

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



DISEÑO DE UNA RED DE ACCESO ÓPTICA PARA LA SIGUIENTE GENERACIÓN

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE TELECOMUNICACIONES

PRESENTADO POR:

ISRAEL ARNALDO SÁNCHEZ CÉSPEDES

PROMOCIÓN

2010-II

LIMA-PERÚ

2014

DISEÑO DE UNA RED DE ACCESO ÓPTICA PARA LA SIGUIENTE GENERACIÓN

DEDICATORIA

A Dios por bendecirme siempre.

A mis padres por su apoyo incondicional.

A mi compañera de toda la vida, Yasmín,
por su gran amor y comprensión.

A mis hermanos Gustavo y Sergio a
quienes estimo mucho.

A mis amigos que de alguna u otra
manera confiaron en mí y me brindaron
su apoyo.

A mi alma máter, la UNI, y mi facultad, la
FIEE, en donde me formé
profesionalmente.

SUMARIO

Las redes de acceso actuales en el Perú para el servicio de banda ancha fija tienen limitaciones técnicas debido al uso del cobre como medio de transmisión. Estos inconvenientes se reflejan en el servicio que se brinda a los usuarios debido a que la demanda de ancho de banda es cada vez mayor.

El objetivo principal del trabajo es diseñar una red de acceso para la siguiente generación con elementos ópticos pasivos. Para tal fin, se brinda una metodología basada en un enfoque de "arriba hacia abajo" donde se toma como referencia las capas del modelo OSI, es decir, se inicia en la capa de aplicación y se termina en la capa física.

Se empieza la metodología con la preparación de la red, en la que se analiza los requerimientos organizacionales y técnicos de una empresa operadora de cable. Este operador tiene una red HFC desplegada en la zona norte de Lima. En esta fase, se abarca lo correspondiente a la capa de aplicación y se evalúa las diferentes alternativas de solución, donde se elige y fundamenta una opción tecnológica.

En la segunda fase se realiza la planificación, donde se caracteriza la red existente del operador y se elige una zona de la cobertura para el diseño de un piloto de red. En esta etapa se obtiene un mayor conocimiento de la red y se puede visualizar los cambios necesarios para cumplir con todos los requerimientos actuales y futuros. Esta evaluación se realiza en base a la opción tecnológica elegida.

Finalmente, en el diseño de la red se estudian las diferentes arquitecturas que se utilizan tanto en capa 2 como en capa 1. La capa 3 no se analiza ya que involucra a los equipos de la red de núcleo. Adicionalmente, se muestran las proyecciones de la red a futuro de acuerdo a la solución planteada.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
PLANTEAMIENTO DE LA INGENIERÍA DEL PROBLEMA	3
1.1 Objetivos del informe	3
1.2 Alcance del informe	3
1.3 Descripción del problema	4
1.4 Evaluación del problema	5
1.4.1 Tecnología de cable	5
1.4.2 Tecnología DSL	9
1.4.3 Evolución de las redes de acceso basadas en cobre: G.Fast	13
CAPÍTULO II	
FUNDAMENTO DE LAS REDES ÓPTICAS PASIVAS	14
2.1 Normalización de la ITU-T	14
2.1.1 Descripción de las recomendaciones	15
2.1.2 Fundamentos de GPON	17
2.2 Normalización del IEEE	30
2.2.1 Características de EPON	31
2.2.2 Aprovisionamiento de DOCSIS por EPON	37
2.3 Introducción a las tecnologías PON de 10 Gbps	40
2.3.1 XG-PON ó NG-PON	40
2.3.2 10G-EPON	42
2.3.3 Proyección de las redes PON	43
2.4 Escenarios FTTx	43
CAPÍTULO III	
METODOLOGÍA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	45
3.1 Preparación de la red	46
3.1.1 Identificación de aplicaciones y servicios de red	47
3.1.2 Definición de los objetivos del operador	49

3.1.3 Definición de los límites del operador	49
3.1.4 Definición de los objetivos técnicos	50
3.1.5 Definición de los límites técnicos	51
3.1.6 Evaluación de la arquitectura de solución	52
3.2 Planificación de la red	59
3.2.1 Caracterización de la red existente	59
3.2.2 Cambios recomendados para la red existente	65
3.3 Diseño de la red	65
3.3.1 Diseño de la infraestructura de capa 2	66
3.3.2 Diseño de la infraestructura de capa 1	77
3.4 Equipamiento para la red	114
3.4.1 Terminal de línea óptica	114
3.4.2 Acoplador de video	118
3.4.3 Terminal de red óptica	119
3.4.4 Amplificador de fibra dopada con erbio o EDFA	121
CAPÍTULO IV	
ANÁLISIS DE COSTOS	122
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	124
BIBLIOGRAFIA	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Sistema de cable	6
Figura 1.2	Espectro para el sistema de cable	7
Figura 1.3	Envío de datos por cable	8
Figura 1.4	Ancho de banda para ADSL	10
Figura 1.5	Conexiones DSL	11
Figura 1.6	Red de acceso ADSL	12
Figura 2.1	Marco ITU-T G.984.x	17
Figura 2.2	Plan de longitudes de onda PON	18
Figura 2.3	Encapsulación en GPON	19
Figura 2.4	Formato de trama GPON	20
Figura 2.5	Bloque PCBd	20
Figura 2.6	Campo US BW Map	21
Figura 2.7	Asignación de BW para 3 ONTs	22
Figura 2.8	Asignación de BW dinámico	23
Figura 2.9	Encabezado de la trama GPON en la dirección ascendente	23
Figura 2.10	Encapsulación GEM	25
Figura 2.11	Modo de operación continuo en la dirección descendente	26
Figura 2.12	Modo de operación de ráfagas en la dirección ascendente	27
Figura 2.13	Problema de superposición	28
Figura 2.14	Ejemplo de fluctuación de distancia	29
Figura 2.15	Escenarios de la norma IEEE 802.3ah	31
Figura 2.16	ONU y OLT en la red EPON	31
Figura 2.17	Configuración EPON	32
Figura 2.18	Formato de trama para EPON	33
Figura 2.19	Operación de EPON para el tráfico descendente	33
Figura 2.20	Operación de EPON para el tráfico ascendente	34
Figura 2.21	Mensajes GATE iniciales	35
Figura 2.22	Mensaje REGISTER_REQ	35

Figura 2.23 Mensaje REGISTER.....	36
Figura 2.24 Mensajes GATE de concesión	36
Figura 2.25 Mensaje REGISTER_ACK	37
Figura 2.26 Arquitectura DPoE	38
Figura 2.27 SIEPON para la interoperabilidad de servicios	39
Figura 2.28 Evolución de GPON.....	40
Figura 2.29 Compatibilidad de GPON y XG-PON1	41
Figura 2.30 Coexistencia de EPON y 10 G-EPON	42
Figura 2.31 Evolución de las redes PON.....	43
Figura 2.32 Escenarios PON desplegados – FTTx	44
Figura 3.1 Enfoque de diseño de arriba hacia abajo.....	45
Figura 3.2 Ciclo de vida de una red	46
Figura 3.3 Encapsulación de una trama Ethernet con GPON y EPON	54
Figura 3.4 Fragmentación de tramas.....	56
Figura 3.5 Diferencia en la estructura de trama de GPON y EPON	56
Figura 3.6 Red troncal del operador	60
Figura 3.7 Elementos del Heand End y de la planta externa del operador	61
Figura 3.8 Distribución de cobre de la red del operador	62
Figura 3.9 Red de distribución actual en la zona objetivo para la red piloto	63
Figura 3.10 Cobertura objetivo para la red piloto	64
Figura 3.11 OLT como switch de capa 2	67
Figura 3.12 Modo de envío de conexión cruzada para clientes importantes	68
Figura 3.13 Diferentes VLANs para diferentes OLTs.....	68
Figura 3.14 Modo de envío de conexión ibridge para clientes residenciales comunes	69
Figura 3.15 Modos de marcado confiable y no confiable	71
Figura 3.16 Modos de etiquetado apilado y no apilado.....	71
Figura 3.17 Modo de etiquetado passthrough.....	72
Figura 3.18 Modo no apilado en la dirección descendente.....	73
Figura 3.19 Modo apilado en la dirección descendente.....	74
Figura 3.20 Modos no confiable y no apilado en la dirección ascendente	75
Figura 3.21 Modos no confiable y apilado en la dirección ascendente	75
Figura 3.22 Modos confiable y no apilado en la dirección ascendente	76
Figura 3.23 Modos confiable y apilado en la dirección ascendente	77
Figura 3.24 Topologías de distribución óptica.....	78
Figura 3.25 Secciones de fibra de la PON	78
Figura 3.26 Arquitectura de la ODN con <i>splitters</i> centralizados	79

Figura 3.27 Arquitectura de la ODN con <i>splitters</i> distribuidos	80
Figura 3.28 Redundancia en la alimentación de la PON	81
Figura 3.29 Aplicaciones actuales de GPON	82
Figura 3.30 Sensibilidad en el ONT para la señal de video analógico	86
Figura 3.31 Tipos de <i>splitters</i>	90
Figura 3.32 Formas de integración de los <i>splitters</i>	90
Figura 3.33 Máquina empalmadora	91
Figura 3.34 Escenario con <i>splitters</i> centralizados con superposición de video	94
Figura 3.35 Escenario con <i>splitters</i> distribuidos con superposición de video.....	96
Figura 3.36 Escenario con <i>splitters</i> centralizados sin superposición de video.....	98
Figura 3.37 Escenario con <i>splitters</i> distribuidos sin superposición de video.....	100
Figura 3.38 Conectores SC/UPC y SC/APC	103
Figura 3.39 Sección alimentadora de la red piloto	107
Figura 3.40 Sección distribuidora de la red piloto	108
Figura 3.41 Cobertura potencial de la red piloto	110
Figura 3.42 Cobertura de la red a futuro	111
Figura 3.43 Estructura del cable ADSS	112
Figura 3.44 Estructura del cable Ribbon	113
Figura 3.45 Máquina empalmadora para cable Ribbon	113
Figura 3.46 OLTS-M.....	114
Figura 3.47 Tarjeta ACU	115
Figura 3.48 Tarjeta EHNT-B	115
Figura 3.49 Tarjeta GLT4-A	116
Figura 3.50 Módulos SFP y XFP	117
Figura 3.51 Tarjeta EXNT-A.....	117
Figura 3.52 Tarjeta NGLT-A.....	118
Figura 3.53 Rack FIST-GR2	118
Figura 3.54 Bandeja VCW4-A.....	119
Figura 3.55 ONT I-241W-P	120
Figura 3.56 Serie de ONTs	120
Figura 3.57 EDFA.....	121

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA N° 1.1	Suscriptores de Internet en el 2012 y 2013	5
TABLA N° 3.1	Aplicaciones planificadas	47
TABLA N° 3.2	Servicios planificados	48
TABLA N° 3.3	Objetivos del operador	49
TABLA N° 3.4	Límites del operador	50
TABLA N° 3.5	Objetivos técnicos	51
TABLA N° 3.6	Límites técnicos	52
TABLA N° 3.7	Pérdidas ópticas para las clases de ODN	58
TABLA N° 3.8	Formato del etiquetado de VLAN	70
TABLA N° 3.9	Niveles de potencia para 2,488/1,244 Gbps con una ODN clase B+	84
TABLA N° 3.10	Niveles de potencia para 2,488/1,244 Gbps con una ODN clase C+	85
TABLA N° 3.11	Parámetros de la interfaz óptica a 2,488 Gbps en sentido descendente	87
TABLA N° 3.12	Parámetros de la interfaz óptica a 1,244 Gbps en sentido ascendente ..	88
TABLA N° 3.13	Características de la fibra óptica monomodo G.652-B	89
TABLA N° 3.14	Especificaciones para el acoplador WDM1r	92
TABLA N° 3.15	Pérdidas de inserción de los componentes ópticos pasivos en la ODN ..	92
TABLA N° 3.16	Balance de atenuación para una ODN clase B+	93
TABLA N° 3.17	Balance de atenuación para una ODN clase C+	93
TABLA N° 3.18	Distancias desde la cabecera hasta los <i>splitters</i> secundarios	109
TABLA N° 4.1	Costos de equipamiento para la nueva red GPON	123

ABREVIACIONES

AAL	ATM Adaptation Layer
ACU	Alarm Control Unit
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
ADSS	All-Dielectric Self-Supporting
AES	Advanced Encryption Standard
APC	Angled Physical Contact
APD	Avalanche Photodiode
APON	ATM Passive Optical Network
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BIP	Bit Interleaved Parity
BPON	Broadband Passive Optical Network
BW	Bandwidth
CATV	Community Antenna Television
CFI	Canonical Format Indicator
CLI	Command Line Interface
CM	Cable Modem
CMTS	Cable Modem Termination System
CNR	Carrier-to-Noise Ratio
CO	Central Office
CoS	Class Of Service
CP	Customer Premises
CPE	Customer Premises Equipment
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CTS	Common Technical Specifications
DBA	Dynamic Bandwidth Allocation
DFB	Distributed FeedBack
DML	DOCSIS Mediation Layer
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
DPoE	DOCSIS Provisioning Of EPON
DS	DownStream
DSCP	Differentiated Services Code Point
DSL	Digital Subscriber Line
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer

DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
eHCL	Ethernet High Capacity Link
eOAM	Ethernet Operations, Administration and Maintenance
EPON	Ethernet Passive Optical Network
FBT	Fused Biconic Taper
FCC	Federal Communications Commission
FCS	Frame Check Sequence
FEC	Forward Error Correction
FIST-GR2	Fiber Infrastructure System Technology-Generic Rack 2
FSAN	Full Service Access Network
FTTB	Fiber To The Business
FTTC	Fiber To The Curb
FTTH	Fiber To The Home
FTTO	Fiber To The Office
FTTP	Fiber To The Premises
GEM	GPON Encapsulation Method
GPON	Gigabit-capable Passive Optical Network
GPS	GPON Physical medium dependant Specifications
GSR	GPON Service Requirements
GTC	GPON Transmission Convergence
HDTV	High Definition Television
HEC	Header Error Control/Check
HFC	Hybrid Fibre Coaxial
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ILMI	Interim Local Management Interface
IP	Internet Protocol
IPTV	Internet Protocol Television
ISAM	Intelligent Services Access Manager
ISP	Internet Service Provider
ITU-T	ITU Telecommunication Standardization Sector
LC	Lucent Connector
LED	Light-Emitting Diode
LLID	Logical Link Identifier
LT	Line Termination
MAC	Media Access Control

MIB	Management Information Base
MLM	Multi-Longitudinal Mode
MPCP	Multi-Point Control Protocol
MSO	Multiple-System Operator
NGA	Next-Generation Access
NG-PON	Next Generation Passive Optical Network
NID	Network Interface Device
NRZ	Non-Return-to-Zero
NT	Network Termination
NTSC	National Television System Committee
OAM	Operations, Administration and Maintenance
ODN	Optical Distribution Network
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OLT	Optical Line Terminal
OMCI	ONT Management and Control Interface
ONT	Optical Network Terminal
ONU	Optical Network Unit
ORL	Optical Return Loss
OSI	Open System Interconnection
P2MP	Point to Multi-Point
PAL	Phase Alternating Line
PCB	Physical Control Block
PCS	Physical Coding Sublayer
PLC	Planar Lightwave Circuit
PLI	Payload Length Indicator
PLOAM	Physical Layer Operations, Administration and Maintenance
PMD	Physical Medium Dependent
PON	Passive Optical Network
POP	Point Of Presence
POTS	Plain Old Telephone Service
PTI	Payload Type Indicator
PVC	Permanent Virtual Circuit
QoS	Quality of Service
RF	Radio Frequency
RG	Residential Gateway
RS	Reconciliation Sublayer

SBS	Stimulated Brillouin Scattering
SC	Suscriptor Connector
S-CDMA	Synchronous-Code Division Multiple Access
SCTE	Society of Cable Telecommunication Engineers
SDSL	Symmetric Digital Subscriber Line
SECAM	Séquentiel Couleur à Mémoire
SFP	Small Form-factor Pluggable
SIEPON	Service Interoperability in Ethernet Passive Optical Networks
SLM	Single-Longitudinal Mode
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
SPD	Start Delimiter Package
TC	Transmission Convergence
T-CONT	Traffic-Containers
TDM	Time-Division Multiplexing
TDMA	Time division multiple access
TPID	Tag protocol identifier
US	UpStream
USB	Universal Serial Bus
VCI	Virtual Channel Identifier
vCM	Virtual Cable Modem
VCS	Video Coupler Subrack
VCW	Video Coupler WDM
VDSL	Very high bit-rate Digital Subscriber Line
VID	VLAN Identifier
VLAN	Virtual Local Area Networks
VoIP	Voice-over-Internet Protocol
VPI	Virtual Path Identifier
WBF	Wavelength Blocking Filter
WDM	Wavelength Division Multiplexing
XAUI	10 Gigabit Attachment Unit Interface
XFP	10 Gigabit Small Form factor Pluggable
XG-PON	10 Gigabit Passive Optical Network

INTRODUCCIÓN

Actualmente, las telecomunicaciones están presentando aumentos abruptos en el volumen del tráfico demandado por los usuarios. Para poder soportar todo ello, las redes desplegadas por los proveedores de servicios deben ser capaces de soportar toda esta gran cantidad de información. Las actuales redes de acceso de los operadores en el Perú tienen limitaciones en el ancho de banda y presentan problemas que tienen como causa el uso del cobre como medio de transmisión. En un futuro cercano estas redes de acceso serán obsoletas, por lo que el uso de la fibra óptica será la única opción para implementar las redes de telecomunicaciones.

Las ventajas de la fibra óptica en comparación con el cobre son: elevado ancho de banda, inmunidad a los ruidos e interferencias electromagnéticas, tramos largos de enlace sin necesidad de repetidores y alta seguridad, ya que es difícil que personas maliciosas puedan robar la señal de la fibra óptica. Los beneficios son tanto para el operador como para los usuarios, más aún si la fibra llega hasta o lo más cerca a las instalaciones de los clientes.

Dentro de las tecnologías ópticas, el uso de los elementos pasivos ha tenido un gran auge a nivel mundial y operadores como Verizon y NTT DoCoMo tienen redes desplegadas con estos elementos en sus redes de acceso de banda ancha. Los elementos pasivos ahorran energía eléctrica en la planta externa, sobre todo en las redes HFC, en donde se utilizan amplificadores eléctricos. Con ello, se reduce el costo en la operación de la red y se refleja un menor precio del servicio para los usuarios.

El presente trabajo analiza las redes de acceso ópticas pasivas o PON con FTTP y brinda una metodología de diseño para solucionar las limitaciones de las redes de acceso en el Perú. Las redes PON soportan las velocidades altas que se requieren en las actuales y futuras aplicaciones, como los servicios convergentes de voz, datos y video o lo que se conoce como Triple Play y las aplicaciones multimedia interactivas.

El informe se organiza en cuatro capítulos principales:

- **Capítulo I “Planteamiento de la ingeniería del problema”:** Se explica el problema de ingeniería y se precisan los objetivos del informe. También se hace una evaluación

de la problemática de las redes de acceso basadas en cobre y se establece el alcance del trabajo.

- **Capítulo II “Fundamento de las redes ópticas pasivas”**: Se describen los conceptos y fundamentos de las PON y los tipos de FTTx. Para ello, se toma en cuenta las normas internacionales que rigen sobre estas tecnologías.
- **Capítulo III “Metodología para la solución del problema”**: Se realiza la preparación, planificación y diseño de la red de acceso óptica con elementos pasivos, y se describe el equipamiento ha utilizar. También, se diseña una red piloto en una zona de la cobertura del operador de cable y se muestran las proyecciones a futuro.
- **Capítulo IV “Análisis de costos”**: Se realiza el análisis de costos del equipamiento para verificar que se esté dentro del margen presupuestal.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INGENIERÍA DEL PROBLEMA

En este capítulo se describen los objetivos y el alcance del presente informe. También, se evalúa la problemática de las redes de acceso basadas en cobre y se explican sus limitaciones actuales.

1.1 Objetivos del informe

El presente trabajo presenta los siguientes objetivos:

- Realizar una metodología de diseño de una red de acceso óptico para la siguiente generación bajo el enfoque de "arriba hacia abajo" tomando como referencia el modelo OSI. Se empieza por la capa de aplicación y se termina en la capa física.
- Realizar la preparación de la red, donde se analizan los requerimientos organizacionales y técnicos de la empresa operadora de cable, y se evalúan las posibles soluciones tecnológicas basadas en elementos ópticos pasivos. De esta manera, se identifica la que mejor se adapte a los requerimientos.
- Realizar la planificación de la red, donde se caracteriza la red existente de la empresa operadora de cable para poder tener una mejor visión del escenario donde se realiza el diseño.
- Diseñar la red y realizar una red piloto en una zona de la cobertura de la empresa operadora de cable.
- Mostrar las proyecciones a futuro de la red tanto en cobertura como en capacidad.
- Realizar un análisis de costo del equipamiento a utilizar.
- Describir las conclusiones y recomendaciones de acuerdo a todo lo fundamentado.

