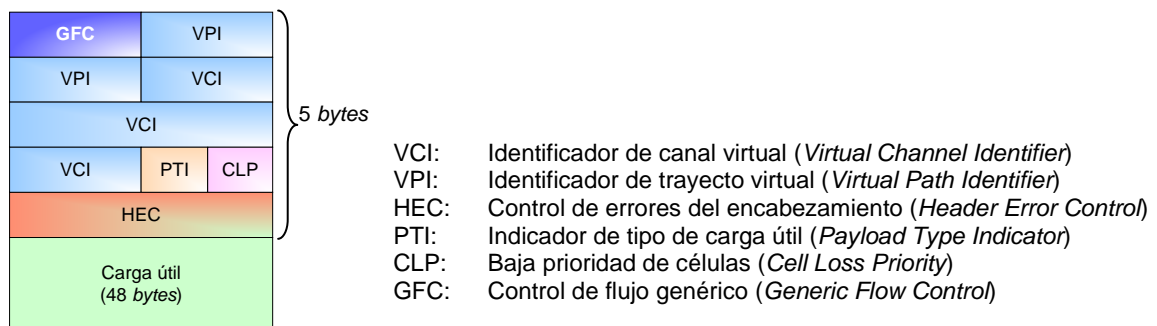


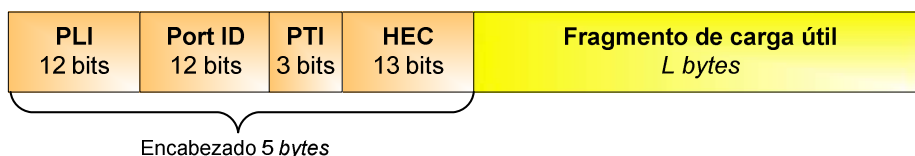
Figura 2.23b Formato de celda ATM (Interfaz usuario-red) [25]

Sección GEM:

La partición GEM contiene un número de paquetes GEM, usualmente para tramas *Ethernet*. La longitud de la partición GEM es lo que queda después de haber sustraído las particiones PCBd y ATM de la longitud de trama completa.

El flujo de tramas descendente se filtra en la ONU sobre la base del valor del campo Port-ID de 12 bits de cada fragmento de trama.

Hay que tomar en cuenta el término “tramas de datos de usuario”¹. Para ello se utiliza el encabezamiento GEM, tal como se muestra en la figura 2.23c. El encabezamiento GEM contiene:

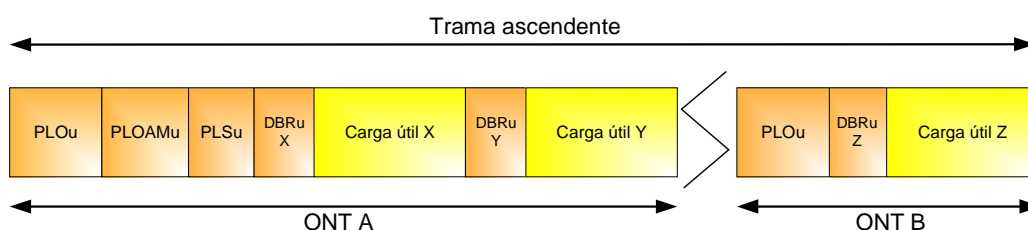


PLI: Indicador de longitud de carga útil (*Payload Length Indicator*), el número de bytes de la carga útil.
 Port ID: Identificador de puerto (*Port Identifier*), provee 4096 identificadores de tráfico único en la PON.
 PTI: Indicador de tipo de carga útil (*Payload Type Indicator*), indica el tipo de carga útil.
 HEC: Control de errores en el encabezamiento (*Header Error Control*).

Figura 2.23c Encabezado y estructura de trama GEM [26]

Formato de la trama ascendente

En la figura 2.23d se presenta un diagrama de la estructura de trama ascendente. La longitud de la trama es la misma bits que en sentido descendente para todas las velocidades binarias. Cada trama contiene un conjunto de transmisiones procedentes de una o varias ONUs. De acuerdo con el control ejercido por la OLT, durante cada período de atribución la ONU puede transmitir uno de los cuatro tipos de *overheads* de PON y datos de usuario. Los cuatro tipos de *overhead* son los siguientes:



- PLOu: *Overhead* de capa física ascendente (*Physical Layer Overhead*), Se transmite al inicio de cualquier transmisión de ráfaga de una ONU y sirve como delimitador de la trama.
- PLOAMu: Operaciones de gestión y administración de capa física ascendente (*Physical Layer Operations, Administration and Management upstream*), contiene el mensaje PLOAM.
- PLSu: Secuencia de nivelación de potencia ascendente (*Power Levelling Sequence Upstream*), Esta función sirve para ajustar los niveles de potencia de la ONU a fin de reducir el margen dinámico óptico recibido en la OLT.
- DBRu: Informe de ancho de banda dinámica ascendente (*Dynamic Bandwidth Report Upstream*), La estructura de DBRu contiene información vinculada con la entidad T-CONT, no con la ONU, la estructura DBRu consta de un campo DBA y un campo CRC.

Figura 2.23d Trama ascendente GTC [27]

¹ NOTA: “Tramas de datos de usuario”, denota tramas que se envían o se reciben de un usuario.

Después de la transmisión de dichas *overheads*, se transmiten los datos de la carga útil de usuario existentes, al igual que las tramas en sentido descendente (células ATM o GEM) y también como carga útil se puede enviar el informe DBA el cual contiene un conjunto de informes de atribución dinámica de ancho de banda de la ONU en cuestión.

En el Anexo “A” se muestra con mayor detalle las estructuras de las tramas ascendentes y descendentes para las redes ópticas pasivas con capacidad en gigabits (GPON).

2.2.3.9 Mensajes GTC¹

Existen tres métodos para transportar información entre la estación de gestión de red, la OLT y las ONUs:

Canales OAM integrados

Se definen varios campos en las estructuras de trama en sentido descendente y ascendente. Estos campos transportan información en tiempo real tal como intercambio de seguridad, DBA y supervisión del BER del enlace.

Mensajes PLOAM

La OLT puede mandar a las ONUs un mensaje dedicado de 13 *bytes* en sentido descendente, y las ONUs enviar otro en sentido ascendente a la OLT con las funciones OAM de que disponen.

Información OAM con OMCI transportada en un canal GEM dedicado o en un VPI/VCI ATM dedicado

En general el estándar G-PON presenta diferentes tipos de mensajes de control relacionados con los tres métodos puntualizados, los cuales no se estudiarán para el análisis del presente proyecto. Sin embargo se los puede revisar en la Recomendación de la UIT-T G.984.3.

¹ Se puede profundizar en: Recomendación UIT-T G.984.3, Anexo C.

2.2.3.10 Seguridad

En esta sección se analizan los aspectos relacionados con la seguridad de los datos en las PONs. Se analiza el modelo de amenazas que se pretende contrarrestar mediante la seguridad, así como el intercambio de claves y el método de activación

Modelo de amenazas básicas

La preocupación básica en una PON es que los datos descendentes se difundan a todas las ONUs de la PON. Si un usuario malicioso reprogramara su ONU, podría escuchar los datos descendentes de todos los usuarios; ésta es la “amenaza de escucha indebida” que el sistema de seguridad de la PON pretende evitar. Existen otras amenazas menos comunes que no se consideran de importancia en la práctica, ya que para realizar tal tipo de ataques, el usuario debería invertir una cantidad de recursos que se estima superior al beneficio que obtendría de su acción.

Además, la propia PON tiene la propiedad singular de ser altamente direccional. Por tanto, una ONU no puede observar el tráfico ascendente de otras ONUs de la PON. Esto permite que información privilegiada (como las claves de seguridad) se transmita en sentido ascendente sin cifrar. Si bien existen amenazas que pueden complicar la situación, tales como un ataque para intervenir las fibras comunes de la PON, tampoco éste se considera un caso realista, pues el atacante lo realizaría en recintos públicos y probablemente perturbaría toda la PON sobre la que pretende intervenir.

Sistema de encriptación

El algoritmo de encriptación a utilizar es la denominada norma de criptación avanzada (AES, *Advanced Encryption Standard*)¹. Se trata de un cifrado en

¹ Este algoritmo se describe en documentos publicados por el *National Institute of Standards and Technology* (NIST) de los Estados Unidos de América. Se puede profundizar en: <http://www.nist.gov/>

bloque que funciona sobre bloques de datos de 16 *bytes* (128 bits). Acepta claves de 128, 192 y 256 bits.

2.2.3.11 Corrección de errores en recepción

La capa de transporte de los sistemas de comunicaciones utiliza la corrección de errores en recepción (FEC, *Forward Error Correction*), y se basa en la transmisión de los datos en un formato codificado. La codificación introduce redundancia, lo cual permite que el decodificador detecte y corrija errores de transmisión. Por ejemplo, para un BER de entrada de 10^{-4} , el BER a la salida del decodificador se habrá reducido a 10^{-15} . Utilizando la técnica FEC, pueden transmitirse datos a baja velocidad, evitándose las retransmisiones.

La FEC aumenta el balance del enlace en aproximadamente 3-4 dB. Por lo tanto, puede soportarse una mayor velocidad binaria y una mayor distancia entre la OLT y las ONUs, así como un número mayor de derivaciones en un mismo árbol PON.

2.2.3.12 Mecanismo de transporte de la OMCI¹

La interfaz de control y gestión de las ONUs es un servicio de OAM que proporciona una forma normalizada para detectar las capacidades de la ONU, gestionarlas y controlarlas.

Esquema de transporte de la OMCI

La OMCI trabaja sobre un canal virtual bidireccional dedicado entre la estación de gestión y la ONU. Existe una analogía con las redes G.983.1, en las que el transporte de la información de la OMCI se realiza mediante un VC especial establecido durante el proceso de determinación de distancia. La estación de gestión puede estar situada en la propia OLT, o en un elemento de red localizado en el interior de la misma. Si ese es el caso, la conexión virtual debe extenderse desde la ONU hasta dicho elemento de red.

¹ Todo lo relacionado a la gestión de las redes ópticas pasivas con capacidad en gigabits, se puede profundizar en: Recomendación de la UIT-T G.984.4. Anexo C.

Modos de transporte

El protocolo GTC proporciona dos modos alternativos de transporte para los datagramas de la OMCI, a saber, ATM y GEM. Tanto la OLT como la ONU pueden soportar ATM, GEM o ambos simultáneamente.

La OLT conoce la capacidad de la OMCI de la ONU durante el proceso de determinación de distancia, gracias al mensaje número de serie de ONU PLOAM (*Serial_Number_ONU*)¹. Si existe una combinación de interfuncionamiento entre la OLT y la ONU, la OLT configura el VPI/VCI o el Port-ID que se debe utilizar para el transporte de la OMCI, mediante el mensaje PLOAM adecuado.

Encapsulación de datagramas

Las unidades de datos de las primitivas OMCI tienen una longitud de 48 bytes. En el modo ATM, estos datagramas se transportan en las cargas útiles de las células ATM. En la G-PON, éstas se transportan en la partición ATM descendente, y en el Alloc-ID ascendente por defecto. En el modo GEM, las cargas útiles de 48 bytes se encapsulan con un encabezamiento GEM (que contiene el Port-ID de 12 bits OMCI configurado). En la G-PON, éstas se transportan en la partición GEM descendente, y en el Alloc-ID por defecto ascendente.

Adaptador OMCI de la ONU

El adaptador OMCI de la ONU es responsable del filtrado y desencapsulado de células o de tramas en sentido descendente, y de la encapsulación de las PDUs en el sentido ascendente. Las PDUs de 48 bytes se transfieren a la lógica que implementa las funciones OMCI.

Adaptador OMCI de la estación de gestión

El adaptador OMCI de la estación de gestión es responsable del filtrado y desencapsulado de células y de tramas en sentido ascendente. Deben soportarse varios canales concurrentes, que pueden ser de tipos mixtos. También es

¹ *Serial_Number_ONU*: Contiene el número de serie de una ONU. La ONU envía este mensaje cuando se encuentra en el modo determinación de distancia y al recibir un AllocID de determinación de distancia (254). El efecto en la recepción, la OLT extrae el número de serie y puede asignar un ONU-ID libre a dicha ONU. En el mensaje se incluye el retardo aleatorio utilizado para permitir la primera medición del RTD (retardo de ida y vuelta) durante la adquisición de SN (número de serie).

responsable de encapsular las PDUs de 48 *bytes* procedentes de la lógica de control OMCI en el formato adecuado para su transporte hasta la ONU.

2.3 EPON (*ETHERNET PASSIVE OPTICAL NETWORK*)^[3]

Las redes ópticas pasivas *Ethernet* (EPON) son redes basadas en PON que encapsulan tráfico de datos portadores en tramas *Ethernet* (definido en el estándar IEEE 802.3). Usa el código de línea 8B/10B (8 bits de usuario codificados como 10 bits de línea) y opera a velocidades estándares *Ethernet* (Ver anexo B estándar IEEE 802.3ah).

2.3.1 POR QUÉ *ETHERNET*?

Los sistemas PON han sido considerados para la red de acceso desde hace mucho tiempo, aún antes de que Internet demandara ancho de banda. La recomendación UIT-T G.983 de la red de acceso de servicio completo (FSAN¹) define una red de acceso óptico basada en una PON que usa ATM como protocolo de capa 2. En 1995, cuando la iniciativa de FSAN comenzó, ATM tuvo altas esperanzas de convertirse en la tecnología predominante para redes LAN, MAN y *backbone*. Sin embargo, desde ese momento, la tecnología *Ethernet* ha rebasado ampliamente a ATM. *Ethernet* se ha convertido en un estándar universalmente aceptado, por encima de los 330 millones de puertos desplegados mundialmente, ofreciendo grandes economías de escala.

Por otra parte, *Ethernet* se lo visualiza como una opción lógica para la optimización de datos IP sobre la red de acceso. La calidad de servicio (QoS) ha permitido que las redes *Ethernet* sean capaces de soportar voz, datos y video. Esas técnicas incluyen modos de transmisión full dúplex, priorización (802.1P), y etiquetamiento de LAN virtual (VLAN-802.1Q). *Ethernet* es una tecnología barata, sencilla, ubicua e interoperable con una variedad de equipos.

¹ El grupo FSAN (*Full Service Access Network*), es un grupo de interés formado por más de 50 operadores de telecomunicaciones con el objetivo de unificar las especificaciones para el acceso de [banda ancha](http://www.fsanweb.org/) a las viviendas, definió APON, BPON y GPON. Se puede profundizar en: <http://www.fsanweb.org/>

2.3.2 EVOLUCIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE 802.3ah

La necesidad de un estándar *Ethernet* para la red de acceso del suscriptor, hace que se cree la norma IEEE 802.3ah, por el grupo de trabajo *Ethernet* en la primera milla (EFM, *Ethernet in the First Mille*). Este grupo recibió la aprobación para operar como un grupo de trabajo de la asociación de estándares IEEE (IEEE-SA) en septiembre del 2001.

El grupo de trabajo EFM 802.3ah posibilita tener en *Ethernet* el bucle del abonado local, enfocando la atención en ambas redes de acceso, residencial y empresarial. Mientras, a primera vista, esto parece ser tarea simple, en realidad los requerimientos de portadores del bucle local son vastamente diferentes de dichas empresas gestadoras para lo cual *Ethernet* ha sido diseñado. Para desarrollar *Ethernet* como redes de suscriptor local, 802.3ah está enfocado en cuatro definiciones primarias:

1. *Ethernet* sobre cobre
2. *Ethernet* sobre fibra punto a punto (P2P)
3. *Ethernet* sobre fibra punto a multipunto (P2MP)
4. Operación, Administración y Mantenimiento (OAM)

Así, el grupo de trabajo EFM está enfocado a la utilización de la fibra y el cobre (se puede apreciar en figura 2.24), optimizado así a la primera milla, y conjuntamente puesta en espera por una operación común, administración y sistema de mantenimiento. Particularmente la visión de los operadores de red es muy grande, ya que éstos tienen con *Ethernet* la elección de implementar un *hardware* común y una plataforma gestadora.

El camino de *Ethernet* sobre punto a multipunto (P2MP) se enfoca en las capas inferiores de una red EPON. Esto involucra una especificación de la capa física (PHY), con una modificación mínima en la MAC (*Medium Access Control*) 802.3. Los estándares *Ethernet* basados en fibra para P2MP surgen debido a su progreso, mientras el entramado del protocolo de control multipunto está

emergiendo. Este protocolo emergente usa envío de mensajes de control MAC (similar al mensaje PAUSE de *Ethernet*) para coordinar el tráfico *Ethernet* de tramas *upstream* punto a multipunto. Información concerniente al logro del estándar 802.3ah se pueden encontrar en las presentaciones y materiales publicados por el grupo de trabajo EFM.

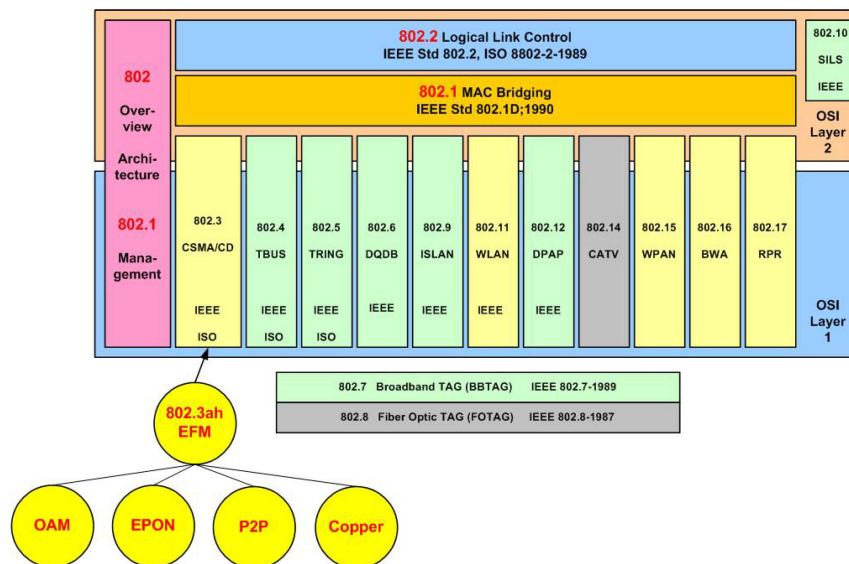


Figura 2.24 Grupo de trabajo 802.3ah EFM en la IEEE 802 [28]

2.3.3 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN

El estándar IEEE 802.3 define dos configuraciones básicas para una red *Ethernet*. En la primera configuración sobre un medio compartido se emplea técnicas de acceso múltiple con detección de portadora con el protocolo de detección de colisión (CSMA/CD). En la otra configuración, las estaciones pueden conectarse a través de un *switch* sobre un medio compartido usando enlaces punto a punto full dúplex.

Las propiedades de EPON son tales que no pueden considerarse como un medio compartido o una red punto a punto, más bien es una combinación de ambas.

En dirección *downstream*, las tramas *Ethernet* transmitidas por la OLT pasan a través de un divisor pasivo 1:N y llegan a cada ONU. El valor de N está típicamente entre 16 y 64. Este comportamiento es similar a una red de medio compartido. Debido a la difusión de *Ethernet*, en dirección *downstream* (desde la

red al usuario), se satisface perfectamente con la arquitectura *Ethernet* PON: los paquetes son difundidos por la OLT y recogidos por sus destinos ONU basándose en la dirección de control de acceso al medio. (Figura 2.25).

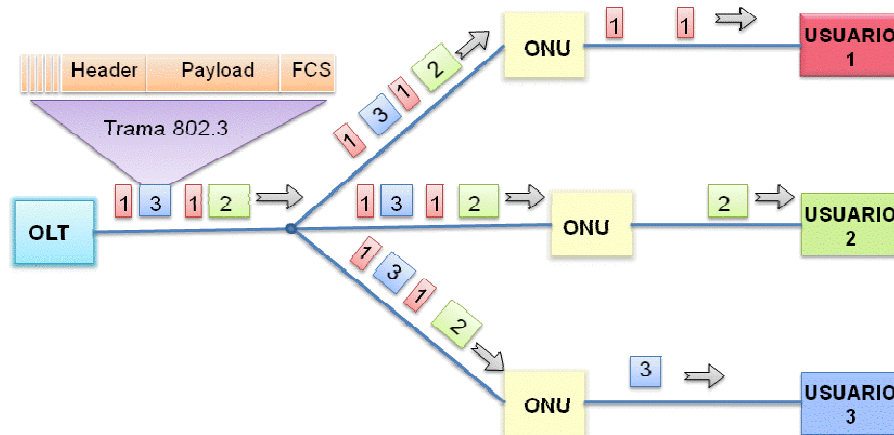


Figura 2.25 Tráfico *Downstream* en EPON ^[29]

En la dirección *upstream*, debido a las propiedades direccionales de un combinador óptico pasivo, las tramas de datos desde cualquier ONU solo alcanzarán a la OLT, y no a otras ONUs. En este sentido, en la dirección *upstream*, el comportamiento de la EPON es similar a una arquitectura punto a punto.

Sin embargo, a diferencia de un verdadero enlace de red punto a punto, en las tramas de datos EPON de diferentes ONUs transmitidas simultáneamente todavía se puede presentar colisión. Así, en la dirección *upstream* (desde el usuario a la red) las ONUs necesitan emplear algunos mecanismos arbitrarios para evitar colisiones de datos y compartir medianamente la capacidad del canal de fibra. Un mecanismo de acceso basado en contención (similar a CSMA/CD) es difícil de implementar porque las ONUs no pueden detectar una colisión de la OLT (debido a las propiedades direccionales de los divisores/combinadores). Una OLT podría detectar una colisión e informar a las ONUs enviando una señal *jam*; sin embargo, los retardos de propagación en la PON, que pueden exceder los 20 Km de longitud, pueden reducir enormemente la eficiencia de tal esquema.

No hay garantía de que un nodo consiga acceso al medio de comunicación en cualquier intervalo de tiempo pequeño. Esto no es un problema para las redes de las empresas basadas en CSMA/CD donde los enlaces son cortos, y el tráfico predominante son los datos. Las redes de acceso de suscriptores, sin embargo, además de datos, deben soportar servicios de voz y video, y de esa manera proveer algunas garantías en la entrega oportuna de dichos tipos de tráfico.

Para introducir determinismo en la entrega de tramas, se han propuesto diferentes esquemas sin contención. La figura 2.26 ilustra un flujo de datos de tiempo compartido *upstream* en una EPON.

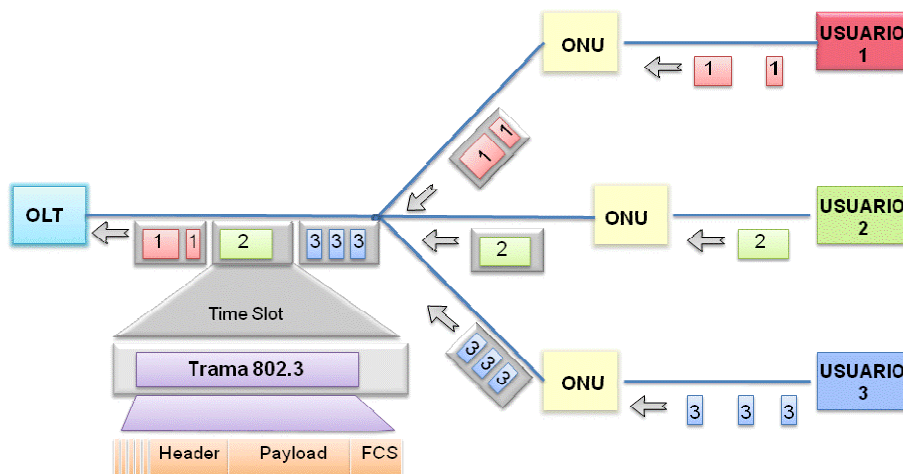


Figura 2.26 Tráfico *Upstream* en EPON ^[30]

Todas las ONUs son sincronizadas a una referencia de tiempo común y cada ONU es asignada a un intervalo de tiempo (*timeslot*). Cada intervalo de tiempo es capaz de llevar varias tramas *Ethernet*. Una ONU debería recibir las tramas en la memoria temporal (*buffer*) de un suscriptor hasta que su intervalo de tiempo llegue. Cuando su intervalo de tiempo llega, la ONU “estallaría” todas las tramas almacenadas a una velocidad de canal saturado el cual debe corresponder a una tasa estándar *Ethernet* (10/100/1000/10000 Mbps). Si no hay tramas en el *buffer* para llenar el intervalo de tiempo completamente, se transmite caracteres *idles* de 10 bits.

Los posibles esquemas de asignación del intervalo de tiempo (*timeslots*) podrían ir de una asignación estática (acceso múltiple por división de tiempo- fijo (TDMA))

a un esquema de adaptación dinámica basado en el tamaño instantáneo de encolamiento en cada ONU (esquema de multiplexación estadística). Existen otros esquemas de asignación posibles, incluyendo esquemas utilizando nociones de prioridad de tráfico, calidad de servicio (QoS), acuerdos de nivel de servicio (SLAs¹), etc.

Los acercamientos descentralizados para implementar un esquema dinámico de asignación de la ranura (*slot*) también es posible, en el cual las ONUs deciden cuándo enviar datos y por cuánto tiempo. Esos esquemas son algo parecidos a un método de *token-passing*, excepto que en este caso es un anillo pasivo. En tal esquema, cada ONU, antes de enviar sus datos, enviará un mensaje especial anunciando cuántos *bytes* está a punto de enviar. La ONU está programada para monitorear y cronometrar la transmisión de la ONU previa a la OLT. Así de esta manera no habrá colisión y no se desperdiciará ancho de banda. Este esquema es similar al sondeo de un *hub*. Sin embargo, tiene una limitación mayor: requiere conectividad entre ONUs. Eso impone algunas restricciones en la topología PON; es decir, la red debería ser desplegada como un anillo o una estrella *broadcasting*. Este requerimiento no es deseable ya que: (a) puede requerir instalar más fibra, o (b) la instalación de fibra con diferentes topologías podría ser ya pre-desplegado. En general, un algoritmo preferido soportará cualquier topología punto a multipunto (P2MP) PON (Ver figura 2.5).

En una red de acceso óptico, se puede contar sólo con conectividad desde la OLT a cada ONU (tráfico *downstream*) y cada ONU a la OLT (tráfico *upstream*). Eso es cierto para todas las topologías PON. Por consiguiente, la OLT permanece sólo en un dispositivo que puede arbitrar el acceso por división de tiempo para el canal compartido.

¹ “Acuerdo de nivel de servicio (SLA, *Service Level Agreement*) es un contrato entre el usuario y el operador de la red. En el mismo se define el significado real de los parámetros en cuestión. Se supone que las definiciones están dadas de modo tal que sean interpretadas de la misma manera por el cliente y por el operador de la red. Asimismo, el SLA define qué sucede en el caso de la violación de los términos del contrato. Algunos operadores han decidido emitir un SLA para todas las relaciones que tienen (al menos en principio) con el cliente, mientras que otros sólo lo hacen con grandes clientes que conocen lo que realmente significan los términos del SLA”. (MANUAL SOBRE INGENIERÍA DE TELETRÁFICO, Comisión de Estudio 2/16 del UIT-D y Congresos Internacionales de Teletráfico).

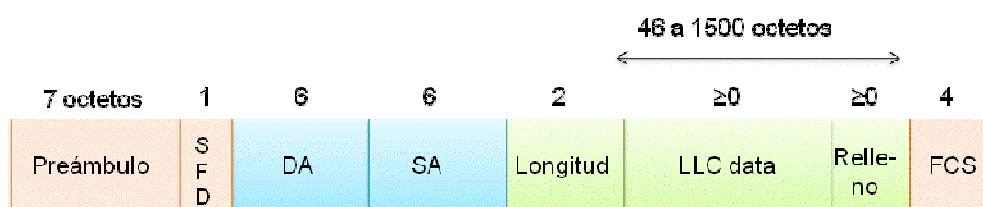
El desafío de implementación de un esquema dinámico arbitrario basado en la OLT está en el hecho de que la OLT no conoce cuántos *bytes* de datos de cada ONU tiene almacenado en sus *buffers*. Las ráfagas de tráfico de datos imposibilitan una predicción de ocupación con cualquier exactitud razonable. Si la OLT debe hacer una asignación precisa del intervalo de tiempo, debería conocer el estado exacto de la ONU dada. Una solución puede utilizar un esquema de sondeo basado en mensajes de concesión y petición. Las peticiones son enviadas desde una ONU para reportar cambios en un estado de la misma, ejemplo, la cantidad de datos almacenados en el *buffer*. La OLT procesa todas las peticiones y asigna diferentes ventanas de transmisión (*timeslots*) a las ONUs. La información de asignación de la ranura es entregada a las ONUs usando mensajes de concesión.

La ventaja de tener una inteligencia centralizada por algoritmos de asignación de ranuras es que la OLT conoce los estados de la red entera y puede conmutar otros esquemas de asignación basados en esa información; las ONUs no necesitan monitorear los estados de red o hacer negociación y admitir nuevos parámetros. Eso hará a las ONUs más simples, más baratas y más robustas en la red entera.

2.3.4 FORMATO DE TRAMAS

2.3.4.1 Trama MAC (Ethernet)

En la figura 2.27 se muestra el formato de la trama del protocolo 802.3. Ésta consta de los siguientes campos:



SFD= Delimitación de comienzo de trama (*Start of Frame Delimiter*)

DA= Dirección destino (*Destination Address*)

SA= Dirección origen (*Source Address*)

FCS= Secuencia de comprobación de trama (*Frame Check Sequence*)

Figura 2.27 Formato de trama IEEE 802.3 ^[31]

- **Preámbulo:** El receptor usa 7 octetos de bits ceros y unos alternados para establecer la sincronización entre el emisor y receptor.
- **Delimitador del comienzo de la trama (SFD, *Start Frame Delimiter*):** Consiste en la secuencia de bits 10101011, que indica el comienzo real de la trama y posibilita que el receptor pueda localizar el primer bit del resto de la trama.
- **Dirección de destino (DA, *Destination Address*):** Especifica la estación o estaciones a las que va dirigida la trama. Puede tratarse de una única dirección física, una dirección de grupo o una dirección global.
- **Dirección de origen (SA, *Source Address*):** Especifica la estación que envió la trama.
- **Longitud / Tipo:** Contiene la longitud del campo de datos LLC (*Logic Link Control*) expresado en octetos o el campo Tipo de *Ethernet*, dependiendo de que la trama siga la norma IEEE 802.3 o la especificación primitiva de *Ethernet*. En cualquier caso, el tamaño máximo de la trama, excluyendo el preámbulo y el SFD, es de 1518 octetos.
- **Datos LLC:** Unidad de datos proporcionada por el LLC.
- **Relleno:** Octetos añadidos para asegurar que la trama sea lo suficientemente larga como para que la técnica de detección de colisiones (CD) funcione correctamente.
- **Secuencia de Comprobación de Trama (FCS, *Frame Check Sequence*):** Comprobación de redundancia cíclica de 32 bits, calculada teniendo en cuenta todos los campos excepto el preámbulo, el SFD y el FCS.

2.3.4.2 Formato de tramas EPON

La figura 2.28 indica un ejemplo de tráfico *downstream* que es transmitido desde la OLT a la ONU en paquetes de longitud variable. El tráfico *downstream* es segmentado en tramas de intervalos fijos, cada uno de los cuales transporta múltiples paquetes de longitud variable. Se incluye una señal de reloj en la información para sincronización en cada inicio de trama. La marca de

sincronización es un *byte* codificado que es transmitido cada 2 ms para sincronizar la ONUs, con la OLT.

Cada paquete de longitud variable es direccionado a la ONU especificada como indica su numeración, de 1 hacia N . Los paquetes son encapsulados de acuerdo al estándar IEEE 802.3 y son transmitidos en *downstream* a 1 Gbps. En la figura se aprecia uno de los paquetes de longitud variable constituido por: el *payload* de longitud variable, el campo de detección de errores y el *header*.

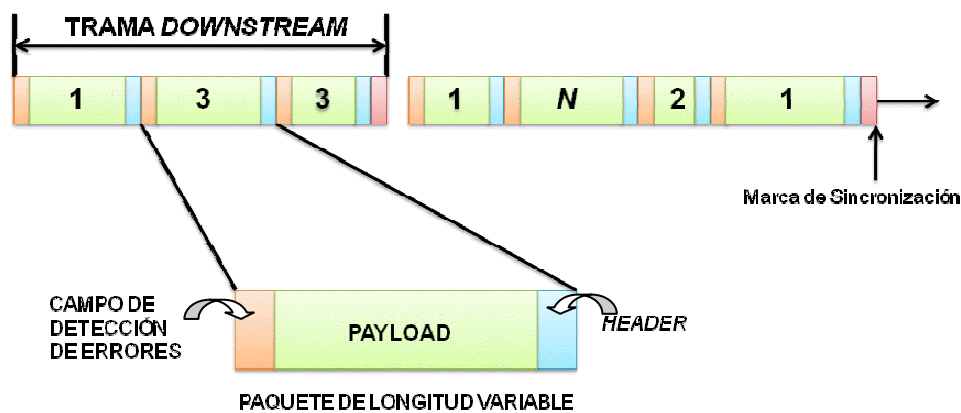


Figura 2.28 Formato de trama *Downstream* en EPON ^[32]

La figura 2.29 ilustra un ejemplo de tráfico *upstream* utilizando TDM a través de una fibra óptica común para evitar colisiones entre el tráfico de cada ONU. El tráfico *upstream* es segmentado en tramas, y cada trama es también segmentada en *slots* de tiempo que corresponden a una ONU específica. Las tramas *upstream* forman una transmisión continua, con intervalos de 2 ms entre ellas. Una cabecera de trama identifica el inicio de cada trama *upstream*.

Cada ONU tiene un *slot* de tiempo dedicado dentro de cada trama *upstream*. Por ejemplo, en la figura 2.29, cada trama *upstream* está dividida en N *slots* de tiempo, cada uno de los cuales corresponde a una ONU específica, de 1 hasta N . El controlador TDM en cada ONU, en conjunción con la información de tiempo de la OLT, controla el tiempo de transmisión *upstream* de los paquetes de longitud variable dentro del *slot* de tiempo dedicado. La figura 2.29 muestra una visión expandida de un *slot* de tiempo de una ONU específica (ONU-4) que incluye dos

paquetes de longitud variable y una cabecera de *slot* de tiempo. La cabecera de *slot* de tiempo incluye una banda de guarda, un indicador de tiempo e indicadores de nivel de señal. Cuando no hay tráfico para transmitir desde la ONU, se rellena el *slot* de tiempo con una señal *idle*.

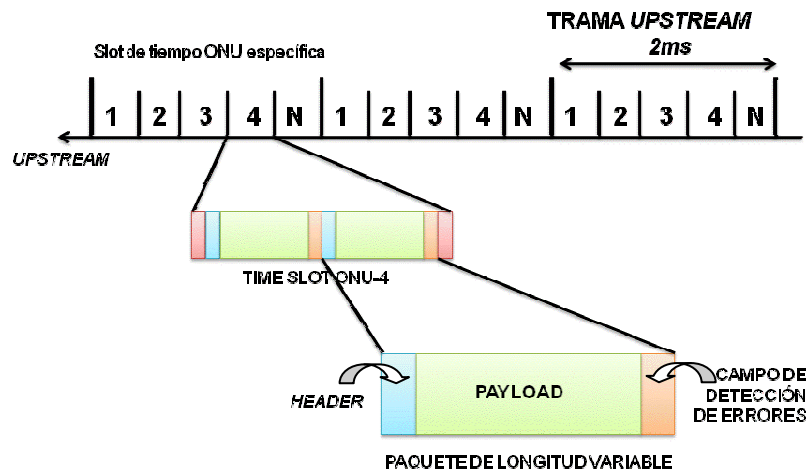


Figura 2.29 Formato de trama *Upstream* en EPON ^[33]

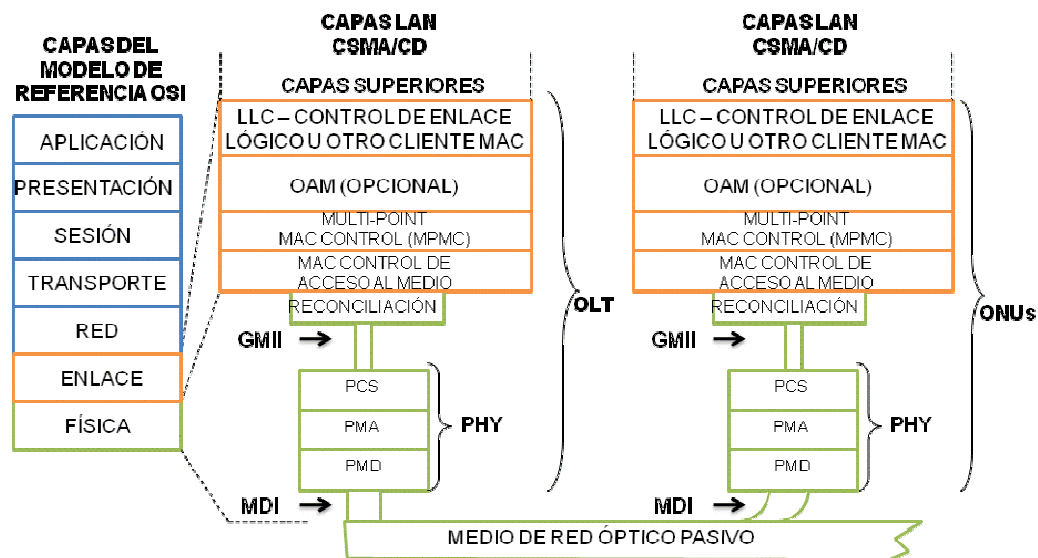
2.3.5 POSICIONAMIENTO DE LA EPON DENTRO DE LA ARQUITECTURA IEEE 802.3

Ethernet para redes de acceso de suscriptores, también llamado *Ethernet* en la Última Milla (EFM, *Ethernet in the First Mile*), combina un grupo mínimo de extensiones a IEEE 802.3 *Media Access Control* (MAC) y subcapas de MAC Control con un grupo de capas físicas. Estas capas físicas incluyen fibra óptica y subcapas dependientes del medio (PMD, *Physical Medium Dependent*) para cable de cobre con aplicaciones de voz, para conexiones punto a punto (P2P) en redes de acceso de suscriptores. EFM también introduce el concepto de EPONs, en el cual se implementa una topología de red punto a multipunto (P2MP) con divisores ópticos pasivos (*Passive Optical Splitters*), junto a las extensiones de las subcapas *MAC Control Sublayer* y *Reconciliation Sublayer* así como la Subcapa dependiente del medio físico (PMD), tipo 1000BASE-PX10 y 1000BASE-PX20 de fibra óptica para soportar esta tecnología.

