

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

ANÁLISIS TÉCNICO COMPARATIVO ENTRE LR-PON Y XPON.

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

LESLIE MARÍA TOAPANTA MEJÍA
leslie.toapanta@epn.edu.ec

DIRECTORA: MARÍA SOLEDAD JIMÉNEZ JIMÉNEZ
maria.jimenez@epn.edu.ec

Quito, diciembre 2018

DECLARACIÓN

Yo, Leslie María Toapanta Mejía, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado en 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 normativa institucional vigente.

Leslie María Toapanta Mejía

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la señorita Leslie María Toapanta Mejía, bajo mi supervisión.

Ing. María Soledad Jiménez Jiménez, MSc.

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a mi familia por siempre haber sido una fuente de apoyo incondicional y haberme alentado a cumplir mis metas.

Le agradezco el apoyo, la confianza y la entrega a mi tutora, la Ing. María Soledad Jiménez, por impulsarme a dar más a lo largo del desarrollo de este proyecto, haberme guiado en todo el proceso y haber compartido sus conocimientos.

También, le agradezco a Paul, por siempre estar a mi lado en los momentos difíciles y darme el impulso para no rendirme.

Leslie Toapanta Mejía

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente, a mi familia por ser el pilar fundamental para cumplir mis sueños y a mi mejor amigo y compañero Paúl, por siempre ser quien esté cuando lo más necesite.

Leslie Toapanta Mejía

CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTO.....	III
DEDICATORIA.....	IV
CONTENIDO.....	V
RESUMEN	XI
PRESENTACIÓN.....	XII
 CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DE LOS TIPOS DE REDES DE ACCESO CABLEADAS USADAS EN LA ACTUALIDAD	1
1.1 REDES DE ÚLTIMA MILLA CABLEADAS	2
1.1.1 REDES DE ÚLTIMA MILLA BASADAS EN PAR DE COBRE.....	3
1.1.1.1 Dial Up.....	4
1.1.1.2 DSL (Digital Subscriber Line).....	4
1.1.1.2.1 ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)	5
1.1.1.2.2 VDSL o VHDSL (Very high bit-rate Digital Subscriber Line).....	7
1.1.2 REDES DE ÚLTIMA MILLA BASADAS EN CABLE COAXIAL	8
1.1.2.1 HFC (Hybrid Fiber Coaxial).....	8
1.1.2.1.1 Evolución.....	9
1.1.2.1.2 Topología	10
1.1.2.1.3 Funcionamiento.....	11
1.1.2.1.4 Aplicaciones	12
1.1.3 REDES DE ÚLTIMA MILLA BASADAS EN FIBRA ÓPTICA.....	13
1.1.3.1 Redes Ópticas Pasivas.....	13

1.1.3.1.1	Ventanas de Transmisión.....	14
1.1.3.1.2	Bandas Ópticas.....	15
1.1.3.1.3	Dispersión	16
1.1.3.1.4	Técnicas para limitar la dispersión total	18
1.1.3.1.5	Topología	18
1.1.3.1.6	Elementos Activos.....	20
1.1.4	TECNOLOGÍAS DE ÚLTIMA MILLA UTILIZADAS EN ECUADOR..	37
CAPÍTULO 2: ESTUDIO DE LAS XPON CONVENCIONALES Y LR-PON		40
2.1	INTRODUCCIÓN.....	40
2.2	ESTÁNDARES PON IMPLEMENTADOS EN LA ACTUALIDAD.....	42
2.2.1	EPON.....	43
2.2.1.1	Arquitectura	44
2.2.1.1.1	Subcapa Dependiente del Medio Físico (PMD)	45
2.2.1.1.2	Subcapa PMA	46
2.2.1.1.3	Subcapa PCS.....	46
2.2.1.1.4	Subcapa MAC	47
2.2.1.2	Funcionamiento	49
2.2.1.2.1	Canal descendente	49
2.2.1.2.2	Canal ascendente	49
2.2.1.3	Trama	49
2.2.1.4	Calidad de servicio QoS	50
2.2.1.5	Servicios	51
2.2.2	10G-EPON	51
2.2.3	GPON.....	55
2.2.3.1	Arquitectura	55

2.2.3.1.1	Modelo de capas	56
2.2.3.1.2	Jerarquía de multiplexación	59
2.2.3.2	Trama	60
2.2.3.3	Calidad de servicio QoS	62
2.2.3.4	Servicios	63
2.2.4	NG-PON (NEXT GENERATION PASSIVE OPTICAL NETWORK) ..	64
2.2.4.1	XG-PON	64
2.2.4.2	NG-PON2	67
2.2.4.3	LR-PON	69
2.2.4.3.1	PLANET SuperPON	71
2.2.4.3.2	LR-PON 10 Gbps	73
2.2.4.3.3	PIEMAN	78
2.2.4.3.4	Otros Estudios	82
2.2.4.4	Control de acceso al medio	83
2.2.4.4.1	Algoritmos DBA centralizados en redes LR-PON	84
2.2.4.4.2	Algoritmos de testeo continuo	86
2.3	COMPARACIÓN ENTRE GPON Y LR-PON	88
2.3.1	ARQUITECTURA	89
2.3.2	CANTIDAD DE USUARIOS POR PON	90
2.3.3	CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN	90
2.3.4	SERVICIOS	90
2.3.5	OTROS ASPECTOS	91
2.4	CASOS DE APLICACIÓN	91
2.4.1	ESCENARIO 1	92
2.4.2	ESCENARIO 2	94

2.4.3	COMPARATIVA EN FUNCIÓN DE CADA TECNOLOGÍA.....	96
2.4.4	COSTOS.....	99
CAPÍTULO 3: FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA LR-PON EN EL PAÍS		
100		
3.1	FACTIBILIDAD TÉCNICA.....	100
3.1.1	MIGRACIÓN DE GPON A LR-PON	102
3.1.1.1	Enlace Descendente.....	103
3.1.1.2	Enlace Ascendente	103
3.1.1.3	Transpondedor hecho a medida	104
3.2	FACTIBILIDAD LEGAL.....	105
3.2.1	ENTIDADES REGULADORAS	106
3.2.2	NORMAS JURÍDICAS PARA EL DESPLIEGUE DE SERVICIOS DE TELECOMUNICACIONES EN ECUADOR.....	107
3.2.2.1	Norma técnica para el ordenamiento, despliegue y tendido de redes físicas aéreas de servicios del régimen general de telecomunicaciones y redes privadas	108
3.2.2.2	Norma técnica para el despliegue de infraestructura de soterramiento y de redes físicas soterradas para la prestación de servicios del régimen general de telecomunicaciones y redes privadas	109
3.2.2.3	Reglamento para la prestación de servicios de telecomunicaciones y servicios de radiodifusión por suscripción.....	109
3.2.2.4	Reglamento para otorgar títulos habilitantes para servicios del régimen general de telecomunicaciones y frecuencias del espectro radioeléctrico	110
3.2.2.5	Reglamento de interconexión	110
3.2.2.6	Normas técnicas de CNT para redes de telecomunicaciones con	

fibra óptica	111
3.3 FACTIBILIDAD ECONÓMICA:	115
3.3.1 DISTRIBUIDORES DE EQUIPOS Y MATERIALES PARA SOLUCIONES PON	116
3.3.2 EQUIPOS HUAWEI.....	117
3.3.2.1 OLT	117
3.3.2.2 ONT	118
3.3.3 EQUIPOS ALCATEL-LUCENT	118
3.3.3.1 OLT 7342 FTTU.....	119
3.3.3.2 ONT 7368	119
3.3.4 EQUIPOS ZTE	120
3.3.5 ANÁLISIS DE COSTOS	121
3.3.5.1 GPON	124
3.3.5.2 LR-PON	127
CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	130
4.1 CONCLUSIONES.....	130
4.2 RECOMENDACIONES	131
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133
ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO A. DATASHEET DE FIBRA ÓPTICA G.652.D	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO B. DATASHEET G.657.A.....	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO C. DATASHEET MA5600T	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO D. DATASHEET HG8245H.....	¡Error! Marcador no definido.

ANEXO E. DATASHEET EDFA EM316EA ¡Error! Marcador no definido.

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se realiza un análisis técnico comparativo entre las tecnologías xPON convencionales y la última tecnología PON desarrollada, conocida como LR-PON (*Long Reach Passive Optical Network*) o Red Óptica Pasiva de Largo Alcance, adicionalmente, para complementar el análisis técnico se presenta el estudio de factibilidad legal y factibilidad económica de la posible implementación de esta tecnología en el país.

En el primer capítulo se describen los distintos tipos de redes de acceso cableadas utilizadas en la actualidad basadas en par de cobre, cable coaxial y fibra óptica. También, se estudia el avance tecnológico de dichas redes a lo largo de los años, así como, la arquitectura utilizada en cada una, su funcionamiento y sus principales aplicaciones. Además, en este capítulo se hace énfasis en las redes ópticas pasivas debido a que es el tema principal de este trabajo.

En el segundo capítulo se presenta información acerca de los estándares de redes ópticas pasivas existentes, con mayor enfoque en las redes más usadas hoy en día y en las redes ópticas pasivas de largo alcance. También, se realiza un análisis comparativo entre LR-PON y GPON, debido a que ésta última es la tecnología PON mayormente implementada en el país. Por lo tanto, los principales parámetros a comparar son: tasa de transmisión, alcance, arquitecturas, escenarios, servicios y costos.

En el tercer capítulo se desarrolla el análisis de factibilidad técnica, y adicionalmente, se incluye un breve análisis sobre la factibilidad legal y económica para la posible implementación de LR-PON en el país. Asimismo, se evalúan varios aspectos importantes a tener en cuenta en una implementación, como: la disponibilidad de equipos, leyes y reglamentos existentes, y recursos económicos disponibles.

Finalmente, en el cuarto capítulo se presenta las conclusiones y recomendaciones obtenidas a partir de la realización de este trabajo.

PRESENTACIÓN

La tendencia de las comunicaciones ha cambiado notablemente en la actualidad, incrementándose de manera significativa el tráfico de datos a nivel mundial, debido a que hoy en día la mayoría de las actividades diarias requieren consumo de recursos de tecnologías de la información como: carga y descarga de archivos, telepresencia, compartición de documentos, videos, imágenes, es decir un sin fin de herramientas web y multimedia.

El bucle de abonado, última milla o también conocido como red de acceso de cable coaxial o par de cobre tradicional, actualmente no posee la capacidad suficiente para suplir los requerimientos de aplicaciones y plataformas web emergentes, a las cuales los usuarios residenciales acceden cada vez con mayor frecuencia y en la mayoría de los casos demandan un elevado consumo de recursos de Internet.

Por esta razón, surge la necesidad del despliegue de redes de acceso de banda ancha, para lo cual, las redes basadas en fibra óptica y especialmente las redes PON (*Passive Optical Network*) son una solución bastante óptima por las múltiples ventajas que presentan, como: alta capacidad de ancho de banda que permite satisfacer la demanda de un elevado número de usuarios, amplia cobertura, altamente rentable, etc.

Sin embargo, el presente desarrollo de las PON ha promovido la búsqueda de implementaciones más efectivas en cuanto a capacidad de transmisión, cobertura y costos, apareciendo así las redes LR-PON (*Long Reach Passive Optical Network*).

LR-PON ofrece mejores prestaciones en comparación con la xPON convencional, y el principal objetivo de este tipo de red, es combinar tanto la Metro como la Red de Acceso resultando en una red altamente simplificada y con menores costos operacionales.

Este trabajo propone realizar un análisis técnico comparativo entre las LR-PON y las xPON convencionales, con la finalidad de conocer las diferentes tecnologías PON existentes y el avance tecnológico desarrollado entre cada una de ellas.

También, conocer los parámetros técnicos que diferencian a los diferentes tipos de redes presentadas en este trabajo y adicionalmente, conocer aspectos legales y económicos necesarios para llevar a cabo la implementación y despliegue de LR-PON en el país.

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN DE LOS TIPOS DE REDES DE ACCESO CABLEADAS USADAS EN LA ACTUALIDAD

Con el desarrollo de los servicios de comunicaciones y las nuevas plataformas web, ha crecido significativamente la demanda de acceso a Internet más veloz y a menor precio. Por tal motivo, es importante que exista una continua evolución de las tecnologías de última milla que permitan proporcionar el acceso adecuado a la red para satisfacer las necesidades de los abonados.

“En Ecuador, el servicio de Internet a través de conexiones físicas ha crecido de manera exponencial entre 2001 y 2015, a niveles que superan el 300%” [1], siendo las conexiones por par de cobre las más numerosas.

En este contexto, existe un reto importante para los proveedores de servicios, los cuales deben maximizar sus recursos tecnológicos y mejorar los mecanismos de calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*¹) en sus redes. Además, las redes actuales deben estar preparadas para responder ante posibles cambios y actualizaciones, ya sean físicos o lógicos y ofrecer completa compatibilidad con los distintos tipos de tecnologías existentes.

En general, las redes de telecomunicaciones están conformadas por tres partes: Red de Acceso, Red de Transporte y Núcleo de la Red o Red de *Core*, donde, uno de los tramos más importantes es la Red de Acceso, ya que es la conexión desde el proveedor, que permite el despliegue de servicios de voz, datos y video, hasta el usuario final.

Por tal motivo, se considera que la Red de Acceso es la parte de la infraestructura de la red de telecomunicaciones que posee la mayor inversión económica y de tiempo de diseño e investigación, un ejemplo de la estructura de las redes de telecomunicaciones se observa en la figura 1.1.

¹ Es el conjunto de técnicas y mecanismos que permiten administrar el tráfico de red eficientemente, logrando que el abonado perciba un rendimiento adecuado de los servicios contratados.

Por otro lado, la Red de Core y las Redes de Transporte, al ser redes de alta capacidad, utilizan comúnmente fibra óptica como medio de transmisión y son las redes que más desarrollo y evolución han presentado a lo largo de los años, a diferencia de las redes de acceso, en las que apenas en los últimos años se ha producido cambios y mejoras.



Figura 1.1. Estructura General de una Red de Telecomunicaciones. [2]

En este capítulo se abordan los diferentes tipos de redes de última milla cableadas existentes, además, se indica la topología utilizada en cada caso, los elementos de red que conforman dichas redes, su funcionamiento, entre otras características.

1.1 REDES DE ÚLTIMA MILLA CABLEADAS

“La red de acceso o última milla, es la parte que conecta los usuarios finales (residenciales o corporativos) a las redes de las operadoras de telecomunicaciones” [3]. El término última milla fue utilizado inicialmente en las redes telefónicas, donde, también se lo conoce como bucle de abonado, por lo cual, en la actualidad la última milla que más extensión posee es el cableado telefónico.

En nuestro país, el número de conexiones a través de un medio físico ha crecido considerablemente desde el 2010 hasta el 2017 como se observa en la figura 1.2.

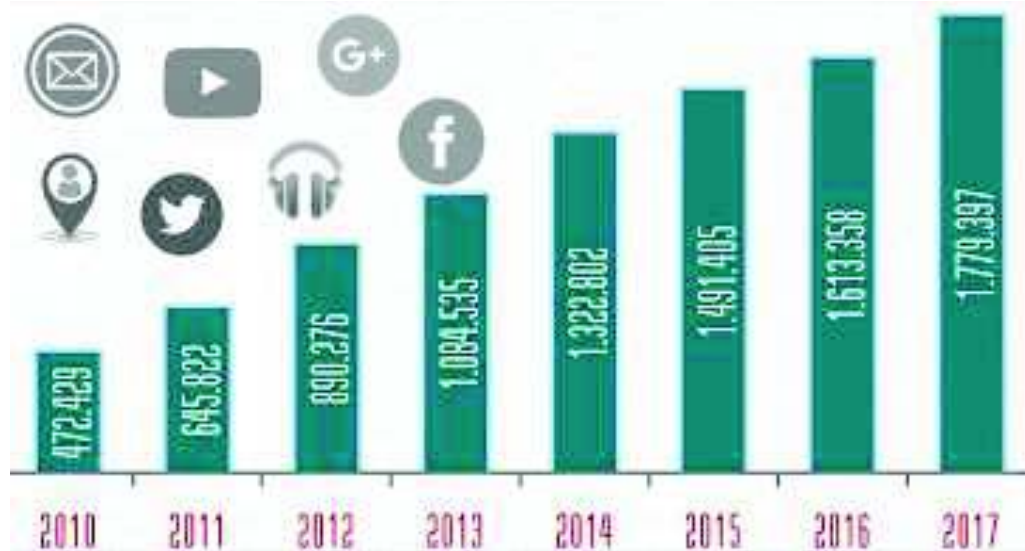


Figura 1.2. Crecimiento de conexiones físicas a nivel Nacional. [4]

Existen varias formas de acceso a la red de telecomunicaciones, pero a nivel global el acceso a través de un medio físico es el más común. De tal manera que, es importante tener en cuenta que el medio utilizado para acceder a los servicios de red influye mucho en la calidad de los mismos, además, el medio de transmisión que se seleccione dependerá del tipo de usuario, la aplicación, el área geográfica, entre otros aspectos [1].

Por consiguiente, en este capítulo sólo se analizarán las tecnologías de acceso para redes cableadas, abordando inicialmente las redes basadas en par de cobre, seguido por las redes basadas en cable coaxial y finalmente las redes basadas en fibra óptica.

1.1.1 REDES DE ÚLTIMA MILLA BASADAS EN PAR DE COBRE

Existen dos tipos de tecnologías muy conocidas que forman parte del grupo de redes de acceso con par de cobre, las cuales, son: Dial-Up y xDSL (x (*any tipe of Digital Subscriber Line*)); de estos dos grupos, las tecnologías más desplegadas son las correspondientes a xDSL, a causa de sus bajos costos de inversión.

Por el contrario, la tecnología Dial-Up ha desaparecido a lo largo de los años, un ejemplo de ello se evidencia en Ecuador, donde, hasta noviembre del 2015 existían 161 conexiones a Internet Fijo a través de Dial-Up y 915.568 conexiones con tecnologías xDSL [1].

1.1.1.1 *Dial Up*

Dial-Up fue una de las primeras tecnologías de última milla que permitieron el acceso a Internet y su funcionamiento se basa en la utilización de un módem telefónico para conectarse a Internet a través de un servidor local.

Para permitir la conexión a Internet, desde el computador se realiza una llamada a un número provisto por el Proveedor de Servicios de Internet (ISP, *Internet Service Provider*), luego, la llamada se establece a través de la Red Telefónica Conmutada (PSTN, *Public Switched Telephone Network*), donde, la señal es transmitida hasta el nodo del ISP, en el cual, finalmente se permitirá el acceso al cliente conectándolo al servidor local de Internet.

Las conexiones *Dial-Up* que generalmente ofrecen los ISP, son de baja velocidad y comúnmente la opción más barata. Además, debido a las características físicas de la línea telefónica tradicional, la velocidad de señal ofrecida resulta ser máximo 56 kbps [5].

La ventaja de este tipo de conexiones es que son muy económicas y ampliamente disponibles, sin embargo, la velocidad que ofrecen es muy baja en comparación con otras tecnologías de acceso a Internet y uno de sus mayores problemas es que no es posible realizar o recibir llamadas telefónicas mientras se tiene establecida una conexión a Internet.

A pesar de ser una tecnología que está perdiendo fuerza, el acceso por *Dial-Up* puede ser una opción conveniente para áreas remotas donde el acceso WAN sea limitado y no se requiera alta capacidad de transferencia de datos.

1.1.1.2 *DSL (Digital Subscriber Line)*

DSL es una familia de tecnologías que utilizan par de cobre como medio de transmisión. En Ecuador estas tecnologías son las más utilizadas por los usuarios residenciales, pues aprovecha la infraestructura de la red de acceso de telefonía tradicional ya instalada.

Las tecnologías DSL fueron creadas inicialmente para ofrecer servicios de voz, pero

con el desarrollo de las redes de comunicaciones han evolucionado. De tal manera que, con la aparición de las comunicaciones de datos, fue necesario ofrecer al cliente dispositivos que le permitan el intercambio de información digital y por esta razón aparece el módem DSL.



Figura 1.3. Topología de xDSL. [6]

Como se muestra en la figura 1.3, el módem DSL se conecta por un extremo a la línea telefónica y por el otro extremo se conecta al computador, después, la línea telefónica se conecta a la compañía de teléfono mediante el par de cobre, específicamente a un multiplexor de acceso digital llamado DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*) ubicado en la oficina central (CO, *Central Office*) del operador, el cual, se encarga de permitir el acceso a Internet al abonado.

Uno de los mayores inconvenientes que presentan estas tecnologías es el limitado ancho de banda que proporcionan. Por otra parte, la tecnología más utilizada de la familia DSL es ADSL, la cual se describe a continuación.

1.1.1.2.1 ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*)

ADSL inició en 1989, a partir de estudios realizados en la compañía *Bellcore*, luego, en 1994 se creó el *ADSL Forum* y el siguiente año el *ANSI (American National Standards Institute)* aprobó la primera norma para ADSL denominada T1.413 [7].

La tecnología ADSL utiliza par de cobre como medio de transmisión para permitir el acceso a Internet de banda ancha, sin interferir con el uso de la línea telefónica simultáneamente. Además, al ser una tecnología inicialmente pensada para transmitir señales de audio, la calidad del servicio depende mucho de la calidad del cableado, por lo cual, presenta limitaciones en la transmisión de datos.

El ancho de banda que ofrece el par de cobre depende de factores como la distancia y el diámetro del cable, al existir mayor distancia entre el abonado y la central será menor la calidad del canal.

Por otra parte, el estándar que define ADSL con modulación DMT (*Discrete Multi-tone*)² es UIT-T G.992.1, el cual, indica que las velocidades de transmisión son aproximadamente de “6 Mbps para *downstream* y 640 Kbps para *upstream*” [8]. Estas cifras dependen tanto de las características físicas del sistema como el nivel de ruido presente en la red.

En la figura 1.4 se puede observar la distribución del espectro de frecuencias utilizado en esta tecnología.

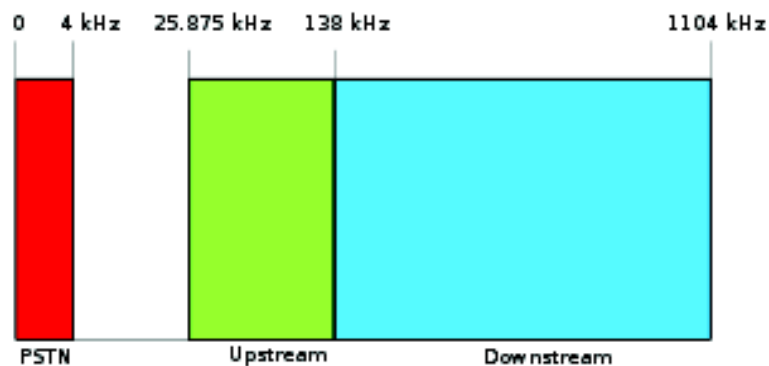


Figura 1.4. Distribución del Espectro de frecuencias utilizado por ADSL. [9]

Adicionalmente, existen dos versiones mejoradas, las cuales son, ADSL 2 y ADSL 2+, estas versiones incluyen características que permiten el aumento de la capacidad que ADSL comúnmente ofrece, incremento en la protección a interferencias y disminución de la atenuación de la señal.

² En este tipo de modulación se utilizan un conjunto de subportadoras equi-espaciadas, donde cada una se modula en QAM, el conjunto de subportadoras moduladas se suman y se transmite por el par de cobre. QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) es un esquema de modulación que combina la modulación en amplitud y fase.

1.1.1.2.2 VDSL o VHDSL (Very high bit-rate Digital Subscriber Line)

Esta tecnología permite la transmisión de datos tanto de manera simétrica como asimétrica adaptándose mejor a la demanda del mercado y utilizando hasta 12 MHz del espectro del hilo de cobre [10].

VDSL utiliza dos canales para descarga y dos canales para subida de datos, es decir, usa en total cuatro canales para transmitir, con lo cual la potencia de transmisión se incrementa considerablemente.

Además, la aplicación más común de esta tecnología es la televisión de alta definición por red, y por otra parte, en el ámbito de oficina, VDSL hace posible las llamadas por videoconferencia de alta calidad y soporta interconexión de VPN.

En la Tabla 1.1 se muestra un resumen de los principales parámetros de las tecnologías xDSL.

Tabla 1.1. Cuadro comparativo entre ADSL y VDSL. [10]

UIT-T	Tecnología	Velocidad de subida (Mbps)	Velocidad de bajada (Mbps)	Alcance (km)	Aplicaciones
G.992.1	ADSL (G.DMT)	0.64	1.5 - 8	4 - 5	"Acceso a Internet, mensajería electrónica, comercio electrónico, interconexión LANs, VPN, acceso remoto y teletrabajo, audio, vídeo difusión, vídeo conferencia, aplicaciones interactivas en red" [7].
G.992.3	ADLS 2	1	12	4 - 5	
G.992.5	ADSL 2+	1	24	4 - 5	
G.993.1	VDSL	1.6 - 6.4	13 - 52	0.3 - 1.5	Permite ofrecer los mismos servicios que ADSL y adicionalmente televisión de alta definición.
G.993.2	VDSL2-12MHz (largo alcance)	30	52	1	
G.993.2	VDSL2-30MHz (corto alcance)	Hasta 100 simétrico		0.15-0.5	

En la figura 1.5 se puede observar la distribución del espectro de frecuencia utilizado por las tecnologías xDSL mencionadas.

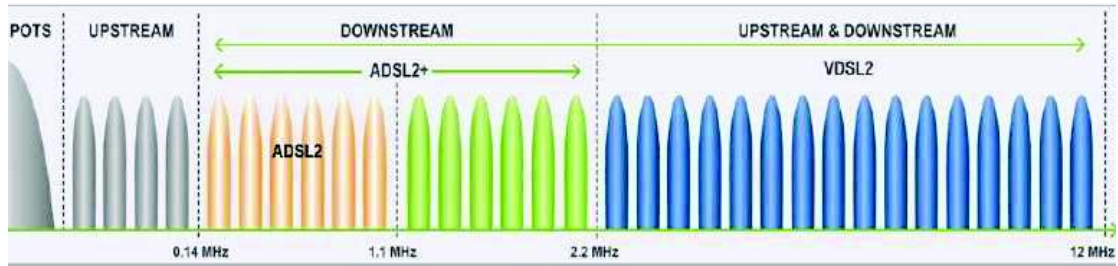


Figura 1.5. Distribución del espectro de frecuencias utilizado por ADSL2, ADSL2+ y VDSL2 [11]

1.1.2 REDES DE ÚLTIMA MILLA BASADAS EN CABLE COAXIAL

En la década de los 90, los operadores de telefonía tradicional apenas empezaban a desplegar fibra óptica en el acceso, mientras que los operadores de cable coaxial ya poseían toda una red de banda ancha pero dedicada solamente a la difusión de televisión.

Debido a que el despliegue de fibra óptica implicaba la instalación de costosos equipos, se mejoró la capacidad de la red de televisión por cable insertando fibra óptica en la red de distribución, en lugar de tendidos enteros de cable coaxial, de esta manera nacen las redes híbridas HFC.

1.1.2.1 HFC (*Hybrid Fiber Coaxial*)

Las redes HFC son aquellas que utilizan en su parte de distribución fibra óptica y en su parte de acceso cable coaxial, con el objetivo de disminuir la distorsión de las señales a transmitir, además, al ser la atenuación de la fibra mucho menor en comparación al cable coaxial, se pueden alcanzar mayores distancias sin colocar amplificadores. Asimismo, este tipo de redes conllevan menores costos que las redes FTTx (*Fiber To The x*)³ debido a la reutilización de las redes de cable coaxial ya implementadas.

En la actualidad, la elevada competencia existente entre proveedores de servicios de telecomunicaciones, ha ocasionado que la televisión por cable como un solo

³ FTTX es el término utilizado para referirse a un conjunto de tecnologías que utilizan fibra como medio de transmisión y dependiendo de dónde se ubique el equipo final toman su denominación: FTTH (*Fiber To The Home*), FTTC (*Fiber to The Curb/Cabinet*), FTTB (*Fiber To The Building*), FTTN (*Fiber To The Node*), etc.

servicio no sea una opción rentable, por lo cual, los proveedores han optado por ofrecer adicionalmente acceso a Internet de alta velocidad y servicio telefónico (*triple-play*). Para ello, los usuarios únicamente deben disponer de un dispositivo conocido como cable-módem para acceder a Internet.

Por otra parte, para estandarizar las redes HFC, en 1997 se desarrolló el estándar internacional DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*) desarrollado por la empresa *CableLabs*, el cual, define todos los requerimientos de la infraestructura de la red HFC desde el equipo local del cliente o CPE, hasta el equipo terminal del operador también conocido como *head-end* o cabecera [12].

Hasta la fecha existen tres versiones del estándar, de las cuales la versión original (DOCSIS 1.0) es la más utilizada.

1.1.2.1.1 Evolución

La distribución de televisión tuvo un gran desarrollo a partir de la década de los 70 con el inicio de la televisión satelital, por lo cual, al existir una mayor gama de canales se requería de mayor cantidad de ancho de banda en los sistemas de cable coaxial. Por lo tanto, con la finalidad de compensar las limitaciones de este medio, en la década de los 90 se introdujo tecnología óptica a estos sistemas y así evolucionaron como sistemas completos bidireccionales de telecomunicaciones y no solo sistemas de distribución.

Típicamente, estas redes utilizan el espectro de frecuencias de 5 a 42 MHz para la transmisión en sentido ascendente y de 54 a 750 MHz para la transmisión en sentido descendente [12], como se observa en la figura 1.6, a continuación:

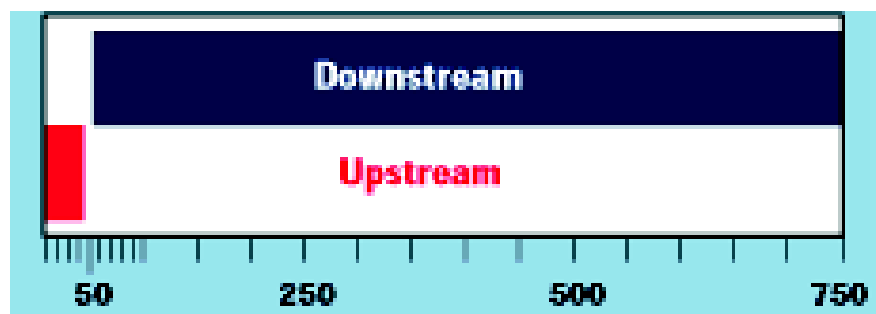


Figura 1.6. Distribución del espectro de frecuencias utilizado por HFC. [13]

1.1.2.1.2 Topología

La topología típica de este tipo de redes se indica en la figura 1.7, donde, se diferencian varios dispositivos que forman parte de la red, entre los que se encuentran: el equipo terminal del abonado, el cable-modem, el nodo HFC, el transceptor de fibra, el combinador de RF, un *splitter* de subida, banco de filtros y el Sistema de Terminación de Cable Modem (CMTS, *Cable Modem Termination System*).

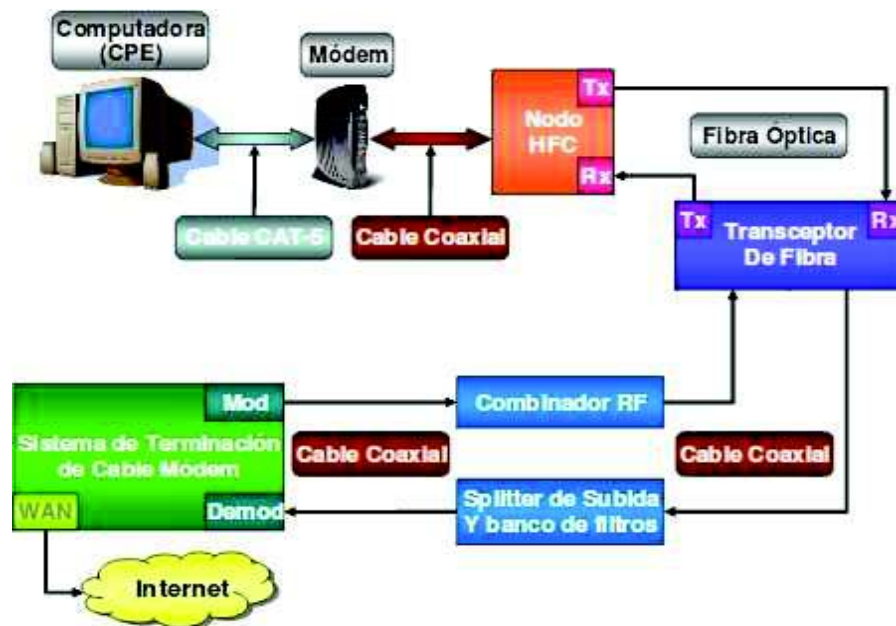


Figura 1.7. Diagrama de la topología DOCSIS. [12]

- **Cable-modem:** es un dispositivo ubicado en el lado del abonado, el cual, permite al usuario el acceso a Internet, además, se encarga de modular/demodular las señales que se transmiten o reciben respectivamente a la red HFC.
- **Nodo HFC:** es un dispositivo de dos vías, una para la transmisión de datos y otra para la recepción, este dispositivo convierte las señales analógicas en pulsos digitales o viceversa.
- **Transceptor de Fibra:** es un equipo concentrador o repetidor que actúa como interfaz entre la fibra óptica y el cable coaxial.
- **Splitter de Subida y banco de filtros:** este bloque es utilizado únicamente en el enlace de subida, donde los filtros reciben las señales enviadas por los

diferentes módems y se encargan de seleccionar solamente las frecuencias entre 5 y 42 MHz, luego cada señal es llevada a un *splitter* donde son combinadas para ser enviadas al CMTS.

- **Combinador RF:** Es un dispositivo utilizado en el sentido de bajada, el cual, combina múltiples frecuencias de radio de diferentes fuentes hacia un solo medio compartido y añade las frecuencias de los canales de televisión, ya sea digital o analógica.
- **CMTS:** es un equipo ubicado en el lado del proveedor, el cual, funciona como la interfaz entre Internet y el proveedor, además, se encarga de proporcionar servicios de banda ancha al abonado a través de las redes híbridas HFC. En particular, “dependiendo del CMTS, el número de cable-módems que puede manejar varía entre 4.000 y 150.000, además, una determinada cabecera puede tener entre media docena y una docena de CMTS [14]”.

1.1.2.1.3 Funcionamiento

Canal ascendente:

En el enlace de subida, el equipo del cliente se conecta al cable módem a través de una tarjeta de red con interfaz *Ethernet* y un cable de cobre (los módems actuales permiten realizar esta conexión por USB).

A continuación, el cable-módem se conecta por medio de cable coaxial a un nodo HFC, éste normalmente es compartido entre varios usuarios que llegan a un sólo nodo HFC. Es decir, los abonados de un mismo sector comparten el ancho de banda proporcionado por una misma línea de cable coaxial, por lo cual, los nodos HFC son ubicados en puntos estratégicos dentro de cada vecindario con la finalidad de conectar la mayor cantidad de usuarios a la menor distancia posible de cada uno de ellos.

Luego, varios nodos HFC se conectan por medio de cables de fibra óptica al transceptor de fibra, el cual, envía las señales transmitidas por todos los cable-módems hacia el *splitter* y banco de filtros. Posteriormente, las señales son transmitidas al CMTS, donde, son demoduladas para que finalmente, la señal se transmita por el enlace internacional contratado por el proveedor.

Canal descendente:

En el enlace de bajada, el CMTS modula la señal con 64QAM para transmitirse en un rango de frecuencias entre 54 y 750 MHz hacia el combinador de RF [12]. Posteriormente, el combinador de RF transmite las señales al transceptor de fibra, el cual, convertirá las señales de RF en pulsos digitales que se transmitirán al nodo HFC, éste convertirá nuevamente la señal digital en señal analógica para transmitirla al cable módem, quien demodulará la señal para entregársela en un formato adecuado a cliente.

En la tabla 1.2, se presentan las diferentes combinaciones y tasas de transmisión resultantes para cada versión del estándar DOCSIS.

Tabla 1.2. Velocidades permitidas en cada versión del estándar DOCSIS. [14]

Versión	DOCSIS		EURODOCSIS	
	Velocidad de bajada (Mbps)	Velocidad de subida (Mbps)	Velocidad de bajada (Mbps)	Velocidad de subida (Mbps)
1.x	42.88	10.24	55.62	10.24
2.0	42.88	30.72	55.62	30.72
3.0 (4 canales)	171.52	122.88	222.48	122.88
3.0 (8 canales)	343.04	122.88	444.96	122.88

1.1.2.1.4 Aplicaciones

Las redes HFC son una evolución de las redes CATV⁴ (*Community Antenna Television*), por lo que, originalmente el único servicio que los operadores de cable ofrecían era la distribución de televisión.

Actualmente, además de distribución de televisión, las redes HFC soportan varios servicios como “telefonía, servicios de acceso a internet y datos; dentro de los que se tiene por ejemplo servicios interactivos, juegos en red, servicios P2P (Peer to Peer)⁵, videoconferencia, streaming de video” [15], etc.

⁴ CATV o Televisión por Cable es un sistema de televisión por suscripción que se ofrece a través de señales de radio frecuencia y se transmite a los televisores por medio de cable coaxial.

⁵ Los servicios P2P son aquellos que permiten compartir todo tipo de material, video, audio,

1.1.3 REDES DE ÚLTIMA MILLA BASADAS EN FIBRA ÓPTICA

Hoy en día, debido a las altas prestaciones de la fibra óptica, se considera que las redes de acceso que utilizan fibra óptica son las más eficientes en comparación con otras opciones cableadas.

Entre estas características se encuentran: la alta capacidad de transmisión (ancho de banda en el orden de decenas de THz), la alta resistencia a las agresiones del entorno como: la penetración de agua, inmunidad a las interferencias electromagnéticas, inmunidad a las interferencias estáticas (provocadas por relámpagos, motores eléctricos, luces fluorescentes). Además, las fibras ópticas son livianas y de diámetro más pequeño en comparación con los medios de cobre, y en general, los sistemas de fibra óptica permiten gran alcance de cobertura (desde decenas hasta cientos de km) y la posibilidad de ofrecer servicios a un gran número de usuarios [15].

En este sentido, actualmente existe una gran variedad de tecnologías disponibles con el fin de permitir el acceso mediante fibra hasta el hogar. De hecho, estas tecnologías se clasifican en dos grandes grupos: Redes Ópticas Activas (AON, *Active Optical Network*) y Redes Ópticas Pasivas (PON, *Passive Optical Network*).

En este trabajo se estudiará únicamente las redes PON, de acuerdo al alcance del mismo y dado que son las más desplegadas en la actualidad.

1.1.3.1 Redes Ópticas Pasivas

Las PON son redes punto-multipunto que comparten un mismo hilo de fibra entre varios abonados, han tomado gran relevancia en los últimos años debido a que, estas redes están mayormente compuestas por elementos ópticos que no disponen de una conexión a la red eléctrica para su funcionamiento, también, debido a las ventajas que ofrecen, como: la utilización de menor cantidad de equipos, menor cantidad de cables, mayor vida útil del canal y menor consumo de energía, lo que

programas, literatura, etc., entre diferentes usuarios conectados a las redes P2P, este tipo de redes permiten compartir recursos entre los usuarios de la red por medio de la conectividad entre los mismos, de tal forma que a la vez que se descargan algún material de la red, se pone a disposición del resto la parte descargada.

en general, se traduce en menor CAPEX (*CAPital EXpenditures*)⁶ y OPEX (*OPerating EXpenditures*)⁷.

Previo a conocer las características de las PON, es importante conocer algunos conceptos relacionados a la fibra óptica, como los siguientes:

1.1.3.1.1 Ventanas de Transmisión

Para que los pulsos de luz transporten información mediante la fibra óptica es necesario la utilización de un rango del espectro electromagnético, en redes PON se utiliza específicamente el margen de infrarrojos comprendido entre 750 nm y 1650 nm [16], el uso de este rango de longitudes de onda se debe a que se ha comprobado experimentalmente que esta zona es de baja atenuación.

En un inicio, se denominó ventana de transmisión al rango de longitudes de onda utilizado para las transmisiones con fibra óptica, donde, la primera ventana tiene una longitud de onda central de 850 nm y comprende el rango desde 820 nm hasta 880 nm, la segunda ventana tiene una longitud de onda central de 1310 nm y comprende el rango desde 1260 nm hasta 1360 nm, la tercera ventana tiene una longitud de onda central de 1550 nm y comprende el rango desde 1530 nm hasta 1565 nm. [16]

También, se ha añadido una cuarta ventana donde la atenuación se reduce significativamente, su longitud de onda central es de 1625nm y comprende un rango desde 1565 a 1625nm.

Adicionalmente, con el desarrollo de fibras ZWP (*Zero Water Peak*) se menciona una quinta ventana, en la cual, se ha disminuido las “pérdidas por iones hidroxilo”⁸, la cual, tiene una longitud de onda central de 1470nm y comprende un rango desde 1460nm hasta 1530nm. [16]

⁶ Capex es la inversión de capital de una empresa, es decir, el gasto generado por la adquisición de un activo fijo nuevo o el aumento de valor de un activo fijo ya existente, para la obtención de beneficios.

⁷ Opex representa el gasto recurrente asociado al mantenimiento de equipos, gastos de funcionamiento, etc.

⁸ Los iones hidroxilo son impurezas naturales presentes en la fibra durante su fabricación que producen la absorción de la luz en la fibra provocando pérdidas en la señal.