1.2 Alcance del informe

El presente informe realiza una metodología de diseño de alto nivel de una red de acceso con elementos ópticos pasivos bajo el enfoque de "arriba hacia abajo" de acuerdo

al modelo OSI. Se empieza el análisis en la capa de aplicación y se termina en la capa física. El estudio se realiza en base a la red de CATV desplegada por la empresa LCV, que en adelante se cita con la denominación de "operador".

El trabajo se divide en la preparación, planificación y diseño de la red, y se culmina con la realización de un piloto de red de acuerdo principalmente a los parámetros físicos que se analizan. Adicionalmente, se presentan las proyecciones para los requerimientos futuros que pueda tener el operador. También, se realiza un análisis de costo del equipamiento a utilizar y se muestran las conclusiones y las recomendaciones de acuerdo a todo lo fundamentado en el informe.

No está dentro del alcance del informe diseñar los servicios de una red inteligente como la QoS, la seguridad y el multicast. El trabajo se centra principalmente en el diseño de la infraestructura de la red. Tampoco se toman en cuenta características que involucren a los equipos de la red de agregación o núcleo. El diseño está enfocado en la red de acceso para servicios de banda ancha y solo se mencionan aspectos ajenos a ello en caso sean necesarios.

1.3 Descripción del problema

Las actuales redes de acceso de banda ancha utilizan principalmente dos tecnologías alámbricas: cable y DSL. Ambas utilizan el cobre en el bucle local como medio de transmisión y debido a ello el servicio se limita en muchos aspectos.

En las redes de cable, que utilizan generalmente una arquitectura híbrida de coaxial y fibra (HFC) se tiene la problemática de que el ancho de banda es compartido por todos los abonados, es decir, a mayor cantidad de usuarios menor será el ancho de banda que se podrá ofrecer a cada uno. El uso de amplificadores en el segmento coaxial implica un aumento en el costo por el uso de energía a la vez que el ruido también aumenta. Un problema adicional es que la señal a través del cobre puede ser extraída fácilmente por personas maliciosas, lo que afecta económicamente a los operadores y a los usuarios en la calidad de la señal que reciben.

En las redes DSL, que utilizan par de cobre por abonado desde el hogar hasta la oficina central o DSLAM, se tiene la problemática de la distancia del bucle local, es decir, mientras más lejos se encuentre el abonado, más degradada se encontrará la señal. La máxima distancia de cobre permisible para tener una señal aceptable es de 5,5 Km, por lo que el alcance de la red también se encuentra limitado. Actualmente, existen varios tipos de tecnologías DSL: ADSL, ADSL+, VDSL, etc., los cuales aumentan la capacidad de uso de ancho de banda del cobre. Además, si se despliega fibra óptica desde la oficina central hasta un punto intermedio, antes de llegar al usuario, se mejora también el

servicio, pero igual se necesita una unidad de red óptica (ONU) para convertir la señal óptica a eléctrica y esto, si se tiene varios usuarios, aumenta el costo de la planta externa.

El uso de elementos ópticos pasivos reducen los costos de implementación y operación de la planta externa al no tener que utilizar energía eléctrica. Además, con la fibra óptica se tienen varios kilómetros de alcance. A nivel mundial esta tendencia ya se está aplicando pero en el Perú todavía se está en proceso.

Las aplicaciones y servicios como IPTV, HDTV, juegos interactivos o en línea, se están desarrollando rápidamente y requerirán una mayor velocidad en el bucle local. La demanda de Internet fija también está creciendo con pendiente positiva y el reflejo de ello se observa en el aumento de la cantidad de usuarios de banda ancha en 14,38% entre el segundo trimestre del año 2012 al segundo trimestre del 2013. Esto se aprecia en la tabla 1.1. Por ello, la optimización de las redes de acceso es muy importante y dan beneficios tanto a los usuarios como a los operadores.

TABLA N° 1.1 Suscriptores de Internet en el 2012 y 2013

Fuente: Cuadro N° 1 de [1]

Ámbito Geográfico	II T 2012	I T 2013	II T 2013
Lima Metropolitana y Callao ¹	853 698	920 851	949 299
Resto del País	494 252	564 948	592 537
Nivel Nacional	1 347 950	1 485 799	1 541 836
Densidad a Nivel Nacional	4,47	4,89	5,06

1.4 Evaluación del problema

En esta sección se describe las características principales y las limitaciones de las tecnologías de cable y DSL, que son las que más se utilizan actualmente en las redes de acceso de banda ancha.

1.4.1 Tecnología de cable

a) Características principales

El sistema de cable usa un cable coaxial que transporta las señales de radiofrecuencia (RF) a través de la red. El cable coaxial es el medio principal usado para construir sistemas de televisión por cable.

Los sistemas de cable modernos proporcionan una comunicación bidireccional entre los abonados y el operador de cable. Estos operadores, en general, implementan redes HFC para aumentar la transmisión de datos a los módems por cable ubicados en las pequeñas oficinas y oficinas domésticas. La figura 1.1 muestra el sistema en mención.

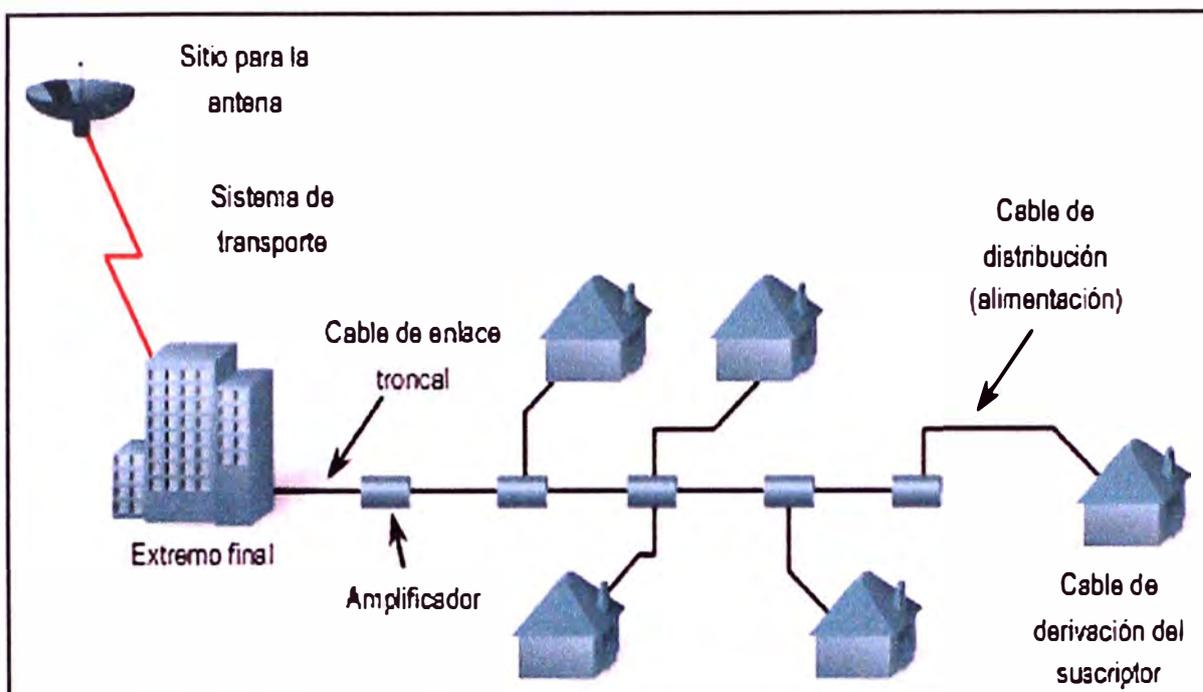


Figura 1.1 Sistema de cable

Fuente: Capítulo 6 de [2]

La industria de la televisión por cable usa una parte del espectro electromagnético de RF. Dentro del cable, frecuencias diferentes llevan datos y canales de televisión. En el extremo del suscriptor, los equipos tales como televisores, videograbadoras y decodificadores de televisión sintonizan ciertas frecuencias que permiten que el usuario vea el canal o, si se usa un módem por cable, que reciba acceso a Internet.

Una red por cable es capaz de transmitir señales en el cable en cualquier dirección al mismo tiempo. Se utiliza el siguiente ámbito de frecuencias:

- **Descendente:** La dirección de una transmisión de señal de RF (datos y canales de televisión) desde el origen (cabecera) hacia el destino (suscriptores). La transmisión desde el origen hacia el destino se denomina ruta de envío. Las frecuencias descendentes se encuentran en el rango de 50 a 860 megahercios (MHz).
- **Ascendente:** La dirección de una transmisión de señal de RF desde los suscriptores hacia la cabecera o la ruta inversa o de regreso. Las frecuencias ascendentes se encuentran en el rango de 5 a 42 MHz.

La figura 1.2 muestra el ámbito de frecuencias descritas.

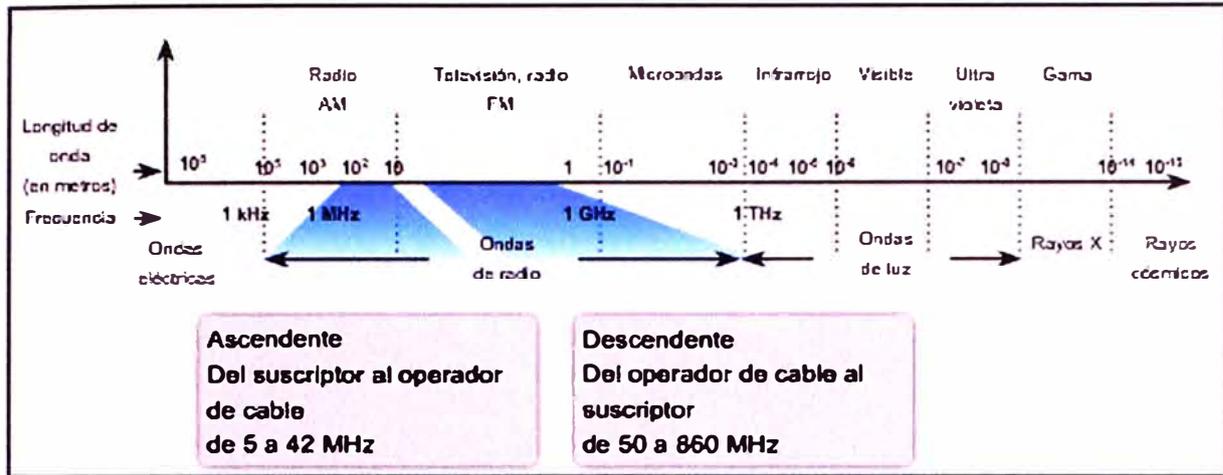


Figura 1.2 Espectro para el sistema de cable

Fuente: Capítulo 6 de [2]

La especificación sobre interfaz del servicio de datos por cable (DOCSIS) es una norma internacional desarrollada por CableLabs, un consorcio sin fines de lucro dedicado a la investigación y el desarrollo de las tecnologías relacionadas con el cable. CableLabs prueba y certifica dispositivos de proveedores de equipos de cable, como módems por cable y sistemas de terminación de módems de cable, y otorga el estado calificado o certificado por DOCSIS.

DOCSIS define los requisitos de interfaz de soporte de operaciones y comunicaciones para el sistema de datos por cable y permite la incorporación de transferencia de datos de alta velocidad a un sistema CATV existente. Los operadores de cable emplean DOCSIS para proporcionar acceso a Internet por la infraestructura existente de HFC.

DOCSIS especifica los requisitos de capa 1 y 2 del modelo OSI:

- **Capa física:** Para las señales de datos que el operador de cable puede usar, DOCSIS especifica los anchos de canales (anchos de banda de cada canal) como 200 KHz, 400 KHz, 800 KHz, 1.6 MHz, 3.2 MHz y 6.4 MHz. DOCSIS también especifica las técnicas de modulación (la manera de usar señales de RF para transmitir los datos digitales).
- **Capa MAC:** Define un método de acceso determinista, acceso múltiple por división temporal (TDMA) o el método de acceso múltiple por división de código síncrono (S-CDMA).

Los planes para las bandas de asignación de frecuencias difieren entre los sistemas de cable europeos y norteamericanos. Euro-DOCSIS está adaptado para su uso en Europa. Las diferencias principales entre DOCSIS y Euro-DOCSIS se relacionan con los anchos de banda del canal. Las normas técnicas de televisión varían en el mundo, lo que afecta cómo se desarrollan las variantes de DOCSIS. Las normas internacionales de

coaxial como medio de transmisión. Estos inconvenientes son los siguientes:

- El cable coaxial puede ser afectado por los ruidos e interferencias electromagnéticas que afectan la calidad de la señal.
- El ancho de banda para esta tecnología está limitada a 37 MHz para el tráfico ascendente y a 810 MHz para el tráfico descendente teniendo en cuenta las bandas de guarda. Este espectro es compartido por todos los usuarios.
- Las velocidades por usuario generalmente están en el rango de 256 Kbps a 6 Mbps en la dirección descendente, lo cual va a ser muy poco en un futuro cercano debido a las nuevas aplicaciones y servicios que se están desarrollando.
- El uso de amplificadores y nodos en la planta externa aumenta el costo de la operación de la red, ya que estos equipos necesitan consumir energía eléctrica.
- Los casos de robo de señal son muy comunes en este escenario ya que es muy fácil obtener la señal del cable coaxial. Esto genera pérdidas económicas para el operador y afecta la calidad de la señal del abonado.

1.4.2 Tecnología DSL

a) Características principales

Hace varios años, los laboratorios de Bell identificaron que una conversación de voz común por un bucle local solamente requería un ancho de banda de 300 Hz a 3 KHz. Durante varios años, las redes telefónicas no usaron un ancho de banda superior a 3 KHz. Los avances en tecnología permitieron que DSL use el ancho de banda adicional desde 3 KHz hasta 1 ó 2 MHz para proporcionar servicios de datos mediante las líneas de cobre comunes.

Como ejemplo, DSL asimétrica (ADSL) usa un rango de frecuencia de 20 KHz a 1 MHz aproximadamente. Por suerte, sólo se requieren cambios relativamente pequeños en la infraestructura existente de las empresas telefónicas para ofrecer velocidades de datos a los suscriptores.

Existen dos tipos básicos de tecnología DSL: la asimétrica (ADSL) y la simétrica (SDSL). Todas las formas de servicio DSL se pueden clasificar como ADSL ó SDSL y existen muchas variedades de cada tipo. ADSL brinda un mayor ancho de banda descendente al usuario que el ancho de banda de carga. SDSL ofrece la misma capacidad en ambas direcciones.

Los distintos tipos de DSL brindan diferentes anchos de banda, algunos con capacidades que exceden aquellas de la línea alquilada T1 ó E1. La velocidad de transferencia depende de la longitud real del bucle local y del tipo y condición de su cableado. Para obtener un servicio satisfactorio, el bucle debe ser menor a 5,5 kilómetros

(3,5 millas). La figura 1.4 muestra el ancho de banda que utiliza la tecnología ADSL:



Figura 1.4 Ancho de banda para ADSL

Fuente: Capítulo 6 de [2]

Los proveedores de servicio implementan conexiones DSL en el último paso de una red telefónica local, lo que se denomina bucle local o última milla. Se instala la conexión entre un par de módems ubicados en cualquier extremo de un cable de cobre que se extiende entre el equipo local del cliente (CPE) y el multiplexor de acceso DSL (DSLAM). El DSLAM es el dispositivo ubicado en la oficina central (CO) del proveedor, que concentra las conexiones desde los distintos suscriptores DSL.

Los dos componentes claves para brindar servicio con DSL son el transceptor DSL y el DSLAM:

- **Transceptor:** Es un módem DSL conectado a la computadora del usuario mediante un cable USB o Ethernet. Los transceptores DSL más nuevos pueden integrarse en routers pequeños con varios puertos de switch 10/100 para que usen las oficinas pequeñas.
- **DSLAM:** Ubicado en la oficina central de la empresa de telecomunicaciones, el DSLAM combina conexiones DSL individuales de los usuarios en un enlace de alta capacidad al ISP y, por lo tanto, a Internet.

La ventaja que tiene DSL sobre la tecnología por cable es que no es un medio compartido. Cada usuario tiene una conexión directa separada al DSLAM. La incorporación de usuarios no afecta el rendimiento a menos que la conexión de Internet DSLAM al ISP o Internet se sature. La conexión DSL se muestra en la figura 1.5.

Cuando el proveedor del servicio coloca voz analógica y ADSL en el mismo cable, divide el canal POTS desde el módem ADSL por medio de filtros o divisores de señal. Esta configuración garantiza el servicio telefónico normal sin interrupciones, aun si ocurre

una falla en el ADSL. Cuando los filtros o divisores de señal están en su lugar, el usuario puede usar la línea de teléfono y la conexión ADSL al mismo tiempo, sin afectar ninguno de los servicios.

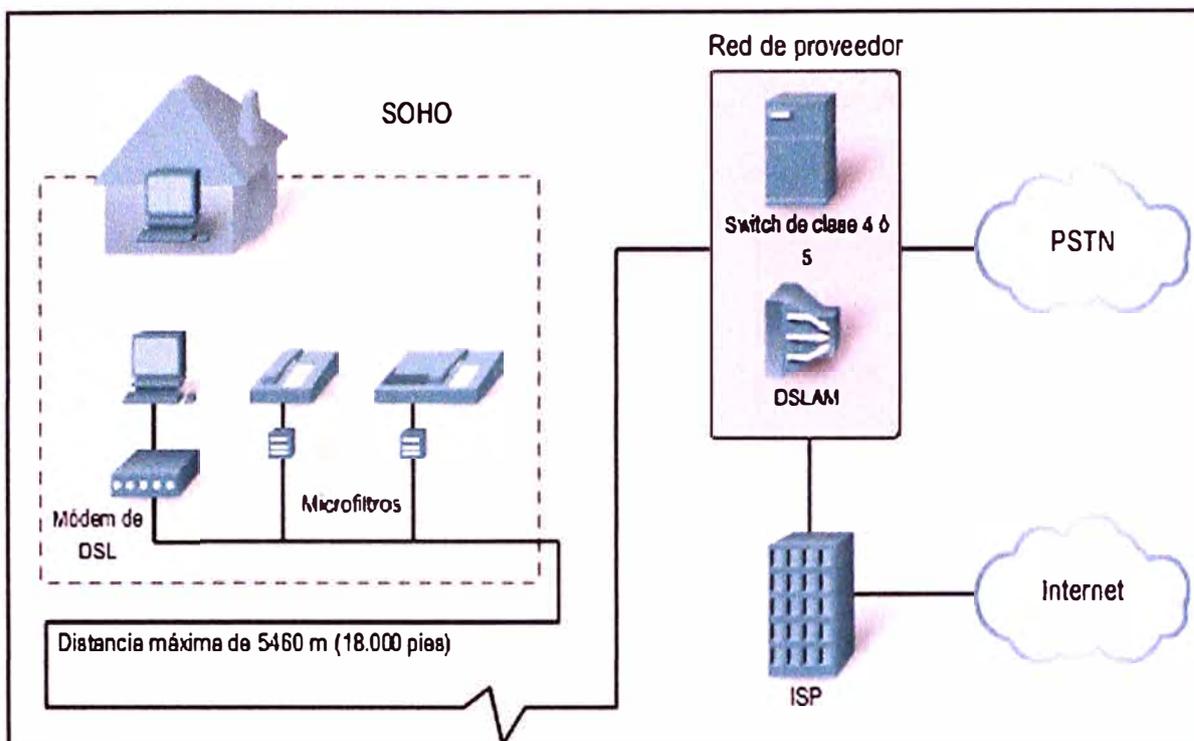


Figura 1.5 Conexiones DSL

Fuente: Capítulo 6 de [2]

Las señales ADSL distorsionan la transmisión de voz y se dividen o filtran en las instalaciones del cliente. Hay dos maneras de separar ADSL de la voz en las instalaciones del cliente: mediante un microfiltro o un divisor de señal.

Un microfiltro es un filtro de paso bajo con dos extremos. Un extremo se conecta al teléfono y el otro al jack de pared. Esta solución elimina la necesidad de que un técnico visite las instalaciones y permite que el usuario use cualquier jack de la casa para el servicio de voz o ADSL.

Los divisores de señal POTS separan el tráfico DSL del tráfico POTS. El divisor de señal POTS es un dispositivo pasivo. Si se produce un corte de energía eléctrica, el tráfico de voz aún se desplaza al switch de voz en la oficina central de la empresa de telecomunicaciones. Los divisores de señal se ubican en la oficina central y, en algunas implementaciones, en las instalaciones del cliente. En la oficina central, el divisor de señal POTS separa el tráfico de voz, destinado para las conexiones POTS, y el tráfico de datos destinado para el DSLAM.