Además, en el estándar se incluye un mecanismo para el mantenimiento, administración y operación de la red (OAM, *Operation, Administration and*

Maintenance), para facilitar la operación y la solución de problemas de la red. En la figura 2.30, se presenta la relación entre los elementos EFM y el modelo de referencia OSI para tecnologías punto a multipunto.

El estándar IEEE 802.3ah define una característica llamada MAC full dúplex simplificada, con el fin de utilizarla en aplicaciones P2MP así como en aplicaciones de cobre para EFM.



GMI=GIGABIT MEDIA INDEPENDENT INTERFACE (Interfaz independiente del medio *gigabit*)
 MDI=MEDIUM DEPENDENT INTERFACE (Interfaz dependiente del medio)
 OAM=OPERATIONS, ADMINISTRATION, AND MAINTENANCE (Operación, administración, y mantenimiento)
 PCS=PHYSICAL CODING SUBLAYER (Subcapa de codificación física)
 PHY=PHYSICAL LAYER DEVICE (Dispositivo de capa física)
 PMA=PHYSICAL MEDIUM ATTACHMENT (Aditamiento del medio físico)
 PMD=PHYSICAL MEDIUM DEPENDENT (Dependiente del medio físico)

Figura 2.30 EFM para tecnologías punto a multipunto ^[34]

2.3.5.1 Subcapas P2MP

Para tecnologías con fibra óptica P2MP, EFM soporta una velocidad nominal de 1000 Mbps (sin codificar), compartida entre un conjunto de ONUs adjuntos a la tecnología P2MP.

A continuación se detallan breves aspectos considerados en las subcapas P2MP, que serán abordados con mayor detalle en secciones posteriores.

2.3.5.2 Protocolo de Control de Acceso al Medio Multipunto (MPCP)

El Protocolo de Control de Acceso al Medio Multipunto (MPCP) usa mensajes, estados de máquina y temporizadores, como se define más adelante, para controlar la tecnología P2MP. Cada topología P2MP consiste de una OLT más una o varias ONUs, tal como se ilustra en la figura 2.30.

Una de las varias instancias del MPCP en la OLT se comunica con la instancia del MPCP en la ONU. Se distingue entonces un par asociado de MPCPs que se comunican entre la OLT y la ONU.

2.3.5.3 Subcapa de Reconciliación (RS) e interfaces independientes del medio

La combinación de MPCP y la extensión de la Subcapa de Reconciliación (RS) para una emulación P2P, permite a una red P2MP aparecer como una colección de enlaces punto a punto frente a los protocolos de capa superior (y para el cliente MAC en las inferiores).

2.3.5.4 Sistemas de señalización de capa física

Para las topologías P2MP, EFM introduce una familia de sistemas de señalización de capa física las cuales se derivan de 1000BASE-X, pero que incluyen extensiones a la RS, PCS y PMA, junto con una capacidad FEC (*Forward Error Correction*). La familia de sistemas de señalización de capa física de P2MP incluye una combinación de 1000BASE-PX10-D (*downstream* PON de 10 km), más 1000BASE-PX10-U (flujo de subida PON de 10 km), y la combinación de 1000BASE-PX20-D (flujo de bajada PON de 20 km) más 1000BASE-PX20-U (flujo de subida PON de 20 km).

EFM introduce diferentes sistemas de señalización de capa física ya sean especificaciones de larga distancia, utilizando cableado de cobre, etc. En la tabla 2.7, se puede ver de manera general las operaciones de cada elemento de capa física que se presentan en el estándar.

Nombre	Localización	Velocidad (Mbps)	Alcance nominal (Km)	Medio
100BASE-LX10	ONU/OLT	100	10	Dos fibras monomodo
100BASE-BX10-D	OLT	100	10	Una fibra monomodo
100BASE-BX-10-U	ONU			
1000BASE-LX10	ONU/OLT	1000	10 0.55	Dos fibras monomodo Dos fibras monomodo
1000BASE-BX10-D	OLT	1000	10	Una fibra monomodo
1000BASE-BX10-U	ONU			
1000BASE-PX10-D	OLT	1000	10	Una fibra monomodo PON
1000BASE-PX10-U	ONU			
1000BASE-PX20-D	OLT	1000	20	Una fibra monomodo PON
1000BASE-PX20-U	ONU			
10PASS-TS-O	CO	10	0.75	Uno o más pares de cobre para aplicaciones de voz
10PASS-TS-R	Suscriptor			
2BASE-TL-O	CO	2	2,7	Uno o más pares de cobre para aplicaciones de voz
2BASE-TL-R	Suscriptor			

Tabla 2.7 Resumen de sistemas de señalización de capa física de EFM¹

2.3.5.5 Administración

Para objetos de administración, atributos y acciones, EFM introduce Operaciones, Administración y Mantenimiento OAM (*Operations, Administration and Maintenance*) para las redes de acceso de suscriptores a *Ethernet*.

OAM incluye un mecanismo para la comunicación de la información de administración usando tramas OAM, así como funciones para el desarrollo de diagnósticos de bajo nivel en un enlace de la red.

2.3.5.6 Transmisión unidireccional

En contraste a ediciones previas de 802.3, en ciertas circunstancias un DTE estaba habilitado para transmitir tramas mientras no recibía una señal satisfactoria; en cambio, para un OLT 1000BASE-PX-D es necesario hacer esto para así llevar a una PON a un estado de operación (aunque no es aconsejable para una ONU 1000BASE-PX-U transmitir sin tener recepción de la OLT).

¹ Fuente: IEEE STD 802.3ah "Ethernet in the First Mile Task Force, Point to Multipoint Ethernet on SM Fiber (PON)".

2.3.6 SUBCAPA DEPENDIENTE DEL MEDIO FÍSICO (PMD) EPON 1000BASE-PX10 Y 1000BASE-PX20

Las subcapas dependientes del medio físico PMD 1000BASE-PX10 y 1000BASE-PX20 proporcionan conexiones 1000BASE-X punto a multipunto (P2MP) sobre redes ópticas pasivas (PONs) de al menos 10Km a 20Km, respectivamente y con una relación típica del divisor de 1:16. Las mismas fibras se utilizan simultáneamente en ambas direcciones. A continuación se especifica la subcapa dependiente del medio físico de: 1000BASE-PX10D, 1000BASE-PX10-U, 1000BASE-PX20-D y 1000BASE-PX20-U (incluyendo MDI) y el medio (fibra monomodo).

Una PMD 1000BASE-PX-U o una PMD 1000BASE-PX-D están conectadas para acomodar la PMA 1000BASE-X y el medio a través de MDI. Opcionalmente una PMD se combina con funciones de gestión que pueden ser accesibles a través del interfaz de gestión. Un enlace 1000BASE-PX10 usa una PMD 1000BASE-PX10-U a un extremo y una PMD 1000BASE-PX10-D al otro. Un enlace 1000BASE-PX20 usa una PMD 1000BASE-PX20-U a un extremo y una PMD 1000BASE-PX20-D al otro. Una PMD 1000BASE-PX20-D¹ es interoperable con una PMD 1000BASE-PX10-U¹. Eso permite ciertas posibilidades de mejoras en la longitud de 10Km a 20Km PONs.

La relación divisora o la longitud de alcance se pueden incrementar si está presente FEC (FEC se refiere a la corrección de errores hacia adelante para enlaces ópticos P2MP).

La máxima longitud de alcance no está limitada por el protocolo. La tabla 2.8, ilustra los atributos primarios para cada tipo de PMD.

Metas y Objetivos

Los objetivos de 1000BASE-PX10 y 1000BASE-PX20 son los siguientes:

¹ El sufijo D y U indica las PMDs de cada extremo de un enlace que transmite en esas direcciones y recibe en direcciones opuestas.

- a) Punto a multipunto en fibra óptica.
- b) 1000 Mbps sobre los 10Km en fibra monomodo soportando una relación divisora de 1:16.
- c) 1000 Mbps sobre los 20Km en fibra monomodo soportando una relación divisora de 1:16.
- d) Un BER mejor o igual a 10^{-12} en la interfaz de servicio PHY.

Descripción	1000BASE PX10-U	1000BASE PX10-D	1000BASE PX20-U	1000BASE PX20-D	Unidad
Tipo de fibra ¹	B1.1, B1.3 SMF				
Número de fibras	1				
Longitud de onda nominal de transmisión	1310	1490	1310	1490	nm
Dirección de Transmisión	<i>Upstream</i>	<i>Downstream</i>	<i>Upstream</i>	<i>Downstream</i>	
Rango mínimo	0.5m-10Km		0.5m-20Km		
Máxima pérdida de inserción de canal ²	20	19.5	24	23.5	dB
Mínima pérdida de inserción de canal ³	5		10		dB

Tabla 2.8 Tipos de PMD especificados⁴

2.3.6.1 Posicionamiento de la PMD establecida en la arquitectura IEEE 802.3

La figura 2.31 describe la relación de la PMD (coloreada) con otras subcapas y el modelo de referencia OSI (*Open System Interconnection*).

2.3.6.2 Interfaz de servicio de la subcapa dependiente del medio físico (PMD)

Se especifica a continuación los servicios dotados por las PMDs 1000BASE-PX10 y 1000BASE-PX20. Estas interfaces de servicios de la subcapa PMD están descritas de una manera abstracta y no implica ninguna implementación en particular. La interfaz de servicio PMD soporta el cambio de códigos de grupo

¹ Los requerimientos del cable de fibra óptica están soportados por las fibras especificadas en IEC 60793-2 Tipo B1.1 (fibra monomodo *dispersion un-shifted*), Tipo B1.3 (fibra monomodo *low water peak*) especificadas en la norma IEC 60793-2 y UIT-T G.652. Ver Anexo D.

² A transmisión de longitud de onda nominal.

³ La pérdida de inserción diferencial para un enlace es la diferencia entre la pérdida máxima y mínima de la inserción del canal.

⁴Fuente: IEEE STD 802.3ah "*Ethernet in the First Mile Task Force, Point to Multipoint Ethernet on SM Fiber (PON)*".

8B/10B entre las entidades PMA y PMD. La PMD traduce los datos serializados a la PMA desde y hacia señales adecuadas para el medio específico.

2.3.6.3 Especificaciones funcionales de la PMD

El funcionamiento de PMDs 1000BASE-PX transmite y recibe funciones que transportan datos de la interfaz de servicio de la PMD y la MDI.

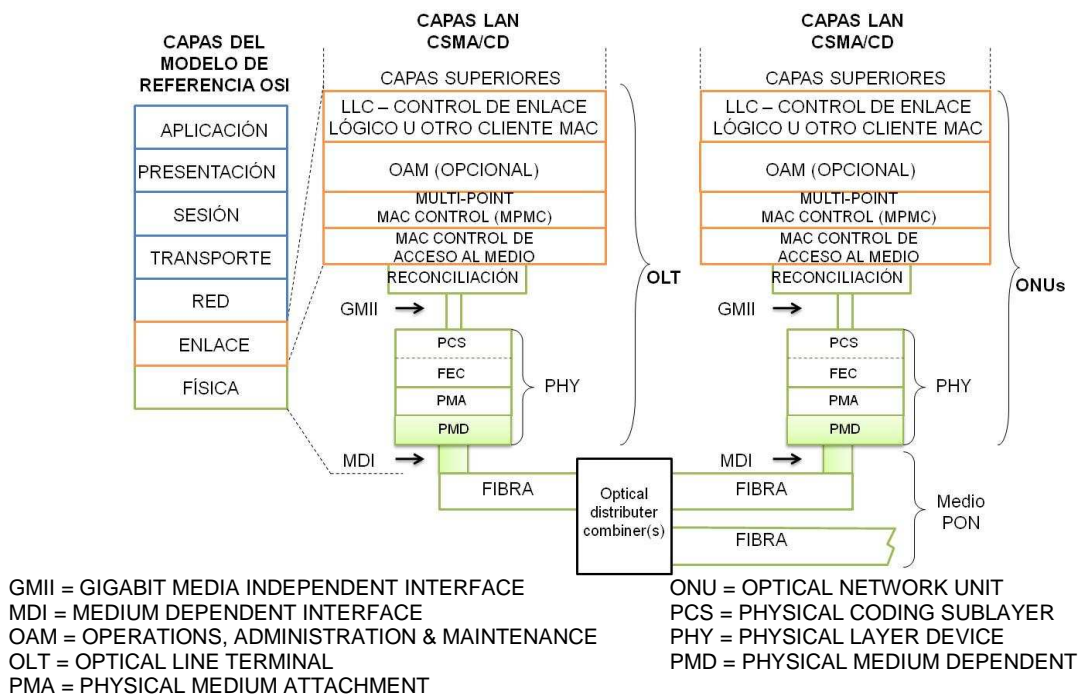


Figura 2.31 PMDs P2MP relación del modelo de referencia OSI y el modelo LAN IEEE 802.3 CSMA/CD [35]

2.3.7 CONTROL MAC MULTIPUNTO

A continuación se detallan los protocolos de mecanismo y control requeridos para relacionar la topología P2MP en un ambiente de trabajo *Ethernet*.

El medio P2MP es una red óptica pasiva (PON), una red sin elementos activos en el camino de la señal desde su origen hasta su destino. Los únicos elementos interiores usados en una PON son componentes ópticos pasivos, tales como fibra óptica, empalmes (*splices*) y divisores (*splitters*) (mencionados anteriormente para el sistema GPON), que combinados con el protocolo *Ethernet* da lugar a la red referida como *Ethernet Passive Optical Network* (EPON).

P2MP es un medio asimétrico basado en una topología tipo árbol, así, un DTE (*Data Terminal Equipment*) conectado al tronco del árbol llamado *Optical Line Terminal* (OLT), y varios DTEs conectados en las ramas llamados *Optical Network Units* (ONUs). La OLT típicamente reside en las instalaciones del proveedor de servicios, mientras que las ONUs se localizan en las proximidades de los suscriptores.

En la dirección del flujo de bajada (desde la OLT hasta una ONU), las señales transmitidas por la OLT pasan a través de un *splitter* pasivo 1:N (o cascadas de *splitters*) para alcanzar cada ONU. En la dirección del flujo de subida (desde las ONUs hasta la OLT), la señal transmitida por una ONU, únicamente alcanza la OLT mas no otras ONUs.

Para eliminar la colisión de datos e incrementar la eficiencia de la red de acceso de suscriptores, las transmisiones de las ONUs son arbitrarias, esto se logra gracias a la localización de una ventana de transmisión en cada ONU¹. Una ONU retarda su transmisión hasta que llegue una concesión. Una vez que dicha concesión ha llegado, la ONU transmite tramas a la velocidad nominal en su *slot* de tiempo asignado. En la figura 2.32, se ilustra un ejemplo de la tecnología P2MP.

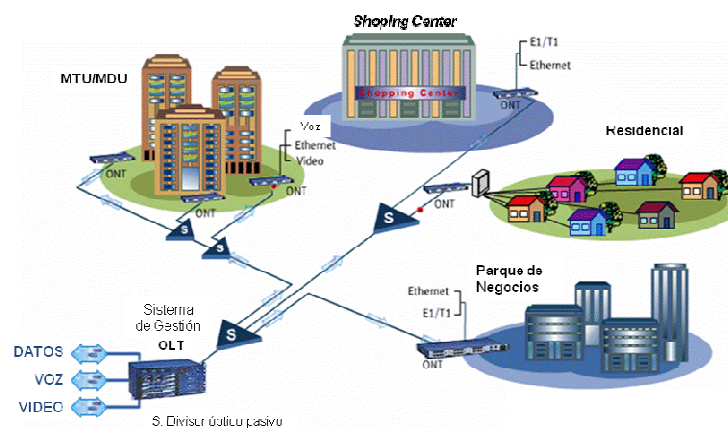


Figura 2.32 Ejemplo de topología PON [36]

El estándar IEEE 802.3ah detalla la localización de los recursos de transmisión en el flujo de subida a las diferentes ONUs, descubrimiento y registro de las ONUs

¹ Para profundizar ver la sección: 2.3.3 Principios de operación del sistema PON.

(similar a GPON) en la red y reporte de congestión a capas superiores para permitir esquemas de localización de ancho de banda dinámico y multiplexaje estadístico a través de la PON.

No incluye tópicos como estrategias de localización de ancho de banda, autenticación de usuarios finales, definición de calidad de servicio, aprovisionamiento o mantenimiento.

Se especifica el Protocolo de Control de Acceso al Medio Multipunto para operar una red óptica multipunto definiendo la subcapa *Multi-point MAC Control* como una extensión de la subcapa *MAC Control* actualmente soportada por las especificaciones.

Cada PON consiste de un nodo localizado en la raíz del árbol asumiendo el rol de OLT, y múltiples nodos localizados en las ramas del árbol asumiendo el rol de ONUs (figura 2.33). La red opera permitiendo la transmisión de una única ONU a la vez en la dirección del flujo de subida. EL MPCP localizado en la OLT es responsable de los diferentes intervalos de transmisión, el reporte de congestión de las diferentes ONUs puede concurrir a la determinación de ancho de banda a través de las PON.

El descubrimiento automático de las estaciones finales se desarrolla culminando en un proceso de registro de una ONU en un puerto de la OLT y determinando un Identificador Lógico de Enlace LLID (*Logical Link ID*).

Las funcionalidades del Control MAC Multipunto deben implementarse por los equipos de acceso de los subscriptores contenidos en los equipos de capa física punto a multipunto.

El Control MAC multipunto define la operación de control MAC para redes ópticas punto a multipunto. La figura 2.33, ilustra el posicionamiento de la subcapa *Multipoint MAC Control* con respecto a MAC y al cliente *MAC Control*, la cual toma el lugar de ésta para extender su aplicación a múltiples clientes y con una funcionalidad de control MAC adicional.

Multi-point MAC Control está definida usando los mecanismos y precedentes de la subcapa *MAC Control*, la cual tiene una extensa funcionalidad diseñada para administrar el control en tiempo real y la manipulación de la operación de la subcapa MAC.

Además, la subcapa *Multi-point MAC Control* está especificada para que pueda soportar nuevas funciones a ser implementadas y adheridas al estándar IEEE 802.3ah en el futuro, tal como MPCP para P2MP.

Como se aprecia en la figura 2.33, la instancia MAC ofrece una emulación de servicio P2P entre la OLT y la ONU, en una MAC adicional es posible la comunicación con todas las MACs simultáneamente. Estas instancias toman máxima ventaja de la naturaleza de difusión de un canal de flujo de bajada al enviar una copia simple de una trama que es recibida por todas las ONUs. Esta instancia MAC es referida como Copia Simple de Difusión SCB (*Single Copy Broadcast*). La ONU únicamente requiere una instancia MAC de las operaciones de filtrado de trama que se dan en RS antes de alcanzar la MAC.

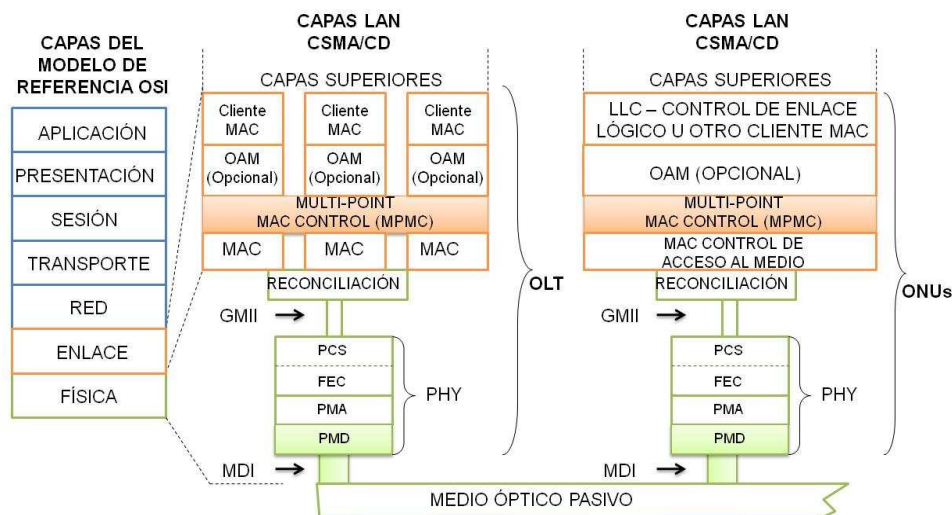


Figura 2.33 Relación del Control MAC Multipunto y la pila de protocolos OSI ^[37]

Aunque la figura 2.33, y el texto de apoyo¹ describen múltiples MACs dentro de la OLT, se puede usar una dirección MAC simple *unicast* por la OLT. Dentro de la

¹ Ver ANEXO B del proyecto

red EPON, las MACs son identificadas únicamente por su LLID, el cual se asigna dinámicamente en el proceso de registro.

La figura 2.34, muestra un diagrama de bloques funcional de la arquitectura de control MAC multipunto.

2.3.7.1 Operación del Control MAC Multipunto

Como se observa en la figura 2.34, el control MAC multipunto se compromete en las siguientes funciones:

- a.** *Control de transmisión multipunto (Multi-Point Transmisión Control)*. Este bloque es el responsable de la sincronización de las instancias de control MAC multipunto asociadas con dicho control. Mantiene el estado de control y supervisa las funciones de multiplexaje de las MACs requeridas.
- b.** *Instancia n de control MAC multipunto (Multi-Point MAC Control Instante n)*. Este bloque es requerido por cada MAC y por sus clientes respectivos MAC asociados con el control MAC multipunto, para mantener todas las variables y estados asociados con la operación de todos los protocolos de control MAC.
- c.** *Control Parser*. Este bloque es responsable del análisis de las tramas de control MAC, de las interfaces con las diferentes entidades, de los bloques específicos *opcode*¹, y el cliente MAC.
- d.** *Control Multiplexer*. Este bloque es el responsable de la selección de la fuente de las tramas reenviadas.
- e.** *Anexos*. Este bloque mantiene las acciones de control MAC para apoyo de legitimidad y servicios futuros.

¹ Opcode: Códigos de operación de control de acceso al medio.

f. *Procesos de descubrimiento, reporte y portal.* Estos bloques son responsables de la manipulación del MPCP en el contexto de MAC.

2.3.7.2 Fundamentos del control MAC multipunto

Como se ilustra en la figura 2.34, la subcapa de Control MAC Multipunto puede requerir múltiples instancias de Control MAC Multipunto para unir múltiples MAC y clientes *MAC Control* sobre múltiples MACs. Una única instancia *MAC unicast* se usa en la OLT para comunicarse con cada ONU. Las instancias MAC individuales utilizan el servicio de la emulación de punto a punto entre la OLT y la ONU.

En la ONU, una instancia MAC única se usa para comunicarse con otra instancia MAC respectiva en la OLT. En ese caso, el Control MAC Multipunto contiene una única instancia de la función *Control Parser/Multiplexer*.

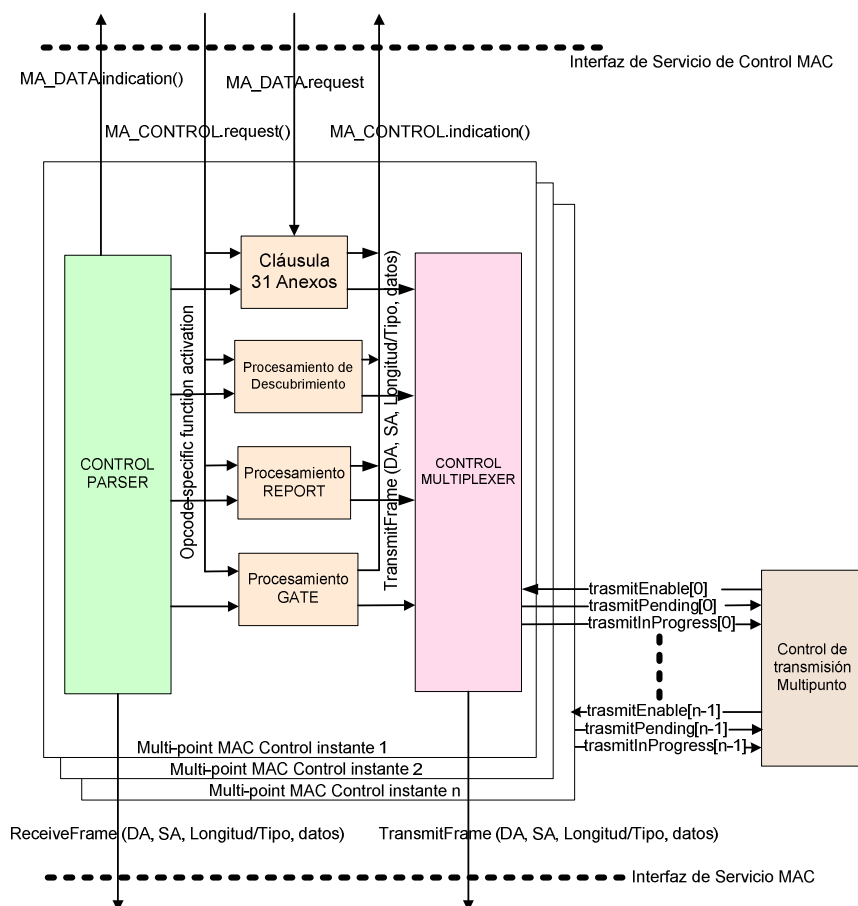


Figura 2.34 Diagrama de bloques funcional del control MAC multipunto [38]

El Protocolo de Control MAC Multipunto soporta varios MACs e interfaces de cliente. Solamente una interfaz de MAC y la interfaz del Cliente se habilita para la transmisión en un determinado momento. Existe una ruta clara entre una interfaz de servicio MAC y una interfaz de servicio de Cliente.

La operación de recepción se da como se describe a continuación: La instancia de Control MAC Multipunto genera la llamada de la función *ReceiveFrame* continuamente a la instancia MAC fundamental. Desde que estas MACs están recibiendo tramas de una simple capa física, sólo pasa una de ellas desde las instancias MAC al Control MAC Multipunto. Las instancias MAC como respuesta a *ReceiveFrame* se refieren a cómo éstas estén habilitadas, y su interfaz de servicio está referido a como el interfaz de MAC esté activado. El MAC pasa a la subcapa Control MAC Multipunto únicamente las tramas válidas, evitando las no válidas en respuesta a la llamada de la función *ReceiveFrame*.

La habilitación de una interfaz de servicio de transmisión es realizada por la instancia de Control MAC Multipunto en colaboración con el Control de Transmisión Multipunto. Las tramas generadas en el Control MAC tienen mayor prioridad que las tramas de cliente MAC. Para la transmisión de estas tramas, la instancia de Control MAC Multipunto habilita el reenvío de las funciones *MAC Control*, pero la interfaz de cliente MAC no se habilita. La recepción de una trama en un MAC habilita la interfaz *ReceiveFrame* del MAC. Al recibir la interfaz MAC, ésta se habilitará en cualquier momento dado que hay una interfaz de capa física. La información de las interfaces activadas se guarda en las variables de estado de control, y son accedidas por el bloque *Control Multiplexing*.

La subcapa de Control MAC Multipunto usa los servicios fundamentales de la subcapa para intercambiar datos y tramas de control.

Operación de recepción en cada instancia:

- a)** Una trama se recibe del MAC subyacente.
- b)** La trama se analiza según el campo *Length/Type*.

- c) Las tramas *MAC Control* son demultiplexadas según el *opcode* y reenviadas a las funciones del proceso pertinentes.
- d) Se reenvían las tramas de datos al cliente MAC.

Operación de transmisión en cada instancia:

- a) El cliente MAC señala una trama de transmisión.
- b) Un bloque de proceso de protocolo intenta emitir una trama, como resultado de una petición específica o como resultado de un evento MPCP que genera una trama.
- c) Cuando se permite transmitir por el bloque de Control de Transmisión Multipunto, la trama se reenvía.

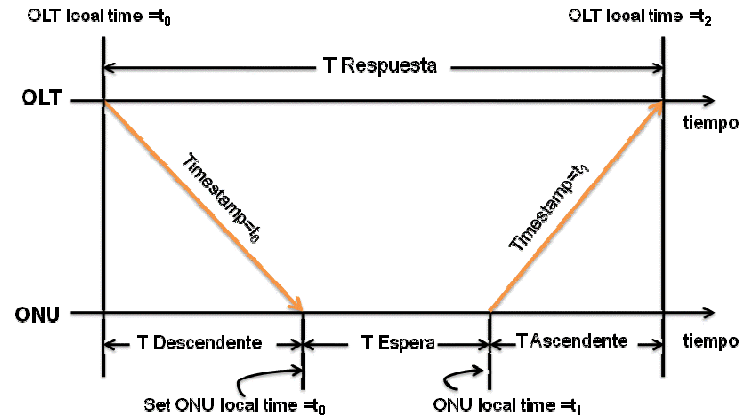
2.3.7.2.1 Procesos de Ranging y Timing

La OLT y las ONUs tienen contadores de 32 bits que se incrementan cada 16 ns. Estos contadores proporcionan una estampa de tiempo local. Cuando cualquier dispositivo transmite una PDU MPCP (MPCPDU), se marca su valor de contador en el campo *timestamp*. El tiempo de transmisión del primer octeto de una trama MPCPDU desde el Control MAC al MAC se toma como el tiempo de la referencia usado para poner el valor de *timestamp*. Cuando la ONU recibe MPCPDUs, pone su contador según el valor del campo *timestamp* del MPCPDU recibido.

Cuando la OLT recibe MPCPDUs, usa los valores de *timestamp* recibidos para calcular o verificar el tiempo de viaje entre la OLT y la ONU. El RTT es igual a la diferencia entre el valor del cronómetro y el valor en el campo *timestamp*. El RTT calculado es notificado al cliente, el cual puede usar este RTT para el proceso de *ranging*.

Una condición de error de tendencia de *timestamp* ocurre cuando la diferencia entre los relojes de la OLT y la ONU excede algún umbral predefinido. Esta condición puede descubrirse independientemente por la OLT o por una ONU.

La OLT descubre esta condición cuando una diferencia absoluta entre valores nuevos y viejos de RTT medidos para una ONU dada excede el valor de *guardThresholdOLT*, como se muestra en la figura 2.35.



$$T_{\text{DOWNSTREAM}} = \text{Retardo de propagación del flujo de bajada}$$

$$T_{\text{UPSTREAM}} = \text{Retardo de propagación del flujo de subida}$$

$$T_{\text{WAIT}} = \text{Tiempo de espera en la ONU} = t_1 - t_0$$

$$T_{\text{RESPONSE}} = \text{Tiempo de respuesta en el OLT} = t_2 - t_0$$

$$\text{RTT} = T_{\text{DOWNSTREAM}} + T_{\text{UPSTREAM}} = T_{\text{RESPONSE}} - T_{\text{WAIT}} = (t_2 - t_0) - (t_1 - t_0) = t_2 - t_1$$

Figura 2.35 Cálculo del tiempo de viaje RTT [39]

Una ONU descubre una condición de error de tendencia de *timestamp* cuando la diferencia absoluta entre un *timestamp* recibido en un MPCPDU y los contadores locales exceden el *guardThresholdONU*.

2.3.7.2 Control de transmisión multipunto, *Control Parser* y *Control Multiplexer*

El propósito del control de transmisión multipunto es permitir solamente a uno de los múltiples clientes MAC, transmitir a su MAC asociado y subsecuentemente a la capa RS a un tiempo, solo para hacer útil una señal *transmitEnable* a la vez.

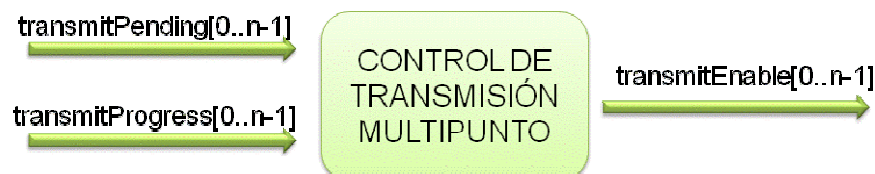


Figura 2.36 Interfaces del Servicio de Control de Transmisión Multipunto [40]

El bloque de función de n de la instancia de control MAC multipunto se comunica con el Control de Transmisión Multipunto usando las variables de estado *transmitEnable[n]*, *transmitPending[n]* y *transmitProgress[n]*.

Control Parser es responsable del análisis independiente de *opcode* de las tramas MAC en la vía de recepción, identificando las tramas *MAC Control* y demultiplexándolas en múltiples entidades para el manejo de eventos.

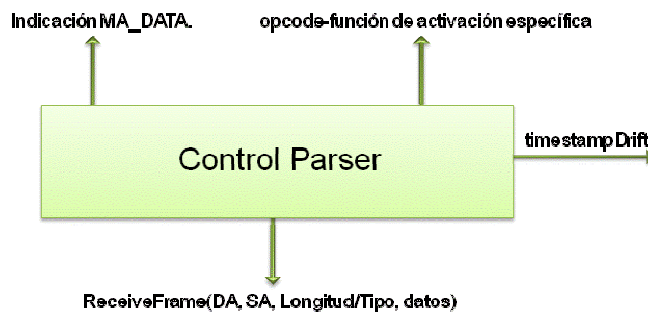


Figura 2.37 Interfaces de servicio de *Control Parser* ^[41]

Control Multiplexer es el responsable del reenvío de las tramas desde las funciones específicas *opcode* del *MAC Control* y el cliente MAC, a la MAC. El multiplexado se realiza en la dirección de transmisión. En la OLT, las múltiples instancias MAC comparten el mismo Control MAC Multipunto, resultando que el bloque de transmisión esté habilitado basado en una señal de control externo localizada en el Control de Transmisión Multipunto para evitar la sobrecarga de transmisión.

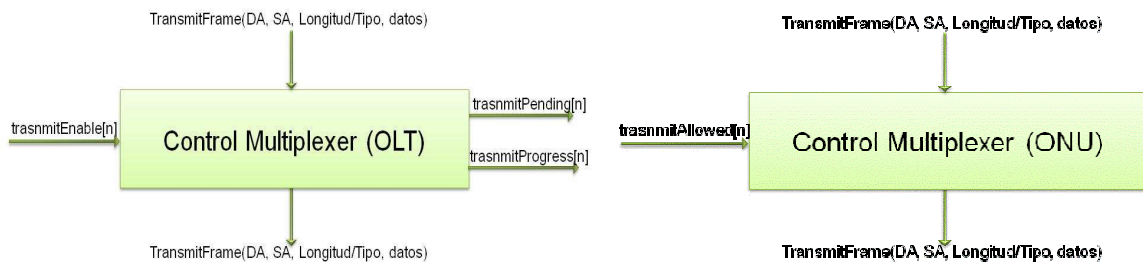


Figura 2.38 Interfaces de servicio de *Control Multiplexer* ^[42]

2.3.7.3 Protocolo de Control Multipunto (MPCP)

Tal como se observó en la figura 2.34, el bloque funcional del Control MAC Multipunto comprende las siguientes funciones:

- a) *Proceso de descubrimiento.* Este bloque maneja el proceso de descubrimiento a través del cual una ONU se descubre y registra en la red mientras se da un RTT.
- b) *Proceso de reporte.* Este bloque maneja la generación y colección de los mensajes de reporte a través de los cuales se envían los requisitos de ancho de banda que son transmitidos en el flujo de subida desde la ONU hasta la OLT.
- c) *Proceso de portal.* Este bloque maneja la generación y colección de mensajes de portal a través de los cuales se logra la multiplexación de los múltiples transmisores.