1.1.3.1.2 Bandas Ópticas

Hoy en día, es más común utilizar el término “bandas ópticas”, para referirse a los rangos del espectro electromagnético en los que se puede transportar información. A continuación, en la figura 1.8, se indican los rangos determinados para cada banda y se observa la coexistencia entre ventanas y bandas.

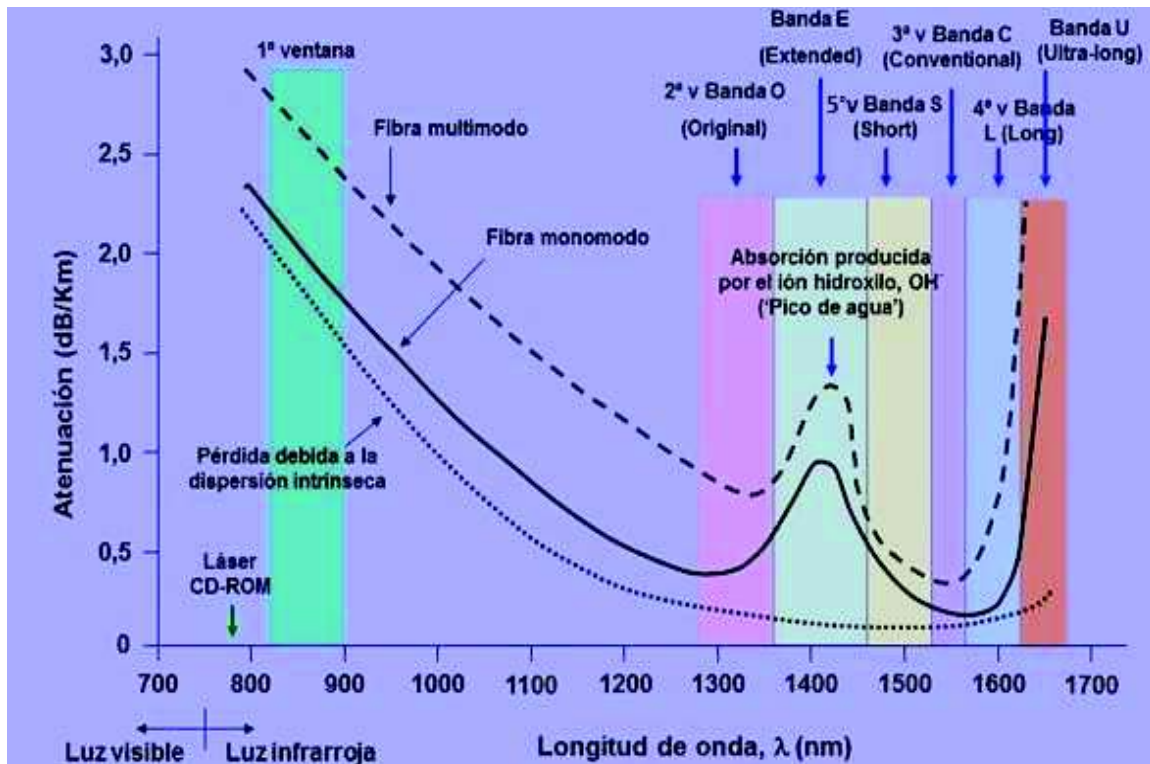


Figura 1.8. Ventanas y bandas de transmisión de la fibra óptica. [17]

- **Banda O:** desde 1260 hasta 1360 nm (Corresponde al mismo rango que segunda ventana).
- **Banda E:** desde 1360 hasta 1460 nm.
- **Banda S:** desde 1460 hasta 1530 nm (Corresponde al mismo rango que quinta ventana).
- **Banda C:** desde 1530 hasta 1565 nm (Corresponde al mismo rango que tercera ventana).
- **Banda L:** desde 1565 hasta 1625 nm (Corresponde al mismo rango que cuarta ventana).
- **Banda U:** va desde 1625 a 1675 nm.

1.1.3.1.3 *Dispersión*

Un aspecto importante a tener en cuenta en redes de fibra óptica es el fenómeno de dispersión, el cual, “define la capacidad máxima que, por una longitud de onda se puede transmitir en una fibra” [16].

Además, el efecto que produce la dispersión es el ensanchamiento de los pulsos originalmente transmitidos, a medida que dichos pulsos se transmiten a través de la fibra, este efecto produce que eventualmente la señal llegue al receptor distorsionada y no pueda ser recuperada en su forma original.

Por otra parte, el tipo de fibra óptica utilizada para redes PON debe ser monomodo, ya que son redes de alta capacidad de transmisión y gran alcance (en el orden de decenas de km). Por esta razón, los dos tipos de dispersión que pueden aparecer en este tipo de fibras son:

Dispersión Cromática:

Es el resultado combinado de dos efectos; la dispersión cromática de material y la dispersión cromática de guía de onda.

La dispersión cromática de material, se produce a causa de los distintos retardos que experimentan las longitudes de onda producidas por una fuente de luz al transmitirse a través de la fibra. Además, “en fibras monomodo, el 80% de la energía que se propaga por la misma está contenida en el núcleo y el resto se propaga a través del manto a mayor velocidad” [16], por lo tanto, el resultado físico de ello es la aparición de la dispersión cromática de guía de onda.

Los dos tipos de dispersión cromática se miden mediante un parámetro denominado coeficiente de dispersión, el cual, está dado de acuerdo al tipo de fibra a utilizarse y se encuentra en unidades de ps/(km*nm), además, se busca que este valor sea muy pequeño.

Por otra parte, la dispersión cromática de guía de onda puede utilizarse para contrarrestar la dispersión cromática de material, de esta manera, fibras monomodo estándares presentan dispersión nula alrededor de 1300nm, es decir, en esta longitud de onda ambas dispersiones se cancelan de manera natural. [16]

Como se puede observar en la figura 1.9, a mayor longitud de onda es mayor el valor del coeficiente de dispersión cromática.

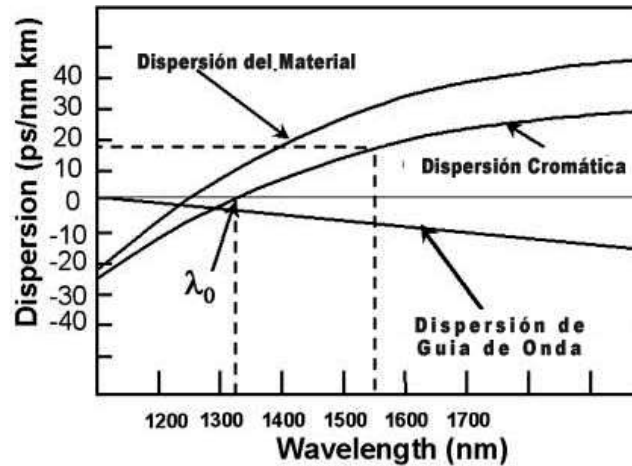


Figura 1.9. Dispersión Cromática en función de la longitud de onda [16].

Dispersión por Modo de Polarización (PMD, *Polarization Mode Dispersion*):

Este efecto se produce por las diferencias en las constantes de propagación en los ejes ortogonales (horizontal y vertical) de un modo, las cuales, son ocasionadas por imperfecciones en el proceso de fabricación de la fibra, curvaturas o tensiones en la misma, por lo cual, ocasionan que los dos ejes de un modo sufran un retraso llamado PMD, lo que produce el ensanchamiento de la señal como se puede ver en la figura 1.10.

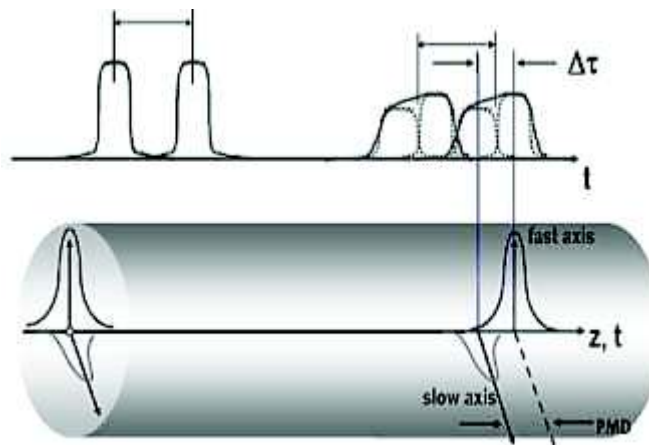


Figura 1.10. Efecto de la dispersión por modo de polarización. [16]

“PMD es de relevancia únicamente en sistemas de muy alta velocidad de

transmisión (por arriba de los 10 Gbps), donde la dispersión cromática se reduce por el uso de fuentes de bajo ancho espectral y cables de baja dispersión” [16].

1.1.3.1.4 Técnicas para limitar la dispersión total

- **Fibras Monomodo de Dispersión Plana (DFF, *Dispersion Flattened Fiber*):** esta fibra permite que la dispersión cromática sea nula a 1330 nm y 1550 nm [16], pero provoca un nivel de atenuación ligeramente mayor que el de la fibra estándar.
- **Fibra Óptica Compensadora de Dispersión (DCF, *Dispersion Compensating Fiber*):** la dispersión de un tramo de fibra puede ser compensada insertando otro tramo de fibra seguido al principal, con un valor de dispersión específico que anule la dispersión del tramo original. Es así que, DCF tiene un valor de dispersión cromática elevado y de signo contrario al de la fibra estándar, pero una desventaja que posee es un nivel de atenuación de aproximadamente 0.5 dB/km vs 0.2 dB/km de la fibra monomodo estándar [16].
- **Fibra óptica mantenedora de Polarización (PMF, *Polarization Maintaining Fiber*):** “es una fibra monomodo diseñada para permitir la propagación de una única polarización de la señal óptica de entrada. Se utiliza en dispositivos sensibles a la polarización como los moduladores externos Mach-Zehnder” [16].

1.1.3.1.5 Topología

La topología más utilizada en una PON es la topología en estrella, la cual, consiste en la conexión del OLT (*Optical Line Terminal*) y el ONT (*Optical Network Terminal*) a través de un tramo de fibra principal que conecta el OLT con el *splitter*, del cual se derivan varios enlaces hacia cada ONT conectado.

Esta topología es muy vulnerable, ya que, si el enlace principal o el *splitter* sufren algún incidente toda la red se verá afectada, sin embargo, es una opción bastante flexible dado que si existe un crecimiento en el número de usuarios se puede modificar la red con facilidad.

En la figura 1.11, se presenta la arquitectura general de una PON, donde se

observan tres secciones principales: la sección del operador, la red de distribución y la sección del cliente.

Por lo tanto, ubicados en la sección del operador se encuentran los equipos de transmisión más robustos como el OLT, en la red de distribución se encuentran equipos completamente pasivos como empalmes, conectores, *splitters* y cables de fibra óptica; y, en la sección del cliente se encuentra el equipo del abonado conocido como ONT/ONU.

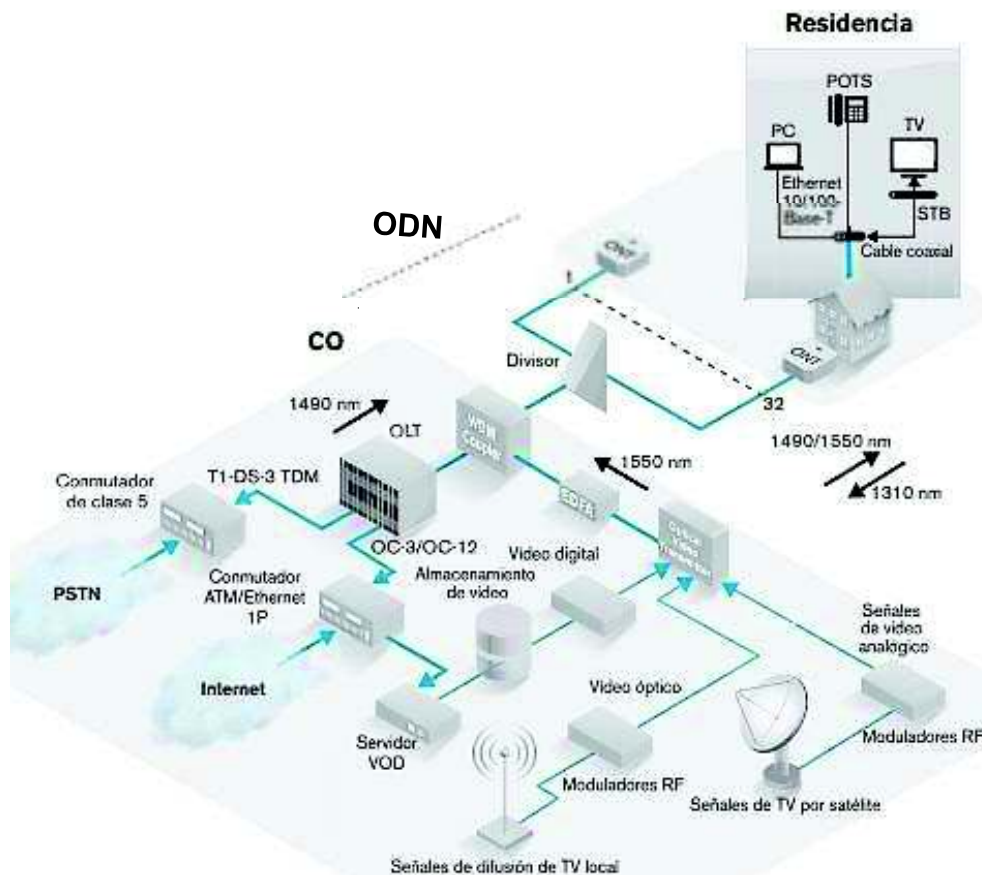


Figura 1.11. Topología general de las redes PON. [18]

De acuerdo al número de etapas de división de los *splitters*, existen varias arquitecturas para conectar los abonados a la PON, en particular, la arquitectura más simple es utilizar únicamente un solo nivel de división en toda la red, pero también puede existir el caso en el que se emplee más de una etapa de división, como se puede observar en la figura 1.12 a continuación:

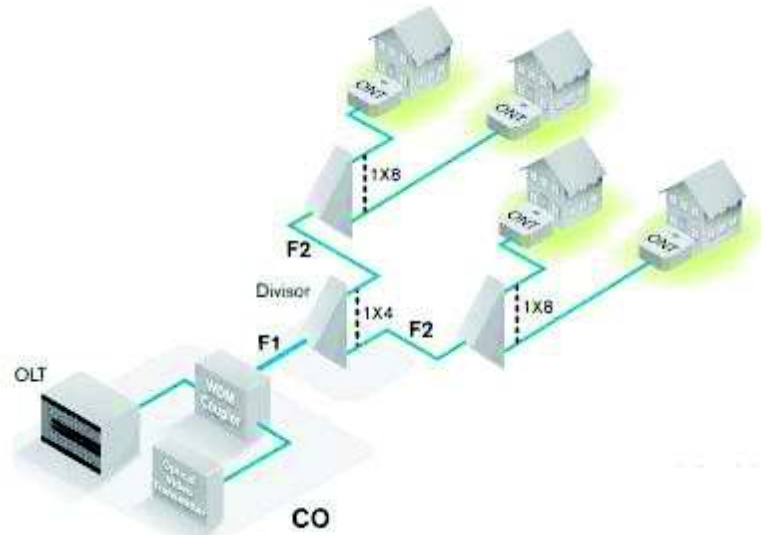


Figura 1.12. Arquitectura PON con dos etapas de división. [18]

1.1.3.1.6 Elementos Activos

OLT: es un equipo activo que cumple la función de gestionar y controlar todos los aspectos correspondientes al transporte del tráfico entregado y recibido desde el usuario. Adicionalmente, realiza la multiplexación/demultiplexación de las tramas transmitidas y asigna el intervalo de tiempo en el que cada ONT puede transmitir. Por lo tanto, es el equipo que permite el acceso a los servicios de red al abonado.

ONT/ONU: es un equipo activo ubicado en la localidad del usuario, el cual, recibe la información proveniente del OLT y la transmite en un formato adecuado al usuario. Además, en el sentido ascendente encapsula la información procedente del usuario y la envía al OLT, y en el sentido descendente se encarga de seleccionar la información correspondiente a un determinado usuario proveniente desde el OLT.

Amplificadores Ópticos: otros dispositivos importantes en LR-PON son los amplificadores ópticos, los cuales, cumplen la función de amplificar las señales ópticas de entrada sin realizar una conversión óptico-eléctrico-óptico, de hecho, son elementos completamente ópticos y se utilizan con la finalidad de compensar las pérdidas inherentes en el canal.

Es así que, los amplificadores ópticos poseen un funcionamiento y estructura muy parecida a la de un láser, con la diferencia de que no realizan realimentación o regeneración de la señal. A continuación, se indica el funcionamiento de estos

dispositivos en la figura 1.13, donde, la fuente de bombeo inyecta energía a la zona activa del amplificador, la cual, es absorbida para amplificar la señal de entrada mediante el proceso de “emisión estimulada”⁹.

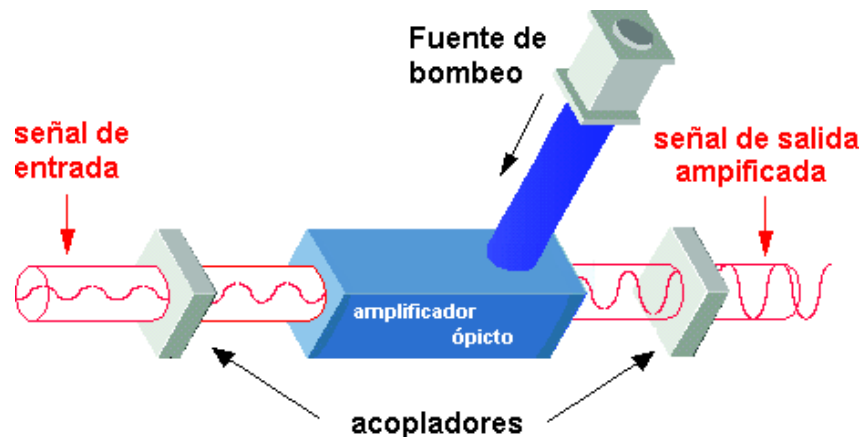


Figura 1.13 Funcionamiento de un amplificador óptico. [19]

Dos amplificadores ópticos ampliamente utilizados en estudios experimentales acerca de las tecnologías de largo alcance en redes de fibra óptica son los EDFA y SOA, estos dispositivos hacen posible alcanzar la elevada distancia entre el OLT y el ONT (100 km), las elevadas velocidades de transmisión (hasta 40 Gbps) y la alta cantidad de abonados soportados por este tipo de redes (hasta 16384).

Amplificador Óptico de Semiconductor (SOA, Semiconductor Optical Amplifier): posee una zona activa de amplificación, la cual, proporciona un nivel de ganancia a la señal óptica entrante que se consigue a partir de una corriente eléctrica externa aplicada al dispositivo. También, posee una guía de onda embebida usada para confinar la señal que se propaga a través de la zona activa. Además, es importante mencionar que el proceso de amplificación introduce ruido en la señal resultante y debido a esto, dicho ruido no puede ser enteramente eliminado.

La estructura general de un amplificador SOA se observa en la figura 1.14, a continuación:

⁹ La energía inyectada por la fuente de bombeo se combina con los fotones de la señal de entrada, ocasionando que caigan a unos niveles energéticos más bajos dando lugar a un nuevo fotón y produciendo de esta manera la amplificación de la señal.

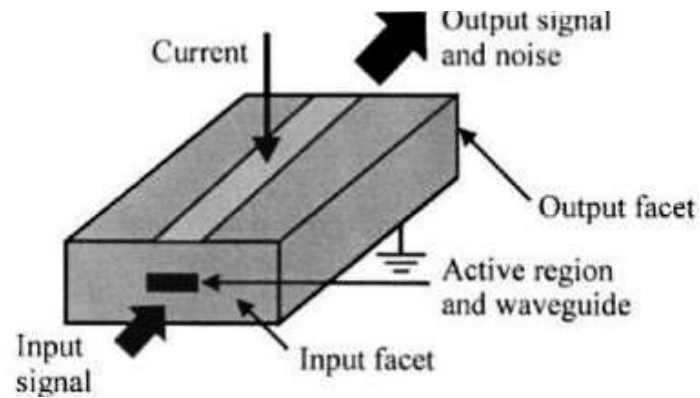


Figura 1.14. Diagrama básico de un SOA. [20]

Por lo tanto, la zona activa está compuesta por una capa sin dopar de GaAsP (Arseniuro de Galio y Fosfato) y posee una longitud de alrededor de $1.55\mu\text{m}$. Por otra parte, la capa de revestimiento superior consiste en una capa no dopada de InGaAsP (Arseniuro de Galio, Fosfato e Indio) y posee una longitud de $1.28\mu\text{m}$, adicionalmente, la guía de onda está compuesta por InP con dopaje p (Zinc) y en su parte superior se encuentra la capa de contacto por medio de la cual la corriente eléctrica externa es introducida a la zona activa.

En particular, la potencia de salida de saturación corresponde al nivel de potencia de la señal de salida en la cual la ganancia tiene una reducción típicamente de 3dB, con respecto a la ganancia del amplificador trabajando en región lineal. Entonces, si el SOA trabaja por encima de la potencia de saturación, es decir fuera de la región lineal, la calidad de la señal se degradará. Asimismo, el nivel de potencia máximo de una señal entrante permitido en un SOA, se obtiene a partir de la potencia de saturación y la ganancia del SOA.

Una ventaja de los SOA es la estabilidad que ofrece ante los cambios de polarización, lo cual, es favorable para sistemas implementados con múltiples longitudes de onda donde se ha comprobado que la polarización se mantiene constante.

Hoy en día, “las aplicaciones más adecuadas de los SOA como bloques de ganancia en los sistemas ópticos punto a punto es como amplificadores de refuerzo integrados con el láser emisor, aun cuando haya algunas limitaciones en cuanto a la potencia de salida” [21]. Además, pueden resultar ventajosos en la

implementación de algunas funcionalidades, tales como, la conversión de longitud de onda, la conmutación óptica y la multiplexación/de multiplexación. [21]

Algunas desventajas es que entregan muy bajo nivel de potencia en la señal de salida, tienden a ser ruidosos, son fuertemente no lineales cuando trabajan en la región de saturación, “pueden ser perjudiciales cuando trabajan como amplificadores de línea en los sistemas WDM”. [21]

Amplificador de Fibra Dopado con Erbio (EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifier*): el comportamiento no lineal de la ganancia en los SOA provocó que sean reemplazados por los EDFA en los enlaces ópticos de largo alcance, además de las ventajas que ofrecen como “bajas pérdidas de acoplo a la fibra, reflexiones despreciables, independencia a la polarización, alta ganancia, alta potencia de saturación de salida y bajo factor de ruido (NF, *Noise Figure*)¹⁰ [22].

Este tipo de amplificador es un segmento de fibra dopada con Erbio, en el cual al introducir un haz de luz de alta potencia, produce que los átomos en el Nivel fundamental o E1 sean excitados a un nivel inestable de mayor energía o E3, debido a que este nivel es inestable al cabo de aproximadamente $1\mu\text{s}$ descienden al nivel E2, conocido también como meta-estable, en el cual el electrón permanece por alrededor de 10ms para finalmente caer al nivel E1 por emisión estimulada produciéndose la amplificación, como se indica en la figura 1.15, a continuación:

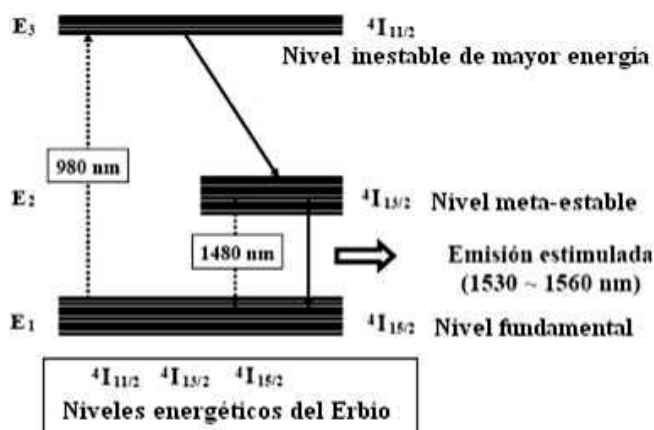


Figura 1.15. Diagrama de los niveles energéticos del Erbio.

¹⁰ El factor de ruido es la disminución del valor de SNR a la entrada en comparación al valor de SNR a la salida del amplificador.

La energía inyectada puede ser bombeada mediante dos longitudes de onda: 980 y 1480nm, donde, la fuente de bombeo está formada por un láser semiconductor. Además, “el bombeo a 1480nm supone un amplificador más ruidoso pero más inmune a la “saturación de ganancia”¹¹, mientras que, el bombeo a 980nm proporciona un amplificador con menor ruido pero es más propenso a la saturación de ganancia. En ambos casos es posible obtener ganancias entre 30 y 50 dB” [19].

Este amplificador originalmente era utilizado en la banda C, actualmente también existen EDFA para la banda L. Por otra parte, el EDFA es uno de los amplificadores más utilizados en la actualidad.

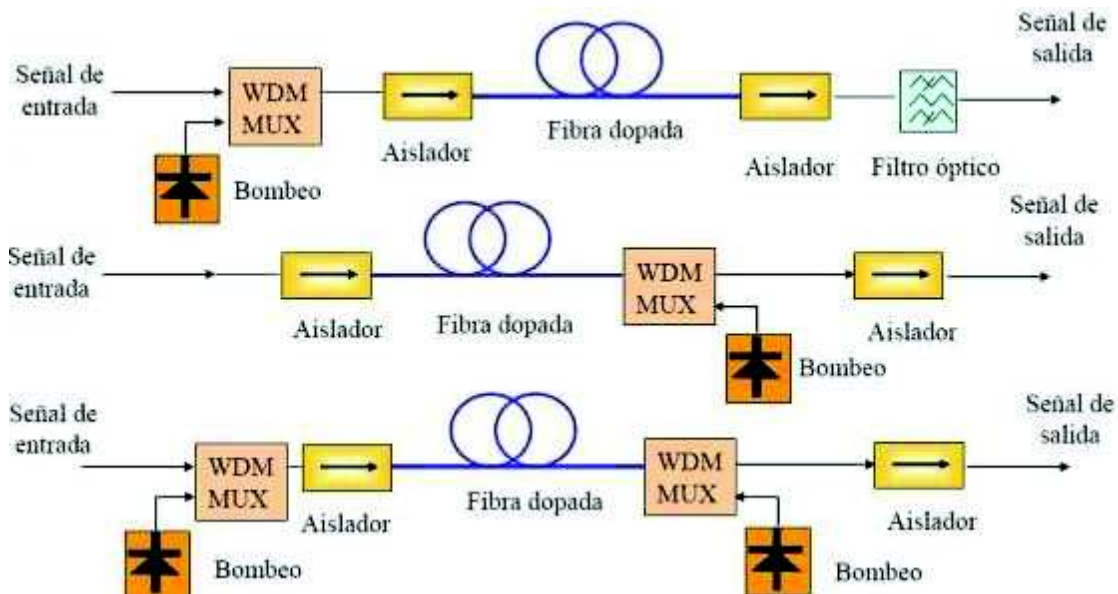


Figura 1.16 Tipos de configuraciones de un EDFA

Existen tres tipos de configuraciones de un EDFA, éstas se muestran en la figura 1.16, donde, la primera configuración, denominada bombeo co-direccional, es la más utilizada, en la cual, la señal de entrada y la radiación de bombeo se introducen al EDFA al mismo tiempo a través de un acoplador, ésta pasa por un aislador que cumple la función de evitar la propagación del ruido introducido fuera del EDFA, adicionalmente, a la salida se coloca otro aislador que evita la entrada al EDFA y amplificación de cualquier señal reflejada al EDFA, finalmente se coloca un filtro que permite disminuir el ruido introducido en el proceso de amplificación.

¹¹ La ganancia se satura cuando una mayor intensidad implica un menor coeficiente de ganancia.

En la segunda configuración, denominada bombeo contra-direccional, la señal de bombeo se inyecta en sentido contrario al de la propagación de la señal de entrada, en esta opción el primer aislador además de las funciones indicadas en la primera configuración, evita que la radiación de bombeo se propague fuera del EDFA. Por lo tanto, esta opción ofrece ganancias más altas pero introduce mayores niveles de ruido.

La tercera opción, conocida como *dual* o bidireccional, la ganancia puede llegar a duplicarse y su uso más común es en amplificadores repetidores. En particular, una desventaja de los EDFA es el reducido ancho de banda que posee, alrededor de 30 nm, sin embargo, gracias a los sistemas DWDM es posible alojar 40 canales de 100GHz u 80 canales de 50GHz, en ese ancho espectral. [16]

Además, algunas ventajas de los EDFA es que ofrecen alta ganancia óptica y se saturan lentamente, por lo tanto cuando se satura solo pierde cierta ganancia sin distorsionar la señal. A pesar de ello, también presentan desventajas, por ejemplo, estos dispositivos entregan diferentes cantidades de ganancia a diferentes longitudes de onda, lo que resulta en un problema en sistemas WDM a lo largo de un enlace que tiene diferentes etapas de amplificación. [23]

A continuación, en la tabla 1.3 se indica una comparación entre las principales características de ambos amplificadores.

Tabla 1.3. Características de los SOA y los EDFA [20]

Parámetros	SOA a 1490 nm	SOA a 1310 nm	SOA a 1570 nm	SOA a 1260 nm	EDFA a 1550 nm	EDFA a 1570 nm
Pico de ganancia (dB)	26	29	9.5	9.5	30	22
Ancho de banda (nm)	30	40	40	40	40	25
NF (dB)	8	7.5	7-9		5	6
Potencia óptica de salida (dBm)	+15 (prototipo de laboratorio)				+17 (hasta +26)	+13 (hasta +17)

AWG (Arrayed Waveguide Grating): es un multiplexor/demultiplexor, de hecho, en LR-PON se los utiliza para multiplexar/demultiplexar las señales en el canal de bajada y en el canal de subida respectivamente. Además, pueden formar parte del

OLT a la salida de la señal, y también pueden estar ubicados en nodos remotos, previo al ingreso a la ONU.

Su estructura consiste en acopladores multi-puertos interconectados por un arreglo de guías de onda, como se observa en la figura 1.17. Por lo tanto, una señal óptica formada por distintas longitudes de onda ingresa por un extremo de la guía de onda hacia el acoplador, donde, las señales se mezclan causando fenómeno de interferencia (constructiva y destructiva) y difracción; resultando en que cada longitud de onda sea enviada a diferentes guías de onda de salida. Es decir, “el acoplador de salida distribuye la potencia de sus entradas hacia las salidas aprovechándose de las diferentes interferencias producidas por las señales ópticas retardadas entre sí” [24].

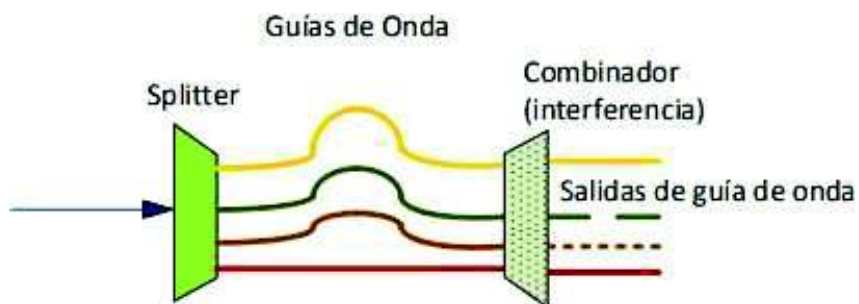


Figura 1.17. Estructura de un AWG.

Transmisor Óptico: es una fuente de luz que puede ser del tipo LED o del tipo LASER, debido a las características de las PON las fuentes utilizadas son de tipo láser. Por lo tanto, los transmisores deben ser capaces de ofrecer una adecuada potencia de salida, no demasiada como para ocasionar efectos no lineales o distorsión en la fibra o en el receptor, pero suficiente como para cubrir grandes distancias, desde 100mW para ciertos láseres [16]. A continuación, se detallan varios tipos de láseres:

- **ELC (External Laser Cavity):** su principio radica en colocar un láser semiconductor dentro de una cavidad externa, incorporando un mecanismo seleccionador de longitud de onda, este elemento seleccionador suele ser rejillas de refracción o prismas. Por lo tanto, para una determinada posición de las rejillas el láser emitirá una determinada longitud de onda, como se observa en la figura 1.18 a continuación:

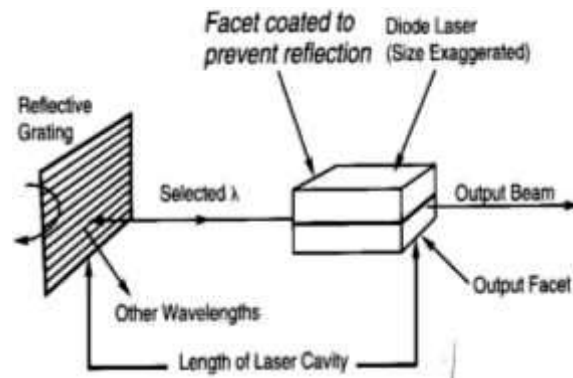


Figura 1.18. Estructura de un ELC. [16]

- **VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser):** es un diodo semiconductor que emite luz en un haz cilíndrico vertical, está constituido por espejos resonadores arriba y debajo de la capa activa, donde, la luz resuena perpendicular a la juntura y emerge a través de un área circular hecha en la superficie, como se observa en la figura 1.19. Adicionalmente, tiene una menor corriente de umbral a la cual se presenta el efecto laser (10 uA), consume poca potencia, en particular, tienen un mayor tiempo de vida útil y alcanza potencias ópticas del orden de 10 mW, por lo tanto, se puede aplicar un VCSEL en transmisión de datos en el rango de velocidad de 100 Mbps a 1 Gbps. [16]

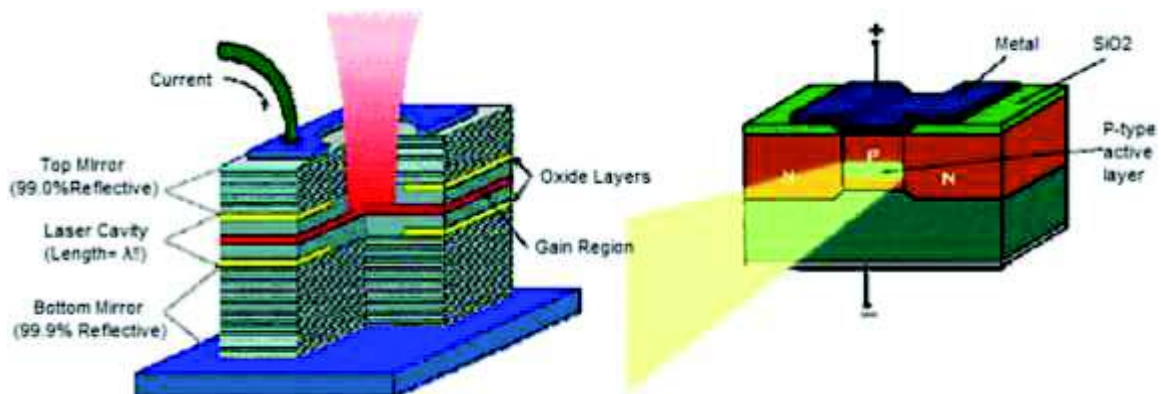


Figura 1.19. Estructura de un VCSEL. [25]

DBR (Distributed Bragg Reflection): es un diodo láser que actúa como una guía de onda de un solo modo que recorre toda la longitud del dispositivo. Por otra parte, una cavidad resonante se define por un espejo DBR altamente reflectante en un extremo, y una etapa de salida de baja reflectividad en el otro extremo. El espejo

DBR está diseñado para reflejar solo un único modo longitudinal, que permite al láser operar en un único modo espacial y longitudinal.

Receptor Óptico: la tarea primordial de los receptores ópticos es la conversión de la señal óptica recibida en señal eléctrica. En particular, el elemento fundamental que forma parte del receptor óptico es el detector de luz, el cual, puede ser un fotodetector o fotodiodo semiconductor.

Entre los más utilizados está el diodo PIN (*P-Intrinsic-N*), el cual, está conformado por dos capas semiconductoras entre las que se aloja una región poco dopada (capa intrínseca) para mejorar la sensibilidad¹² del diodo. Por lo tanto, la luz ingresa al diodo y cae sobre el material intrínseco, el cual, absorbe los fotones que entregan su energía a los electrones ubicados en la banda de valencia del material intrínseco, estos electrones pasan a la banda de conducción y se transforman en portadores de carga que hacen que una corriente eléctrica fluya por el dispositivo. Además, el nivel de corriente se incrementa de acuerdo a la cantidad de luz absorbida. [16]

Es así que, la alta velocidad y sensibilidad de un diodo PIN lo hacen muy adecuado para gran parte de los sistemas de fibra.

Por otra parte, otro detector bastante utilizado es el APD (*Avalanche Photo Diode*), el cual, se basa en el efecto avalancha, para lo cual, es necesario suministrar al diodo un alto voltaje en polarización inversa que genera la presencia de un intenso campo eléctrico.

Entonces, la luz que incide en el dispositivo genera electrones a nivel de la banda de conducción, los cuales son acelerados por acción del campo eléctrico hasta que chocan con los átomos de la estructura liberando múltiples electrones, éstos a su vez son acelerados por el campo eléctrico produciendo más electrones y así sucesivamente se suscita el fenómeno de avalancha. [16] Además, tienen mayor responsividad (25-100 A/W), son más sensibles y presentan menores “tiempos de respuesta”¹³ que los PIN, pero generan mayor ruido por el efecto avalancha. Otro

¹² La responsividad o también conocida como sensibilidad mide la relación que existe entre la corriente que entrega el detector y la potencia óptica que recibe, los valores típicos son 0.5 a 1 A/W.

¹³ El tiempo de respuesta mide la rapidez con la que el detector responde ante variaciones en la intensidad de luz de entrada, los tiempos de respuesta típicos oscilan en pocos ns.

inconveniente es que presenta mayor sensibilidad a variaciones de temperatura, lo que ocasiona que se requiera de circuitos especiales, haciéndolo más caro y complejo que el PIN.

Moduladores: existen dos maneras de realizar modulación óptica, la modulación directa y la externa. En la modulación directa, se modifica la corriente de la señal que ingresa al laser para modular la portadora óptica con la señal moduladora, por lo cual, con la variación de la corriente se puede modificar la amplitud, fase y frecuencia de la portadora.

La mayor desventaja de emplear este método es la modulación de fase residual, que expande el espectro óptico emitido, lo cual incrementa la distorsión de la señal.

En la modulación externa, el láser mantiene constante su corriente y el haz de luz ingresa a un modulador externo el cual realizará la modificación de amplitud y fase de la portadora óptica. De tal manera que, con esta forma de modulación se elimina o reduce significativamente el ensanchamiento del espectro óptico.

Los dos tipos de moduladores que se utilizan con mayor frecuencia son el electroóptico (EOM) y el electro absorción (EAM). Además, la modificación de las características de la portadora en los moduladores EOM se consigue mediante el cambio de índice de refracción, mientras que en los moduladores EAM ocurre a través de la absorción de luz que experimenta una guía de onda de semiconductor por efecto de un campo eléctrico aplicado sobre ella.

De hecho, EAM es bastante utilizado en transmisiones de muy alta velocidad, ya que las fuentes a altas velocidades presentan inestabilidad, ruido y degradación de sus características espectrales. Por lo que, está hecho de un material electro-absorbente mediante el cual es posible controlar la cantidad de potencia que éste deja pasar, tienen la ventaja de acoplarse fácilmente a diodos láser sin introducir altas pérdidas.

Bajo la categoría de moduladores EOM se encuentra el modulador Mach Zehnder, el cual, según su construcción puede variar la amplitud y/o fase de la señal para generar las modulaciones M-PSK y M-QAM. Además, este modulador está formado por un divisor, dos brazos de fibra óptica y un combinador, entonces, al emplear un material electro-óptico (como puede ser Niobato de litio) en uno de los brazos del

Mach Zehnder, se controla el desfase entre las señales combinadas. Por lo tanto, su principio de funcionamiento se basa en el fenómeno de interferencia entre ondas.

Elementos Pasivos: la sección entre el ONT y el OLT que permite la conexión entre ambos equipos en una PON, es conocida como Red de Distribución Óptica (ODN, *Optical Distribution Network*). En general, esta parte de la red es completamente pasiva y va desde la cabecera del operador hasta la caja de distribución en el lado del cliente. Además, está constituida por dos etapas: la etapa de *Feeder* o Alimentación (tramo principal entre el OLT y el *splitter*) y la etapa de Distribución (tramo desplegado desde el *splitter* hasta la caja de distribución o NAP (*Network Access Point*)), ver figura 1.20 a continuación:



Figura 1.20. Estructura de la ODN [26]

Splitter Óptico Pasivo: el elemento principal en la ODN y el que permite entregar los servicios de red en la PON hacia múltiples usuarios, es el *splitter* óptico. Este dispositivo se encarga de dividir la potencia de la señal de luz que ingresa por un puerto de entrada hacia los múltiples puertos de salida donde se conectan las distintas fibras que van hacia los abonados, este equipo no amplifica la señal ni la modifica, solamente reduce su potencia por efectos de la división que realiza.