El bucle local termina en las instalaciones del cliente en el punto de demarcación. El

dispositivo real es el dispositivo de interfaz de red (NID). Este punto es, generalmente, donde la línea telefónica ingresa a las instalaciones del cliente. En este punto, puede colocarse un divisor de señal en la línea telefónica. La red de acceso ADSL se observa en la figura 1.6.

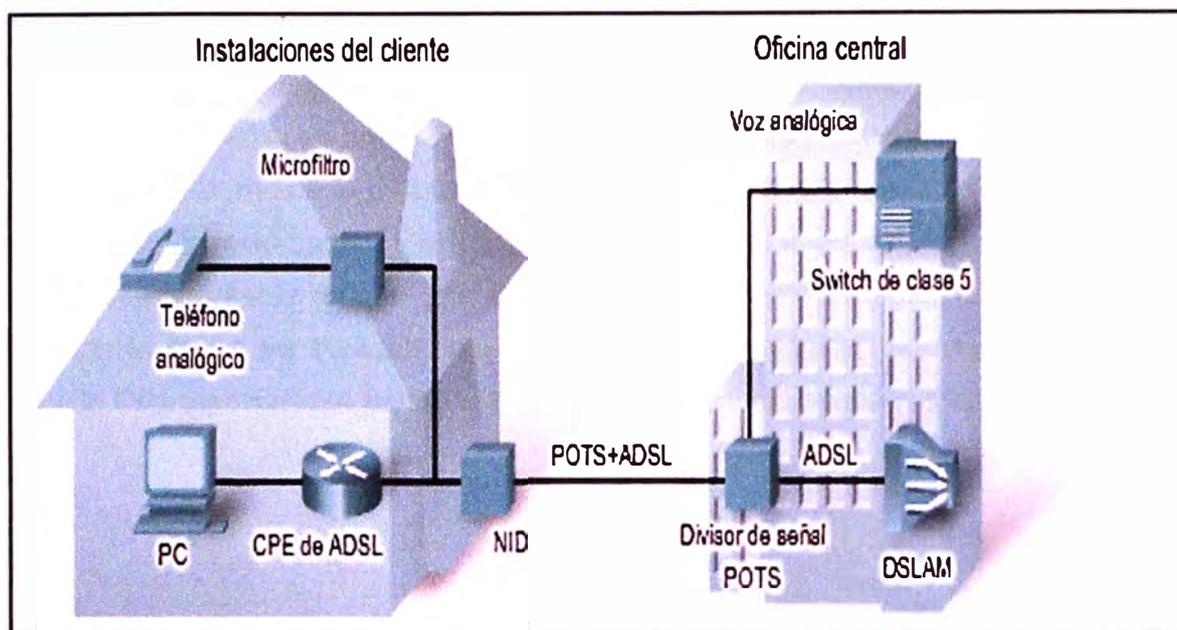


Figura 1.6 Red de acceso ADSL

Fuente: Capítulo 6 de [2]

b) Limitaciones

La tecnología DSL presenta limitantes principalmente debido al uso del par de cobre como medio de transmisión. Estos inconvenientes son los siguientes:

- El par de cobre puede ser afectado por los ruidos e interferencias electromagnéticas que afectan la calidad de la señal.
- El ancho de banda para esta tecnología está limitado a 2 MHz para el tráfico ascendente y descendente, teniendo en cuenta las bandas de guarda.
- Las velocidades por usuario están limitadas por la distancia a la cual se encuentren de la oficina central o DSLAM. A mayor distancia menor será la velocidad de transmisión para el abonado.
- Al estar el bucle local de cobre limitado a una distancia de 5,5 Km, la red no tiene una gran escalabilidad.
- Actualmente se están utilizando tramos de fibra en el bucle local hasta un punto intermedio u ONU. Esto aumenta el alcance y la velocidad de transmisión pero también aumenta el costo de operación, ya que el ONU necesita suministro de energía eléctrica.

1.4.3 Evolución de las redes de acceso basadas en cobre: G.Fast

Actualmente, la ITU-T se encuentra por publicar las normas G.9700 y G.9701 sobre la nueva tecnología llamada G.Fast que sería una evolución de VDSL2. Estas normas especifican velocidades de 200 a 500 Mbps y en condiciones excepcionales se podría llegar a 1 Gbps. Para ello se tendría que acercar la fibra óptica hasta 250 m antes de llegar al hogar o la oficina.

A pesar de que hasta ahora las pruebas de laboratorio están brindando resultados satisfactorios, lo cierto es que G.Fast todavía se encuentra en desarrollo y no se sabe si tendrá éxito en el mercado o cuánto tiempo demorará en llegar a la madurez completa. Además, esta solución solo es aplicable en redes basadas en par de cobre telefónico y no en redes con cable coaxial, por lo que no es una solución global. El uso de la fibra óptica jamás podrá ser superado por el cobre y las tecnologías futuras que aparezcan en base a la fibra tendrán más beneficios que las tecnologías basadas en cobre.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO DE LAS REDES ÓPTICAS PASIVAS

En este capítulo se explican los fundamentos y las normas PON. Principalmente se enfoca en EPON y GPON, que son las tecnologías PON más importantes que se utilizan a nivel mundial y soportan velocidades del orden de los Gbps. Se dará también una introducción a XG-PON y 10GEPON que son una evolución tecnológica para brindar velocidades del orden de los 10 Gbps.

2.1 Normalización de la ITU-T

En el año 2001, el grupo FSAN inició un esfuerzo por normalizar la tecnología PON para tasas mayores a 1 Gbps. Había la necesidad de que la solución sea la más óptima y eficiente en su operación, administración, mantenimiento y provisionamiento.

APON fue la primera red que definió la FSAN con el objetivo de unificar las especificaciones para el acceso de banda ancha a las viviendas. APON basa su transmisión en ráfagas de celdas ATM para el canal descendente con una tasa máxima de 155 Mbps que se reparte entre el número de ONUs o también conocido como ONTs. Esto último fue su principal inconveniente aunque más adelante se aumentó la velocidad hasta los 622 Mbps.

BPON se basa en las redes APON pero con la diferencia que pueden dar soporte a otras normas de banda ancha. Originalmente estaba definida con una tasa de 155 Mbps fijos tanto en canal ascendente como descendente. Más adelante, se modificó para admitir tráfico asimétrico con canal descendente a 622 Mbps y canal ascendente a 155 Mbps. También, se admitió tráfico simétrico con 622 Mbps en ambos sentidos. Actualmente, ya se llega a velocidades de hasta 1 Gbps en el canal descendente. Las recomendaciones G.983.1, G.983.2, G.983.3, G.983.4 y G.983.5 definen los fundamentos y las características de esta tecnología, tanto en la capa dependiente de los medios físicos como la capa de convergencia de transmisión.

GPON está basada en BPON y alcanza velocidades de hasta 2.488 Gbps, el cual puede transportar múltiples servicios como datos y TDM en su forma nativa. En enero del 2003, la ITU-T ratificó la normalización en sus recomendaciones G.984.1, G.984.2 y G.984.3. Posteriormente, salieron las recomendaciones G.984.4, G.984.5, G.984.6 y G.984.7.

2.1.1 Descripción de las recomendaciones

En esta sección se resumen las recomendaciones que la ITU-T tiene para las tecnologías BPON y GPON.

a) Recomendaciones para BPON

Las especificaciones G.983.1, G.983.2, G.983.3, G.983.4 y G.983.5 definen las características y fundamentos de la tecnología BPON.

- **G.983.1 Características generales:** Describe la red de acceso flexible de fibra óptica que puede soportar los requisitos de ancho de banda de los servicios de banda estrecha y de banda ancha. Describe sistemas con velocidades de línea en sentido descendente de 155.52, 622.08 y 1244.16 Mbps, y velocidades nominales de línea en el sentido ascendente de 155.52 y 622.08 Mbps. Se describen tanto los sistemas simétricos como los asimétricos. La recomendación propone los requisitos y especificaciones de capa física para la capa dependiente de los medios físicos, la capa TC y el protocolo de determinación de distancia de una red óptica pasiva de banda ancha basada en ATM.
- **G.983.2 Interfaz de control y gestión de terminales de red óptica:** Describe el sistema de gestión de elementos de la red óptica pasiva de banda ancha (B-PON) a través del terminal de línea óptica (OLT), que utiliza la interfaz de control y gestión de ONT (OMCI). La recomendación detalla los requisitos de esta interfaz de control y gestión. También, especifica las entidades gestionadas de una base de información de gestión independiente del protocolo que modela el intercambio de información entre el OLT y el ONT.
- **G.983.3 Asignación de longitudes de onda:** Define nuevas asignaciones de longitudes de onda para distribuir señales ATM-PON y señales de servicios adicionales de manera simultánea. Nuevas bandas de longitud de onda se ponen a disposición de servicios adicionales limitando la longitud de onda en el sentido hacia el destino de la ATM-PON. Con las bandas nuevas es posible prestar servicios unidireccionales y bidireccionales. Las atribuciones de anchura de banda definidas

permiten la distribución de servicios de radiodifusión de señales de vídeo o servicios de datos donde se tiene en cuenta las características ópticas en general.

- **G.983.4 Asignación dinámica de anchura de banda:** Especifica los requisitos para añadir la funcionalidad de asignación dinámica de anchura de banda (DBA) a los sistemas de acceso óptico de banda ancha. La funcionalidad DBA permite la compartición dinámica de la anchura de banda hacia el origen. La compartición dinámica mejora el aprovechamiento de la anchura de banda y proporciona más flexibilidad para la prestación de servicios adicionales. Esta recomendación contiene especificaciones de funcionamiento de la DBA y de las comunicaciones entre las terminaciones de red óptica.
- **G.983.5 Mayor capacidad de supervivencia:** Se describen las funciones que amplían la Rec. ITU-T G.983.1 para mejorar la capacidad de supervivencia-protección en el suministro de servicios de alta fiabilidad. Se describen arquitecturas de supervivencia de las redes ópticas pasivas de banda ancha, criterios de calidad de funcionamiento en cuanto a la protección y criterios y protocolos de conmutación de protección.

b) Recomendaciones para GPON

Las especificaciones G.984.1, G.984.2, G.984.3, G.984.4, G.984.5, G.984.6 y G.984.7 definen las características y fundamentos de la tecnología GPON.

- **G.984.1 Características generales:** Provee los requerimientos de servicio de GPON (GSR). Éste resume las características de operación que el operador de servicios espera en la red, en términos de velocidad, tolerancia, retardo, etc.
- **G.984.2 Capa dependiente de los medios físicos:** Provee las especificaciones dependientes de los medios físicos de GPON (GPS). Incluye parámetros operacionales de los transmisores y transceptores ópticos, recuperación de reloj y mecanismos de corrección de errores.
- **G.984.3 Capa de convergencia en la transmisión:** Provee las especificaciones de la convergencia en la transmisión de GPON (GTC). Éste es responsable de la correcta implementación del proceso de flujo de datos en la capa física y direcciona problemas en la estructura de la trama, controla la secuencia entre el OLT y los ONTs y tiene la función de encriptar la información.
- **G.984.4 Interfaz de control y gestión de la terminación de la red óptica:** Define la interfaz de control y administración ONT (OMCI) para GPON. Permite la interoperabilidad multi-vendor entre el OLT y el ONT. Con esta interfaz se tiene una administración centralizada desde el OLT.

- **G.984.5 Banda de ampliación:** Define el rango de longitudes de onda para señalar servicios adicionales a través de la multiplexación por división de longitud de onda (WDM), para maximizar los recursos de las redes de distribución óptica.
- **G.984.6 Extensión del alcance:** Describe la arquitectura y los parámetros de interfaz de los sistemas GPON, donde se utiliza equipos de extensión de capa física como regeneradores y amplificadores ópticos entre el OLT y el ONT. El máximo alcance es de 60 Km con presupuestos de pérdidas que exceden los 27.5 dB en ambos tramos.
- **G.984.7 Largo alcance:** Describe los requerimientos para extender el alcance físico máximo de 20 Km a 40 Km entre dos ONUs en una red óptica pasiva.

La figura 2.1 muestra el stack de protocolos en la arquitectura GPON.

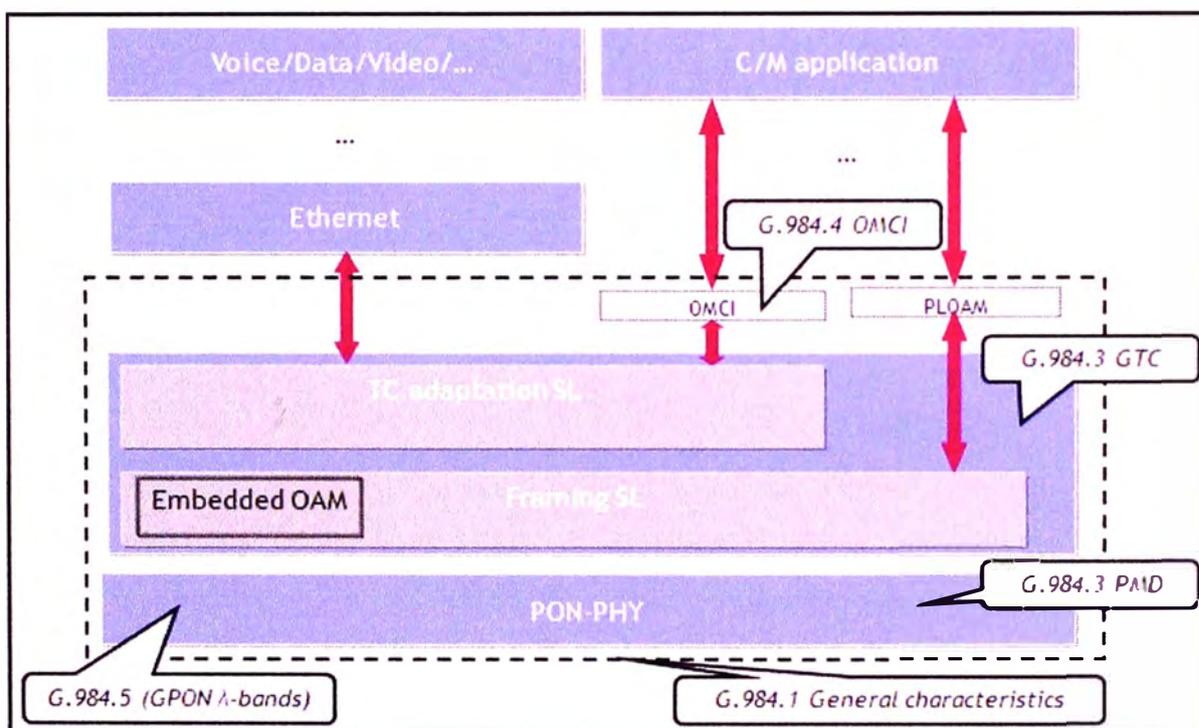


Figura 2.1 Marco ITU-T G.984.x

Fuente: [3]

2.1.2 Fundamentos de GPON

En esta sección se detallan los tópicos relacionados a los fundamentos de GPON de acuerdo a las recomendaciones mencionadas. La mayoría de los puntos tocados se aplican también en APON y BPON.

a) Propiedades PON

De acuerdo al GSR, GPON es una red full-service, lo que significa que puede transportar todo tipo de servicios. Esto incluye 10 y 100 Mbps Ethernet, telefonía

Dependiendo de las capacidades ópticas de los transmisores y receptores, las recomendaciones de GPON especifican una distancia máxima de transmisión de 10 a 20 Km. También, el número máximo de rutas divididas es de 64 (aunque actualmente se llega a 128).

La norma especifica una distancia lógica máxima de 60 Km relativo al proceso de fluctuación, donde el ONT adiciona un retardo de ecualización que depende de la distancia al OLT.

b) Formatos y capas de protocolos GPON

Se utiliza el método de encapsulación GPON (GEM) para encapsular tráfico ATM, Ethernet ó TDM, el cual está basado en TDM/TDMA óptico. Esto se puede verificar en la figura 2.3.

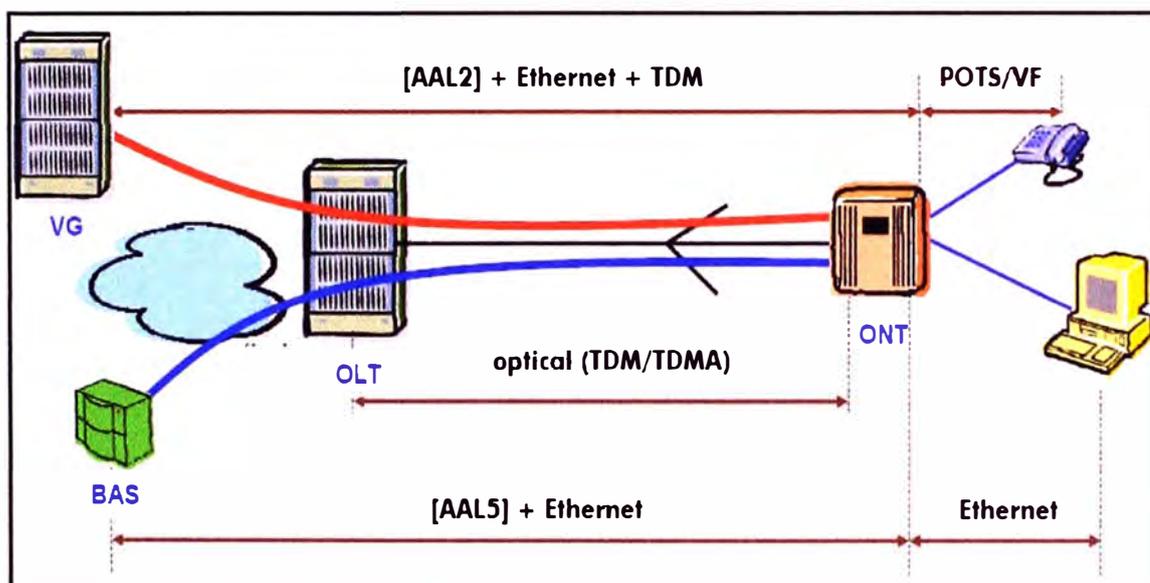


Figura 2.3 Encapsulación en GPON

Fuente: [3]

Para el caso del transporte de celdas ATM, se utiliza AAL2 (adaptado para voz) y AAL5 (adaptado para datos). En la figura 2.3 estos protocolos de transporte se encuentran entre corchetes debido a que actualmente ATM ya no es muy utilizado.

El formato de trama GPON está especificado en la recomendación ITU-T G984.3: GTC. Esta última es equivalente a la capa 2 del modelo de referencia OSI. También se describe el protocolo de control de acceso al medio, el esquema ranging, los procesos de operación y mantenimiento, y el método de encriptación de información.

La figura 2.4 muestra el formato de trama GPON, que tiene un tamaño fijo de 125 μ s. La trama consiste en un bloque de control físico (PCB) y la carga compuesta puramente

de ATM ó GEM. La sección PCB contiene información de capa física para el control y administración de la red.