El sistema de capas puede requerir múltiples entidades MAC, usando una sola capa física. Cada MAC requerida se comunica con una instancia de bloque funcional específico de *opcode* a través del Control MAC Multipunto. Además algunas variables globales son compartidas por las múltiples instancias. El control de estado común se usa para sincronizar las múltiples MACs usando los procedimientos del MPCP. El funcionamiento del control de estado común generalmente es considerado fuera del alcance de las especificaciones del estándar.

2.3.7.3.1 Fundamentos del Protocolo de Control Multipunto

El Control MAC Multipunto habilita a un cliente MAC para participar en una red óptica punto a multipunto permitiéndole transmitir y recibir las tramas como si estuviese conectado a un enlace dedicado, para ello, emplea los siguientes fundamentos y conceptos:

Un cliente MAC transmite y recibe tramas a través de la subcapa MAC Multipunto. El Control MAC Multipunto decide cuándo permitir que una trama sea transmitida usando la interfaz de cliente *Control Multiplexer*.

Dada una oportunidad de transmisión, el control MAC puede generar tramas de control que se transmitirían previamente a las tramas del cliente MAC, utilizando la habilidad inherente de proporcionar transmisión de prioridad superior de tramas de control MAC sobre tramas de cliente MAC.

Múltiples MACs operan en un medio compartido permitiendo a una sola MAC transmitir en el flujo de subida en cualquier momento dado por la red que usa un método de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA).

Los nuevos dispositivos son descubiertos en la red y permiten la transmisión a través de las funciones del proceso de descubrimiento. Se logra un control minucioso de la distribución de ancho de banda usando mecanismos de regeneración apoyados en las funciones del proceso de reporte. El funcionamiento de la red P2MP es asimétrico, con la OLT que asume el papel de maestro, y la ONU que asume el papel de esclavo.

2.3.7.3.2 Consideraciones de compatibilidad

Operación PAUSE

Aunque MPCP es compatible con el control de flujo, el uso optativo de éste puede no ser eficiente en el caso de retardos de propagación elevados.

Emulación LAN compartida opcional

Combinando P2PE, reglas de filtración convenientes en la ONU y, la filtración conveniente y reglas remitidas al OLT, es posible emular una LAN compartida eficiente. El soporte para la emulación de LAN compartida es optativo, y requiere una capa adicional sobre la MAC que está fuera del alcance del estándar.

Multidifusión y soporte de copia simple de distribución

En la dirección del flujo de bajada, la PON es un medio de difusión. Para hacer uso de esta capacidad para el reenvío de tramas de difusión desde la OLT a los múltiples destinatarios sin la duplicación múltiple para cada ONU, se introduce el soporte de copia simple de distribución SCB (*Single-Copy Broadcast*).

La OLT tiene por lo menos un MAC asociado con cada ONU. Además uno o más MAC en la OLT es marcado como SCB MAC. El SCB MAC se ocupa de todo el tráfico de difusión del flujo de bajada, pero nunca se usa en la dirección del flujo de subida para el tráfico del cliente, salvo en el registro del cliente. Pueden implementarse capas superiores optativas para realizar una difusión selectiva de tramas. Tales capas pueden demandar MACs adicionales (MACs *multicast*) para ser requeridas en la OLT para algunas o todas las ONUs que aumentan el número total de MACs.

Cuando se conecta el SCB MAC a un puerto de un puente 802.1d, es posible que puedan formarse lazos debido a la naturaleza *broadcast* de transmisión; es por eso que se recomienda no hacerlo.

Requerimientos de retraso

El protocolo MPCP confía en una base de tiempo estricta basada en la distribución de *timestamps*. Una implementación conforme necesita garantizar un retardo constante a través de la MAC y de la capa física para mantener la exactitud del mecanismo de *timestamping*. El retardo real es dependiente de la implementación; sin embargo, una implementación mantendrá una variación de retardo de no más de 16 tiempos de *bit* a través de la pila MAC implementada.

2.3.8 OPERACIÓN, ADMINISTRACIÓN Y MANTENIMIENTO (OAM)

La subcapa OAM provee mecanismos útiles para el monitoreo de la operación de los enlaces tal como indicaciones remotas de falla y controles remotos de lazo de retorno (*loopback*). En general OAM provee a la red operar la disponibilidad para

monitorear su “salud” y rápidamente localizar los enlaces con falla o las condiciones de error.

OAM no incluye funciones tales como mantenimiento de estación, determinación de ancho de banda o funciones de aprovisionamiento, las cuales son consideradas de manera propietaria fuera del alcance de EFM en IEEE802.3ah.

2.3.8.1 Posicionamiento de OAM dentro de la arquitectura IEEE 802.3

OAM compromete una subcapa opcional entre una subcapa superior y una inferior. La figura 2.39, muestra la relación de la subcapa OAM con el modelo de referencia ISO/OSI.

2.3.8.2 Consideraciones de compatibilidad

OAM está proyectada para enlaces IEEE 802.3 punto a punto y emulados punto a punto, su implementación y funcionalidad son opcionales.

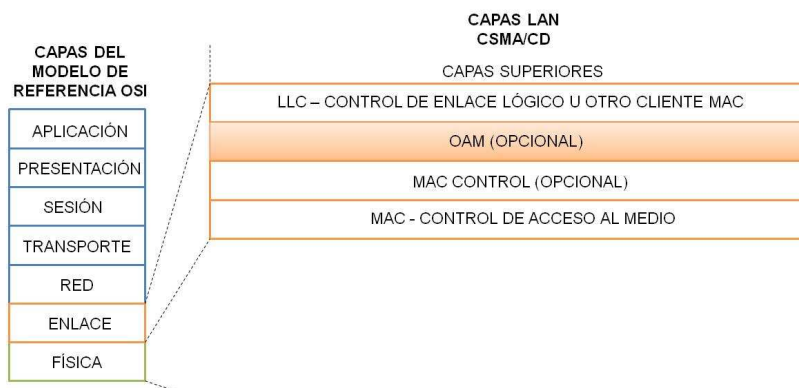


Figura 2.39 Relación de OAM dentro del modelo ISO/OSI ^[43]

La subcapa opcional OAM puede efectuar una implementación para algunos puertos dentro de un sistema y no para otros de ellos.

Un DTE está capacitado para determinar si un DTE remoto tiene o no habilitado la funcionalidad OAM. El mecanismo de descubrimiento de OAM determina los parámetros configurados y funciones soportados en un enlace dado.

2.3.9 RENDIMIENTO EPON

El rendimiento de una EPON depende en lo particular del esquema de asignación de ancho de banda. Escoger el mejor esquema de asignación, sin embargo, no es una tarea trivial. Si todos los usuarios forman parte del mismo dominio administrativo (dicho a una red corporativa o de campus), tendría sentido la multiplexación estadística¹, que permitiría a los administradores de red conseguir más del ancho de banda disponible.

Sin embargo, las redes de acceso de suscriptores no son LANs privadas y el objetivo asegura conformidad con acuerdos de nivel de servicio (SLA) para cada usuario final. Usando mecanismos de multiplexación estadística para brindar a cada usuario ancho de banda de mejor esfuerzo puede complicar la facturación y potencialmente contrarrestar el manejo de anchos de banda mayores al usuario. También, los suscriptores pueden habituarse y esperar el rendimiento que se ofrece durante horas de poca actividad donde los *slots* de ancho de banda de mejor esfuerzo están disponibles. Por tanto, en las horas pico², los mismos usuarios percibirán el servicio como insatisfactorio, aun cuando es el que está garantizado por su SLA. Un algoritmo optimizado de asignación de ancho de banda finalmente dependerá del SLA futuro y el modelo de facturación usado por el proveedor de servicio. Esta noción ha conducido a un modelo de “tubería fija” para una red de acceso. La tubería fija asume que cada usuario acordará y pagará por un ancho de banda fijo independiente de las condiciones de la red o aplicaciones usadas por la misma. Ya que el ancho de banda contratado debe estar disponible en cualquier momento, este modelo no soporta sobresuscripción. Correspondientemente, los operadores de red no están deseosos por dar a los usuarios un ancho de banda de mejor esfuerzo adicional. No es fácil facturar y los usuarios no están dispuestos a pagar ya que dicha medición es rigurosa. En un sentido, este modelo opera como un circuito fijo dado a cada cliente.

¹ La multiplexación en tiempo estadística proporciona un servicio generalmente más eficiente que la técnica TDM síncrona para el soporte a terminales. Las ranuras temporales en TDM estadística no están preasignadas a fuentes de datos concretas, sino que los datos de usuario se almacenan y transmiten tan rápido como es posible haciendo uso de las ranuras temporales disponibles.

² Hora pico: Período continuo de una hora de duración comprendido enteramente en el intervalo de tiempo en cuestión, en que el volumen de tráfico o el número de tentativas de llamada son máximos.

Recientemente, sin embargo, ha existido un cambio hacia un nuevo paradigma. Si las ofertas de ancho de banda son más económicas, los ingresos que los proveedores de servicio obtienen del tráfico de datos serán menores. Correspondientemente, muchos portadores se quejan de esta situación, ya que éstos deben adecuar el incremento de tráfico en sus redes; es decir, una continua mejora en sus redes por lo que aumentan sus gastos, y sus ingresos serán constantes o incluso decrecientes. En estos últimos años, se ha vuelto aparente que el ancho de banda no pueda generar suficiente ingreso. El nuevo pensamiento entre operadores de telecomunicaciones demanda facturación basada en servicio, de acuerdo a la cual los usuarios pagan por los servicios que adquieren y no por el ancho de banda suministrado. En este modelo, los operadores de red están deseosos de emplear multiplexación estadística para ser capaz de soportar más servicios sobre la red.

2.3.10 SEGURIDAD

La seguridad nunca ha sido una parte fuerte de las redes *Ethernet*. En *Ethernet* punto a punto *full dúplex*, la seguridad no es un asunto crítico ya que sólo existe comunicación entre dos estaciones, usando un canal privado. En *Ethernet half dúplex* compartido, las preocupaciones de seguridad son minimizadas porque los usuarios solo forman parte de un dominio administrativo y están sujetos al mismo conjunto de políticas. EPON, sin embargo, tiene un conjunto diferente de requerimientos, en su mayor parte debido a su uso pretendido en ambientes de acceso del suscriptor. EPON presta servicios a pocas empresas cooperativas, usuarios privados, pero por otra parte, tiene un canal *downstream broadcasting*, potencialmente disponible para cualquier parte interesada capaz de manejar una estación final en modo promiscuo. En general, para asegurar la seguridad EPON, los operadores de red deben ser capaces de garantizar privacidad al suscriptor, y deben proveer mecanismos para el control de acceso del suscriptor a la infraestructura.

En un ambiente de acceso residencial, los usuarios individuales esperan que sus datos permanezcan privados. Para aplicaciones de acceso de negocios, este

requerimiento es fundamental. Los dos problemas principales asociados con la falta de privacidad son susceptibilidad del suscriptor por ser escuchado indebidamente por sus vecinos (un asunto del suscriptor), y la susceptibilidad para el robo de servicios (un asunto del proveedor de servicios). A continuación se examinan dichos problemas.

2.3.10.1 Amenaza de Escucha Indebida

En EPON, una amenaza de escucha indebida es posible por la operación de una ONU en modo promiscuo: siendo expuesto a todo tráfico *downstream*, tal ONU puede escuchar tráfico pretendido por otras ONUs.

La emulación punto a punto añade enlaces IDs (*Identifiers*) que permiten a una ONU reconocer tramas intencionadas para dicha ONU, y filtrar fuera el resto. Sin embargo, este mecanismo no ofrece la seguridad requerida, pues una ONU podría desactivar este filtrado, y monitorear todo el tráfico.

La transmisión *upstream* en una EPON relativamente es más segura. Todo tráfico *upstream* es multiplexado, y es visible solo para la OLT (debido a la directividad del combinador pasivo). Aunque, Las reflexiones podrían ocurrir en el combinador pasivo, enviando alguna señal *upstream* y de nuevo *downstream*, la transmisión *downstream* está en una longitud de onda diferente que las transmisiones *upstream*. Así, la ONU es “ciega” al tráfico reflejado que no se procesó en el circuito de recepción.

El tráfico *upstream* también puede ser interceptado en el divisor/combinador PON, conforme los divisores y combinadores en su mayoría son elaborados como dispositivos simétricos, por ejemplo, si bien un solo puerto del acoplador está conectado a un tronco de fibra, más puertos están disponibles. Un dispositivo sensible a longitudes de onda *upstream* puede ser conectado a longitudes de onda *downstream* similar a un puerto sin uso. Este dispositivo podría interceptar todas las comunicaciones *upstream*.

2.3.10.2 Robo de servicios

El robo de servicios ocurre cuando un suscriptor asume el rol de otro suscriptor vecino, y transmite tramas que no son facturadas de acuerdo a la cuenta del imitador. La OLT obtiene la identidad de suscriptor a través de un enlace ID insertado por cada ONU en los preámbulos de la trama. Este enlace ID puede ser falseado por la ONU maliciosa cuando transmita en la dirección *upstream*. Por supuesto, para poder transmitir en el *slot* de tiempo secuestrado, el imitador ONU también debería escuchar a escondidas para recibir mensajes GATE dirigidos a una víctima.

2.3.10.3 Encriptación como alternativa de solución

La encriptación de la transmisión *downstream* impide la amenaza de escucha indebida cuando la clave de encriptación no está compartida. Así, se crea un túnel punto a punto, lo cual permite comunicaciones privadas entre la OLT y las diferentes ONUs.

La encriptación de la transmisión *upstream* impide la intercepción del tráfico *upstream* cuando se agrega al divisor PON un *Tap*. La encriptación también impide la personificación de la ONU: los datos de llegada desde una ONU deberían ser encriptados con una clave disponible para dicha ONU. Existen métodos seguros de distribución de clave, pero están fuera del alcance de este proyecto.

La encriptación y desencriptación se pueden implementar en: la capa física, la capa enlace de datos, o en capas superiores¹. Implementar encriptación sobre la subcapa MAC encriptará sólo el *payload* de la trama MAC, y deja los *headers* en texto simple. En ese escenario, la transmisión MAC calculará la Secuencia de Comprobación de Trama (FCS) para encriptar el *payload*, y la recepción MAC verificará la integridad de la trama recibida antes de pasar el *payload* a una

¹ Actualmente el estándar EPON no presenta algún método de encriptación en sus capas inferiores. El presente proyecto permite una visión sobre la implementación de encriptación en las capas inferiores.

subcapa superior para la descriptación. Este esquema impide que ONUs maliciosas lean el *payload*, pero todavía pueden aprender otras direcciones MAC de las ONUs.

Alternativamente, la encriptación puede implementarse debajo de la MAC. En ese esquema, la máquina de encriptación, encriptará el flujo total de bits, incluyendo los *headers* de la trama y la FCS. En la recepción final, la descriptación, descriptará los datos antes de pasar por la MAC para su verificación. Dado que las claves de encriptación son distintas para ONUs diferentes, las tramas no destinadas a una ONU no son descriptadas y por tanto serán rechazadas. Implementar una capa de encriptación debajo de la MAC parece ser un método confiable y más seguro.

Método de encriptación

La transmisión *downstream* en una EPON es un canal de comunicación basado en tramas en las cuales cada trama se la direcciona a un destino diferente. Como cada trama es una pieza independiente de información, el método de encriptación no puede basarse en flujos. La solución más apropiada es una codificación basada en bloques que encripta cada trama separadamente. El enlace del campo ID localizado en cada preámbulo de la trama puede usarse para identificar un túnel entre la OLT y una ONU. Este *header* puede usarse también para soportar mecanismos de encriptación en la EPON. Con este propósito uno de los *bytes* de reserva en el *header* se emplea como índice de clave (identificador clave) (Figura 2.40). Basado en el valor de dicho campo es posible determinar si las tramas son encriptadas, y qué clave (identificador) fue usada.

Cada ONU posee una clave que es válida para la sesión actual. El identificador clave pone referencias a las claves en la ONU. Este comportamiento permite disminuir la transmisión de una sesión válida a la siguiente, cuando nuevamente la sesión sea identificada por clave. Un identificador clave predeterminado es usado para enviar tramas no encriptadas. Este mecanismo tiene incorporado: expansión y diferentes índices de clave, los cuales pueden conducir a diferentes

algoritmos de cifrado, y así permitir a los sistemas de acceso condicionales en la capa 2, eventuales implementaciones.

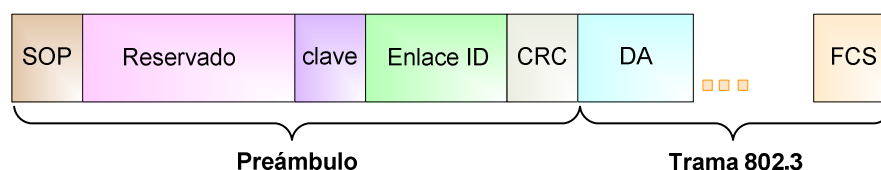


Figura 2.40 Preámbulo de la trama con enlaces ID acoplados y encriptación mediante índices de clave ^[44]

La renovación del índice de clave periódicamente permite mantener seguridad en los túneles establecidos continuamente. Como el cifrado del bloque usa tamaños fijos de bloques, y las tramas *Ethernet* son de longitud variable, el límite del bloque puede ser diferente para el límite del paquete, y el último bloque será rellenado para alcanzar el tamaño de bloque requerido. Como el rellenar ceros es una debilidad potencial en la encriptación, se usa un método alternativo en el cuál los últimos n bits ($n < 128$) pasan por una XOR con el resultado de una segunda iteración cifrada del penúltimo bloque. El algoritmo estándar de encriptación avanzado (AES), originalmente diseñado para reemplazar el envejecido estándar de encriptación de datos (DES), es considerado para PONs *Ethernet*. Este algoritmo permite el uso de claves de 128 bits, 192 bits o 256 bits.

2.3.11 CALIDAD DE SERVICIO

EPON ofrece muchas ventajas en cuanto a costos posibilitando al proveedor de servicios obtener beneficios sobre una plataforma altamente económica. Sin embargo, las capacidades de *Ethernet* para asegurar voz en tiempo real y servicios de video sobre IP, sobre una simple plataforma no tienen la misma calidad de servicio y facilidad de administración como ATM o SONET.

OBJETIVO	SOLUCIONES ATM Y SDH	SOLUCIÓN <i>ETHERNET</i> PON
Servicio en tiempo real	El diseño de la arquitectura y servicios orientados a conexión de ATM aseguran la calidad y confiabilidad requerida para servicios de tiempo real.	Un equipo <i>routing/switching</i> que ofrece IP/ <i>Ethernet</i> con un avanzado control de admisión, ancho de banda garantizado, tráfico en orden, y recursos de administración de la red, extienden significativamente las soluciones de <i>Ethernet</i> existentes en LANs tradicionales.

Multiplexación estadística	Tráfico en orden y recursos de administración de la red permiten repartir ancho de banda entre usuarios de servicios de tiempo no real. El ancho de banda dinámico necesita implementación.	Funcionalidad de administración de tráfico que atraviesa la arquitectura interna y el interfaz externo provee una política coherente basada en la administración de tráfico que atraviesan las OLTs y ONUs. El tráfico IP que fluye es inherente conservando el ancho de banda (multiplexaje estadístico).
Entrega multiservicio	Estas características trabajan en conjunto para asegurar que la firmeza sea mantenida entre diferentes servicios coexistentes en una red común.	Prioridades de servicio y SLAs aseguran que los recursos de la red están siempre disponibles para un servicio en específico del cliente. Proporcionando al proveedor un servicio de control, como CATV y video IP interactivo.
Capacidades de Administración	Un sistemático aprovisionamiento de tramas de trabajo y una avanzada funcionalidad de administración realzan la operación de herramientas disponibles para administrar la red.	Integrando al EMS con los OSSs (<i>Operation Support Systems</i>) de los proveedores de servicios emula los beneficios de redes orientadas a conexión y las facilidades de aprovisionamiento, desarrollo y administración de servicios IP y <i>end to end</i>
Protección	Línea conmutada de un anillo bidireccional (BLSR) y paquetes conmutados de un anillo unidireccional (ULSR) proveen un total sistema de redundancia y restauración	Arquitectura de cuenta de rotación en anillo provee protección conmutando en sub intervalos de 50ms.

Tabla 2.9 Comparación entre servicios ATM y SDH y EPON

Este problema ha sido atacado desde algunos ángulos: Primero implementando métodos de diferenciación de servicios *DiffServ*¹ y 802.1P, los cuales priorizan el tráfico para diferentes niveles de servicios. Utilizando una técnica de tipo de tráfico denominada campo TOS² (*Type of Service*), la cual provee 8 capas de priorización³ que aseguran que los paquetes viajan en orden de importancia.

¹ DiffServ, *Differentiated Services*: Un protocolo QoS (*Quality of service*, calidad de servicio) que prioriza paquetes provenientes del servicio de VoIP frente a los demás para asegurar una buena calidad de voz, aun cuando el tráfico de red es alto. Se puede profundizar en: <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3768/1/54630-1.pdf>.

² Tipo de Servicio (TOS): Especifica como un protocolo de capa superior desea le sean enviados sus datagrama a través de la subred de comunicaciones.

³ Capas de priorización del campo TOS (*Type of Service*): 0-Mejor esfuerzo, 1-*Background*, 2-Repuesto, 3-Exelente esfuerzo, 4-Carga controlada, 5-Video, 6-Voz, 7-Control de red. Se puede profundizar en: la norma IEEE 802.1P.

Otra técnica, llamada de reserva de ancho de banda, provee una vía rápida abierta que garantiza el tráfico POTS que no tiene que contender con los datos.

Para ilustrar alguna de las diferentes aproximaciones que emulan las capacidades de servicio en una EPON, en la Tabla 2.9 se resalta los objetivos que ATM y SONET proveen con mayor efectividad. (1) La calidad y confiabilidad requerida para servicios de tiempo real, (2) multiplexación estadística para administración efectiva de los recursos de la red, (3) entrega multiservicios para permitir una entrega justa de ancho de banda entre usuarios, (4) herramientas para proveer, administrar, operar redes y servicios; (5) sistema completo de redundancia y restauración.

En cada caso, EPONs es diseñado para entregar servicios y objetivos comparables usando tecnologías IP y *Ethernet*. Algunas veces esto requiere desarrollar nuevas técnicas, las cuales no son adecuadas para reflejar compatibilidad con los estándares y características de ATM y SONET. Estas técnicas permiten a EPON transmitir información con la misma confiabilidad, seguridad y calidad de servicio (QoS) que las más caras soluciones SONET y ATM. Un sistema completo de redundancia que provee alta disponibilidad y soporte con protección para una arquitectura de anillo. Seguridad multicapa, que al igual que VLAN encierra un grupo de usuarios y da soporte VPN, IPsec¹ y *tunneling*.

2.4 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LAS REDES EPON Y GPON

[4]

Encontrar la tecnología correcta para cubrir la última milla de cualquier red siempre ha sido un reto por parte de los proveedores de servicios. Determinar la solución óptima puede ser un proceso complicado con numerosos factores que se necesita tener en cuenta. Los principales operadores de telecomunicaciones del mundo están definiendo redes convergentes avanzadas de banda ancha basadas

¹ IPsec (abreviatura de *Internet Protocol security*) es un conjunto de protocolos cuya función es asegurar las comunicaciones sobre el Protocolo de Internet (IP) autenticando y/o cifrando cada paquete IP en un flujo de datos. IPsec también incluye protocolos para el establecimiento de claves de cifrado. Se puede profundizar en: <http://es.wikipedia.org/wiki/IPsec>.

en IP, que permiten ofrecer más servicio sobre la misma infraestructura, a precios cada vez más competitivos. Además de reducir la inversión necesaria en equipamiento de red, esta convergencia trae consigo para los operadores una reducción en la complejidad de la gestión y unos costes operativos más bajos. Entre las tecnologías más interesantes que están permitiendo esta convergencia cabe destacar, en parte del bucle de abonado, a EPON y GPON, la tecnología de acceso mediante fibra óptica con arquitectura punto a multipunto más avanzada en la actualidad.

Años atrás la industria FTTP (*Fiber To The Premise*) ha discutido y debatido tres protocolos PON: BPON, EPON y GPON. Recientemente la industria ha reconocido que la aplicación más atractiva en todo el mundo es IPTV. Consecuentemente, BPON está siendo vista más y más como un despliegue preliminar debido a su falta de ancho de banda. Esto ha dejado a EPON y GPON como los únicos candidatos para desplegar escalabilidad. Actualmente estos dos protocolos ya han sido instalados y experimentados en un número de ambientes del mundo real.

2.4.1 Relación GPON/EPON

En estándar IEEE 802.3 se discute sobre *Ethernet* PON (EPON), tiene una velocidad de transmisión de 1 Gbps en ambas direcciones y transmite tramas *Ethernet* sin alteración. Algunas veces a EPON se lo conoce como GEPON (*Gigabit Ethernet PON*). Mientras GPON tiene la intención de acomodar varios servicios, EPON básicamente transmite tramas *Ethernet*. La UIT-T tuvo la intención de tener una especificación común de la capa física con EPON, como se muestra en la figura 2.41. Debido a la imperfección de las especificaciones por parte de la IEEE, ya que estas básicamente fueron consideradas exclusivamente para uso de *transceivers Ethernet* existentes.

Sin embargo, la UIT-T ha publicado recomendaciones como Q.838¹ en la que se especifican los requisitos y el análisis de la interfaz de gestión entre el sistema de

¹ Se puede profundizar en: Anexo C Conmutación y Señalización, Recomendación UIT-T Q.838.x.

gestión de elementos (EMS) y el sistema de gestión de red (NMS) de las redes ópticas pasivas *Ethernet* (EPON).

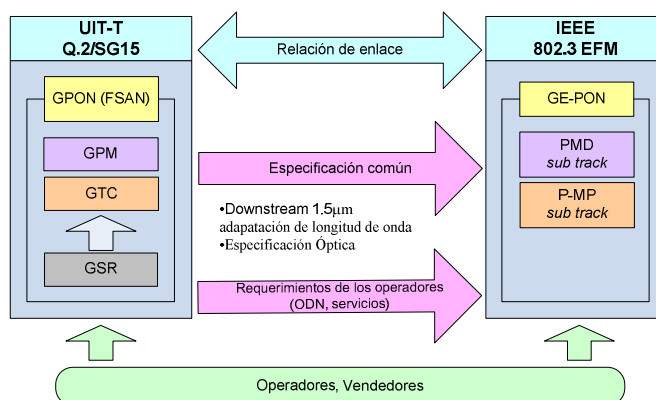


Figura 2.41 Relación entre la UIT-T y EFM [45]

Las funciones de gestión tratadas en la Recomendación son: la gestión de configuración, la gestión de los parámetros de medición de la calidad de funcionamiento y la prueba en bucle de la gestión de fallos. Estas funciones de gestión se describen y dividen mediante casos de utilización del Lenguaje de modelado unificado (UML, *Unified Modeling Language*). Esta Recomendación no abarca todos los aspectos relacionados con la gestión de *Ethernet*, sino únicamente aquéllos relacionados con la gestión de EPON.

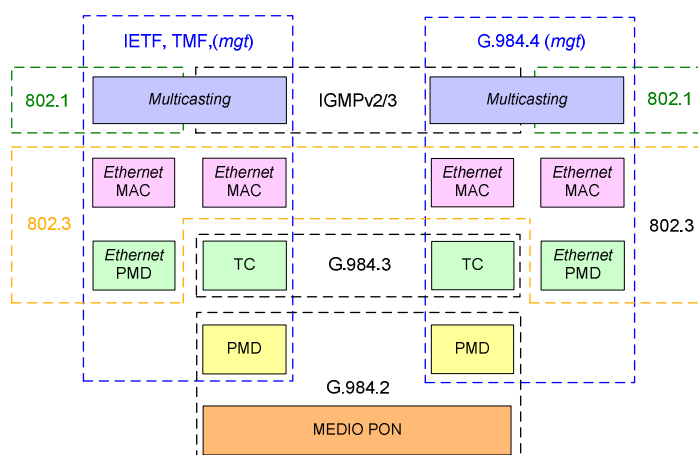


Figura 2.42 Relación de capas entre la EPON y GPON [46]

En la figura 2.42 se ilustran las diferentes capas existentes en el estándar GPON, su relación con el estándar EPON y los diferentes métodos de gestión para la multidifusión, característica principal de dichos sistemas.

2.4.2 Diferencias entre EPON y GPON

Una PON fundamentalmente es diferente a una red *Ethernet* ya que tiene una arquitectura de red única. En sentido descendente existe una configuración punto a multipunto (así como *Ethernet*), pero en sentido ascendente la configuración es punto a punto. Esta diferencia tiene un profundo impacto en el protocolo, significa que las ONTs reciben solo transmisiones de la OLT, es decir no pueden “escuchar” las transmisiones de otras ONTs. Esto, a su vez, implica que las ONTs no pueden detectar colisiones de otras ONTs. Consecuentemente, una PON requiere una arquitectura de red maestro-esclavo donde la OLT es el maestro y la ONT el esclavo.

Por esta razón el comité *Ethernet* (IEEE 802.3) creó un protocolo dedicado a redes PON llamado EPON. El comité *Ethernet* rápidamente se dio cuenta que todos los protocolos PON deben encapsular tramas *Ethernet* dentro de un encabezado (*header*) específico PON. Esto es cierto para ambos protocolos EPON y GPON. De manera que EPON no es solamente *Ethernet*. Esto se puede comprender de mejor manera si se examina la figura 2.43, dicha figura muestra dos tramas *Ethernet* idénticas. En el lado izquierdo se encuentra la trama encapsulada con EPON, en el lado derecho se muestra la trama encapsulada con GPON. La figura 2.43 muestra algunas similitudes generales entre los dos protocolos. Ambos contienen una sección de cabecera (*overhead*)-mostrada en azul-, una sección de encabezado (*header*)-mostrada en amarillo-, y una sección de carga útil (*payload*)-mostrada en verde-. Para ambos protocolos la sección de *overhead* solo se requiere en sentido *upstream*. Esto facilita la recuperación de datos y reloj en la OLT, la cual recibe transmisiones en ráfagas desde las ONTs. El encabezamiento se requiere en ambos sentidos *upstream* y *downstream* así como también el *payload*.

Se puede ver diferencias entre los dos protocolos examinando sus encabezados respectivos -mostrados en amarillo-. El encabezado EPON contiene dos campos: Un LLID (Identificador lógico del enlace) y un CRC (Comprobación de Redundancia Cíclica). La CRC se usa para verificar si el encabezado se ha

recibido sin errores. En el encabezado GPON se encuentra un campo correspondiente HEC designado para la Corrección de errores en dicho encabezado. La LLID del encabezado EPON se usa para identificar el origen por el cual la trama fue direccionada (o el transmisor desde el cual fue enviado). El encabezado GPON también tiene un campo correspondiente que es etiquetado Port ID. Cada protocolo confía en sus respectivos identificadores para todo direccionamiento en la PON. Específicamente, una ONT EPON usa la LLID para determinar, ya sea para aceptar o descartar paquetes *downstream* mientras que una ONT GPON usa Port-ID.

Esto confirma que EPON no es solamente *Ethernet*, cada uno tiene esquemas de direccionamiento diferentes. EPON usa LLIDs para llevar los paquetes de un extremo de la PON a otro, mientras *Ethernet* usa direccionamientos MAC (*MAC addresses*) para obtener tramas desde un extremo del segmento de la red a otro. La importancia de esto, deja en claro que EPON es fundamentalmente diferente a *Ethernet*.

2.4.3 Manejo de QoS en GPON

La figura 2.43, revela diferencias en los encabezados de EPON y GPON. A pesar que ambos protocolos usan un identificador para direccionamiento, efectivamente el significado de dichos identificadores es diferente. En EPON, LLID esencialmente designa una ONT en particular. En GPON, los Port ID designan no solamente una ONT sino también un servicio en particular (VoIP, IPTV, etc.) dentro de la ONT. Esto es muy importante ya que en la capa inferior el sistema GPON puede diferenciar el tráfico, y por consiguiente establecer prioridades.

Existen otras diferencias entre el encabezado EPON y el Encabezado GPON, según la figura 2.43, existen dos campos adicionales en el encabezado GPON que no están presentes en el encabezado EPON. Éstos son el PLI (*Payload Length Indicator*) y el PTI (*Payload Type Indicator*). El uso de estos campos es otra característica que le da a GPON la habilidad para soportar QoS. Como su nombre lo indica, el campo PLI especifica la longitud del *payload*; esto es crítico

para algoritmos de planificación, y a su vez crítico para QoS. El PTI es un campo de 3 bits usado para indicar si el manejo especial es requerido para el *payload* asociado. Por ejemplo esto se puede usar para representar información adicional del encabezado y/o para indicar fragmentación de paquetes. La fragmentación de paquetes es otra característica significativa de GPON que le permite proveer alta calidad de servicio.

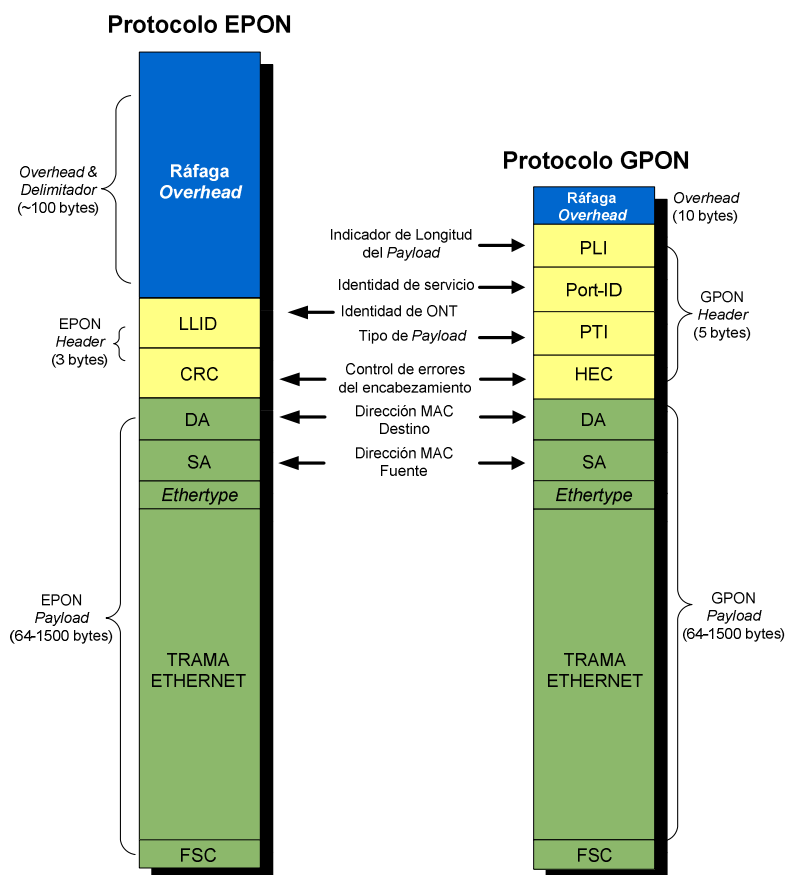


Figura 2.43 Encapsulación de tramas *Ethernet*^[47]

La figura 2.44 muestra como trabaja la fragmentación, se ilustran también dos métodos para transportar un paquete de baja y de alta prioridad, la mitad superior de la figura muestra la técnica usada por EPON para transportar secuencialmente tramas donde cada una es transmitida completamente antes de enviar la siguiente. Lo que a menudo ocurre con este método es que la trama de baja prioridad es más larga (trama #1 en la figura 2.44), por lo que causa un retardo a las tramas de alta prioridad (#2) generalmente de menor tamaño, produciendo así *jitter*. La parte inferior de la figura muestra fragmentación donde la transmisión de la trama de baja prioridad (#1) comienza en el mismo instante como en la figura

superior, pero su transmisión es temporalmente suspendida para permitir que la trama de alta prioridad (#2) sea transmitida. La fragmentación se usa para proveer alta eficiencia en el ancho de banda y baja latencia para tráfico sensitivo en el tiempo. Se tiene en cuenta una eficiencia superior en el ancho de banda ya que permite virtualmente un 100% de asignación en el ancho de banda *upstream* a ser usado. En el caso de baja latencia, la fragmentación elimina el problema de bloqueo “*head of line*” donde un paquete largo, pero de baja prioridad, impide la transmisión oportuna de un paquete corto pero de alta prioridad como se describió anteriormente. Esto se muestra en la figura 2.44.