De hecho, esta reducción de potencia es conocida como pérdida del *splitter*, se expresa en dB y depende del número de puertos de salida.

Los *splitters* más conocidos son la guía de onda planar (PLC, *Planar Lightwave Circuit*) usada para altas relaciones de división; y, la fibra de acondicionador bicónico fundido (FBT, *Fused Biconic Taper*) usado para bajas relaciones de división.

- **PLC:** basa su funcionamiento en la tecnología de guía de onda planar sobre

un sustrato de silicio, donde, el nivel de pérdida es más lineal en comparación con FBT, además, se pueden encontrar en configuraciones de 1:2, 1:4, 1:8, 1:16, 1:32, 1:64 y 1:128 [16] y trabajan en el rango de longitudes de onda desde 1260 hasta 1650 nm. Una desventaja es que su fabricación es más compleja, por lo tanto, son más costosos que FBT.

- **FBT:** este tipo de *splitter* se encuentra en presentación de tubo metálico cilíndrico y caja de plástico, donde dos o más fibras se fusionan mediante la aplicación de calor. Comúnmente su estructura es en árbol o estrella desde 1(2):2 hasta 1(32):32 y sólo trabajan en tres longitudes de onda; 850nm, 1310nm y 1550nm. [16]

Empalme: es la unión permanente entre dos secciones de fibra. En particular, existen dos técnicas de empalme, empalme mecánico y empalme por fusión. Por lo tanto, los empalmes mecánicos tienen mayor pérdida de inserción que los empalmes por fusión, desde 0.15 hasta 0.5 dB y los empalmes por fusión tienen pérdidas en el rango de 0.01 a 0.2 dB [16]. Por otro lado, el número de empalmes dependerá de la longitud del sistema, teniendo en cuenta que las longitudes estandarizadas para rollos de fibra desnuda van desde 1 km hasta 25 km y los cables de fibra vienen en bobinas de hasta 12 km. [16]

Conector: es un dispositivo que permite realizar una unión no permanente entre dos partes, normalmente se utilizan para unir los cables de fibra a los equipos de transmisión. Existen varios tipos de conectores en el mercado, su utilización dependerá de la forma de conectorización que posea cada equipo, algunos de los más conocidos son SC (*Subscriber Connector*), FC (*Ferrule Connector*), LC (*Lucent Connector*) y ST (*Straight Tip*).

De los conectores mencionados, son bastante utilizados en implementaciones PON, los SC/PC y SC/APC, éste último comúnmente se usa en las conexiones realizadas en la CO pues este tipo de conector posee una mejor calidad de unión óptica, lo cual lo hace idóneo para ambientes de potencias de transmisión elevadas.

Por otra parte, el conector SC típicamente no tiene partes metálicas, de hecho, el material de la carcasa exterior es de plástico y es de inserción *push-pull*. Además, para fibras ópticas monomodo típicamente tiene pérdidas de 0.2 dB.

Además, PC (*Physical Contact*) y APC (*Angled Physical Contact*) se refiere al tipo de pulido utilizado en el conector, además, PC es la conexión más común, en el cual, las dos fibras son enfrentadas una contra otra con un pulido levemente curvo o esférico en la superficie del conector y en APC las superficies del conector son curvadas y anguladas en 8° reduciendo las reflexiones en más de 60 dB con pérdidas ≤ 0.5 dB.

Circulador: es un dispositivo pasivo que transmite luz de un puerto a otro en una sola dirección, permitiendo que ésta no retorne nuevamente al puerto desde el que fue enviada, es por esto que pueden estar conectados directamente a los láseres.

Su estructura se observa en la figura 1.19, donde, se observa que cada puerto actúa como entrada o salida de las señales de luz y las versiones más comunes son de 3 o 4 puertos. A continuación, en la figura 1.21 se observa un ejemplo:

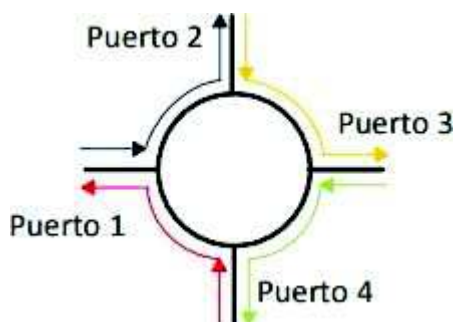


Figura 1.21. Circulador de 4 puertos. [23]

Fibra Óptica: mantener todos los dispositivos que conforman una ODN o por lo menos gran parte de ellos al migrar o actualizar una red a un nuevo estándar, con certeza representa un ahorro significativo para los operadores, pues, se aprovecha gran parte de la infraestructura desplegada. En este sentido, cabe mencionar que uno de los aspectos que representa mayor costo en una implementación PON es el tendido de fibra óptica.

En particular, en los diferentes estándares PON, se recomienda que para el despliegue de la ODN se utilice la fibra óptica G.652 y se sugiere para el cableado de *Drop* y cableado interno la fibra óptica G.657 compatible con G.652.

Por lo tanto, G.652 es una fibra óptica monomodo que posee 4 subcategorías que

son: G.652.A, G.652.B, G.652.C y G.652.D. A continuación, en la tabla 1.4 se muestra un resumen de las características de los estándares mencionados.

Tabla 1.4. Características de las subcategorías de G.652 [22]

Estándar	Características	Longitud de onda	Aplicaciones
G.652.A	PMD máximo = 0.5 ps/ \sqrt{km}	Bandas O y C	Aplicaciones para sistemas de hasta STM-16, así como 10 Gbps a 40km (Ethernet).
G.652.B	PMD máximo = 0.2 ps/ \sqrt{km} Atenuación máxima especificada en 1625 nm.	Bandas O, C, L	Soporta aplicaciones de altas velocidades, hasta STM-64, y en algunos casos hasta STM-256.
G.652.C	PMD máximo = 0.5 ps/ \sqrt{km} Atenuación máxima especificada en 1383 nm.	Desde la banda O hasta la banda C	Este estándar permite la transmisión en partes de un rango de longitud de onda extendida desde 1360 nm a 1530 nm. Adecuado para sistemas CWDM.
G.652.D	PMD máximo = 0.2 ps/ \sqrt{km} . Atenuación máxima especificada en 1383 nm. Atenuación mínima en 1550 nm = 0,3 dB/km Atenuación promedio en el rango de 1310 nm a 1625 nm = 0,4 dB/km	Amplia cobertura: bandas O a L.	Similar a G.652.B con la diferencia que este estándar permite la transmisión en partes de un rango de longitud de onda extendida desde 1360 nm a 1530 nm. Adecuado para sistemas CWDM.

De acuerdo a lo mencionado en la tabla 1.4, la subcategoría escogida para las implementaciones de los segmentos de *Feeder* y Distribución en redes PON es G.652.D (ver Anexo A), debido a que, es la que trabaja en el mayor rango de longitudes de onda y presenta un nivel de atenuación bastante parejo en todas las bandas inclusive disminuye el pico de dispersión por iones hidroxilo, como se observa en la figura 1.22.

Por otra parte, se escoge G.657.A (ver Anexo B) para el uso de interiores y la zona de *Drop*, debido a que esta serie proporciona una gran resistencia a pérdidas introducidas por macro curvaturas, también, debido a que de las dos subcategorías existentes (G.657.A y G.657.B) únicamente G.657.A ofrece compatibilidad de

“campo modal”¹⁴ con G.652.D.

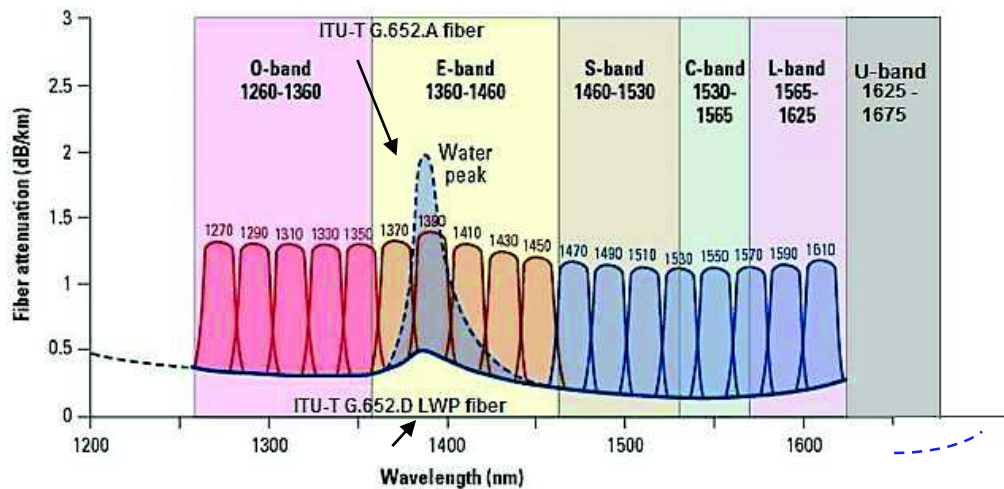


Figura 1.22. Atenuación de la Fibra en función de la Longitud de Onda.

1.1.3.1.8 Funcionamiento

En la CO del operador el OLT se conecta al WDM para transmitir sobre una misma fibra los servicios de video, voz y datos. Posteriormente, inicia el tramo principal de fibra óptica que es desplegado entre el WDM y el *splitter* óptico, luego, el *splitter* deriva la señal hacia los distintos tramos de fibra que conectan varios ONT a la PON, como se muestra en la figura 1.23 a continuación:

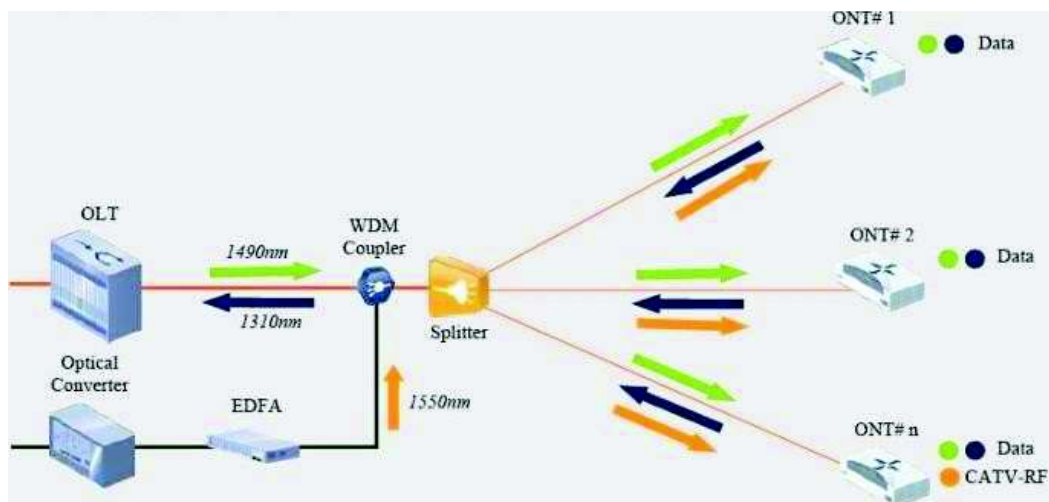


Figura 1.23. Esquema Global de las Redes Ópticas Pasivas. [27]

En general, en las redes PON se hace uso de tres longitudes de onda: 1310nm,

¹⁴ Región por la que se transmiten los pulsos de luz que incluyen el núcleo más una porción de *cladding*.

1490nm y 1550nm para llevar a cabo la entrega de servicios a los abonados.

a) *Longitud de onda 1490nm y 1550nm:*

Este par de longitudes de onda son utilizadas en el canal descendente, donde, el OLT envía la información en forma de *broadcast* utilizando multiplexación por división de tiempo (TDM, *Time Division Multiplexing*)¹⁵ y se conecta al WDM, el cual, recoge las señales de voz, datos y video.

Es así que, la longitud de onda utilizada para transmitir voz y datos es de 1490nm y para transmitir video es de 1550nm.

Por otra parte, las tramas enviadas desde el OLT, llevan la información de destino con el objetivo de que cada ONT pueda reconocer la información que le corresponde, además, el *splitter* óptico se encarga de repartir dichas tramas hacia todos los ONT conectados, como se observa en figura 1.24 a continuación:

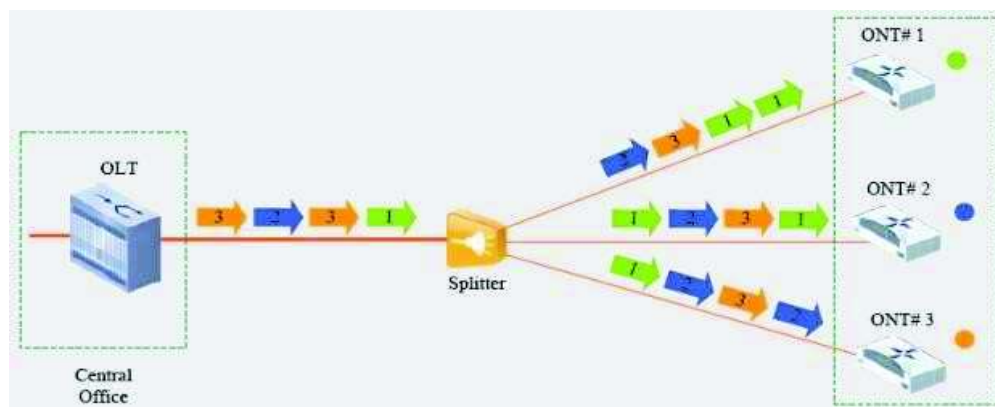


Figura 1.24. Esquema de transmisión en canal descendente. [27]

b) *Longitud de onda 1310nm:*

Esta longitud de onda se utiliza en el canal ascendente, donde, cada ONT recoge la información de voz y datos de cada abonado y utiliza el método de acceso TDMA (*Time Division Multiple Access*)¹⁶ para enviar la información recogida. Así pues,

¹⁵ TDM es una técnica de multiplexación donde cada usuario en el sistema puede utilizar todo el ancho de banda de un medio de transmisión durante una fracción del tiempo total.

¹⁶ TDMA es una técnica de acceso al medio que utiliza un canal común entre múltiples usuarios asignándole a cada uno de ellos un intervalo de tiempo distinto.

cada ONT enviará su información en distintos periodos de tiempo, asignados previamente por el OLT, en la longitud de onda de 1310nm. Luego, el *splitter* óptico combinará toda la información recogida para transmitirla por una sola salida hacia el OLT.

A continuación, en la figura 1.25 se puede observar lo mencionado.

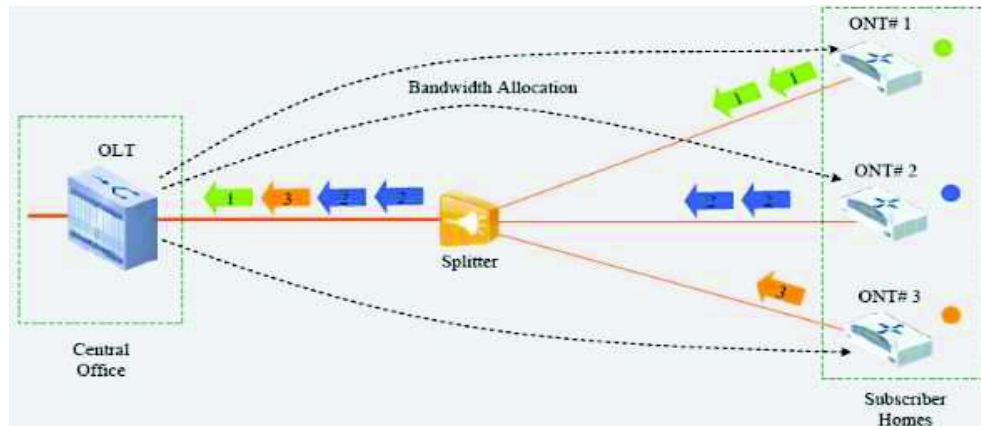


Figura 1.25. Esquema de transmisión en canal ascendente. [27]

1.1.3.1.9 Redes FTTx

La clasificación de las redes de acceso de fibra según su punto de terminación, depende del sitio en el cual se instale el ONT y por consecuencia la acometida, algunos ejemplos se muestran en la figura 1.26.

A continuación se describen los tipos de redes FTTx más utilizados:

- **FTTH (*Fiber to the Home*):** en este tipo de red el despliegue de fibra óptica llega hasta el hogar, ya sea su interior o su fachada.
- **FTTC (*Fiber to the Curve*):** fibra hasta la acera, en este tipo de red la fibra llega hasta una cabina ubicada entre 300 y 600 metros del usuario.
- **FTTB (*Fiber to the Building*):** fibra hasta el edificio, en este tipo de red la fibra llega hasta el cuarto de distribución del edificio y el acceso hasta el usuario se lo realiza con otro medio de transmisión ya sea cable coaxial, cobre o interfaz de radio.
- **FTTN (*Fiber to the Node or Neighborhood*):** fibra hasta el nodo o vecindario, en este tipo de red la fibra suele llegar hasta un punto ubicado en las inmediaciones del vecindario como puede ser una cabina ubicada

entre 1.5 y 3 km del usuario.

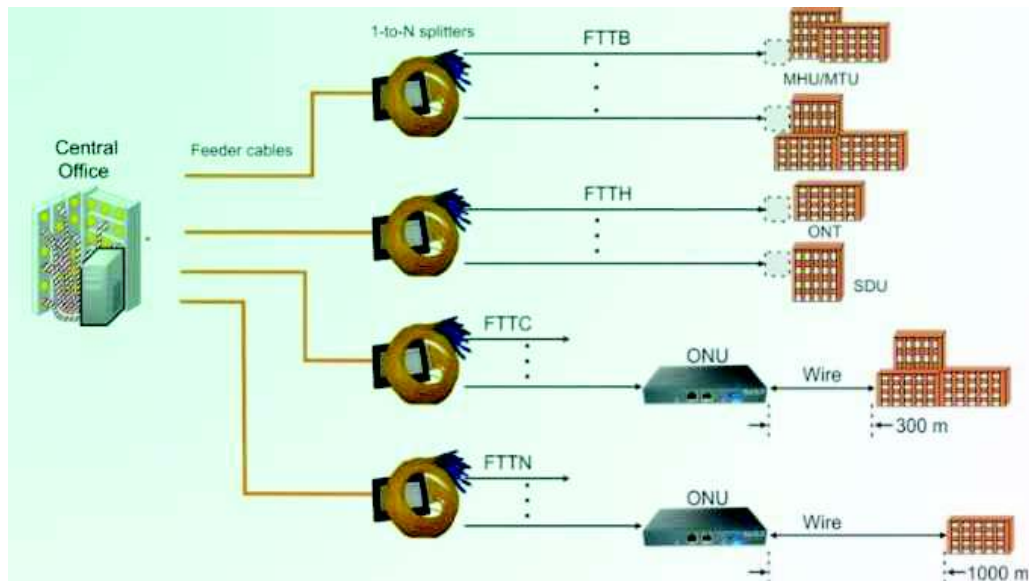


Figura 1.26. Tipos de topologías de redes FTTx. [28]

1.1.4 TECNOLOGÍAS DE ÚLTIMA MILLA UTILIZADAS EN ECUADOR

Como se ha mencionado ya en este capítulo, el tráfico de Internet a nivel mundial ha crecido significativamente en las últimas décadas, es así que, en 1990 el tráfico aproximado era de 1 TB/mes y en 2018 es de aproximadamente 56,94 TB/seg [29].

En particular, debido a las limitaciones de este trabajo, se hablará únicamente del acceso a servicios de banda ancha mediante conexiones fijas y no móviles. En este contexto, se conoce que en Ecuador el acceso a Internet Fijo ha crecido de manera relevante desde 2010 donde existía alrededor de 472.429 cuentas contratadas; este número ha crecido a 1'779.397, consiguiendo un índice de penetración del 10,61% al cierre del 2017 [30].

Por otra parte, el servicio de acceso a internet fijo en el país es proporcionado por varios proveedores, los cuales se mencionan en la figura 1.27 con su respectivo índice de participación de mercado.

Además, en el país existen varias formas de proporcionar acceso a servicios de Internet a través de conexiones cableadas, siendo de esta manera que para el cuarto trimestre del 2017 el 56,96% de abonados correspondían a conexiones a

través de par de cobre, el 19,58% correspondían a conexiones a través de cable coaxial y el 14,74% correspondían a conexiones mediante fibra óptica [30].

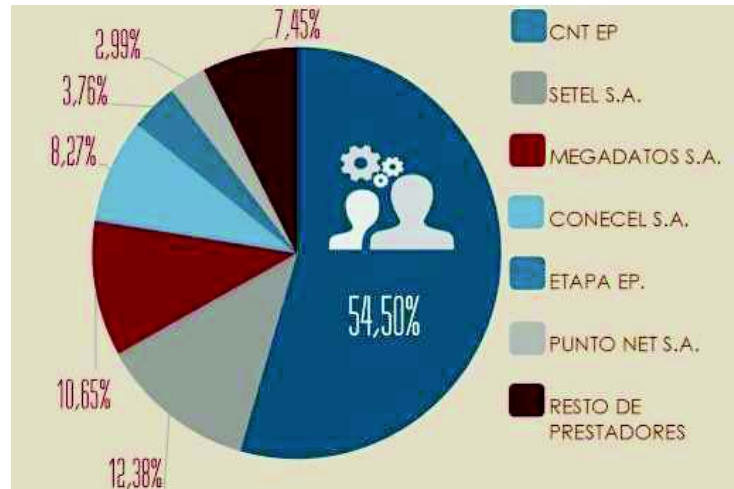


Figura 1.27. Principales Proveedores de Servicios de Internet Fijo en Ecuador [30]

En las figuras 1.28, 1.29 y 1.30 se observan las estadísticas del número de conexiones de Internet Fijo registradas en el 2017 en las principales provincias del Ecuador para los tres tipos de tecnologías de última milla cableadas detalladas en este capítulo.

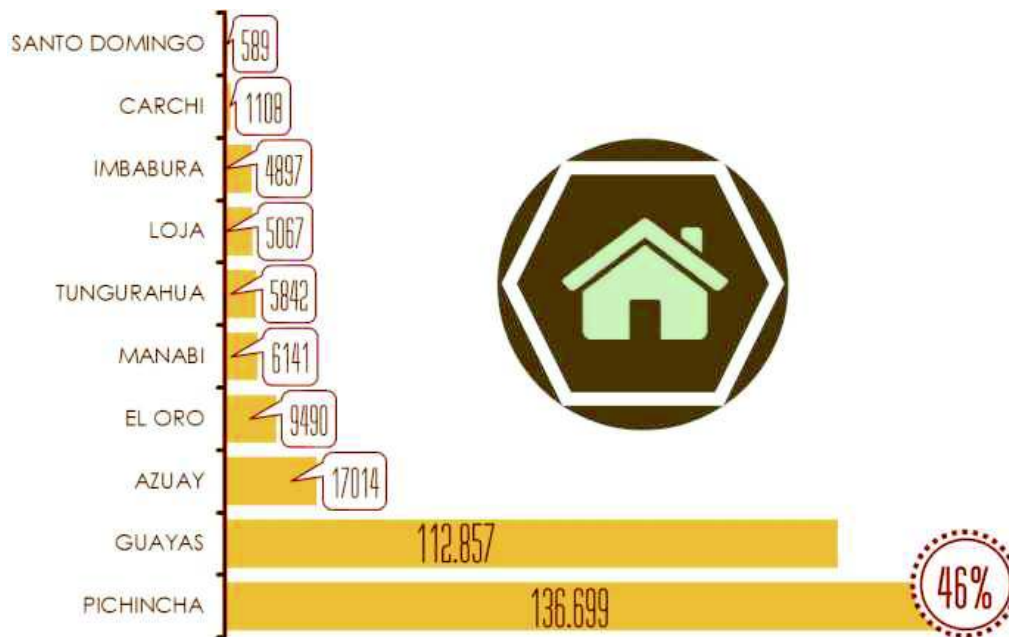


Figura 1.28. Conexiones a Internet Fijo por medio de Cable Coaxial. [31]

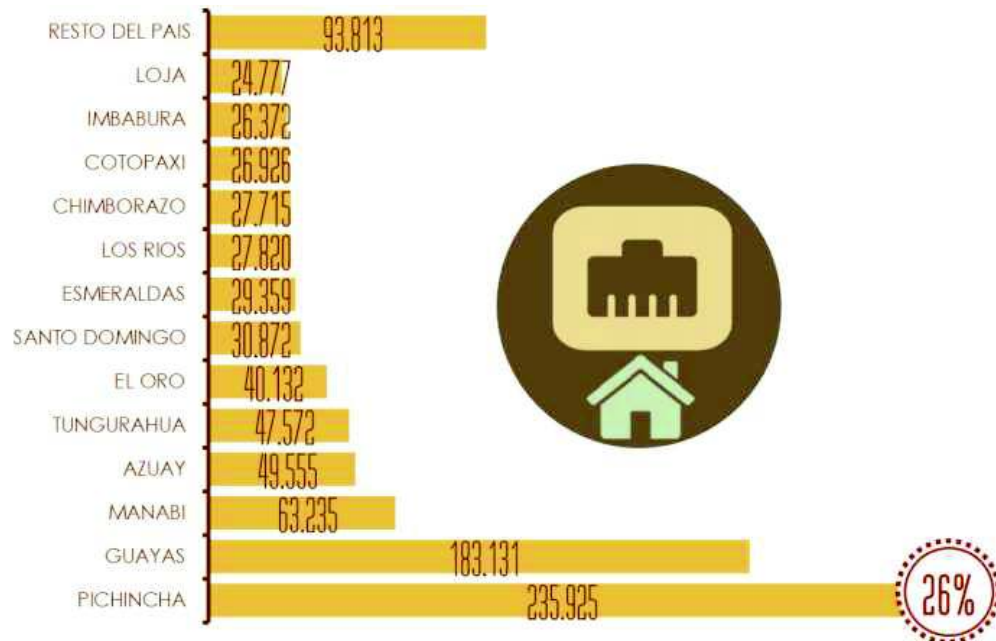


Figura 1.29. Conexiones a Internet Fijo por medio de Par de Cobre. [31]

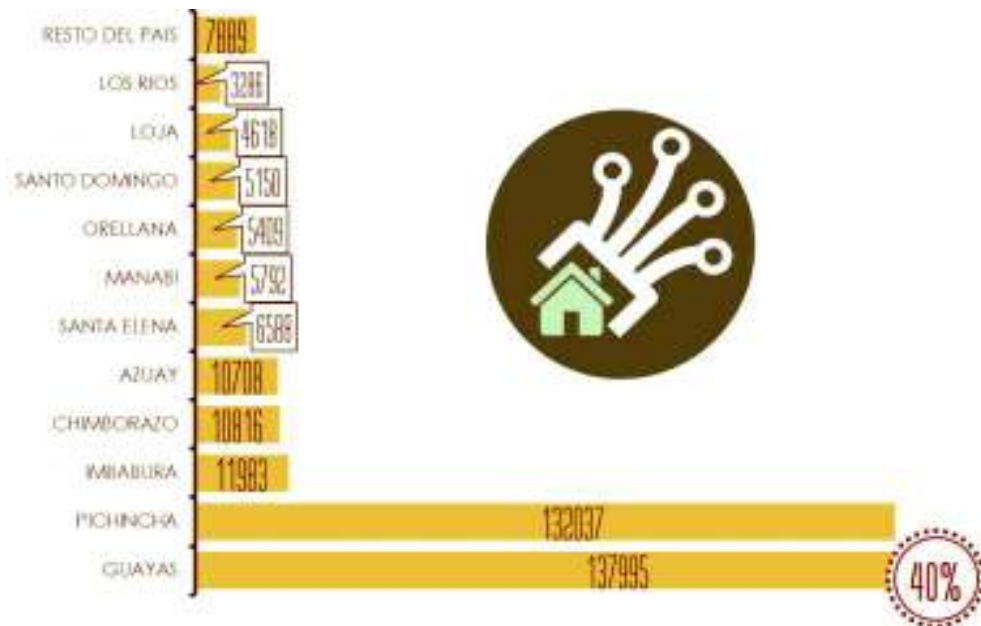


Figura 1.30. Conexiones a Internet Fijo por medio de Fibra Óptica. [31]

Las estadísticas presentadas se han determinado teniendo en cuenta que en Ecuador se define como banda ancha al servicio entregado a un usuario mediante una “velocidad de transmisión de bajada (proveedor hacia usuario) mínima igual o superior a 1024 Kbps, en conexión permanente, que permita el suministro combinado de servicios de transmisión de voz, datos y video de manera simultánea” [32].

CAPÍTULO 2

ESTUDIO DE LAS XPON CONVENCIONALES Y LR-PON

En este capítulo se profundizará en los aspectos técnicos relacionados a cada estándar PON definido hasta la actualidad y en especial se presentará información relevante obtenida a partir de los estudios realizados acerca de las LR-PON, en cada caso se indicará el tipo de arquitectura utilizada, la estructura de las tramas, los servicios ofrecidos, entre otros aspectos específicos de dichos estándares.

La finalidad de este capítulo es conocer las características que permiten el adecuado funcionamiento de cada tecnología presentada en este trabajo y que evidencien la diferencia existente entre cada una de ellas.

2.1 INTRODUCCIÓN

Debido a las ventajas de la fibra óptica y considerando la rapidez con la que se desarrollaban los servicios de Telecomunicaciones, las redes de fibra óptica se presentaron como una solución atractiva para suplir las nuevas necesidades tecnológicas.

Sin embargo, desde el punto de vista económico resultaba costoso tender fibra para conectar a cada usuario hasta la CO, por lo cual, con el propósito de solucionar este inconveniente se creó la organización destinada a la normalización de redes de acceso, FSAN (*Full-Service Access Network*) sobre redes ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), la cual junto a otros organismos como el IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), IEC (*International Electrotechnical Commission*) y la UIT, han desarrollado recomendaciones y normas para estandarizar las especificaciones de diseño y los dispositivos adecuados para redes de acceso mediante fibra óptica, creando así la posibilidad de disminuir los costos que estas implementaciones representan e incentivando el mayor despliegue de redes con fibra óptica [18].

Inicialmente se consideraron dos configuraciones de redes basadas en fibra óptica, las AON y las PON; las AON no tuvieron gran acogida debido a los mayores costos

que implica una configuración de este tipo, en cambio las PON al involucrar menor cantidad de equipos para ofrecer servicio a un gran número de usuarios fue más aceptada. A continuación, se explica lo mencionado en base a un escenario general de una AON y una PON.

Como se muestra en la figura 2.1, en una AON cada cliente tiene un puerto dedicado en el nodo de acceso, de esta manera, si es necesario dividir una línea de fibra para varias conexiones adicionales se debería incluir otro equipo activo adicional, lo cual, finalmente se traduce en un incremento en el costo del despliegue.

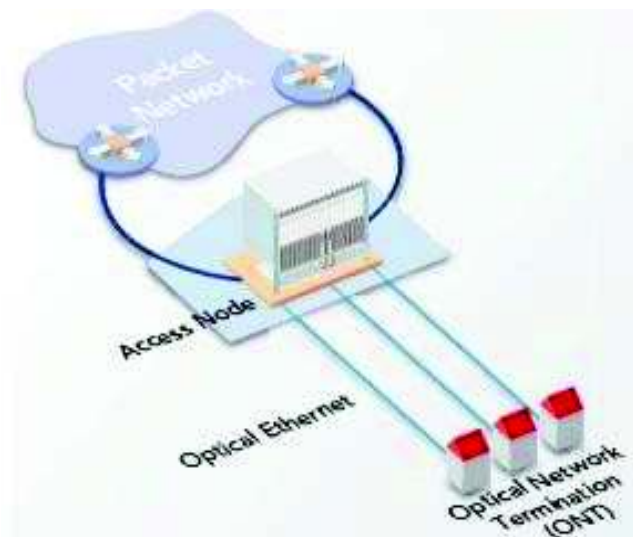


Figura 2.1. Topología general de una AON. [33]

Por otra parte, en la figura 2.2 se observa que en una PON, un mismo puerto del OLT es suficiente para dar servicio a múltiples abonados, únicamente con la instalación de un *splitter* óptico pasivo, puesto que la utilización del *splitter* permite que el consumo de energía sea bastante bajo y que no sea necesario fuentes de alimentación externas como en el caso de una AON, lo cual abarata los costos de mantenimiento.

En otras palabras, las opciones de implementación de redes PON son una opción bastante conveniente y permiten disminuir costos en comparación a la tecnología AON. Por lo tanto, existe mayor aceptación al despliegue de redes PON, permitiendo reemplazar progresivamente lo usualmente implementado en el segmento de última milla, como son las líneas de abonados digitales o cable coaxial,

que presentan limitaciones en cuanto a ancho de banda y alcance.

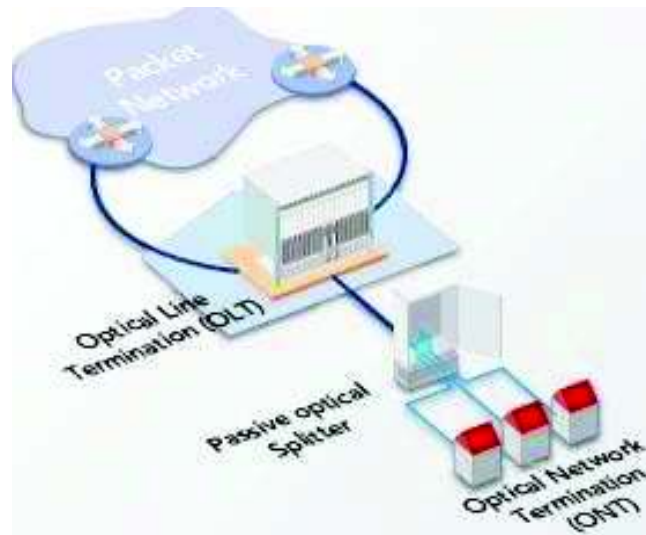


Figura 2.2. Topología general de una PON. [33]

2.2 ESTÁNDARES PON IMPLEMENTADOS EN LA ACTUALIDAD

El interés por el despliegue de redes de fibra óptica para transportar servicios de banda ancha surgió a finales de los 90, a causa del reto tecnológico que afrontaban los operadores de brindar mayores y mejores servicios a sus usuarios, y gracias a la disminución de los costos de la fibra óptica.

De esta manera, en 1998 se define el primer estándar para las redes PON, desarrollado por el comité FSAN, conocido como APON. Este estándar fue adoptado por la UIT convirtiéndose en la recomendación UIT-T (Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sección de Telecomunicaciones) G.983.1 [34].

APON utiliza la tecnología ATM¹⁷ sobre una red óptica pasiva, transmite y recibe tramas de celdas ATM a una velocidad simétrica de 155,52 Mbps, esta capacidad puede ser repartida con el uso de *splitters* ópticos entre un máximo de 32 ONT [35]. A pesar de presentar limitaciones de velocidad para ofrecer nuevos servicios como: streaming de video en HD, televisión digital, video de vigilancia múltiple en tiempo real, entre otros, APON define robustas “características de operación,

¹⁷ ATM es una tecnología desarrollada para permitir la integración de múltiples servicios en una única red, se basa en el transporte de celdas de tamaño fijo de 53 bytes (5 bytes de cabecera y 48 bytes de datos).

administración y mantenimiento de la red”¹⁸.

Años más tarde, el comité FSAN desarrolló las especificaciones para BPON, el cual apareció como una mejora al estándar APON. Inicialmente, ofrecía una tasa de transmisión de 155,52 Mbps en canal simétrico, tiempo después se modificó para soportar 622 Mbps de manera simétrica y para canales asimétricos se ofrecía 622 Mbps en *downstream* y 155 Mbps en *upstream* [36].

Este estándar fue definido primero en la revisión G.983.1 (revisión original de esta tecnología) al igual que APON, luego, se especificó la interfaz de control y gestión de terminales en la revisión G.983.2, además, se incrementó la capacidad de servicio mediante asignación de longitudes de onda en la revisión G.983.3, después, se introdujo BPON con asignación dinámica de ancho de banda para aumentar la capacidad de servicio en la revisión G.983.4 y finalmente en 2002 se introdujo una mayor capacidad a estos sistemas en la revisión G.983.5, permitiendo que BPON ofrezca hasta 1,2 Gbps de bajada y 622 Mbps de subida [37].

Al igual que APON, BPON es un estándar que actualmente ya no se utiliza en el despliegue de redes con fibra óptica, sin embargo, se los menciona brevemente con la intención de conocer la evolución histórica de las PON.

En Ecuador, ninguna de las tecnologías más avanzadas o las conocidas como “PON de Próxima Generación” se encuentran disponibles, a pesar de ello, el interés en la fibra óptica está aumentando significativamente en los últimos años. Es así que, actualmente en el país las tecnologías PON mayormente implementadas son EPON y GPON. A continuación, se presenta la información necesaria para conocer las características técnicas más relevantes de estos estándares.

2.2.1 EPON

El estándar 802.3ah fue aprobado en 2004, el cual, fue desarrollado por el grupo de estudio EFM (*Ethernet in the First Mile*) del IEEE con el objetivo de habilitar

¹⁸ En las tramas de APON se introducen celdas PLOAM (celdas de capa física de operación, administración y mantenimiento), por medio de las cuales la OLT envía mensajes de concesión para determinar los slots TDMA que son asignados para cada ONT. Estas celdas son celdas de concesión, sincronización, control de errores, seguridad, determinación de distancia y mantenimiento.

Ethernet sobre redes de acceso con fibra óptica a una velocidad de transmisión simétrica de 1 Gbps y un alcance máximo de 20 km desde el OLT (ubicado en la central) hasta el ONT (ubicado en el usuario).

A diferencia de APON y BPON, esta tecnología se basa en el transporte de tráfico Ethernet y no de celdas ATM, además, una ventaja que posee frente a los estándares anteriormente mencionados es que EPON garantiza QoS.

Este estándar fue rápidamente adoptado en Japón debido a sus múltiples ventajas en cuanto a escalabilidad, simplicidad y la capacidad de proporcionar acceso a un servicio completo [38].

2.2.1.1 Arquitectura

El estándar IEEE 802.3 define los parámetros de la capa MAC (*Media Access Control*) y las especificaciones de la capa física, en particular, en la figura 2.3 se puede observar la comparación del modelo de capas de EPON con el modelo OSI.

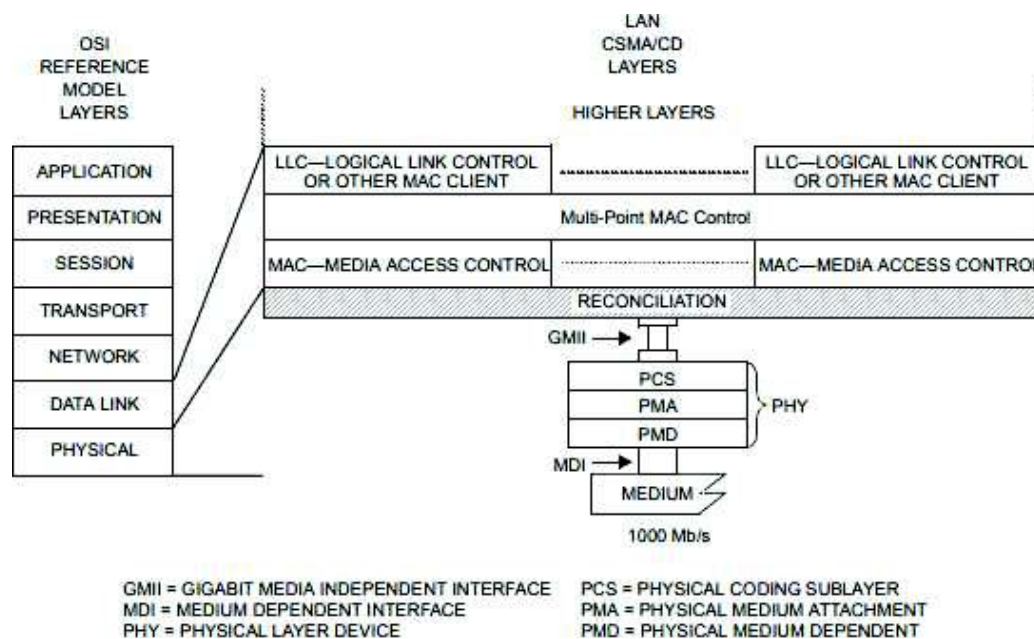


Figura 2.3. Comparación del modelo de capas de EPON y el modelo de referencia OSI [39].

Además, de acuerdo al estándar IEEE 802.3ah, en el enlace descendente se utiliza una topología punto-multipunto y en el enlace ascendente se utiliza una topología

punto-punto, además, se aceptan dos tipos de ODN: tipo A (de 5dB hasta 20dB de pérdidas del canal) y tipo B (de 10dB hasta 24dB de pérdidas del canal) con una relación de división de 1:16 [40].

El utilizar *Ethernet* como tecnología de última milla permite evitar la complejidad en la conversión de protocolos requerida en ATM, pues Ethernet se basa completamente en IP, lo que lo convierte en un protocolo universal y uno de los protocolos de redes LAN más extendidos en todo el mundo.