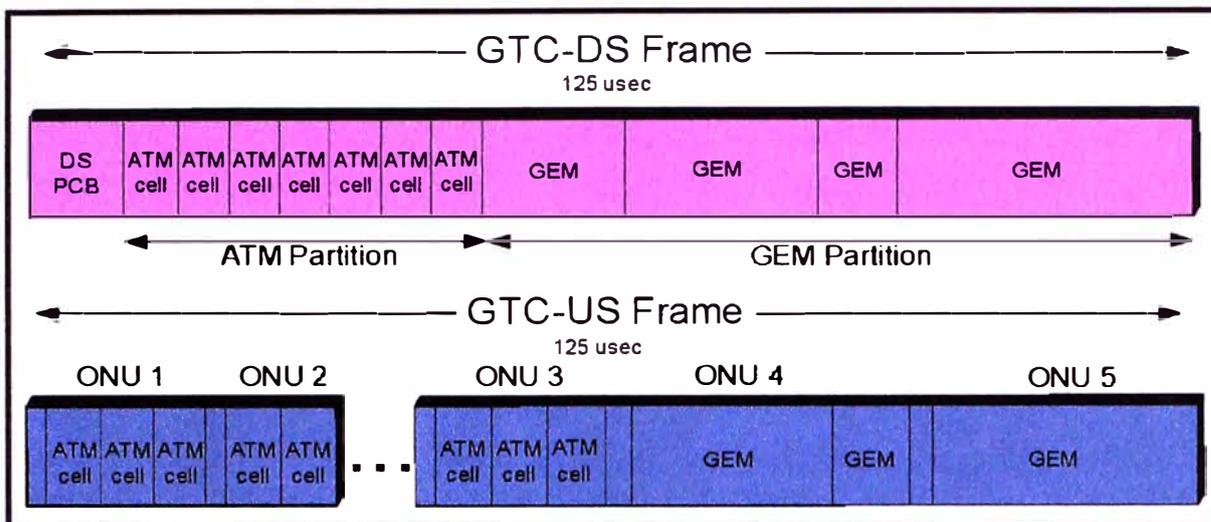


Figura 2.4 Formato de trama GPON

Fuente: [3]

b.1) Campos de la trama GPON en la dirección descendente

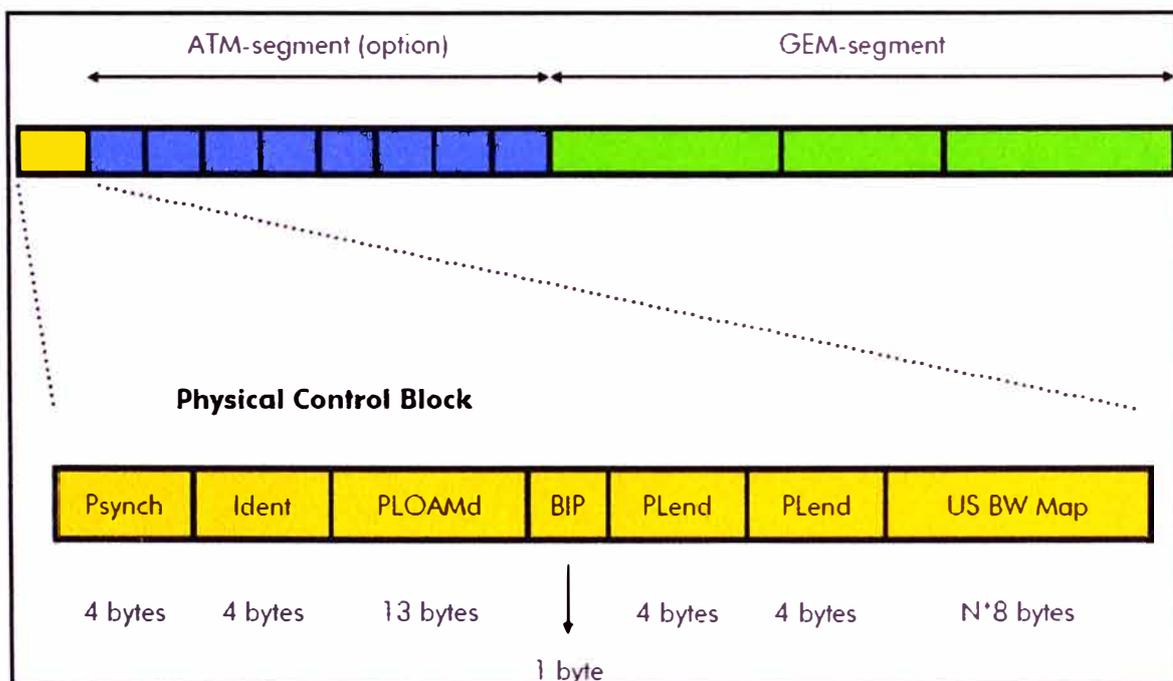


Figura 2.5 Bloque PCBd

Fuente: [3]

La figura 2.5 muestra el bloque de control físico en la dirección descendente (PCBd), el cual contiene la siguiente información:

- 4 bytes para el campo de sincronización (Psync)
- 4 bytes que contienen el contador de 8 KHz, un bit de estado FEC, el bit de conversión de cifrado de clave y 8 bits de estado para usos futuros (Ident).
- 13 bytes para el mensaje OAM (PLOAMd) que se ocupa de funciones como alarmas relativas a OAM y alertas de cruce de umbrales.
- 1 byte que contiene el bit de paridad intercalada (BIP) usado para estimar la tasa de error de bit.
- 4 bytes para el indicador de tamaño de carga útil (Plend) que da el tamaño del campo ancho de banda mapeado en la dirección ascendente (US BW Map) o el tamaño del segmento ATM. Este campo se envía 2 veces por redundancia y para dar robustez contra el error.
- Nx8 bytes para el campo US BW Map que asigna N timeslots de transmisión para cada ONT. Este campo se detalla en la figura 2.6.

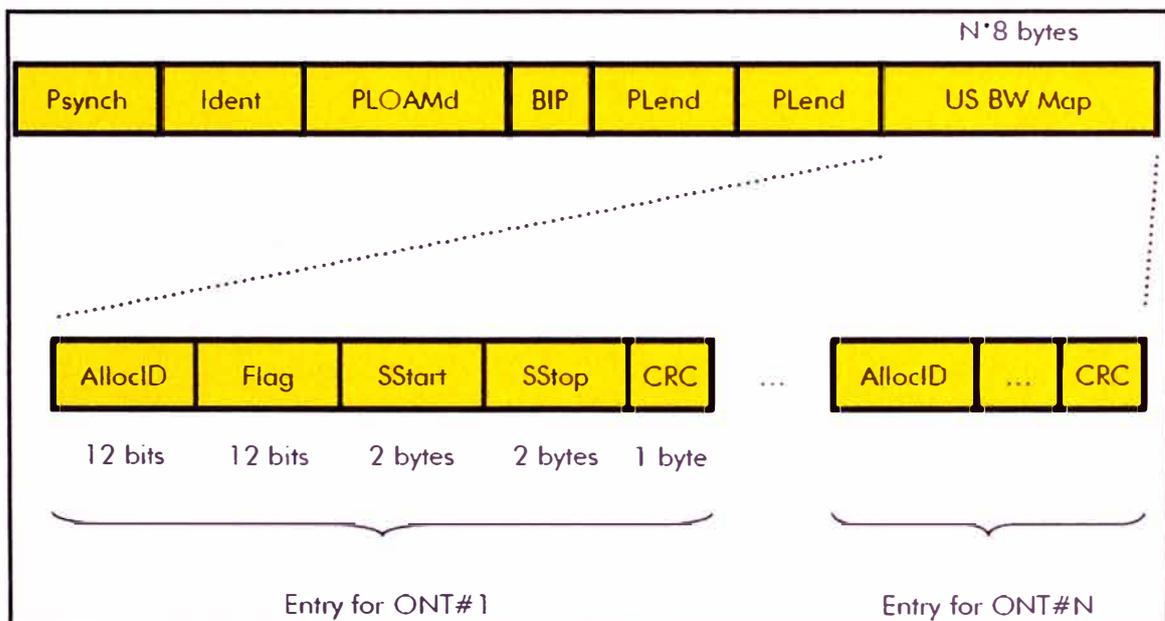


Figura 2.6 Campo US BW Map

Fuente: [3]

Cada entrada en la estructura de acceso consiste en lo siguiente:

- 12 bits del identificador de la asignación (AllocID) que se asigna a cada ONT.
- 12 bits de flags que permiten la transmisión en la dirección ascendente de los bloques generales de capa física de un ONT.
- 2 bytes para el puntero de inicio (SStart) que indica el inicio de la ventana de transmisión en la dirección ascendente. El inicio de la trama se designa como el tiempo cero.

- 2 bytes para el puntero de detención (SStop) que indica el término de la ventana de transmisión en la dirección ascendente.
- 1 byte de CRC que provee 2 bits de corrección de error y un bit de detección de error para el campo de asignación de ancho de banda.

Si se considera 3 ONTs a manera de ejemplo, la asignación de timeslots es como se muestra en la figura 2.7.

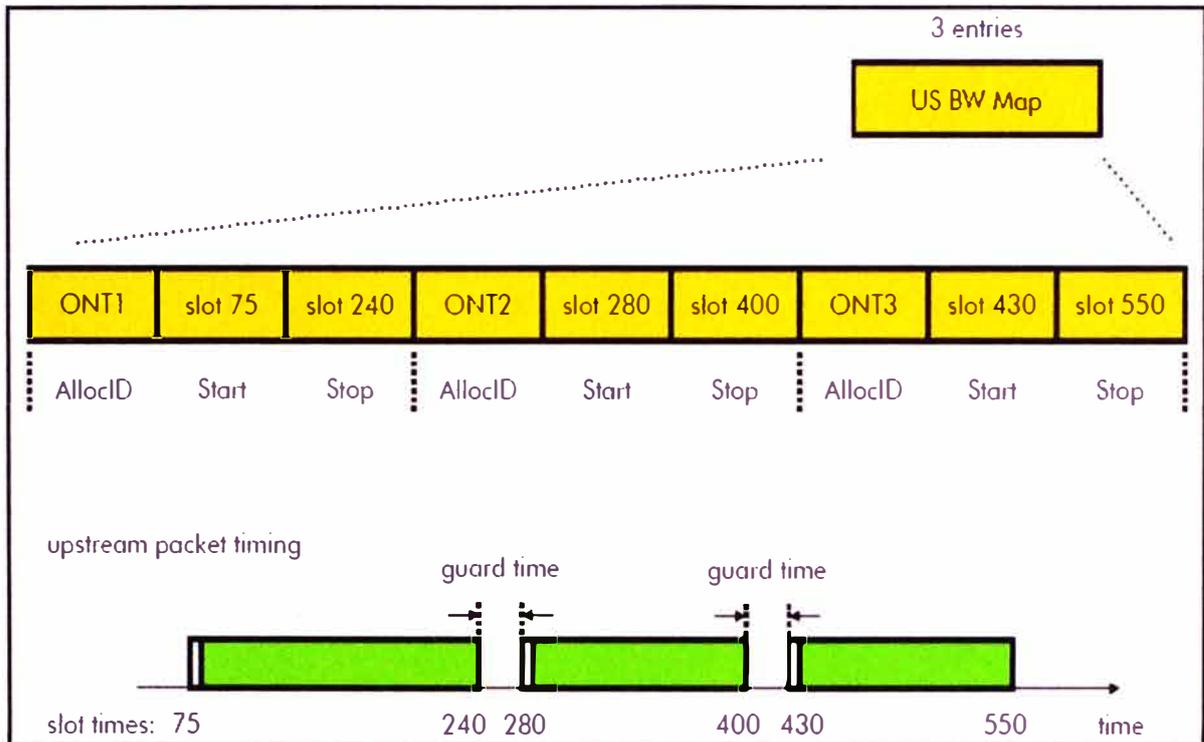


Figura 2.7 Asignación de BW para 3 ONTs

Fuente: [3]

En este ejemplo se muestra un campo US BW Map que contiene 3 entradas. Los campos AllocID de los ONTs tienen los valores de 1, 2 y 3 para los ONT1, ONT2 y ONT3 respectivamente. La parte central muestra los timeslots de inicio y final que se asignan a los ONTs para su transmisión. En la parte inferior se muestran las tramas que se envían en la dirección ascendente para los tres ONTs, donde se indican los timeslots asignados y los tiempos de guarda respectivos.

Como se observa en la figura 2.8, un sistema GPON asigna timeslots a cada ONT para asegurar que los datos de cada uno se reciban de manera independiente en el OLT. Para ello, se utiliza un sistema de punteros en el campo PCB que asignan los timeslots/bytes para las tramas que se envían en la dirección ascendente. Las tramas pueden tener diferentes tamaños, por lo que la asignación de ancho de banda se realiza de manera dinámica.

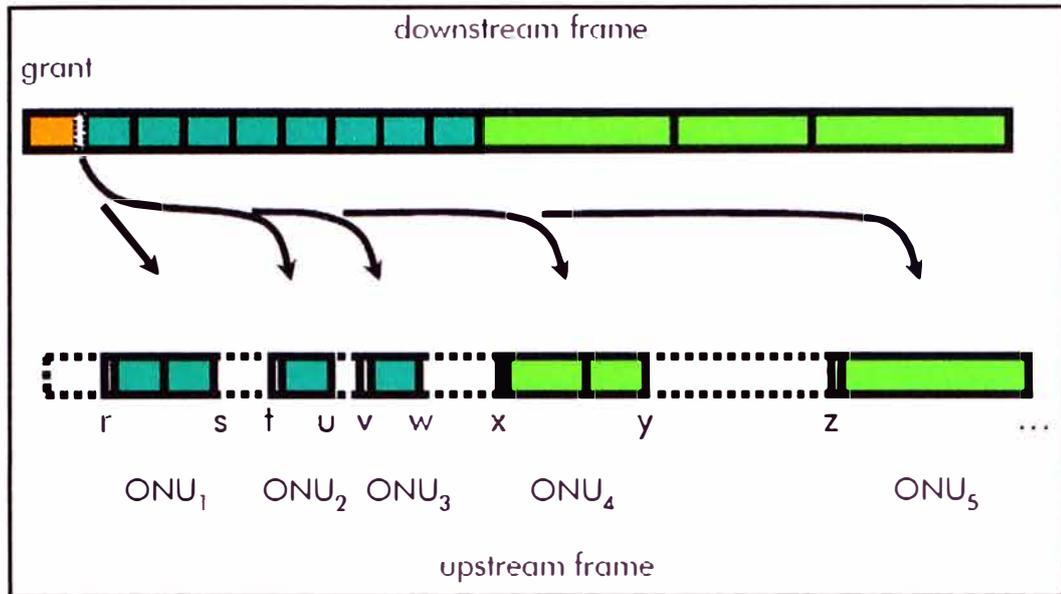


Figura 2.8 Asignación de BW dinámico

Fuente: [3]

b.2) Campos de la trama GPON en la dirección ascendente

En la figura 2.9 se observa el encabezado de la trama GPON en la dirección ascendente.

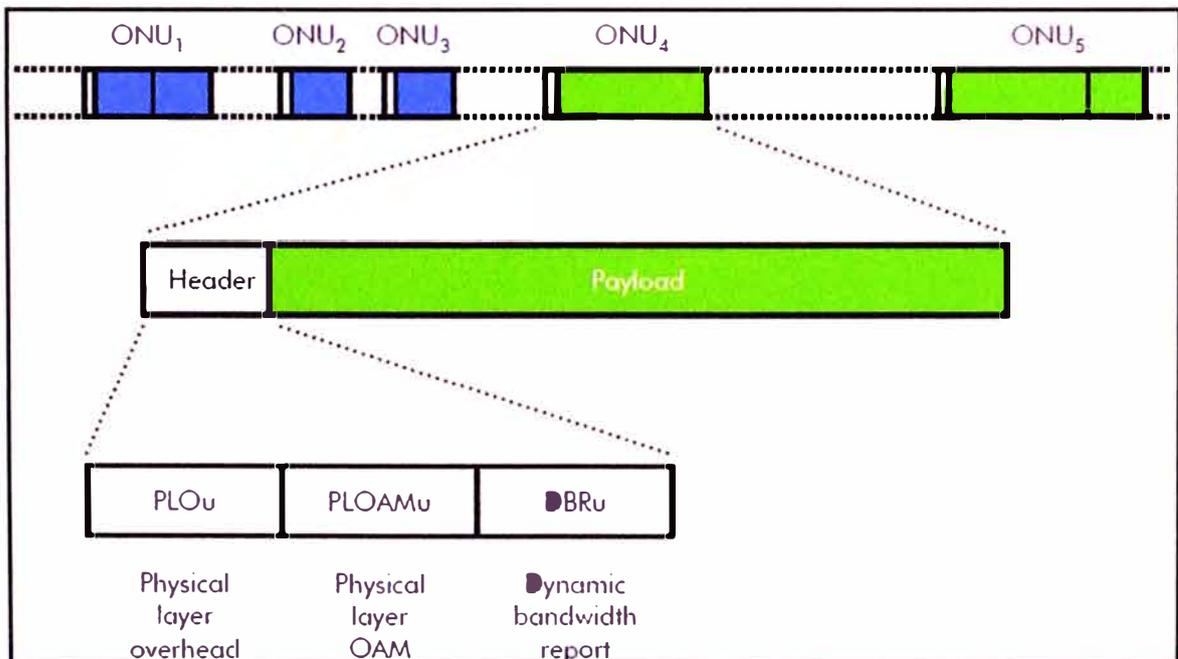


Figura 2.9 Encabezado de la trama GPON en la dirección ascendente

Fuente: [3]

El tráfico GPON en la dirección ascendente consiste en transmisiones sucesivas de uno o más ONTs. Como se ha visto, las secuencias particulares de las tramas están

basadas en la asignación de timeslots de transmisión dadas por el OLT. Para permitir la apropiada recepción de las tramas individuales en modo de ráfaga, es necesario un encabezado al inicio de la trama ascendente del ONT.

En la figura 2.9 se observan los campos del encabezado PON de la trama ascendente y la carga de datos de usuario de tamaño variable que contiene las ráfagas de transmisión. Los campos son los siguientes:

- El encabezado de capa física (PLOu) que inicia la trama y contiene el preámbulo, el cual asegura la correcta operación de la capa física del enlace ascendente en modo ráfaga.
- El campo OAM de capa física en la dirección ascendente (PLOAMu) que es responsable de funciones de administración como el ranging, activación del ONT y notificaciones de alarmas. Los 13 bytes de este campo están definidos en la norma G.984.1 y está protegido de los errores de bit por un chequeo de redundancia cíclica (CRC) que utiliza un código polinomial normalizado para la corrección y detección de errores.
- El reporte de ancho de banda dinámico (DBRu) que informa al OLT la longitud de la cola de cada AllocID de un ONT. Esto permite al OLT la correcta operación del proceso de asignación de ancho de banda dinámico. El DBRu está protegido contra los errores de bit a través de un CRC.

Estos campos son opcionales dependiendo de los flags del campo US BW Map.

b.3) Encapsulación GEM

Para acomodar todos los tipos de servicios (ATM, TDM y Ethernet) eficientemente se utiliza el método de encapsulación GPON (GEM). Este método está basado en una ligera modificación de la recomendación ITU-T G.7041 "Procedimiento de Entramado Genérico", que brinda las especificaciones para enviar paquetes IP sobre redes SONET ó SDH.

El método de encapsulación GPON trabaja de manera similar a ATM, pero utiliza tramas de tamaño variable en vez de celdas de tamaño fijo. Así, GEM provee un medio genérico para enviar diferentes servicios sobre GPON. La carga útil de la encapsulación puede tener hasta 1500 bytes de longitud. Si un ONT necesita enviar una trama de mayor longitud, la trama es fragmentada de acuerdo al tamaño de carga útil asignado. El equipo de destino es el encargado del re-ensamblado de los fragmentos para obtener la trama original.

La figura 2.10 muestra la estructura del segmento GEM que consiste en cuatro campos de encabezado y una carga útil de L bytes de longitud.

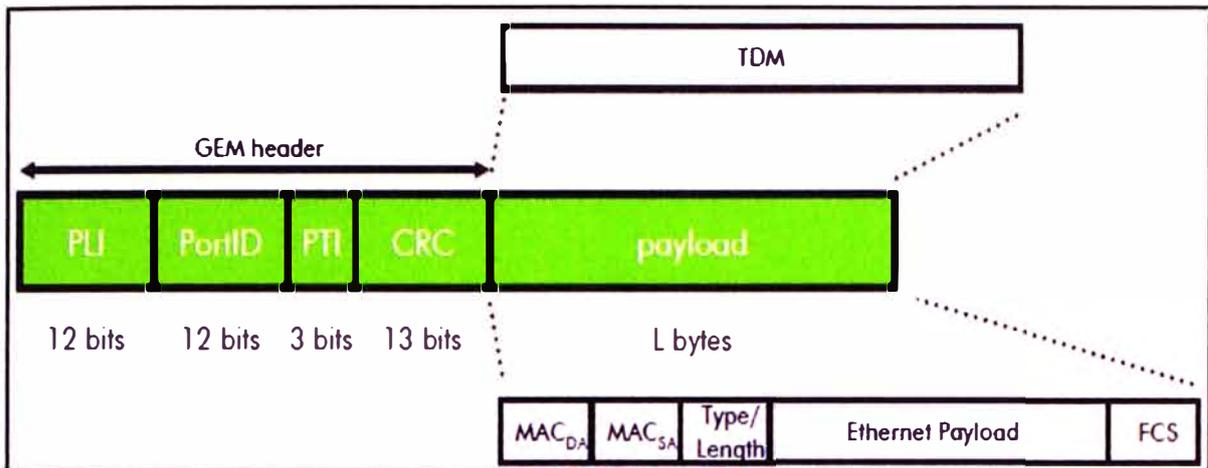


Figura 2.10 Encapsulación GEM

Fuente: [3]

Los campos del encabezado GEM son los siguientes:

- 12 bits para el indicador de tamaño de carga (PLI) que brinda el tamaño en bytes de la carga encapsulada GEM.
- 12 bits para el número de identificación de puerto (PortID) que indica a qué flujo de servicios pertenece el fragmento.
- 3 bits para el indicador de tipo de carga (PTI) que especifica si el fragmento es el último del datagrama del usuario, en caso que el flujo de tráfico esté congestionado o si la carga GEM contiene información de OAM.
- 13 bits de chequeo de redundancia cíclica (CRC) para el control de errores en el encabezado que permite la corrección de 2 bits errados y la detección de 3 bits errados.