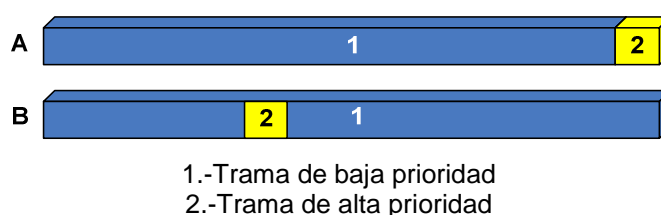


Figura 2.44 Transmisión de una trama *Ethernet* de baja prioridad ^[48]

GPON posee otra capacidad llamada “entramado” que realiza mucho más la capacidad de QoS. Debido al entramado de las transmisiones *upstream* y *downstream* de la GPON, la información se fracciona en segmentos precisos de 125 μ seg llamadas tramas GPON (Ver figura 2.45). Lo recíproco de 125 μ seg es 8 KHz, lo cual por supuesto es la frecuencia de reloj para voz TDM. Al inicio de cada trama GPON, en sentido descendente, existe un bloque corto conservando información que se envía a todas las ONTs. (véase los paquetes cortos negros de la figura 2.45). Posteriormente, se transmiten los tráficos *Ethernet* (con o sin fragmentación) a las ONTs. Esta estructura entramada es crítica para proveer QoS necesaria para tráfico con prioridades altas y sensitivo en tiempo tal como IPTV.

Por otra parte, las redes EPON no describen algún concepto de entramado, consecuentemente la QoS para entregar datos sensitivos en tiempo como IPTV se deja a las capas superiores del protocolo que realicen dicho trabajo. Los protocolos de capas superiores usan sus esquemas de sincronización para compensar lo que debería haber sido provisto por los protocolos de las capas inferiores de la PON.

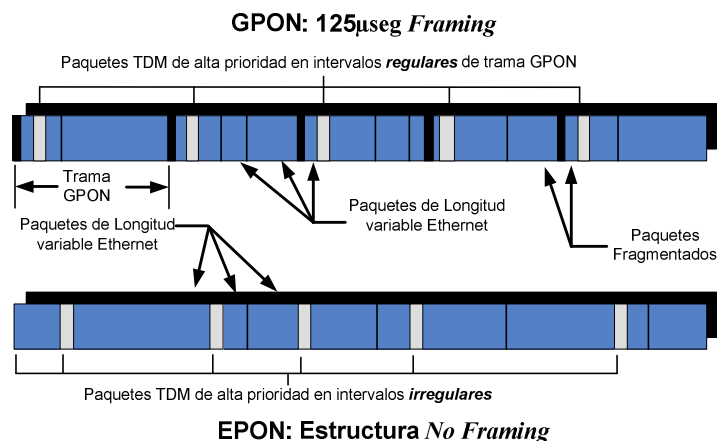


Figura 2.45 Diferencias en la estructura de entramado –Tráfico *downstream* ^[49]

2.4.4 Costo de QoS en EPON versus GPON

Así como se mencionó anteriormente, el protocolo *Ethernet* no tiene capacidad inherente de QoS. Ya que un sistema PON no es viable sin QoS, la mayoría de vendedores lo provee usando etiquetas VLAN (*Virtual LAN*)¹, si bien esto soluciona el problema de QoS, lo hace con un gran costo, ya que el suministro de etiquetas VLAN se realiza de manera manual mas no automáticamente.

La provisión de etiquetas VLAN en la red de *core* (donde miles de flujos se agregan a una VLAN ID), es impertinente para la QoS. Conforme se aleja más en la red, el nivel de agregación es cada vez menor. En las redes de acceso residencial aproximadamente no existe agregación. Típicamente, sólo hay un flujo o servicio por VLAN ID. En este caso es irrazonable y sin costo efectivo gestionar todos los VLAN ID para todos los servicios del suscriptor. Desafortunadamente, para EPON hay muy pocas alternativas.

La mayoría de vendedores EPON han reconocido este problema y han tratado de convertir el desperfecto de la tecnología en una característica del producto, casi todos venden ONTs con múltiples puertos *Ethernet*, donde cada puerto se asigna automáticamente a un único VLAN ID. Esto ha ayudado a reducir el número de pasos de aprovisionamiento, con tal de que el suscriptor conozca qué puerto es para determinado servicio y de esa forma no tener una mezcla de servicios en el

¹ Ver Gestión de VLAN en: Anexo A

mismo puerto. Tener un puerto *Ethernet* separado para cada servicio no es perjudicial cuando la ONT está ubicada en un armario alambrado e instalada por un profesional capacitado. Sin embargo, raramente éste es el caso, lo más común es que la ONT esté ubicada en un sitio remoto al closet alambrado, típicamente en el exterior de la vivienda. En este caso, múltiples cables CAT-5 (uno por cada servicio etiquetado VLAN) deben ser tendidos desde la ONT hacia el armario de alambrado o al cuarto del computador.

La figura 2.46 muestra esquemáticamente dicho trabajo. La parte superior de la figura presenta cómo EPON maneja la QoS, en la parte izquierda del diagrama de red se encuentra un *switch* VLAN, y representa el punto en la red donde la agregación de todos los servicios finales fluye en sentido *downstream* (hacia la derecha) los cuales son transmitidos sobre VLAN IDs separados. En los inicios de EPON, todas las VLAN IDs en el conmutador y en las correspondientes ONTs eran suministradas y mantenidas manualmente. Después de reconocer esta problemática, los vendedores EPON como solución añadieron múltiples puertos. Desafortunadamente, es una solución de dos pasos adelante y un paso atrás, es decir que elimina la mitad del número de pasos manuales de suministro, pero se crea otro problema ya que con la solución anterior de la QoS, totalmente es inaceptable que cualquiera de las ONTs establezca sus VLAN IDs a la EMS.

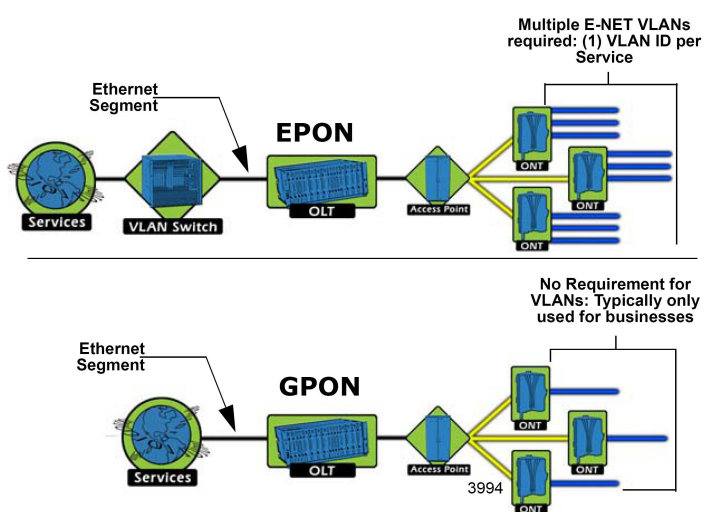


Figura 2.46 Arquitectura QoS EPON vs GPON [50]

Existe una extraordinaria ironía a ser reconocida en este punto. Durante las guerras de *ATM/Ethernet*, los proponentes de *Ethernet* legítimamente atacaron los altos costos del suministro manual de los PVCs ATM. Pero ahora que todo es ATM, se encuentra que *Ethernet* ha conseguido circuitos virtuales permanentes denominados etiquetas VLAN. Todos los requerimientos manuales costosos de PVCs ATM han sido transmitidos a las etiquetas VLAN. Y las legiones desempleadas de técnicos de redes ATM, quienes suministraban y mantenían las bases de datos de PVC ATM, han sido recontratados para mantener la base de datos de VLANs *Ethernet*.

2.4.5 Caracterizaciones erróneas sobre las redes EPON/GPON

La industria FTTP ha reconocido los defectos de EPON por lo que sus vendedores caracterizan erróneamente a GPON como estrategia de mercado. La principal caracterización equivocada es que GPON es un protocolo basado en ATM; como se mostró anteriormente, GPON es primordialmente un protocolo PON para el transporte de *Ethernet*. GPON tiene en cuenta el transporte de celdas ATM como una característica opcional pero el transporte obligatorio en GPON es para *Ethernet*.

Otra caracterización errónea común involucra a la seguridad de los datos. Tomando en cuenta que una red PON es punto a multipunto en el sentido descendente y punto a punto en el sentido ascendente, el protocolo GPON especifica encriptación AES de 128 bits, EPON por otra parte no especifica ninguna encriptación. La mayoría de requerimientos que EPON emplea, deja dicha tarea a las capas superiores. Consecuentemente, un negocio que contrata a un servicio de datos basado en EPON debe implementar su propia red de seguridad tal como IPsec o VPLS¹ (*Virtual Private LAN Service*). Obviamente, dichos mecanismos de seguridad están disponibles en GPON, en conclusión EPON no soporta ninguna encriptación en la capa 1 como lo hace GPON. En la

¹ VPLS es una tecnología que permite crear una red privada virtual de Nivel 2 capaz de soportar múltiples sedes en el interior de un único dominio sobre una red IP/MPLS (*Multiprotocol Label Switching*) gestionada.

tabla 2.10 se resume las diferencias existentes en las redes ópticas pasivas EPON y GPON.

En la siguiente representación se observa las magnitudes en las cuales las tecnologías EPON/GPON difieren.

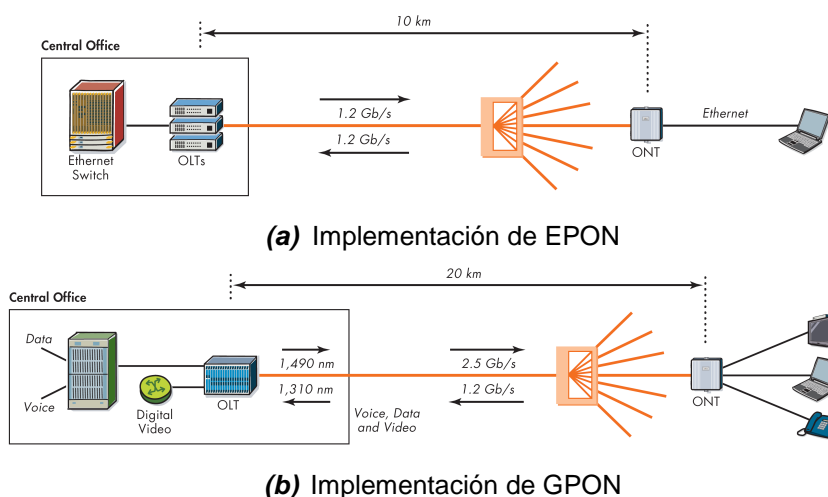


Figura 2.47 Diferencias de implementación EPON/GPON [51]

	EPON	GPON
Estándar	IEEE 802.3ah	ITU-T series G.984
Medio de Transmisión	Alámbrico (FO)	Alámbrico (FO)
Tipo de fibra	Monomodo UIT-T G.652	Monomodo UIT-T G.652
Número de fibras	1	1 o 2
Tasa bits descendente (DS)	1000 Mbps	1244, 2488 Mbps
Tasa bits ascendente (US)	1000 Mbps	155, 622, 1244, 2488 Mbps
División mínima (en capa TC)	16 (Así especificado en IEEE 802.3ah)	64
División máxima (en capa TC)	No especificado	128
Longitud de onda DS/US	1490±10nm/1310±50nm	1490±10nm/1310±50nm
Encapsulado de la información entre OLT y ONU	Sobre tramas <i>Ethernet</i>	Sobre celdas ATM o bien empleando <i>Ethernet</i> o TDM usando para ello GEM (<i>GPON Encapsulation Mode</i>) basado en GFP (<i>Generic Framing Procedure</i>), o dual
Capacidad promedio por usuario	60 Mbps	40 Mbps
Codificación	8B/10B	NRZ
Gama de atenuación¹	Clase A, B	Clase A, B, C
Alcance lógico máximo	10/20 Km (Físico)	10/20 Km (Físico)

¹ Para las especificaciones de atenuación se han supuesto valores de caso más desfavorable, incluyendo pérdidas debido a los empalmes, conectores, atenuadores ópticos (si se utilizan) u otros dispositivos ópticos pasivos, y todo margen adicional relativo al cable. Clase: A: 5-20 dB, B: 10-25 dB y C: 15-30 dB.

soportado por capa TC		60 Km (lógico, debido al protocolo de determinación de la distancia) <i>Ranging</i>
Video	RF/IP	RF/IP
Tercera longitud de onda para video	Ninguna	Estandarizada
Encriptación (Seguridad descendente)	Ninguna	AES
Eficiencia típica (depende del servicio)	~73% downstream ~61% upstream	~93% downstream ~94% upstream
Transporte TDM	Limitada y no estandarizada	Nativo y estandarizado
Soporte TDM	TDM sobre paquetes	TDM nativo, TDM sobre ATM, TDM sobre paquete
Nivelación de Potencia	Ninguna	Estandarizada a 3 niveles
Protección	Ninguna	Protección de fibra Sub 50ms
Costo por enlace ONU [relativo]	78	100
Típica capacidad descendente (para caudal de datos IP)	910 Mbps	1170 Mbps (para v. línea 1,244Gbps)
Típica capacidad ascendente (para caudal de datos IP)	760-860 Mbps	1160 Mbps (para v. línea 1,244Gbps)
OAM	<i>Ethernet</i> OAM (+SNMP opcional)	PLOAM+OMCI

Tabla 2.10 Diferencias entre EPON y GPON

2.5 DIFERENCIAS ENTRE LAS TECNOLOGÍAS EPON/GPON CON WiMAX ^[5]

Es muy importante destacar los beneficios que brindan las tecnologías de acceso de banda ancha. EPON/GPON al ser sistemas que emplean medios guiados aumentan la capacidad en el ancho de banda que ofrecen, esto se puede apreciar en la figura 2.48, a diferencia de WiMAX que utiliza un medio no guiado, por lo que se reduce dicha capacidad. Sin embargo, estas tecnologías de acuerdo a sus diferentes medios de transmisión prometen gran ancho de banda para redes de acceso. Al integrar dichas tecnologías podrán converger servicios, terminales, etc, para una operación más eficiente, eficaz y sobre todo que satisfaga las necesidades de los usuarios ya que la información requerida será transmitida por una sola red.

En los medios de transmisión guiados, la capacidad de transmisión, en términos de velocidad de transmisión o ancho de banda, depende drásticamente de la distancia y de si el medio es punto a punto o punto a multipunto, además poseen un alto grado de seguridad por la naturaleza de los medios guiados en comparación con los medios inalámbricos que están expuestos al medio ambiente. Las redes EPON/GPON utilizan como medio de transmisión la fibra óptica basada en la Recomendación de la UIT-T G.652¹, la cual recomienda las características de la fibra que proporcionan una estructura de diseño esencial para la fabricación de fibras.

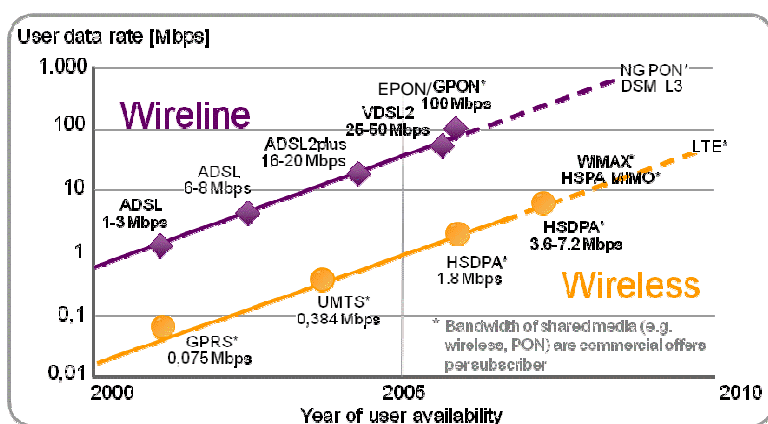


Figura 2.48 Cuadro comparativo entre tecnologías alámbricas e inalámbricas de banda ancha [52]

La fibra óptica es un medio flexible y delgado capaz de confinar un haz de naturaleza óptica, como ventajas se tiene:

Mayor capacidad.- en el ancho de banda potencial y por lo tanto, la velocidad de transmisión en las fibras es enorme, en el caso de las EPON/GPON está en unidades de *Gbps*.

Menor tamaño y peso.- la fibra óptica apreciablemente es más delgada que otros tipos de cableado, lo que conlleva un ahorro sustancial en el espacio requerido para su instalación. La reducción en tamaño lleva asociado una reducción en peso, que disminuye a su vez la infraestructura necesaria.

¹ Medios de Transmisión de las redes EPON/GPON. Ver Anexo D.

Menor atenuación.- la atenuación es significativamente menor en los sistemas que emplean fibras ópticas. Se ilustra en la figura 2.49 las mínimas atenuaciones de la fibra en función de la longitud de onda de operación. Igualmente en dicha figura se puede observar las longitudes de onda en las que EPON/GPON opera tanto en sentido *upstream* como *downstream*.

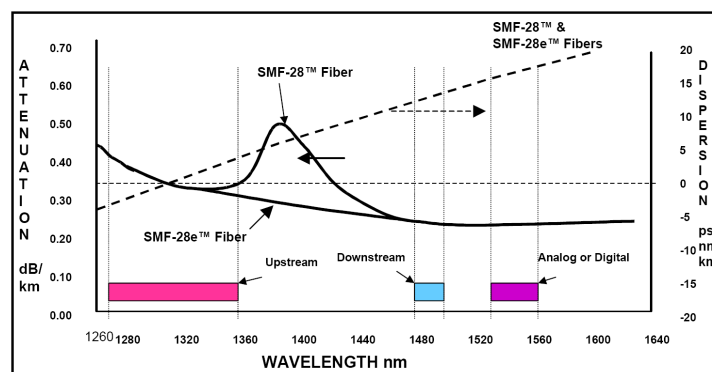


Figura 2.49 Ventanas de operación de las EPON/GPON [53]

Aislamiento electromagnético.- los sistemas de fibra óptica no se ven afectados por los efectos de campos electromagnéticos exteriores. Estos sistemas no son vulnerables a interferencias, ruido impulsivo o diafonía. Por la misma razón, las fibras no radian energía, produciendo interferencias despreciables con otros equipos, lo que proporciona, a la vez, un alto grado de privacidad; además, relacionado con esto, la fibra es por construcción difícil de “pinchar”.

En el caso de WiMAX, utiliza un medio de transmisión no guiado (inalámbrico); tal tecnología opera en las bandas de frecuencia denominadas frecuencias microondas que van desde 2 GHz hasta 11 GHz.

El Acceso Inalámbrico Fijo de Banda Ancha (BFWA, *Broadband Fixed Wireless Access*) se ha relevado como una de las mejores soluciones para atender la demanda creciente de las empresas en materia de servicios de conexión rápida a Internet y de servicios integrados (datos, voz y video) en el bucle local debido a que este tipo de acceso puede prolongar las redes de fibras ópticas y ofrece mayor capacidad que las redes de cable tradicionales.

Uno de los aspectos más convincentes de la tecnología BFWA es que las redes pueden construirse en unas pocas semanas apenas instalando un pequeño número de estaciones base en edificios y sobre pilares para crear sistemas de acceso inalámbrico de gran capacidad. En el caso de las tecnologías xPON requieren de mayor tiempo y costo para su implementación.

Los trabajos de normalización realizados en relación con el BFWA por la IEEE son: los estándares para WiMAX IEEE 802.16a/c/e, la última versión amplía el acceso inalámbrico ofreciendo movilidad (*roaming*). En adición, el rango de soluciones de 802.16, la ausencia del requerimiento de línea de vista, gran ancho de banda, y la inherente flexibilidad y bajo costo ayudan a superar las limitaciones de las tecnologías inalámbricas propietarias.

En adicción al soporte de un esquema de modulación robusto y dinámico, el estándar IEEE 802.16 también ofrece tecnologías que incrementan la cobertura incluida la tecnología de malla (*mesh*) y las técnicas de “antena inteligente”. Mientras la tecnología de radio mejora y los costos bajan, la habilidad de incrementar la cobertura y las tasas de transferencia usando múltiples antenas para crear diversidad en transmisión y/o recepción, aumentará sensiblemente la cobertura en escenarios externos.

WiMAX promete alcances de hasta 50 Km, gran ventaja con respecto a los 20 Km de EPON/GPON; y gracias a la nueva versión de WiMAX que brinda movilidad superaría las capacidades de EPON/GPON ya que éstas son tecnologías netamente fijas sin movilidad.

Se puede observar en la tabla 2.11 algunas diferencias que poseen tanto las redes alámbricas (EPON/GPON) como las inalámbricas (WiMAX).

Otra diferencia respecto a las redes PON y WiMAX se aprecia en la figura 2.50, y representa el número de suscriptores a nivel mundial divididos por regiones y muestra una relación significativa de usuarios de las redes WiMAX con respecto a las redes PON (aproximadamente 2 a 1), debido a los altos costos de instalación

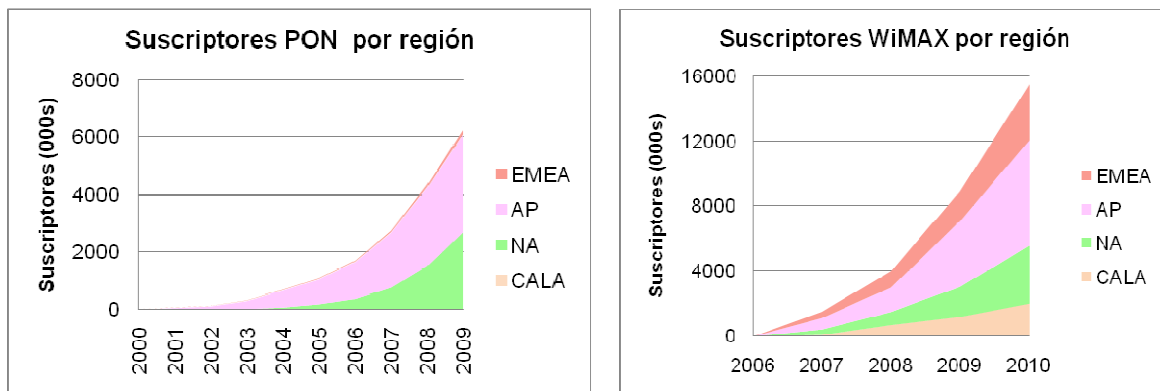
de la infraestructura que las tecnologías alámbricas poseen frente a las inalámbricas.

	EPON	GPON	WiMAX
Estándar	IEEE 802.3ah	ITU-T series G.984	IEEE 802.16x
Medio de Transmisión	Alámbrico (FO)	Alámbrico (FO)	Inalámbrico
Modo de Transmisión	P2MP	P2MP	P2P/P2MP
Protocolos de capa dos	<i>Ethernet</i>	<i>Ethernet</i> , TDM sobre GEM (<i>GPON Encapsulation Mode</i>), ATM	TDM, T1/E1, ATM, <i>Ethernet</i> , voz, Frame Relay
Tasa bits descendente (DS)	1000 Mbps	1244, 2488 Mbps	~70Mbps
Tasa bits ascendente (US)	1000 Mbps	155/622, 1244, 2488 Mbps	~50Mbps
Alcance lógico máximo soportado por capa TC	10/20 Km (Físico)	10/20 Km (Físico) 60 Km (lógico, debido al protocolo de determinación de la distancia) <i>Ranging</i>	IEEE 802.16-2004: 50Km (sin línea de vista) IEEE 802.16e: 5Km
Codificación	8B/10B	NRZ+Aleatorización	Aleatorización, FEC e <i>Interleaving</i>
Modulación	Ninguna	Ninguna	QPSK, QAM, OFDMA adaptiva
Video	RF/IP	RF/IP	RF/IP
Seguridad	Ninguna	AES	CCM AES
Fragmentación	No	Si	Si
OAM	<i>Ethernet</i> OAM (+SNMP opcional)	PLOAM+OMCI	SNMP, TFTP, DHCP, etc.

Tabla 2.11 Diferencias entre EPON/GPON con la tecnología WiMAX

Adicionalmente en la figura 2.50, se puede apreciar que en los países Asiáticos del Pacífico (Japón, Corea, China, etc.) apuntan un mayor despliegue de las tecnologías PON y de manera similar a WiMAX, por tanto al ser países con un alto grado de penetración de las comunicaciones alámbricas e inalámbricas son los más idóneos a una integración y así ofertar servicios de Convergencia Fijo-Móvil. En el caso de los países restantes el número de suscriptores WiMAX supera al de las tecnologías PON.

Las múltiples diferencias que existen entre estas tecnologías son considerables. Sin embargo, la integración de ambas permitirá combinar dichas diferencias y aprovechar sus características en beneficio del usuario.



EMEA: Europa & Este Medio (*Europe & Middle East*)
 AP: Asia Pacífico (*Asia Pacific*)
 NA: América del Norte (*North America*)
 CALA: Caribe y Latinoamérica (*Caribbean and Latin America*)

Figura 2.50 Proyecciones del número de suscriptores de las PON y WiMAX [54], [55]

En la siguiente figura se presentan las tendencias de las tecnologías que ofrecen banda ancha en los diferentes medios de transmisión.

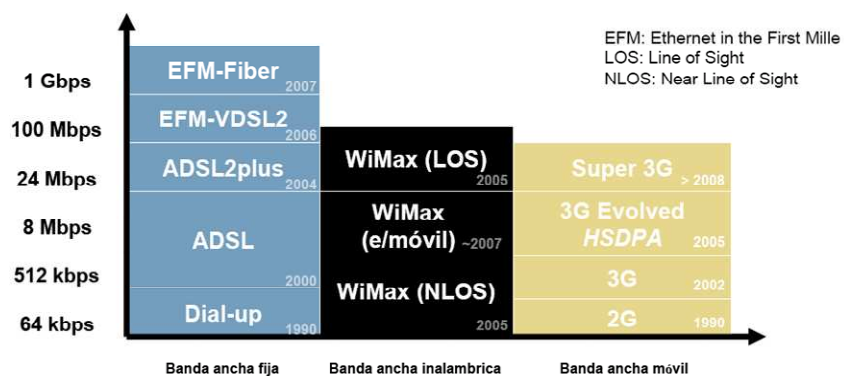


Figura 2.51 Tecnologías emergentes [56]

A muchos países y gobiernos de todo el mundo les podrían preocupar los gastos que entraña la instalación de redes de banda ancha (principalmente las tecnologías alámbricas); no obstante, con incentivos económicos y una política de reglamentación favorable, esto se puede realizar de una manera rentable y eficaz.

La instalación de redes de banda ancha puede transformarse en realidad si se conceden incentivos fiscales para su despliegue, tales como créditos impositivos, préstamos subvencionados o con bajo interés, apoyo para actividades de investigación y desarrollo de tecnologías de banda ancha.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CONTENIDO

[1] G. Kramer, B. Mukherjee y A. Mailos, *Ethernet Passive Optical Network*, 2003.

[2] ITU-T/G.984.1/2/3/4 “*Gigabit-Capable Passive Optical Networks (GPON)*”.

[3] IEEE 802.3ah “*Ethernet in the First Mile Task Force, Point to Multipoint Ethernet on SM Fiber (PON)*”, 2004.

[4] David Cleary, *Optical Solutions, Fiber Powered Communities, White Paper, EPON or GPON* www.opticalsolutions.com, 2005.

[5] WILLIAM, Stallings, *Comunicaciones y Redes de Computadores*, Séptima Edición, Prentice Hall, 2004.

FIGURAS

[1] Glen Kramer, Keiji Tanaka, *Advances in Optical Access Networks Teknovus, Inc. KDDI R&D Labs, Inc*, <http://www.ieee802.org/3/efm/>.

[3] Estado actual y evolución de las infraestructuras para los ámbitos de Hogar Digital y Entorno Personal Digital, Foro MINT 2007 – Telecomunicaciones / IHD, TELEFÓNICA ESPAÑA, Tecnología y Planificación de Servicios, 23 de Enero de 2007.

[5] Gerry Pesavento, Glen Kramer, Biswanath Mukherjee, *Ethernet PON (ePON): Design and Analysis of an Optical Access Network*.

[2, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27]

- ITU-T/G.984.1 “*Gigabit-Capable Passive Optical Networks (GPON): General Characteristics*”.
- ITU-T/G.984.2 “*Gigabit-Capable Passive Optical Networks (GPON): Physical Media Dependent (PMD) Layer Specification*”.
- ITU-T/G.984.3 “*Gigabit-Capable Passive Optical Networks (GPON): Transmission Convergence Layer Specification*”.
- ITU-T/G.984.4 “*A Broadband Optical Access System with Increased Service Capability Using Dynamic Bandwidth Assignment*”.

[28] Gerry Pesavento, *IEEE Access Standards, 802.3ah GE-PON Status, Ethernet First Mile Task Force* <http://www.ieee802.org/3/efm/>.

[29, 30, 32, 33] *White Paper, Ethernet Passive Optical Network, The International Engineering Consortium, Web Proforum Tutorials, 2007.*

[31] WILLIAM, Stallings, *Comunicaciones y Redes de Computadores, Séptima Edición, Pretince Hall, 2004.*

[34, 35, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43]

- IEEE 802.3ah “*Ethernet in the First Mile Task Force, Point to Multipoint Ethernet on SM Fiber (PON)*”.

[36, 54] Tutorial, *Broadband Fiber Access*, Prof. Leonid G. Kazovsky. David Gutierrez, Wei-Tao Shaw, Gordon Wong, *Photonics and Networking Research Laboratory (PNRL), Stanford University, 2007.*

[4, 6, 44] G. Kramer, B. Mukherjee y A. Mailos, *Ethernet Passive Optical Network.*

[45] Tsutomu Tatsuta†, Yukihiro Yoshida, and Yoichi Maeda, *Standardization of G-PON (Gigabit Passive Optical Network) in ITU-T, Global Standardization Activities*.

[46] *Cable&Wireless, Wholesale Requirements for GPON & Generic Ethernet Access (GEA), Gavin Young Chief Architect, C&W Access DATE 26th November 2007.*

[47, 48, 49, 50] David Cleary, *Optical Solutions, Fiber Powered Communities, White Paper, EPON or GPON* www.opticalsolutions.com, 2005.

[51] *Alcatel White Paper. "GPON versus EPON".* www.alcatel.com, 2005.

[52] VIGUERAS, Marco, *ACCESS CONVERGENCE, Sales Solution Management Latinoamerica, Nokia Siemens Network.*

[53] Y. Lisa Peng, *Gigabit access link feasibility considerations for optical Ethernet,* pengl@corning.com, 2004.

[55] *Tecnología WiMAX y su impacto en el mercado de los negocios de la Banda Ancha,* Carlos Flores Ganoza (Gerente Ingeniería de Clientes y Nuevos Servicios), Telefónica del Perú S.A.A. 2006.

[56] Jorge Pérez Martínez, *Evolución y Tendencias del Sector de las Telecomunicaciones,* Presentación Ericsson, 2006.

CAPÍTULO III

INTEGRACIÓN EPON/GPON-WiMAX (ARQUITECTURAS, PLANEAMIENTO Y FUNCIONAMIENTO)

3.1 INTRODUCCIÓN ^[1]

Con el surgimiento de aplicaciones que requieren un gran ancho de banda como IPTV y VoD (*Video on Demand*), los accesos de banda ancha llegan a ser progresivamente importantes en las actuales redes de acceso.

Las actuales redes de acceso se clasifican en dos campos, a saber: accesos alámbricos e inalámbrico. Las técnicas alámbricas tradicionales de acceso principalmente incluyen dos técnicas: DSL y Cable. Estas técnicas generalmente soportan ancho de banda en un rango de varios Mbps y una distancia máxima de transmisión de hasta varias unidades de kilómetros. Para soportar aún más ancho de banda y distancias mucho más largas, emerge una nueva generación de técnicas de acceso de banda ancha.

La nueva generación en técnicas de acceso basadas en fibra óptica ya estandarizadas, por tanto, son desplegadas gradualmente desde fibra al armario/acometida (FTTC), al edificio (FTTB), y al hogar (FTTH)¹. Las redes ópticas pasivas *Ethernet* (EPON) o con capacidad en *Gigabits* (GPON) son

¹ Se puede profundizar más acerca del tema en el segundo capítulo del presente proyecto o para propósitos de diseño ver en: *Fiber Optics for Government and Public Broadband: A Feasibility Study, Prepared for the City and County of San Francisco, Jan 2007.*

técnicas de acceso prometedoras basadas en fibra óptica, esperadas para ofrecer una solución económica al acceso de banda ancha debido a su implementación ubicua de equipos de red basados en *Ethernet*. Por otra parte, las técnicas inalámbricas de acceso también expanden continuamente su ancho de banda de transmisión, cobertura y soporte de calidad de servicio (QoS).

La técnica inalámbrica de nueva generación WiMAX¹ (IEEE 802.16), pretende repetir la evolución que tuvo la tecnología WiFi² en las redes de área local inalámbricas (WLANs) con los *hotspots*, pero en redes inalámbricas de área metropolitana (WMANs). Sin embargo, mientras para ofrecer servicios WiFi no se precisa licencia al trabajar sobre el espectro de uso común, con WiMAX en bandas de espectro licenciadas, se precisa licencia para uso del espectro. Esto hace que la mayoría de los países se encuentren en un proceso de adjudicación de licencias y que el despliegue no se haya iniciado rápidamente.

Las técnicas basadas en fibra óptica ofrecen anchos de banda “super-altos”. Sin embargo, todavía es muy costoso desplegar una fibra directamente a cada hogar; en contraste, las tecnologías inalámbricas tienen costos bajos de implementación. Otra ventaja importante de las técnicas inalámbricas es el soporte de movilidad. No obstante, las técnicas inalámbricas generalmente sufren de un espectro inalámbrico limitado, que está compartido por muchos usuarios, por consiguiente el ancho de banda está limitado para cada usuario. Además, un sistema inalámbrico usualmente requiere de un alimentador de fibra óptica de banda ancha para interconectar muchas estaciones de accesos dispersas a una oficina central (CO). Una combinación de EPON/GPON y WiMAX puede ser una solución atractiva para el acceso de la red de banda ancha, lo que permite a las dos técnicas complementarse cada una en muchos aspectos. Especialmente, existen varios factores importantes que motivan a tal integración como:

¹ Ver más acerca de WiMAX en el primer capítulo del presente proyecto.

² Wi-Fi es un conjunto de estándares para redes inalámbricas basado en las especificaciones IEEE 802.11. Wi-Fi no es un acrónimo de "*Wireless Fidelity*", Wi-Fi es una marca de la Wi-Fi Alliance (anteriormente la *Wireless Ethernet Compatibility Alliance*), la organización comercial que prueba y certifica que los equipos cumplen los estándares IEEE 802.11x. Se puede profundizar en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Wifi>.

Primero, EPON/GPON y WiMAX proveen niveles diferentes de ancho de banda. EPON soporta un ancho de banda total de 1 Gbps en ambos sentidos (ascendente y descendente), en tanto que GPON soporta varias velocidades, en direcciones ascendentes y descendentes, lo cual es compartido por un grupo de unidades de red ópticas remotas (ONUs). Como promedio, cada ONU accede aproximadamente a un ancho de banda alrededor de 60 Mbps (usando EPON), que corresponde a la capacidad total ofrecida por una estación base (BS) WiMAX que soporta aproximadamente 70 Mbps sobre un canal de 20 MHz.

Segundo, la integración dispone asignación integrada de ancho de banda y planificación de paquetes que ayudan a mejorar el soporte de calidad de servicio (QoS) y mejorar el rendimiento específico de la red.

Tercero, la integración consigue soportar redes de acceso de banda ancha, movilidad y logra efectuar la ambicionada convergencia fijo móvil (CFM), por consiguiente reducir significativamente el diseño de red y el costo operacional.

Recientemente, algunas investigaciones preliminares sobre la integración de las redes EPON/GPON y WiMAX, las denominadas redes ópticas inalámbricas híbridas, han sido elaboradas. Las redes ópticas inalámbricas híbridas emplean una red óptica pasiva como un medio de distribución para llevar la información a toda la red WiMAX con una sola estación BS co-localizada con un terminal de línea óptica (OLT) en un nodo del borde. La arquitectura realizó sólo una etapa de red WiMAX con todas las decisiones de operación, tales como la asignación de ancho de banda, planificación de paquetes, y soporte de QoS para los usuarios, hecho en la central BS en el nodo del borde. La investigación también evaluó el rendimiento de la planificación consciente de QoS y lo relacionado con el retardo de los paquetes para la red híbrida.

Sin embargo, para la integración de EPON/GPON y WiMAX, existen varias arquitecturas que se desarrollan en el presente capítulo y que brindan mayores ventajas a la integración. Se consideran potencialmente cuatro arquitecturas:

- 1) Arquitecturas independientes.
- 2) Arquitecturas híbridas con modo operacional jerárquico/directo.
- 3) Arquitecturas orientadas a conexión unificadas.
- 4) Arquitecturas de Microonda sobre Fibra (MoF, *Microwave Over Fiber*).

Las redes ópticas inalámbricas híbridas propuestas en varios artículos pueden esencialmente ser clasificadas como un caso especial, más no confundirlas erróneamente con: la arquitectura de Microonda sobre fibra (MoF) y la arquitectura híbrida bajo modos operacionales directos.