2.2.1.1.1 Subcapa Dependiente del Medio Físico (PMD)

Tabla 2.1. Especificaciones de la Capa Dependiente del Medio Físico para EPON. [39]

Parámetro	1000BASE-PX10-U	1000BASE-PX10-D	1000BASE-PX20-U	1000BASE-PX20-D
Tipo de Fibra óptica	El estándar indica que se utilizará fibra óptica monomodo de acuerdo a la recomendación UIT-T G.652.			
Longitud de onda trabajo ¹⁹ (nm).	1310	1490	1310	1490
Máximo nivel de pérdida de inserción en el canal ²⁰ (a la longitud de onda nominal).	20 dB	19.5 dB	24 dB	23.5 dB
Mínimo nivel de pérdida de inserción en el canal ²¹ (a la longitud de onda nominal).	5 dB		10 dB	
Velocidad de transmisión	1 Gbps			
Alcance máximo de transmisión entre el OLT y el ONT.	10 km		20 km	
Relación de división del <i>splitter</i> .	1:16 (1:32 con FEC)			
Código de línea ²²	8B/10B			

Las especificaciones para el estándar EPON indican que existen dos tipos de

¹⁹ Se refiere al valor de longitud de onda donde existe la máxima intensidad de luz.

²⁰ Este valor indica la máxima atenuación de la fibra óptica permitida entre el OLT y el ONT a la longitud de onda nominal, incluye pérdida de conectores, empalmes y otros componentes pasivos como *splitters*.

²¹ Este valor indica la mínima atenuación entre el transmisor y receptor, asumida para el cálculo de presupuesto de potencia de los enlaces PX10 y PX20. Este valor es necesario para realizar pruebas de PMD.

²² En este código de línea cada byte de 8 bits se codifica en la fibra como 10 bits, lo que se busca con la codificación es asegurar la sincronización entre el receptor y el emisor.

subcapas PMD, las cuales se diferencian por el alcance proporcionado, éstos son: 1000BASE-PX10 y 1000BASE-PX20.

- **1000BASE-PX10:** es la especificación de la capa física de acuerdo al estándar IEEE 802.3 para un enlace punto-multipunto a 1000 Mbps sobre fibra óptica monomodo con un alcance de 10km.
- **1000BASE-PX20:** es la especificación de la capa física de acuerdo al estándar IEEE 802.3 para un enlace punto-multipunto a 1000 Mbps sobre fibra óptica monomodo con un alcance de 20km.

En la tabla 2.1 se resume los parámetros más significativos para 1000BASE-PX10 y 1000BASE-PX20.

2.2.1.1.2 Subcapa PMA

Esta subcapa se encarga de la recuperación del reloj, alineamiento de fase y conversión de los *streams* de bits en una comunicación paralela en el enlace de subida y viceversa en el enlace de bajada, en particular, este proceso se conoce como CDR (*Clock and Data Recovery*).

Además, en esta subcapa se especifica la utilización de codificación 8B/10B que permite una salida de bits suficiente para evitar la necesidad de utilizar relojes demasiado precisos.

2.2.1.1.3 Subcapa PCS

Esta subcapa se encarga de solucionar un problema existente en las EPON, conocido como *near-far*, el cual, provoca que el OLT reconozca erróneamente un bit recibido y es causado por una configuración de “comportamiento fijo”²³ del OLT o por el ruido generado por las fuentes de láser.

Para evitar este problema, los ONT deben tener un comportamiento de apagado entre *timeslots*, por lo tanto, la subcapa PCS se encarga de apagar los láseres en los tiempos correctos en función de la información recibida de capas superiores.

²³ El OLT puede configurarse de manera fija para que reciba una señal fuerte de un ONT cercano, en este caso debido al problema de “*near-far*”, el OLT podría leer un 1 en lugar de un 0 transmitido por una señal débil de un ONT lejano.

Además, esta subcapa también se encarga de la corrección de errores, que es opcional en EPON, mediante códigos de bloque Reed Solomon.

2.2.1.1.4 Subcapa MAC

Para el control de acceso, el estándar IEEE 802.3ah desarrolló el protocolo MPCP (*Multi-Point Control Protocol*) perteneciente al plano de control de la subcapa MAC (*Media Access Control*).

MPCP básicamente se encarga de tres procesos muy importantes en EPON para los cuales se utilizan tres mensajes de control: *GATE*, *REGISTER* y *REPORT*.

- **Proceso de Auto-Descubrimiento de un ONT:** en este proceso un ONT es descubierto y registrado con la red después de su encendido. Durante este proceso se intercambia el tiempo de sincronización para que el OLT pueda almacenar el reloj del ONT e identificar los niveles de potencia de cada ONT.

El proceso es el siguiente: el OLT envía periódicamente en forma de *broadcast* tramas *GATE* con el objetivo de realizar una invitación a los ONT que quieran registrarse en la EPON, se reserva un intervalo de tiempo en el cual el ONT debe responder con un mensaje *REGISTER_REQUEST* tras esperar un retardo randómico (este retardo se coloca para evitar colisiones de los mensajes *REGISTER_REQUEST* de varias ONT intentando registrarse al mismo tiempo). Al recibir el OLT esta última trama, asigna al ONT un identificador lógico (LLID) y envía nuevamente una trama *GATE* para iniciar el proceso de *ranging*.

- **Proceso de *Ranging*:** este proceso sirve para medir el tiempo de ida y vuelta (RTT, *Round Trip Time*) que tarda una trama sin considerar el tiempo de procesamiento en un ONT.

El proceso es el siguiente y se observa en la figura 2.4: el OLT envía un mensaje *GATE* con una marca de tiempo T1, el ONT recibe el mensaje en un tiempo T2 y resetea su reloj a T1, después del retardo por procesamiento, el ONT envía un mensaje *REPORT* en un tiempo T3 con una marca de tiempo T4, el OLT recibe este mensaje en un tiempo T5.

En la figura 2.4, el valor de RTT corresponde a la parte sombreada y se obtiene a partir del resultado de la ecuación (2.5). De la ecuación (2.1) a la ecuación (2.4) se indica paso a paso el cálculo para la obtención de RTT.

$$RTT = (T5 - T1) - (T3 - T2) \quad (2.1)$$

La marca de tiempo T4 se calcula como se indica en la ecuación (2.2) y corresponde al tiempo que tarda la trama *GATE* desde que sale del OLT hasta que llega al ONU, más el tiempo de procesamiento de la trama.

$$T4 = T3 - T2 + T1 \quad (2.2)$$

$$T3 - T2 = T4 - T1 \quad (2.3)$$

La ecuación (2.4) se obtiene a partir del reemplazo de la ecuación (2.3) en la ecuación (2.1).

$$RTT = T5 - T1 - (T4 - T1) \quad (2.4)$$

$$RTT = T5 - T4 \quad (2.5)$$

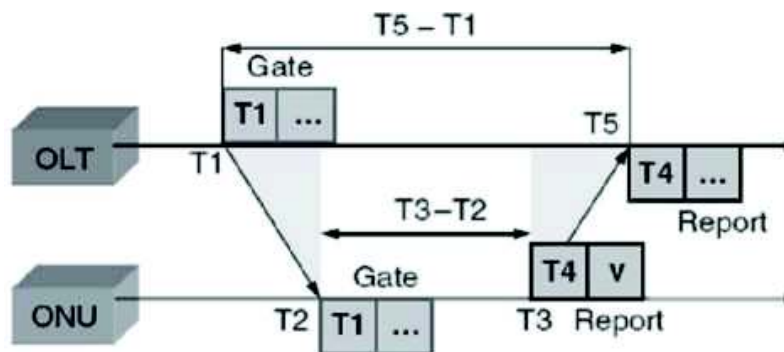


Figura 2.4. Proceso de Ranging [41]

- **Proceso de Asignación de Ancho de Banda:** de acuerdo a los resultados obtenidos durante el proceso de *ranging*, el OLT indicará a cada ONU el tiempo de inicio para su transmisión y la longitud de la ventana de tiempo, éste valor es decidido por los mecanismos de asignación de ancho de banda. En EPON se puede utilizar asignación estática de ancho de banda o FBA (*Fixed Bandwidth Assignment*), mediante el cual todos los ONU tienen igual longitud de ventana de tiempo para transmitir más un intervalo de guarda.

Este modelo no es eficiente cuando algún ONT no tiene datos para transmitir. Otro mecanismo utilizado es DBA (*Distribution Bandwidth Allocation*), mediante el cual los *timeslot* se asignan de acuerdo al volumen de datos que el ONT necesite transmitir, por lo tanto, este mecanismo permite mayor utilización del canal.

En otras palabras, EPON emplea un mecanismo genérico de sondeo/demanda/concesión, es decir, que el OLT sondea a un ONT que demanda ancho de banda, luego, el ONT responde a dichas solicitudes, y finalmente, el OLT concede ancho de banda a los ONT.

2.2.1.2 Funcionamiento

2.2.1.2.1 Canal descendente

En el canal descendente, el OLT transmite tramas de longitud variable de hasta 1526 bytes en forma de *broadcast*, donde, cada trama contiene una cabecera de 8 bytes que indica el ONT de destino específico hacia el cual se debe dirigir dicha trama, por otra parte, el *splitter* óptico es el encargado de dividir la señal hacia cada ONT conectada y mediante la dirección MAC cada ONT podrá determinar cuáles son las tramas dirigidas hacia ésta descartando el resto.

2.2.1.2.2 Canal ascendente

Para la transmisión en sentido ascendente, cada ONT envía sus tramas al OLT simulando una conexión punto a punto, en este canal las tramas son enviadas por todos los ONT conectados, lo cual, puede ocasionar que colisionen. Para resolver este problema, se requieren mecanismos de control de acceso al medio, los cuales, se basan en TDMA estableciendo un intervalo de tiempo o *timeslot* específico en el que cada ONT puede transmitir. De hecho, cada *timeslot* se determina de acuerdo a la distancia que existe entre el ONT y el OLT (proceso de *ranging*).

2.2.1.3 Trama

En la figura 2.5 se muestra el formato de una trama Ethernet, la cual puede variar su longitud de 72 a 1526 bytes y contiene 8 campos funcionales.

Una trama EPON se diferencia de una Ethernet porque cambia el preámbulo para introducir 4 campos necesarios para identificar el ONT al que le corresponde cada trama. Estos campos son:

- **SPD (*Start of Packet Delimiter*)**: es el delimitador de inicio del paquete, contiene la información de reloj para sincronización.
- **Reserved**: este campo se reserva para usos futuros.
- **LLID (*Logical Link Identifier*)**: etiqueta de 16 bits de longitud para identificar cada ONT.
- **FCS (*Frame Check Sequence*)**: contiene un valor de verificación CRC (Control de Redundancia Cíclica) que permite realizar la detección de errores desde el campo SPD hasta LLID.

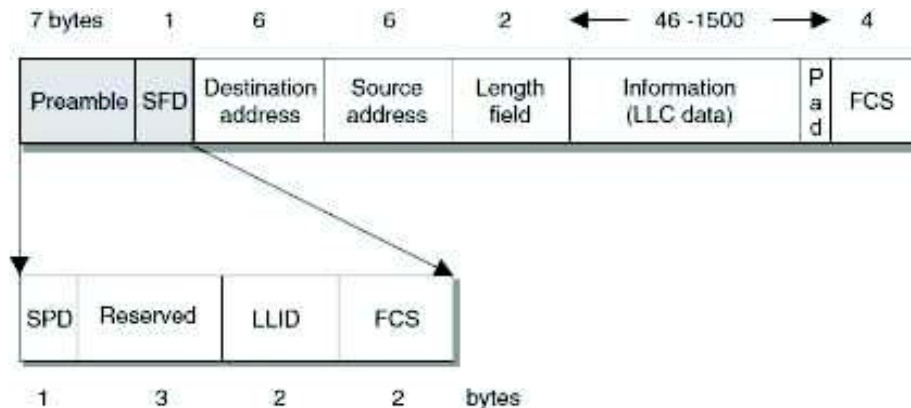


Figura 2.5. Formato de una trama EPON [42].

2.2.1.4 Calidad de servicio QoS

El principal desafío de EPON es mejorar las capacidades de Ethernet para poder soportar nuevas aplicaciones como VoIP, videoconferencia, IPTV, servicios de video asistencia o vídeo bajo demanda, ya que son servicios que no sólo demandan un mayor ancho de banda sino también altos requerimientos de técnicas de QoS.

El estándar EPON implementa varios métodos para enfrentar este problema, tales como priorización de tráfico mediante el estándar 802.1p²⁴, solicitud y asignación

²⁴ IEEE 802.1p es un estándar que proporciona priorización de tráfico y filtrado *multicast* dinámico. Esencialmente, proporciona un mecanismo para implementar Calidad de Servicio (QoS) a nivel de MAC (*Media Access Control*).

de ancho de banda, autodescubrimiento de nuevos elementos en el sistema mediante el protocolo MPCP, etiquetamiento de VLAN 802.1q y el modo *DiffServ* o Servicios Diferenciados tanto para el enlace ascendente como para el descendente que permite clasificar tráfico de datos. “EPON proporciona hasta ocho colas de prioridad distintas en cada ONU” [35].

2.2.1.5 Servicios

Mediante la tecnología EPON se puede ofrecer servicios de voz, transporte de datos en tiempo real, IP (voz y video), CATV, POTS, etc.

2.2.2 10G-EPON

10G-EPON se encuentra estandarizado en IEEE 802.3av aprobado en septiembre de 2009, el cual, se desarrolló con el fin de incrementar la velocidad de transmisión proporcionada por el estándar original EPON de 1Gbps a 10Gbps. De tal manera que tiene muchas características en común con EPON, para permitir que estos dos estándares coexistan se utiliza una combinación de CWDM²⁵ (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*) y TDM.²⁶ [43].

Por otra parte, este estándar soporta dos tipos de configuraciones: simétrica, la cual, opera a 10Gbps en ambas direcciones y asimétrica que opera a 10Gbps en dirección descendente y 1Gbps en dirección ascendente. Además, el modo de transmisión es bidireccional sobre una sola fibra óptica, por lo cual, se utiliza WDM para separar las señales del enlace de subida y del enlace de bajada.

Con el fin de que EPON y 10G-EPON puedan coexistir, el espectro de longitudes de onda se ocupa tal y como se muestra en la figura 2.6. Por lo tanto, en la dirección de bajada los canales de 1Gbps y 10Gbps son separados en el dominio de longitud de onda, es decir que EPON (1Gbps) utiliza el rango de longitudes de onda de 1480 a 1500nm y 10G-EPON (10Gbps) usa el rango de 1575 a 1580nm.

²⁵ CWDM o multiplexación por división aproximada de longitud de onda, es una técnica de multiplexación que permite transmitir señales a través de la fibra óptica permitiendo hasta 18 longitudes de onda espaciadas 20nm en un intervalo de 1270 a 1610nm. Por lo general soporta hasta 2,5Gbps y alcance de hasta 80km.

²⁶

En la dirección de subida, las bandas de 1Gbps y 10Gbps se superponen, pero mediante la tecnología TDM utilizada por el OLT se evita la interferencia entre los dos sistemas permitiendo que el “OLT utilice un mismo receptor óptico para todas las señales de 1Gbps” [44], por lo tanto, la banda de 1Gbps se extiende de 1260 a 1360nm y para 10Gbps utiliza una banda de 1260 a 1280nm [45].

Al igual que EPON, esta tecnología reserva el rango de longitudes de onda de 1550 a 1560nm para transmisión de video.

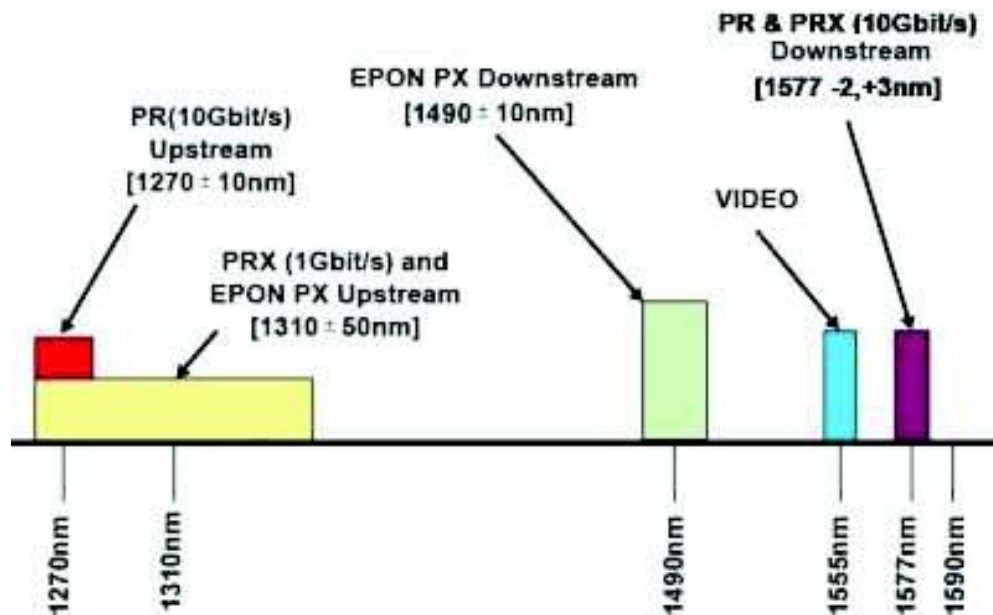


Figura 2.6. Longitudes de onda para EPON y 10G-EPON [44]

También, 10G-EPON define tres tipos de márgenes de potencia para sus interfaces ópticas, las cuales, son conocidas como PR y PRX.

En particular, PRX se utiliza en sistemas asimétricos y PR en sistemas simétricos [45].

Adicionalmente, cada margen de potencia se relaciona a un valor numérico que representa el nivel de potencia, es decir 10 representa un margen de potencia bajo, 20 representa un margen de potencia medio y 30 representa un margen de potencia alto. Entonces, los tres tipos de márgenes definidos en este estándar son: PR10/PRX10, PR20/PRX20 y PR30/PRX30, los mismos que se indican en la tabla 2.2, a continuación:

Tabla 2.2. Características de los Márgenes de Potencia en 10G-EPON [45].

Márgenes de Potencia	Margen de Potencia Bajo		Margen de Potencia Medio		Margen de Potencia Alto	
	PRX10	PR10	PRX20	PR20	PRX30	PR30
Pérdidas de inserción máximas del canal óptico	20 dB		24 dB		29 dB	
Pérdidas de inserción mínimas del canal óptico	5 dB		10 dB		15 dB	

Este estándar permite conectar 16 ONT al igual que EPON, con una distancia máxima de 20 km y adicionalmente, una ventaja que ofrece es que se puede trabajar sobre la misma fibra utilizada en EPON. De tal manera, que para realizar la migración de EPON a 10G-EPON únicamente es necesario mejorar las características del OLT y posteriormente cambiar el ONT de ser necesario.

En lo que se refiere al formato de la señal transmitida, el estándar IEEE 802.3av indica que en el enlace descendente se envían tramas Ethernet en forma de *broadcast* que se codifican con un formato 64B/66B; y, en el enlace ascendente se utiliza TDMA para repartir el ancho de banda del canal entre todos los ONT, donde la codificación de línea utilizada para 1Gbps es 8B/10B y para 10Gbps es 64B/66B.

Además, el OLT realiza la asignación del inicio de la transmisión para cada ONT y reserva un intervalo de guarda para asegurar que las señales de diferentes ONT no se superpongan y disminuir la cantidad de bits de identificación de cada uno.

Por lo tanto, para que el OLT esté preparado para recibir información desde los ONT es necesario que el receptor se sincronice, lo cual es posible gracias a los patrones ubicados en el inicio de la ráfaga de subida, como se observa en la figura 2.7. Seguido al patrón delimitador de ráfaga se transmiten dos bloques de caracteres inactivos para permitir al OLT sincronizar su decodificador y prepararse para el inicio de la recepción de datos del cliente.

Algunos de los servicios de nueva generación que permite soportar 10G-EPON son IPTV, IPTV bajo demanda, Televisión en alta definición (HDTV), videoconferencias, etc.

2.2.3 GPON

GPON se basa en el estándar BPON y se asemeja en gran parte a EPON, en particular, los estudios sobre este estándar iniciaron en 2002 y en el año 2003 se dieron a conocer las primeras recomendaciones, por lo tanto, GPON se define en el conjunto de recomendaciones UIT-T G.984.x [47].

Su principal objetivo es ofrecer una capacidad de transmisión más alta que los estándares predecesores, en este sentido, GPON permite desplegar arquitecturas simétricas y asimétricas de hasta 2.5 Gbps utilizando combinaciones de velocidades de transmisión, según como se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Combinaciones de velocidades en GPON [48].

Upstream	155 Mbps	622 Mbps	1.2 Gbps	155 Mbps	622 Mbps	1.2 Gbps	2.4 Gbps
Downstream	1.2 Gbps	1.2 Gbps	1.2 Gbps	2.4 Gbps	2.4 Gbps	2.4 Gbps	2.4 Gbps

Entre otras funcionalidades incorporadas, este estándar presenta capacidades OAM avanzadas (*Operation Administration and Maintenance*), monitoreo de la tasa de error, alarmas y eventos, proceso de descubrimiento y *ranging* automático [40].

Por lo tanto, GPON no ofrece únicamente aumento en la capacidad de transmisión frente a los estándares APON y BPON sino que también presenta mayor eficiencia y permite a los operadores continuar brindando servicios tradicionales como voz y líneas alquiladas, sin reemplazar los equipos en el lado del abonado mediante su Método de Encapsulamiento nativo GEM (*GPON Encapsulation Method*).

2.2.3.1 Arquitectura

En la figura 2.8 se muestra una configuración referencial para GPON descrita en el estándar UIT-T G.984.1.

- **UNI (*User Network Interface*):** es la interfaz o el punto de demarcación entre el entorno del cliente y la red del proveedor.
- **AF (*Adaptation Fuction*):** este bloque representa un dispositivo independiente o una función que puede estar incluida en el ONT, el cual, se encarga de cambiar la interfaz del ONT en una interfaz UNI o viceversa.

- **NE (Network Element):** este bloque representa un elemento de red adicional en la EPON que aprovecha las diferentes longitudes de onda del OLT y el ONT.
- **SNI (Service Node Interface):** es la interfaz que permite el acceso del cliente a través de la EPON hacia un nodo de servicio.

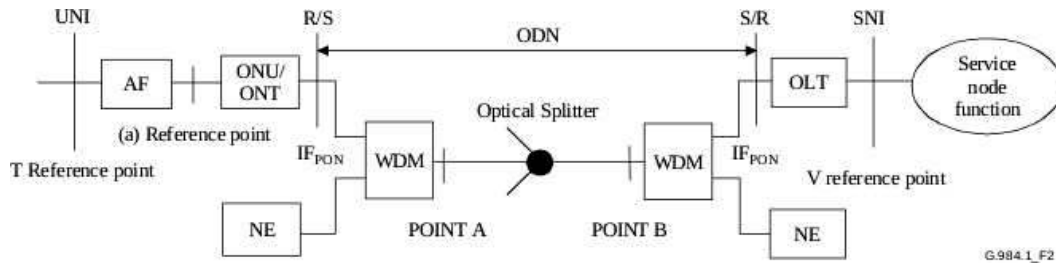


Figura 2.8. Arquitectura general para GPON [49].

2.2.3.1.1 Modelo de capas

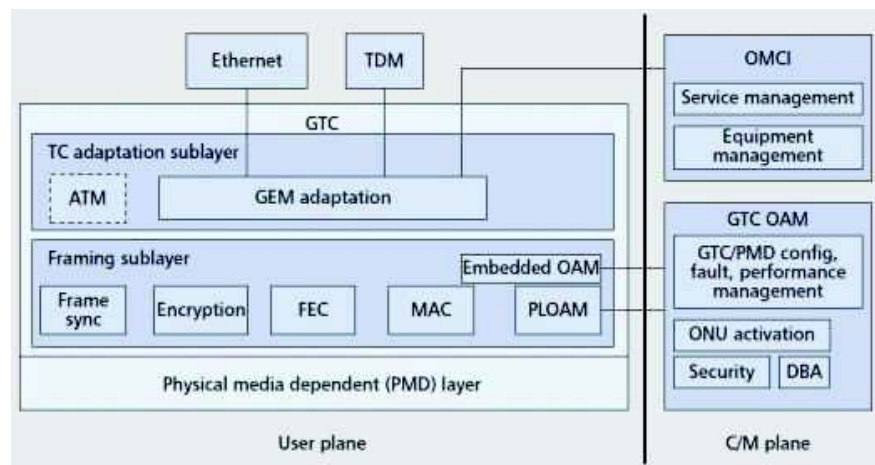


Figura 2.9. Modelo de capas de GPON [47].

La estructura de capas de una red GPON se compone de la capa Dependiente del Medio Físico o PDM y la capa de Convergencia de Transmisión o TC, la cual se subdivide en dos capas: Subcapa de Entramado y Subcapa de Adaptación, como se puede observar en el esquema de la figura 2.9.

Requerimientos de la Capa Dependiente del Medio Físico (PMD):

La Capa Dependiente del Medio Físico de GPON debe cumplir con los requerimientos resumidos en la Tabla 2.5, a continuación:

Tabla 2.5. Requisitos de la Capa Dependiente del Medio Físico para GPON [48].

Parámetro	Especificación	Observación
Fibra óptica	Fibra óptica monomodo descrita en la recomendación UIT-T G.652	El modo de transmisión es bidireccional cuando se utiliza la técnica de multiplexación por división de longitud de onda (WDM) en una sola fibra, o modo de transmisión unidireccional utilizando dos fibras.
Rango de atenuación en la ODN	La recomendación UIT-T G.982 define tres clases de atenuación: Clase A: 5 a 20 dB Clase B: 10 a 25 dB Clase C: 15 a 30 dB	Estos rangos de atenuación incluyen pérdidas ²⁷ en los empalmes, conectores, atenuadores ópticos, splitters u otro dispositivo óptico pasivo, más un margen relativo para cubrir futuras modificaciones como empalmes adicionales o alargamiento del cable, variaciones de calidad por factores ambientales y degradación de cualquier dispositivo óptico pasivo.
Longitud de onda de trabajo	Ascendente: 1260 a 1360 nm. Descendente: en sistemas de una sola fibra el intervalo de trabajo será de 1480 a 1500 nm y en sistemas de dos fibras será de 1260 a 1360 nm.	
Velocidad de transmisión	Existen 7 combinaciones de velocidades presentadas en la tabla 2.3.	
Alcance máximo de transmisión	Físico: 10 o 20 km Lógico ²⁸ : 60 km	El alcance físico en GPON depende de la velocidad que se utilice.
Relación de división del splitter	1:64	Escalable a 1:128
Código de línea	NRZ-L	Para enlace ascendente y descendente. El convenio utilizado para el nivel lógico es: <ul style="list-style-type: none"> - Nivel alto de emisión de luz para UNO binario. - Nivel bajo de emisión de luz para CERO binario.

²⁷ Las pérdidas son afectaciones en el enlace que produce la reducción de la potencia promedio que llega al receptor.

²⁸ El alcance lógico se define como la longitud máxima que se puede alcanzar en un sistema de transmisión determinado independientemente del presupuesto óptico, no está limitado por los parámetros de dispersión por modo de polarización (PMD, *polarization mode dispersion*) sino más bien por aspectos relacionados con la capa TC y la implementación.

Requerimientos de la Capa de Convergencia de Transmisión (GTC):

La Capa de Convergencia de Transmisión está definida en la recomendación UIT-T G.984.3 y se compone de un plano de control y administración (*C/M-plane*) y un plano de usuario (*U-plane*) para gestionar y llevar el tráfico de usuario.

También, la capa GTC se encarga de controlar el acceso al medio y realiza el *interleaving*²⁹ en el sentido ascendente de la información enviada desde múltiples ONT. Adicionalmente, esta capa se ocupa de la corrección de errores, el cifrado y la asignación de ancho de banda [50].

Por otra parte, la capa de Convergencia de Transmisión se compone de 2 subcapas que son la subcapa de entramado y la subcapa de adaptación, las cuales, se describen a continuación:

- Subcapa de entramado:

La subcapa de entramado se encarga de definir la estructura de la trama GTC, la cual, será diferente dependiendo del sentido de la transmisión, como se indica más adelante.

Por lo tanto, una de las funciones de esta subcapa es la creación de la cabecera de la trama GTC en el enlace de bajada o la decodificación de la misma en el enlace de subida.

Otra función que cumple es la de multiplexar las tramas GEM en el campo de carga útil de una trama GTC, en el enlace de bajada. Por otra parte, en el enlace de subida, se encarga de demultiplexar el campo de carga útil para transmitir las tramas GEM a las capas superiores.

Finalmente, esta subcapa también realiza enrutamiento interno de datos desde o hacia GEM basado en *Alloc-ID*³⁰.

²⁹ El *interleaving* es una técnica en la que se organiza la información de manera no contigua para protegerla frente a los errores de ráfaga.

³⁰ El *Alloc-ID* o *Allocation Identifier* es un número de 12 bits que el OLT asigna a una ONU para identificar una entidad de tráfico entrante receptora de asignaciones de ancho de banda ascendente dentro de esa ONU.

- **Subcapa de adaptación:**

Es la subcapa más alta de GTC, provee dos adaptadores de convergencia de transmisión, el adaptador a la interfaz GPON (GEM) y el adaptador a la interfaz OMCI³¹ (Interfaz de Gestión y Control de ONT).

Además, en la recomendación vigente UIT-T G.984.3 se define a GEM como el único esquema de transporte de datos en la capa GTC. Por lo tanto, GEM se desarrolló como un protocolo nativo de GPON para permitir el transporte de paquetes IP de longitud variable y proporcionar la posibilidad de soportar cualquier tipo de servicio independientemente del tipo de protocolo utilizado.

Por otra parte, la adaptación con el protocolo OMCI, hace posible que múltiples ONT sean controladas por un mismo OLT. Entonces, durante el arranque del ONT, el protocolo OMCI establece una conexión GEM entre el OLT y el ONT para llevar a cabo dicha función.

2.2.3.1.2 Jerarquía de multiplexación

La figura 2.10 ilustra la jerarquía de multiplexación GPON, sin embargo, para describir dicha jerarquía es necesario conocer previamente los siguientes conceptos:

- **GEM Port:** es un puerto virtual considerado la mínima unidad para transportar servicios entre el OLT y el ONT. Cada puerto GEM contiene una clase de tráfico distinta. La cabecera de una trama GEM contiene 5 bytes que indican la identificación del puerto GEM (*Port-ID*) y la longitud de la trama.
- **T-CONT:** es un contenedor de tráfico dentro de un ONT que representa un grupo de conexiones lógicas y se trata como una unidad para la asignación de ancho de banda en el enlace de subida, fijada por el OLT.

³¹ OMCI (*ONT Management and Control Interface*) es el protocolo estándar de GPON para controlar la ONT desde la OLT. Permite establecer y liberar conexiones en la ONT, gestionar los puertos físicos de la ONT, solicitar información de configuración y estadísticas de rendimiento, informar autónomamente al operador del sistema de eventos como cortes de fibra, etc.

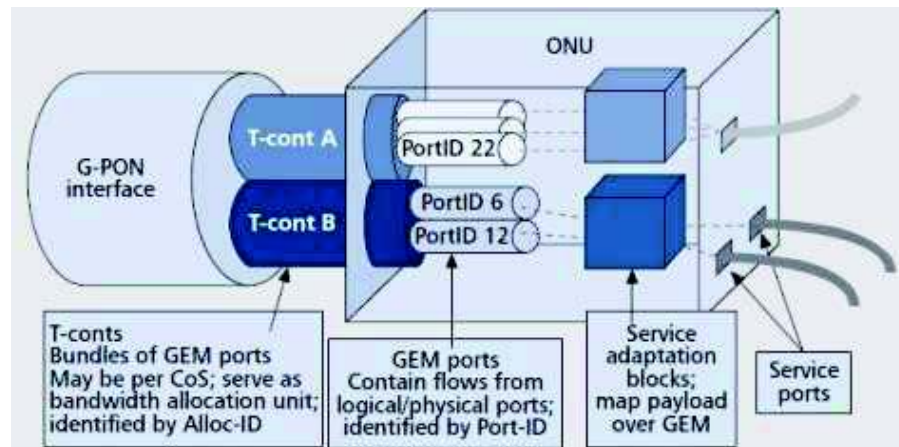


Figura 2.10. Jerarquía de multiplexación GPON [47].

El tráfico de un mismo cliente puede transmitirse en diferentes puertos GEM, y varios puertos GEM pueden pertenecer a un mismo T-CONT, además, una IFPON o interfaz GPON de un ONT puede contener múltiples T-CONTs.

2.2.3.2 Trama

Las tramas Ethernet son encapsuladas dentro de tramas GTC mediante el método de encapsulamiento de GPON (GEM), es decir, una trama Ethernet será encapsulada en una trama GEM y ésta a su vez se encapsulará en una trama GTC, esto se puede observar en la figura 2.11.

El campo de carga útil de la trama GEM está formado por una o varias tramas Ethernet y la cabecera de la trama GEM se conforma por cuatro campos que se describen a continuación:

- **PLI (Payload Length Indicator):** este campo indica la longitud en bytes del campo carga útil de la trama GEM.
- **Port-ID:** este campo es un número de 12 bits asignado por el OLT y se usa para proveer 4096 indicadores de tráfico que permiten la multiplexación de tráfico más eficiente.
- **PTI (Payload Type Indicator):** este campo sirve para indicar el tipo de contenido que se transmite en la carga útil de la trama y su tratamiento adecuado.
- **HEC (Header Error Checksum):** este campo provee corrección y detección de errores en la cabecera de la trama GEM.

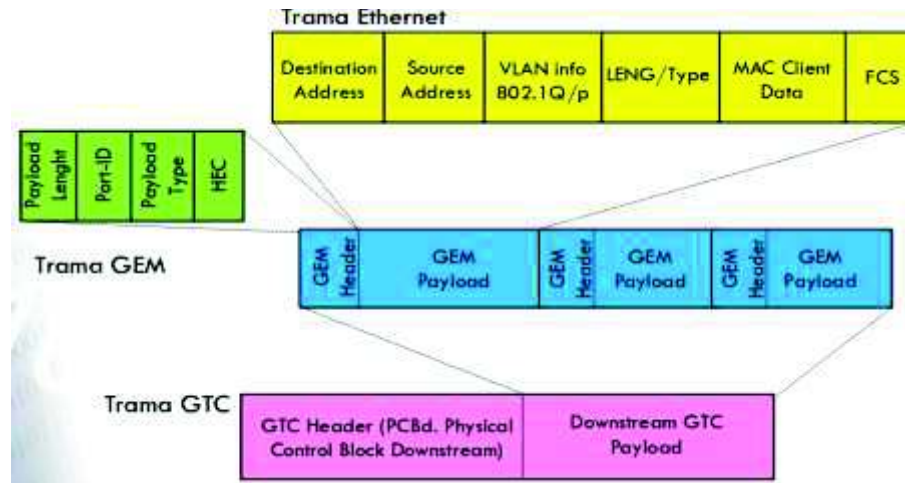


Figura 2.11. Formatos de las tramas GEM y GTC [51].

Por otra parte, una trama GTC tiene una duración de 125 μ s tanto para el enlace de subida como para el enlace de bajada, sin embargo, la estructura de la trama de subida es distinta a la trama de bajada.

Canal Descendente:

La trama GTC en el sentido descendente está compuesta por dos campos; la cabecera y la carga útil.

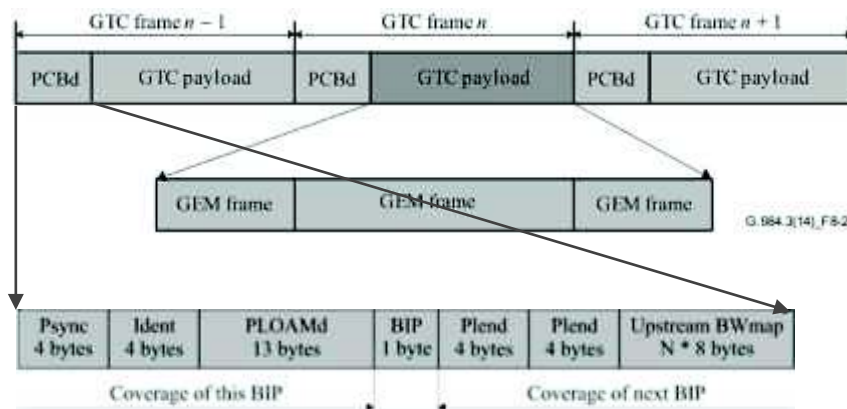


Figura 2.12. Estructura de la trama GTC en el sentido de bajada [52].

La cabecera es un bloque de control físico (PCBd, *Physical Control Block downstream*), donde, uno de los campos más importantes que lo conforman es PLOAMd, el cual, se encarga del mantenimiento, administración y operación de la capa física, además, la carga útil de la trama GTC, contiene varias tramas GEM, como se puede observar en la figura anterior 2.12.

Canal ascendente:

Esta trama está formada por una secuencia de múltiples ráfagas de transmisiones originadas por los ONT, como se observa en la figura 2.13, donde, cada ráfaga contiene un encabezado de la capa física, nombrado PLOu (*Physical Layer Overhead upstream*), y adicional a la carga útil del cliente puede incluir el campo DBRu (*Dynamic Bandwidth Report upstream*)³² y el campo PLOAMu. Además, cada trama GTC en este canal contiene un número arbitrario de ráfagas generadas por uno o más ONT, las cuales son organizadas de acuerdo al campo *BWMaps*³³.

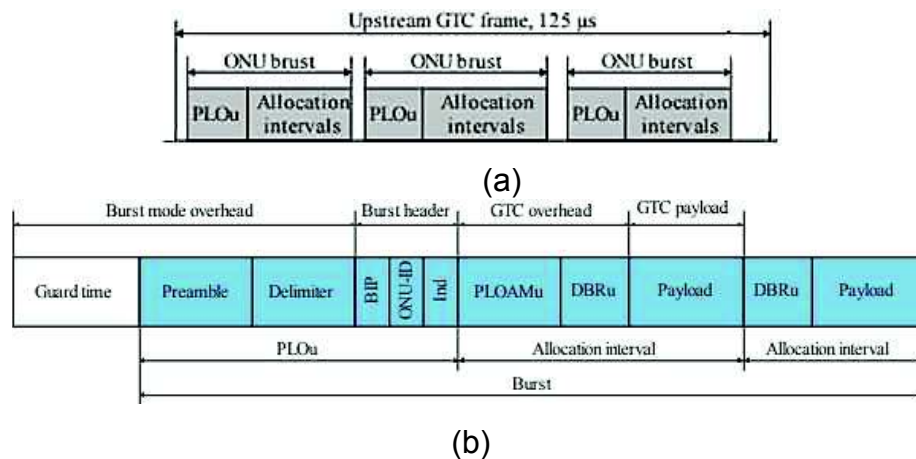


Figura 2.13 (a) Formato de una trama GTC en canal de subida. (b) Estructura de campos PLOu e intervalos de asignación [52].

2.2.3.3 Calidad de servicio QoS

Una especificación de servicio deberá ser asociado con cada flujo de tráfico mapeado a un Port-ID GEM específico, por lo tanto, la especificación de servicio es un conjunto de atributos que caracterizan el tipo de servicio, parámetros de flujo de tráfico y objetivos de QoS, la cual, típicamente incluye por lo menos una tasa de información comprometida (CIR, *Committed Information Rate*³⁴) y una tasa de información pico (PIR, *Peak Information Rate*³⁵).

³² Este campo se encarga de llevar un reporte del estado del buffer asociado a un Alloc-ID específico.

³³ BWmap o *Bandwidth map* es una matriz escalar de estructuras de 8 bytes. Cada estructura representa una asignación de ancho de banda única para un T-CONT específico.

³⁴ CIR es el promedio de ancho de banda garantizado que debe proporcionar un circuito virtual de una red trabajando en condiciones normales, por esta razón el ancho de banda no debería caer por debajo de este valor.

³⁵ El PIR es la tasa pico a la que puede llegar el tráfico del cliente.

Es decir, es responsabilidad del OLT proporcionar gestión del tráfico, incluyendo *traffic policing*³⁶, gestión del *buffer*, programación y organización tanto de los flujos de tráfico de los puertos GEM como los asociados a los T-CONTs basados en las especificaciones de servicio respectivas, recursos de ancho de banda, y las condiciones de tráfico dinámico.

2.2.3.4 Servicios

Tabla 2.6 Resumen de servicios ofrecidos por GPON [52].

Categorías del servicio	Servicio	Observaciones
Servicio de Datos	Ethernet ³⁷	Estandarizado en IEEE 802.3. Cumple con IEEE 802.1D.
PSTN	POTS	El tiempo de retardo medio de transferencia de la señal debe ser menor que 1,5 ms. Si la red utiliza compensación de eco, ese tiempo de retardo medio en el sistema basado en PON podría ser más largo, siempre que se cumplan los requisitos de retardo de transferencia de extremo a extremo.
	ISDN (BRI)	La velocidad de la portadora es de 144 kbps. El tiempo de retardo medio de transferencia de la señal debería ser menor que 1,5 ms.
	ISDN (PRI)	La velocidad de la portadora es de 1,544 Mbps y de 2,048 Mbps. El tiempo de retardo medio de transferencia de la señal debería ser menor que 1,5 ms.
Línea Privada	T1	La velocidad de la portadora es de 1,544 Mbps. El tiempo de retardo medio de la transferencia de la señal debería ser menor que 1,5 ms.
	E1	La velocidad de la portadora es de 2,048 Mbps. El tiempo de retardo medio de transferencia de la señal debería ser menor que 1,5 ms.
	DS3	La velocidad de la portadora es de 44,736 Mbps.
	E3	La velocidad de la portadora es de 34,368 Mbps.
Video	Video Digital	El propósito principal es video sobre IP, con una calidad de servicio suficiente para apoyar la experiencia competitiva en comparación con los métodos tradicionales de transporte.