La principal ventaja del esquema GEM es que provee un medio eficiente para la encapsulación y el fragmentado de los paquetes de información. La razón de utilizar una encapsulación en GPON es que permite una administración propia de los múltiples flujos de servicios de los diferentes ONTs que comparten un enlace de transmisión óptica común. El propósito de la fragmentación es enviar paquetes de los usuarios eficientemente y de manera independiente de su tamaño y recuperar los mismos de forma confiable de la ventana de transmisión de la capa física de GPON.

c) Modos de operación en GPON

El proceso de transporte de datos en la dirección descendente es diferente al transporte de datos en la dirección ascendente.

c.1) Modo de operación para el tráfico descendente

Los datos en la dirección descendente son de la forma broadcast del OLT a cada ONT y cada ONT procesa los datos que en su encabezado tienen la dirección de destino correspondiente. Esto es conocido como modo de operación continuo.

Cuando el OLT envía, por ejemplo, celdas ATM, cada ONT compara su identificador de ruta (VPI) de la celda y la procesa si hay correspondencia para enviar la celda al cliente local. Este último compara su identificador de canal (VCI) y la procesa de igual manera si hay correspondencia. Para el caso de las tramas GEM, la identificación se realiza a través del campo Port-ID.

Los datos son transmitidos continuamente a través de la multiplexación por división de tiempo (TDM) para llegar a todos los ONUs a manera de broadcast. La señal de reloj también es extraída por los ONUs, los cuales sincronizan de la misma manera que se realiza en SDH/SONET al utilizar patrones específicos de un campo del encabezado o de la delineación de la celda ATM o trama GEM.

Debido a que los datos se envían en forma de broadcast del OLT a todos los ONTs, todos los mensajes pueden ser leídos por cualquier usuario de la red. Por tal motivo, GPON implementa mecanismos de seguridad para impedir que un usuario o persona malintencionada tenga acceso a información que no le corresponde. Un ejemplo de mecanismo de encriptación punto a punto es la norma de Encriptación Avanzada (AES) que es usado para proteger la información de la carga útil de la trama GPON. El modo de operación en la dirección descendente se observa en la figura 2.11.

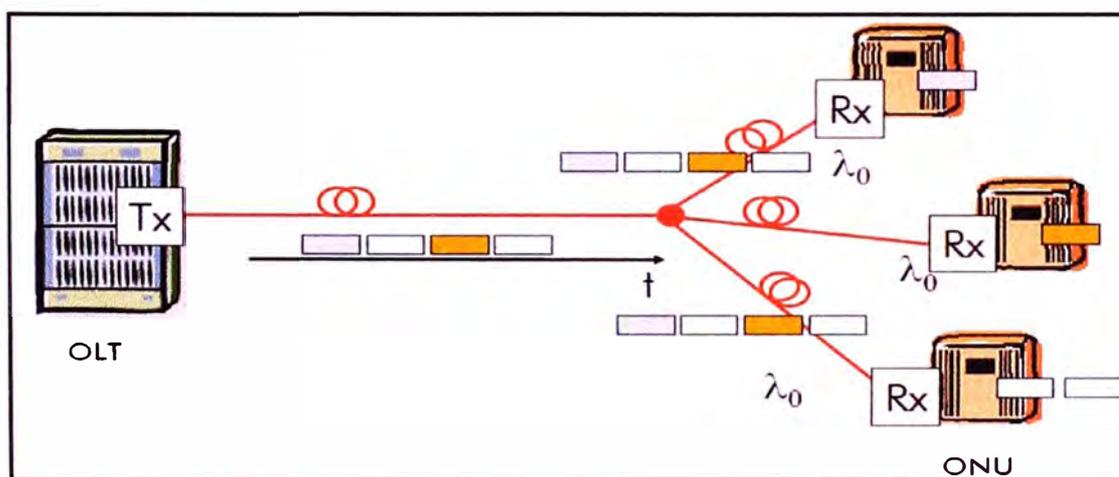


Figura 2.11 Modo de operación continuo en la dirección descendente

Fuente: [3]

c.2) Modo de operación para el tráfico ascendente

El tráfico ascendente es más complicado debido a la naturaleza compartida de la red de distribución óptica (ODN). Es necesaria una coordinación entre el OLT y los ONTs

para evitar colisiones en la transmisión. Los datos son transmitidos de acuerdo a los mecanismos de control del OLT utilizando el acceso múltiple por división del tiempo (TDMA), en donde timeslots de transmisión dedicados son garantizados para cada ONT. Los timeslots están sincronizados de manera que las ráfagas de transmisión de diferentes ONTs no colisionen. Esto es conocido como modo de operación de ráfagas.

Cuando un ONT necesita enviar información, espera que el OLT le envíe una trama PLOAM. Cada PLOAM tiene 26 ó 27 permisos que cualquiera puede leer. El ONT chequea el número de permiso y si tiene una coincidencia utiliza el permiso para enviar sus datos. La trama luego es enviada en la dirección ascendente. El OLT receptor recibe los bits y utiliza el preámbulo para recuperar la señal de reloj, lee el encabezado y la envía al switch ATM o Ethernet de la red de agregación o núcleo del operador.

Adicionalmente, TDMA requiere un control de acceso al medio (MAC) en el OLT para prevenir las colisiones y distribuir el ancho de banda ascendente entre los ONTs. TDMA requiere una operación en modo de ráfaga en el receptor del OLT y en el transmisor del ONT. Estas ráfagas están precedidas por un encabezado, cuyo tamaño compensa la complejidad del circuito de recepción dependiente del medio físico (PMD) del OLT y la eficiencia del canal ascendente. Similar al caso de la dirección descendente, hay un tiempo de guarda entre las ráfagas respectivas. El modo de operación ascendente se observa en la figura 2.12.

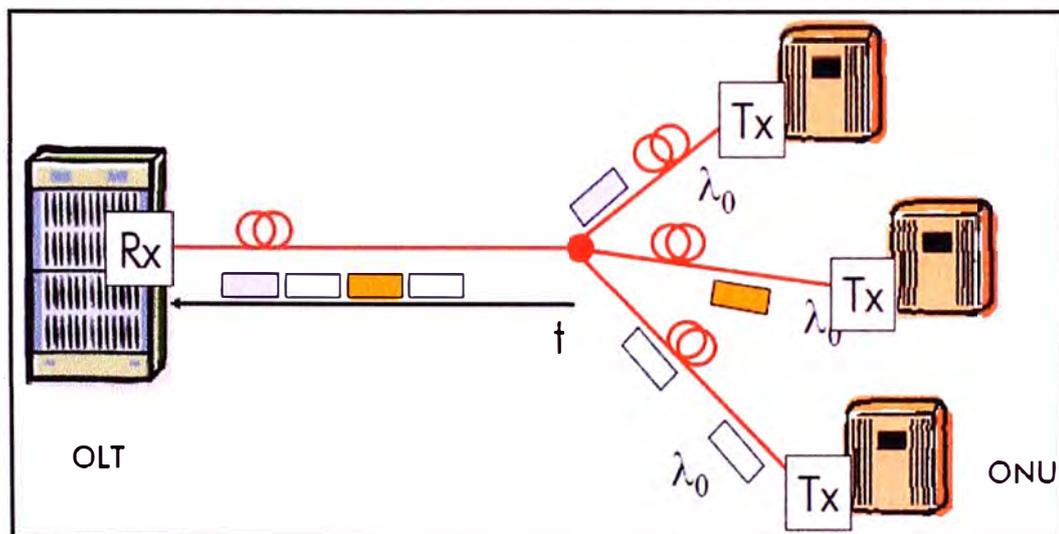


Figura 2.12 Modo de operación de ráfagas en la dirección ascendente

Fuente: [3]

En condiciones normales en la red, las ONUs están ubicadas a diferentes distancias del OLT. Esto resulta en transmisiones desfasadas y el OLT puede recibir transmisiones superpuestas de diferentes ONUs. En el concepto de PON se especifica un método para

sincronizar las transmisiones de las ONUs llamado ranging o fluctuación de distancia. Primero, la ONU sincroniza su trama ascendente de acuerdo al encabezado de la trama descendente y espera que la ventana de fluctuación se abra. Cuando esta ventana está abierta, la red entra en el proceso de fluctuación, donde las diferencias de retardo y fase entre el OLT y las ONUs son determinadas. Como resultado, las ONUs ajustan sus fases y permisos en su transmisión. La figura 2.13 presenta el problema de superposición al cual enfrenta el ranging:

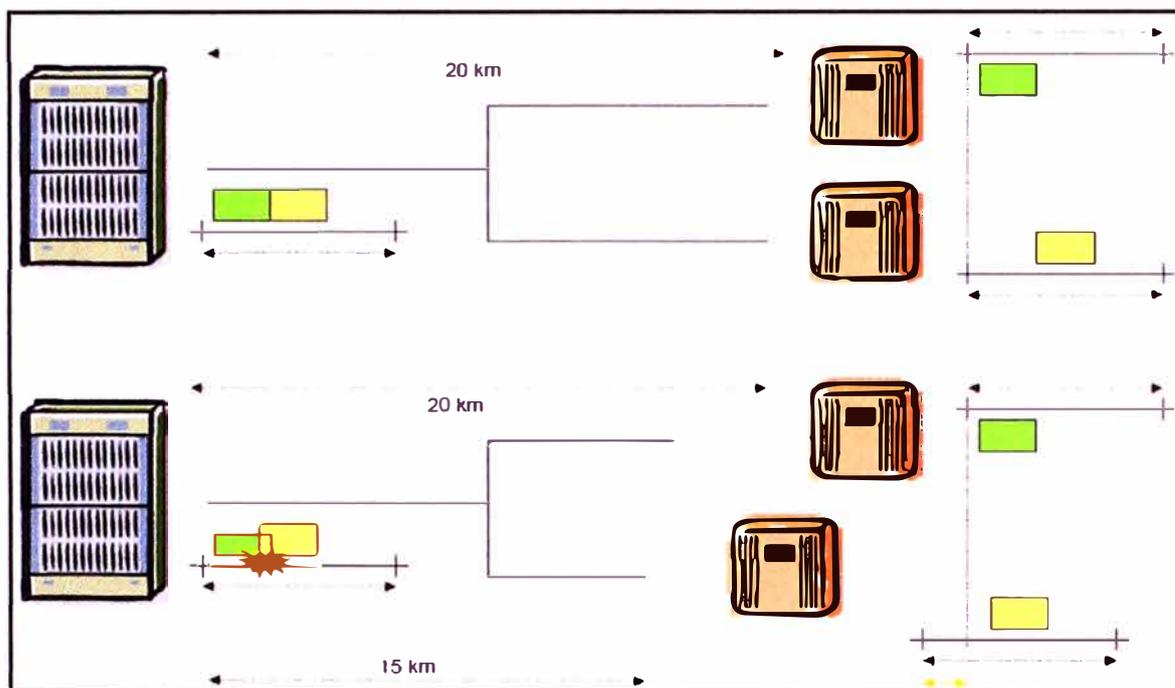


Figura 2.13 Problema de superposición

Fuente: [3]

El ranging o fluctuación de distancia opera en el OLT, que abre las ventanas de fluctuación entre períodos de tiempo configurables. Esto quiere decir que el OLT envía permisos de fluctuación y detiene el tráfico en la red para esperar que las ONUs envíen los PLOAMs. La ventana de fluctuación debe ser lo suficientemente larga para cubrir la propagación y los procesos de retardo de todas las ONUs, incluyendo la ONU más lejana. El tamaño de la ventana puede ser programado para soportar unas distancias de transporte de hasta 20 Km.

Durante el proceso de fluctuación de distancia, cada ONU recibe un identificador PON (PON-ID) del OLT. Este último mide las fases de llegada de las celdas o tramas de fluctuación, calcula los retardos de equalización que se requiere y los informa a las ONUs. Éstas ajustan sus fases de transmisión acorde a los valores determinados. Luego de la inicialización, cada ONU puede transmitir sus datos de acuerdo a los permisos

adquiridos. Para entender mejor la fluctuación de distancia se tiene el siguiente ejemplo en la figura 2.14.

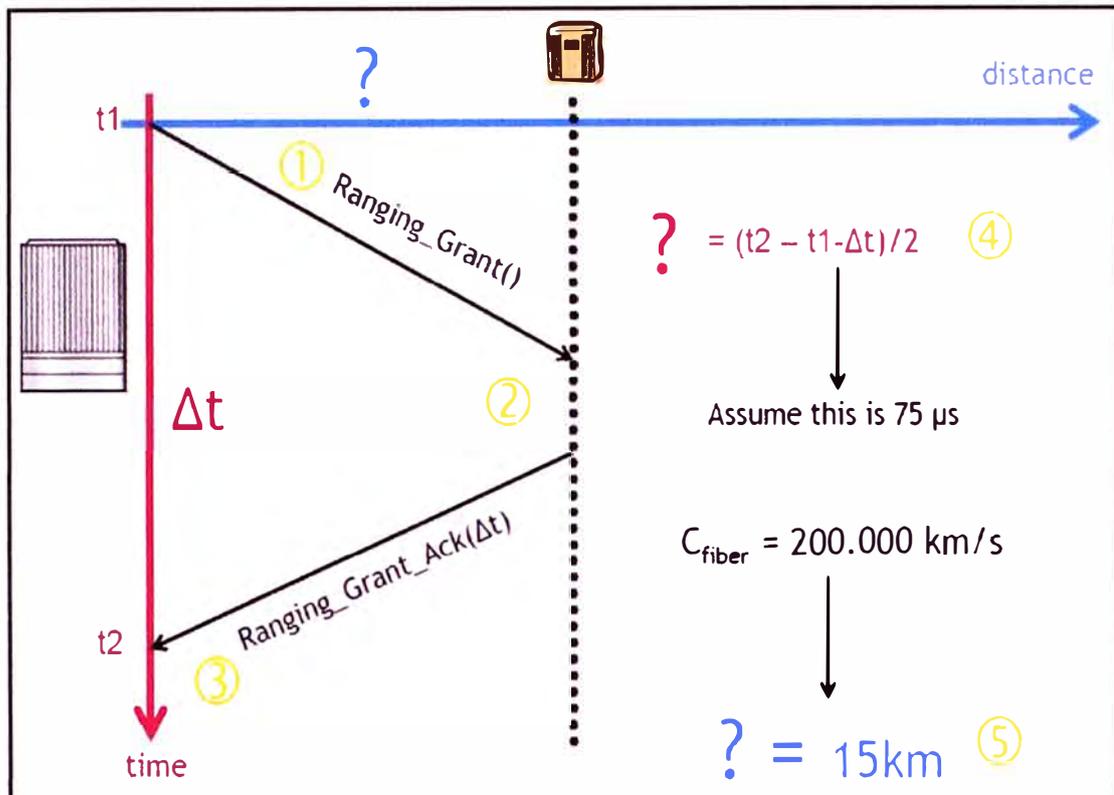


Figura 2.14 Ejemplo de fluctuación de distancia

Fuente: [3]

La fluctuación de distancia cumple los siguientes pasos:

1. El OLT envía el mensaje de permiso de fluctuación (Ranging-Grant) a la red óptica pasiva.
2. El nuevo ONT conectado escucha el mensaje y lo procesa. Esto toma un cierto tiempo (Δt).
3. El ONT envía el acuse de recibo al OLT donde se incluye el tiempo que necesita para el proceso.
4. El OLT calcula el tiempo que se tomó para que el permiso de fluctuación llegue al ONT (tiempo de ida y vuelta / 2). **Nota:** Se sustrae Δt .
5. Basado en la velocidad de la luz (en el vidrio), la distancia al ONT puede ser calculada.

d) Interfaz de control y administración del ONT

Existe una interfaz de control y administración del ONT (OMCI) cuyo propósito es similar al ILMI en las redes xDSL. OMCI incluye la administración de la configuración, fallas y rendimiento con una capacidad aproximada de 424 Kbps por ONT.

Actualmente, el canal OMCI es bidireccional en la red óptica pasiva y su propósito es administrar un único ONT. Por ende, en la red existen muchos canales OMCI asociados a los ONTs respectivos.

Para la dirección ascendente del canal OMCI cada ONT tiene un propio T-CONT, identificado con un único identificador de asignación. Éste identificador para el ONT es asignado por el OLT, quien informa al ONT la terminación del proceso de fluctuación a través del canal descendente PLOAM.

2.2 Normalización del IEEE

La norma IEEE 802.3ah del 2004 describe los escenarios en la red de última milla utilizando la tecnología Ethernet. Entre esos escenarios se encuentra la red PON y se describen sus características de capa 2 y capa 1.

En general, los escenarios que abarcan son los siguientes (considerar $N = \#$ de abonados):

- **Punto a punto Ethernet:** Se utilizan N ó $2*N$ fibras ópticas. De igual manera se utilizan $2*N$ transceptores.
- **Curb-switched Ethernet:** Se utiliza una troncal de fibra que va desde la oficina central (CO) hasta el switch. Desde este último se distribuye una fibra óptica para cada abonado. En total se usan $2*N+2$ transceptores y se necesita energía eléctrica para el switch.
- **EPON:** Minimiza el uso de fibras y de espacio en la CO. Utiliza únicamente $N+1$ transceptores ópticos y no requiere energía eléctrica en la planta externa al utilizar elementos pasivos. Soporta tráfico descendente de video.

En la figura 2.15 se observa un ejemplo con $N = 32$ para todos los escenarios descritos. Con ello, en una red punto a punto se tiene que utilizar 32 ó 64 fibras ópticas dependiendo si la comunicación es en ambos sentidos. Estas fibras se despliegan desde la CO hasta los hogares. En el caso del número de transceptores, se necesitan 2 por cada abonado, dando un total de 64.

En una red curb-switched solo se utiliza una o dos fibras desde la CO hasta el switch, pero la desventaja es que éste necesita energía eléctrica para su funcionamiento. Igualmente, se deben utilizar 66 transceptores en total y la cantidad de fibras desde el switch hasta los hogares es de 32.

En un escenario con EPON solo se necesita una fibra entre la CO y el *splitter* pasivo independientemente si la comunicación es en ambos sentidos. En total, solo se utilizan 33 transceptores para integrar todos los abonados aunque la cantidad de fibras desde el *splitter* hasta los hogares sigue siendo de 32.

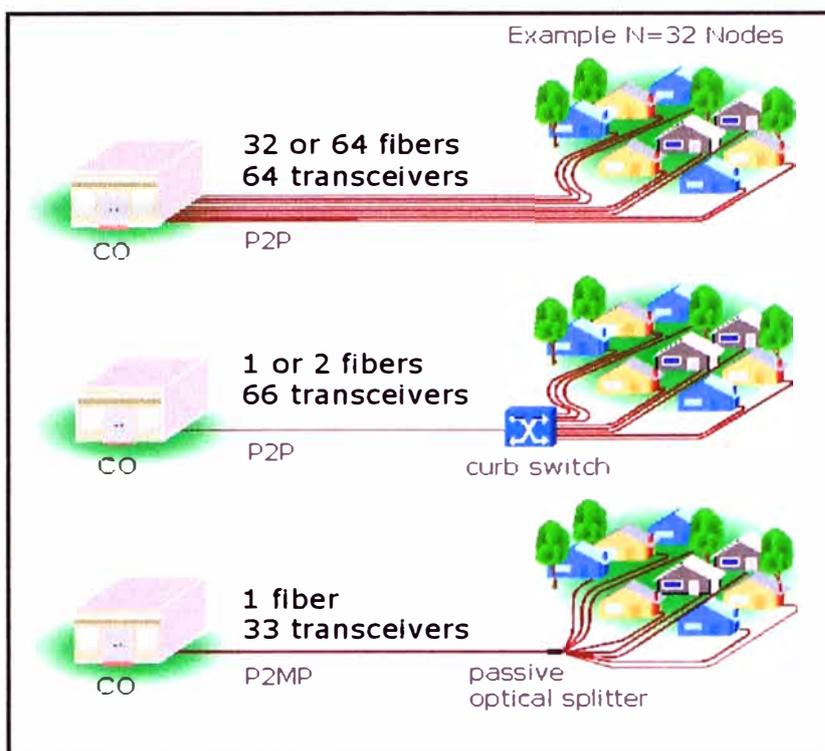


Figura 2.15 Escenarios de la norma IEEE 802.3ah

Fuente: Figura 1 de [4]

2.2.1 Características de EPON

La red EPON incluye un terminal de línea óptica (OLT) y una unidad de red óptica (ONU). El OLT reside en la oficina central o CO (POP o local de intercambio). La ONU se encuentra en o cerca al local del usuario, es decir, puede estar en la residencia del suscriptor, en un edificio o en una caja en el exterior. La conectividad entre el OLT y la ONU es a través de una red pasiva con cableado de fibra óptica monomodo y *splitters* ópticos pasivos. Las velocidades son de 1.25 Gbps tanto en el sentido ascendente como descendente. La figura 2.16 muestra los componentes de EPON.