Basado en esa arquitectura integrada básica, se toman en cuenta varios asuntos operacionales importantes como:

- 1) Direccionamiento y reenvío de paquetes IP sobre el sistema integrado.
- 2) Asignación de ancho de banda y soporte de calidad de servicio para servicios de usuario
- 3) Operación de *handover* para usuarios móviles

En este capítulo se presentan las arquitecturas básicas de integración y asuntos operacionales relacionadas con dichas arquitecturas. Además, se proponen otras arquitecturas de integración extendidas a partir de las cuatro arquitecturas de integración básicas, al igual que el adecuado direccionamiento en el diseño y operación de las mismas. Específicamente, además de los tres aspectos operacionales mencionados anteriormente, también se explica en detalle, aspectos como:

- 1) Implementación óptima de fibra
- 2) Asignación del espectro inalámbrico entre micro celdas WiMAX
- 3) Mejora de confiabilidad para los sistemas integrados
- 4) Aplicaciones de banda ancha de las redes integradas EPON/GPON con la tecnología WiMAX en las telecomunicaciones
- 5) Convergencia Fijo Móvil (CFM) de infraestructura de red, terminales, planos de control y gestión, y servicios de usuario.

3.2 TECNOLOGÍAS DE ACCESO CLAVES ^{[2], [3]}

Es muy importante la elección del tipo de tecnologías a ser desarrolladas en el proceso de integración, ya que éstas tienen que brindar aspectos similares para dicho proceso de integración y a la vez diferentes, al momento de ofrecer los servicios a fin de acoplar a una sola plataforma y llegar a una tan esperada convergencia fijo móvil, mencionada en el primer capítulo del presente proyecto.

3.2.1 Características fundamentales para que EPON/GPON se integre con WIMAX

Las redes ópticas pasivas EPON/GPON son un tipo de tecnologías PON evolucionadas de la tradicional ATM PON (APON). Una red EPON/GPON consiste de un terminal de línea óptica (OLT) central y un acoplador/divisor de unidades de red ópticas (ONUs) remotas interconectadas por una red de fibra pasiva. La topología física típica de una red EPON/GPON es en árbol.

Las redes EPON/GPON operan en un modo de multiplexación por división de tiempo (TDM), lo cual permite a cada ONU flexiblemente compartir el ancho de banda del sistema.

La clave de una operación exitosa de una red EPON/GPON es el mecanismo de asignación de ancho de banda entre múltiples ONUs. En la dirección *downstream* también denominada dirección *downlink* (DL), la asignación de ancho de banda sigue un modo de transmisión punto a multipunto (P2MP). Así, es fácil para una OLT la asignación de ancho de banda. Específicamente, los paquetes *broadcasts* que se envían de la OLT a todas las ONUs, para luego aceptar o ignorar los paquetes basados en la información concordante de las direcciones de los paquetes MAC y las direcciones MAC de la ONU. Si concuerdan dichas direcciones, las ONUs aceptan los paquetes, de lo contrario, las ONUs ignoran los paquetes.

En contraste, la asignación de ancho de banda en la dirección *upstream* también denominada dirección *uplink* (UL), es más complicada. Múltiples ONUs pueden

transmitir datos a una OLT simultáneamente, lo cual constituye un modo de transmisión multipunto a punto (MP2P). Bajo este modo, pueden ocurrir colisiones si no hay un correcto mecanismo para coordinar las transmisiones *upstream* para diferentes ONUs. Con este propósito, EPON/GPON emplea a la OLT como un controlador central, para coordinar las transmisiones *upstream* de las ONUs. Además, se han desarrollado un conjunto de protocolos de sondeo/demanda/concesión estandarizados para EPON por el IEEE 802.3ah y para GPON por la UIT-T G.984. Los detalles de los mecanismos de sondeo/demanda /concesión son los siguientes:

Una OLT periódicamente sondea cada ONU interrogando el estado del tráfico de datos acumulados en sus memorias temporales o *buffers* (ejemplo, prioridad de colas).

Al recibir el mensaje de sondeo, la ONU responde con sus estados de *buffer*. Por consiguiente, la OLT asigna ancho de banda, proceso denominado de concesión, para cada ONU basada en todos los estados recibidos de los correspondientes *buffers*. Tal mecanismo de sondeo/demanda/concesión proporciona un canal eficiente para el control de información intercambiada entre la OLT y las ONUs. En base a dicho mecanismo, se han propuesto numerosos algoritmos dinámicos de asignación de ancho de banda (DBA, *Dynamic Bandwidth Assignment*). Uno de los esquemas más conocidos es IPACT¹ (*Interleaved Polling with Adaptive Cycle Time*, un protocolo dinámico para una *Ethernet* PON), el cual se basa en un sondeo entrelazado y en un proceso de asignación de ancho de banda para cada ONU. Además se han desarrollado otros algoritmos avanzados para mayor integridad en la asignación de ancho de banda entre diferentes ONUs (tales algoritmos no se estudian en el presente proyecto).

La capacidad de asignación de ancho de banda dinámica permite tanto a EPON como a GPON soportar un rango de servicios con diferentes niveles de QoS, incluyendo servicios sensitivos a retardos, servicios asegurados de ancho de

¹ Se puede profundizar en: G. Kramer, B. Mukherjee, and G. Pesavento, "IPACT: A Dynamic Protocol for an Ethernet PON (EPON)," *IEEE Communications Magazine*, February 2002, pp. 74-80.

banda, servicios de mejor esfuerzo, etc. Para soportar QoS, de hasta ocho colas de prioridad sobre cada ONU, ésta clasifica los paquetes de servicio y provee oportunidades de transmisión de datos basándose en los requerimientos individuales de QoS. Una clasificación de paquetes ordinarios es similar al esquema *DiffServ* en la red IP, la cual asegura que paquetes de alta prioridad ganen más ancho de banda y sean transportados rápidamente.

La asignación de ancho de banda para cada cola de prioridad consta de dos pasos sucesivos, ejemplo: *asignación de ancho de banda inter-ONU* y *asignación de ancho de banda intra-ONU*. La asignación inter-ONU es realizada por una OLT, a fin de asignar un ancho de banda añadido para una ONU. Sin embargo, la asignación explícitamente no indica cuánto ancho de banda debería ser asignado a cada cola de prioridad en una ONU. Así, al recibir un ancho de banda agregado concedido, cada ONU necesita a su vez asignar el ancho de banda a cada una de sus colas de prioridad, lo cual constituye la asignación de ancho de banda intra-ONU. En principio, a una cola con alta prioridad se le asigna más ancho de banda y se le autoriza transmitir datos por anticipado.

3.2.2 Características fundamentales para que WiMAX se integre con EPON/GPON

WiMAX es una técnica de acceso inalámbrico de banda ancha de nueva generación estandarizada por la IEEE 802.16, grupo de estudio 7. El grupo inicialmente desarrolló una suite de estándares para soportar accesos de banda ancha inalámbricos punto a multipunto (P2MP) dentro de un rango espectral de 10 a 66 GHz. Más tarde para la mayoría de intereses comerciales, el rango espectral fue extendido para soportar un rango de 2 a 11GHz adicionales. Posteriormente, se realizó una enmienda (IEEE 802.16e) para soportar capacidad de *networking* entre estaciones base fijas y dispositivos móviles.

La técnica WiMAX muestra como características más destacadas para la integración las siguientes: Primero, empleando técnicas de transmisión avanzadas de capa física y técnicas de modulación y codificación, WiMAX puede soportar una velocidad de datos pico en *downlink* (DL) hasta ~70Mbps y una

velocidad de datos pico en *uplink* (UL) hasta ~50Mbps sobre un canal de 20MHz. Segundo, WiMAX mantiene QoS extremo a extremo sobre una base (flujo) por conexión. Su subcanalización y su capacidad de señalización basada en el protocolo de acceso al medio (MAP) proveen flexibilidad de planificación de espacio, frecuencia y el acceso de paquetes basados en tiempo, forman *slots* en cada trama Multiplexada por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM¹), la cual permite a la técnica facilitar la asignación de ancho de banda y proveer QoS para cada flujo de servicio. Tercero, WiMAX emplea esquemas de *handover* optimizados para garantizar bajas latencias (menores a 50ms), permitiendo por consiguiente, servicios sensibles al retardo tal como VoIP.

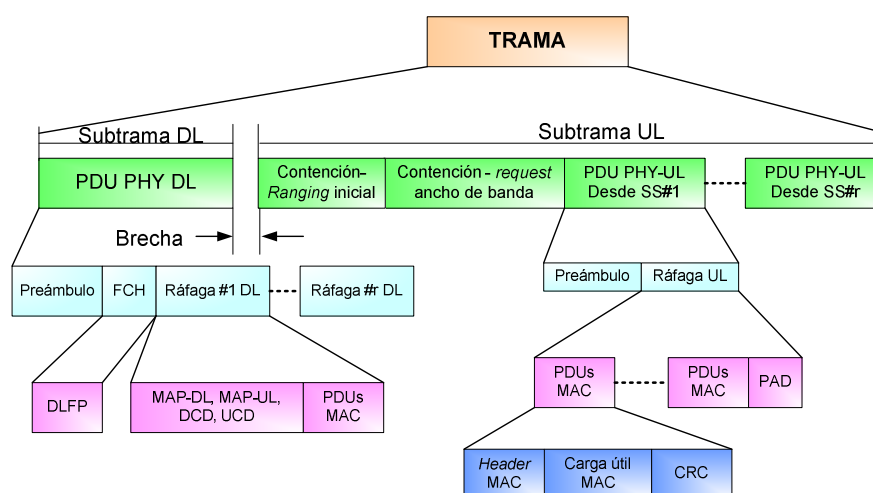


Figura 3.1 Estructura de la trama WiMAX ^[1]

El estándar WiMAX soporta ambos modos operacionales TDD (*Time Division Duplexing*) y FDD (*Frequency Division Duplexing*), ya mencionados en el primer capítulo. La estructura de trama de capa física del modo TDD consiste de dos partes, una subtrama *downlink* y una subtrama *uplink* (como se muestra en la figura 3.1). El campo del preámbulo sincroniza la trama. La brecha como se muestra en la figura 3.1, entre las dos subtramas se la reserva para impedir que la transmisión UL y DL colisionen. Los campos de control, incluyendo protocolo de acceso al medio DL (DL-MAP), UL-MAP, Descriptor de Canal DL (DCD) y Descriptor de Canal UL (UCD), proveen una asignación de subcanal e

¹ OFDM: Es una técnica que consiste en utilizar frecuencias ortogonales para la multiplexación de señales, al utilizar frecuencias ortogonales entre sí, las subportadoras pueden traslaparse permitiendo más cantidad de canales y mayores anchos de banda por canal.

información de control para las subtramas DL y UL, respectivamente. Cada trama TDD puede contener múltiples ráfagas de usuario DL y UL, cuyos perfiles están contenidos en los campos de DL-MAP y UL-MAP respectivamente. Específicamente, la información MAP señala el símbolo de comienzo de cada ráfaga y especifica las técnicas de codificación y modulación que se usan para la transmisión de ráfagas.

WiMAX soporta cinco tipos de servicios con diferentes niveles de QoS como se indicó en el primer capítulo. Para garantizar los requerimientos de ancho de banda de esos tipos de servicio, WiMAX asigna ancho de banda para cada SS (*Subscriber Station*) basándose en mecanismos sondeo/demanda/concesión al igual que las redes ópticas pasivas EPON/GPON.

3.2.2.1 Mecanismos de Demanda y Asignación de Ancho de Banda

Durante la entrada e inicialización de la red, a cada SS se le asigna hasta tres CIDs¹ dedicados con el propósito de enviar y recibir mensajes de control. Estas conexiones pares son usadas para permitir que se apliquen niveles diferenciados de QoS a diferentes conexiones que llevan tráfico de administración MAC. Es necesario incrementar (o disminuir) los requerimientos de ancho de banda para todos los servicios excepto para conexiones UGS² con velocidades de transmisión constantes no comprimibles. Las necesidades de conexiones UGS no comprimibles no cambian desde el establecimiento hasta la terminación de la conexión.

Los requerimientos de conexiones UGS comprimibles, pueden incrementar o disminuir dependiendo del tráfico. Los Servicios de DAMA (*Acceso múltiple con Asignación en Base a Demanda*) son recursos dados en base a una asignación bajo demanda, cuando la necesidad se incrementa.

¹ CID: Identificador de Conexión (*Conexion Identifier*), indica la conexión para la cual el ancho de banda de enlace ascendente es requerido.

² UGS: Servicios de Concesión no Solicitado (*Unsolicited Grant Service*). Ver con detalle en el Capítulo I.

Cuando una SS necesita preguntar por un ancho de banda sobre una conexión con servicio de planificación de mejor esfuerzo (BE, *Best Effort*), envía un mensaje a la BS conteniendo los requerimientos inmediatos de la conexión DAMA. La QoS para la conexión es fijada en el establecimiento de dicha conexión y es buscada por la BS. Hay numerosos métodos por los cuales la SS puede obtener el mensaje de requerimiento de ancho de banda para la BS.

a) Demandas

Las demandas se refieren a mecanismos que las SSs usan para indicar a la BS que requieren asignación de ancho de banda para el enlace ascendente. Una demanda puede venir como una cabecera de demanda de Ancho de Banda autosuficiente o puede venir como una demanda de *PiggyBack*. La capacidad de demanda de *PiggyBack* es opcional. Debido a que el perfil de ráfaga de enlace ascendente puede cambiar dinámicamente, todas las demandas de ancho de banda se harán en términos del número de bytes necesarios para llevar la Cabecera MAC y el *payload*, pero no el *overhead* PHY. El mensaje de Demanda de Ancho de Banda puede transmitirse durante cualquier asignación de enlace ascendente, excepto durante cualquier intervalo de Alineación Inicial. Una SS no demandará ancho de banda para una conexión si no tiene una PDU para transmitir sobre esa conexión. Las Demandas de ancho de banda pueden ser incrementales o agregadas.

Cuando la BS recibe una Demanda de Ancho de Banda incremental, agregará la cantidad de ancho de banda requerido a su percepción actual de las necesidades de ancho de banda para la conexión.

Cuando la BS recibe una Demanda de Ancho de Banda agregada, reemplazará su apreciación de las necesidades de ancho de banda en la conexión con la cantidad de ancho de banda requerido. Puesto que las Demandas de ancho de Banda *Piggybacked* no tienen un campo tipo, las Demandas de Ancho de Banda *Piggybacked* siempre serán incrementales. La naturaleza de autocorrección del protocolo Demanda/Concesión requiere que las SSs usen periódicamente

Demandas de Ancho de Banda agregado como una función de la QoS de un servicio y de la calidad del enlace. Debido a la posibilidad de colisiones, el ancho de banda basado en contención será una demanda agregada.

La capacidad de Demandas de Ancho de Banda Incremental es opcional para la SS y obligatoria para la BS. La capacidad de Demandas de Ancho de Banda Agregada es obligatoria para la SS y para la BS.

b) Concesiones

Para una SS, las demandas de ancho de banda se refieren a la conexión individual mientras que cada concesión de ancho de banda se direcciona al CID básico de la SS, y no a CIDs individuales. Puesto que esto no es determinístico se respeta tal demanda, cuando la SS recibe una oportunidad de transmisión más corta que la esperada (decisión del Planificador, la pérdida del mensaje de demanda, etc.). En todos los casos, basadas en la más reciente información recibida desde la BS y el estado de la demanda, la SS puede decidir realizar el *backoff* y hacer de nuevo la demanda o descartar la unidad de servicio de datos (SDU, *Service Data Unit*).

c) Sondeo

El Sondeo es el proceso por el cual la BS asigna a las SSs ancho de banda específicamente para propósito de realizar requerimientos de ancho de banda. Estas asignaciones pueden ser a una SS individual o a un grupo de SSs.

Note que el sondeo se hace en base a la SS. El ancho de banda se requiere siempre en una base de CID y es asignado en una base SS.

3.3 INTEGRACIÓN DE EPON/GPON Y WiMAX ^{[4], [5]}

3.3.1 ARQUITECTURAS

Se consideran cuatro arquitecturas diferentes que pueden usarse para soportar la integración de EPON/GPON y WiMAX. Por la simplicidad de comunicaciones de datos *downstream/downlink* de ambas tecnologías EPON/GPON y WiMAX, todos los siguientes puntos relacionados con en el reenvío de paquetes y asignación de ancho de banda están enfocados en la dirección más complicada *upstream/uplink*.

3.3.1.1 Arquitecturas independientes

La forma más intuitiva para integrar las redes EPON/GPON y WiMAX es usar arquitecturas independientes por la simplicidad respecto a las otras arquitecturas, tal como se muestra en la figura 3.2, en la cual, dichas redes operan de manera independiente, es decir que de una ONU u ONT se despliega fibra a una estación base BS WiMAX para brindar acceso inalámbrico a un grupo de usuarios (esto se ilustra en la parte superior de la figura 3.2). Es posible su interconexión, dado que los dos dispositivos (la ONU/ONT y la BS) soportan una interfaz estándar común (*Ethernet*). Además, cada ONU puede tener interfaces para el hogar de los usuarios por accesos cableados. Así, el sistema puede ofrecer servicios de Convergencia Fijo Móvil (CFM) integrados.

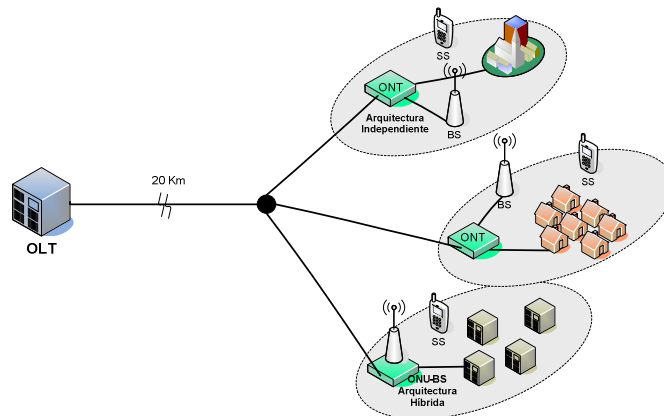


Figura 3.2 Arquitecturas para la integración EPON/GPON y WiMAX [2]

Con una interfaz estandarizada común (*Ethernet*), el beneficio directo de la arquitectura independiente es que la ONU y la BS pueden conectarse sin ningún requerimiento especial al momento de integrarlos. Sin embargo, puesto que los

sistemas EPON/GPON y WiMAX funcionan independientemente, la ONU no puede ver los detalles de cómo la BS WiMAX está programando/planificando los paquetes para sus estaciones suscriptoras (SSs) asociadas, mientras tanto la BS WiMAX no puede ver los detalles de cómo la ONU programa/planifica los paquetes y envía datos *upstream* a una terminal de línea óptica (OLT) la EPON/GPON. Así, la arquitectura no puede tomar total ventaja de la integración, particularmente en la asignación de ancho de banda óptimo de todo el sistema. Lo que es más, se requieren en los límites de los dos sistemas dos dispositivos independientes, una ONU/ONT y una BS WiMAX, por consiguiente existe la probabilidad de ser más costoso que emplear una plataforma integrada, como se explicará en las siguientes secciones.

3.3.1.2 Arquitecturas Híbridas¹

Una arquitectura híbrida es una arquitectura de integración, en la cual una ONU y una BS WiMAX están integradas en un sistema de una sola plataforma denominada ONU-BS, en la ONU (parte inferior de la figura 3.2). Tal arreglo permite una integración completa de estos dispositivos tanto en *hardware* como en *software*. La figura 3.3 ilustra los módulos funcionales claves dentro de la ONU-BS. En *hardware* existen tres CPUs; para una mejor integración, estas tres CPUs pueden adicionalmente ser integradas en una sola CPU.

La CPU-1 es responsable de la comunicación de datos dentro de la sección EPON/GPON y la ejecución de los protocolos EPON/GPON.

La CPU-3 es responsable de la comunicación de datos dentro de la sección WiMAX y la ejecución de los protocolos WiMAX.

Entre ellas, hay una CPU central, la CPU-2, encargada de coordinar el comportamiento de las otras dos CPUs. CPU-1 y CPU-3 informan sus estados de sección, demanda y asignación de ancho de banda a la CPU-2; lo cual implica

¹ Para mayor interés se puede profundizar en las siguientes publicaciones: *MARIN Hybrid Optical-Wireless Access Network, OFC, Anaheim CA, Mar 2007. *GROW-Net-A Hybrid Optical Wireless Access Network, 9th Joint Conference on Information Sciences (JCIS 2006), Kaohsiung, Taiwan, Oct 2006.

una toma de decisiones por parte de la CPU2, y además instruye a las otras dos CPUs a solicitar ancho de banda desde la dirección *upstream* y asignar ancho de banda a cada SS en la dirección *downstream*.

Los módulos funcionales correspondientes a las tres CPUs de la figura 3.3a se muestran en la figura 3.3b/c, principalmente se ilustra los módulos para la comunicación de datos *upstream*. Específicamente, en *software* la CPU-1, relacionada con la sección EPON/GPON, contiene componentes funcionales del planificador de paquetes EPON/GPON, colas de prioridad, y clasificador de paquetes EPON/GPON. La CPU-3, relacionada con la sección WiMAX, contiene los componentes funcionales de reconstrucción de paquetes WiMAX y planificador *upstream* WiMAX. Finalmente, la CPU-2 corresponde al controlador central de la ONU-BS como se aprecia en la figura 3.3c.

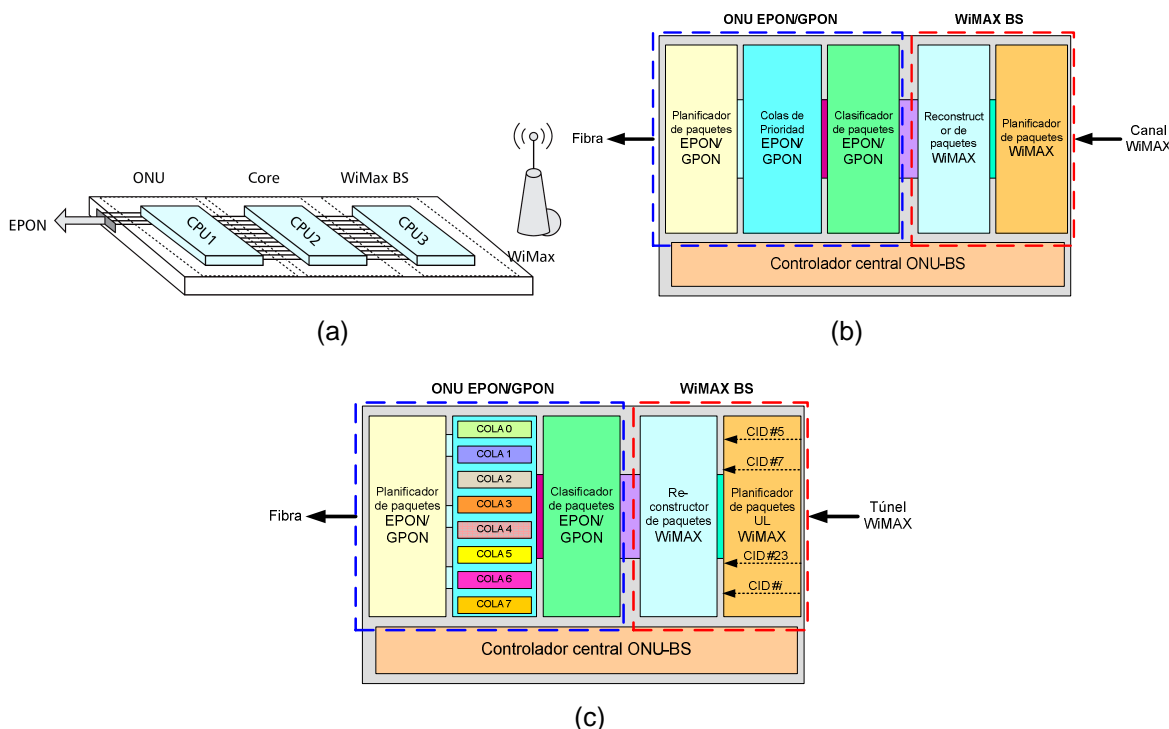


Figura 3.3 Módulos funcionales y arquitectura de la ONU-BS: a) diseño de hardware, b) módulos funcionales y c) módulos funcionales internos [3]

Uno de los mayores beneficios de la arquitectura híbrida es que el costo del equipo puede reducirse a un solo dispositivo; una única plataforma/caja requerida. Lo que es más, ya que la ONU-BS integrada posee la información completa de las demandas de ancho de banda, asignación y paquetes planificados de ambas ONU y BS WiMAX, se pueden adoptar óptimos mecanismos para demandas de

ancho de banda en la dirección *upstream* de la red ya sea EPON o GPON, y la asignación de ancho de banda y planificación de paquetes en la dirección *downstream* de la red WiMAX. Específicamente, ya que la ONU-BS tiene la información completa sobre cómo solicitan ancho de banda las SSs WiMAX desde la BS, la ONU-BS puede realizar una mejor predicción sobre los requerimientos de ancho de banda en el siguiente ciclo en la EPON/GPON y así enviar demandas más precisas de ancho de banda para la OLT. Asimismo, ya que la ONU-BS tiene total conocimiento sobre el ancho de banda que ha sido demandado desde la EPON/GPON para el siguiente ciclo de transmisión, la BS WiMAX puede realizar una óptima asignación de ancho de banda y planificación de paquetes para las SSs en las subsiguientes tramas WiMAX.

Así, la arquitectura híbrida comparada con la arquitectura independiente mencionada anteriormente, espera mejorar el rendimiento del sistema global en términos de *throughput* y calidad de servicio QoS. Como desventajas: la arquitectura híbrida no está estandarizada y la implementación de una ONU-BS puede no ser tan eficiente en cuanto a costos cuando se requieran aplicaciones de una sola ONU o una BS WiMAX.

3.3.1.3 Arquitecturas orientadas a conexión unificadas

Como se introdujo anteriormente, los principios operacionales de WiMAX y EPON/GPON, particularmente en el aspecto de petición y asignación de ancho de banda, son muy similares. De esa manera, puede ser eficiente emplear un protocolo común de demanda y asignación de ancho de banda para ambas tecnologías EPON/GPON y WiMAX en las arquitecturas integradas.

WiMAX es una técnica de transmisión orientada a conexión¹ bajo la cual cada flujo de servicios está asociado con una única conexión ID (CID), y las demandas de ancho de banda y soporte en la calidad de servicio QoS también son orientadas a conexión. En base a las demandas de ancho de banda, se asigna a cada SS un ancho de banda agregado, y luego dicho ancho de banda es

¹ Ver Anexo A.

asignado a cada servicio asociado a conexión con la SS. En contraste, la tecnología EPON no soporta este tipo de conexión (sin embargo, será más eficiente utilizar la tecnología GPON ya que es un sistema que soporta transmisiones orientadas y no orientadas a conexión). Más bien, las demandas de ancho de banda son orientadas a puesta en fila (hacer cola); se asigna un ancho de banda agregado a cada ONU, y posteriormente se realiza una asignación interna de ancho de banda de hasta ocho diferentes prioridades de puesta en fila en la ONU.

En términos generales las principales operaciones de los dos tipos de redes son muy similares, particularmente en el aspecto de demanda de ancho de banda y una asignación más fina que los sistemas EPON/GPON. Además, la asignación de ancho de banda orientada a conexión generalmente muestra una QoS más predecible que la asignación de banda ancha basada en puesta en fila, lo cual implica que la tecnología WiMAX pueda soportar mejor QoS que la tecnología EPON/GPON. En contraste, la tecnología EPON/GPON muestra mejor escalabilidad operacional que la tecnología WiMAX ya que cada ONU gestiona hasta ocho colas/filas de prioridad.

Puesto que EPON/GPON y WiMAX usan protocolos operacionales diferentes a pesar de la similitud en sus mecanismos de demanda/concesión de ancho de banda, puede tener sentido que para modificar los protocolos de la capa de control de acceso al medio (MAC) de la EPON también permita soportar servicios orientados a conexión como en los sistemas WiMAX. Se espera que tal modificación pueda brindar muchas ventajas a la integración debido a la operación unificada de los protocolos en ambos sistemas.

La nueva arquitectura integrada tiene casi el mismo esquema que la arquitectura híbrida. La única diferencia preferentemente es en el transporte de tramas *Ethernet* en ráfagas/tramas *upstream* y *downstream* de EPON/GPON, las PDUs de la MAC WiMAX reemplazan las tramas *Ethernet*, dichas tramas *Ethernet* por tanto son encapsuladas como datos del cliente en las PDUs MAC WiMAX.

La figura 3.4, muestra cómo los datos EPON se transmiten después de que las tramas *Ethernet* son reemplazadas o encapsuladas por las PDUs MAC WiMAX. Específicamente, el campo de enlace lógico ID (LLID) se guarda para el preámbulo y propósitos de direccionamiento (para enlaces MAC). Sin embargo, después de LLID las tramas se convierten en PDUs MAC WiMAX, y cada PDU encapsula tramas *Ethernet*. Así, la pila de protocolos de la nueva arquitectura incorpora una nueva subcapa de convergencia (CS, *Convergence Sublayer*) debajo de la subcapa de trama *Ethernet*. Las funciones de la nueva subcapa son las de controlar y asignar ancho de banda en las redes ópticas pasivas. La operación total es la misma que en una red WiMAX. Como consecuencia, el sistema enteramente integrado puede controlarse por un conjunto unificado de protocolos de control orientados a conexión propagados de la tecnología WiMAX. Ninguna trama de control se requiere en la capa trama *Ethernet* para el control de la red y la asignación de ancho de banda como en sistemas convencionales EPON. Desde un punto de vista operacional de la red, éste es un tipo de Convergencia Fijo Móvil para el control y gestión de la red: Ya que un único sistema de control de red y un conjunto de protocolos administran y controlan ambas redes de acceso cableadas e inalámbricas.

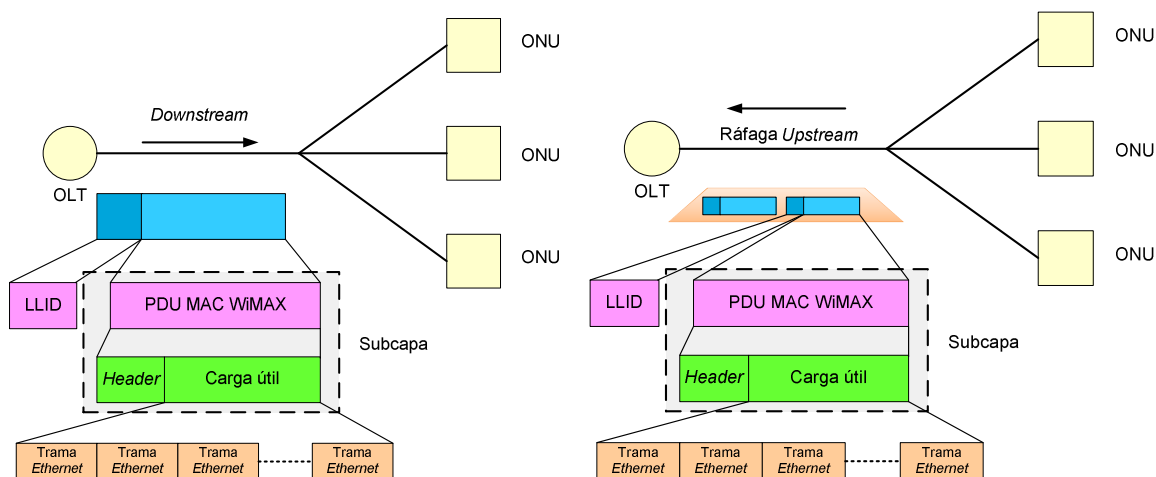


Figura 3.4 Aplicando la capa MAC WiMAX a EPON/GPON sentido downstream/upstream^[4]

En la figura 3.5, se describe un ejemplo de petición de ancho de banda y asignación a través de una red PON y WiMAX integrada. Las SSs envían demandas (ejemplo, *Request CID #x1* y *Request CID #x2*) para una ONU-BS, y dicha ONU-BS intercepta y procesa dichas solicitudes y envía información abstracta como una demanda (ejemplo, *Request CID #y1*) para una OLT. La

clasificación y agregación de diferentes demandas desde las SSs dependen de su QoS individual. En general, las solicitudes con similares requerimientos de QoS son agregadas conjuntamente a la ONU-BS. Como respuesta, la OLT concede un ancho de banda agregado a la ONU-BS (ejemplo, Concesión para ONU-BS1), y luego se da una reasignación más fina para el ancho de banda concedido por cada SS (ejemplo, Concesión para SS1).

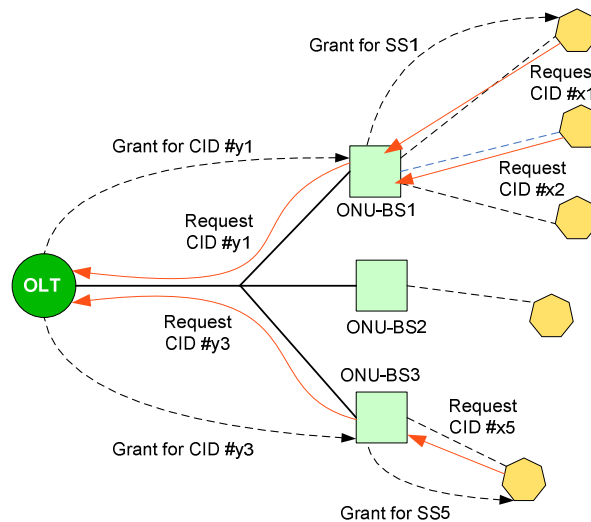


Figura 3.5 Demanda y asignación de ancho de banda (Modo Jerárquico) [5]

La operación consiste de dos jerarquías. La OLT no puede ver cualquier información detallada de demanda de cada SS; la información está resumida por la ONU-BS antes de que se reenvíe a la OLT. Los CIDs en las dos jerarquías son independientes y los mismos CIDs pueden aparecer en las diferentes jerarquías sin afectar la operación del sistema entero.

Por tanto, el modo jerárquico para el intercambio de información de control divide a la red integrada en dos secciones, a saber la sección PON/WiMAX y la ONU-BSs la cual funciona como un punto intermedio para el intercambio de la información de control entre dos secciones de red. La ventaja de tal operación es que los mensajes de control en la PON pueden reducirse en gran medida aún cuando el sistema integrado emplee muchas conexiones de aplicación SS. No obstante, como un inconveniente, el procesamiento de información de demanda de ancho de banda SS puede perder cierta información de estado sobre todas las

SSs en el sistema, de tal forma que la OLT no pueda realizar una óptima asignación de ancho de banda para cada ONU-BS.

Además del modo jerárquico, existe otro modo operacional, denominado *modo directo*, basado en la arquitectura orientada a conexión unificada. Como se muestra en la figura 3.6(a), este modo reenvía directamente las demandas de ancho de banda de cada SS a una OLT sin interceptación y procesamiento alguno por parte de una ONU-BS intermedia. Al recibir la información de petición de ancho de banda de las SSs, la OLT efectúa la asignación de ancho de banda para cada ONU-BS y por tanto asigna el ancho de banda a cada una de las SSs asociadas. En la figura 3.6(a) la información de petición de ancho de banda de CID x1 y x2 reenvía directamente a la OLT a través de la ONU-BS1, posteriormente la OLT realiza una asignación de ancho de banda y concede un ancho de banda agregado a la ONU-BS1 (ejemplo, Concesión para ONU-BS1), a continuación la ONU-BS1 realiza una asignación de ancho de banda a cada una de las SSs (ejemplo, Concesión para SS1).