“GPON soporta varios servicios, incluyendo voz (TDM, SONET, SDH), Ethernet,

³⁶ *Traffic Policing* es un componente esencial de la seguridad de acceso a la red, permite controlar la tasa máxima de tráfico establecida en una interfaz eliminando los paquetes que exceden las velocidades comprometidas y también permite proporcionar clases de servicio.

³⁷ El servicio Ethernet se utiliza principalmente para transmitir datos como los del protocolo de Internet, en el que incluye voz sobre IP (VoIP), *stream* de video codificado con M-PEG2 o M-PEG4.

ATM, líneas alquiladas, extensiones *wireless*, etc., mediante el uso del método de encapsulación GEM (GPON *Encapsulation Method*)” [53], como se observó en la Tabla 2.6.

2.2.4 NG-PON (NEXT GENERATION PASSIVE OPTICAL NETWORK)

A esta familia de redes pertenecen las XG-PON o NG-PON 1, NG-PON 2 y en especial las LR-PON, las cuales se detallan en los siguientes apartados.

2.2.4.1 XG-PON

Fue desarrollado por la FSAN en 2010 y definido como un sistema asimétrico que proporciona velocidades de 10 Gbps en el canal de bajada y 2.5 Gbps en el canal de subida. Además, se encuentra estandarizado en la serie de recomendaciones UIT-T G.987 y G.988, donde, se indica que XG-PON debe proporcionar completa compatibilidad con GPON, por lo tanto, aspectos como el entramado y la administración, son iguales a los que utiliza GPON con el protocolo OMCI, como se explicó en la sección anterior.

En particular, estas redes adoptan la ODN de la red GPON, permitiendo reutilizar la fibra óptica y los *splitters* de dichos sistemas para una implementación con XG-PON. En el caso del ONT, los operadores pueden migrar progresivamente a la tecnología XG-PON cambiando este equipo por uno de mejores características que soporte servicios de tasa controlada con función *policing* y *shaping*³⁸ y administración de tráfico basada en prioridades, sin interrumpir o afectar al servicio de los clientes no migrados.

Por otra parte, XG-PON se diferencia de GPON no solo en la velocidad de transmisión, sino también en el valor de máxima relación de división del *splitter* óptico, alcance, longitudes de onda de trabajo, intervalos de atenuación permitidos en el canal óptico y mejores mecanismos de seguridad, ver tabla 2.7. Adicionalmente, esta tecnología posee la misma arquitectura punto - multipunto de GPON y de igual manera soporta diferentes escenarios de acceso como FTTH,

³⁸ *Traffic Shaping* es un mecanismo de control del tráfico al igual que *policing*, su objetivo es evitar una posible sobrecarga en redes con altas ráfagas de tráfico entrante, se diferencia de *policing* porque no elimina paquetes, sino que almacena en búfer y cola los paquetes que exceden las velocidades comprometidas, asegurando que dicho excedente se transmita posteriormente

FTTCell, FTTB, FTTCurb y FTTCabinet.

Tabla 2.7. Requerimientos de la capa dependiente del medio físico [54] [55].

Parámetro	Especificación	Observaciones
Fibra Óptica	Compatible con UIT-T G.652	También se puede utilizar nuevas fibras ópticas compatibles con UIT-T G.657. Transmisiones bidireccionales utilizando la técnica WDM.
Rango de pérdidas en el canal óptico	Clase N1: 14 a 29 dB (Para aplicaciones sin previo despliegue GPON) Clase N2: 16 a 31 (Para aplicaciones co-existentes con GPON) Clase E1: 18 a 33 dB Clase E2: 20 a 35 dB	
Rangos de longitudes de onda de trabajo	Ascendente: 1260 a 1280 nm. Descendente: 1575 a 1580 nm.	
Velocidad máxima de transmisión	Ascendente: 2.48832 Gbps Descendente: 9.95328 Gbps	
Alcance máximo de transmisión	Físico: 20 km Lógico: 60 km	
Relación de división	1:64	Escalable a 1:128 y 1:256
Codificación de línea	NRZ-L	Para enlace ascendente y descendente
Tipo de fuente	Láser SLM (Single Longitudinal Mode) ³⁹	Sólo este tipo de laser cumple con los requerimientos de distancia y velocidad de transmisión de sistemas XG-PON.

Los aspectos que se han tomado con mayor importancia en XG-PON son el mejoramiento de la seguridad y el ahorro energético. En particular, en GPON la encriptación de datos es opcional y la administración relacionada a la seguridad es facilitada vía OMCI.

Por otra parte, en XG- PON los operadores requieren seguridad mejorada desde el

³⁹ El término SLM indica la operación del láser en un único modo de resonador, el cual, es un láser de frecuencia única, y tiene un ancho de línea de espectro muy estrecho con una longitud de coherencia mayor a 10 m, con un bajo nivel de ruido de fase.

procedimiento inicial de la activación de la red PON. Razón por la cual, existen tres métodos de autenticación detallados a continuación:

- El primero es un esquema de autenticación de ONT basado en un identificador lógico de registro, por lo tanto, una vez que se ha activado y registrado la ONT se autentica con el OLT, es decir, en este esquema el OLT no se autentica con la ONT.
- El segundo método es un esquema de autenticación bidireccional basado en canales OMCI (heredado desde GPON).
- El tercer método es un nuevo esquema de autenticación bidireccional basado en protocolos IEEE 802.1x, donde, existen tres actores principales: el suplicante, el autenticador y el servidor de autenticación. Por lo tanto, la comunicación comienza cuando un suplicante no autenticado envía un mensaje de inicio del proceso de autenticación al autenticador, éste responde solicitando su identidad, el suplicante responde con su identidad y el autenticador reenvía este mensaje al Servidor de Autenticación para verificar la identidad del suplicante.

Otros mecanismos de seguridad que ofrece esta tecnología son: encriptación en el canal ascendente y encriptación *multicast* en canal descendente. Por otra parte, en cuanto al ahorro energético, la UIT-T publicó en [56] tres modos de ahorro de potencia, el modo dormitado, el modo dormido y el modo de desprendimiento de energía.

- **Modo dormitado:** se caracteriza por apagar el transmisor de la ONU durante distintos períodos de tiempo con la condición de que el receptor permanezca continuamente encendido.
- **Modo dormido:** se caracteriza por apagar tanto el receptor como el transmisor de la ONU por periodos de tiempo.
- **Modo de desprendimiento de energía:** se caracteriza por desactivar o reducir la potencia a funciones y servicios no esenciales mientras mantiene un enlace óptico completamente operativo.

Adicionalmente, XG-PON debe ser capaz de soportar toda clase de servicios existentes y emergentes en los próximos años. Actualmente, provee acceso a

servicios basados en paquetes como IPTV, VoIP y acceso a Internet de alta velocidad, y también a servicios de voz ya existentes como POTS y líneas E1/T1. Por lo tanto, esta variedad de servicios presenta una amplia gama de características de QoS, por ejemplo, para los servicios POTS, XG-PON soporta calidad de voz con ancho de banda fijo garantizado para satisfacer requerimientos de *jitter* y retardo bajos.

Además, para proveer acceso a servicios basados en paquetes como los mencionados anteriormente, XG-PON proporciona al menos cuatro clases de servicios, se espera que en el futuro se ofrezca al menos 6 clases de servicio.

2.2.4.2 NG-PON2

En 2013, se definió el estándar NG-PON 2 bajo la recomendación UIT-T G.989.1, el cual, fue desarrollado con la finalidad de ofrecer hasta 40 Gbps en el canal de bajada y 10 Gbps en el canal de subida, con una relación de división máxima del *splitter* de 1:256.

NG-PON2 se basa en una arquitectura punto-multipunto y soporta de 4 a 8 pares de canales TWDM (*Time and Wavelength Division Multiplexing*)⁴⁰ por fibra, con un rendimiento máximo de 80 Gbps en cada dirección, es decir que cada canal o haz de luz es capaz de proporcionar hasta 10 Gbps. Además, de acuerdo a la recomendación UIT-T G.989.1, “los sistemas NG-PON2 deben soportar un alcance de fibra de al menos 40 km sin extensores de alcance intermedios” [57] y hasta 60 km con “extensores de alcance”⁴¹ de ser necesario.

Por otra parte, este estándar posee una arquitectura TWDM de múltiples canales de longitud de onda, donde, cada OLT/ONT se compone de un transmisor de al menos 10 Gbps, un receptor de 10/2,5 Gbps y un filtro WDM. En el caso del ONT, el transmisor debe ser sintonizable y capaz de ajustarse a las longitudes de onda de subida asignadas, asimismo, el receptor debe ser capaz de sintonizar cualquier

⁴⁰ TWDM es un mecanismo híbrido de multiplexación por división de tiempo y longitud de onda, el cual permite que cada longitud de onda se comparta entre múltiples ONT en un mismo *timeslot*.

⁴¹ Los extensores de alcance son elementos utilizados en la Red de Distribución Óptica que permiten aumentar el presupuesto del enlace, su capacidad y la distancia física de alcance que proporciona cada tecnología.

canal de longitud de onda de bajada recibido, es decir, se requiere de ONT *colourless*. En la Tabla 2.8 se puede observar un resumen de los requerimientos de la capa dependiente del medio físico en la tecnología NG-PON 2.

Tabla 2.8. Requerimientos de la capa PMD en NG-PON 2 [58].

Parámetro	Especificación	Observación
Fibra óptica	Fibra monomodo descrita en UIT-T G.652	También se puede utilizar nuevas fibras ópticas compatibles con UIT-T G.657 para cableado interior. Transmisiones bidireccionales utilizando la técnica WDM en una sola fibra.
Rango de pérdidas en el canal óptico	Clase N1: 14 a 29 dB Clase N2: 16 a 31 dB Clase E1: 18 a 33 dB Clase E2: 20 a 35 dB	Medido entre el ONT y el OLT. La ODN deberá garantizar el mínimo valor de pérdidas de trayecto indicado en cada clase para evitar la degradación del BER y el daño potencial a los receptores.
Plan de longitud de onda	Descendente: 1596 a 1603 nm Ascendente: Banda Ancha: 1524 a 1544 nm Banda Reducida: 1528 a 1540 nm Banda Estrecha: 1532 a 1540 nm	
Velocidad de transmisión	Upstream: 10 Gbps Downstream: 40 Gbps	
Alcance máximo de transmisión	40 km	
Relación de división	1:256	
Codificación de línea	NRZ-L	Para enlace ascendente y descendente
Tipo de fuente	Láser SLM (Single Longitudinal Mode)	Sólo este tipo de láser cumple con los requerimientos de distancia y velocidad de línea.

Como se observa en la figura 2.14, el rango de longitudes de onda para este estándar en el canal ascendente va de 1524 a 1544 nm y en el canal descendente de 1596 a 1603 nm.

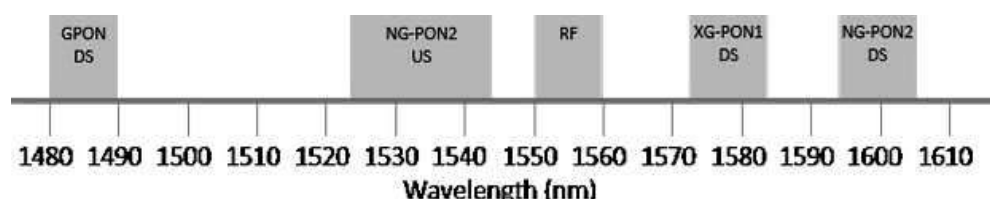


Figura 2.14. Espectro de longitudes de onda de NG-PON 2 [59].

Los sistemas NG-PON2 deben soportar completamente varios servicios para suscriptores residenciales, clientes comerciales, *backhaul* móvil y fijo, como servicios heredados, tales como POTS y T1/E1 usando emulación y/o simulación, líneas privadas de alta velocidad, entre otras aplicaciones, a través de su alta calidad de servicio y alta capacidad de tasa de bits, y debe cumplir al menos requisitos de sincronización y calidad de servicio.

En la tabla 2.9 se indican los distintos tipos de servicios que pueden ser soportados en las redes XG-PON y NG-PON 2.

Tabla 2.9 Servicios soportados en NG-PON [56].

Servicio		Observación
Telefonía	VoIP	
	POTS	Tiempo de retardo de transferencia de señal media debe ser menor a 1.5 ms.
TV (tiempo real)	IPTV	Para ser transportado usando IP <i>multicast / unicast</i>
	Difusión de TV digital	Transportado usando video RF
Línea arrendada	T1	Velocidad de transmisión de 1.55 Mbps, tiempo de retardo de transferencia de señal media debe ser menor a 1.5 ms.
	E1	Velocidad de transmisión máxima de 2.048 Mbps, tiempo de retardo de transferencia de señal media debe ser menor a 1.5 ms.
Acceso a Internet de alta velocidad		La interfaz de la red de usuario es comúnmente <i>Gigabit Ethernet</i> .
Redes móviles		Debe soportar sincronización precisa en frecuencia, fase y tiempo.
Servicio VPN de capa 2		Por ejemplo Ethernet
Servicios IP		Por ejemplo VPN, VoIP, etc.

2.2.4.3 LR-PON

Red Óptica Pasiva de Largo Alcance (LR-PON, *Long Reach Passive Optical Network*), es uno de los más recientes desarrollos de las PON y se propone como una solución rentable capaz de ofrecer un alcance mayor o igual a 100 km, gracias a la utilización de amplificadores ópticos y técnicas WDM.

Por lo tanto, debido al gran alcance que tiene esta tecnología permite combinar la red de acceso y la red metropolitana en una sola red que conecta el ONT directamente a la Red de *Core*, por ende, se eliminan los anillos SDH que

comúnmente se tiene en la red Metro, los cuales, son reemplazados por una sola fibra extendida para todo el *backhaul*. En particular, esto conlleva a la eliminación de sitios donde se encuentran las centrales locales, como se observa en la figura 2.15.

Por esta razón, este tipo de redes representa un potencial impacto económico pues disminuye altamente los equipos utilizados en la red.

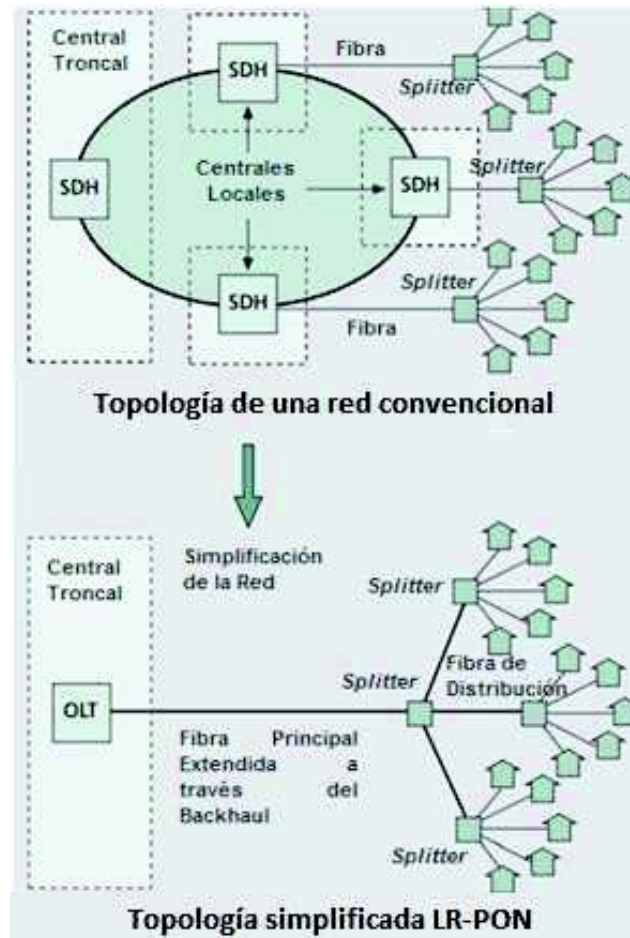


Figura 2.15 Simplificación de la red mediante LR-PON

Varios estudios realizados han demostrado que al utilizar la tecnología LR-PON se puede reducir al menos un 50% el número de nodos. Un ejemplo de esto, se lleva a cabo en países como Reino Unido e Irlanda, en donde se observó que LR-PON no solo incrementa la cobertura sino que específicamente en Irlanda, donde se utilizaba tecnología DSL, el número de nodos activos pasó de 1100 a 20 y en el caso de Reino Unido, también con tecnología DSL, la cantidad de 5600 nodos activos se redujo a 75 nodos con LR-PON [60].

Asimismo, dado que esta red proporciona una conectividad directa hacia el *core*, es muy importante que se incluyan rutas y mecanismos de protección. También por esta razón, esta red propone una larga distancia de transmisión, ya que las rutas de protección pueden ser hasta dos veces más largas que las rutas principales [61]. Por otra parte, debido a que no existe un estándar o recomendación establecida para esta tecnología, los tipos de arquitecturas descritos a continuación se han obtenido a partir de varios estudios experimentales.

2.2.4.3.1 *PLANET SuperPON*

A mediados de los 90, se desarrolló el proyecto ACTS (*Advanced Communication Technologies and Services*), conocido como PLANET (*Photonic Local Access Network*), el cual, fue uno de los primeros estudios realizados sobre tecnologías de largo alcance en redes ópticas pasivas. En este proyecto trabajaron varias empresas de telecomunicaciones y varios proveedores, quienes desarrollaron una arquitectura conocida como SuperPON, dicha arquitectura se muestra en la figura 2.16.

El objetivo del proyecto era desarrollar una red que soportara hasta 2048 ONT, enlaces de hasta 100 km de distancia que permitieran velocidades de 2.5 Gbps en el enlace de bajada y 311 Mbps en el enlace de subida.

Este aumento significativo en la distancia de transmisión y la relación de división de los *splitters*, ocasionó que el sistema se vea comprometido debido al elevado nivel de atenuación introducido, por lo tanto, para contrarrestar los altos niveles de atenuación se utilizaron amplificadores ópticos tanto para el enlace de subida como para el enlace de bajada.

En el enlace de bajada, se eligieron amplificadores EDFA debido a su alta ganancia de potencia, amplio ancho de banda de trabajo, bajas pérdidas de acoplo a la fibra, baja sensibilidad al estado de polarización de la luz, alto nivel de potencia de salida (entre 14 - 25 dBm) y porque trabaja adecuadamente a cualquier velocidad [23].

En el enlace de subida, se eligieron amplificadores SOA debido a que permiten operar en un amplio rango de longitudes de onda de la fibra óptica, desde la banda O hasta la banda L, además, proveen una alta ganancia cuando las señales de

entrada tienen poca potencia (como ocurre en el enlace de subida) y para altos niveles de potencia (como ocurre en el enlace de bajada) no proporciona mayor ganancia provocando que la potencia de salida sea similar a la de la señal de entrada [23].

Por otra parte, los amplificadores ópticos proporcionan niveles de ganancia necesarios para que la transmisión sea factible, no obstante, es importante tener en cuenta que estos dispositivos también introducen un efecto no deseado para el rendimiento de la transmisión, el cual es conocido como Emisión Espontánea Amplificada o ruido ASE (*Amplified Spontaneous Emission*)⁴².

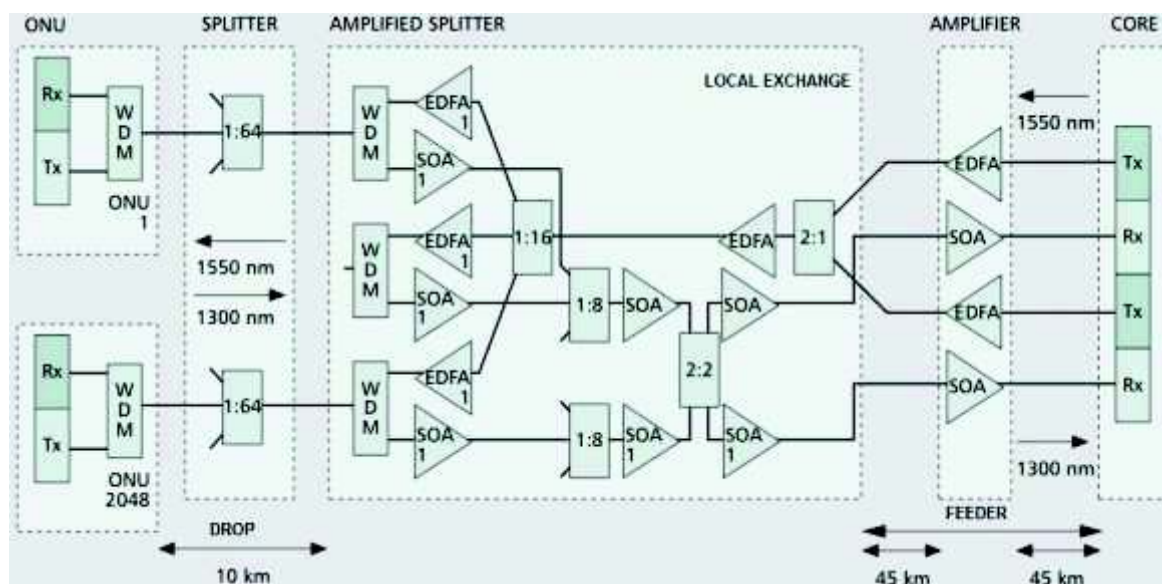


Figura 2.16 Arquitectura SuperPON [62].

Esta arquitectura se diseñó para cumplir un requerimiento de Relación Señal a Ruido (SNR, *Signal Noise Rate*) de 18,6 dB con una Tasa de Error de Bits (BER, *Bit Error Rate*) = 10^{-9} , utilizando modulación OOK (*On-Off Keying*)⁴³ y 3 dB de margen de potencia óptica [62]. En base a estos requerimientos, la relación de división máxima que se alcanzó fue de 1:1024, la mitad de la relación de división

⁴² La emisión espontánea es una de las formas de emisión presente en los amplificadores ópticos, a diferencia de la emisión estimulada que genera la amplificación de la señal, uno de los efectos negativos que produce la emisión espontánea amplificada es la reducción de la ganancia del amplificador.

⁴³ La modulación OOK es una versión de la modulación ASK, mientras que en ASK un "0" es representado por una baja amplitud de señal y un "1" es representado por la mayor amplitud; en la modulación OOK no hay portadora durante la transmisión de un "0", es decir el transmisor de modulación pasa a estado inactivo y únicamente la portadora se transmite para los "1".

que se buscaba inicialmente para SuperPON, por esta razón se introdujo un módulo nombrado “*splitter* amplificado”.

Este *splitter* amplificado consistió en la utilización de amplificadores ópticos en paralelo entre las etapas de división, alcanzando una relación de división de 1:2048, sin embargo, provocó que el efecto ASE se tornara más severo, pues cada amplificador óptico producía contribuciones de ASE que se combinaban en el *splitter* en el canal ascendente. Este efecto se conoce como canalización de ruido y aumenta la cantidad de ASE presente en el receptor.

Es así que, los diseñadores de SuperPON implementaron un método para reducir dicho efecto (nombrado como OAM-ONT), el cual, se encargaba de interpretar la información de control transmitida en el canal de bajada para conocer el instante de tiempo en el que un ONT tenía acceso al canal ascendente y mediante esta información el protocolo encendía el amplificador óptico solo cuando fuese necesario amplificar una señal. Usando este método, SuperPON logró el objetivo de una división de 1:2048 cumpliendo con el rendimiento del canal planteados inicialmente.

2.2.4.3.2 LR-PON 10 Gbps

Otro proyecto destacado es el presentado por la operadora inglesa British Telecom, donde, se desarrolló una arquitectura con un alcance de 100 km a una velocidad máxima simétrica de 10 Gbps y una relación de división de 1:1024 ONT, la cual, resulta de una combinación en cascada de dos divisores ópticos de N: 16 y uno N: 4 en la sección de *Drop*.

A pesar de proponer una relación de división igual a la mitad ofrecida en SuperPON, solamente requería de seis amplificadores ópticos tanto para el enlace de bajada como el enlace de subida, frente a los 39 necesarios en SuperPON.

En particular, teniendo en cuenta dos niveles de división N: 16 ($2 \times 14 \text{ dB} = 28 \text{ dB}$), un nivel de división N: 4 (7.3 dB) más la atenuación de 10 km de fibra óptica ($0.35 \text{ dB/km} \times 10 \text{ km} = 3.5 \text{ dB}$), e incluyendo pérdidas de 0.5 dB y 1 dB debido puntos de flexibilidad en las instalaciones del cliente y en la oficina local respectivamente, se tiene un total de 40.3 dB en la sección de distribución en el canal ascendente, lo

que resulta en una potencia de señal muy baja recibida en la oficina local.

Para contrarrestar dicho nivel de atenuación, se introdujo una sección de amplificación intermedia que contenía dos etapas: la primera etapa estaba constituida por un preamplificador de bajo ruido, pues debido a que la potencia de la señal era muy baja, la SNR se determinó a partir del ruido producido por el amplificador óptico, por lo tanto, al disminuir el valor de ruido ASE se logró maximizar la SNR. La segunda etapa de amplificación se encargaba de proporcionar el nivel de potencia de señal suficiente para reducir la atenuación hasta llegar al OLT.

Por lo tanto, experimentalmente se utilizó en el enlace de subida, amplificadores EDFA de la marca Northlight Optronics en ambas etapas de amplificación.

A pesar de ello, la atenuación obtenida en el *backhaul* fue de 37dB, provocando que la potencia que llegaba al OLT continúe siendo relativamente baja. De esta manera, fue necesario añadir un preamplificador óptico para incrementar la sensibilidad del receptor, el cual fue un EDFA de la marca JDSU.

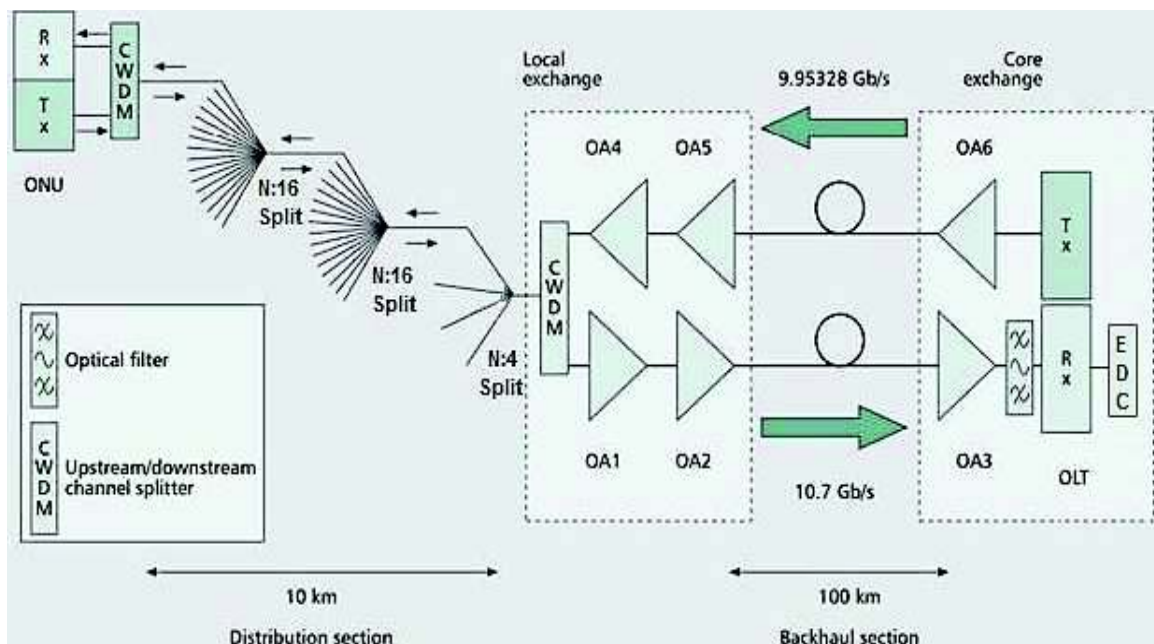


Figura 2.17 Arquitectura LR-PON TDMA de 10 Gbps [62].

Sin embargo, la ganancia total de los amplificadores ópticos no fue suficiente para alcanzar el rendimiento planteado en la arquitectura con un $BER = 10^{-10}$, debido al

efecto perjudicial del ASE. Por lo tanto, un método para aumentar el rendimiento del sistema es utilizar códigos FEC para la corrección y detección de errores en el sistema, en este caso se utilizó RS (255,239) [63]. En particular, los estudios indicaban que se requería de una tasa de error previa a aplicar FEC de 2.9×10^{-4} para conseguir finalmente el valor de BER = 10^{-10} deseado, la cual, se pudo lograr utilizando un filtro óptico con ancho de banda de 2nm antes del receptor [63], como se observa en la figura 2.17.

Por otra parte, un filtro óptico permite seleccionar las frecuencias ópticas que llegan al receptor, causando la reducción de la cantidad de ASE presente en dicho receptor, lo que se traduce en un aumento de la SNR y, por lo tanto, en el rendimiento del sistema. Sin embargo, un inconveniente al utilizar un filtro óptico es que en el transmisor se debe configurar una longitud de onda bastante precisa para garantizar que pueda pasar a través de la banda de paso del filtro óptico. Además, “la longitud de onda de un láser depende de la temperatura, razón por la cual, debe incluirse un controlador de temperatura para garantizar que la longitud de onda no se salga de la banda de paso del filtro. Esto no es deseable ya que agrega un costo adicional al ONT” [62].

Por lo tanto, una solución rentable incluía el uso de un transmisor Ethernet de 10Gbps, pues estos transmisores tienen un enfriador termoeléctrico (TEC, *Thermo Electric Cooler*) embebido, y son de bajo costo debido el volumen de producción para aplicaciones Ethernet.

Adicionalmente, un problema existente en esta red es la presencia de dispersión cromática, por lo cual, la técnica escogida para contrarrestar dicha dispersión fue la Compensación de Dispersión Electrónica (EDC), la cual, implica colocar un filtro de Respuesta de Impulso Finito (FIR) después del receptor óptico en el OLT, para filtrar la señal eléctrica de forma que contrarreste el efecto del canal óptico. Además, el EDC se puede ajustar dinámicamente, con lo cual, se consigue que el dispositivo compense cada uno de los ONT ubicados a diferentes distancias del OLT sin cambios en la infraestructura que hubiera implicado el uso de DCF.

Por lo tanto, con el uso de tecnologías ópticas apropiadas, fue posible lograr una transmisión de 10 Gbps en los canales descendentes y ascendentes, con un

alcance de 100 km a 1024 clientes que utilizan un transceptor óptico de bajo costo en la ONU situada en las instalaciones del cliente.

2.2.4.1.1 LR-PON híbrida DWDM-TDM

En 2005, el Grupo de Sistemas Fotónicos de la Universidad de Cork en Irlanda, realizó la primera demostración de un sistema híbrido DWDM-TDM para LR-PON, la cual, introduce la idea de utilizar un Amplificador Óptico de Semiconductor Modulador de Electroabsorción (EAM-SOA) como una ONU *colourless* en un sistema DWDM de alto rendimiento.

En este trabajo se investiga la viabilidad de admitir hasta 17 SuperPONs, donde, cada una trabaja en una grilla UIT de 100 GHz, en la cual, la banda C se divide en dos partes, una mitad nombrada “azul” (1529 nm – 1541.6 nm) utilizada para transportar los canales de los clientes en el sentido de bajada y una mitad nombrada “roja” (1547,2 nm – 1560,1 nm) que transporta los canales en el sentido de subida, ver figura 2.18 [64].

Además, se observa que las bandas rojas y azules están separadas por una banda de guarda de 5 nm que permite utilizar filtros nombrados RBF (*Red Blue Filter*) utilizados para dividir y combinar las dos bandas en varios puntos de la red [64].

También, esta red permite un alcance de 100 km para cada SuperPON y capacidad de 512 usuarios a 2.5 Gbps o 128 usuarios operando a 10 Gbps.

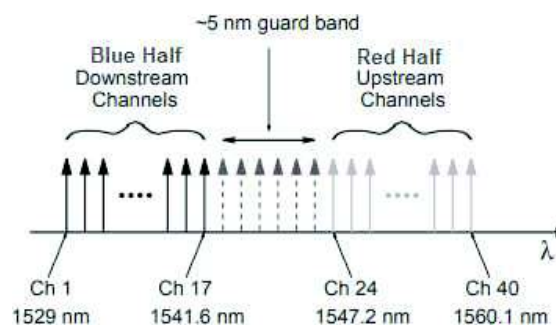


Figura 2.18. Longitudes de onda DWDM para transmisión en LR-PON DWDM/TDM [64].

En la figura 2.19 se indica la arquitectura propuesta, la cual es dividida en cuatro secciones: la oficina central, la oficina local, un gabinete en la calle y la ONU del cliente. Esta arquitectura es técnicamente factible si se utilizan láseres DWDM para

proveer los canales de datos del cliente en el canal de subida, pero aquello no resulta rentable a causa de los elevados costos que implica la utilización de dichas fuentes en la ONU del cliente.

Por esta razón, la transmisión en el enlace de subida se realiza mediante la siguiente configuración: una portadora óptica es generada a partir de una solución centralizada ubicada en la oficina local, específicamente en este estudio la portadora la genera un ECL sintonizable de 100 MHz de ancho de banda, seguido de un amplificador *booster*⁴⁴ SOA, resultando en una potencia de salida en el rango de +12 a +15 dBm. Seguido a esto, la señal ingresa al SOA ubicado en la ONU, el cual, amplifica la portadora óptica, posteriormente, la señal se modula mediante el EAM y se transmite hasta el segundo SOA, el cual, se usa para amplificar la señal después de la modulación.

También, son parte de la ONU un receptor de 10 Gbps y otro RBF (Red Blue Filter) utilizado para la multiplexación/demultiplexación de los canales ascendente/descendente. Por lo tanto, mediante esta configuración la ONU alcanza una ganancia de potencia promedio de alrededor de 18 dB.

En el gabinete de la calle, se ubican los dos niveles de *splitters*, donde, cada *splitter* utiliza dos canales DWDM, uno para el sentido de subida y otro para el sentido de bajada, además, experimentalmente se utilizaron *splitters* PLC (*Planar Light wave Circuit*), los cuales, tienen una pérdida por inserción ligeramente mayor a 3 dB.

También, la oficina local contiene dos amplificadores en línea de dos etapas para cada canal de transmisión, para el canal descendente se utilizan amplificadores EDFA con una ganancia total de 46 dB y una NF = 4 dB, por otra parte, para el enlace ascendente se utilizan amplificadores SOA con una ganancia de 32 dB y una NF = 6.4 dB [64].

Además, los canales ascendente y descendente para cada una de las 17 PON soportadas, se multiplexan/demultiplexan en la oficina local utilizando otro RBF.

⁴⁴ Es un tipo de aplicación de los amplificadores ópticos que compensa el acoplamiento pasivo y la división de pérdida en una LAN.

En la oficina central, los canales ascendente y descendente atraviesan un tramo de DCF para reducir las pérdidas por dispersión antes de separarse mediante el circulador. En particular, los canales ascendentes se demultiplexan y se detectan a través de un AWG de 40 canales, un preamplificador EDFA con ganancia de 27 dB, un NF = 4.3 dB y un receptor PIN de 10 Gbps con una sensibilidad de -17 dBm o un receptor APD de 2.5 Gbps con una sensibilidad de -30 dBm [64].

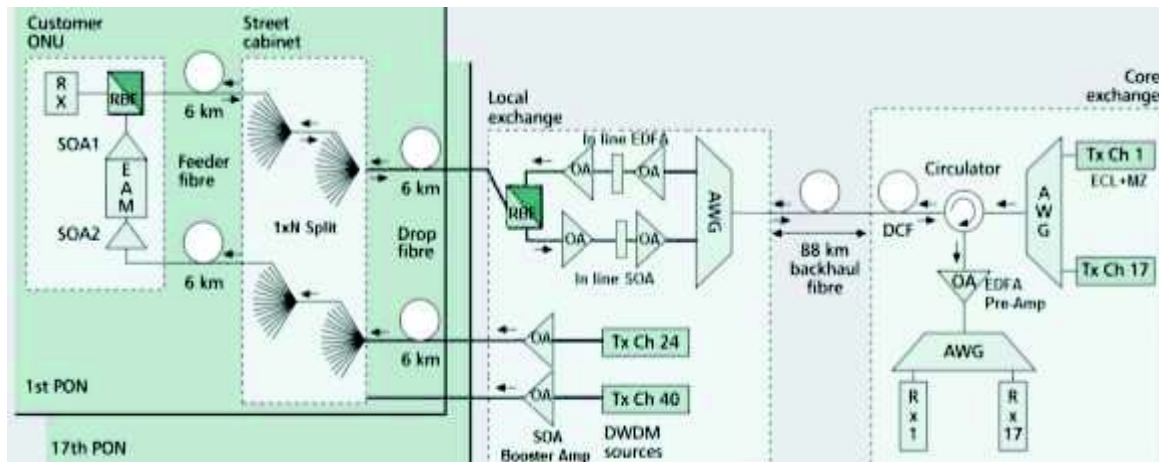


Figura 2.19. Arquitectura general de una LR-PON híbrida DWDM-TDM

Por otra parte, el canal descendente en el sistema es generado por un segundo ECL seguido de un modulador de amplitud Mach-Zehnder (ECL + MZ) de Niobato de litio y un multiplexor AWG de 40 canales.

Por lo tanto, el número máximo de abonados para una configuración de 10 Gbps es de 2176 (17 PON cada una con relación de división máxima de 1:128) y para una configuración de 2.5 Gbps es de 8704 usuarios (17 PON cada una con relación de división máxima de 1:512) para un sistema con $BER=10^{-9}$.

2.2.4.3.3 PIEMAN

PIEMAN (*Photonic Integrated Extended Metro and Access Network*) es un proyecto que fue desarrollado por la Sociedad de Tecnologías de la Información (IST, *Information Society Technologies*) en 2006, el cual, propone una red LR-PON con un alcance de 100 km y un *backhaul* de 32 longitudes de onda DWDM, cada una con capacidad simétrica de 10 Gbps compartido entre un máximo de 512 abonados por longitud de onda, resultando en un total de 16,384 abonados totales en toda la

red (512*32), la arquitectura de la red se observa en la figura 2.21.

Además, la planificación de longitudes de trabajo DWDM, se ha escogido en la banda C, con 32 longitudes de onda para el enlace de subida y 32 longitudes de onda para el enlace de bajada de 50 GHz, adicionalmente, un intervalo de guarda de 10 nm como se observa en la figura 2.20 a continuación:

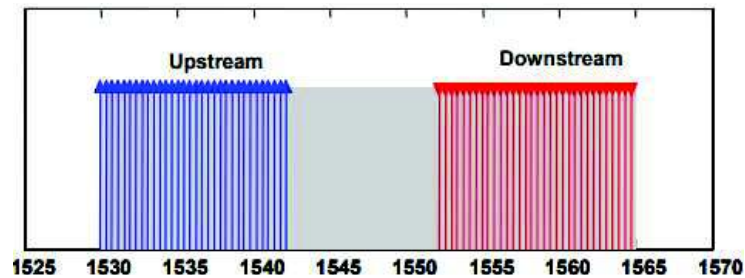


Figura 2.20. Rango de longitudes de onda de trabajo DWDM [65].

Por otra parte, en PIEMAN el transporte de video se realiza a través de canales de transmisión IP en lugar de un operador óptico analógico adicional, como se realiza en algunas implementaciones PON convencionales, esto con el objetivo de tener una configuración más fácil y más barata del sistema.

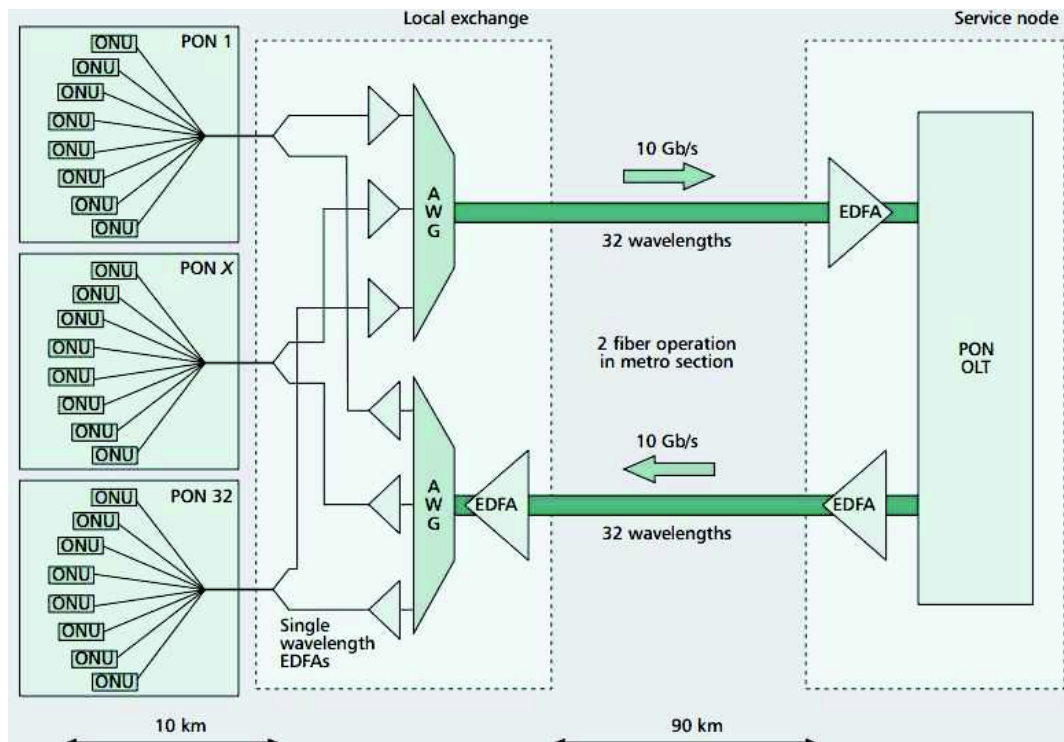


Figura 2.21. Arquitectura de la red híbrida WDM/TDMA del proyecto PIEMAN [62].