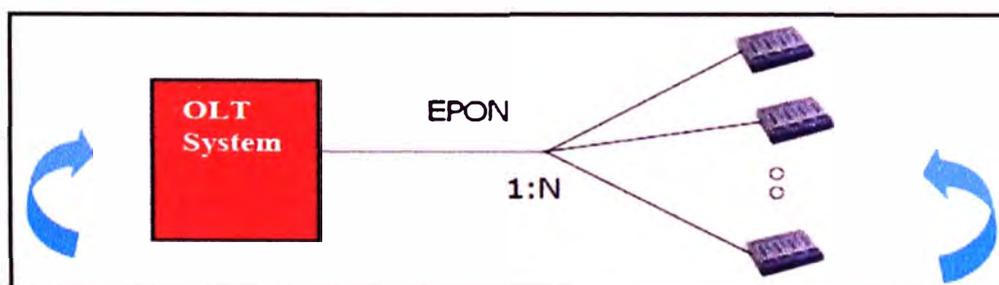


Figura 2.16 ONU y OLT en la red EPON

Fuente: Figura 3 de [4]

a) Configuración de EPON

EPON se encuentra configurado en modo full dúplex (no CSMA/CD) con una única fibra óptica en una topología punto a multipunto (P2MP). Los suscriptores u ONUs ven el tráfico únicamente de la cabecera u OLT; cada suscriptor no puede ver el tráfico que transmite otro suscriptor y la comunicación entre estos se da a través del OLT. Como se observa en la figura 2.17, la cabecera admite a un suscriptor en un determinado intervalo de tiempo utilizando un acceso múltiple por división de tiempo o TDMA.

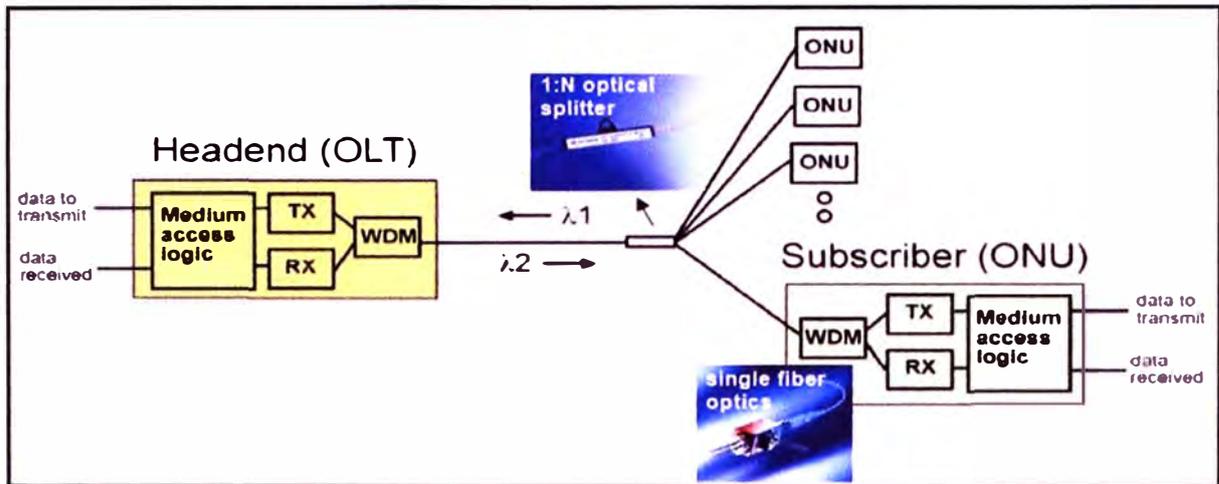


Figura 2.17 Configuración EPON

Fuente: Figura 4 de [4]

b) Formato de la trama EPON

La red EPON utiliza una subcapa de codificación física (PCS) y una subcapa de control de acceso al medio (MAC) que son idénticas a las utilizadas en los dispositivos 1000BASE-X. Sin embargo, existen diferencias importantes en el preámbulo de la trama.

En los dispositivos tradicionales el campo preámbulo tiene 7 bytes con valor hexadecimal 0x55 cada uno y un byte con valor 0xD5. Generalmente, este campo se utiliza para la sincronización de reloj o para informar al dispositivo la llegada de una trama 803.3. El preámbulo para la trama 1000BASE-PX, o sea la trama para EPON, varía como se muestra en la figura 2.18.

Como se observa, todavía 4 bytes del preámbulo tienen el valor de 0x55. El tercer byte es el Delimitador de Inicio de Paquete (SPD) y tiene el valor de 0xD5. El sexto y séptimo byte se reemplaza como el Identificador de Enlace Lógico (LLID) que se encuentra asociado con la ONU o el OLT. La diferenciación entre estos equipos se realiza con el bit de modo dentro del mismo campo: 1 para el OLT y 0 para la ONU. Un único LLID es asignado por el OLT a cada ONU cuando el proceso de registración se completa. Finalmente, el último byte es la comprobación de redundancia cíclica que toma en cuenta 5 bytes del preámbulo, desde el SPD al último byte de LLID.

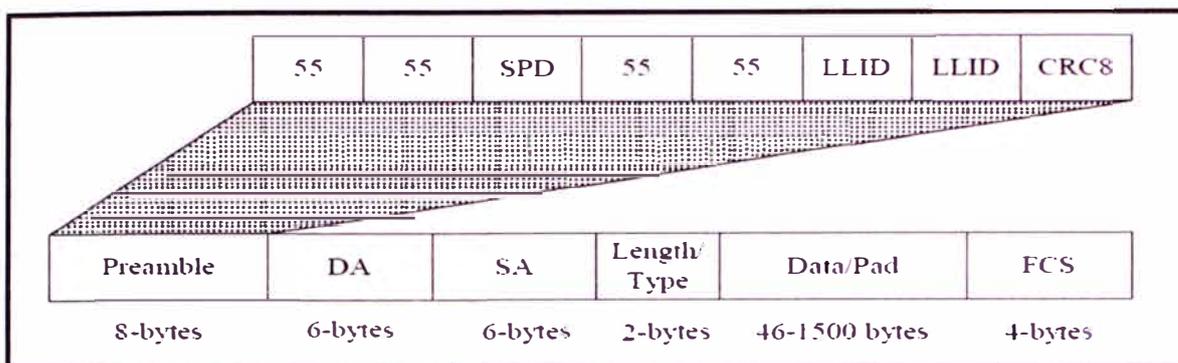


Figura 2.18 Formato de trama para EPON

Fuente: Figura 1 de [5]

c) Operación de EPON

En esta sección se describe el modo de operación en EPON tanto para el tráfico ascendente como para el tráfico descendente.

c.1) Modo de operación para el tráfico descendente

Para controlar la red de fibra P2MP, EPON utiliza el Protocolo de Control de Multipunto (MPCP). Este protocolo realiza la asignación y el sondeo de ancho de banda, el autodescubrimiento y el ranging. El OLT genera mensajes de tiempo de estampado que se utiliza como una referencia de tiempo global. Éste genera el descubrimiento de ventanas para las nuevas ONUs y controla el proceso de registración. El OLT también asigna el ancho de banda y realiza el proceso de ranging.

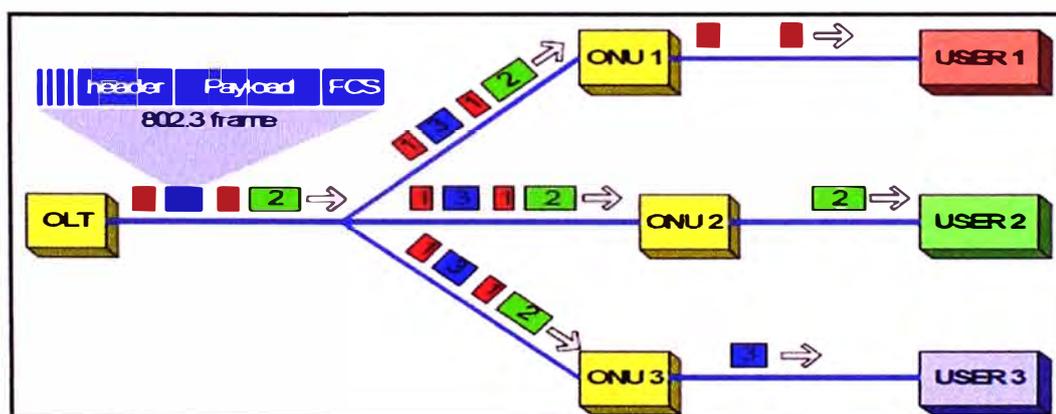


Figura 2.19 Operación de EPON para el tráfico descendente

Fuente: Figura 6 de [4]

En el tráfico descendente, EPON se encarga de transmitir los broadcast de tramas 802.3. Como se muestra en la figura 2.19, las tramas de broadcast son extraídas debido al identificador de enlace lógico (logical link ID) del preámbulo. Los mensajes GATE de 64

bytes son enviados en la dirección descendente para asignar el ancho de banda para el tráfico ascendente.

c.2) Modo de operación para el tráfico ascendente

La ONU realiza el proceso de autodescubrimiento, que incluye el ranging y la asignación del identificador de enlace lógico y el ancho de banda. La ONU sincroniza en tiempo con el OLT al utilizar las marcas de tiempo de los mensajes de control de la dirección descendente. Las ONUs reciben los mensajes GATE y transmiten dentro del período de tiempo permitido.

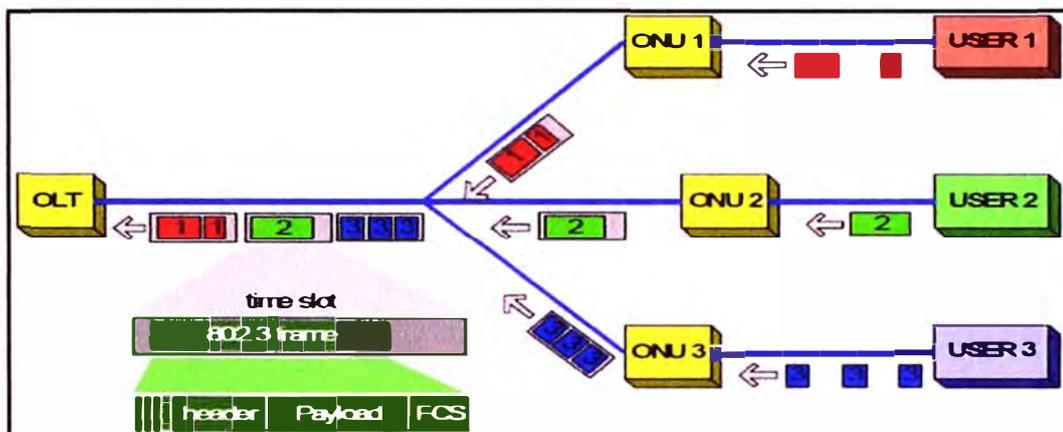


Figura 2.20 Operación de EPON para el tráfico ascendente

Fuente: Figura 8 de [4]

En la figura 2.20 se observa el control en la dirección ascendente; el MPCP utiliza timeslots que pueden contener múltiples tramas 802.3. La ONU envía un mensaje REPORT de 64 bytes en donde brinda información de su estado al OLT. De esta manera, no existe colisión ni fragmentación de paquetes en esta arquitectura.

c.3) Proceso de descubrimiento en EPON

En las secciones anteriores se ha mencionado algunos pasos del proceso de descubrimiento de las ONUs en la red EPON. Ahora se detallan los seis pasos de este proceso para mejor entendimiento.

Paso 1: El OLT envía los mensajes GATE a todas las ONUs

Los mensajes GATE se anuncian cuando la ventana de descubrimiento se abre. El mensaje se recibe por todas las ONUs en forma de broadcast en el campo LLID y con una dirección MAC de destino multicast de control. La trama contiene la concesión y el tiempo de sincronismo. La figura 2.21 muestra el proceso descrito.

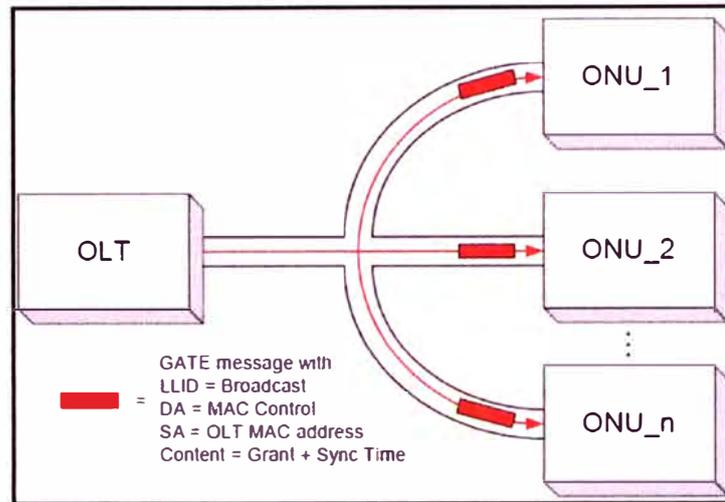


Figura 2.21 Mensajes GATE iniciales

Fuente: [6]

Paso 2: La ONU envía el mensaje REGISTER_REQ al OLT

La ONU le solicita al OLT que le informe qué concesión está pendiente para él. La trama presenta en el encabezado el campo LLID como broadcast y la dirección MAC de control en el destino. La figura 2.22 muestra el proceso descrito.

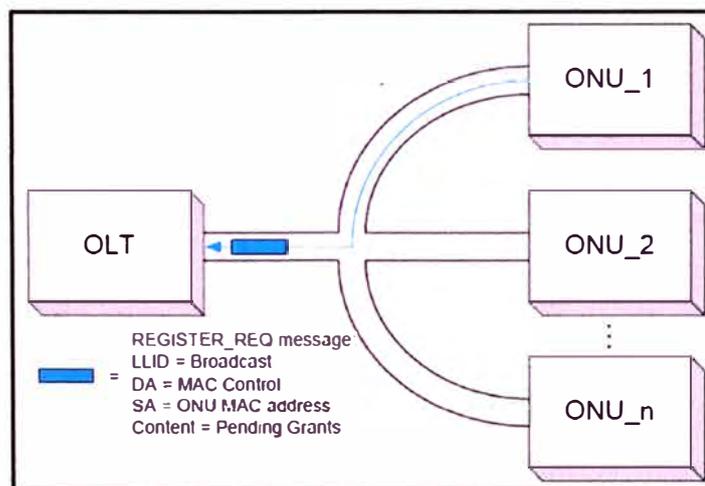


Figura 2.22 Mensaje REGISTER_REQ

Fuente: [6]

Antes de que la ONU transmita el mensaje REGISTER_REQ espera un tiempo aleatorio. Sin embargo, es posible que múltiples ONUs envíen este mensaje al mismo tiempo ocurriendo una colisión. Cuando esto sucede, el OLT no recibe una trama válida y la ONU tiene que retransmitir el mensaje.

Paso 3: El OLT envía el mensaje REGISTER a la ONU

En este mensaje se asigna un LLID a la ONU. En el encabezado de la trama se tiene el LLID como broadcast, la dirección MAC del OLT como origen y la dirección MAC del ONU como destino. Debido a ello, la trama es descartada por otras ONUs al no coincidir su dirección MAC con la dirección MAC de destino de la trama. El mensaje contiene el LLID asignado, el tiempo de sincronismo y una réplica de la solicitud de concesión que solicitó la ONU en el mensaje anterior. La figura 2.23 muestra el proceso descrito.

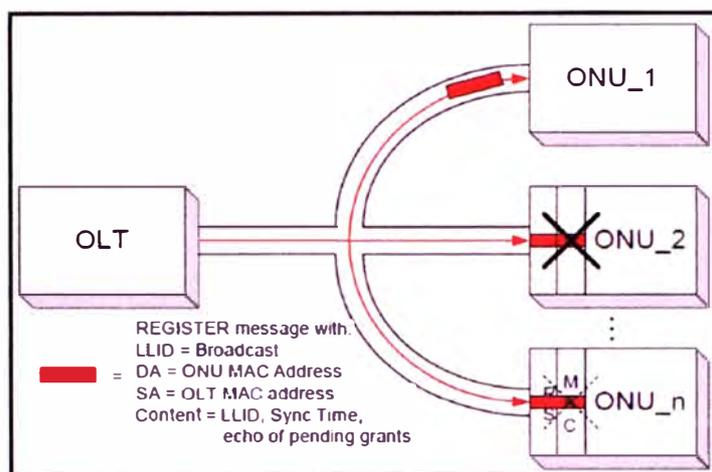


Figura 2.23 Mensaje REGISTER

Fuente: [6]

Paso 4: El OLT envía a la ONU su concesión inicial

Como se observa en la figura 2.24, el OLT envía mensajes GATE utilizando el LLID asignado al ONU y una dirección MAC de destino unicast. Las tramas son filtradas en las otras ONUs en la subcapa de reconciliación (RS), es decir, se filtra al no concordar el LLID de la trama con la del receptor. El mensaje contiene la concesión para la ONU.

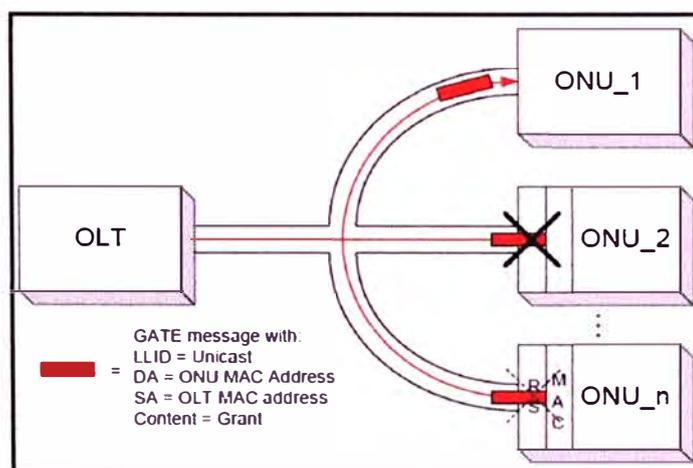


Figura 2.24 Mensajes GATE de concesión

Fuente: [6]

Paso 5: La ONU envía el mensaje REGISTER_ACK al OLT

La ONU envía un acuse de recibo del mensaje REGISTER al OLT, en donde replica el LLID único asignado y el tiempo de sincronismo. Esto se muestra en la figura 2.25.

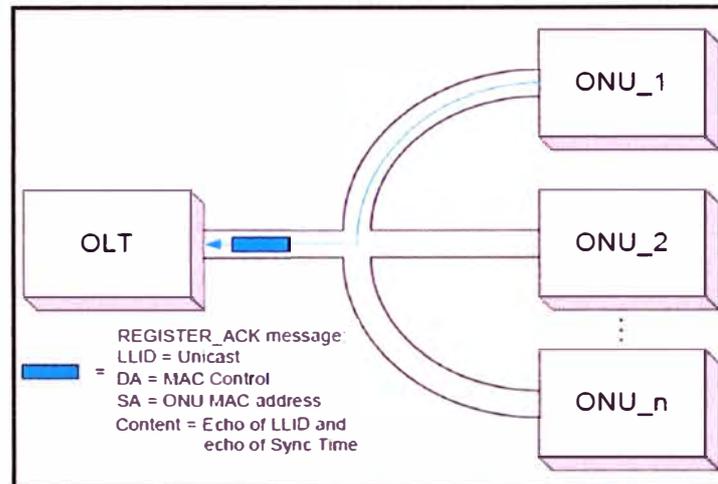


Figura 2.25 Mensaje REGISTER_ACK

Fuente: [6]

Paso 6: La registración está completa

Cuando todas las ONUs están registradas, estas empiezan a transmitir sus tramas utilizando el mecanismo TDMA, el cual es controlado por el OLT y previene las colisiones.

d) Administración de la ONU

Análogo al OMCI en GPON, para EPON el IEEE especifica el protocolo OAM para la operación, administración y mantenimiento en Ethernet. Las características principales que tiene este protocolo es el descubrimiento, monitoreo de enlace, detección de falla remota y loopback remoto. Diferentes regiones o vendedores definen extensiones OAM para una mejor administración de las ONUs.

2.2.2 Aprovisionamiento de DOCSIS por EPON

Un tema adicional es la tecnología DPoE que se encuentra definida por CableLabs para el mercado MSO o el mercado de los operadores de Televisión por cable. Actualmente, sus especificaciones se encuentran en la versión 2.

En esta arquitectura, el OLT funciona como un CMTS y la ONU como un CM o cable modem. Por ende, los equipos EPON deben soportar servicios y aprovisionamiento de una red DOCSIS. De esta manera, se facilita la interoperabilidad de multivendedores y se definen funcionalidades adicionales para servicios Metro Ethernet. Entiéndase que esta tecnología no es DOCSIS sobre fibra óptica. La figura 2.26 muestra la arquitectura DPoE.