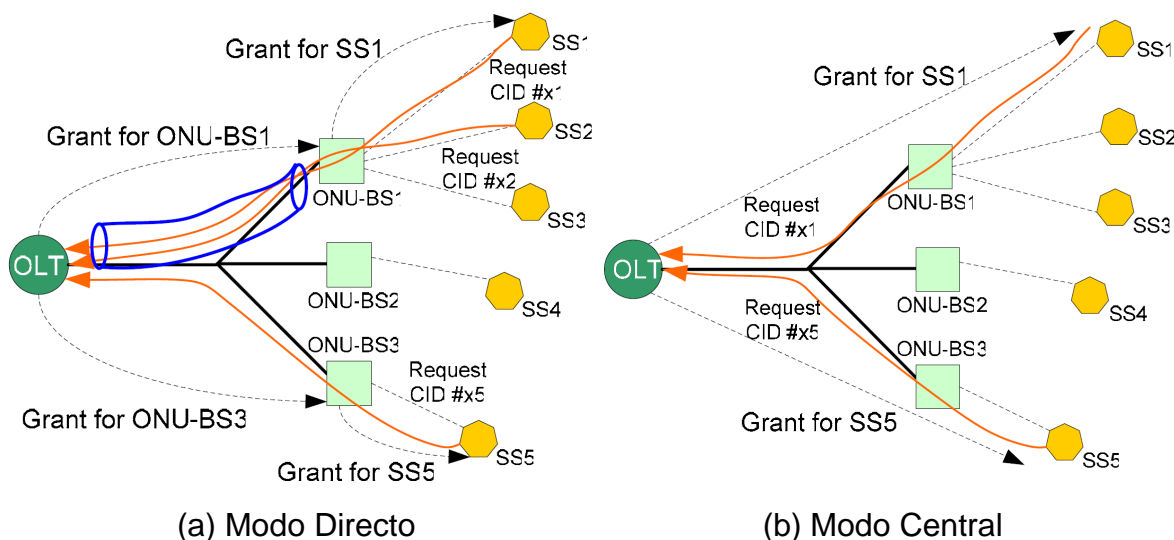


Figura 3.6 Modos para el cambio de información de control ^[6]

Como una ventaja, el modo directo permite a la OLT obtener la información de demanda de ancho de banda completamente desde todas las SSs sin pérdida de información alguna. Con la información completa, la OLT puede efectuar una asignación de ancho de banda más eficiente para cada ONU-BS con respecto a la del modo jerárquico anterior. Sin embargo, el modo directo es menos escalable, lo cual atribuye a lo siguiente: si cada micro celda WiMAX sirve a N conexiones SS y

una PON tiene una proporción divisora de 1:16; por consiguiente, se requiere de una OLT para procesar un total de $16N$ demandas de ancho de banda (modo directo); en tanto que, para el modo jerárquico previo solo necesita procesar N demandas de ancho de banda.

Una extensión adicional también puede efectuarse para el modo directo. En lugar de primero asignar el ancho de banda a cada ONU-BS y luego asignar el ancho de banda concedido a cada SS como se muestra en la figura 3.6(a), también se puede directamente preguntar a la central OLT la asignación de ancho de banda para cada una de las SSs como se muestra en la figura 3.6(b). En este caso, la ONU-BS intermedia llega a ser un repetidor *dumb* (no inteligente) que transmite la información de la red de control y gestión entre la central OLT y todas las SSs sin procesamiento alguno. Ya que la central OLT directamente asigna ancho de banda para cada uno de los SSs, a este modo se lo denomina *modo centralizado*.

Comparado al modo directo, el modo centralizado incluso muestra mejores oportunidades para la eficiencia de la asignación de ancho de banda entre SSs como esfuerzo al control en la asignación de ancho de banda lo suficientemente distante como para el mínimo estado SS. Sin embargo, el modo puede sufrir de una carga pesada de control en la central OLT así como, la necesidad de procesar todos los mensajes de control y efectuar la asignación de ancho de banda a cada SS.

En resumen, para los tres modos operacionales mencionados anteriormente, existe un cambio. Al efectuar una eficiente asignación de ancho de banda, se debería reenviar la información mucho más detallada del ancho de banda de las demandas de SS a la OLT, por tanto el control de red *overhead* y la carga de control en la OLT se incrementa. Por otro parte, si se le reenvía a la OLT sólo la información de demanda de ancho de banda procesada por las ONU-BSs, el control de red *overhead* ampliamente puede ser guardado, sin embargo, no puede tener la capacidad de asignar mayor ancho de banda a cada SS.

Además, asociado con la demanda y asignación de ancho de banda jerárquico mencionado anteriormente, existen dos tipos de conexiones de ancho de banda como se muestra en la figura 3.7. Llamadas conexiones en la sección PON (por ejemplo, entre la OLT y una ONU-BS, *conexión troncal*) y en conexiones en la sección WiMAX (por ejemplo, entre una ONU-BS y una SS, conexiones regulares SS). En la sección PON, cada ONU puede asociarse con múltiples conexiones regulares SS en la sección WiMAX. Tales conexiones a capas con diferentes granularidades son análogas con las trayectorias virtuales (VPs) y circuitos virtuales (VCs) en la red ATM.

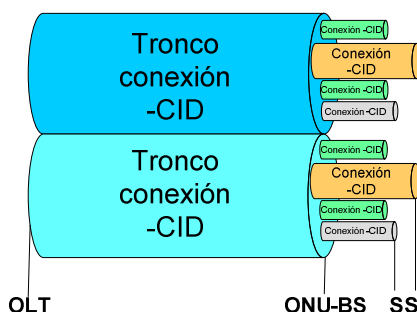


Figura 3.7 Jerarquía de ancho de banda de conexiones [7]

También es viable adaptar una red WiMAX para ejecutar los protocolos MAC de la EPON/GPON. De esa manera, todos los dispositivos WiMAX serán operados bajo la técnica de *Ethernet* con interfaces *Ethernet* unificadas. El defecto de esta modificación es que hay menos control de calidad de servicio QoS para cada conexión de servicio. También, las extensiones especiales están obligadas a manipular la codificación y la modulación de las señales inalámbricas, ya que los canales inalámbricos usualmente son menos estables que los sistemas que emplean fibra. Finalmente, para las dos arquitecturas de integración anteriormente citadas, tienen como desventaja común el no estar estandarizadas.

3.3.1.4 Arquitecturas de microondas sobre fibra

Más allá de reducir los costos al límite de los sistemas EPON/GPON y WiMAX así como de utilizar mejor la capacidad de transmisión de la fibra, se propone otra alternativa de arquitectura como se muestra en la figura 3.8. Cada nodo remoto

está implementado con una unidad ONU, responsable de la comunicación de datos de la EPON/GPON, y una antena no inteligente, responsable de transmitir una señal de radio WiMAX desde y para sus micro celdas asociadas. La señal EPON/GPON se encuentra en banda base y ocupa frecuencias de hasta 1.25 GHz (caso de EPON) y 2.48 GHz (caso de GPON). Las señales WiMAX se modulan en una frecuencia portadora inalámbrica. Por tanto estas dos señales son moduladas y multiplexadas por encima de una frecuencia óptica (longitud de onda) y transmitidas a un nodo central *upstream*.

La modulación de una frecuencia portadora WiMAX (ejemplo, 2.5 GHz) sobre una frecuencia óptica se denomina microonda sobre fibra (MoF, *Microwave Over Fiber*). En esta arquitectura, hay dos tipos de subportadoras.

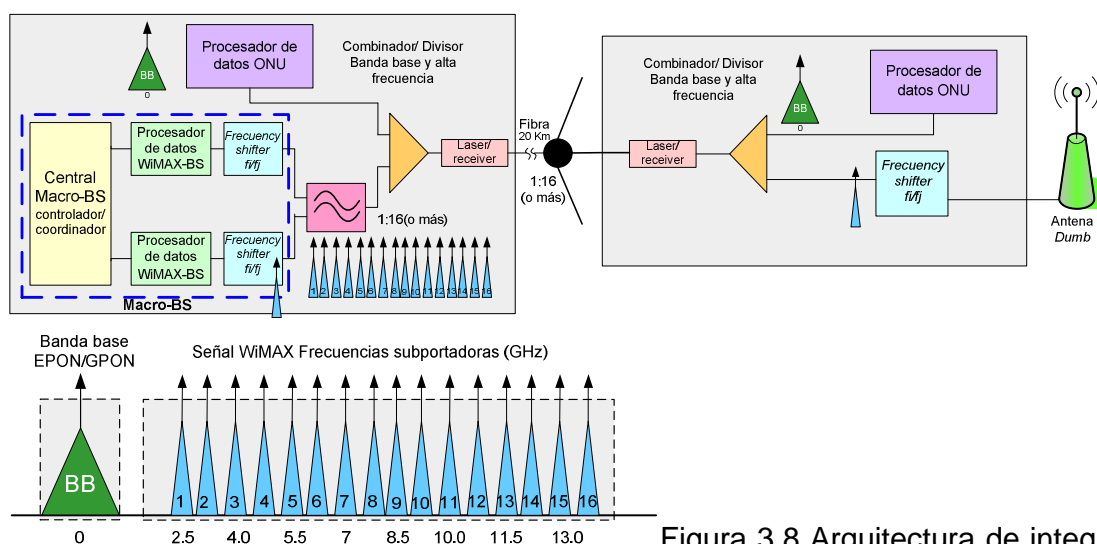


Figura 3.8 Arquitectura de integración

Microonda sobre fibra para G/EPON y WiMAX, y el esquema del espectro de señal portadora en el sistema integrado MoF ^[8]

Una, es una subportadora inalámbrica en el sistema WiMAX, en la cual algunos Megahertz (ejemplo, 10 MHz) del espectro están divididos en múltiples subportadoras (1024 subportadoras) con un espaciado de frecuencia subportadora típico de 10.94 KHz.

El segundo tipo de subportadora es la subportadora óptica en la PON que transmite señales WiMAX desde una antena *dumb* hasta el nodo central.

Para el desarrollo del presente proyecto el primer tipo de subportadora se denomina *subportadora WiMAX*, y el segundo tipo *subportadora óptica*. Una

subportadora WiMAX es consecuentemente una subportadora dentro de una subportadora óptica. Para distinguir señales inalámbricas de diferentes antenas no inteligentes en el nodo central, las frecuencias subportadoras ópticas de diferentes antenas *dumb* deben ser diferentes. Se requiere un intercambiador (convertidor) de radio frecuencia (RF) (como se muestra en la figura 3.8) después de cada antena para convertir, por ejemplo, una frecuencia de modulación WiMAX de 2.5 GHz a una frecuencia superior a 7 GHz antes de modular a la frecuencia óptica. Si un sistema EPON tiene una relación divisoria 1:16, lo cual permite la instalación de hasta 16 antenas *dumb* WiMAX, se requerirá un total de 16 subportadoras ópticas en el espectro óptico.

La figura 3.8 muestra un ejemplo de la asignación del espectro óptico, la cual consta de la señal en banda base EPON (1.25 Gbaudios/s) y 16 frecuencias (altísimas) subportadoras que se utilizan para múltiples señales WiMAX en un espaciamiento de frecuencia de 750 MHz.

En lo que respecta a las estaciones remotas, el nodo central como se muestra en la figura 3.8, consiste de dos módulos principales, una OLT y una central BS WiMAX. A la central BS WiMAX se la denomina *macro-BS*, la cual consta de múltiples unidades BS WiMAX y un controlador/coordinador central *macro-BS*. La *macro-BS* procesa todas las tramas o paquetes de datos desde las micro celdas, también coordina la asignación de ancho de banda y la planificación de paquetes para cada una de las unidades BS WiMAX. Después de que una señal óptica entra en el nodo central y se convierte en un formato electrónico, la señal es demultiplexada en dos porciones:

Una señal en banda base EPON/GPON y un grupo de señales subportadoras ópticas. La señal banda base es reenviada a la OLT para mayor procesamiento de datos, y las señales subportadoras ópticas son reenviadas a la *macro-BS* WiMAX, donde las señales subportadoras ópticas primero son demultiplexadas en múltiples señales independientes, y luego cada una transferida a un convertidor de frecuencia para desviar su frecuencia alta o baja para EPON/GPON o WiMAX

respectivamente. Finalmente, la frecuencia desviada es reenviada a una unidad BS WiMAX, la cual procesa los paquetes para ser transportados en la frecuencia.

Una de las mayores ventajas de la arquitectura *macro-BS* es la operación *handover* simplificada para usuarios móviles. Sin embargo, la misma *macro-BS* puede convertirse en un cuello de botella potencial de toda la red WiMAX debido a la manipulación de todos los paquetes que se generan por el gran número de SSs suscritos al sistema. En sistemas físicos reales, por los efectos no lineales, la diafonía¹ entre las subportadoras ópticas que modulan un componente semiconductor activo común (ejemplo, el láser o un modulador externo) a la oficina central puede ser un inconveniente importante. Además, otro problema podría ser la interferencia de pulsación óptica (OBI, *Optical Beat Interference*) entre señales ópticas subportadoras *upstream*. Para superar estos problemas se requiere, separar las longitudes de onda para cada ONU, lo cual conduce a los sistemas PON de nueva generación: multiplexación por división de onda (WDM², *Wavelength Division Multiplexing*) PONs.

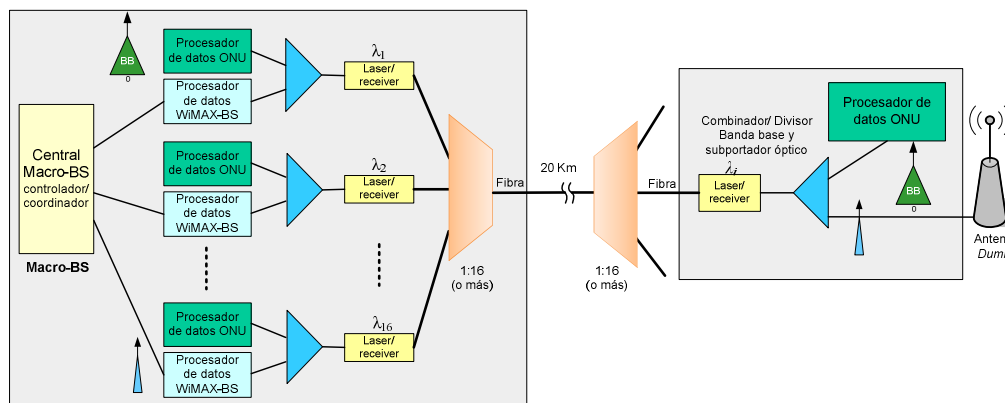


Figura 3.9 Arquitectura de integración Microonda sobre fibra bajo WDM-PON [9]

La utilización de la técnica de transmisión WDM permite modular las dos señales: banda base y WiMAX, cada una sobre longitudes de onda diferentes. De ese modo se desarrollan los sistemas de nueva generación, denominados WDM-PON.

¹ Diafonía: Fenómeno por el que una señal transmitida en un circuito o canal de un sistema de transmisión crea un efecto indeseado en otro circuito o canal.

² WDM: Es una técnica de multiplexación bidireccional, que emplea diferentes longitudes de onda para las señales ascendentes y descendentes. La mayoría de sistemas WDM usan un espaciado de 50GHz. Se puede profundizar en: Recomendación de la UIT-T G.692.

La figura 3.9 ilustra una arquitectura WDM-PON, la arquitectura muestra un sistema con 16 longitudes de onda. Cada longitud de onda transporta una señal de banda base para WDM-PON y una señal subportadora para WiMAX. El esquema del espectro de la señal portadora para un sistema integrado MoF se muestra en la figura 3.10.

En *hardware*, cada nodo remoto está diseñado de una unidad ONU que es la responsable de la comunicación de datos de la WDM-PON, y una antena *dumb* que es la responsable de transmitir una señal de radio WiMAX desde y para sus micro celdas asociadas.

La señal WDM-PON se transmite en banda base sobre fibra ocupando alrededor de 1.25 GHz de ancho de banda. La señal del sistema WiMAX se la modula dentro de una frecuencia portadora inalámbrica WiMAX también denominada microonda sobre fibra. Así, la arquitectura se relaciona con dos tipos de subportadoras. Una es la subportadora inalámbrica del sistema WiMAX, en la cual algunos Megahertz (ejemplo, 10MHz) del espectro están divididos en múltiples subportadoras (ejemplo, 1024 subportadoras) con un espaciamiento de frecuencia subportadora típica de 10.94 KHz. Las otras subportadoras ópticas en la red WDM-PON, llevan señales de cada antena *dumb* (por ejemplo 2.5GHz), así también como los sistemas TDM-PON descritos anteriormente.

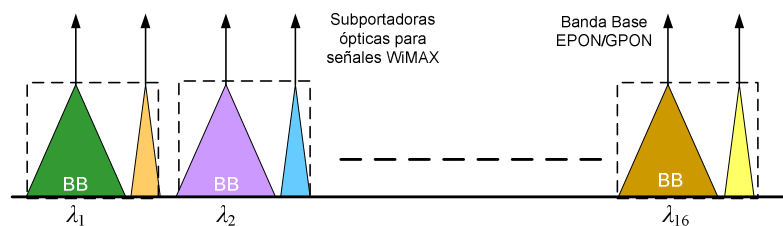


Figura 3.10 Esquema del espectro de señal portadora en el sistema integrado MoF ^[10]

En lo referente a los nodos remotos, el nodo central consiste de dos tipos de módulos importantes, incluyendo OLTs y una central BS WiMAX como se presenta en la figura 3.9. En lugar de una sola OLT, como en el nodo central de la arquitectura MoF descrita anteriormente, existen 16 unidades OLT en la WDM PON. También, hay 16 unidades BS WiMAX que, asociadas con una central

macro BS controladora/coordinadora, crean una *macro*-BS WiMAX. La *macro*-BS procesa todas las tramas o paquetes de datos de las micro celdas asociadas, además coordina la asignación de ancho de banda y planificación de paquetes para cada una de las unidades BS WiMAX.

Específicamente, después de que una señal óptica entra al nodo central, primero es demultiplexada en diferentes longitudes de onda. Luego las señales transportadas en cada una de las longitudes de onda son convertidas en un formato electrónico, las cuales adicionalmente son demultiplexadas en una señal de banda base y una señal WiMAX. La señal de banda base es reenviada a una OLT para el procesamiento de datos y la señal WiMAX es reenviada a una unidad BS WiMAX para el procesamiento de datos.

Comparada a la arquitectura MoF mencionada anteriormente, dicha arquitectura basada en WDM-PON no requiere un intercambiador de frecuencia portadora antes y después de cada procesador de datos BS WiMAX y cada antena *dumb*. Esto se debe a que las frecuencias portadoras WiMAX están moduladas en distintas longitudes de onda y la diferencia entre las longitudes de onda puede ayudar a distinguir desde cuál antena *dumb*, proviene una señal WiMAX.

Las ventajas de la arquitectura MoF pueden ser recapituladas de la siguiente manera: Primero, ya que la *macro*-BS tiene la información completa de petición de ancho de banda desde todas las micro celdas, se puede implementar asignación avanzada de ancho de banda y estrategias de planificación de paquetes para el sistema integrado a fin de mejorar la eficiencia de ancho de banda del sistema. Segundo, debido a que solo una *macro*-BS coordina las comunicaciones de datos de múltiples micro celdas WiMAX, la arquitectura MoF provee conveniencia para la operación de *handover* de usuarios móviles. Tercero, la arquitectura MoF es efectiva en términos de costos. Solo una PON transporta dos redes de acceso de banda ancha independientes. Además, para todas las redes de acceso WiMAX (asociadas con diferentes micro celdas), sólo se requiere una (potente) *macro*-BS en el sitio central, y cada uno de los sitios remotos de acceso se necesita simplemente una antena *dumb*. Se espera que tal configuración sea más económica que el caso regular con una WiMAX-BS dedicada para cada micro

celda. Finalmente, las señales moduladas WiMAX en subportadoras ópticas están en un formato OFDM, en el cual cada bit de datos tiene una duración superior que su formato normal TDM. Así, las señales pueden resistir una mayor dispersión de la fibra y pueden expandir la distancia de transmisión.

Sin embargo, la arquitectura MoF sufre de algunas desventajas. Primero, la central *macro*-BS puede llegar a ser un cuello de botella de toda la red WiMAX debido a la necesidad de atención a todos los suscriptores SSs del sistema. Segundo, la utilización de una sola fibra para llevar dos redes de acceso independientes, incrementa el riesgo de doble fallo cuando se corta la fibra o falla un nodo central. Finalmente, la arquitectura no está estandarizada.

3.4 REDES MULTIETAPA EPON/GPON Y WiMAX ^[6]

Basados en las cuatro arquitecturas fundamentales de integración (2 etapas) mencionadas anteriormente, se puede realizar más extensiones para desarrollar los avances multietapas de los sistemas integrados EPON/GPON y WiMAX aprovechando las ventajas de las técnicas de nueva generación EPON/GPON (por ejemplo según la IEEE 10G EPON¹) y la capacidad de *networking* de la topología en malla² de WiMAX. Específicamente para la técnica 10G EPON, se ha formado recientemente un nuevo grupo de trabajo de la IEEE (P802.3av), para estandarizar a 10G EPON, el cual tiene la intención de mejorar la capacidad de transmisión de EPON a 10 Gbps. La figura 3.11 ilustra una arquitectura de integración típica multietapa, la cual consiste de cuatro jerarquías así:

- 1) 10G EPON
- 2) EPON (opcional GPON)

¹ La IEEE aún está trabajando en la revisión de la especificación anterior para obtener un ancho de banda 10 veces más grande que recogerá el nuevo estándar IEEE 802.3av (10G EPON). Se puede profundizar en: <http://ieee802.org/3/av/index.html>.

² La principal diferencia entre los modos P2MP y el de Malla es que en el modo P2MP, el tráfico solo ocurre entre la BS y las SSs, mientras que en el modo malla el tráfico puede ser enrutado a través de otra SS y puede ocurrir directamente entre SSs.

- 3) Red malla punto a punto (P2P) WiMAX (entre estaciones base)
- 4) Red de acceso WiMAX (para las SSs)

Específicamente, la red de acceso 10G EPON funciona como un *backhaul* para interconectar múltiples OLTs EPON (opcional GPON). Con la capacidad de 10 Gbps compartida hasta 16 OLTs EPON y si EPON está operando a una velocidad de 1 Gbps, es razonable tener una proporción de sobre suscripción de 0.6 provista por cada OLT. La etapa desde la OLT EPON a la ONU-BS exactamente es la misma que las arquitecturas integradas (dos etapas) descritas anteriormente.

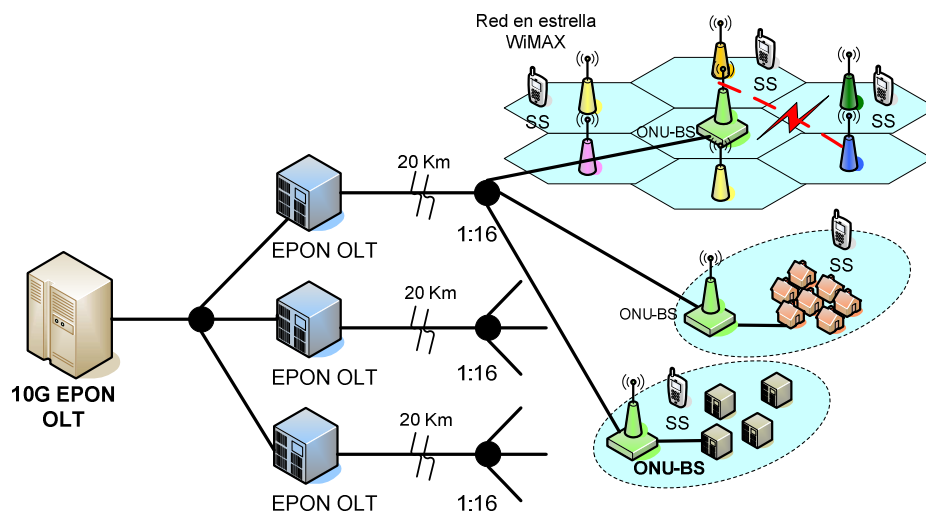


Figura 3.11 Redes de acceso de banda ancha integradas multietapa ^[11]

Finalmente, para la etapa de la red de acceso WiMAX, además de desplegar una ONU-BS para servir únicamente a una micro celda WiMAX, adicionalmente se puede tomar ventajas de la capacidad de *networking* P2P WiMAX para construir una estrella WiMAX o un centro de red de comunicaciones, ilustrada en la parte superior de la figura 3.11, en la cual una central ONU-BS funciona como una estación transmisora para reenviar todos los paquetes desde sus BSs vecinas.

La red en estrella WiMAX puede ser eficiente para la red de acceso en áreas rurales, donde los usuarios están dispersos y la agregación de ancho de banda a los usuarios es baja. Finalmente, la arquitectura de integración multietapa toma en consideración lo heterogéneo del nodo de acceso. Una ONU-BS conectada a la red EPON puede ser el único que regule el tráfico de datos a las micro celdas

WiMAX vecinas como en una red en estrella WiMAX o el único transportando solamente datos de usuario a una sola micro celda WiMAX. Además, para soportar aún altos anchos de banda, es posible conectar directamente una ONU-BS a una 10G EPON (reemplazando una OLT EPON con una ONU-BS) tal que la ONU-BS soporte un promedio de velocidad de datos, mayores que 600 Mbps.

La arquitectura multietapa posee varias ventajas:

- Primero, la arquitectura cubre un área de servicio de banda ancha enorme.
- Segundo, se espera una mejor capacidad de utilización de la red, a causa del beneficio de la multiplexación del tráfico entre un grupo voluminoso de usuarios.
- Tercero, lo heterogéneo del nodo de acceso en la arquitectura provee flexibilidad en el diseño y operación de la red.
- Finalmente, además del *handover* a través de las micro celdas como en las arquitecturas de dos etapas previas, la arquitectura puede soportar la operación *handover* a través de macro celdas.

3.5 DISEÑO Y OPERACIÓN ^{[7], [8], [9], [10]}

Para seleccionar las características de una red integrada EPON/GPON y WiMAX, las empresas de telecomunicaciones deben tener en cuenta lo siguiente:

- 1) Número y densidad de clientes (incluidas las previsiones de demanda).
- 2) Costes de construcción y mantenimiento.
- 3) Escalabilidad (número de fibras terminadas, longitud total de la fibra en la red, recursos del espectro, etc.).
- 4) Sistema de supervisión y prueba de la red óptica.

Para el caso del diseño o construcción de una red integrada EPON/GPON y WiMAX, las empresas de telecomunicaciones deben seleccionar, según la necesidad de redes EPON/GPON y WiMAX en cada región, una o más de las

siguientes ubicaciones para los componentes de derivación (fibra óptica) conforme a las características prácticas adecuadas o la utilización de antenas para el caso de la red WiMAX. Además, estas empresas deben elegir el tipo de componente de derivación (fibra óptica) considerando los factores y las características de calidad de funcionamiento, la asignación correcta del espectro inalámbrico, direccionamiento y reenvío de paquetes, soporte de QoS, procesos de *handover* y la fiabilidad del sistema.

3.5.1 IMPLEMENTACIÓN ÓPTIMA DE FIBRA

Bajo las arquitecturas integradas, la red EPON/GPON conecta múltiples estaciones base (BSs) WiMAX. Ya que el costo de instalar fibras ópticas es alto y es el que domina el costo global de construcción de un sistema integrado, es importante minimizar la longitud total de la fibra. El problema de la minimización de la longitud de la fibra se debe a los siguientes puntos: ofreciendo un conjunto de micro celdas WiMAX dispersas, se necesita encontrar una ubicación óptima de los divisores ópticos ya sean EPON o GPON para interconectar todas las BSs WiMAX y minimizar la longitud total de la fibra.

Mientras la situación más simple de este problema es encontrar un punto medio geométrico (llamado también el punto *Fermat-Weber*¹), que despliegue fibras más pequeñas para interconectar todas las ONU-BSs a una OLT. El problema se torna más complicado cuando se consideran más restricciones. Por ejemplo, el costo de construcción de una infraestructura de cableado subterráneo independiente para un divisor óptico, ya que el divisor podría estar obligado a ser co-ubicado a una ONU o a una OLT. También, la distancia de transmisión básica de una EPON puede ser otra restricción, la cual requiere que la EPON sea instalada dentro de un rango de, por ejemplo 20 Km; a pesar de que este problema se puede solucionar utilizando una red GPON la cual ofrece un rango de cobertura mayor al de EPON y según la actual Recomendación UIT-T G.984.6 describe mejoras en dicho alcance. En otras situaciones si hay un gran número de BSs WiMAX,

¹ Se puede profundizar en: *Geometric median* http://en.wikipedia.org/wiki/Geometric_median.

pueden requerirse múltiples EPONs, lo cual no puede ser apropiado para una sola o pocas EPONs.

Diseño del sistema óptico

Las redes EPON/GPON pueden implementarse utilizando un diseño de dos o tres longitudes de onda. El diseño de dos longitudes de onda sirve para entregar datos, voz y video digital IP- conmutado (SDV, *Switched Digital Video*). Un diseño de tres longitudes de onda es requerido para proveer servicios de video (CATV, *Cable Television*) de radio frecuencia (RF, *Radio Frequency*) o multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*).

La figura 3.12 muestra el diseño óptico de las dos ventanas de transmisión de EPON/GPON. En esta arquitectura, la ventana de transmisión de los 1490 nm porta datos, video y voz downstream, mientras que la ventana de transmisión de los 1310 nm se emplea para llevar video bajo demanda (VoD) y requerimientos de canal, bien como datos o como video upstream. Usando los 1.25 Gbps de una PON bidireccional, la pérdida óptica con esta arquitectura le da a PON un alcance de 20 Km con 32 splitters.

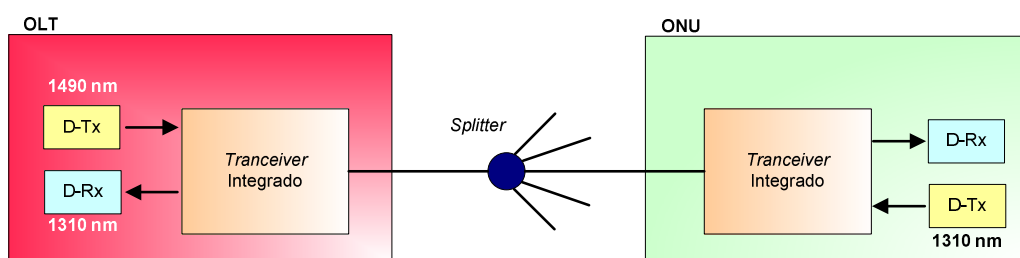


Figura 3.12 Diseño óptico para dos longitudes de onda en una EPON/GPON ^[12]

La figura 3.13 muestra el diseño de una EPON/GPON de tres longitudes de onda. En esta arquitectura la longitud de onda 1490 nm y 1310 nm son utilizadas en direcciones downstream y upstream respectivamente. Mientras que la longitud de onda de 1550 nm está reservada para video downstream. El video se codifica como MPEG2 y es transportado con modulación de amplitud en cuadratura

(QAM). Usando esta configuración la PON tiene un rango efectivo de 18 Km con 32 splitters.

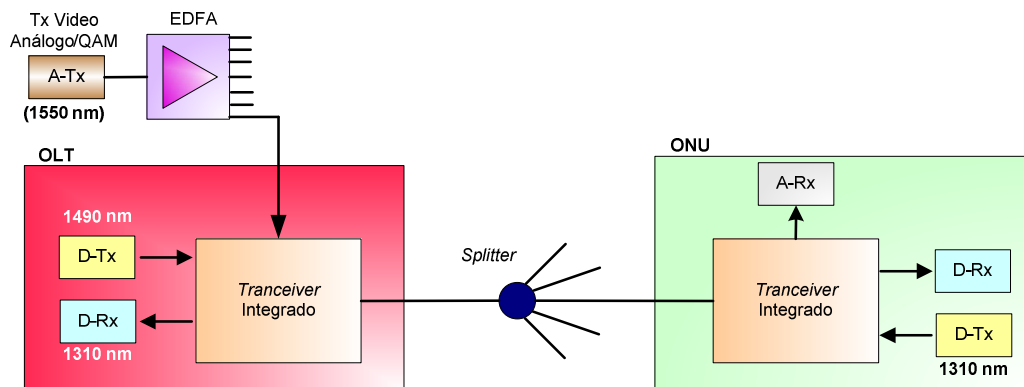


Figura 3.13 Diseño óptico para tres ventanas de transmisión en una EPON/GPON [13]

El diseño con tres longitudes de onda también se usa para proveer DWDM sobre EPON/GPON. Esta solución usa una fibra óptica simple con 1490 nm de downstream y 1310 nm de upstream. La ventana de 1550 nm (1530 nm-1565 nm) se deja sin uso y los transceivers son designados para transportar los canales DWDM sobre PON transparentemente, por lo que la PON puede desplegarse sin componentes DWDM, mientras permitan futuras actualizaciones para proveer servicios de video analógico, incremento de ancho de banda, etc.

3.5.2 ASIGNACIÓN DEL ESPECTRO INALÁMBRICO

También es importante considerar el re-uso de frecuencia¹ y la asignación en las micro celdas WiMAX en el contexto de las arquitecturas integradas. Para una red estrella WiMAX basada en enlaces P2P como se muestra en la figura 3.11, un factor de re-uso de frecuencia, por ejemplo, siete, puede adoptarse para la asignación de la frecuencia de las micro celdas circundantes a la central ONU-BS.

Bajo esta circunstancia, cada una de las micro celdas es asignada con una única frecuencia sin interferencia alguna con las señales de sus micro celdas vecinas.

¹WiMAX Forum, "Mobile WiMAX Part I: a technical overview and performance evaluation", August 2006. Ver Anexo D, Publicaciones del Forum WiMAX.

Además, para las arquitecturas integradas (como se muestra en la figura 3.2), dependiendo del tipo de micro celdas, puede presentarse alguna interferencia, por tanto se puede adoptar diferentes estrategias de re-uso de frecuencia (ver enunciado 3.5.2.2) y asignación. Específicamente, si la red integrada consiste de varias micro celdas dispersas sin interferencia, entonces existe mucha libertad para la asignación de frecuencia de las micro celdas. De otra manera, debería adoptarse una asignación y estrategia de re-uso de frecuencia similar al que presenta la red en estrella WiMAX de la figura 3.11.

Finalmente, vale la pena mencionar que la asignación de espectro inalámbrico¹ (ver enunciado 3.5.2.1) para la arquitectura MoF propuesta, presenta una importante ventaja ya que dicha arquitectura asigna una única frecuencia subportadora óptica a cada micro celda. Dado el requerimiento de asignación de diferentes frecuencias a las micro celdas vecinas con el fin de evitar interferencia, es beneficioso asignar directamente una frecuencia subportadora óptica como una frecuencia portadora WiMAX a cada micro celda. De este modo, pueden removerse todos los intercambiadores de frecuencia intermedia en la arquitectura, con la consiguiente disminución en el costo del sistema.

3.5.2.1 Bandas de Frecuencias para WiMAX

Las aplicaciones son dependientes del espectro a ser usado. Las principales bandas de interés se muestran a continuación:

3.5.2.1.1 Bandas Licenciadas (10-66 GHz) (WiMAX Fijo)

Las bandas de los 10-66 GHz proveen un ambiente físico donde, debido a que se tienen longitudes de onda pequeñas, se requiere de línea de vista (LOS) y el efecto *multipath* es insignificante. En la banda de los 10-66 GHz, son típicos anchos de banda de los canales de 25 MHz o 28 MHz, con una tasa de transmisión de datos de más de 120 Mbps; este ambiente está bien preparado

¹ Se puede profundizar en: "Spectrum_Requirements_for_Mobile_WiMAX", September 2007. Ver Anexo D, Publicaciones del Forum WiMAX.

para acceso P2MP a aplicaciones y servicios desde pequeñas oficinas / oficinas de hogar (SOHO, *Single Office Home Office*) a través del medio para aplicaciones de oficina grande.

La interfaz aire del esquema de modulación de portadora simple especificada aquí para 10- 66 GHz es conocida como interfaz aire “WirelessMAN-SC”

3.5.2.1.2 Frecuencias Bajo los 11 GHz.

Las frecuencias bajo los 11 GHz proveen un ambiente físico donde, debido a que se tiene longitudes de onda grandes, no existe requerimiento de línea de vista (LOS), sin embargo, el efecto *multipath* es significativo. La capacidad de soportar escenarios con línea de vista (LOS) y sin línea de vista (NLOS) requiere funcionalidades adicionales a nivel físico, como lo son el soporte de técnicas avanzadas de manejo de potencia y múltiples antenas.

Se introducen características adicionales MAC (Control de acceso al medio) como topología en malla y Requerimiento de Repetición Automática (ARQ).

3.5.2.1.3 Bandas no Licenciadas Bajo los 11 GHz (Principalmente 5-6 GHz) (WiMAX Fijo)

El ambiente físico para bandas no licenciadas bajo los 11 GHz es similar al de las bandas licenciadas en el mismo rango de frecuencias, como se describió en la sección 3.5.2.1.2; sin embargo, las bandas no licenciadas introducen interferencia adicional y problemas de coexistencia, considerando que las restricciones regulatorias limitan la potencia radiada permitida. Además de las características descritas en la sección 3.5.2.1.2, la capa física y la capa MAC introducen mecanismos para detección y anulación de interferencias así como la prevención de interferencias perjudiciales entre otros usuarios, incluyendo a los usuarios de espectro específico identificados por regulación. Esto incluye un mecanismo de

regulación llamado selección dinámica de frecuencias (DFS, *Dynamic Frequency Selection*).¹

3.5.2.2 Re-uso de Frecuencia para OFDMA

En esta sección se define las extensiones del sistema OFDMA para trabajar en escenarios desplegados con un factor de re-uso de frecuencia de 1.