Esta arquitectura está compuesta por tres partes principales: el nodo de servicio ubicado en la CO, la oficina local y el lado del cliente.

Receptor del OLT en el Nodo de Servicio:

Debido a la naturaleza del tráfico (modo ráfaga) en el enlace de subida y la alta velocidad de transmisión ofrecida, se requiere de un receptor especial en el OLT, por lo que se realizó el diseño de un receptor compuesto por un “amplificador de transimpedancia”⁴⁵ con fotodiodo PIN y un post-amplificador para soportar la alta velocidad de bits y el alto “rango dinámico”⁴⁶, impuesto por la relación de división y el ruido ASE introducido por los amplificadores, su estructura se observa en la figura 2.22.

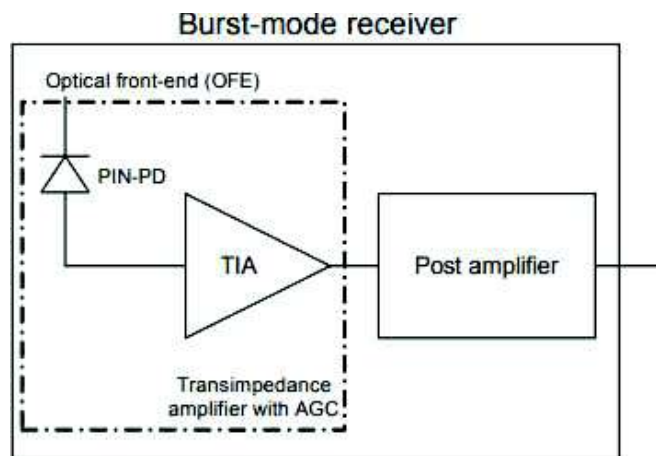


Figura 2.22. Estructura del receptor en el enlace de subida [65].

La tabla 2.10 indica las principales especificaciones para el receptor diseñado, donde, el valor de rango dinámico se debe principalmente a las diferencias en la atenuación de la ODN para diferentes ONT, la tolerancia en la potencia de salida del ONT y la variación de la ganancia de los EDFA.

Además, la longitud de sobrecarga se utiliza para el control automático de ganancia (AGC), la determinación correcta del umbral de cada ráfaga y la recuperación de fase.

⁴⁵ Es el nombre que se le da a los amplificadores operacionales con realimentación de corriente.

⁴⁶ Es la relación entre la máxima potencia soportada y la mínima potencia percibida por el receptor.

Tabla 2.10. Principales especificaciones para el receptor del OLT

Parámetro	Unidad	Especificación
Formato de Modulación		NRZ
Sensibilidad Mínima	dBm	-16
Rango Dinámico	dB	16
Longitud de sobrecarga	Ns	40.8
Tiempo de guarda	Ns	25.6

Amplificación en el Nodo de Servicio:

Como se observa en la figura 2.21, se hace uso de un amplificador EDFA tanto para el canal ascendente como para el canal descendente para compensar la atenuación presente en cada canal óptico. Sin embargo, no se puede utilizar un EDFA estándar, debido a que la ganancia del EDFA no cambia lo suficientemente rápido para garantizar que todo el paquete reciba una ganancia constante. Es decir, la ganancia cambia a medida que el paquete se propaga a través del EDFA provocando que la amplitud del paquete sea no uniforme, lo cual, implica un impacto negativo en la sensibilidad del receptor y una reducción en la relación de división factible.

Por lo tanto, el objetivo es estabilizar la ganancia del EDFA, para lo cual se aplicó un esquema de compensación óptica, en el que se envía una longitud de onda auxiliar (λ_c) junto con las longitudes de onda de carga útil (λ_{PON}), dicha longitud de onda se ajusta en relación con el paquete transmitido en el enlace de subida de modo que se mantiene la potencia óptica constante a través del EDFA durante la duración de la ráfaga.

Amplificación en la CO:

Para la etapa de amplificación en la CO, en la dirección descendente las señales DWDM provenientes del OLT son amplificadas después de los 90 km de despliegue mediante un amplificador EDFA, luego estas señales son demultiplexadas en sus longitudes de onda individuales a través de un AWG y cada longitud de onda individual es amplificada nuevamente, como se observa en la figura 2.21. Además, en el enlace ascendente cada longitud de onda es amplificada por un EDFA

dedicado, antes de la multiplexación del AWG, en una fibra hasta el OLT.

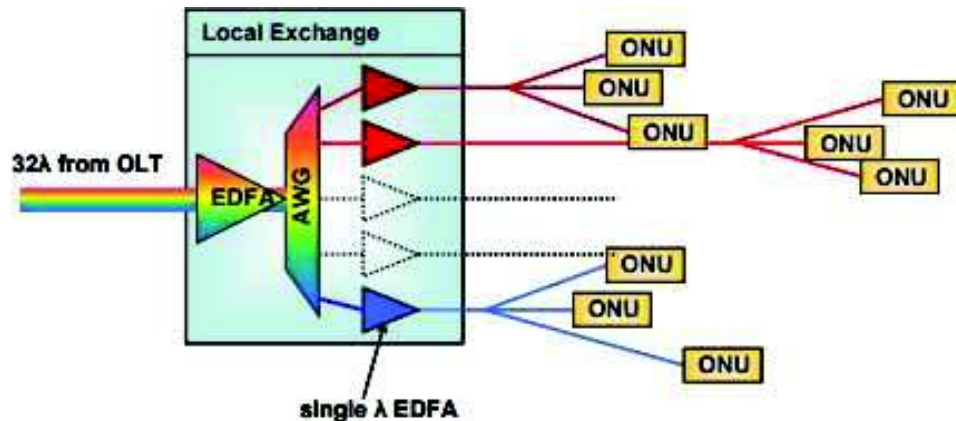


Figura 2.23. Amplificación de las señales en el enlace descendente [65].

ONT *colourless* en el cliente:

Debido a que se puede aceptar hasta 32 tipos de ONT, cada uno con diferentes longitudes de onda en el sentido de subida, PIEMAN implementa ONT *colourless* mediante dos potenciales enfoques.

El primero es desarrollar un ONT sintonizable que escoja entre las 32 longitudes de onda disponibles, y con el objetivo de reducir costos, además, la longitud de onda se establece una sola vez cuando el ONT se registra en la red, en lugar de sintonizar el ONT a una longitud de onda cada vez que vaya a transmitir.

El segundo es implementar R-ONT (*Reflective ONT*), el cual, es muy similar al utilizado en la arquitectura LR-PON híbrida DWDM/TDMA, donde, la red suministra una longitud de onda al ONT mediante una solución centralizada. Además, el ONT se basa en la integración de EAM y SOA, permitiendo suficiente ancho de banda y ganancia (~ 25dB) para alcanzar la velocidad de 10 Gbps y potencia de transmisión de 5 dBm [65].

2.2.4.3.4 Otros Estudios

Los estudios detallados anteriormente son algunos de los más importantes y de mayor relevancia en el desarrollo de las LR-PON, pero existen muchas más demostraciones de este tipo de redes con configuraciones bastante similares a lo ya mencionado, por lo cual, a continuación se resume brevemente algunas de ellas.

En 2004, se llevó a cabo el proyecto Europeo DISCUS (*DIStributed Core for unlimited bandwidth supply for all Users and Services*) detallado en [66], en el cual, se presenta una arquitectura LR-PON que propone ofrecer servicio hasta a 1024 abonados con un alcance de hasta 80 km y una velocidad de transmisión simétrica de 10 Gbps.

Adicionalmente, en la sección entre la CO y la oficina local se colocan dos fibras en el canal de subida y bajada para utilizar una de ellas como ruta de protección o uso futuro.

Otro estudio es el desarrollado en [67], donde, los autores propusieron una arquitectura de red de acceso WDM-TDM en anillo, SUCCESS (*Stanford University aCCES*S) emplea una configuración semi-pasiva utilizando láseres sintonizables en el OLT permitiendo compartir los canales ascendentes y descendentes entre todos los ONT.

Por otra parte, en [68], se demuestra el desarrollo del proyecto nombrado STARGATE, en el cual se examina una red de acceso-metro integrada que emplea una arquitectura híbrida de una red con topología en anillo y una subred con topología en estrella de largo alcance, que conecta cada nodo remoto. Esta estructura permite que los ONT de diferentes PON se comuniquen entre sí a través de cualquier CO intermedia.

2.2.4.4 Control de acceso al medio

LR-PON al igual que las PON tradicionales son redes con comunicación bidireccional, donde, el canal de subida es compartido entre todas las ONU, razón por la cual, los datos transmitidos desde cada ONU pueden llegar a colisionar. Por lo tanto, para evitar estas colisiones y compartir la capacidad del canal, es necesaria la utilización de un mecanismo de control de acceso al medio.

En particular, los algoritmos de asignación dinámica de ancho de banda son considerados los más convenientes para LR-PON, ya que, “adaptan la capacidad de la red a las condiciones de tráfico actuales modificando la distribución del ancho de banda asignado a cada ONU en función de la demanda actual o en función de los requisitos de QoS” [60], además, el dispositivo encargado de la distribución del

ancho de banda entre todas las ONU es el OLT, es decir, se encarga de controlar la transmisión de los datos de cada ONU.

Por otra parte, “los algoritmos de asignación dinámica de ancho de banda pueden dividirse en dos tipos, algoritmos centralizados y algoritmos de testeo continuo” [60].

Cabe recalcar que los algoritmos presentados a continuación, constituyen un breve resumen del estado del arte de los algoritmos DBA desarrollados específicamente para LR-PON.

2.2.4.4.1 Algoritmos DBA centralizados en redes LR-PON

Primero, el OLT recibe la demanda de todas las ONU en el ciclo⁴⁷ actual y asigna el ancho de banda correspondiente a cada una para el siguiente ciclo, las cuales, esperarán un intervalo de tiempo antes de poder transmitir, como se observa en la figura 2.24 a continuación:

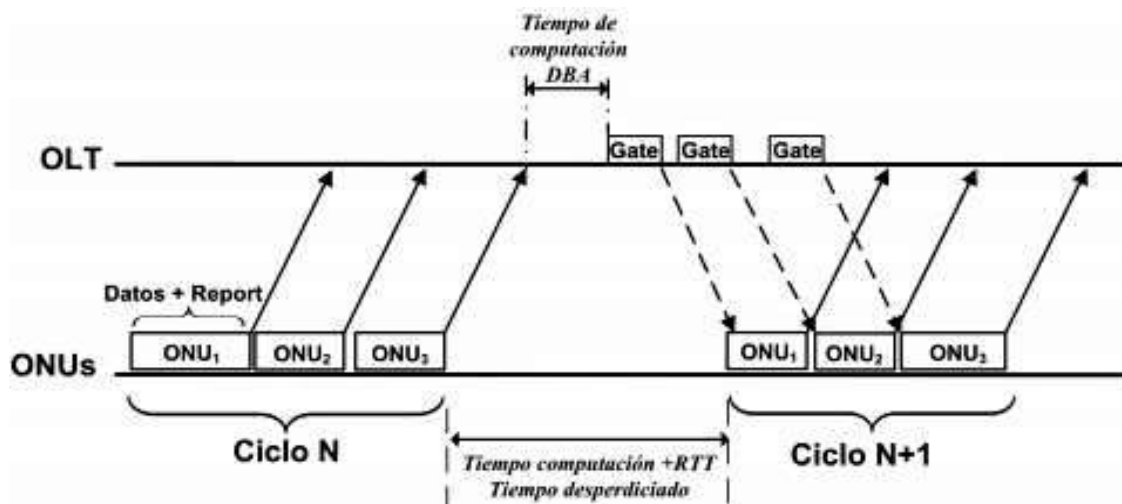


Figura 2.24. Esquema de funcionamiento de un algoritmo centralizado [60].

Adicionalmente, este tiempo aumenta considerablemente en LR-PON debido a la larga distancia propuesta, razón por la cual, los algoritmos centralizados permiten que durante este tiempo las ONU transmitan y no se desperdicien recursos.

En este contexto, se desarrolló el algoritmo TSD (Two-State DMB), el cual, planifica

⁴⁷ El tiempo de ciclo es el tiempo total en el que todas las ONUs transmiten una vez siguiendo un orden consecutivo.

las nuevas transmisiones en base a la demanda del tráfico presentado en un ciclo, eliminando el tiempo de espera y permitiendo que los paquetes se transmitan en paralelo en base a la planificación realizada previamente. A continuación, se muestra en la figura 2.25 un esquema de lo indicado.

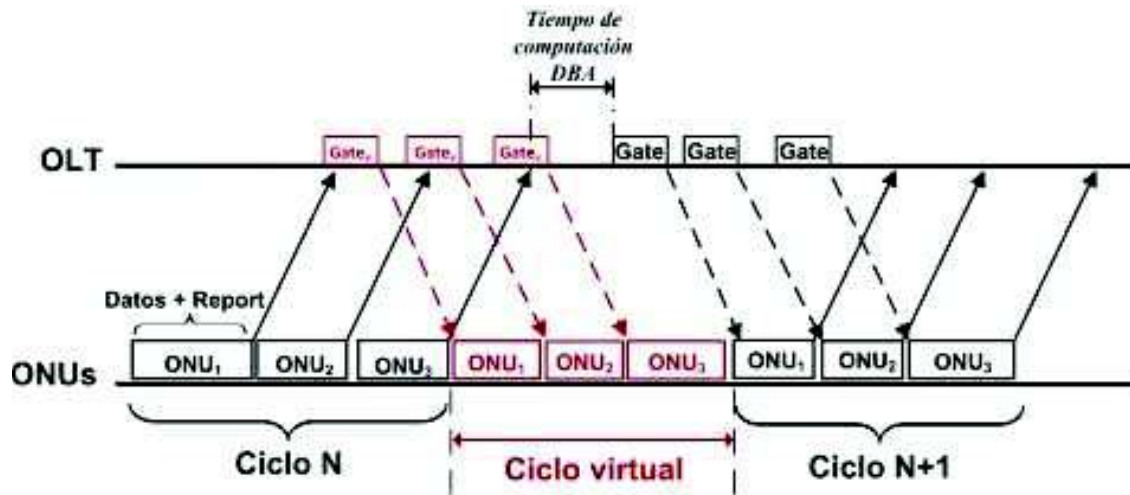


Figura 2.25. Esquema de funcionamiento del algoritmo TSD [60].

Sin embargo, este algoritmo presenta una serie de inconvenientes; uno de ellos es que no soporta QoS (esencial para soportar distintos tipos de tráfico existentes), otro inconveniente viene dado por el sistema de planificación para permitir la transmisión en paralelo, ya que, debe existir una alta coordinación entre los intervalos de transmisión para evitar que se asigne ancho de banda a un grupo de paquetes al que ya se le ha asignado ancho de banda previamente.

Por otra parte, han surgido algunas variaciones que tratan de mejorar estos inconvenientes, una de ellas es el algoritmo PGO (*Periodic Gate Optimization*) implementado en el OLT para optimizar la distribución del ancho de banda mediante la estimación de un ancho de banda extra que se asigna a cada ONU, calculado a partir de la información de los mensajes *Report* enviados, de esta manera, se disminuye el retardo medio, sobre todo para altas cargas de red.

Además, existe otro algoritmo que cumple la función de coordinador entre los procesos DBA corriendo en paralelo, este algoritmo es conocido como NA+ (*Newly Arrived Frames*), el cual, se encarga de evitar que el OLT asigne el ancho de banda destinado al mismo paquete varias veces.

2.2.4.4.2 Algoritmos de testeo continuo

En este tipo de algoritmos, la ONU transmite sus datos y su mensaje *Report* con la demanda correspondiente, luego, el OLT al recibir el mensaje *Report* asigna el ancho de banda a cada ONU para el siguiente ciclo, una explicación gráfica de lo mencionado se muestra en la figura 2.26 a continuación:

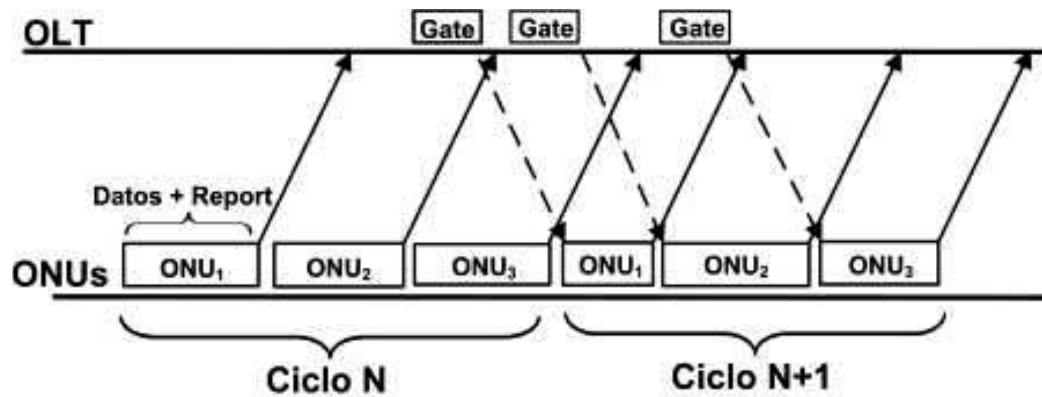


Figura 2.26. Esquema de funcionamiento de los algoritmos de testeo continuo [60].

Este tipo de algoritmos se presentan como una solución más eficiente en cuanto a la utilización de ancho de banda en el canal de transmisión, pues el tiempo desperdiciado entre transmisiones es muy corto, ya que, una ONU transmite inmediatamente después de la finalización de la transmisión de la ONU anterior.

Además, uno de los algoritmos que forman parte de esta clasificación es OEBD (*Online Excess Bandwidth Distribution*) [69], el cual, realiza asignación de ancho de banda en exceso a cada ONU en tiempo real, sin esperar a que cada ONU envíe su correspondiente información de demanda.

Para realizar el cálculo del exceso asignado, se toma en cuenta “pesos asociados a cada ONU y una ventana de ancho de banda extra que se incrementa cuando las ONU piden menos ancho de banda que un mínimo establecido y que se decrementa dinámicamente por un factor (γ)” [60].

Por lo tanto, una vez estudiado las características técnicas más importantes de cada tecnología y conociendo el funcionamiento de cada una de ellas, en la Tabla 2.11 se presenta un resumen de los principales aspectos de las tecnologías mencionadas en este capítulo.

Tabla 2.11. Comparativa de las tecnologías mencionadas

Parámetros	EPON	10G-EPON	GPON	XG-PON	NG-PON2
Estándar	IEEE 802.3ah	IEEE 802.3av	UIT-T G.984x	UIT-T G.987 y G.988	UIT-T G.989.1
Velocidad de transmisión	UL: 1 Gbps DL: 1 Gbps simétrico	Canal simétrico: UL: 10 Gbps DL: 10 Gbps Canal asimétrico: UL: 1 Gbps DL: 10 Gbps	UL: 155 Mbps, 622 Mbps, 1.2 Gbps, 2.4 Gbps DL: 1.2 Gbps, 2.4 Gbps	UL: 2.5 Gbps DL: 10 Gbps	UL: 10 Gbps DL: 40 Gbps
Alcance	10-20 km	20 km	10-20 km	20 km	40-60 km
Relación de división del splitter	1:16	1:16/1:32	1:64/1:128	1:64/1:128/1:256	1:256
Longitudes de onda	1480-1500 nm (DS) 1260-1360 nm (US)	1575-1580 nm (DS) Upstream: 1G: 1260-1360 nm 10G: 1260-1280 nm	1480-1500 nm (DS) 1260-1360 nm (US)	1575-1580 nm (DS) 1260-1280 nm (US)	1596-1603 nm (DS) 1524-1544 nm (US)
Servicios	Pueden transportar datos en tiempo real. Es ideal para video y voz, CATV, POTS.	IPTV, IPTV bajo demanda, televisión de alta definición (HDTV), videoconferencias	Ethernet, POTS, ISDN (BRI y PRI), T1, E1, DS3, E3, video digital	VoIP, POTS, IPTV, difusión de TV digital, T1, E1, acceso a internet de alta velocidad, redes móviles, VPN de capa 2.	
Código de línea	8B/10B	64B/66B	NRZ	NRZ	NRZ
FEC	Reed Solomon (255, 239) optativo.	Reed Solomon (255, 223) obligatorio.	Reed Solomon (255, 239).	Reed Solomon (248, 216) (DL). Reed Solomon (248, 232) (UL).	No indicado.

2.3 COMPARACIÓN ENTRE GPON Y LR-PON

Una de las tecnologías más fuertes en el mercado de las redes ópticas pasivas es la tecnología GPON, ya que es la opción más popular para los despliegues FTTH, especialmente en Estados Unidos y Europa [70].

De hecho, de acuerdo a las estadísticas presentadas por FTTH *Council* (organismo dedicado a promover el desarrollo y despliegue de la fibra óptica), los tres países con mayor despliegue de redes PON a nivel mundial son Corea del Sur, donde aproximadamente el 50% de la población tiene conexión con fibra óptica, Japón y Hong Kong [71]. Además, en el continente Europeo, España es uno de los países líderes en cuanto al despliegue de fibra óptica, con una tasa de penetración del 33,9% [72].

También, en América Latina la tecnología FTTH ya es una realidad, sin embargo, las estadísticas de penetración de la fibra en estos países no crece a los mismos niveles que en los anteriormente mencionados.

Por lo tanto, actualmente GPON posee un amplio mercado en países donde el desarrollo de las PON aún no ha alcanzado las tecnologías de nueva generación y en los cuales los índices de penetración se encuentran aún muy por debajo de la mitad de la población. En cambio, las tecnologías de próxima generación como las LR-PON se perfilan para convertirse en soluciones a corto plazo en los países líderes de desarrollo de redes con fibra óptica ya que es notable el rápido crecimiento de estas soluciones.

Sin embargo, la elección del tipo de tecnología adecuada para la última milla es un proceso en el que intervienen muchos aspectos. Por lo tanto, en base a las características técnicas presentadas en este capítulo se compararán ambas tecnologías con la finalidad de conocer bajo qué factores una tecnología es mejor que otra. Cabe recalcar que la comparación realizada será en base a la capa física pues es la capa en la que se enfocan los estudios experimentales presentados de LR-PON, más no en cuanto a aspectos de capa 2 como protocolos de transporte, generación de tramas, mecanismos de operación y mantenimiento, técnicas de asignación de ancho de banda, etc.

2.3.1 ARQUITECTURA

La arquitectura es una de las principales diferencias entre ambas tecnologías, GPON hace uso de una arquitectura mucho más simple a las desarrolladas para LR-PON, incluso, toda una red GPON puede ser actualizada a una LR-PON adoptando gran parte de la misma.

Las redes GPON son redes completamente pasivas, por lo que en su ODN no se introduce ningún elemento activo, por lo tanto, un amplificador óptico no es un elemento fundamental en este tipo de redes. Por el contrario, una LR-PON no puede satisfacer los objetivos planteados sin la utilización de estos dispositivos, es decir, los amplificadores ópticos son dispositivos esenciales de la arquitectura de largo alcance.

Otra diferencia crucial en la arquitectura de estas tecnologías es el ONT, en particular, el ONT GPON es un elemento de red estandarizado y disponible en el mercado, con configuraciones definidas permitiendo que su administración sea amigable para el cliente y el operador, además, se configura para que transmita a una sola longitud de onda (1310 nm) en ciertos periodos de tiempo. En cambio, LR-PON requiere utilizar ONT *colourless* con configuraciones más complejas, en algunos casos implementando un transmisor centralizado o en otros un ONT sintonizable, como se explicó anteriormente.

Otra diferencia es la utilización de mecanismos compensadores de dispersión, en GPON los niveles de dispersión no son tan severos en comparación a los presentados en LR-PON. Debido a la alta distancia existente entre el OLT y el ONT, el efecto de dispersión cromática se incrementa significativamente en LR-PON, para evitar este efecto se han introducido en algunos proyectos EDC y DCF con fines experimentales.

En general, el nivel de atenuación del canal óptico en LR-PON es mucho mayor que en GPON, por esta razón es importante introducir elementos que compensen la atenuación en los sistemas LR-PON, pues caso contrario en función de la naturaleza de la arquitectura la señal transmitida desde el ONT hasta al OLT no se percibiría.

Por ello se introducen, etapas de pre-amplificación, etapas de amplificación en serie o en paralelo, moduladores, codificación FEC, etc., métodos no muy utilizados en GPON.

2.3.2 CANTIDAD DE USUARIOS POR PON

GPON permite una relación de división máxima de 1:64 por puerto GPON, un OLT GPON puede tener hasta 14 slots para tarjetas de servicio y cada tarjeta de servicio puede contener hasta 8 puertos GPON, es decir que finalmente todo un equipo OLT puede soportar hasta 7168 abonados (14x8x64).

Por otra parte, en LR-PON dependiendo de la arquitectura implementada, soportará mayor o menor número de abonados. En conclusión, teniendo en cuenta las arquitecturas mencionadas anteriormente, la menor cantidad de abonados soportada es 1024 con la arquitectura "LR-PON 10 Gbps" y la mayor cantidad de abonados es 16,384 con la arquitectura PIEMAN.

2.3.3 CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN

GPON ofrece 6 combinaciones de velocidades de transmisión para canales simétricos o asimétricos, que van desde 1.25 Gbps a 2.5 Gbps en el sentido de bajada, y desde 155 Mbps hasta 2.5 Gbps en el sentido de subida.

Las tasas de transmisión ofrecidas por LR-PON varían entre 311 Mbps a 2.5 Gbps en el sentido de subida; y, entre 2.5 Gbps y 10 Gbps para el sentido de bajada.

2.3.4 SERVICIOS

En redes GPON debido a la utilización de un método de encapsulación nativo de esta tecnología, conocido como GEM, es posible proporcionar una amplia variedad de servicios, entre los cuales están los servicios de voz (TDM, SONET, SDH), Ethernet, ATM, líneas arrendadas e incluso servicios que requieren un gran ancho de banda, como por ejemplo IPTV o televisión de alta definición

Por otra parte, LR-PON también debe ser capaz de transportar todo tipo de tráfico de una manera eficiente, incluyendo servicios TDM garantizados como POTS; y, tráfico de paquetes como Ethernet, con capacidades de calidad de servicio (QoS).

Además, en estas redes es posible considerar agregar más canales DWDM para proporcionar servicios adicionales emergentes de alta capacidad.

2.3.5 OTROS ASPECTOS

En la tabla 2.12 se resumen otros aspectos adicionales que diferencian la tecnología GPON de LR-PON.

Tabla 2.12. Características adicionales de GPON y LR-PON [73].

Parámetro	GPON	LR-PON
Longitud máxima de alcance entre OLT y ONT.	≤ 60 km	≥ 100 km
Fibra óptica	G.652.D	G.652.D
Longitud de onda de trabajo	Ascendente: banda O. Descendente: en sistemas de una sola fibra banda S y en sistemas de dos fibras banda O.	Banda C con canales DWDM.
Rango de atenuación permitida en la ODN entre el OLT y el ONT.	La recomendación UIT-T G.982 define tres clases de atenuación A, B y C: Clase A: 5 a 20 dB. Clase B: 10 a 25 dB. Clase C: 15 a 30 dB.	No especificado

2.4 CASOS DE APLICACIÓN

En esta sección, se proponen dos opciones de posibles escenarios o casos de aplicación para implementación de redes PON, donde cada uno representa un diferente tipo de mercado, se han escogido los sectores descritos a continuación con la finalidad de analizar la efectividad y funcionalidad de las tecnologías PON estudiadas, aplicadas en cada escenario. Los casos presentados serán de ayuda para comparar las características de cada tecnología xPON vs LR-PON, bajo los mismos parámetros de implementación y concluir en cada caso cuál tecnología es la que más ventajas provee según el escenario en la que se aplique.

Por otra parte, en base a los casos de aplicación presentados y la información técnica estudiada, se realizará el análisis de factibilidad económica en el siguiente capítulo de este proyecto.

2.4.1 ESCENARIO 1

Para el primer escenario se ha escogido una zona de carácter comercial, donde los principales clientes serán entidades financieras, centros ejecutivos, edificios residenciales y centros comerciales. En este caso se pone como ejemplo el sector Lñaquito, el cual posee una superficie aproximada de 1,8 km² [74] y un promedio de 42,500 habitantes [75]. En la figura 2.27 se muestra un mapa del sector. Además, el sector de Lñaquito posee una de las mayores concentraciones de entidades financieras y bancarias de la ciudad de Quito, un listado de las mismas se muestra en la tabla 2.13 a continuación:

Tabla 2.13. Entidades Financieras en el Sector Lñaquito al 2017

Entidad	Número de sucursales
Banco del Pacífico	1
Banco Bolivariano	1
Banco del Pichincha	2
Banco de Guayaquil	2
Banco Internacional	1
Banco del Pacífico	1
Dinners Club	1
Banco del Austro	1
Total	10

En este sector se encuentran varios centros de comercio listados en la tabla 2.14.

Tabla 2.14. Centros de Comercio en el Sector Lñaquito al 2017

Entidad	Número de locales
Quicentro Shopping	210
Centro Comercial Naciones Unidas	86
Coral Hipermercados	1
Mega Santa María	1
Novicompu	1
Techresourcec	1
Total	300

También se puede encontrar varios centros ejecutivos como los mostrados en la tabla 2.15.

Tabla 2.15. Centros ejecutivos en el Sector Iñaquito al 2017

Entidad	Número de centros
Embajada de Cuba	1
Instituto de Seguridad de la Policía Nacional	1
Policía Judicial	1
Embajada de Canadá	1
Embajada de Brasil	1
Total	5

Finalmente se lista en la tabla 2.16, los centros educativos y de atención médica que se ubican en el sector Iñaquito.

Tabla 2.16. Centros Educativos y de Atención Médica en el Sector Iñaquito al 2017

Entidad	Número de centros
Instituto Tecnológico Superior Central Técnico	1
Escuela Fiscal Mixta República de Paraguay	1
Clínica “El Batán del Pozo”	1
Fundación “Vista para Todos”	1
Total	4

Para conocer el número de hogares en el sector hay que tener en cuenta que el promedio de personas por hogar en Ecuador es “3.78” [76], por lo tanto el número de hogares en promedio se calcula de acuerdo a la ecuación 2.6:

$$42.500 \text{ habitantes} / 3,78 = 11.243,39 \text{ hogares} \approx 11.243 \text{ hogares} \quad (2.6)$$

Se calcula que en Iñaquito hay un promedio de 11,243 hogares. De acuerdo a lo mencionado en [30], el 14,74% de la población en Ecuador al 2017 tiene conexión a través de fibra óptica.

Con este porcentaje y adicionalmente el número de abonados resultante de las tablas anteriores, se calcula el número total de abonados en este escenario, como se indica en la ecuación 2.8.

$$11.243 \text{ hogares} * 0,1474 = 1.657,22 \text{ abonados} \quad (2.7)$$

$$1.657,22 \text{ abonados} + 319 \text{ abonados} \approx 1.977 \text{ abonados totales} \quad (2.8)$$



Figura 2.27. Mapa del sector Iñaquito

2.4.2 ESCENARIO 2

Por otra parte este escenario representa una zona con menor cantidad de edificios, ubicados de manera más dispersa, y con mucho menor número de habitantes que en el escenario 1. En este caso se tomará como ejemplo el barrio de La Merced

ubicado en el Valle de los Chillos, La superficie aproximada de la parroquia es de “31,71 km² y tiene 8394 habitantes” [77]. En la figura 2.28 se muestra un mapa de la parroquia. En este caso, los clientes finales se conformarán principalmente por hogares.

La parroquia de La Merced se conforma de aproximadamente 2.221 hogares de acuerdo a lo calculado en la ecuación 2.9.

$$8.394 \text{ habitantes} / 3,78 = 2.220,63 \text{ hogares} \quad (2.9)$$

Sin embargo de acuerdo a las estadísticas presentadas por la Arcotel para el acceso de fibra óptica, el número de abonados es el calculado en la ecuación 2.10.

$$2.220,63 \text{ hogares} * 0,1474 = 327,32 \text{ abonados} \approx 328 \text{ abonados} \quad (2.10)$$

Es decir que en este caso, el número de clientes será de 328 abonados, aproximadamente una sexta parte del total de clientes que en el escenario 1.



Figura 2.28. Mapa del sector La Merced

2.4.3 COMPARATIVA EN FUNCIÓN DE CADA TECNOLOGÍA

En la tabla 2.20 se presenta un cuadro comparativo de cada escenario propuesto en función de cada tecnología estudiada, desde el punto de vista técnico, que es la esencia de este trabajo de titulación.

En cada tecnología se tomará en cuenta las características técnicas estudiadas y se analizará en qué escenario es más conveniente realizar una implementación. Entre las características a considerar, se encuentran la distancia máxima de alcance, velocidad de transmisión y relación de división máxima.

A continuación, en la tabla 2.17 se resumen brevemente las características de los escenarios propuestos.

Tabla 2.17 Parámetros de cada escenario propuesto.

Parámetros	Escenario 1	Escenario 2
Área geográfica (km ²)	1.8	31.86
# de clientes finales	1,977	328
Tipo de usuarios	Corporativos y residenciales	Usuarios residenciales

En la tabla 2.18 se indica el número de puertos del OLT requeridos por tecnología, para lo cual es necesario recalcar que EPON indica un número máximo de 16 ONT por puerto EPON, GPON especifica 64 ONT por puerto, NG-PON menciona un máximo de 256 ONT por puerto y LR-PON un máximo de 1024 ONT por puerto del OLT. Además se incluye la estimación de crecimiento al año 2022, teniendo en cuenta una tasa de crecimiento poblacional promedio en Ecuador de 1,7% [78].

En las ecuaciones 2.11 y 2.12, se muestran los cálculos realizados:

- Número de abonados al año 2017 en el escenario 1: 1.977.
- Proyección de habitantes en el mismo sector al año 2022, teniendo en cuenta un crecimiento poblacional anual del 1,7% :

$$1.977 \text{ abonados} * (1 + 0,17)^5 = 4.334,47 \text{ abonados} \quad (2.11)$$

- Número de abonados al año 2017 en el escenario 2: 328.
- Proyección de habitantes en el mismo sector al año 2022, teniendo en cuenta

un crecimiento poblacional anual del 1,7% :

$$328 \text{ abonados} * (1 + 0,17)^5 = 719,12 \text{ abonados} \quad (2.12)$$

El número de puertos se calcula dividiendo el número de abonados para la relación de división máxima permitida por tecnología, como se indica en la ecuación 2.13.

- Relación de división en EPON 1:16 y 1977 abonados

$$1.977 \text{ abonados} / 16 \text{ puertos} \approx 124 \text{ puertos} \quad (2.13)$$

Tabla 2.18 Especificación del número de puertos por tecnología PON en 2017 y 2022

	Escenario 1		Escenario 2	
	Año 2017 (1.977 abonados)	Año 2022 (4.335 abonados)	Año 2017 (328 abonados)	Año 2022 (720 abonados)
Tecnología	# puertos	# puertos	# puertos	# puertos
EPON (1:16)	124	271	21	45
GPON (1:64/1:128)	31/16	68/34	6/3	12/6
NG-PON 1 (1:64/1:128/1:256)	31/16/8	68/34/17	6/3/2	12/6/3
NG-PON 2 (1:256)	8	17	2	3
LR-PON (1:512)	4	9	1	2

En la tabla 2.19 se muestra un resumen del cálculo realizado para obtener la velocidad percibida por cada usuario de acuerdo a la tecnología y la relación de división máxima en cada una.

Tabla 2.19. Cálculo de las velocidades de transmisión percibidas por usuario

Tecnología	Velocidad de transmisión total	Velocidad de transmisión por usuario
EPON	1 Gbps simétrico	62,5 Mbps simétrico
10G-EPON	UL:1 Gbps; DL: 10 Gbps	UL: 31,25 Mbps; DL: 312,5 Mbps
G-PON	UL mín: 155 Mbps UL máx: 2,4 Gbps DL mín: 1,2 Gbps DL máx: 2,4 Gbps	UL mín: 2,42 Mbps UL máx: 37,5 Mbps DL mín: 18,75 Mbps DL máx: 37,5 Mbps
NG-PON 1	UL: 2,5 Gbps DL: 10 Gbps	UL:19,53 Mbps DL:78,12 Mbps
NG-PON 2	UL: 10 Gbps DL: 40 Gbps	UL: 39,06 Mbps DL: 156,25 Mbps
LR-PON	10 Gbps simétrico	19,53 Mbps simétricos

Tabla 2.20. Comparativa de escenarios de aplicación con cada tecnología

Tecnología	Escenario 1	Escenario 2	Observaciones
EPON	En este escenario se tienen en cuenta un número aproximado de 124 puertos necesarios para dar servicio a todos los habitantes de este caso, además, los servicios ofrecidos por EPON y mencionados en la tabla 2.9 son orientados a usuarios residenciales, pues no soportan muchos servicios corporativos como VoIP, telepresencia, videoconferencia, etc.	En este escenario se necesitan alrededor de 21 puertos, además, el alcance proporcionado por esta tecnología es suficiente para cubrir la superficie de esta zona, y al ser un mercado de tipo residencial, la velocidad proporcionada es suficiente para cubrir los requerimientos del usuario.	Tasa de transmisión de 1Gbps simétrico, alcance de 10 a 20km, relación de división de 1:16 y permite ofrecer servicios <i>triple play</i> . De acuerdo a lo analizado en cada escenario se concluye que esta tecnología es rentable al implementarla en el escenario 2, sin embargo, es posible implementarla en el escenario 1 pero representaría un aumento de costos que se incrementaría significativamente al aumentar el número de usuarios.
GPON	En este escenario se necesitan alrededor de 31 puertos, además, esta tecnología es una de las más utilizadas para ofrecer servicios de alta capacidad por las operadoras del país, el alcance y las velocidades ofrecidas son suficientes para garantizar la satisfacción de los servicios en este caso.	En este escenario se necesitan alrededor de 6 puertos, lo cual, representa menores costos por la menor cantidad de usuarios, además, como se observa en la tabla 2.19 el rango de velocidades es adecuado para ofrecer servicios de tipo residencial.	Esta tecnología proporciona 7 combinaciones de velocidades de transmisión las cuales se mencionan en la tabla 2.3, un alcance máximo de 20 km y una relación de división de 1:64. Dependiendo de la configuración de velocidades y tasas de división en la red, esta tecnología es viable tanto en el escenario 1 como en el escenario 2.
NG-PON 1 y NG-PON 2	En ambos escenarios se necesitan mínimo 8 puertos, además, de acuerdo a las características de ambas tecnologías resultan ser una opción bastante eficiente y permiten cumplir con los requerimientos del tipo de usuarios en esta zona.	En este escenario se necesitan mínimo 2 puertos, además, las prestaciones de estas tecnologías son demasiado elevadas para cubrir los servicios requeridos, por lo que los recursos no serían utilizados eficientemente y representaría pérdidas para las operadoras.	NG-PON 1 soporta 2,5Gbps de subida y 10Gbps de bajada, alcance de hasta 20km y relación de división de 1:128. Por otra parte, NG-PON 2 soporta 10 Gbps en el canal de subida y 40 Gbps en el de bajada, alcance de hasta 60 km y relación de división de 1:256. En ambos casos, se aprovecharían de mejor manera los recursos de red si se aplican en el escenario 1 pues allí existe mayor demanda en comparación al escenario 2.
LR-PON	En este escenario se necesita alrededor de 4 puertos, además, esta tecnología permite ofrecer servicios FTTH disminuyendo los costos utilizados.	En este caso se necesita 1 puerto LR-PON, ofreciendo servicio a una gran cantidad de usuarios a menor costo que otras tecnologías.	A pesar de que las prestaciones de esta tecnología permiten ofrecer servicios en ambos escenarios la migración a LR-PON puede resultar compleja y con una inversión inicial elevada.

2.4.4 COSTOS

Si bien el tema propuesto es realizar un análisis técnico comparativo entre las tecnologías PON convencionales y las LR-PON, en el siguiente capítulo se realizará un análisis de factibilidad económica, como una sección adicional que permita aportar al análisis de factibilidad de implementar una LR-PON en el país. Por lo tanto, se mencionará con mayor detalle costos de equipos, costos operacionales, costos de mantenimiento, costos de materiales, entre otros.

A pesar de que en este capítulo no se detallan todos los costos involucrados en una implementación LR-PON, es importante mencionar que debido a que las ONU, según la arquitectura que maneja una red PON, deben ser ubicadas en la locación del suscriptor y el costo no debe ser compartido por múltiples consumidores, el diseño y costo de una ONU es un factor clave en la aceptación y desarrollo de sistemas de las distintas tecnologías estudiadas en este capítulo.