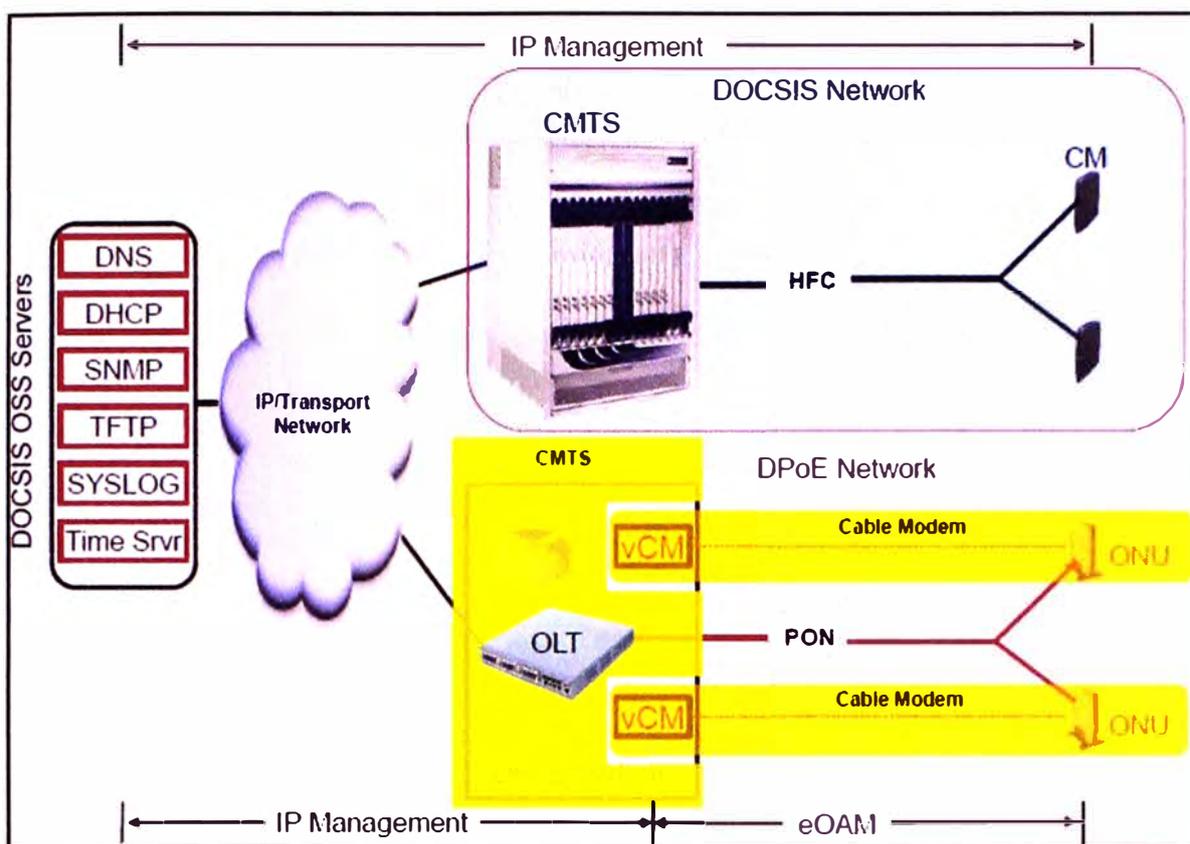


Figura 2.26 Arquitectura DPoE

Fuente: [7]

Se observa que la comunicación se da entre un CM virtual o vCM en el lado del sistema DPoE y las DPoE ONUs. La administración IP en esta arquitectura a través de SNMP solo llega hasta el sistema DPoE, desde éste hasta las ONUs se administra con el protocolo OAM extendido (eOAM).

a) Capa de mediación de DOCSIS

La capa de mediación DOCSIS (DML) es una entidad o proceso del sistema DPoE que traslada todas las herramientas de administración de DOCSIS en EPON. Algunas de estas tareas son:

- Interpretar las MIBs de DOCSIS.
- Crear vCMs para cada ONU, solicitando direcciones IP y archivos de configuración para ellos.
- Trasladar los parámetros de los archivos de configuración recibidos en cada vCM hacia las ONUs a través de mensajes EPON OAM.
- Mantener el software actualizado de las ONUs.
- Proveer una interfaz de línea de comandos (CLI) como si el sistema DPoE fuera un CMTS.

b) Proceso de inicialización de una DPoE ONU

El proceso de inicialización de las DPoE ONUs se da de la siguiente manera:

1. Las ONUs se registran normalmente siguiendo la norma IEEE 802.3ah.
2. El sistema DPoE crea vCMs para cada ONU.
3. El vCM obtiene los parámetros IP de un servidor DHCP, incluyendo el nombre del archivo de configuración y la dirección del servidor TFTP.
4. El tiempo del día no es necesario que se establezca ya que el vCM está sincronizado al reloj del sistema DPoE.
5. El vCM obtiene el archivo de configuración vía TFTP.
6. La ONU es configurada a través de mensajes OAM.
7. La ONU está ahora correctamente registrada y el vCM se encuentra en estado operacional.

c) Interoperabilidad de servicios

DPoE sigue también una norma IEEE para la interoperabilidad de servicios. Esta norma es llamada SIEPON y está especificada en el IEEE P1904.1, el cual describe los requerimientos de sistema necesarios para asegurar a nivel de servicio la interoperabilidad multivendedor entre equipos EPON.

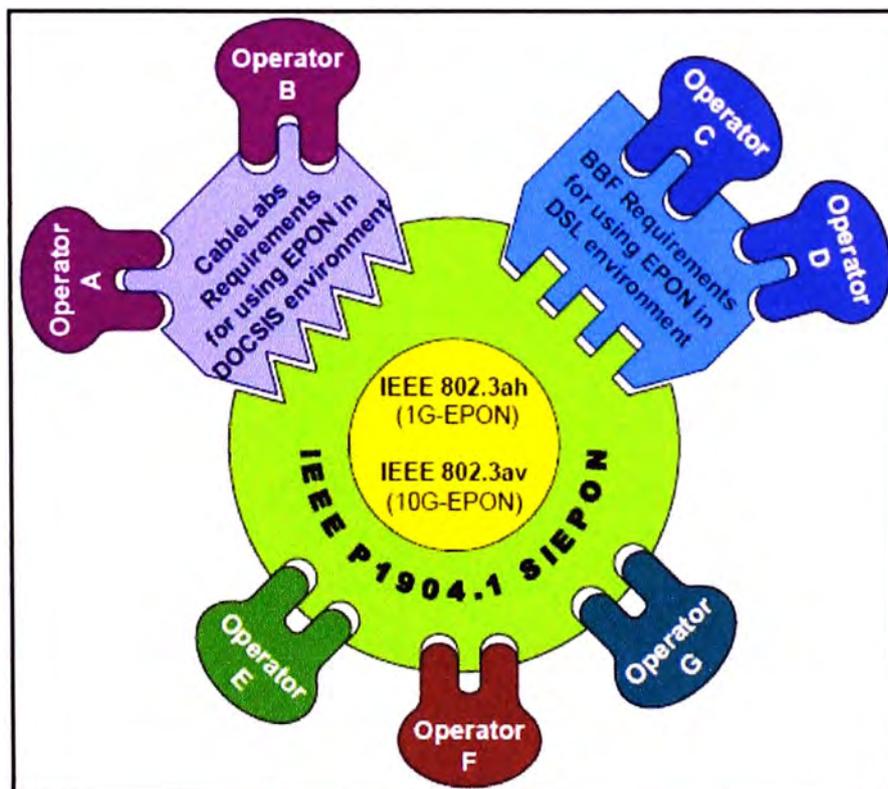


Figura 2.27 SIEPON para la interoperabilidad de servicios

Fuente: [7]

La figura 2.27 muestra esta interoperabilidad que se da en la capa física y en la capa de enlace de datos. SIEPON permite direccionar los diversos requerimientos de especificaciones externas como DOCSIS en un solo camino consistente y unificado utilizando una red EPON. Los propósitos principales de esta norma son:

- Especificar la interoperabilidad a nivel de sistema EPON para cubrir la funcionalidad del equipo, la ingeniería de tráfico y los mecanismos de QoS/CoS.
- Especificar la administración del equipo, del servicio y de la utilización de potencia.

2.3 Introducción a las tecnologías PON de 10 Gbps

Actualmente, se han desarrollado normas que son una evolución de GPON y EPON para alcanzar velocidades de hasta 10 Gbps. Estas tecnologías todavía no han alcanzado la madurez completa pero están empezando a desplegarse en otras partes del mundo. En esta sección, se da una introducción a las tecnologías XG-PON y 10GEPON que son normas de la ITU-T y del IEEE respectivamente.

2.3.1 XG-PON ó NG-PON

En apoyo con la FSAN, la ITU-T ha desarrollado normas para la siguiente evolución de GPON. Las normas se describen en las especificaciones G.987, G.987.1, G.987.2, G.987.3, G.987.4, G.988 y G.989.1. La figura 2.28 muestra la evolución de GPON.

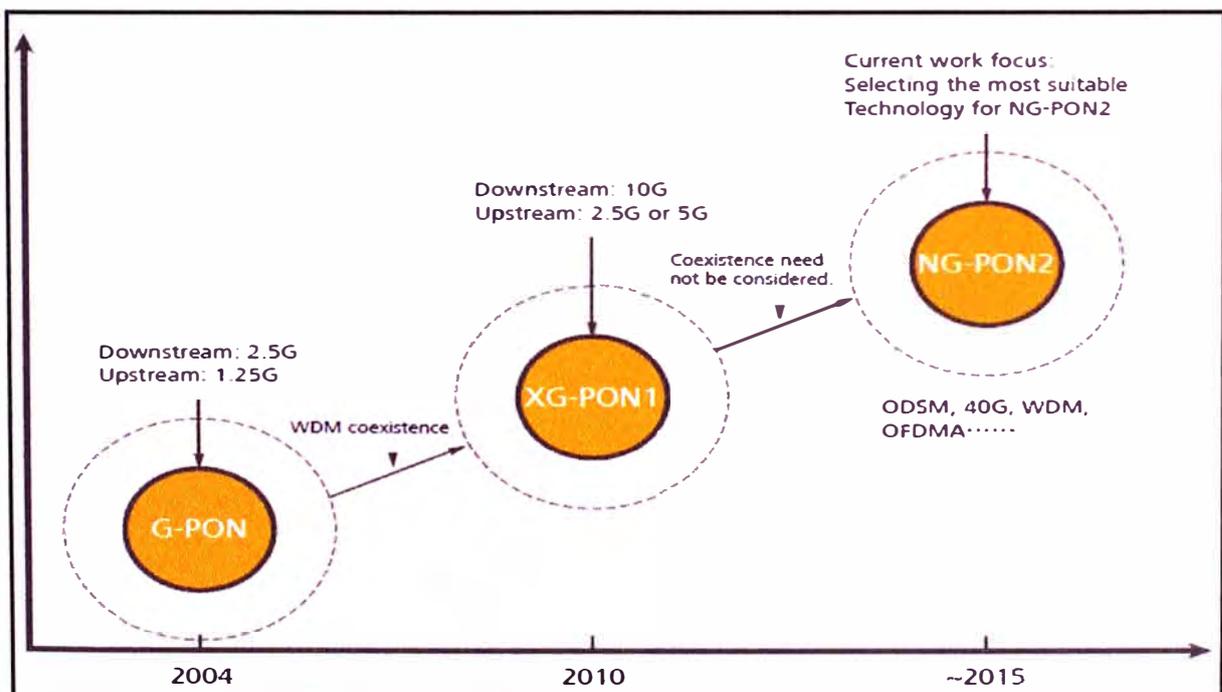


Figura 2.28 Evolución de GPON

Fuente: Figura 2-1 de [8]

NG-PON se divide en dos fases: NG-PON1 y NG-PON2. Los requerimientos en la primera fase incluyen la coexistencia con los sistemas GPON y se reutiliza la planta externa llegando a velocidades de 10Gbps en la dirección descendente. Operadores como Verizon ya han dado los primeros pasos en esta tecnología con muy buenos resultados. NG-PON2 es la siguiente fase que logra velocidades de 10 Gbps o más en ambas direcciones del tráfico, con nuevos ODNs e independientemente de las normas de GPON.

a) Compatibilidad entre GPON y XG-PON1

XG-PON1 es una mejora de GPON y soporta todos los escenarios del mismo. Inherentemente mantiene la arquitectura punto a multipunto (P2MP) y utiliza la misma ODN. Esto económicamente conviene al proveedor de servicios ya que la planta externa representa aproximadamente el 70% del costo de la implementación.

En la capa física las longitudes de onda en la dirección ascendente y descendente difieren entre GPON y XG-PON1 pero la compatibilidad se da con el uso de WDM. En la oficina central o CO se utiliza un acoplador llamado WDM1r y en el lado del usuario se utiliza un filtro que bloquea longitudes de onda o WBF. El escenario de compatibilidad descrito se muestra en la figura 2.29.

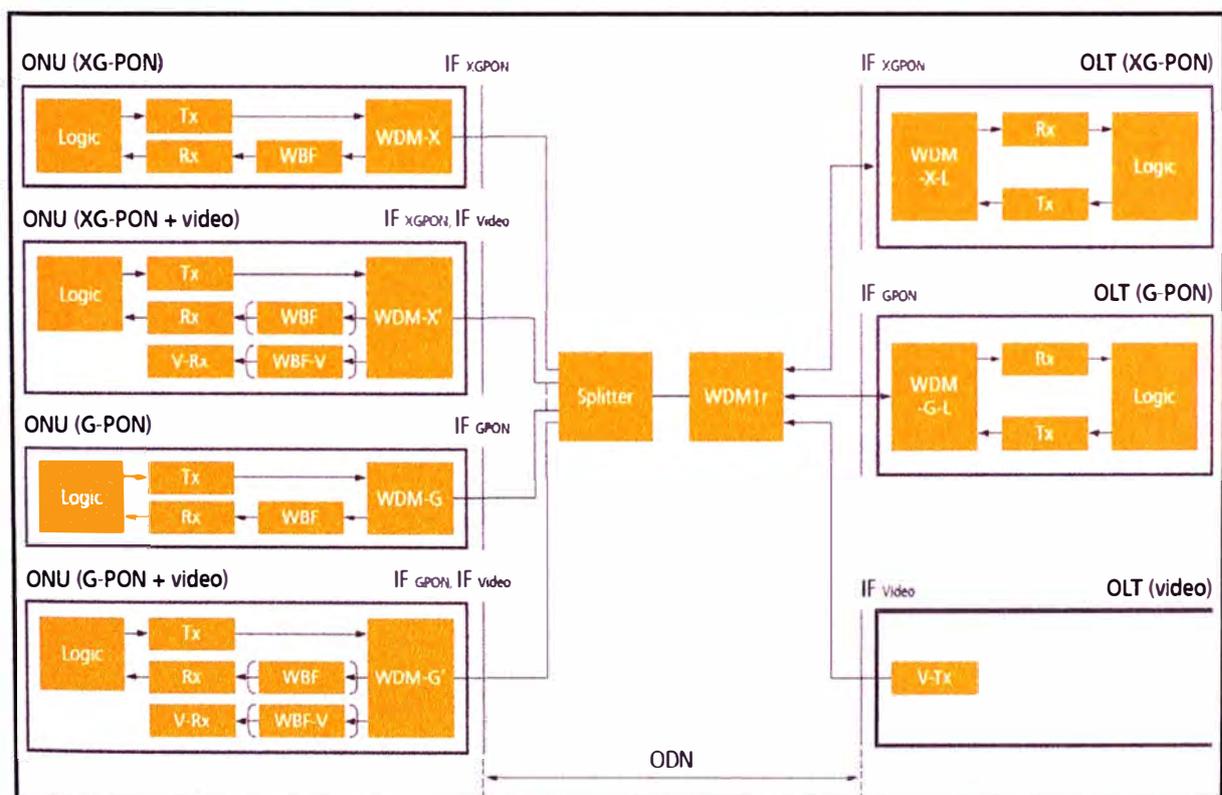


Figura 2.29 Compatibilidad de GPON y XG-PON1

Fuente: Figura 3-3 de [8]

b) Evolución a XG-PON2

XG-PON2 especifica velocidades de 10 Gbps tanto en la dirección descendente como ascendente. Sin embargo, la norma G.989.1 también indica poder llegar a los 40 Gbps con *splitters* de 1:64 para el tráfico descendente.

Definitivamente, la mayor demanda de ancho de banda y de velocidad hará que las redes de acceso, principalmente PON, sigan desarrollándose y ofrezcan mayores beneficios tanto al operador como a los usuarios. Este desarrollo tiene que tener en cuenta los aspectos técnicos y económicos. Por tal motivo, la ITU-T está analizando cómo podría darse la migración de XG-PON1 a XG-PON2 pero todavía se espera que la primera fase esté completamente madura.

2.3.2 10G-EPON

La norma IEEE 802.3av especifica las características de 10G-EPON, que es una evolución de EPON y permite velocidades de 10 Gbps en la dirección descendente y ascendente. La codificación que se utiliza para alcanzar estas velocidades es 64B/66B. 8B/10B se utiliza en la dirección ascendente si solo se requiere 1 Gbps.

a) Compatibilidad de 10G-EPON con EPON

La figura 2.30 muestra una red en transición de EPON a 10 G-EPON.

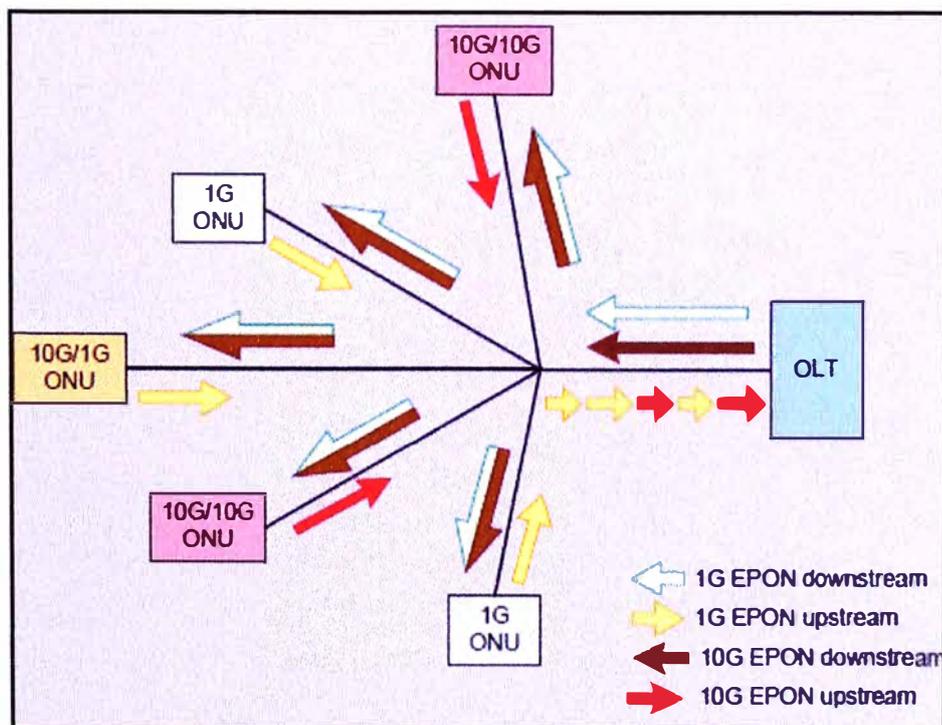


Figura 2.30 Coexistencia de EPON y 10 G-EPON

Fuente: Figura 3 de [9]

Al igual que en las normas de la ITU-T, el uso de WDM permite la coexistencia de 10G-EPON con EPON ya que las longitudes de onda que se utilizan son distintas. Esto hace factible una migración paulatina de una tecnología a otra.

2.3.3 Proyección de las redes PON

Por lo que se ha visto, la tendencia por el uso de tecnologías PON está en aumento y tanto la IEEE como la ITU-T siguen desarrollando y mejorando constantemente su normalización. Actualmente, en cuanto a velocidad se refiere, 10G-EPON supera a XG-PON1 debido a que ofrece 10 Gbps en ambas direcciones del tráfico. Sin embargo, no solo la velocidad es importante, sino también el alcance, y en ese aspecto la ITU-T ofrece mejores soluciones. La figura 2.31 muestra la evolución de las tecnologías PON y su proyección a futuro.