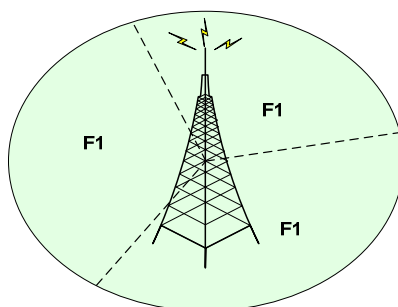


Figura 3.14 Configuración con re-uso de 1 y 3 sectores por celda ^[14]

Un sistema OFDMA es ideal para trabajar con escenarios desplegados con factor de re-uso de frecuencia mayor que 1, pero para satisfacer requerimientos de fiabilidad, cobertura, capacidad, eficiencia espectral y servicio de localización de base, el sistema puede ser configurado para trabajar con un factor de re-uso de frecuencia de 1, lo que significa que la misma frecuencia de RF es asignada para todos los sectores en la celda. En este caso, debe aplicarse un nuevo esquema de trabajo para alcanzar el rendimiento necesario. Un escenario usando un re-uso de frecuencia de 1 se presenta en la figura 3.14.

El patrón de re-uso de subcanal puede configurarse para que los usuarios cercanos a la estación base operen en la zona con todos los subcanales disponibles. Mientras que para los usuarios que están en el borde, cada celda o sector opera en la zona con una fracción de todos los canales disponibles. En la figura 3.15, F1, F2 y F3 representan diferentes conjuntos de subcanales en el

¹ En el contexto de este estándar, el uso de los términos "frecuencias no licenciadas" o "bandas no licenciadas" debe ser tomado para suponer una situación donde autoridades de licenciamiento no coordinen asignaciones individuales a operadores, a pesar de que si el espectro en cuestión tiene un estatus regulatorio particular como licenciado o no licenciado.

mismo canal de frecuencia. Con esta configuración, la carga de re-uso de frecuencia de uno está mantenida por los usuarios centrales para maximizar la eficiencia espectral y la fracción de re-uso de frecuencia está implementada por usuarios de borde para asegurar la calidad de la conexión y el *throughput* de usuarios de borde.

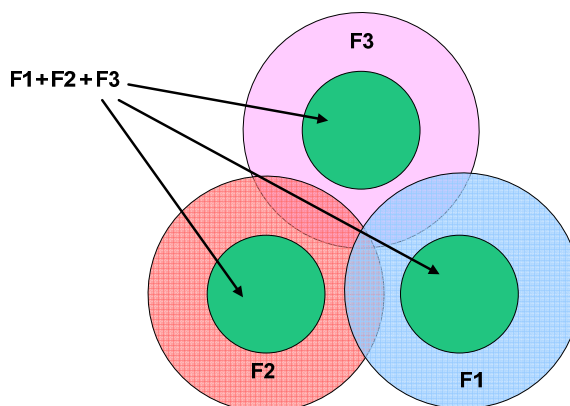


Figura 3.15 Re-uso de Frecuencia ^[15]

La planificación de re-uso de subcanal se puede optimizar dinámicamente por sectores o celdas basándose en la carga de la red y en las condiciones de interferencia en una de base trama por trama. Por consiguiente, todas las celdas y sectores pueden operar en el mismo canal de frecuencia sin necesidad de planificación de frecuencia.

3.5.3 DIRECCIONAMIENTO Y REENVÍO DE PAQUETES

En los sistemas integrados, cada SS usa el protocolo DHCP¹ para obtener una dirección IP de un servidor DHCP, razón por la cual la central OLT puede fijar direcciones a las ONU-BS remotas. Para reenvío de paquetes IP, particularmente entre las SSs locales que forman parte de un sistema de acceso integrado común, se pueden aplicar varios mecanismos de reenvío en la red y la capa MAC, como se muestra en la figura 3.16. La figura 3.16a ilustra un ejemplo de utilización de un *router* de acceso (AR) IP para el reenvío de paquetes IP.

¹ DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*): es un conjunto de reglas para dar direcciones IP y opciones de configuración a ordenadores y estaciones de trabajo en una red. Ver Anexo A.

Los paquetes IP primero son enviados desde las SSs encapsulando paquetes IP en tramas *Ethernet* (se asume que la CS de WiMAX es operada/manejada bajo el modo de PDU MAC WiMAX IP/*Ethernet*), a través de la red de acceso integrada para la OLT. La OLT posteriormente reenvía los paquetes IP para su AR adjunto demandando más reenvío ya sea para el público o de regreso a las SSs locales en la misma red de acceso. En este proceso de reenvío de paquetes, los dispositivos intermedios, incluyendo la OLT y la ONU-BS, se asume que no tienen la capacidad de conmutación (*switch*) de tramas *Ethernet* basadas en sus direcciones MAC como un puente (*bridge*¹) *Ethernet*.

Las ventajas de este modo de reenvío incluyen arquitecturas más simples del nodo ONU-BS y la OLT; así pues, no existe requerimiento de la capacidad de conmutación de la capa MAC y hay mejor seguridad para cada SS ya que todos los paquetes deben pasar por un *router* el cual posee seguridades mayores a las de utilizar un *switch* de capa 2 (ver anexo A). Sin embargo, las desventajas de este modo caen en el desaprovechamiento de ancho de banda del tráfico local reenviado por el lazo de regreso (*loopback*) como se muestra en la figura 3.16a (ejemplo, los paquetes de la SS1 a la SS3 necesitan pasar un lazo de ida y vuelta), y la AR puede llegar a ser un cuello de botella de todo el sistema ya que necesita procesar todos los paquetes ya sean locales o públicos.

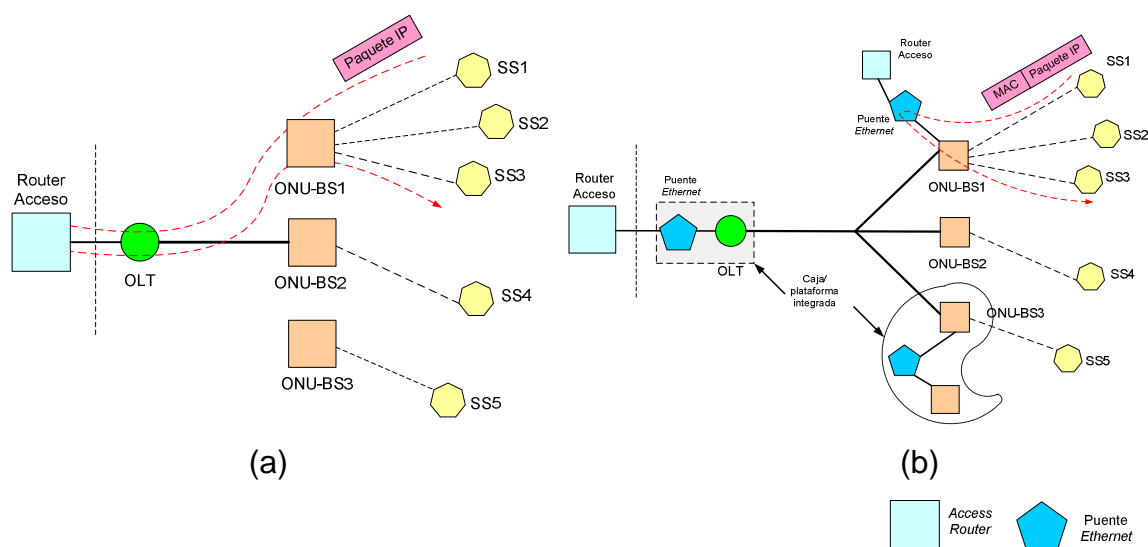


Figura 3.16 Reenvío de Paquete/trama en una red de acceso integrada: a) capa red reenvío de paquete IP; (b) capa enlace conmutación de trama *Ethernet* ^[16]

¹ Ver Anexo A.

Para evitar el tráfico local *loopback* mencionado anteriormente, se propone otro mecanismo de reenvío basado en conmutación de capa 2. Específicamente, para cada ONU-BS así también como para cada OLT, un *bridge Ethernet* de capa 2 está anexado, lo cual permite al nodo tener la capacidad de conmutación de tramas *Ethernet* basadas en sus direcciones MAC (*MAC addresses*). La norma IEEE 802.3D¹ (STP, *Spanning Tree Protocol*) puede directamente emplearse para este propósito, y la red de acceso integrada esencialmente por un simple árbol con un *bridge Ethernet* adjunto para la OLT como un nodo raíz (*root*). En la figura 3.16b, se ilustran los paquetes intercambiados entre las SSs dentro de una micro celda común o entre micro celdas, puede ser interceptado por un *bridge* para evitar un largo viaje de ida y vuelta como en el previo modo AR. Por ejemplo, los paquetes IP que van desde la SS1 hacia la SS3 pueden ser conmutados por un *bridge* adjunto para una ONU-BS a través de tramas *Ethernet* que encapsula los paquetes. Esto también se refiere al intercambio de paquetes entre diferentes micro celdas: el *bridge* anexado a la OLT conmuta estos paquetes para evitar el acceso al borde AR.

En la figura 3.16 se usa bloques independientes para representar cada ONU-BS, *bridge* y AR en un nodo remoto. Dichas ONU-BS, *bridge* y AR pueden integrarse en un solo dispositivo/caja para el ahorro de costos, así también en el nodo central. Las ventajas del modo de reenvío basado en *bridge* incluyen el evitar desperdiciar el ancho de banda debido al lazo cerrado del reenvío de paquetes entre las SSs dentro de la misma red de acceso integrada, y reducir la carga en el borde AR, que ahora necesita reenviar los paquetes solamente a un público.

El modo de reenvío, sin embargo, trae consigo algunas desventajas de alto costo sobre cada plataforma del nodo (ambas cajas centrales y remotas); como se requiere capacidad de conmutación de capa 2² extra; y todas las SSs están compartiendo una red de capa 2 común para paquetes reenviados locales, lo cual presenta seguridad de bajo nivel cuando todos los paquetes pasan por un AR.

¹ Se puede profundizar en: IEEE 802.1D, "*Media Access Control (MAC) Bridges*," June 2004.

² Ver Anexo A.

Así, para mejor seguridad del usuario, un extra AR puede anexarse a un nodo ONU-BS, como se muestra en la figura 3.16b para ofrecer una opción de reenvío de paquetes por usuarios que requieran mayor seguridad. Además, la técnica de LAN virtual (VLAN-IEEE 802.3Q¹) es otra opción para mejor seguridad bajo el modo de reenvío basado en *bridge* en el caso que se emplee una red EPON.

3.5.4 ASIGNACIÓN DE ANCHO DE BANDA Y SOPORTE DE QoS

Es un asunto desafiante para EPON y WiMAX, la asignación de ancho de banda eficaz en dirección *upstream* a los usuarios. Las redes EPON y WiMAX emplean un mecanismo genérico de sondeo/demanda/concesión; es decir, que una estación central (OLT o BS WiMAX) sondea a una estación remota (ONU o SS) para demandas de ancho de banda, luego la estación remota responde con dichas demandas, y finalmente, la estación central concede ancho de banda a las estaciones remotas. La información de control de sondeo/demanda/concesión usualmente se intercambia mediante un canal de control dedicado o por paquete de datos *piggybacking*.

Las concesiones de ancho de banda no demandadas también pueden hacerse periódicamente para soportar servicios sensitivos al retardo o para sondear cada estación remota y permitir enviar una demanda.

En base a un mecanismo genérico sondeo/demanda/concesión, EPON/GPON y WiMAX comparten muchas similitudes en asignación de ancho de banda y soporte de QoS. Primero, la EPON/GPON por un lado demanda ancho de banda por el principio básico de prioridad de cola y por otro asigna ancho de banda sobre una base por ONU. En un ancho de banda concedido, cada ONU efectúa decisiones locales para asignar el ancho de banda y planificar paquetes de transmisión para cada cola de prioridad. WiMAX solicita ancho de banda en un principio básico por conexión, pero asigna ancho de banda en una base por SS. Al ser concedido el ancho de banda, cada SS efectúa decisiones locales para asignar el ancho de banda y planificar los paquetes de transmisión para cada

¹ Se puede profundizar en: IEEE 802.1Q, "Virtual Bridged Local Area Networks," May 2006.

conexión de servicio. Segundo, ambas EPON y WiMAX soportan dos tipos de modos de asignación de ancho de banda: no solicitado (*unsolicited*) y cuando se demande (*upon request*). Esto muestra una buena similitud en el soporte de servicios con diferentes niveles de QoS, incluyendo servicios sensibles al retardo, servicios garantizados de banda ancha, y servicios de mejor esfuerzo. Tercero, ambas EPON y WiMAX clasifican tráfico de datos en un modo de servicios diferenciados (*DiffServ*¹). EPON tiene hasta ocho colas de prioridad diferentes en cada ONU, mientras WiMAX clasifica el tráfico de datos en cinco niveles de QoS (ver primer capítulo) dirigidos desde el servicio no solicitado de concesión (UGS) hasta servicios de mejor esfuerzo (BE).

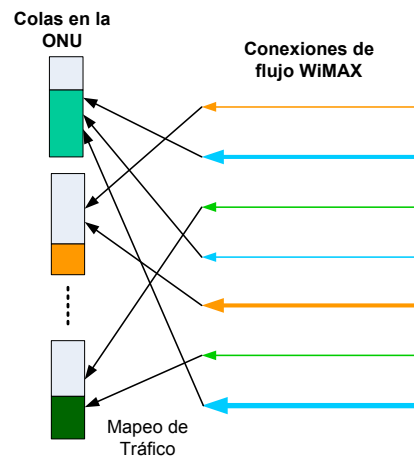


Figura 3.17 Mapeo de QoS entre flujos WiMAX y colas de prioridad G/EPON ^[17]

La similitud anteriormente señalada facilita la integración de asignación de ancho de banda y soporte de QoS en las arquitecturas de acceso integradas (sin incluir la arquitectura independiente). Primero, la integración de asignación de ancho de banda dinámica puede presentarse en arquitecturas integradas basadas en el mecanismo sondeo/demanda/concesión. En el lado EPON/GPON, una ONU entiende completamente la información de concesión de ancho de banda en una BS WiMAX, lo cual ayuda a demandar más eficientemente ancho de banda de una OLT. En el lado WiMAX, una vez que a una ONU le es concedido ancho de banda, la BS WiMAX entiende completamente cuánto ancho de banda puede

¹ *DiffServ, Differentiated Services*: Un protocolo QoS (calidad de servicio) que prioriza paquetes provenientes del servicio de VoIP frente a los demás para asegurar una buena calidad de voz, aun cuando el tráfico de red es alto. Para profundizar ver: <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3768/1/54630-1.pdf>.

asignar para cada tipo de servicio, y así poder hacer una asignación de ancho de banda óptima entre todos los flujos de servicios. Segundo, para permitir una integración más apta, se requiere un mecanismo de mapeo eficiente entre las colas de prioridad de EPON y la conexión de servicios WiMAX. Específicamente, el mapeo (se ilustra en la figura 3.17) necesita conocer qué flujo WiMAX debería ser almacenado en qué prioridad de cola EPON al equivalente QoS.

EPON soporta QoS en un modo *DiffServ*, bajo el cual los paquetes están clasificados y almacenados en diferentes colas de prioridad. En contraste, aunque los servicios de WiMAX se han clasificados para soportar diferentes niveles de QoS, WiMAX es una tecnología orientada a conexión, lo cual esencialmente sigue un esquema de servicios integrados (*IntServ*). Así, para la integración, un problema interesante es cómo realizar una conversión eficiente entre servicio *DiffServ* e *IntServ*. Además, también es atractivo ver cómo la calidad de servicio QoS extremo a extremo puede soportarse después de que estos dos sistemas estén integrados.¹

3.5.5 HANDOVER

Para soportar movilidad del usuario, es importante considerar la operación de *handover* cuando un usuario cruza el límite de dos celdas WiMAX. Se espera que las arquitecturas integradas provean de una operación de *handover* más simple. En el contexto de la arquitectura multietapa, existen múltiples niveles de operación de *handover*, incluyendo *inter-micro celda handover*² e *inter-macro celda handover*³.

Como se muestra en la figura 3.2, una OLT puede funcionar como un coordinador para manipular completamente el *handover* del usuario, al igual, la OLT puede pasar por alto todas las micro celdas conectadas a la EPON/GPON. En particular, las arquitecturas independientes e híbridas, sesionadas por la OLT, pueden

¹ Nota: Los tipos de tráfico en las redes EPON/GPON, flujos de tráfico WiMAX y su relación en las arquitecturas integradas, se puede profundizar en: Anexo A.

² Micro celda es aquella celda arraigada a una estación base WiMAX.

³ Macro celda está referida a una gran celda compuesta de múltiples micro celdas y cuya operación está coordinada por un controlador central en una OLT EPON/GPON.

desplegar un coordinador *handover* para el control de la operación de *handover* sobre principales micro celdas razón por la cuál se debería reservar un canal de control dedicado para asegurar que el controlador central de *handover* pueda intercambiar información con la BS WiMAX de cada nodo remoto en tiempo real, por tanto se proporciona a una vieja estación BS WiMAX con instrucciones para despejar una conexión con un usuario móvil, y a una nueva BS WiMAX para iniciar una nueva conexión con el usuario.

Comparado con las tres primeras arquitecturas integradas, la arquitectura MoF (*Microwave Over Fiber*) incluso es más simple en la operación *handover* del usuario. Ya que todo el tráfico del usuario se procesa en una central WiMAX *macro-BS*, no se requiere un canal de control dedicado para las comunicaciones entre una central controladora y las individuales *micro-BSs* WiMAX como en las otras arquitecturas integradas. Para usuarios *handover*, la *macro-BS* WiMAX puede continuar monitoreando paquetes del usuario para encontrar de qué antena no inteligente (correspondientemente, sobre cuál frecuencia de subportadora óptica) ha sido reenviado el tráfico del usuario.

Si el tráfico del usuario se reenvía sobre la misma frecuencia de subportadora como antes, ningún reparto es requerido; de otra manera, si el tráfico del usuario se recibe de una subportadora óptica diferente, quiere decir que el usuario se ha cambiado a una nueva micro celda y se requiere por tanto una operación de *handover*. En el futuro, cuando la *macro-BS* envíe los datos al usuario, la *macro-BS* debe usar la nueva frecuencia de subportadora óptica para que los datos puedan ser reenviados a una nueva micro celda en la cual el usuario esté localizado.

Finalmente, un sistema integrado multietapas (más de dos etapas) como se muestra en la figura 3.11 puede proveer aun capacidad más potente de operación *handover*. La misma operación mencionada anteriormente puede efectuarse por el *handover* entre micro celdas que son controladas por una OLT común EPON (ejemplo, dentro de la misma macro celda). Sin embargo, si un usuario está cruzando macro celdas, entonces más que una OLT EPON, se requiere de un coordinador de niveles superiores. Específicamente, la operación de *handover* debería ser alta para la OLT 10G EPON a fin de que domine/vigile una gran celda

que incluye todas las macro celdas. Otro nivel de operación de *handover* puede también ocurrir entre las micro celdas en una red en estrella WiMAX, que es una etapa mínima en la arquitectura integrada como se muestra en la figura 3.11. En este tipo de *handover*, la operación puede funcionar basada en el estándar IEEE 802.16e, bajo el cual el nodo central ONU-BS puede funcionar como una central controladora para coordinar la operación de *handover* a través de diferentes micro celdas.

3.5.6 FIABILIDAD

Un sistema integrado cubre una gran área de servicio, la cual puede estar constituida de 16 (o más) micro celdas WiMAX. Cualquier fallo de la red puede afectar un gran número de usuarios; la fiabilidad es consecuentemente otro asunto importante para un sistema integrado de acceso EPON/GPON y WiMAX. Existen varios sitios en las que el sistema integrado puede fallar. La posición más crítica se encuentra ubicada en la sección entre un divisor óptico y una OLT. Este fallo puede provocar a todos los usuarios suscritos a un sistema integrado, la pérdida total de sus servicios de red. Típicamente, debido a una topología árbol de un sistema EPON, la única solución viable para superar este tipo de fallos es instalar otra fibra geográficamente independiente entre el divisor óptico y la OLT (como se muestra en la figura 3.18), tal que cuando se corte una fibra, la otra puede tomar la responsabilidad de la transferencia de datos.

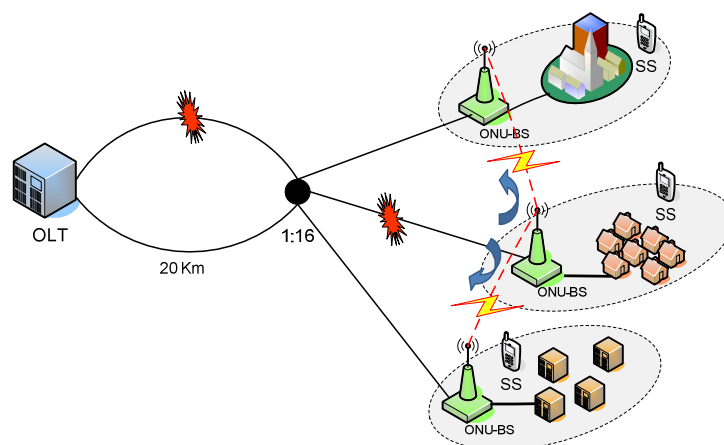


Figura 3.18 Red de acceso integrada fiable [18]

Otro tipo de corte de fibra puede ocurrir en la sección entre un divisor óptico y una ONU-BS. Tal fallo es menos serio que el caso anterior ya que solamente una única ONU-BS es afectada. Además de la implementación de fibra 1+1 entre un divisor óptico y una ONU-BS, otra solución efectiva es aprovechar las ventajas de capacidad de *networking* en la red en malla de WiMAX para establecer un enlace P2P inalámbrico directo entre una BS y todas sus BSs vecinas, de tal manera que si la fibra entre la anterior BS y el divisor óptico se corta, la BS todavía puede comunicarse con la OLT a través del repetidor de sus BSs vecinas. La figura 3.18 ilustra este tipo de fallo de la red y la solución correspondiente de protección.

Para el caso de utilización de un sistema GPON, se propone una protección; desde el punto de vista de la gestión de la red de acceso, se considera que la arquitectura de protección de la GPON mejora la fiabilidad de las redes de acceso. Sin embargo, la protección se debe considerar como un mecanismo facultativo ya que su implementación está en función de la elaboración de los sistemas económicos.

3.5.6.1 Posibles tipos de conmutación

Hay dos tipos de conmutación de protección análogos a los de los sistemas de la jerarquía digital síncrona (SDH, *Synchronous Digital Hierarchy*):

- 1) conmutación automática.
- 2) conmutación forzada.

El primer tipo se activa cuando se detecta una avería tal como pérdida de señal, pérdida de trama, degradación de señal (cuando la tasa de bits erróneos (BER, *Bit Error Ratio*) es mayor que el umbral predeterminado), etc. El segundo tipo se activa mediante eventos administrativos, tales como el reencaminamiento de fibra, sustitución de fibra, etc. El sistema GPON debería soportar ambos tipos, si fuese necesario, aunque se trate de funciones facultativas. Por lo general, la función OAM se encarga del mecanismo de conmutación, por lo tanto se debería reservar en la trama OAM el campo de información OAM necesario.

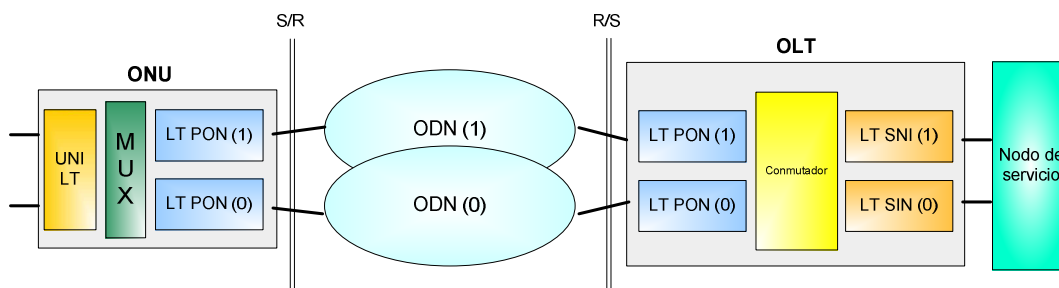


Figura 3.19 Modelo del sistema dúplex ^[19]

En la figura 3.19 se ilustra el modelo del sistema dúplex de la red de acceso. La parte sobresaliente de la protección en el sistema GPON debería ser una parte de la protección entre la interfaz ODN en la OLT y la interfaz ODN en la ONU a través de la ODN, excluida la redundancia de SNI en la OLT.

3.5.6.2 Posibles configuraciones y características de la GPON dúplex

Puede haber varios tipos de sistemas GPON dúplex, como se ilustra en las figuras 3.20 a 3.23. Los protocolos de control de cada configuración se deben especificar de manera independiente.

Por ejemplo, en la figura 3.20 no se requiere protocolo de conmutación para la OLT/ONU, ya que la conmutación se aplica únicamente a las fibras ópticas. Además, en la figura 3.21 tampoco se requiere protocolo de conmutación puesto que la conmutación se lleva a cabo únicamente en la OLT.

Ejemplos de configuración

Tipo A: En la primera configuración se duplican únicamente las fibras ópticas, como se muestra en la figura 3.20. En este caso, las ONUs y la OLT no se duplican.

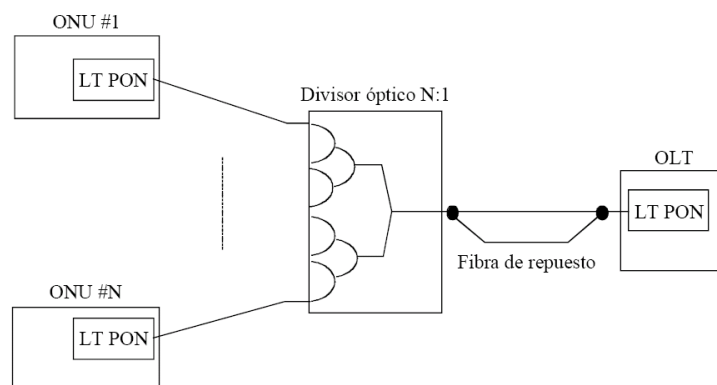


Figura 3.20 Sistema GPON dúplex: sistema de fibras dúplex [20]

En este caso, durante el tiempo de conmutación es inevitable la pérdida de señal o incluso de tramas. No obstante, después de la conmutación de la fibra se deben mantener todas las conexiones establecidas entre el nodo de servicio y el equipo terminal.

Tipo B: En la segunda configuración (figura 3.21) se duplican las OLTs y las fibras ópticas entre las OLTs y el divisor óptico, y este último tiene dos puertos de entrada/salida en el lado de la OLT.

Esta configuración permite reducir el costo de la duplicación de las ONUs, aunque en caso de fallo, sólo se puede recuperar el lado OLT.

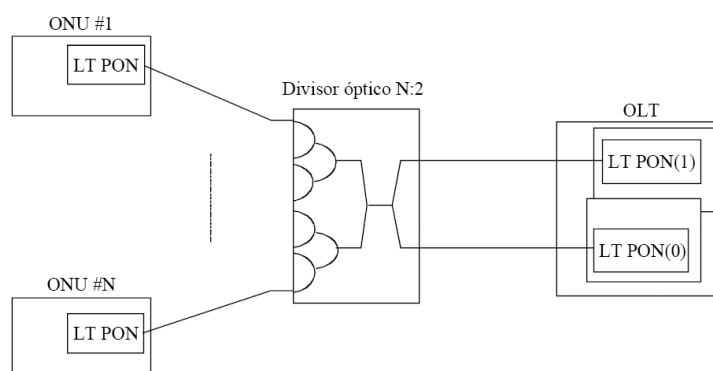


Figura 3.21 Sistema GPON dúplex: sistema dúplex únicamente en la OLT [21]

Para esta configuración es necesario el método de conmutación en frío (operación retardada) del circuito de repuesto en el lado de la OLT. Por lo general, en este

caso, durante el tiempo de conmutación es inevitable la pérdida de señal o incluso de tramas. Sin embargo, después de la conmutación se deben mantener todas las conexiones establecidas entre el nodo de servicio y el equipo terminal.

Tipo C: En la tercera configuración (figura 3.22) se duplican no solamente los equipos del lado OLT sino también los del lado ONU. En esta configuración, en caso de fallo la recuperación es posible en cualquier punto al conmutar a los equipos de reserva. Por consiguiente, el costo de la configuración dúplex total garantiza una alta fiabilidad.

En este caso, existe la posibilidad de la conmutación en caliente (operación inmediata) de los circuitos del receptor de repuesto en los lados de la ONU y de la OLT. Además, con esta configuración también es posible la conmutación sin perturbaciones (sin pérdida de tramas).

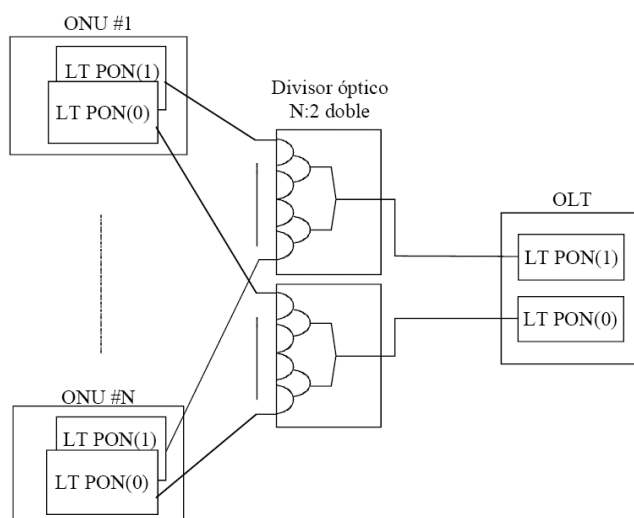


Figura 3.22 Sistema GPON dúplex: sistema dúplex completo [22]

Tipo D: Si las ONU se instalan en los edificios de los abonados, las conexiones internas no tienen por qué estar duplicadas. Además, si cada ONU pertenece a un usuario distinto, el requisito de fiabilidad dependerá de cada usuario y sólo un número limitado de ONU podrán tener la configuración dúplex. Según lo anterior, la última configuración (figura 3.23) permite una duplicación parcial en el lado de la ONU. En el ejemplo de esta figura se muestra que hay ONUs duplicadas

(ONU#1) y otras únicas (ONU#N). Las características de este tipo son las mismas que las del tipo B.

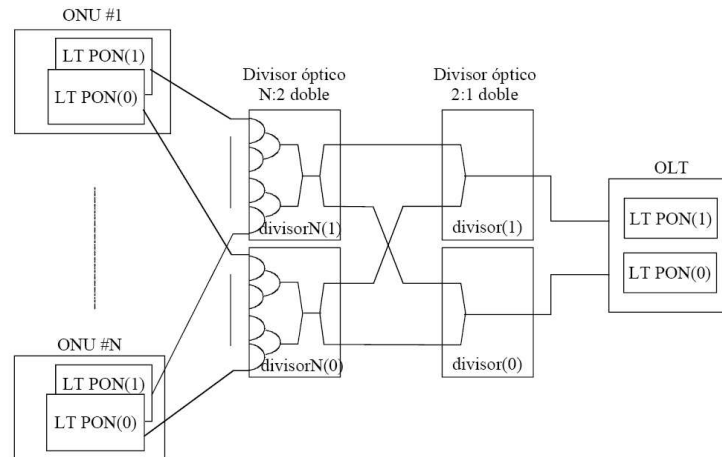


Figura 3.23 Sistema GPON dúplex: configuración dúplex parcial [23]

3.5.7 APLICACIONES DE BANDA ANCHA DE LAS REDES INTEGRADAS EPON/GPON CON LA TECNOLOGÍA WiMAX A LAS TELECOMUNICACIONES [11]

El surgimiento de las tecnologías integradas de banda ancha pueden concebir un sin número de nuevas aplicaciones, o bien perfeccionar las aplicaciones existentes mucho más allá de las capacidades actuales que se limitan únicamente al acceso a Internet con marcación. Entre esas aplicaciones cabe citar las siguientes:

- Cibersanidad
- Teletrabajo
- Cibergobierno
- Ciberagricultura
- Ciberaprendizaje
- Seguridad pública
- Aplicaciones relacionadas con los servicios públicos
- Asistencia a pequeñas empresas
- Compilación de información
- Ciberturismo
- Comercio electrónico

- Actividades recreativas

Aunque ésta no es una lista exhaustiva, las aplicaciones indicadas son algunas de las más importantes en lo que se refiere a la utilización de la banda ancha. En el Anexo A, se describen algunas de las aplicaciones de banda ancha utilizadas más comúnmente y cómo las redes integradas facilitan dichas aplicaciones.

3.5.8 CONVERGENCIA FIJO MÓVIL (CFM) Y LA RED INTEGRADA ^[12]

En resumen, las arquitecturas de red de acceso integrada posibilitan cuatro tipos de convergencia¹:

- 1) Convergencia de red.
- 2) Convergencia de terminal.
- 3) Convergencia de control y gestión de red.
- 4) Convergencia de servicios.

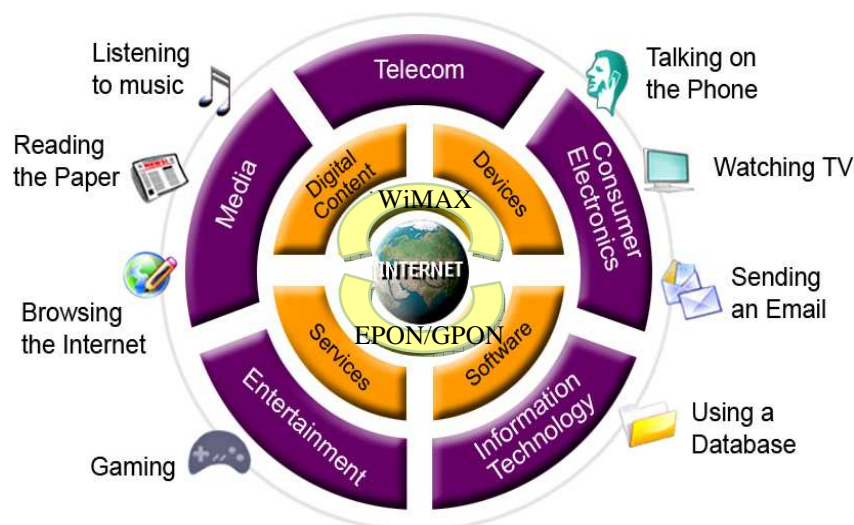


Figura 3.24 Convergencia Fijo Móvil de la red integrada ^[24]

La convergencia de red se realiza usando una red física común (red óptica pasiva), para llevar ambas redes de acceso alámbricas e inalámbricas. La convergencia de terminal significa la convergencia de un nodo central y un terminal del usuario (ver figura 3.24), en cada premisa del cliente que accede a los servicios de red ya sean por una línea alámbrica o un canal inalámbrico.

¹ Para profundizar ver en: M. Vrdoljak, S. I. Vrdoljak, and G. Skugor, "Fixed-mobile convergence strategy: technologies and market opportunities," *IEEE Communications Magazines*, February 2007, pp.116-121.

Además, los dos tipos de convergencia permiten la convergencia de control de red y plano operacional, el cual emplea un solo control y sistema de gestión para controlar, gestionar, monitorear una red, llevar las cuentas y facturar a los usuarios.

La arquitectura integrada provee la flexibilidad de ofrecer diferentes tipos de servicio de acceso de red, incluyendo servicios alámbricos, servicios inalámbricos, y ambos (como se muestra en la figura 3.24), por consiguiente permitir la convergencia de servicios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CONTENIDO

[1] *Gangxiang Shen and Rodney Tucker, Paper Integration of EPON and WiMAX ARC Special Research centre for Ultra-Broadband Information Networks IEEE Department, University of Melbourne, 3010, Australia 10.*

[2] *IEEE 802.3ah Ethernet in the First Mile Task Force, Point to Multipoint Ethernet on SM Fiber (PON).*

[3] "Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems," IEEE STD 802.16 – 2004, October, 2004.

[4] *G. Shen and R. S. Tucker, "Fixed mobile convergence architectures for broadband access: integration of EPON and WiMAX," IEEE Communications Magazine, August 2007, pp. 44-50.*

[5] *Gangxiang Shen and Rodney Tucker, Paper Integration of EPON and WiMAX ARC Special Research centre for Ultra-Broadband Information Networks IEEE Department, University of Melbourne, 3010, Australia 10.*

[6] *IEEE 802.3av, <http://ieee802.org/3/av/index.html>.*

[7] *ITU-T/G.652, Characteristics of A Single-Mode Optical Fiber Cable, 2003.*

[8] *Mobile WiMAX-Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation*” WiMAX Forum website, 2006.

[9] G. Shen and R. S. Tucker, “Fixed mobile convergence architectures for broadband access: integration of EPON and WiMAX,” *IEEE Communications Magazine*, August 2007, pp. 44-50.

[10] ITU-T/G.984.1 “Gigabit-Capable Passive Optical Networks (GPON): General Characteristics”.

[11] UIT-D, “Informe sobre las tecnologías de acceso para las comunicaciones de banda ancha”, Comisión de estudio 2, www.itu.int/ITU-D/study_groups/index-es.html.

[12] Oportunidades y Desafíos de la Banda Ancha, Grupo de Análisis y Prospectiva del Sector de las Telecomunicaciones (GAPTEL), 2008.