CAPÍTULO 3

FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA LR-PON EN EL PAÍS

Las redes PON de largo alcance, son una alternativa a las redes PON convencionales, las cuales, proponen un alcance de hasta 100 km y capacidades de hasta 40Gbps en el enlace de bajada y 10Gbps en el enlace de subida, además, las altas prestaciones mencionadas se logran mediante la introducción de amplificadores ópticos y la tecnología WDM.

De esta manera, LR-PON permiten combinar la red metropolitana y la red de acceso en una sola red integrada, simplificando la red de telecomunicaciones. En términos generales, las LR-PON disminuyen el número de equipos e interfaces, elementos de la red, e inclusive nodos completos.

Por otra parte, una implementación de LR-PON tiene en cuenta muchos aspectos, por lo que en este capítulo se analizará la factibilidad técnica, y adicionalmente se incluye la factibilidad económica y legal, para realizar una implementación con tecnología LR-PON en el país, es decir, la existencia de equipos, tecnología, infraestructura, existencia de normas, existencia de recursos económicos que permitan llevar a cabo el proyecto con el menor riesgo posible.

En general, para realizar una implementación es muy importante realizar la evaluación de los recursos disponibles y la lógica de los procesos, que permitan obtener beneficios y mejoras de la situación actual, para ello es necesario conocer detalladamente los parámetros técnicos, legales y los recursos financieros necesarios.

3.1 FACTIBILIDAD TÉCNICA

En base a los aspectos técnicos estudiados en el capítulo anterior, se analizará la posibilidad de satisfacer los requerimientos tecnológicos asociados a una arquitectura de red, que permita proporcionar los beneficios de una tecnología de largo alcance sobre PON.

En esta sección se presenta la justificación técnica para el despliegue de una LR-PON, teniendo en cuenta las limitaciones lógicas y físicas que enfrenta la instalación de una nueva tecnología en la red de acceso. En este sentido, es fundamental conocer cuál es la situación actual del país en cuanto a acceso a servicios de banda ancha y despliegue de fibra óptica hasta el hogar.

Es evidente el crecimiento de infraestructura de fibra óptica en Ecuador en los últimos años, siendo tal, que la longitud del tendido de fibra óptica a lo largo del país, ha crecido notablemente desde el año 2006, donde apenas se contaba con aproximadamente 3500 km, frente a los más de 60000 km actualmente. El aumento significativo del despliegue de fibra óptica ha permitido un “crecimiento de casi 7 veces en las suscripciones de banda ancha fija en el período 2006-2015” [79].

Sin embargo, el nivel de penetración de banda ancha fija por fibra óptica todavía es muy bajo en el país, de apenas el 16,34% [30] al 2017. Esto se debe a que en Ecuador, la mayor parte de la planta externa de las redes de telecomunicaciones es predominantemente de cobre, y recientemente se están instalando redes FTTH con tecnología GPON, es decir el desarrollo tecnológico de las redes se encuentra significativamente atrasado en relación a otros países del mundo.

Estas estadísticas han causado preocupación, razón por la cual el Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información (MINTEL) ha desarrollado el Plan Nacional de Telecomunicaciones y Tecnologías de Información del Ecuador 2016- 2021. Entre uno de los proyectos propuestos en este plan, se encuentra, la fomentación del despliegue de infraestructura de última milla que permita acelerar la implementación de servicios de banda ancha.

Dicho proyecto abordará el objetivo de aumentar el porcentaje de hogares con fibra óptica en el acceso, y en general incrementar el porcentaje de penetración de banda ancha fija a 59% para el 2021 [79].

LR-PON es indudablemente una solución que permite cumplir con los niveles de penetración de fibra óptica en el acceso, que se buscan alcanzar en Ecuador en los próximos años, sin embargo, una implementación de este tipo de redes puede resultar algo desafiante por el hecho del bajo nivel de desarrollo de las PON en el

país. Una solución factible, sería la migración de las actuales redes GPON a LR-PON.

3.1.1 MIGRACIÓN DE GPON A LR-PON

La finalidad de implementar LR-PON a partir de un despliegue ya realizado de GPON, es considerar LR-PON como una solución a mediano plazo con la ventaja de reutilizar el equipo estandarizado GPON existente.

Para llevar a cabo este fin, se puede tomar como base el estudio experimental realizado en [80] el cual se muestra en la figura 3.1. Este desarrollo nace en función de que la gran parte de los estudios realizados acerca de LR-PON demuestran un trabajo extenso en la capa física, pero se ha realizado relativamente poco en los protocolos de capa superior.

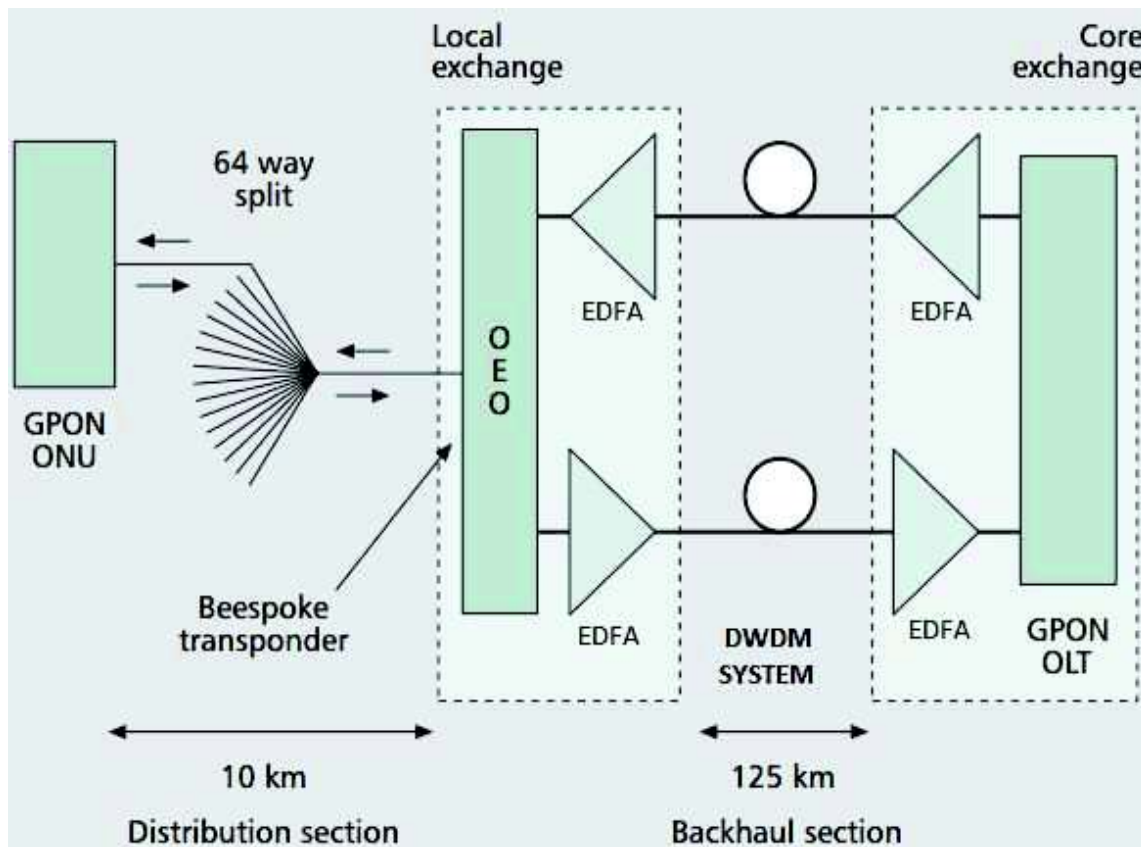


Figura 3.1. Configuración experimental para GPON extendido.

Por lo tanto, en este proyecto se demuestra la extensión en el alcance de una GPON de 20 km a 135 km, para evaluar el rendimiento de los protocolos GPON a esta

distancia, obteniendo los siguientes resultados:

- El alcance lógico máximo especificado para GPON es de 60 km con un BER de 10^{-9} , con la configuración planteada se logró ampliar con éxito tanto el alcance físico como el lógico hasta 135 km.
- Se mejoró el BER a 10^{-10} en ambas direcciones, logrando transportar con éxito *Fast Ethernet* como clientes E1.
- El estándar GPON exige un tiempo de ida y vuelta ≤ 3 ms para clientes E1, con la distancia total implementada que fue de 135 km más un tramo de 11 km de fibra compensadora de dispersión, se comprobó un tiempo de ida y vuelta igual a 2.55 ms.

3.1.1.1 Enlace Descendente

En la dirección de bajada (desde el OLT hasta el ONT), cumpliendo con el estándar GPON, el OLT trasmite a una longitud de onda en la región de 1490 nm operando a una velocidad de 2.488 Gbps. La longitud de onda descendente se convertirá a una longitud de onda compatible con DWDM de 1552.924 nm mediante un transpondedor ubicado inmediatamente después del OLT en la CO, esta conversión es necesaria ya que esta arquitectura explota un sistema DWDM para lograr la transmisión a larga distancia de 125 km de extensión con fibra G.652.D y con un amplificador EDFA en cada extremo.

La señal es amplificada en la oficina local por el EDFA e ingresa a otro transpondedor “hecho a medida”, para que las longitudes de onda se conviertan nuevamente a 1490 nm, para cumplir con el estándar GPON.

Finalmente, cada longitud de onda se divide entre un máximo de 64 ONT dentro de la sección de *Drop* correspondiente a 10 km. Se demostró que en esta sección, la pérdida combinada de los *splitters* y los 10 km de fibra fue de 23 dB.

3.1.1.2 Enlace Ascendente

En el enlace de subida, cumpliendo con el estándar GPON, se tiene una velocidad de 1.244 Gbps y las ONT transmitirán a una longitud de onda de 1310 nm, ésta

será convertida en el transpondedor “hecho a medida” a una longitud de onda compatible con DWDM de 1559.412 nm para transmitirse a través del sistema DWDM de 125 km de fibra G.652.D. En el lado del OLT, se coloca un filtro óptico antes del receptor en modo ráfaga para mejorar la SNR. Debido a la incorporación del filtro óptico, el control de temperatura del sistema debe ser preciso para evitar que la longitud de onda no sea reconocida.

En el sistema DWDM (desde la oficina local hasta el nodo de servicio) se utilizan dos fibras, una para la transmisión y otra para la recepción, por lo que el transpondedor debe adaptarse entre la operación de una sola fibra en el lado de acceso y la operación de fibra dual en el lado del metro, además en el enlace de subida contiene un receptor en modo ráfaga de 1.244 Gbps para recibir las señales de los ONT.

3.1.1.3 Transpondedor hecho a medida

En la figura 3.2 se observa el diseño experimental del transpondedor “hecho a medida”.

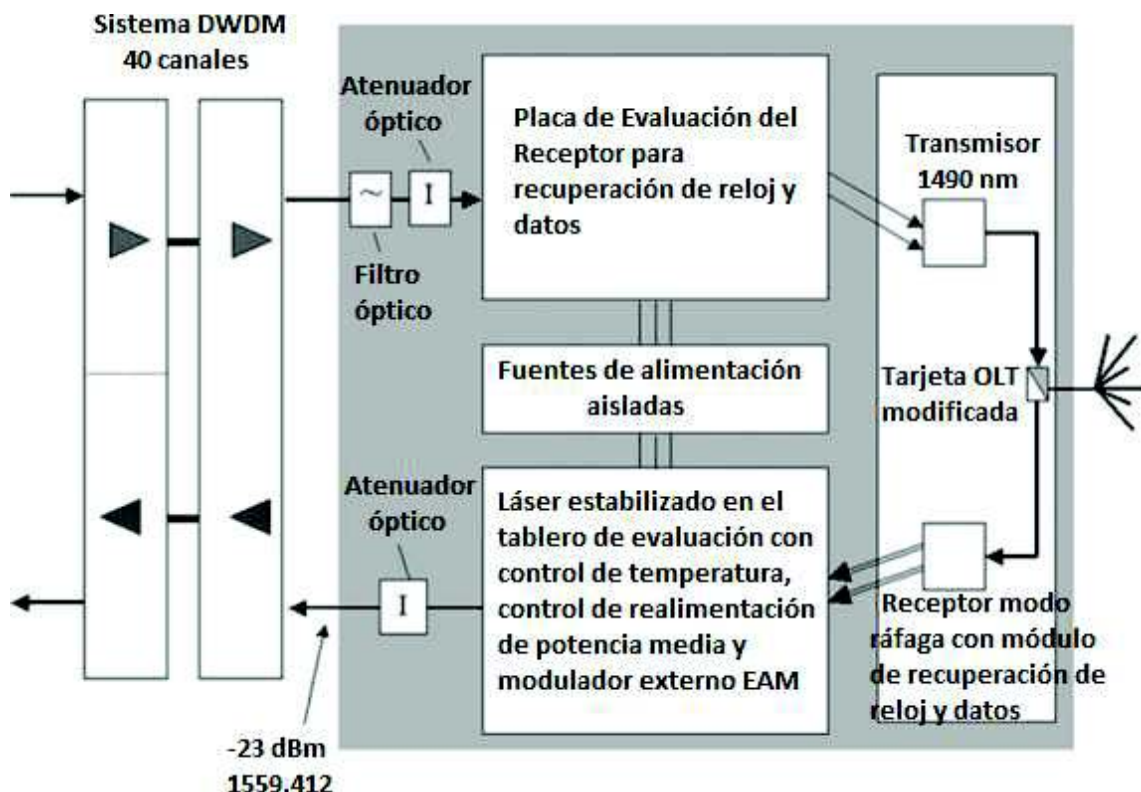


Figura 3.2. Diseño del transpondedor “hecho a medida” [80].

En base a una configuración de este tipo se considera factible una implementación LR- PON en el país, teniendo en cuenta que una LR-PON no debe considerarse puramente como una tecnología para introducir fibra hasta las instalaciones del abonado, también podrían usarse para alimentar una cantidad de gabinetes remotos DSL (por ejemplo, con Gigabit Ethernet). De esta manera, una red de acceso estándar puede convertirse en una LR-PON introduciendo técnicas DWDM y amplificadores ópticos.

Por lo tanto, se puede decir que no existe una razón técnica por la cual no todos puedan acceder a una conexión de banda ancha en su hogar usando sistemas de acceso óptico que están disponibles comercialmente en la actualidad; los obstáculos son puramente económicos.

3.2 FACTIBILIDAD LEGAL

En la actualidad, las recomendaciones de la ITU-T en cuanto a redes ópticas pasivas han sido definidas para las tecnologías GPON, XG-PON y NG-PON; y, por otra parte la IEEE ha propuesto las recomendaciones para los estándares EPON y 10G-EPON, los cuales, se basan en el estándar Ethernet.

Es decir, al día de hoy no existe ninguna recomendación o definición oficial para las LR- PON de alguna de las instituciones mencionadas. Por lo cual, la información presentada en este documento se ha obtenido a partir de estudios técnicos, tesis doctorales, estados del arte, etc., los mismos que a través de la realización de pruebas, implementaciones y simulaciones han permitido obtener resultados del comportamiento de este tipo de redes bajo diferentes escenarios.

Los estudios más relevantes son los siguientes: PLANET enfocado al desarrollo de la arquitectura SuperPON; el proyecto realizado por British Telecom en el Reino Unido, el proyecto PIEMAN para el desarrollo de una red híbrida, el proyecto DISCUS y el proyecto SUCCESS.

Todos estos proyectos fueron nombrados en el estudio de las distintas arquitecturas de las LR-PON en el capítulo 2.

Por otra parte, en Ecuador el sector de las Telecomunicaciones está regularizado y

enmarcado dentro de un entorno legal, lo que permite el adecuado funcionamiento, desarrollo y avance del sector.

3.2.1 ENTIDADES REGULADORAS

Entre los organismos nacionales de control de las telecomunicaciones, se encuentran los siguientes:

- **MINTEL (MINisterio de TELEcomunicaciones y sociedad de la información)**, entre sus funciones se encuentran, apoyar y coordinar el desarrollo de las tecnologías de la información y comunicación en el país, incluyendo las telecomunicaciones y el espectro radioeléctrico. Emitir políticas y planes generales, realizar el seguimiento y evaluación de su implementación, “coordinando acciones con los actores de los sectores estratégicos para garantizar el acceso igualitario a los servicios y promover su uso efectivo, eficiente y eficaz, que asegure el avance hacia la sociedad de la información” [81].
- **ARCOTEL (Agencia de Regulación y COntról de las TELEcomunicaciones)**, se encuentra estrechamente vinculada con el MINTEL, se encarga de la administración, regulación, control y gestión de todo lo relacionado a las telecomunicaciones y el espectro radioeléctrico, así como de los aspectos técnicos involucrados en la gestión de medios de comunicación social que usen frecuencias del espectro radioeléctrico o instalen y operen redes [82].
- **CNT E.P. (Corporación Nacional de Telecomunicaciones - Empresa Pública)**, esta empresa actúa como ente de administración y regulación de las telecomunicaciones y el espectro radioeléctrico en el país, y con facultades para desarrollar y proponer normas técnicas para las implementaciones de redes en el Ecuador.

Entre los organismos internacionales que forma parte Ecuador se encuentran:

- **CITEL (Comisión Interamericana de TELEcomunicaciones)**, es una entidad de la Organización de los Estados Americanos (OEA), “posee

autonomía técnica en el desempeño de sus funciones, dentro de los límites de la Carta de la Organización, del Estatuto de la CITELE y los mandatos asignados por la Asamblea General de la Organización” [83].

Las principales funciones que realiza son coordinar las normas necesarias para la facilitación del despliegue de infraestructuras y la entrega de servicios de telecomunicaciones, gestión y control del espectro de frecuencias radioeléctricas para disminuir el costo de la prestación de servicios inalámbricos, proporcionar capacitación acerca de Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC), ayuda a los países en la generación de nuevas estrategias de desarrollo de las telecomunicaciones; todo esto con el único fin de promover y alcanzar un desarrollo económico y social igualitario en la región [83].

- **UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones)**, es el organismo especializado en telecomunicaciones de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), se encarga de asignar el espectro radioeléctrico mundial y las órbitas de los satélites, desarrolla los estándares técnicos para asegurar la interconexión e interoperabilidad de las redes y las tecnologías, además se encarga de asegurar el acceso a las TIC en las comunidades subatendidas en el mundo [84].

3.2.2 NORMAS JURÍDICAS PARA EL DESPLIEGUE DE SERVICIOS DE TELECOMUNICACIONES EN ECUADOR

En el país, existe el Convenio de Constitución de la UIT, el cual, tiene como finalidad la adhesión a la Constitución de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, este convenio establece como uno de sus objetivos “impulsar el desarrollo de los medios técnicos y su más eficaz explotación, a fin de aumentar el rendimiento de los servicios de telecomunicación, acrecentar su empleo y generalizar lo más posible su utilización por el público” [85].

Además, en Ecuador existen varias Normas Jurídicas establecidas para los servicios de Telecomunicaciones, la principal es la Ley Orgánica de Telecomunicaciones, la cual habla en el Art. 11 acerca del establecimiento y

explotación de redes públicas de telecomunicaciones.

En este artículo se menciona que “los operadores de redes públicas de telecomunicaciones deberán cumplir con los planes técnicos fundamentales, normas técnicas y reglamentos específicos relacionados con la implementación de la red y su operación, a fin de garantizar su interoperabilidad con las otras redes públicas de telecomunicaciones” [86].

También se menciona que “es facultad del Estado Central, a través del Ministerio rector de las Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información y de la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, el establecer las políticas, requisitos, normas y condiciones para el despliegue de infraestructura alámbrica e inalámbrica de telecomunicaciones a nivel nacional” [86].

En este contexto, se puede constatar que en la Base Legal de la ARCOTEL existen varias normas jurídicas para el despliegue de servicios de telecomunicaciones, a continuación se nombran las que tienen más relación en cuanto al despliegue de redes ópticas pasivas [87]:

3.2.2.1 Norma técnica para el ordenamiento, despliegue y tendido de redes físicas aéreas de servicios del régimen general de telecomunicaciones y redes privadas

Esta norma permite regular el despliegue y tendido, identificación, ordenamiento y reubicación de las redes físicas aéreas de servicios de telecomunicaciones, servicios por suscripción (audio y video modalidad cable físico) y redes privadas.

En esta norma se presentan los lineamientos técnicos de ordenamiento e implementación de redes físicas aéreas, como por ejemplo, la ubicación de elementos activos y pasivos en postes, tipo de herrajes y utilización de los mismos, el tipo de etiquetado que debe ser colocado, la instalación de redes acometidas, la colocación de puestas a tierra, además de los derechos y obligaciones de los propietarios de redes físicas aéreas.

Únicamente podrán realizar el despliegue de redes físicas aéreas, los poseedores de títulos habilitantes, para el despliegue y tendido de redes físicas aéreas los poseedores de títulos habilitantes, deberán contar con la respectiva autorización a

través de un contrato de uso de postes con la empresa eléctrica o el propietario de los mismos, siendo responsabilidad de los poseedores de los títulos habilitantes en su calidad de propietarios de las redes, el desplegarlas y mantenerlas de acuerdo a la presente Norma [88].

3.2.2.2 Norma técnica para el despliegue de infraestructura de soterramiento y de redes físicas soterradas para la prestación de servicios del régimen general de telecomunicaciones y redes privadas

Esta norma tiene por objeto, regular el despliegue de infraestructura de soterramiento, y de redes físicas soterradas (fibra óptica, cables de cobre, cables coaxiales, HFC: híbrido de fibra y coaxial y otras tecnologías que se desplieguen por medios alámbricos), para la prestación de servicios de telecomunicaciones y la operación de redes privadas.

En esta norma se detallan varios lineamientos técnicos para la planificación, diseño, construcción y despliegue de infraestructura de soterramiento de telecomunicaciones, también se mencionan los requerimientos mínimos para despliegue y construcción de infraestructura de soterramiento para el despliegue de redes físicas de telecomunicaciones, los tipos, materiales y especificaciones técnicas de ductos utilizados, tipo de cables y número de cables por ducto [89].

3.2.2.3 Reglamento para la prestación de servicios de telecomunicaciones y servicios de radiodifusión por suscripción

Este reglamento tiene por objeto, regular la prestación de servicios de telecomunicaciones y de radiodifusión por suscripción definidos en la Ley Orgánica de Telecomunicaciones (LOT).

Entre los artículos del reglamento se menciona que los servicios de telecomunicaciones y servicios de radiodifusión por suscripción, se brindarán en régimen de competencia, según el área de prestación autorizada y demás condiciones establecidas en el ordenamiento jurídico vigente.

Además, la venta y distribución de servicios, podrá realizarse por medio de reventa, acuerdos de distribución u otro tipo de acciones, siempre y cuando se haya

celebrado acuerdo o contrato con el prestador de servicios de telecomunicaciones y radiodifusión por suscripción o por medio de un intermediario que en forma previa haya celebrado un convenio o acuerdo con el prestador de dichos servicios [87].

3.2.2.4 Reglamento para otorgar títulos habilitantes para servicios del régimen general de telecomunicaciones y frecuencias del espectro radioeléctrico

Este reglamento tiene por objeto, establecer los requisitos, procedimientos, plazos y criterios para el otorgamiento, modificación, renovación y terminación o extinción de títulos habilitantes para la prestación de servicios de telecomunicaciones y de radiodifusión, operación de redes privadas, así como del uso y/o explotación del espectro radioeléctrico.

El otorgamiento se lo realiza a los usuarios que cumplen con los requisitos legales, técnicos y económicos – financieros, según los formatos establecidos. El proceso de otorgamiento termina con la recepción del pago por derechos de concesión para los casos que aplique y la suscripción del acta de sujeción con la que el usuario acepta las condiciones estipuladas en el título habilitante y la aplicación del ordenamiento jurídico vigente. El poseedor del título habilitante puede solicitar: cesión, transferencia, enajenación, extinción, modificaciones legales o técnicas del título habilitante [90].

3.2.2.5 Reglamento de interconexión

El presente reglamento tiene como objeto definir los conceptos básicos y obligaciones sobre los cuales se debe desarrollar la interconexión que se realice en cada uno de los Países Miembros de la Comunidad Andina. Este reglamento menciona que la interconexión podrá realizarse a través de uno de los siguientes mecanismos: por Acuerdo Negociado entre operadores de redes públicas de telecomunicaciones o por Oferta Básica de Interconexión presentada por un operador de redes públicas de telecomunicaciones a consideración de la Autoridad de Telecomunicaciones competente y aprobada por ella.

En cuanto al aspecto económico se menciona en el reglamento que la interconexión deberá ser económicamente eficiente y sostenible, atendiendo a cargos de interconexión que preserven la calidad a costos eficientes. Adicionalmente, se

menciona que los acuerdos y las ofertas básicas de interconexión tomarán en cuenta, como mínimo [91]:

- Las condiciones acordadas y sus términos.
- Los diagramas de interconexión de los sistemas.
- Las características técnicas de todas las señales a transmitir por el sistema, tales como señales principales y auxiliares, y las condiciones técnicas de las interfaces.
- Los requisitos de capacidad de los sistemas involucrados.
- Los índices apropiados de calidad de servicio.
- La responsabilidad de cada operador de redes públicas de telecomunicaciones con respecto a la instalación, prueba, operación y mantenimiento de equipos y enlaces.
- La fecha o plazo en que se completarán las facilidades necesarias para la interconexión y en que los servicios solicitados estén disponibles para el uso y con los niveles de calidad exigidos en el país donde se realice la interconexión.

Se puede notar que los reglamentos mencionados tienen mucha relación en cuanto al despliegue de fibra óptica como medio de transmisión más no específicamente al despliegue de redes ópticas pasivas.

3.2.2.6 Normas técnicas de CNT para redes de telecomunicaciones con fibra óptica

El documento emitido por la Corporación Nacional de Telecomunicaciones denominado “Normas Técnicas de Diseño y Construcción de redes de Telecomunicaciones con Fibra Óptica” ofrece una base para el despliegue de redes PON, el cual, tiene la finalidad de “establecer la normativa de referencia para el diseño y construcción de redes de telecomunicaciones con fibra óptica” [92]. En este documento se definen inicialmente las especificaciones técnicas de los materiales y equipos utilizados en los enlaces de redes con fibra óptica, las cuales, se describen en la tabla 3.1:

Tabla 3.1. Especificaciones Técnicas de materiales y equipos utilizados en enlaces de telecomunicaciones de fibra óptica desarrolladas por CNT [92].

Material/Equipo	Descripción
Fibra Óptica	Fibra óptica monomodo G.652.D, G.655.C ⁴⁸ con configuración canalizado y protección antioedores, y configuración aéreo tipo ADSS ⁴⁹ para vanos ⁵⁰ de 90, 120, 200, 300, 500 y 800m. Longitud de bobina: 5000m + 2% Vida útil mínima de 20 años
ODF (<i>Optical Distribution Frame</i>)	Material: acero o aluminio Capacidad de fibras: 6, 12, 18, 24, 32, 48, 72, 96, 144
Cajas de empalme	Para 12, 24, 48, 96 y 144 hilos de fibra óptica, con sistema de aterramiento exterior. De plástico moldeada, fuertemente resistente a la tensión y altamente impermeable, formado de material termoplástico reforzado de color negro. De cierre hermético, para instalación en subsuelo, soportes aéreos y aplicaciones de pedestal. Con tapones que permitan usar las mangas para empalmes de extremo a extremo o empalmes internos (derivaciones).
Conectores	FC – FC, tipo D cuerpo metálico Pérdida de inserción: ≤ 0.4 dB. Pérdida de retorno: ≥ 30 dB
<i>Patch cords</i>	Cable monomodo G.652D ó G.655C, FC/PC, FC/UPC, FC/APC Longitudes de onda operativa: (1300 ± 30) nm, (1550 ± 30) nm y (1625 ± 30) nm
<i>Pigtails</i>	Cable monomodo G.652D ó G.655C, FC/PC, FC/UPC, FC/APC. Longitudes de onda: (850 ± 30) nm, (1300 ± 30) nm y (1550 ± 30) nm
Mangas	TIPO MECÁNICA: La capacidad debe variar de 12, 24 hasta 48 hilos. Que se la pueda utilizar tanto para empalmes aéreos como canalizados. Debe contener accesorios que permitan el correcto encaminamiento de los <i>buffers</i> e hilos de fibra. TIPO DOMO: La capacidad puede variar entre 12, 24, 48 hasta 96 hilos.

⁴⁸ G.655.C es especialmente utilizada para aplicaciones basadas en arquitecturas WDM con canales ópticos individuales de 2,5 Gbps o 10 Gbps

⁴⁹ Cable de fibra que no tiene partes metálicas, tiene una chaqueta de polietileno reforzado protegiendo los buffers de la fibra, los cuales son entorchados con varillas dieléctricas de relleno, son muy resistentes para interiores o exteriores.

⁵⁰ Distancia entre postes consecutivos en la misma acera que se emplean para el tendido de redes físicas aéreas.

Lo que respecta al diseño y construcción de una red, es importante tener en cuenta la realización previa de un estudio técnico para conocer factores como densidad poblacional, ubicación geográfica, requerimientos tecnológicos, nivel socio-económico, costo de implementación de las diferentes alternativas, disponibilidad de recursos técnicos, red de fibra óptica existente, demanda de tráfico para poder dimensionar la capacidad de tráfico que soportará el enlace, entre otros.

Adicionalmente, los diseños de enlaces de fibra óptica para redes de Planta Externa considerarán los siguientes aspectos:

- **Atenuación del enlace:** es una característica que se manifiesta como la pérdida de potencia de una señal que viaja a través de un medio de transmisión.
- **Impacto ambiental:** gracias al notable interés a nivel mundial en cuanto a la degradación ambiental hoy en día, se ha impulsado el proceso de cambio en el pensamiento global y las formas de interacción de la sociedad y la naturaleza.

Es por esto, que en el sector de las Telecomunicaciones esta preocupación tiene gran importancia, por ello es necesario conocer cuál es el impacto ambiental que generará una implementación con el fin de tomar medidas y contribuir con el cuidado del medio ambiente.

Cada operadora es responsable de los niveles de contaminación que genera, los cuales son regulados y controlados por el Ministerio del Ambiente en coordinación con el MINTEL.

- **Tipo de fibra óptica:** este aspecto se considera con el fin de que la elección del cable de fibra óptica a utilizar en una implementación, sea la adecuada y posea además las características necesarias para cumplir con los servicios solicitados por los usuarios, tanto para la red de *backhaul* como para la instalación en el cliente.
- **Conectores ópticos y empalmes:** es importante considerar estos aspectos pues las pérdidas que se introducen por utilización de empalmes

y conectores pueden constituir un factor muy importante en el diseño de sistemas de transmisión, especialmente en redes de gran distancia.

Existen tres tipos de tendidos de enlaces de fibra aplicados en Ecuador: canalizado, aéreo, o mixto, los cuales, se describen a continuación.

- **Canalizado:** el cable posee protecciones necesarias para su uso como puede ser una armadura metálica.
- **Aéreo:** existen dos tipos de cables para este tipo de tendido, figura 8⁵¹ y ADSS (*All Dielectric Self-Supported*).
- **Mixto:** en este tipo de tendido se puede dar dos configuraciones; cables aéreos utilizados en tramos canalizados o cables canalizados utilizados en tramos aéreos. Para la primera configuración se define máximo 500m de longitud y para la segunda configuración máximo 200m [92].

Lo expuesto en esta sección del trabajo ha sido un breve resumen del contenido en el documento emitido por la CNT, en base a dicho documento y las normas mencionadas, se puede concluir que existen reglamentos que buscan controlar y gestionar los procesos para la utilización e implementación de fibra óptica.

Por este motivo se puede decir que en el país este medio de transmisión guiado cada vez se ve más desplegado, no obstante, al hablar de redes ópticas pasivas se puede notar que las últimas tecnologías PON estudiadas en el capítulo anterior no se encuentran altamente desarrolladas o desplegadas en Ecuador.

La factibilidad legal principalmente dependerá de las operadoras, del planteamiento de ofrecer servicios con tecnología LR-PON, ya que de esta manera serán las encargadas de coordinar las acciones necesarias para garantizar el tendido e instalación de estas redes, mediante trámites de otorgamiento de permisos para realización de obras civiles necesarias para el soterramiento o adosamiento de la fibra, para el uso y ocupación de espacios de vía pública, permisos y licencias para

⁵¹ Cable óptico autoportado por un mensajero de acero galvanizado (figura 8), cubierto con una chaqueta de polietileno de mediana densidad. Internamente el cable está constituido por fibras ópticas tipo monomodo o multimodo, revestidas en acrilato, colocadas en mini tubos rellenos, agrupados en torno al elemento central.

el uso y ocupación del suelo, los cuales son emitidos por la entidad competente en cada Gobierno Autónomo Descentralizado.

3.3 FACTIBILIDAD ECONÓMICA:

Al momento de realizar una implementación, uno de los principales aspectos a tener en cuenta es el aspecto económico, puesto a que en función de los recursos disponibles se pueden tomar decisiones acerca del tipo de tecnología, equipos y materiales a utilizar en el proyecto.

Con base en los principios de las PON, las redes de acceso óptico de largo alcance proporcionan mayores ahorros de costos al extender el alcance físico de la red. De igual manera, como se ha mencionado anteriormente LR-PON elimina la necesidad de equipos adicionales para conectar la red de acceso al núcleo. En segundo lugar, el costo del equipo compartido en la red se reduce al aumentar el número de usuarios.

Por lo tanto, las redes de acceso óptico de largo alcance proporcionarían una solución rentable para instalar tecnología de acceso óptico.

En esta sección se realizará el análisis económico teniendo en cuenta los costos de inversión (CAPEX) y los costos operacionales y de mantenimiento (OPEX) contemplados en la implementación de redes LR-PON, con la finalidad de conocer si desde el punto de vista económico es factible una implementación de este tipo de redes frente a la implementación de redes PON convencionales.

Como se mencionó en el capítulo anterior, debido a que GPON es la tecnología PON más desplegada en el país, se estudiarán dos propuestas distintas para analizar la factibilidad económica, la primera en base a un despliegue con tecnología GPON y la segunda en base al despliegue con LR-PON.

Además considerará que el despliegue de LR-PON se realizará en base a un despliegue previo de GPON como se mencionó en la factibilidad técnica, es decir el OLT y el ONT utilizado por GPON se mantiene en el despliegue de LR-PON, lo que varía es la ODN de GPON de acuerdo a lo estudiado previamente en este trabajo.

3.3.1 DISTRIBUIDORES DE EQUIPOS Y MATERIALES PARA SOLUCIONES PON

Existen varios proveedores que a nivel nacional ofrecen materiales necesarios en la implementación de PON como fibra óptica, conectores, cajas de empalme, módulos SFP, *patch cords* ópticos, entre otros, los cual se listan a continuación:

- Totaltek
- Andean Trade
- Martel
- Digitec
- Hentel
- Cientelcom
- Casa del Cable
- Global Electric

Por otra parte, los equipos que poseen un mayor nivel de complejidad técnica en su configuración y administración, ya sean OLT, ONU, Amplificadores Ópticos, *Splitters*; Filtros ópticos, Moduladores, Switches Ópticos, ente otros, se encuentran mayormente a nivel internacional, donde de igual manera existen varias opciones como:

- Alcatel-Lucent
- Tellabs
- Huawei
- ZTE
- Cisco
- Motorola
- Furukawa

Como se puede notar, muchos de los equipos necesarios para el despliegue de LR-PON existen el mercado local o internacional, de esta manera se puede concluir nuevamente que el principal limitante no es la obtención de equipos y materiales, más bien es el presupuesto destinado para la implementación. A continuación se detallarán los equipos de tres marcas más penetrantes en el entorno de las PON.

3.3.2 EQUIPOS HUAWEI

3.3.2.1 OLT

Dentro de lo que corresponde a las OLT, Huawei ofrece tres series distintas: SmartAX EA5800, SmartAX MA5600T, SmartAX MA5800, las características de las mismas se indican en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Características técnicas de los diferentes modelos de OLT

OLT SERIE SMART AX EA5800	OLT SERIE SMART AX MA5600T	OLT SERIE SMART AX MA5800
<p>Estos equipos han sido diseñados con la finalidad de ofrecer redes con mayor capacidad de ancho de banda y velocidad de transmisión. Además, en estos equipos es posible configurar una amplia variedad de servicios ya que cuenta con acceso GPON, 10G-GPON, GE de punto a punto y 10 GE.</p>	<p>Dentro de esta serie existen cuatro modelos definidos, MA5600T (ETSI), MA5600T (IEC), MA5603T y MA5608T. “Esta serie integra capacidades muy altas de agregación y conmutación, admite una capacidad de panel de interconexión posterior de 3,2 Tbps, una capacidad de conmutación de 960 Gbps, 512000 direcciones MAC y un máximo de 44 canales de acceso 10 GE o 768 puertos GE” [93].</p> <p>Para los tres modelos mencionados existen versiones de software compatibles con las tarjetas físicas de servicio, lo cual se traduce en disminución de costos de operación y mantenimiento.</p>	<p>Se considera el primer NG-OLT (terminal de línea óptico de próxima generación) de la industria con una capacidad de 40 Gbps, posee un módulo de acceso a múltiples servicios, como servicios inteligentes de convergencia fijo móvil y funciones inteligentes como virtualización basada en SDN, que permite acelerar el lanzamiento de nuevos servicios y la rápida adaptación a la demanda de servicios diferenciados.</p> <p>“Cada slot de tarjeta ofrece una capacidad de 200 Gbps, lo que garantiza acceso sin bloqueos para XG-PON y 40G-PON de alta densidad. También cabe destacar que cada subrack admite hasta 32000 usuarios con ancho de banda sin bloqueo de 100 Mbps” [94].</p>

3.3.2.2 ONT

Por otra parte, Huawei ofrece varias series denominadas EchoLife para equipos ONT, las cuales se encuentran descritas en la tabla 3.3, a continuación:

Tabla 3.3. Características de varios modelos de ONT Huawei. [95]

Serie	Descripción
HG8245H	Proporciona 4 puertos GE, 2 puertos POTS, 1 puerto USB y un puerto 2.4G WiFi, ofrece una excelente experiencia con servicios de VoIP, Internet y video HD.
HG8247H	Utiliza la tecnología GPON para implementar el acceso de banda ultra ancha para los usuarios, y proporciona 4 puertos GE, 2 puertos POTS, 1 puerto USB, 1 puerto RF y 1 puerto 2.4G Wi-Fi. Además, el alto rendimiento de reenvío garantiza la experiencia del usuario de los servicios de voz, datos y video HD.
HG8040H	Es un terminal de red óptica para uso interior, proporciona acceso de banda ultra ancha para usuarios domésticos y de SOHO. Además, proporciona 4 puertos GE, también, cuenta con capacidades de reenvío de servicios de alto rendimiento para garantizar una excelente experiencia con los servicios de Internet y video HD.
HG8010H	Posee 1 puerto GE para la interfaz de usuario, funcionalidad <i>plug and play</i> , es decir, el sistema de gestión de red entrega automáticamente las configuraciones, y ofrece servicios de acceso múltiple incluido el almacenamiento conectado a la red doméstica, acceso a Internet y video, ofreciendo a los usuarios un servicio integral de triple play.
HG8240H	Proporciona 4 puertos GE y 2 puertos POTS
HG8242H	Proporciona 4 puertos GE, 2 puertos POTS y un puerto CATV.

3.3.3 EQUIPOS ALCATEL-LUCENT

La línea de negocio de acceso de redes fijas de Alcatel-Lucent está equipada con un conjunto de soluciones para ayudar a los operadores a abordar cualquier

situación que puedan afrontar en la actualidad y en el futuro. Entre estos equipos se encuentra el OLT mostrado en la figura 3.3, el cual, se describe a continuación:

3.3.3.1 OLT 7342 FTTU

Este equipo es ideal para ofrecer servicios *triple-play* para clientes residenciales y corporativos, el cual, soporta hasta 14 slots de interfaces para tarjetas GPON, 2 slots para tarjetas de terminación de red y un slot para una tarjeta de alarma.

Además, cada tarjeta GPON posee 4 puertos, proporcionando un total de 56 interfaces PON por subrack, en decir, en total soporta hasta 3584 abonados con una relación de división de 1:64.



Figura 3.3. OLT Alcatel-Lucent 7342 FTTU. [96]

3.3.3.2 ONT 7368

La familia de ONT 7368 G 8x1G proporciona tres versiones diferentes: G-821G-B y G-881G-B, las cuales son adecuadas para implementaciones en interiores y se pueden montar en escritorio, rack o pared. La tercera versión es G-881G-A y es adecuada para implementaciones en exteriores, como se observa en la figura 3.4.

Por otra parte, permiten entregar acceso a Internet de alta velocidad, voz y video sobre IPTV y CATV. Además, esta familia de ONT cumple con la norma ITU-T G.984, por lo tanto soportan 1,25 Gbps en el canal ascendente y 2,5 Gbps en el

canal descendente.