FIGURAS

[1] G. Nair, et al., “*IEEE 802.16 Medium Access Control and Service Provisioning*,” *Intel Technology Journal*, vol. 8, no. 3, August 2004, pp. 213-228.

[2, 3, 4, 5, 8, 14] G. Shen and R. S. Tucker, “Fixed mobile convergence architectures for broadband access: integration of EPON and WiMAX,” *IEEE Communications Magazine*, August 2007, pp. 44-50.

[3, 6, 7, 9, 10, 11, 15, 16] Gangxiang Shen and Rodney Tucker, *Paper Integration of EPON and WiMAX ARC Special Research centre for Ultra-Broadband Information Networks IEEE Department, University of Melbourne, 3010, Australia* 10.

[12, 13] *Mobile WiMAX-Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation*” WiMAX Forum website, 2006.

[17, 18, 19, 20, 21] ITU-T/G.984.1 “Gigabit-Capable Passive Optical Networks (GPON): General Characteristics”.

[22] Marco A. Viguera, Presentación “*Access Convergence*”, *Nokia Siemens Networks*, 2007.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

La rápida evolución tecnológica y los requerimientos cada vez más altos de los usuarios de telecomunicaciones han estimulado el desarrollo de los servicios convergentes, que brindarán mayores beneficios al usuario permitiéndole estar comunicado siempre y en todo momento, gracias a las características de ubicuidad y movilidad que la red de acceso integrada (tecnologías EPON/GPON y WiMAX) ofrecerá, constituyéndose en una herramienta fundamental para el desarrollo de las naciones en todos los aspectos.

La convergencia en el acceso se manifiesta como una competencia entre diversas soluciones técnicas que tienen la capacidad de cubrir las demandas de los usuarios, en diferentes segmentos y con diferentes características técnicas y económicas relacionadas con su despliegue.

El gran ancho de banda que ofrecen las comunicaciones ópticas (EPON/GPON) y la movilidad sin línea de vista que brindan las comunicaciones inalámbricas (WiMAX), aportan en gran magnitud al sistema integrado.

Es una buena opción en la jerarquía de ancho de banda usar una EPON/GPON como *backhaul* y conectar múltiples BSs WiMAX dispersas. En el presente proyecto se plantearon cuatro arquitecturas para la integración de EPON/GPON y WiMAX. Se encontró que la integración EPON/GPON y WiMAX son una atractiva solución para realizar la esperada Convergencia Fijo-Móvil (CFM) y proveer un número atractivo de características:

- Primero, la integración permite estrategias para asignación de ancho de banda y planificación de paquetes que ayudan a lograr mejores capacidades de utilización del sistema y soporte de calidad de servicio QoS.
- Segundo, la integración puede simplificar las operaciones de la red (ejemplo, la operación de *handover*).
- Tercero, la integración permite a una sola red óptica pasiva simultáneamente transportar dos tipos diferentes de redes de acceso, y proveer ambos servicios alámbricos e inalámbricos de acceso de banda ancha.
- Finalmente, la integración de EPON/GPON y WiMAX espera ahorrar en el diseño y los costos operacionales para redes de acceso de banda ancha de nueva generación.

La convergencia exige elevadas prestaciones en las redes de acceso que conectan a los usuarios finales con las infraestructuras de aplicaciones y servicios y las redes de transporte. Estas prestaciones se miden principalmente en términos de velocidad de transmisión en cada uno de los sentidos de la comunicación de los servicios que soporta, de la calidad y disponibilidad del servicio y de su cobertura.

WiMAX, en general, es una tecnología inalámbrica estandarizada que ofrece como una de sus aplicaciones acceso a Internet con gran cobertura (a nivel metropolitano), la cual entra al mercado como una nueva opción para el acceso de banda ancha a gran velocidad, por tal razón es un fuerte competidor para compañías de cable y proveedores de ADSL, más aún si se da un sistema integrado con suficiente capacidad para soportar varios tipos de servicios y beneficiar a los proveedores y principalmente al usuario final.

La transformación y la convergencia gradualmente evolucionan desde las etapas teóricas y conceptuales hasta la planeación y pruebas piloto. Este proyecto involucra muchos aspectos, propone grandes incertidumbres y un alto nivel de individualización, e involucra factores de riesgo tales como pérdida de recursos, cambios en directrices tecnológicas e inadecuada preparación de las organizaciones y su personal. La transformación, sin embargo, es el único camino abierto para los proveedores si desean sobrevivir, prosperar y florecer.

4.2 RECOMENDACIONES

Es recomendable que las arquitecturas mencionadas para soportar el sistema integrado mediante EPON/GPON y WiMAX ingresen a un proceso de estandarización y así facilitar la implementación de dicho sistema.

Las actuales arquitecturas consideran sólo a los sistemas fundamentales EPON/GPON y WiMAX. Para el futuro, aún para accesos de ancho de banda superiores, las arquitecturas pueden ser extendidas para utilizar tecnologías más avanzadas, tales como sistemas WDM en PON, y sistemas de antenas adaptivas y de múltiples entradas/múltiples salidas MIMO en WiMAX.

Se sugiere elaborar un nuevo modelo regulatorio, en colaboración con los agentes del mercado, que incentive el despliegue de las nuevas redes y dinamice el mercado de nuevos servicios de banda ancha. El nuevo modelo debe considerar las particularidades del despliegue de nuevas redes de banda ancha, con sus incertidumbres y riesgos.

Se sugiere explorar modelos de negocio que puedan beneficiar conjuntamente al propio proveedor de contenidos y al proveedor de infraestructura. De nada servirá que los nuevos contenidos sean un dinamizador del mercado de banda ancha si el proveedor de infraestructura no encuentra incentivos para soportarlos sobre su red.

Se recomienda la utilización del sistema GPON, o superiores, antes que EPON debido a su gran ancho de banda, seguridad y principalmente bajo costo en los equipos; sin embargo, quedará como elección al diseñador seleccionar correctamente de acuerdo a las diferentes situaciones y necesidades que requiera satisfacer.

El despliegue de las redes 10G EPON basadas en el estándar IEEE 802.3av, las cuales aumentan diez veces la capacidad de EPON, no sólo facilitarán a la red de acceso, sino más bien, se recomienda que dicha tecnología aporte con sus capacidades al proceso de integración mencionado en el presente proyecto.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

A

AAL	Capa de adaptación ATM (<i>ATM Adaptation Layer</i>)
ABR	Velocidad binaria disponible (<i>Available Bit Rate</i>)
AES	Norma de criptación avanzada (<i>Advanced Encryption Standard</i>)
AF	Función de adaptación (<i>Adaptation Function</i>)
Alen	Longitud ATM (partición) [<i>ATM (partition) Length</i>]
Alloc-ID	Identificador de atribución (<i>Allocation Identifier</i>)
AN	Nodo de acceso (<i>Access Node</i>)
ANI	Interfaz del nodo de acceso (<i>Access Node Interface</i>)
APD	Fotodiodo de avalancha (<i>Avalanche Photodiode</i>)
APS	Conmutación de protección automática (<i>Automatic Protection Switching</i>)
ATC	Capacidades de transferencia ATM (<i>ATM Transfer Capabilities</i>)
AVC	Cambio de valor de atributo (<i>Attribute Value Change</i>)
ARPU	Ingreso promedio por cliente (<i>Average Revenue per User</i>)

B

BCH	Bose-Chaudhuri-Hocquengham
BE	Servicio de mejor esfuerzo (<i>Best Effort</i>)
BER	Tasa de errores en los bits (<i>Bit Error Ratio</i>)
BIP	Paridad de entrelazado de bits (<i>Bit Interleaved Parity</i>)
Blen	Longitud de mapa de ancho de banda (<i>BWmap Length</i>)
BRI	Interfaz de velocidad básica (<i>Basic Rate Interface</i>)
BS	Estación base (<i>Base Station</i>)

BW	Ancho de banda (<i>Bandwidth</i>)
BWmap	Mapa de ancho de banda (<i>Bandwidth Map</i>)
C	
CBR	Velocidad binaria constante (<i>Constant Bit Rate</i>)
CCM	Contador con código de autenticación de mensaje de operación de un encriptador por bloques (<i>Counter with Cipher-block chaining Message authentication code</i>)
CES	Servicio de emulación de circuitos (<i>Circuit Emulation Service</i>)
CID	Identificador de conexión (<i>Conexion IDentifier</i>)
CPE	Error de fase de célula (<i>Cell Phase Error</i>)
CPL	Modificación del nivel de potencia (<i>Change Power Level</i>)
CRC	Verificación por redundancia cíclica (<i>Cyclic Redundancy Check</i>)
D	
DACT	Desactivación (ONU-ID)
DBA	Asignación dinámica de ancho de banda (<i>Dynamic Bandwidth Assignment</i>)
DBR	Velocidad binaria determinística (<i>Deterministic Bit Rate</i>)
DBRu	Informe de ancho de banda dinámica ascendente (<i>Dynamic Bandwidth Report Upstream</i>)
DES	Estándar de cifrador de datos (<i>Data Encryption Standard</i>)
DF	Desactivación de fallo (<i>Deactivate Failure</i>)
DFB	Láser con realimentación distribuida (<i>Distributed Feedback Laser</i>)
DHCP	Protocolo de configuración de Host Dinámica (<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i>)
DIS Number)	Inhibido (número de serie de ONU) [<i>Disabled (ONU Serial</i>
DL	Enlace descendente (<i>Downlink</i>)
DOW	Desplazamiento de ventana (<i>Drift of Window</i>)
DS	Descendente (<i>Downstream</i>)
DSL	Línea de abonado digital (<i>Digital Subscriber Line</i>)
E	
E/O	Eléctrico/óptico (<i>Electrical/Optical</i>)
EDGE	Velocidad de datos mejorado para la evolución GSM (<i>Enhanced Data Rate for GSM Evolution</i>)
EMS	Sistema de gestión de elemento (<i>Element Management System</i>)
EqD	Retardo de ecualización (<i>Equalization Delay</i>)
ErtPS	Servicio de sondeo en tiempo real extendido (<i>Extended Real-Time Polling Service</i>)
ETSI	Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (<i>European Telecommunications Standards Institute</i>)
EVDO	Datos optimizados-evolución (<i>Evolution-Data Optimized</i>)
F	
FEC	Corrección de errores en recepción (<i>Forward Error Correction</i>)
FTTB	Fibra al edificio (<i>Fiber To The Building</i>)

FTTBBusiness Fibra al local comercial (*Fiber To The Business*)
 FTTCab/C Fibra al armario/a la cometida (*Fiber To The Cabinet/Curb*)
 FTTH Fibra a la vivienda (*Fiber To The Home*)
 FTP Protocolo de transferencia de archivos (*File Transfer Protocol*)

G

GEM Método de encapsulamiento de la G-PON (*G-PON Encapsulation Method*)
 GFR Velocidad de trama garantizada (*Guaranteed Frame Rate*)
 GPM (Dependiente del) Medio físico G-PON [*G-PON Physical Media (Dependent)*]
 GPRS Servicio de radio general de paquete (*General Packet Radio Service*)
 GTC Convergencia de transmisión de la G-PON (*G-PON Transmission Convergence*)

H

H-ARQ Requerimiento de Repetición Automática-Híbrido (*Hybrid-Automatic Repeat Request*)
 HEC Control de errores del encabezamiento (*Header Error Control*)
 HSCSD Dato de conmutación de circuitos de alta velocidad (*High Speed Circuit Switched Data*)
 HSDPA Paquete de acceso downlink de alta velocidad (*High-Speed Downlink Packet Access*)

I

ID Identificador (*IDentifier*)
 IMT Telecomunicaciones móviles internacionales (*International Mobile Telecommunications*)
 IP Protocolo Internet (*Internet Protocol*)

L

LAN Red de área local (*Local Area Network*)
 LCD Pérdida de delimitación de célula (*Loss of Cell Delineation*)
 LCDA Pérdida de delimitación de canal para ATM (*Loss of Channel Delineation for ATM*)
 LCDG Pérdida de delimitación de canal para GEM (*Loss of Channel Delineation for GEM*)
 LCF Campo de control láser (*Laser Control Field*)
 LIM Módulo de interfaz de línea (*Line Interface Module*)
 LOA Pérdida de acuse de recibo (*Loss of Acknowledgement*)
 LOAM Pérdida de OAM (*Loss of OAM*)
 LOF Pérdida de trama (*Loss of Frame*)
 LOS Pérdida de señal (*Loss of Signal*)
 LT Terminal de línea (*Line Terminal*)
 LTE Evolución a largo plazo (*Long Term Evolution*)

M

MAC Control de acceso al medio (*Media Access Control*)

MAN	Red de área metropolitana (<i>Metropolitan Area Network</i>)
MAP	Protocolo de acceso al medio (<i>Media Access Protocol</i>)
MBWA	Acceso Inalámbrico de banda ancha móvil (<i>Mobile Broadband Wireless Access</i>)
MC-CDMA	Acceso múltiple por división de código multi-portador (<i>Multi-Carrier Code Division Multiple Access</i>)
MDU	Unidad multivivienda (<i>Multi-dwelling Unit</i>)
ME	Entidad gestionada (<i>Managed Entity</i>)
MEM	Mensaje de error en el mensaje (<i>Message Error Message</i>)
MIB	Base de información de gestión (<i>Management Information Base</i>)
MIMO	Antenas de múltiples entradas múltiples salidas (<i>Multiple Input Multiple Output</i>)
MIS	Discordancia (del enlace) [<i>Mismatch (link)</i>]
MLM	Modo multilongitudinal (<i>Multi-longitudinal Mode</i>)
MPN	Ruido de partición de modo (<i>Mode Partition Noise</i>)
MPEG	Grupo de expertos en películas animadas (<i>Moving Picture Experts Group</i>)
MSx	Estación móvil x (<i>Mobile Station x</i>), x=1,2,...n.
N	
NMS	Sistema de gestión de red (<i>Network Management System</i>)
NrtPS Service)	Servicio de sondeo en tiempo no real (<i>Non-Real-Time Polling Service</i>)
NRZ	Sin retorno a cero (<i>Non return to Zero</i>)
NSR	Sin información de estado (<i>Non Status Reporting</i>)
NT	Terminación de red (<i>Network Termination</i>)
O	
OAM	Operaciones, administración y mantenimiento
OAN	Red de acceso óptico (<i>Optical Access Network</i>)
ODF	Repartidor óptico (<i>Optical Distribution Frame</i>)
ODN	Red de distribución óptica (<i>Optical Distribution Network</i>)
OFDM	Multiplexación por división de frecuencia ortogonal (<i>Orthogonal Frequency Division Multiplex</i>)
OFDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>)
OLT	Terminación de línea óptica (<i>Optical Line Termination</i>)
OMCC	Canal de control y gestión de ONU (<i>ONU Management and Control Channel</i>)
OMCI	Interfaz de control y gestión de ONU (<i>ONU Management and Control Interface</i>)
ONT	Terminación de red óptica (<i>Optical Network Termination</i>)
ONU	Unidad de red óptica (<i>Optical Network Unit</i>)
ONU-ID	Identificador de ONU (<i>ONU Identifier</i>)
OpS	Sistema de operaciones (<i>Operations System</i>)
ORL	Pérdida de retorno óptica (<i>Optical Return Loss</i>)
P	
PCBd	Bloque de control físico descendente (<i>Physical control block</i>)

downstream)

PCR	Velocidad de célula de cresta (<i>Peak Cell Rate</i>)
PDH	Jerarquía digital plesiócrona (<i>Plesiochronous Digital Hierarchy</i>)
PDU	Unidad de datos de protocolo (<i>Protocol Data Unit</i>)
PEE	Error del equipo físico (<i>Physical Equipment Error</i>)
PHY	Interfaz física (<i>Physical Interface</i>)
PIN	Fotodiodo sin ganancia por avalancha interna (<i>Photodiode Without Internal Avalanche</i>)
Plend	Longitud de cabida útil descendente (<i>Payload Length Downstream</i>)
PLI	Indicador de longitud de cabida útil (<i>Payload Length Indicator</i>)
PLOAM	OAM de la capa física (<i>Physical Layer OAM</i>)
PLOAMd	PLOAM descendente (<i>PLOAM downstream</i>)
PLOAMu	PLOAM ascendente (<i>PLOAM upstream</i>)
PLOu	Overhead de capa física ascendente (<i>Physical Layer Overhead Upstream</i>)
PLSu	Secuencia de nivelación de potencia ascendente (<i>Power Levelling Sequence Upstream</i>)
PMD	Dependiente del medio físico (<i>Physical Media Dependent</i>)
Port-ID	Identificador de puerto (<i>Port Identifier</i>)
POTS	Servicio telefónico ordinario (<i>Plain Old Telephone Service</i>)
PRBS	Secuencia binaria pseudoaleatoria (<i>Pseudo-Random Bit Sequence</i>)
PRI	Interfaz de velocidad primaria (<i>Primary Rate Interface</i>)
PST	Traza de sección de PON (<i>PON Section Trace</i>)
Psync	Sincronización física (<i>Physical Synchronization</i>)
PTI	Indicador de tipo de cabida útil (<i>Payload Type Indicator</i>)

Q

QAM	Modulación por amplitud de cuadratura (<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>)
QoS	Calidad de servicio (<i>Quality of Service</i>)

R

RAU	Unidad de acceso de petición (<i>Request Access Unit</i>)
RDI	Indicación de defecto distante (<i>Remote Defect Indication</i>)
RDSI	Red digital de servicios integrados
RDSI-BA	Red digital de servicios integrados de banda ancha
REI	Indicación de error distante (<i>Remote Error Indication</i>)
RMS	Valor cuadrático medio (<i>Root Mean Square</i>)
RS	Reed Solomon
RTD	Retardo de ida y vuelta (<i>Round Trip Delay</i>)
RTPC	Red telefónica pública conmutada
RtPS	Servicio de sondeo en tiempo real (<i>Real-Time Polling Service</i>)
RXCF	Campo de control de receptor (<i>Receiver Control Field</i>)

S

SBR	Velocidad binaria estadística (<i>Statistical Bit Rate</i>)
SCa	Portadora única (<i>Single Carrier</i>)
SCR	Velocidad de célula sostenible (<i>Sustained Cell Rate</i>)
SD	Degradación de señal (<i>Signal Degrade</i>)

SDH	Jerarquía digital síncrona (<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>)
SDU	Unidad de datos de servicio (<i>Service Data Unit</i>)
SF	Fallo de señal (<i>Signal Fail</i>)
SFID	Identificador de flujo de servicio (<i>Service Flow Identifier</i>)
SIMO	Antenas de una sola entrada y múltiples salidas (<i>Single Input Multiple Output</i>)
SISO	Antenas de una sola entrada una sola salida (<i>Single Input Single Output</i>)
SLA	Acuerdo a nivel de servicio (<i>Service Level Agreement</i>)
SLM	Modo monolongitudinal (<i>Single-Longitudinal Mode</i>)
SN	Número de serie (<i>Serial Number</i>)
SNI	Interfaz de nodo de servicio (<i>Service Node Interface</i>)
SR	Informe de estado (<i>Status Reporting</i>)
SUF	Fallo de arranque (<i>Start up Failure</i>)
T	
TC	Convergencia de transmisión (<i>Transmission Convergence</i>)
T-CONT	Contenedor de transmisión (<i>Transmission Container</i>)
TDM	Multiplexación por división en el tiempo (<i>Time Division Multiplexing</i>)
TDMA	Acceso múltiple por división en el tiempo (<i>Time Division Multiple Access</i>)
TE	Equipo terminal (<i>Terminal Equipment</i>)
TF	Fallo del transmisor (<i>Transmitter Failure</i>)
TFTP	Protocolo de transferencia de archivos trivial (<i>Trivial File Transfer Protocol</i>).
U	
UBR	Velocidad binaria no especificada (<i>Unspecified Bit Rate</i>)
UGS	Servicio de concesión no solicitado (<i>Unsolicited Grant Service</i>)
UI	Intervalo unitario (<i>Unit Interval</i>)
UL	Enlace ascendente (<i>Uplink</i>)
UNI	Interfaz usuario-red (<i>User Network Interface</i>)
UPC	Control de parámetros de utilización (<i>Usage Parameter Control</i>)
US	Ascendente (<i>Upstream</i>)
V	
VBR	Velocidad binaria variable (<i>Variable Bit Rate</i>)
VCC	Conexión de canal virtual (<i>Virtual Channel Connection</i>)
VCI	Identificador de canal virtual (<i>Virtual Channel Identifier</i>)
VOD	Vídeo por demanda (<i>Video-on-Demand</i>)
VoIP	Voz sobre Protocolo de Internet (<i>Voice over Internet Protocol</i>)
VP	Trayecto virtual (<i>Virtual Path</i>)
VPN	Red privada virtual (<i>Virtual Private Network</i>)
VPC	Conexión de trayecto virtual (<i>Virtual Path Connection</i>)
VPI	Identificador de trayecto virtual (<i>Virtual Path Identifier</i>)
W	
WAP	Protocolo de aplicación inalámbrica (<i>Wireless Application Protocol</i>)

WCDMA	Acceso múltiple por división de código de banda ancha (<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>)
WiFi	Fidelidad Inalámbrica (<i>Wireless Fidelity</i>)
WiBro	Servicio de banda ancha Inalámbrica (<i>Wireless Broadband (Service)</i>)
WiMAX	Interoperabilidad mundial por acceso de microonda (<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>)

DEFINICIONES

Ingreso medio por usuario (ARPU, *Average Revenue Per User*): Es la media o promedio de ingresos por usuario que obtiene, en un periodo de tiempo, una compañía de servicios con una amplia base de usuarios. Se calcula dividiendo el total de ingresos obtenidos en el periodo de tiempo, por el total de usuarios activos de la empresa.

Branding: es un anglicismo empleado en mercadotecnia (*marketing*) que hace referencia al proceso de hacer y construir una marca (*brand equity*) mediante la administración estratégica del conjunto total de activos vinculados en forma directa o indirecta al nombre y/o símbolo que identifican a la marca influyendo en el valor suministrado; tanto al cliente como a la empresa oferente.

La administración de la relación con los clientes (CRM, *Customer Relationship Management*): Es parte de una estrategia de negocio centrada en el cliente. Una parte fundamental de su idea es, precisamente, la de recopilar la mayor cantidad de información posible sobre los clientes, para poder dar valor a la oferta. La empresa debe trabajar para conocer las necesidades de los mismos y así poder adelantar una oferta y mejorar la calidad en la atención. CRM hace referencia a una estrategia de negocio basada principalmente en la satisfacción de los clientes, pero también a los sistemas informáticos que dan soporte a esta estrategia.

DES (*Data Encryption Standard*): Es un encriptador por bloques de 64 bits de longitud. Usa claves de 56 bits. DES es lo suficientemente seguro como para dejar fuera a hackers casuales, sin embargo puede ser quebrado con hardware especial, por organizaciones criminales o corporaciones más importantes.

X.509: Esta recomendación de la ITU es parte de la serie de recomendaciones X.500 que define un servicio de directorio. X.509 define un *framework* para la provisión de servicios de autenticación para el directorio X.500 a sus usuarios.

CBC (Cipher Block Chaining Mode): Es un modo de operación de un encriptador por bloques, donde la entrada al algoritmo de encriptación es el XOR del próximo bloque de datos a encriptar con el previo bloque de datos ya encriptados.

Beamforming: Método de conformación de haces que consiste en la formación de una onda de señal reforzada mediante el desfase en distintas antenas. Sus principales ventajas son una mayor ganancia de señal además de una menor atenuación con la distancia. Gracias a la ausencia de dispersión el *beamforming* da lugar a un patrón bien definido pero direccional. En este tipo de transmisiones se hace necesario el uso de dominios de *beamforming*, sobre todo en el caso de múltiples antenas de transmisión. Hay que tener en cuenta que el *beamforming* requiere el conocimiento previo del canal a utilizar en el transmisor.

AES-CCM (Advanced Encryption Standard-Counter with Cipher-block Chaining Message authentication code): Es un encriptador destinado a la protección de todos los datos de usuario sobre una interfaz móvil MAC de WiMAX. Las claves empleadas para el manejo del encriptador se generan desde la autenticación del protocolo de autenticación extensible (EAP, *Extensible Authentication Protocol*). Una máquina de estados de encriptación de tráfico posee un mecanismo de actualización de clave periódica que permite una transición ininterrumpida de claves para proporcionar mejor protección.

Modo Idle&Sleep: Es un modo para la gestión de la conservación de potencia, es decir que se asegura una operación eficiente de potencia de la batería sobre los dispositivos portátiles y móviles de mano en estados “inactivos o de sueño”.

Macroceldas: Son celdas grandes, para áreas con población dispersa.

Microceldas: Estas celdas son usadas para áreas densamente pobladas. Dividiendo las zonas en pequeñas

Red de acceso óptico (OAN, *Optical Access Network*): El conjunto de enlaces de acceso que comparten las mismas interfaces del lado red y están soportados por sistemas de transmisión de acceso óptico. La OAN puede incluir varias ODN conectadas a la misma OLT.

Red de distribución óptica (ODN, *Optical Distribution Network*): Una ODN proporciona el medio de transmisión óptica desde la OLT hasta los usuarios, y viceversa. Utiliza componentes ópticos pasivos.

Terminación de línea óptica (OLT, *Optical Line Termination*): Una OLT proporciona la interfaz en el lado de la red de la OAN, y está conectada a una o varias ODN.

Terminación de red óptica (ONT, *Optical Network Termination*): Una ONT proporciona la interfaz del lado de usuario para la OAN y está conectada a una ODN. Una ONT se utiliza para FTTH e incluye la función de puerto de usuario. Desde el punto de vista de la capa TC de la G-PON, la ONT y la ONU son idénticas.

Unidad de red óptica (ONU, *Optical Network Unit*): Una ONU proporciona (directamente o a distancia) la interfaz lado usuario de la OAN, y está conectada a la ODN. Desde el punto de vista de la capa TC G-PON, la ONT y la ONU son idénticas.

Función de adaptación (AF, *Adaptation Function*): Equipo adicional que convierte la interfaz de abonado ONT/ONU en una interfaz UNI necesaria para el operador o para convertir una interfaz UNI en una interfaz de abonado ONT/ONU. Las funciones de la AF dependerán de la interfaz de abonado ONT/ONU y de la interfaz UNI. Además, la AF es útil también para convertir una interfaz de red OLT en una interfaz SNI necesaria para el operador o para convertir una interfaz SNI en una interfaz de red OLT.

Distancia de fibra diferencial: Una OLT se conecta a varias ONU/ONT. La distancia de fibra diferencial es la diferencia de distancia entre la ONU/ONT más próxima y la más distante a partir de la OLT.

Retardo medio de transferencia de la señal: Los valores medios en transmisión hacia el origen y hacia el destino entre puntos de referencia "V" y "T"; un valor dado se determina midiendo el retardo de ida y retorno y dividiendo por dos el valor obtenido.

Acceso múltiple por división en el tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*): Técnica de transmisión en la que se multiplexan muchos intervalos de tiempo en una misma parte útil.

Multiplexación por división de longitud de onda (WDM, *Wavelength División Multiplexing*): Multiplexación bidireccional que emplea diferentes longitudes de onda para las señales ascendentes y descendentes.

Velocidad de información de cresta (PIR, *Peak Information Rate*): Se trata de la velocidad máxima de transmisión de los bytes de los paquetes GEM. La unidad que se emplea es "bytes/s". Este parámetro es análogo al de velocidad de células de cresta que se aplica en ATM.

Velocidad de información sostenible (SIR, *Sustained Information Rate*): Se trata de la velocidad comprometida de transmisión de los bytes de los paquetes GEM a largo plazo. La unidad que se emplea es "bytes/s". Este parámetro es análogo al de velocidad de células sostenible que se utiliza en ATM.

Velocidad de celda de cresta (PCR, *Peak Cell Rate*): Es el máximo número de celdas/seg que el usuario puede transmitir.

Velocidad de celda sostenible (SCR, *Sustained Cell Rate*): Es el número de celdas/seg promedio, o medida durante un intervalo largo de tiempo, en relación al tiempo de vida de la conexión.

Procedimiento de entramado genérico (GFP, *Generic Framing Procedure*): GFP es un método de entramado y de encapsulamiento que puede aplicarse a cualquier tipo de datos.

Modo de encapsulamiento G-PON (GEM, *G-PON Encapsulation Mode*): GEM es un método que encapsula datos en las G-PON. Aunque pueden encapsularse

cualquier tipo de datos, los tipos reales dependen del servicio. GEM proporciona comunicaciones con conexión y comunicaciones ATM. El concepto y el formato del entramado son similares al procedimiento de entramado genérico (GFP).

Puerto: Un puerto es una unidad para la multiplexación en un T-CONT en GEM. En un T-CONT se especifican uno o más puertos. Los datos se transfieren entre OLT y ONU a través de puertos. En ATM, los puertos corresponden a VP/VC. En GEM cada puerto se identifica mediante un ID de puerto (Port-ID) específico.

Determinación de distancia (*Ranging*): La determinación de la distancia es un método para medir la distancia lógica entre cada ONU y su OLT asociada y para determinar la temporización de transmisión necesaria para que las células ascendentes transmitidas desde distintas ONU en la misma ODN no colisionen.

Asignación dinámica de banda con información de estado (SR-DBA, *Status Reporting DBA*): SR-DBA proporciona la asignación de ancho de banda de conformidad con la información recibida de la ONU.

Contenedores de transmisión (T-CONT, *Transmission Containers*): Los T-CONT se utilizan para la gestión de la atribución de la ancho de banda ascendente en la sección PON de la capa de convergencia de transmisión (TC). Los T-CONT se utilizan principalmente para mejorar la ancho de banda ascendente utilizada en la PON.

- Los T-CONT transportan VPC/VCC ATM y/o puertos GEM, e informan del estado de su memoria intermedia a sus OLT asociadas.
- Los T-CONT reciben dinámicamente concesiones de la OLT, identificadas mediante los ID de atribución (Alloc-ID).
- Un único T-CONT puede transportar tráfico ATM o GEM con varias clases de servicio.
- Un T-CONT puede acomodar una o más colas físicas y las agrupa en una única memoria intermedia lógica.
- Un informe de estado DBA-T-CONT resume el estado de la memoria intermedia lógica de dicho T-CONT.

- Un T-CONT es una entidad de transporte de la capa TC que transfiere información de capa superior de forma transparente desde la entrada a la salida.
- La información del T-CONT no se modifica excepto cuando se produce una degradación en el proceso de transferencia.

Una concesión de datos se asocia a un único T-CONT. Los T-CONT existen físicamente en el soporte físico y soporte lógico de la ONU.

Ancho de banda fijo: El ancho de banda fijo se reserva en su totalidad y se otorga periódicamente a fin de lograr un retardo mínimo en la transferencia de las células/bloque. Si se asigna un ancho de banda fijo a un T-CONT y éste no tiene células para enviar, la OLT sigue enviando concesiones asociadas al ancho de banda fijo y por consiguiente la ONU/ONT enviará células vacías hacia la OLT de origen.

Ancho de banda asegurado: Es la que se encuentra siempre disponible para la ONU/ONT cuando se espera que la memoria intermedia T-CONT tenga células/bloque para transmitir. Cuando la memoria intermedia T-CONT no tenga células/bloque para transmitir, este ancho de banda puede utilizar otros T-CONT. Por consiguiente el ancho de banda asegurado puede utilizarse en la DBA.

Ancho de banda no asegurado: Se trata de la componente de alta prioridad del ancho de banda adicional que se asigna a los T-CONT con ancho de banda asegurado. El ancho de banda no asegurado puede utilizarse en la DBA.

Ancho de banda residual: Es aquella que un T-CONT puede utilizar cuando no exista tráfico de mayor prioridad que haga uso de la misma; no hay seguridad ni garantías de que este ancho de banda esté disponible. El ancho de banda residual también puede utilizarse en la DBA.

Ancho de banda adicional: Es el conjunto de la ancho de banda no asegurado y de la ancho de banda residual.

Ancho de banda garantizado: El ancho de banda garantizado es el conjunto del ancho de banda asegurado y el ancho de banda fijo.

Ancho de banda máximo: Es el límite superior del ancho de banda que se asigna al T-CONT y es la suma de la ancho de banda garantizada y el límite superior del ancho de banda adicional.

Ancho de banda sobrante: Se trata del ancho de banda en la PON no dedicado al ancho de banda fijo ni al ancho de banda asegurado ni a ningún otro ancho de banda reservado para usos especiales como OAM. El ancho de banda sobrante puede utilizarse en la DBA.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS Y FOLLETOS

- WILLIAM STALLINGS, Comunicaciones y Redes de Computadores, Séptima Edición, Prentice Hall, Madrid, 2004.
- ILYAS, Mohammad, MOUFTAH, Hussein, *The Handbook of Optical Communication Network*, CRC Press, New York, 2003.
- BLACK, Uyles, *Residential broadband networks: xDSL, HFC, and fixed wireless Access*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey.
- BARBA, Antoni, Gestión de Red, Ediciones UPC, Barcelona, 2003.
- HONG, Kim, *Radio over Fiber based Network Architecture*, Berlin, 2005.
- JIMÉNEZ, María Soledad, Apuntes de Comunicación Digital, 2006.
- HIDALGO, Pablo, Apuntes de Telemática, 2007.
- AULESTIA, Hugo, Telefonía Documentos Guía, Octubre 2006.

PROYECTOS DE TITULACIÓN

- GUALOTUÑA, Diana; RIFFO Salazar, Estudio de factibilidad de una red de área metropolitana basada en tecnología Gigabit Ethernet como infraestructura para ofrecer los servicios de carrier en el Distrito Metropolitano de Quito. Mayo, 2004.
- PROAÑO, Enrique; RODRÍGUEZ, Alonso; Análisis comparativo del servicio de internet móvil brindado a través de 3G (UMTS) versus la opción brindada por el anexo "e" del estándar IEEE 802.16 (WiMAX móvil). Quito, 2007.

- CELI, Byron, Análisis de las incidencias, tendencias y perspectivas tecnológicas y de mercado que inducen la convergencia fijo móvil y sus implicaciones en el ámbito regulador de las telecomunicaciones. Quito, 2007.
- MERA, Diego Análisis de la tecnología inalámbrica WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) y sus aplicaciones de banda ancha en telecomunicaciones. Quito, Junio 2005.
- GUIJARRO, Cristian, Diseño de una red de acceso utilizando tecnologías APON (*ATM Passive Optical Network*) para ANDINATEL S.A. en la ciudad de Quito. Abril, 2005.

REVISTAS

- *IEEE Communications Magazine* Vol. 45, Nº 2, 8, 9, 10, 11, 12; Vol. 46, Nº 1, 2, 2007-2008.
- *IEEE Applications&Practice*, Vol. 45, Supl. 3, 4, 2007.

Recomendaciones de la ITU-T:

- ITU-T Recommendation G.652 (2003), *Characteristics of a single-mode optical fibre cable*.
- ITU-T Recommendation G.983.1 (1998), *Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON)*.
- ITU-T Recommendation G.983.2 (2002), *ONT management and control interface specification for B-PON*.
- ITU-T Recommendation G.983.3 (2001), *A broadband optical access system with increased service capability by wavelength allocation*.
- ITU-T Recommendation G.983.4 (2001), *A broadband optical access system with increased service capability using dynamic bandwidth assignment (DBA)*.
- ITU-T Recommendation G.983.5 (2002), *A broadband optical access system with enhanced survivability*.

- ITU-T/G.984.1 “*Gigabit-Capable Passive Optical Networks (GPON): General Characteristics*”.
- ITU-T/G.984.2 “*Gigabit-Capable Passive Optical Networks (GPON): Physical Media Dependent (PMD) Layer Specification*”.
- ITU-T/G.984.3 “*Gigabit-Capable Passive Optical Networks (GPON): Transmission Convergence Layer Specification*”.
- ITU-T/G.984.4 “*A Broadband Optical Access System with Increased Service Capability Using Dynamic Bandwidth Assignment*”.

Normas IEEE:

- IEEE 802.3ah (2004), *IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications – Amendment: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for Subscriber Access Networks*.
- IEEE 802.1D (2004), *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks: Media Access Control (MAC) Bridges*.
- IEEE 802.1Q (2003), *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks: Virtual Bridged Local Area Networks*.
- IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless Access Standards, “*Developing the IEEE 802.16 WirelessMAN® Standard for Wireless Metropolitan Area Networks*”, May 2005.

PÁGINAS ELECTRÓNICAS

- <http://www.conatel.gov.ec>
- <http://www.fixedmobileconvergencealliance.com>
- <http://www.ieee802.org/3/efm/>
- <http://ieee802.org/16/>
- <http://ieee802.org/3/av/index.html>.

- <http://www.wimaxforum.org/>
- <http://www.comsoc.org>
- <http://www.opticalsolutions.com>
- http://www.radioptica.com/Radio/material_rad.asp
- <http://www.itu.int/>
- <http://www.findanexpert.unimelb.edu.au/researcher/person13947.html>
- <http://www.buildref.com/home/script/showpage.php?page=publication>
- <http://www.fsanweb.or>