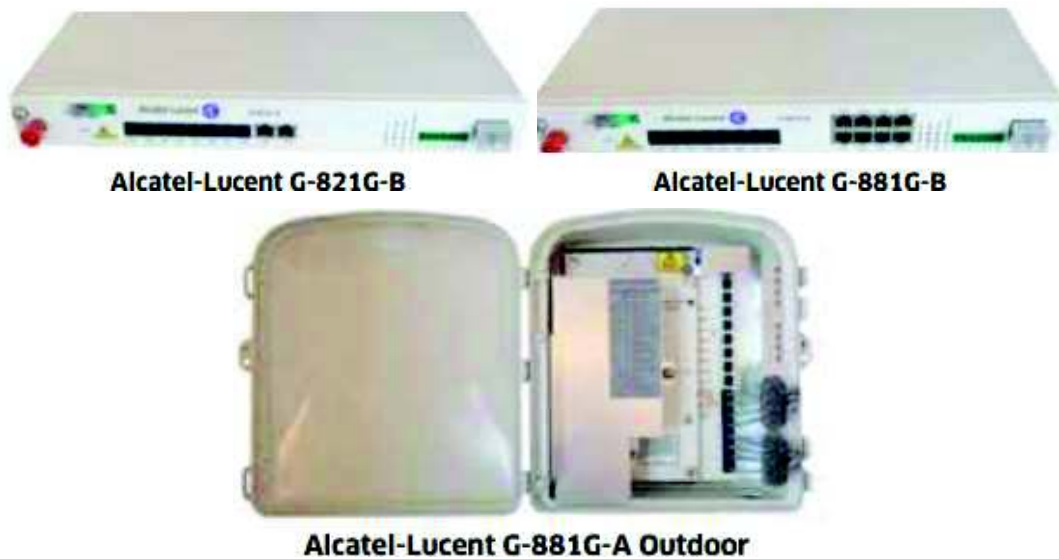


Figura 3.4. Familia Alcatel-Lucent 7368 ONT G-8x1G. [97]

3.3.4 EQUIPOS ZTE

ZTE ofrece soluciones PON de alta capacidad, es uno de los primeros proveedores en ofrecer tarjetas para NG-PON. Entre los modelos de OLT que proporciona este fabricante están los ZXA10 C300 y los ZXA10 C320.

Entre los dos modelos mencionados, el equipo que mayor capacidad ofrece es el ZXA10 C300, el cual se muestra en la figura 3.5.



Figura 3.5 OLT ZXA10 C300 de ZTE [98].

Este dispositivo permite ofrecer servicios *triple-play* y soporta numerosos métodos de acceso, algunos parámetros técnicos se listan a continuación [98]:

- Capacidad de conmutación: 800 Gbit/s
- Número de tarjetas de servicio: 14 (GPON,P2P,XG/PON1)
- Número de tarjetas de control: 2
- Máximo número de usuarios: 16384
- Soporte de FEC, AES128, IGMP, enrutamiento estático, DHCP, QoS, *Multicast*, IPV6.

En la página oficial de ZTE se puede encontrar 4 modelos de ONT: ZXHN F601, ZXHN F600, ZXHN F660, ZXHN F668. Las características técnicas de los mismos se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Características Técnicas de ONT de ZTE [99].

Parámetros	ZXHN F601	ZXHN F600	ZXHN F660	ZXHN F668
Interfaces	1xGPON, 1x10/100/1000 Base-T	1xGPON, 4x10/100/1000 Base-T, 2xPOTS	1xGPON, 4x10/100/1000 Base-T, 2xPOTS, WiFi, USB	1xGPON, 4x10/100/1000 Base-T, 2xPOTS, WiFi, USB, CATV
Modo de operación	Bridge		Bridge, Router, AP	
Sensibilidad	-28 dBm			
Funciones Soportadas	<ul style="list-style-type: none"> - VLAN (802.1Q, 802.1P, 802.1ad) - Multicast - QoS 	<ul style="list-style-type: none"> - VLAN (802.1Q, 802.1P, 802.1ad) - Multicast - QoS - DHCP Server/Client - NAT - IPV6 dual stack 		

3.3.5 ANÁLISIS DE COSTOS

El análisis de costos se desarrolla en base al diseño de la arquitectura mencionada en la factibilidad técnica. En este caso, se escogen los equipos marca Huawei, ya que los equipos poseen las características técnicas requeridas y además, es una de las marcas más convenientes en términos económicos, esta empresa ofrece

asistencia técnica, responsabilidad de la importación de equipos, responsabilidad de repuestos, periodo de garantía y responsabilidad de licencias [100]. De acuerdo a lo indicado por personal técnico de Huawei, para la implementación de soluciones GPON, el OLT modelo MA5600T (IEC) (ver Anexo C), el cual es mayormente instalado en sus centrales y se observa en la figura 3.6.



Figura 3.6. Estructura de OLT MA600T [93].

Las ventajas que ofrecen estos dispositivos son:

- “Múltiples métodos de acceso: incluye acceso de línea privada E1, TDM nativa (CESoP/SAToP), E-LAN y acceso de usuarios a IPTV no convergente” [93].
- “Evolución simple: las redes GPON, PON 10 G y PON 40 G comparten una misma plataforma, lo que permite una evolución sin inconvenientes y la compatibilidad con el acceso de banda ultra ancha” [93].
- “Soportan protocolo IPv4/IPv6” [93].
- Capacidad de conmutación: 3,2 Tbps.
- Posee 21 slots: 14 slots para tarjetas de servicio, donde cada tarjeta de servicio posee 8 puertos GPON, 4 puertos XGPON1, 16 puertos FE, 24/48 puertos GbE, es decir, se tendrá un total de 112 puertos GPON.
- Soporta hasta 7168 clientes GPON.
- Distancia lógica máxima entre dispositivos GPON: 60 km.
- Distancia lógica máxima entre dispositivos XG-PON: 100 km.

- Soporta enrutamiento estático, RIP, OSPF y MPLS.

Lo que respecta a la ONT, así mismo se indicó que en las instalaciones que realiza Huawei con tecnología GPON, comúnmente se instala el modelo HG8245H (ver Anexo D), el cual se observa en la figura 3.7.



Figura 3.7. ONT Huawei HG8245H [101].

El terminal de red óptica HG8245H ha sido diseñado para soluciones FTTH con tecnología GPON para usuarios residenciales y pequeñas empresas. Posee 2 interfaces de VoIP (RJ11), 4 puertos 10/100/1000M Base-T, 1 puerto USB y WiFi. Soporta el estándar G.984, *multicast*, QoS [102].

En el caso de los amplificadores EDFA requeridos, se escoge la familia de amplificadores EM316EA (ver Anexo E) de la marca MRV *Communications*, debido a que es un equipo desarrollado para aplicaciones DWDM, el cual, se observa en la figura 3.9. El modelo se escogerá según sea utilizado como pre-amplificador o amplificador *booster*, en este caso debido a la arquitectura planteada se necesitan 2 en modo pre-amplificado y 2 en modo *booster*.

Un amplificador *booster* funciona en el lado de la transmisión del enlace, presenta alta potencia de entrada, alta potencia de salida y ganancia óptica media.

Por otra parte, un pre-amplificador opera en el extremo receptor de un enlace óptico. Además, cuenta con una potencia de entrada de media a baja, potencia de salida media y ganancia media, también, los pre-amplificadores están diseñados

para amplificar la señal óptica y compensar las pérdidas de un demultiplexor ubicado cerca del receptor óptico.



Figura 3.9. Amplificadores EDFA de la familia EM316EA. [103]

3.3.5.1 GPON

En la tabla 3.5 se detallan los costos de inversión inicial necesarios para llevar a cabo la implementación de GPON en un escenario urbano, algunas consideraciones que existen en este caso son las siguientes:

- Los valores presentados en los ítems indicados son únicamente valores referenciales, no se indican valores exactos debido a que en este trabajo no se presenta un diseño de la red y por lo tanto no se conoce la cantidad exacta de equipos, materiales y usuarios relacionados en la implementación.
- Los costos se han obtenido a partir de personal de Huawei para una instalación GPON, específicamente para el operador CNT, por lo tanto, los valores pueden variar según los convenios que se establezcan con los operadores y el presupuesto asignado para el proyecto.
- No se obtuvieron cotizaciones físicas para adjuntar a este proyecto, debido a que para ello era necesario generar diferentes procesos con

otras áreas involucradas de la empresa y como la finalidad de este trabajo no genera ningún beneficio para la empresa no se desarrolló dicha cotización.

- Es necesario tener en cuenta los mecanismos de redundancia en la red, en particular, existen varios tipos de redundancia como la redundancia por equipo (en este caso *backup* del equipo principal OLT), redundancia por tarjeta (se tiene una tarjeta de *backup* y una tarjeta principal), redundancia por enlace (se tiene diferentes enlaces de fibra para llegar a un mismo equipo por distintas rutas), etc. Por lo tanto, para este caso se ha escogido la redundancia del equipo principal y redundancia de tarjetas, y se incluyen dichos costos en la tabla a continuación.

Tabla 3.5. Gastos CAPEX GPON

Item	Cantidad (u)	Valor Unitario (\$)	Valor Total (\$)
Chasis OLT (5600T)	1 principal + 1 <i>backup</i>	399,00	798,00
Tarjeta de servicio	14 principales + 14 <i>backup</i>	5.782,00	161.896,00
Tarjeta de control	2 principales + 2 <i>backup</i>	1.414,00	5.656,00
ONT	3584	69,00	247.296,00
Red Pasiva ⁵²	1	100.000,00	100.000,00
Software	No aplica	No aplica	19.000,00
Permisos de funcionamiento	3584 (Considerando una última milla individual por abonado)	800,00	2.867.200,00 ⁵³
Total Inversión	-	-	3.401.846,00

En cuanto a costos operacionales, se incluyen los mencionados en la tabla 3.6, además, es importante mencionar que los valores operacionales son recurrentes, es decir, este pago se realiza periódicamente y no una sola vez como los costos de capital detallados en la tabla anterior.

⁵² Dentro de los costos de la red pasiva se incluyen los valores de varios elementos como bobinas de fibra óptica, ODFs, *patch cords*, *pigtails*, conectores, herrajes, cajas de empalme, *splitters*.

⁵³ El valor de permisos por enlace de última milla se estima en promedio en \$800, el cual, fue descrito por Telefónica de acuerdo a los valores que manejan para ofrecer servicios de Datos Fijos a través de fibra óptica.

Debido a que los contratos de mantenimiento y soporte se fijan anualmente, los valores presentados en este caso son cálculos aproximados al año y de igual manera han sido proporcionados por Huawei para un proyecto con CNT.

Tabla 3.6. Gastos OPEX GPON

Item	Valor Total (\$)
Mantenimiento físico de la red	717.200,00 ⁵⁴
Soporte Técnico	12.000,00 ⁵⁵
Personal de instalación	2.000,00 ⁵⁶
Gastos Administrativos	4.000,00 [100]
Total OPEX	734.800,00

- El mantenimiento físico de la red incluye limpieza de equipos físicos de las partes internas y externas de los mismos, cambio o expansión de tarjetas; módulos, discos duros, placas de memoria RAM, reparación de componentes, etc. De igual manera se refiere al mantenimiento de los recorridos de fibra, limpieza, fusiones, cambio de conectores, cambio de tramos de fibra, etc.
- El soporte técnico se refiere a un mantenimiento lógico, es decir, puede incluir actualizaciones de software, actualización de antivirus, configuraciones, adición de servicios, etc.
- Personal de instalación, es la mano de obra encargada de realizar las conexiones físicas de todo el equipamiento y los tendidos de fibra óptica.
- Los gastos administrativos se refieren a los gastos que surgen a partir de

⁵⁴ De acuerdo a lo indicado por personal de Telefónica, se acuerda con el proveedor un mantenimiento físico de la red a mitad de año, con un valor de \$200 por mantenimiento de cada equipo o última milla tendida en el caso de la fibra, se toma en cuenta 3584 últimas millas y 2 OLT, sin contar con los ONT pues no se realiza mantenimiento físico del equipo del cliente.

⁵⁵ Huawei propone un valor de \$150.000 por el soporte técnico de 50 OLT durante 6 meses, es decir \$3.000 por cada OLT en 6 meses, al año el soporte de cada OLT representa \$6.000.

⁵⁶ Huawei propone un valor de \$20 por equipo, el cual, corresponde al cambio o arreglo de un equipo previamente instalado. Además, si se toma en cuenta que es una instalación nueva, durante el primer año no se requeriría de algún cambio pues los equipos son completamente nuevos. Sin embargo asumiendo algún desastre natural, falla eléctrica o incidente en el lugar donde se encuentra el equipo, se asume un cambio o arreglo de 100 equipos anuales.

la gestión y coordinación de la implementación, pueden incluir gastos de llamadas telefónicas, agua, luz, alquileres, transporte, mensajería, material de oficina, etc.

3.3.5.2 LR-PON

En las tablas 3.7 y 3.8 se resumen los costos involucrados en un despliegue de LR-PON. Es importante mencionar que los costos presentados son valores estimados de acuerdo a lo mencionado por personal de Huawei, sin embargo no son costos reales para LR-PON porque esta tecnología aún no se encuentra estandarizada como se ha mencionado ya varias veces en este proyecto. Además, en esta sección no se incluyen los costos ya mencionados en GPON por que se reutilizará la red desplegada.

Tabla 3.7. Gastos CAPEX LR-PON

Item	Cantidad (u)	Valor Unitario (\$)	Valor Total (\$)
AWG	2 ⁵⁷	1.048,22 [24] 16 CH DWDM Mux/Demux	2.096,44
DCM (módulo compensador de dispersión)	2 ⁵⁸	1.093,80 [24] Distancia de compensación: 80 km con 4,8 dB de pérdida.	2.187,60
Amplificadores EDFA	4 ⁵⁹	4.100,00 [104]	16.400,00
Tendido de fibra	130 km	1,20 por metro [105]	156.000,00
Total Inversión			176.684,04

⁵⁷ Se requiere de 2 AWG ya que uno se coloca en el lado del OLT y el otro en el lado del ONT para multiplexar y demultiplexar las longitudes de onda DWDM.

⁵⁸ Se requiere de 2 módulos debido a la distancia de compensación que permite y teniendo en cuenta la distancia total de 135 km de la arquitectura indicada en la factibilidad técnica.

⁵⁹ 2 EDFA para el enlace de subida y 2 EDFA para el enlace de bajada, de acuerdo a la arquitectura planteada.

Tabla 3.8. Gastos OPEX LR-PON

Item	Valor Total
Mantenimiento físico de la red	2.000,00 ⁶⁰
Soporte Técnico	6.000,00
Personal de instalación	200,00 ⁶¹
Gastos Administrativos	4.000,00 [45]
Total OPEX	12.200,00

En la tabla 3.9 se presenta el resumen de los costos totales en cada proyecto.

Tabla 3.9. Comparación de Costos en GPON vs LR-PON

	GPON	LR-PON
Gastos de CapEx (\$)	3.401.846,00	176.684,04
Gastos de OpEx (\$)	734.800,00	12.200,00
Gastos Totales	4.136.646,00	188.884,04

Como se puede observar los valores de los gastos totales son bastante distintos, revelando que LR-PON permite un ahorro significativo, pues, se reutiliza gran parte de la red GPON implementada, es decir el proyecto es factible económicamente, además, se evidencia que la implementación de LR-PON permite ofrecer una red de alta capacidad a un precio razonable. También, existe una enorme diferencia en cuanto a costos: entre PON tradicional y LR- PON por la simplificación de elementos, los costos operativos disminuyen gracias a la eliminación de muchos elementos de red y el cableado para interconexiones. Desde el punto de vista OPEX, LR-PON ofrece menor complejidad de diseño de la red, soporte y mantenimiento a menor cantidad de elementos de red y menor consumo de energía eléctrica.

⁶⁰ Se mantiene el costo de \$200 por mantenimiento físico de equipos, sin embargo LR- PON simplifica significativamente el número total de equipos, en base a lo mencionado en la sección 2.2.4.3 con respecto a la disminución de nodos en estudios realizados en Irlanda y Reino Unido, se asume un total de 10 equipos al año que necesitarán mantenimiento físico.

⁶¹ Se mantiene el costo de \$20 por equipo instalado, pero de igual manera debido a la simplificación que ofrece LR-PON y la disminución de mantenimientos, se asume un total de 10 equipos anuales que necesiten ser cambiados por personal de instalación.

En particular, en la tabla 3.10 se resumen los periodos de tiempo necesarios para la implementación de ambas tecnologías.

Tabla 3.10. Cuadro Comparativo de Tiempos de Instalación

Instalación y Pruebas	GPON	LR-PON
OLT	2 semanas	2 semanas
<i>Feeder</i> / Sistema DWDM (125 km)	1 mes – 2 meses	3 meses – 4 meses
Central Local (transpondedor y amplificadores)	No aplica	1 mes
Distribución	3 meses	No aplica
<i>Drop</i> por última milla	2 semanas – 1 mes	No aplica
Tiempo Total de Instalación	5 meses – 6,5 meses	4,5 meses – 5,5 meses

Por lo tanto, debido a la reutilización de la red GPON para la implementación de LR-PON es posible disminuir los tiempos de instalación de esta última tecnología, sin embargo, como se observa en la tabla anterior no existe una diferencia significativa en la duración total de implementación de cada tecnología. Esto se debe principalmente a que LR-PON posee una configuración mucho más compleja que GPON, por lo que la parte de *feeder* involucra mayor tiempo de instalación.

Finalmente, es necesario mencionar que los periodos de tiempo presentados, al igual que los costos mencionados para las tecnologías indicadas, han sido provistos por personal de Huawei de acuerdo a la experiencia en implementaciones similares.

CAPITULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- SuperPON fue uno de los primeros proyectos enfocados al desarrollo de LR-PON, marcando una base para reconocer a las LR-PON como soluciones reales y factibles para proporcionar FTTH mediante una red simplificada por la combinación del acceso y la metro. A partir de proyectos experimentales como éste, se pudo reconocer que la operación TDM/TDMA trabajando con una única longitud de onda, resulta en una red de baja eficiencia en términos de asignación de ancho de banda y alcance de transmisión.
- Una arquitectura PON estándar puede convertirse en una red de acceso óptico de alta capacidad y largo alcance, introduciendo sistemas DWDM. Estos sistemas permiten mantener el despliegue físico de las redes PON, así como sus protocolos de transporte, QoS, operación y mantenimiento, por la compatibilidad que se logra al convertir la longitud de onda de trabajo utilizada en una PON convencional a una longitud de onda correspondiente a DWDM.
- El implementar una LR-PON en base a una PON estándar convencional es la mejor opción aplicable en Ecuador, pues un sistema de este tipo representan un paso intermedio entre las PON convencionales y las NG-PON, permitiendo a los operadores desplegar tecnologías PON estándar hoy y actualizar la red para un largo alcance de una manera más simple cuando se requiera.
- Las LR-PON sin duda poseen características de gran impacto tecnológico que van más allá de las proporcionadas por las PON convencionales, pues explotan la enorme capacidad de transmisión de las tecnologías ópticas y han logrado desarrollarse debido a los diversos proyectos de interés existentes hoy en día. Debido al entorno experimental de dichos trabajos, se introducen ciertos módulos, etapas o dispositivos independientes que

sirven de apoyo para lograr las altas prestaciones mencionadas, sin embargo, esto conlleva al despliegue de una arquitectura mucho más en comparación a una PON estándar, con un mayor desarrollo de estas arquitecturas se pueden lograr sistemas más integrados que permitan un despliegue mucho más fácil.

- Debido a que en LR-PON, el OLT se encuentra ubicado en CO y no en nodos locales como en una PON estándar, las funciones de red de capas superiores pueden alojarse en la “nube” pues existe conexión directa entre ésta y la red de *core* donde se encuentra el OLT.
- Cuanto más complejo sea el entorno en el que se implementa una PON, más prevalecerán las ventajas de las LR-PON frente a sus tecnologías predecesoras, pues los costos de operación y mantenimiento disminuirán únicamente entre más usuarios existan en la red, por lo tanto, para sectores pequeños, con baja densidad poblacional y baja demanda de recursos las redes PON convencionales como GPON son la mejor opción.
- Las PON permiten cubrir las deficiencias que presentan las otras tecnologías cableadas de última milla como el par de cobre o el cable coaxial, pero para ello es necesario que exista tanto una gran demanda de recursos de red como un amplio desarrollo de las tecnologías FTTx en el país, con la finalidad de que los operadores ofrezcan paquetes completos de servicios a menor costo, resultando ser más accesible al usuario y de esta manera lograr un mayor índice de penetración de tecnologías ópticas en el país.

4.2 RECOMENDACIONES

- Los mecanismos de protección comúnmente son implementados sólo en redes *Core* y *Metro*, no son parte de las redes de acceso. Sin embargo, dado que LR- PON tiene un elevado alcance y una alta relación de división, reemplaza secciones de la red de *Metro* que normalmente tendrían protección. Por esta razón se recomienda tener en cuenta mecanismos de protección para las LR-PON, además de conocer que una parte muy vulnerable de la PON es la fibra principal en la sección de *Feeder* (entre el OLT y el splitter). Una falla en esta fibra o en la OLT misma, afectaría a

todos los usuarios en la PON.

- Se recomienda realizar una implementación PON en un escenario en el que exista una tecnología predecesora, debido a que de esta manera el ahorro de equipamiento y material es mayor y en sí el proceso de implementación es una tarea más sencilla pues ya se tiene un despliegue previo que sirve de base para la nueva tecnología.
- En todos los estándares PON existentes se recomienda como mínimo el uso de fibra óptica que cumpla con el estándar G.652.D, pues este tipo de fibra cumple con los niveles de calidad esperados y garantiza una transmisión de datos confiable.
- Se recomienda que exista mayor interés en el avance tecnológico de las telecomunicaciones en el país y mayor iniciativa por los entes regulatorios para las aplicaciones de nuevos servicios de red emergentes, ya que al día de hoy existen varios estándares que poseen características técnicas muy importantes para la prestación de servicios de gran capacidad, no obstante, no se despliegan en el país debido a que el desarrollo de las redes actuales no se encuentra muy avanzado.
- Se recomienda que para futuras líneas de investigación acerca de LR-PON se presente el desarrollo de un adecuado diseño con la finalidad de conocer valores exactos de una posible implementación en el país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, «Boletín Estadístico del Sector de Telecomunicaciones,» Quito, 2015.
- [2] D. Ortega, «Slide Share,» 15 Noviembre 2012. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/davidortegag/capitulo-01-introduccion-a-las-telecomunicaciones>. [Último acceso: 7 Marzo 2018].
- [3] M. Santos González, «Redes Telemáticas,» 5 Noviembre 2012. [En línea]. Available: <http://redestelematicas.com/la-ultima-milla/>. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [4] Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, «Boletín Estadístico IV Trimestre 2017,» Quito, 2017.
- [5] «MATPEC Soluciones Web,» [En línea]. Available: <http://matpec.com.ar/desde0/desde0-2-dial-up.htm>. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [6] R. M. Arismendi, «redesramosmontalvoarismendi,» [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/redesramosmontalvoarismendi/>. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [7] J. Adell, J. Enriquez, C. Álvarez, J. Jiménez, J. Lobo, J. Lozano, E. Menduïña, S. Pérez, C. Plaza y W. Warzanskij, Las telecomunicaciones de Nueva Generación, Madrid: División de Relaciones Corporativas y Comunicación, 2003.
- [8] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «Transceptores de línea de abonado digital asimétrica,» 2000.
- [9] H. Fernández, *Evolución de las Tecnologías xDSL*, Madrid, 2013.
- [10] R. Millán, «Consultoría Estratégica en Tecnologías de la Información y Comunicaciones,» 2000. [En línea]. Available: <http://www.ramonmillan.com/tutoriales/adsl.php>. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [11] Wikipedia, «Wikipedia,» 27 Agosto 2016. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/VDSL2>. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [12] J. Cartagena, «Redes HFC (Híbrido Fiber-Coaxial) y sus vulnerabilidades,» Valparaíso.
- [13] T. Halfhill, «Information Week IT Network,» 1996. [En línea]. Available: <http://services.eng.uts.edu.au/~kumbes/ra/Access-Networks/hfc/cnethfc.htm>. [Último acceso: Diciembre 2016].

- [14] Á. Merino, «Universitat Oberta de Catalunya,» Enero 2013. [En línea]. Available: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/18805/6/amerinoraTFC0113memoria.pdf>. [Último acceso: 14 Mayo 2018].
- [15] M. Álvarez, J. Berrocal, F. González, R. Pérez, I. Román y E. Vázquez, *Tecnologías de Banda Ancha y Convergencia de Redes*, Madrid, 2009.
- [16] M. S. Jiménez, *Material de Estudio Comunicaciones Ópticas*, Quito, 2015.
- [17] P. Turmero, «Transmisión por Fibra Óptica,» 2015.
- [18] EXFO Electro-Optical Engineering Inc., «La Guía FTTH PON: Realización de pruebas de redes ópticas pasivas,» Quebec, 2012.
- [19] Grupo Comunicaciones Ópticas, «Tutorial de Comunicaciones Ópticas,» 2006. [En línea]. Available: http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_8_2.htm. [Último acceso: 19 Marzo 2018].
- [20] M. J. Conelly, «Semiconductor Optical Amplifiers,» Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [21] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «UIT-T G.661: Definición y métodos de prueba de los parámetros genéricos pertinentes de los dispositivos y subsistemas de amplificadores ópticos,» 2006.
- [22] M. Manzanedo, «Repositorio Institucional Universidad Politécnica de Valencia,» Junio 2013. [En línea]. Available: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/1025/30314/TESIS_Manzanedo%28Final%29.pdf?sequence=1. [Último acceso: 19 Marzo 2018].
- [23] A. Hoyos, «Estudio y diseño de una red LR-PON de alta disponibilidad empleando conmutación óptica y enlaces redundantes,» Quito, 2016.
- [24] S. Pérez, «Repositorio Digital de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas,» Noviembre 2017. [En línea]. Available: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/7488/1/P%C3%A9rezAlmeidaSergioAlejandro2017.pdf>. [Último acceso: Marzo 2018].
- [25] S. Khan y M. A. Hasnayeem, «Scientific & Academic Publishing,» 2015. [En línea]. Available: <http://article.sapub.org/10.5923.j.optics.20150505.03.html>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [26] E. Bonansea, «Capacitación FTTH,» 2011. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=J-S6FivgD38&t=16s>. [Último acceso: Abril 2018].

- [27] Y. Marchukov, *Desarrollo de una aplicación gráfica para el diseño de infraestructuras FTTH*, Valencia, 2011.
- [28] FS.COM, «Community FS.COM,» 17 Diciembre 2014. [En línea]. Available: <https://community.fs.com/blog/a-comprehensive-understanding-of-fttx-network.html>. [Último acceso: 14 Abril 2018].
- [29] «Internet Live Stats,» Mayo 2018. [En línea]. Available: <http://www.internetlivestats.com/>. [Último acceso: 16 Mayo 2018].
- [30] Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, «Boletín Estadístico III Trimestre de 2017,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2015/01/Boletin-Estadistico-III-Trimestre-2017.pdf>. [Último acceso: Abril 2018].
- [31] Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, «Boletín Estadístico II Trimestre de 2017,» 2017. [En línea]. Available: http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2015/01/BOLETIN-ESTADISTICOIITRIMESTRE-Septiembre-2017_def.pdf. [Último acceso: Abril 2018].
- [32] Consejo Nacional de Telecomunicaciones, «Resolución TEL-431-13-CONATEL-2014,» Quito, 2014.
- [33] KEYMILE International GmbH, «AON vs PON - A comparison of two optical access network technologies and the different impact on operations,» Austria, 2008.
- [34] P. Notario, «Revista Española de Electrónica,» 7 Mayo 2015. [En línea]. Available: <https://www.redeweb.com/articulos/componentes/nuevos-estandares-pon-para-sistemas-fttx/>. [Último acceso: Junio 2017].
- [35] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «UIT-T G.983.1: Sistemas de acceso óptico de banda ancha basados en redes ópticas pasivas,» 2005.
- [36] D. Ruiz, *Estudio comparativo y simulación de las tecnologías PON tradicionales y emergentes*, Quito, 2015.
- [37] J. L. Vásquez, *Estudio de las Redes Ópticas Pasivas de Banda Ancha (BPON) y sus posibles aplicaciones en el país.*, Quito, 2009.
- [38] N. Ansari y J. Zhang, «PON Architectures,» de *Media Access Control and Resource Allocation*, SpringerBriefs, 2013, pp. 11-22.
- [39] IEEE, «IEEE Standars,» 24 Junio 2004. [En línea]. Available: http://www.ieee802.org/21/doctree/2006_Meeting_Docs/2006-11_meeting_docs/802.3ah-2004.pdf. [Último acceso: 8 Junio 2017].

- [40] M. López Bonilla, E. Moschim y F. Rudge Barbosa, «Estudio comparativo de redes GPON y EPON,» *Scientia et Technica*, nº 41, pp. 321-326, 2009.
- [41] Y. Ayala y M. S. Jiménez, *Diseño y simulación de una red de acceso EPON (Ethernet Passive Optical Network) para servidores triple play (video, datos y voz) para el sector de "La Mariscal"*, Quito, 2012.
- [42] A. Acosta, «Biblioteca Digital EPN,» 23 Agosto 2012. [En línea]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4845>. [Último acceso: 3 Abril 2017].
- [43] A. Villacís, *Diseño de una red 10G-PON para el barrio de carcelén alto 3D*, Quito, 2013.
- [44] J. L. Calvache Espín, «Repositorio Digital Universidad Politécnica Salesiana,» Marzo 2016. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13079/1/UPS%20-%20ST002258.pdf>. [Último acceso: 10 Junio 2017].
- [45] P. Notario, «Unitronics,» Abril 2015. [En línea]. Available: http://redeweb.com/ficheros/articulos/Unitronics_1959070987. [Último acceso: 11 Junio 2017].
- [46] S. Gorshe y J. Mandin, «Semantic Scholar,» Enero 2009. [En línea]. Available: https://pdfs.semanticscholar.org/a647/5dd4822aa079d7b1fb37699ecbd949b27877.pdf?_ga=2.108490050.1946763894.1497236820-1967831068.1497236820. [Último acceso: 11 Junio 2017].
- [47] F. Effenberger, H. T. US, D. Cleary, I. Calix, O. Haran, P. Sierra, G. Kramer, I. Teknovus, R. Ding Li, I. Motorola, M. Oron, I. Tellabs, T. Pfeiffer y A.-L. Germany, «An Introduction to PON Technologies,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, nº 3, pp. 17-25, 2007.
- [48] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «Redes ópticas pasivas con capacidad de gigabits: Especificación de la capa dependiente de los medios físicos,» 2003.
- [49] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics,» 2008.
- [50] G. Cadena y J. Pozo, «Biblioteca digital EPN,» 14 Noviembre 2014. [En línea]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8878>. [Último acceso: 11 Abril 2017].
- [51] A. García, «Telnet - Redes Inteligentes,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.ccapitalia.net/descarga/docs/2012-gpon-introduccion-conceptos.pdf>. [Último acceso: 12 Abril 2017].

- [52] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Transmission convergence layer specification,» 2014.
- [53] R. Cevallos, R. Montalvo y M. Vinueza, *Estudio y diseño de una red de última milla utilizando la tecnología GPON para el sector del nuevo aeropuerto de Quito.*, Quito, 2013.
- [54] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «10-Gigabit capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification,» 2016.
- [55] Huawei Technologies, «Next-Generation PON Evolution,» Shenzhen, 2010.
- [56] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «Series G: Transmission Systems and Media Digital Systems and Networks,» 2009.
- [57] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «40 Gigabit capable passive optical networks (NG-PON 2): General Requirements,» 2013.
- [58] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «40 Gigabit capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification,» 2014.
- [59] C. Valero, «ADSL Zone,» 9 Marzo 2016. [En línea]. Available: <https://www.adslzone.net/2016/03/09/ng-pon2-el-nuevo-estandar-para-elevar-la-velocidad-de-las-conexiones-ftth-a-40-gbps/>. [Último acceso: 23 Noviembre 2017].
- [60] T. Garcinuño Jimenez, *Técnicas adaptativas y cognitivas para la gestión de recursos en redes de acceso ópticas pasivas y de transporte*, 2014.
- [61] D. Payne y R. Davey, «The future of fibre access systems?,» *BT Technology Journal*, vol. 20, nº 4, 2002.
- [62] D. Shea y J. Mitchell, «Long-Reach Optical Access Technologies,» *IEEE Network*, vol. 21, nº 5, pp. 5-11, 2007.
- [63] D. Shea y J. Mitchell, «A 10 Gb/s 1024-Way-Split 100 km Long-Reach Optical-Access Network,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, nº 3, pp. 685-693, 2007.
- [64] G. Talli y P. Townsend, «100 km Reach DWDM SuperPON with Upstream Bit Rates of 2.5 Gb/s and 10 Gb/s,» *Opto-Ireland 2005: Optoelectronics, Photonic Devices and Optical Networks*, vol. 5825, pp. 510-517, 2005.
- [65] G. Talli, C. Wai, P. Townsend, R. Davey, T. De Ridder, X. Qiu, P. Ossieur, H.-G. Krimmel, D. Smith, I. Lealman, A. Poustie, S. Randel y H. Rohde, «Integrated Metro and Access Network: PIEMAN,» de *12th European Conference on Networks and Optical Communications*, Estocolmo, 2007.
- [66] M. Ruffini, L. Wosinska, M. Achouche, J. Chen, N. Doran, F. Farjady, J. Montalvo, P.

- Ossieur, B. O'Sullivan, N. Parsons, T. Pfeiffer, X. Qiu, C. Raack, H. Rohde y M. Schiano, «DISCUS: An End-to-end solution for ubiquitous broadband optical access,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, nº 2, pp. S24-S32, 2014.
- [67] F.-T. An, K. Soo, D. Gutierrez, S. Yam, E. Hu, K. Shrikhande y L. Kazovsky, «SUCCESS: A Next-Generation Hybrid WDM/TDM Optical Access Network Architecture,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, nº 11, 2004.
- [68] M. Maier y M. Herzog, «STARGATE: The Next Evolutionary Step toward Unleashing the Potential of WDM EPONs,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, nº 5, pp. 50-56, 2007.
- [69] J. Ferguson, M. Reisslein y M. McGarry, «Online excess bandwidth distribution for Ethernet passive optical networks,» *Journal of Optical Networking*, vol. 8, nº 4, pp. 358-369, 2009.
- [70] E. Cervantes, E. Gonzáles, A. Mejía, A. Rangel y L. Tapia, *Análisis y factibilidad en la implementación de una red de acceso por fibra óptica (FTTH) para un desarrollo inmobiliario*, Culhuacan, 2012.
- [71] IDATE for FTTH Council Europe, «FTTH Council,» Septiembre 2017. [En línea]. Available: http://www.ftthcouncil.eu/documents/FTTH%20GR%2020180212_FINAL.2.pdf. [Último acceso: Marzo 2018].
- [72] F. Cano, «El Español,» 15 Febrero 2018. [En línea]. Available: https://www.elespanol.com/economia/empresas/20180215/espana-lidero-crecimiento-europa-millones-nuevas-altas/284972803_0.html. [Último acceso: Marzo 2018].
- [73] R. Davey, D. Nettet, A. Rafael, D. Payne y A. Hill, «Designing long reach optical access networks,» *BT Technology Journal*, vol. 24, nº 2, pp. 13-19, 2006.
- [74] «Google Maps,» [En línea]. Available: <https://www.google.com/maps/place/I%C3%B1aquito,+Quito/@-0.1693489,-78.4903816,15z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x91d59a995819each:0xcc0159383e20f18e!8m2!3d-0.1717243!4d-78.4837189>.
- [75] «Wikipedia,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/I%C3%B1aquito_\(parroquia\)](https://es.wikipedia.org/wiki/I%C3%B1aquito_(parroquia)). [Último acceso: Diciembre 2017].
- [76] Instituto Nacional de Estadística y Censos, «Ecuador en Cifras,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/plugins/download->

- monitor/download.php?id=337&force=0. [Último acceso: Octubre 2017].
- [77] Instituto Nacional de Estadística y Censos, «Ecuador en Cifras,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/plugins/download-monitor/download.php?id=311&force=0>. [Último acceso: Octubre 2017].
- [78] Instituto Nacional de Estadística y Censos, «Ecuador en Cifras,» Diciembre 2017. [En línea]. Available: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/tras-las-cifras-de-quito/>. [Último acceso: Enero 2018].
- [79] Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información, «Plan Nacional de Telecomunicaciones y Tecnologías de Información del Ecuador 2016-2021,» Quito, 2016.
- [80] R. Davey, P. Healey, I. Hope, P. Watkinson, D. Payne, O. Marmur, J. Ruhmann y Y. Zuiderveld, «DWDM Reach Extension of a GPON to 135 km,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, n° 1, pp. 29-31, 2006.
- [81] «Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información,» [En línea]. [Último acceso: Marzo 2018].
- [82] «Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones,» [En línea]. Available: <http://www.arcotel.gob.ec/la-arcotel/>. [Último acceso: Marzo 2018].
- [83] Comisión Interamericana de Telecomunicaciones, «Organización de los Estados Americanos,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.citel.oas.org/es/Paginas/About-Citel.aspx>. [Último acceso: Marzo 2018].
- [84] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «ITU Committed to Connecting the World,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.itu.int/en/about/Pages/overview.aspx>. [Último acceso: Marzo 2018].
- [85] ARCOTEL, «Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones,» 14 Septiembre 1995. [En línea]. Available: <http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/09/Literal-a2-Base-legal-que-rige-a-la-institucion-AGOSTO20171.pdf>. [Último acceso: Noviembre 2017].
- [86] ARCOTEL, «Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones,» 18 Febrero 2015. [En línea]. Available: <http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/09/Literal-a2-Base-legal-que-rige-a-la-institucion-AGOSTO20171.pdf>. [Último acceso: Noviembre 2017].
- [87] ARCOTEL, «Agencia de Regulación y Control de Telecomunicaciones (Base Legal que rige a la Constitución),» Agosto 2017. [En línea]. Available: <http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/09/Literal-a2-Base->

- legal-que-rige-a-la-institucion-AGOSTO20171.pdf. [Último acceso: Diciembre 2017].
- [88] ARCOTEL, «Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones,» 26 Octubre 2015. [En línea]. Available: <http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2016/06/norma-tendido-de-redes-aereas.pdf>. [Último acceso: 3 Abril 2018].
- [89] ARCOTEL, «Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones,» 5 Abril 2017. [En línea]. Available: http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2017/06/029_norma-tecnica-despliegue-redes-fisicas-servicios-telecomunicaciones.pdf. [Último acceso: 3 Abril 2018].
- [90] ARCOTEL, «Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones,» [En línea]. Available: <http://www.arcotel.gob.ec/solicitud-de-otorgamiento-o-administración-de-titulos-habilitantes/>. [Último acceso: 3 Abril 2018].
- [91] ARCOTEL, «Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones,» 26 Junio 2012. [En línea]. Available: <http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2016/03/reglamento-de-interconexion.pdf>. [Último acceso: 3 Abril 2018].
- [92] Corporación Nacional de Telecomunicaciones E.P., «Normas de diseño y construcción de redes de telecomunicaciones con fibra óptica,» Quito, 2011.
- [93] Huawei Technologies Co. Ltd., 2018. [En línea]. Available: <http://e.huawei.com/es/products/fixed-network/access/olt/ma5600t>. [Último acceso: Febrero 2018].
- [94] Huawei Technologies Co. Ltd., 2018. [En línea]. Available: <http://e.huawei.com/es/products/fixed-network/access/olt/ma5800>. [Último acceso: Febrero 2018].
- [95] Huawei Technologies Co. Ltd., «HUAWEI,» 2018. [En línea]. Available: <https://e.huawei.com/en/products/fixed-network/access/ont/optical-terminal>. [Último acceso: Septiembre 2018].
- [96] Alcatel-Lucent, 3 Octubre 2010. [En línea]. Available: ftp://ftp.eyenetworks.no/Alcatel/Alcatel_7342_ISAM_OLT.pdf. [Último acceso: Septiembre 2018].
- [97] Alcatel Lucent, «Advanced Media Technologies,» 2014. [En línea]. Available: http://www.goamt.com/wp-content/uploads/2015/08/7368_ISAM_ONT_G-8x1G_AMT.pdf. [Último acceso: Septiembre 2018].
- [98] ZTE Corporation, «ZTE,» 2017. [En línea]. Available:

- <http://www.zte.com.cn/global/products/access/xpon/PON-OLT/424194>. [Último acceso: Abril 2018].
- [99] ZTE Corporation, «ZTE,» 2015. [En línea]. Available: http://www.zte.com.cn/en/products/access/xpon/201301/t20130131_385569.html. [Último acceso: Abril 2018].
- [100] R. Cevallos, R. Montalvo y M. Vinuesa, «Repositorio Digital Escuela Politécnica Nacional,» 2010. [En línea]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/3708/1/2010AJIEE-31.pdf>. [Último acceso: Febrero 2018].
- [101] Huawei Technologies Co. Ltd., «HUAWEI,» 2018. [En línea]. Available: <http://e.huawei.com/es/products/fixed-network/access/ont/optical-terminal>. [Último acceso: 3 Abril 2018].
- [102] Huawei Technologies Co. Ltd., «HUAWEI,» 2017. [En línea]. Available: <http://www1.huawei.com/es/products/fixed-access/fttx/ont/hg8245/index.htm>. [Último acceso: 3 Abril 2018].
- [103] MRV Communications, «Direct Industry,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.directindustry.es/prod/mrv-communications/product-39917-586195.html>. [Último acceso: Septiembre 2018].
- [104] «Direct Industry - Venta de equipos ópticos,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.directindustry.es/prod/mrv-communications/product-39917-586195.html>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [105] «Mercado Libre,» 2018. [En línea]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-417555241-cable-fibra-optica-adss-g652d-6h-metro-_JM?quantity=1. [Último acceso: Mayo 2018].