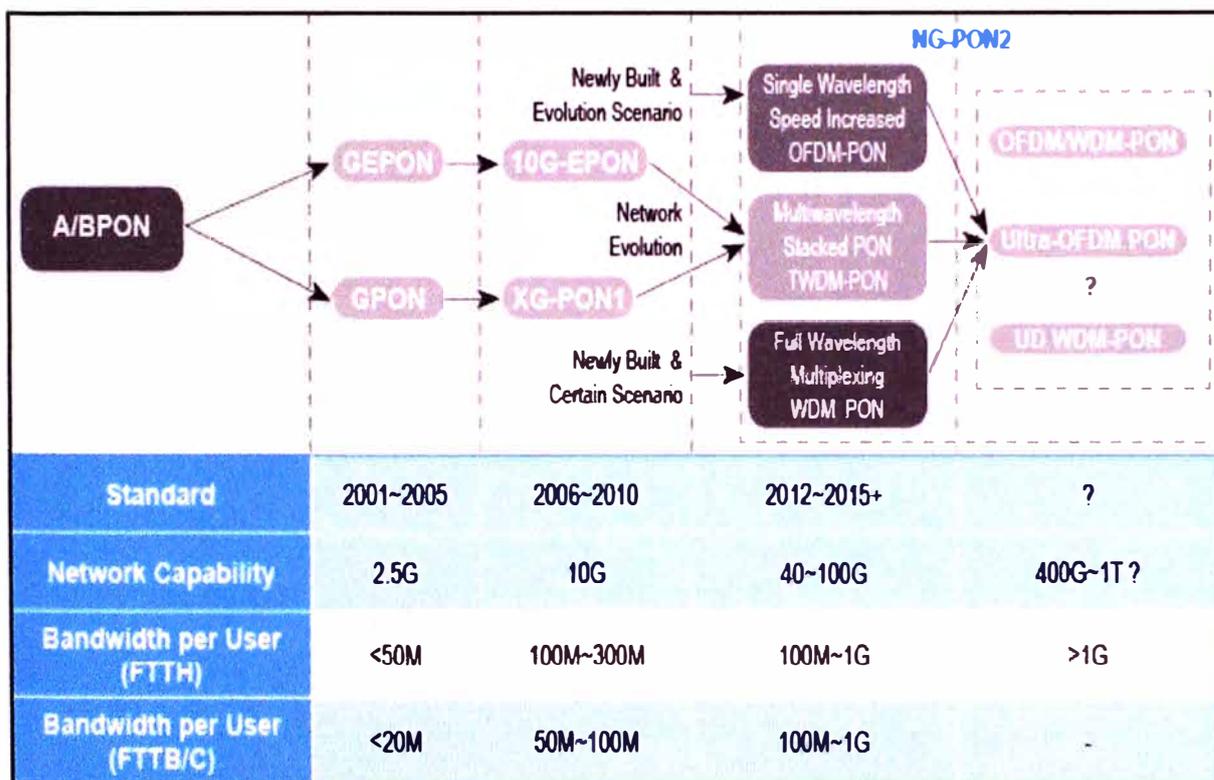


Figura 2.31 Evolución de las redes PON

Fuente: Figura 2 de [10]

2.4 Escenarios FTTx

Las redes de acceso para el hogar, las múltiples unidades ocupacionales y los pequeños negocios, con la aplicación de la tecnología PON, comúnmente son llamadas redes fiber-to-the-x. La x indica qué tan cerca del cliente se encuentra el punto final de la fibra. Los escenarios FTTx se muestran en la figura 2.32.

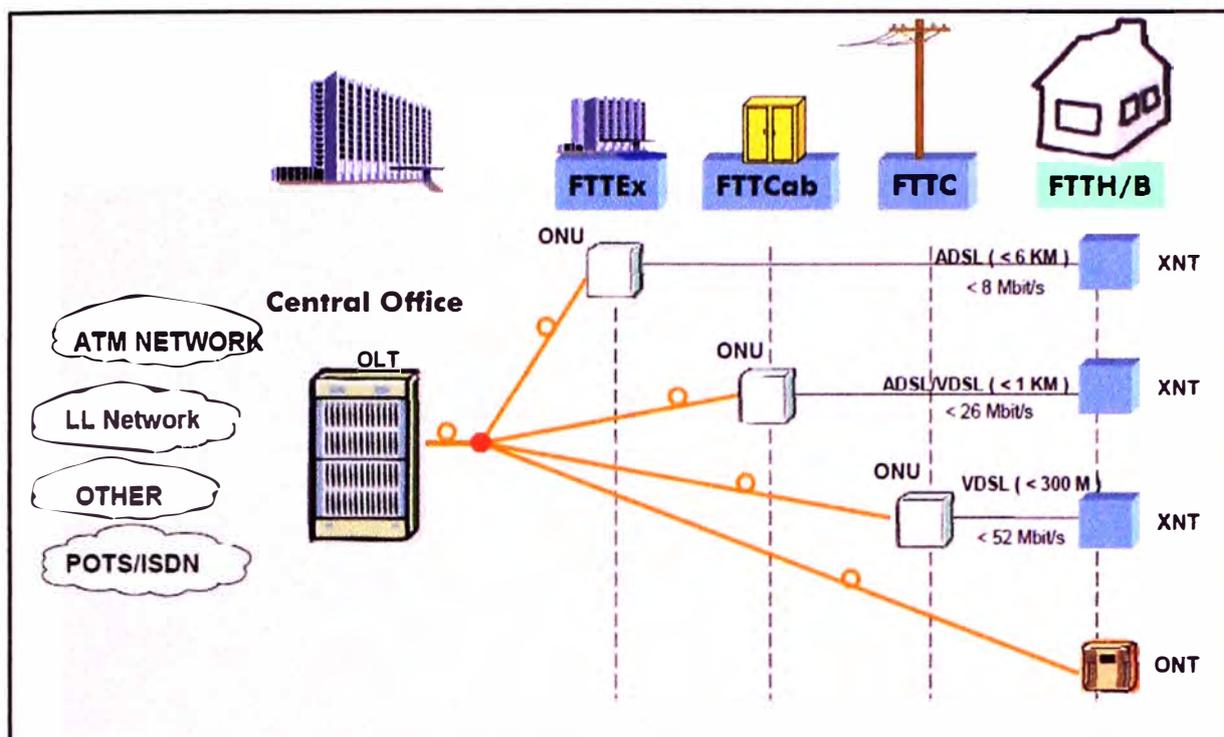


Figura 2.32 Escenarios PON desplegados – FTTx

Fuente: [3]

Entre los acrónimos utilizados en la literatura técnica y comercial, se tienen los siguientes:

- **FTTB:** Se refiere al despliegue de la fibra óptica del switch de la oficina central directamente hasta la empresa.
- **FTTC:** Se refiere al despliegue de la fibra óptica de la oficina central a un switch de comunicación situado aproximadamente a 300 m del hogar o la empresa. Cable coaxial, par de cobre trenzado o cualquier otro medio de transmisión es usado para conectar el equipo de la acera a los clientes del edificio.
- **FTTH:** Se refiere al despliegue de la fibra óptica de la oficina central directamente hasta el hogar. La diferencia entre FTTB y FTTH es que, típicamente, la demanda de ancho de banda en los negocios es mayor en las horas de trabajo que la demanda de los usuarios en el hogar. Como resultado, el proveedor de servicios de red puede recolectar mayores ingresos en las redes FTTB, donde recupera los costos de instalación más rápido que en las redes FTTH.
- **FTTO:** Es análogo al FTTB, en el que la ruta óptica se provee hasta el local del suscriptor de negocios.
- **FTTP:** Se ha convertido en el término dominante que abarca los diversos conceptos FTTx. Así, las arquitecturas FTTP incluyen las implementaciones FTTB y FTTH. Una red FTTP puede usar la tecnología BPON, EPON ó GPON.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

En este capítulo se describe la metodología de diseño para la red de acceso óptico. El enfoque que se utiliza es de “arriba hacia abajo” de acuerdo a las capas del modelo OSI, es decir, se empieza el análisis en la capa de aplicación y se termina en la capa física. Esto se muestra en la figura 3.1.

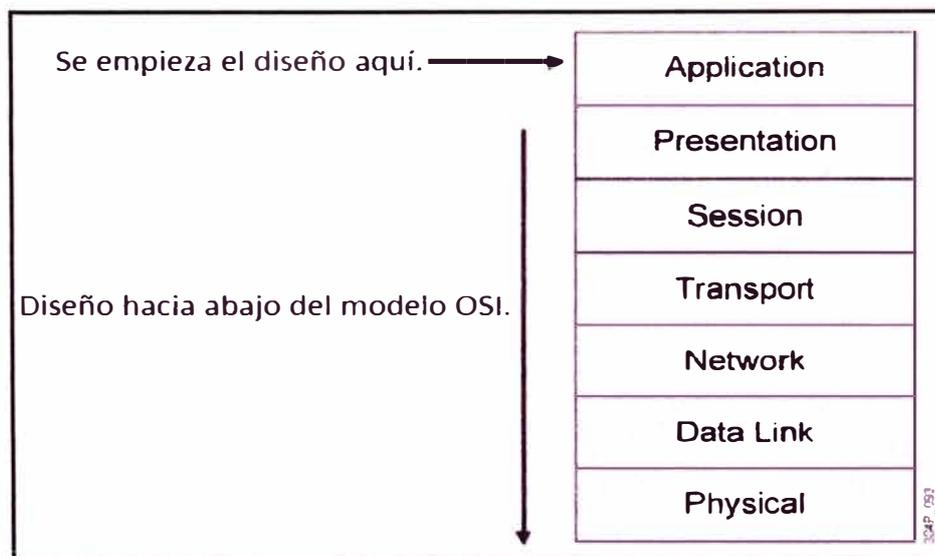


Figura 3.1 Enfoque de diseño de arriba hacia abajo

Fuente: Módulo 1 de [11]

Un diseño bajo el enfoque de “arriba hacia abajo” aclara los objetivos de diseño e inicia el mismo desde la perspectiva de las aplicaciones requeridas y las soluciones de red. Este enfoque adapta la infraestructura física a las necesidades de la solución de red a la cual se llegue. Si se utiliza un enfoque de “abajo hacia arriba” seleccionando primero los equipos y la tecnología, la red puede no cubrir todas las necesidades de la empresa, por lo que hay una alta posibilidad de realizar rediseños de la red. El enfoque tomado en

este trabajo ayuda a disminuir las probabilidades de errores en el diseño.

Para ordenar el procedimiento, se tiene en cuenta el ciclo de vida de la red, el cual contempla seis fases: Preparación, Planificación, Diseño, Implementación, Operación y Optimización (PPDIOO). Esto se muestra en la figura 3.2.

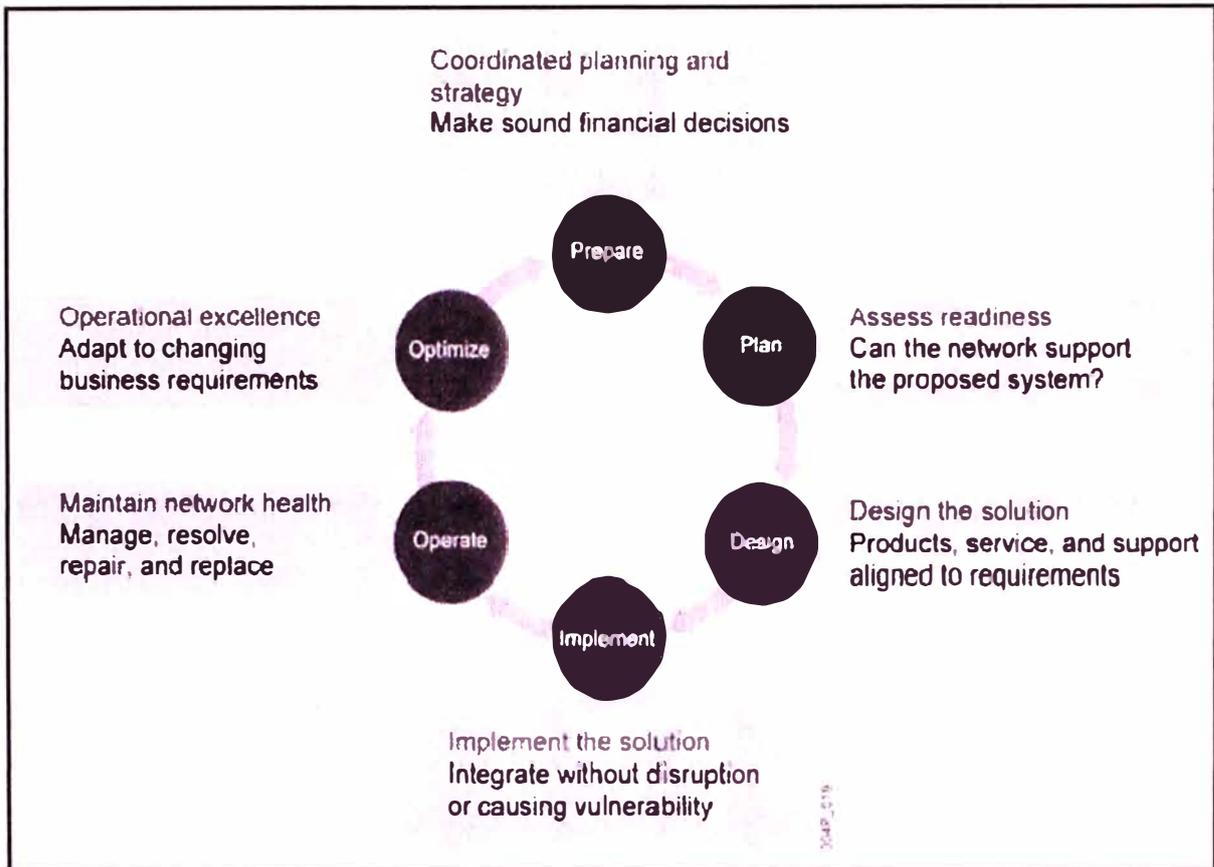


Figura 3.2 Ciclo de vida de una red

Fuente: Módulo 1 de [11]

En el diseño se abarca solo las tres primeras fases del ciclo de vida de la red: Preparación, Planificación y Diseño. En ellas se aplica el enfoque de “arriba hacia abajo”.

3.1 Preparación de la red

Esta fase establece los requerimientos del operador, se desarrolla estrategias de red al proponer una arquitectura conceptual de alto nivel y se identifican las tecnologías que pueden utilizarse. Aquí se puede establecer la justificación financiera de la estrategia de red y se evalúa el caso de negocio de la arquitectura propuesta.

Muchos requerimientos son más importantes para el diseño de la red de agregación y de núcleo, o abarcan el diseño de infraestructura de servicios inteligentes. Si bien esto no es objeto del informe es necesario tenerlos presente debido a que influyen en las

decisiones que se tomen y en el diseño de la red de acceso.

3.1.1 Identificación de aplicaciones y servicios de red

En esta sección se describe el proceso de definición de las aplicaciones y servicios que se planea usar en la red.

a) Identificación de aplicaciones planificadas

Un paso crítico es reunir datos para determinar qué aplicaciones se planea utilizar y qué tan importantes son, así como también saber que tanto ancho de banda o velocidad se requiere. Para ello se utiliza una tabla que ayuda a organizar y categorizar las soluciones para las aplicaciones planificadas.

El operador desea ofrecer un servicio de banda ancha de gran capacidad manteniendo su servicio de televisión analógica y proyectándose a migrar este servicio a IPTV. También, se desea que la red sea capaz de soportar servicios Triple Play con cualquier tipo de tecnología para la voz o el video. Por ello, se considera las aplicaciones que se muestran en la tabla 3.1.

TABLA N° 3.1 Aplicaciones planificadas

Tipo de aplicación	Aplicación	Criticidad	Velocidad requerida
Web Browsing	Microsoft Internet Explorer, Opera, Netscape	Importante	4 Mbps
Video	HDTV, IPTV	Crítica	18 Mbps
Redes de voz	VoIP, POTS	Crítica	1 Mbps
E-mail	Microsoft Outlook	Importante	2 Mbps
Compartición y transferencia de archivos	BearShare, Morpheus, XoloX	No importante	2 Mbps

No necesariamente se considera lo que cada usuario va a utilizar. Esto depende mucho de los tipos de aplicaciones y de la velocidad que el abonado contrate. Sin embargo, la red debe soportar estos requerimientos por usuario sin ningún inconveniente. En general, de acuerdo a la tabla 3.1, cada abonado debe tener una velocidad descendente mínima de 27 Mbps.

Las aplicaciones de voz y video se consideran críticas debido a que tienen prioridad

para su transmisión en comparación con otro tipo de aplicación. Si bien la voz solo necesita una velocidad de 150 Kbps, se considera un margen para que el abonado pueda tener varios teléfonos a la vez. Para el caso del video, se requiere un consumo de ancho de banda elevado en la dirección descendente sobre todo si se envían canales HDTV ó IPTV. Actualmente, el operador no ofrece este tipo de canales pero es una proyección futura y hay que tenerlo en cuenta.

El web browsing es el tipo de aplicación que más utilizan los usuarios, de ahí su importancia al igual que el e-mail, aunque este último se utiliza más en el entorno corporativo.

b) Identificación de servicios de infraestructura planificados

Los servicios de infraestructura planificados son necesarios para brindar eficazmente todos los tipos de aplicaciones de acuerdo a los requerimientos del operador. Existen también servicios que se utilizan para el correcto funcionamiento de la red. Se consideran los servicios que se muestran en la tabla 3.2.

TABLA N° 3.2 Servicios planificados

Servicio	Comentarios
Seguridad	Desarrollar una seguridad sistemática con firewalls, sistemas de detección de intrusión (IOSs) y listas de control de acceso (ACLs).
QoS	Dar prioridad a tráfico sensible al retardo como la voz, el video y otros tráfico importantes. Ayuda también a un mejor manejo de la congestión y asignación de ancho de banda.
Administración de red	Utilizar herramientas de administración centralizados, donde se requiera apropiados productos de administración.
Alta disponibilidad	Eliminar los puntos singulares de falla al utilizar rutas redundantes donde sea necesario.
Movilidad	Necesidad de los usuarios de utilizar laptops.

La seguridad es un servicio importante para poder controlar el tráfico en la red y evitar el acceso a la información de personas no autorizadas; la QoS ayuda a dar prioridad a las aplicaciones de video y voz, controla la velocidad que se brinda a un cliente o servicio de datos en particular y ayuda a manejar el tráfico en caso de congestión; la administración de la red monitorea los equipos y ayuda a resolver inconvenientes que se pudieran presentar; la alta disponibilidad también es importante para asegurar que el servicio tenga un 99.9% de disponibilidad; finalmente, la movilidad es un servicio que se considera

debido al aumento del uso de laptops tanto en el mercado corporativo como residencial.

3.1.2 Definición de los objetivos del operador

Conocer los objetivos del operador ayuda a enfocar el diseño de acuerdo a los requerimientos más importantes. Esto mejora el proceso de posicionamiento tecnológico y da una guía sobre los productos que se utilizan en la red. Se tienen los objetivos que se muestran en la tabla 3.3.

TABLA N° 3.3 Objetivos del operador

Objetivo empresarial	Datos reunidos (Situación actual)	Comentarios
Incrementar la competitividad	Competencia: empresas de cable de Lima.	Mejorar el servicio y la cobertura.
Reducción de costos	Requerimiento de espacio, costos altos en la energía y aire acondicionado.	Se requiere convergencia en la red.
Mejorar la atención a los usuarios	Seguimiento poco flexible de pedidos y soporte técnico a los usuarios.	Atención a los usuarios y soporte técnico vía Web.
Adicionar nuevos servicios al cliente	Se brinda servicio de televisión por cable analógica e Internet.	Brindar Triple Play con IPTV y aumentar la velocidad en el servicio de banda ancha.

El operador desea incrementar su competitividad mejorando su servicio, en este caso el de televisión por cable (con miras a IPTV) e Internet. Asimismo, desea aumentar su cobertura para tener mayor cantidad de potenciales clientes. También, se requiere reducir los costos actuales de operación y mantenimiento, para lo cual se pretende lograr una convergencia en la red al utilizar una sola infraestructura para todos los servicios. Adicionalmente, el operador no cuenta con un soporte técnico adecuado, por lo que se necesita una mejor atención al cliente y soporte técnico vía web.

3.1.3 Definición de los límites del operador

Es importante analizar los límites empresariales que pueden afectar el diseño de la red. La tabla 3.4 muestra los límites del operador.

TABLA N° 3.4 Límites del operador

Límite empresarial	Datos reunidos (Situación actual)	Comentarios
Presupuesto	\$ 1'000,000 para el equipamiento	Como máximo se puede extender hasta \$ 78,000 más.
Personal	Ingenieros y técnicos de planta externa.	Planear tener nuevos ingenieros en el departamento de red; se necesita un plan de desarrollo técnico.
Políticas	Protocolos normalizados y abiertos a diferentes vendedores.	Se prefieren equipos Alcatel-Lucent.
Programación	El plazo para terminar el proyecto de red es de un año.	Se requiere que la red soporte el servicio actual de TV analógica y las nuevas aplicaciones, incluyendo IPTV, voz e Internet con mayor velocidad.

El personal actual del operador necesita capacitaciones para la nueva tecnología que se utilice, por lo que es probable que se requiera contratar ingenieros expertos en el tema; referente a las políticas, la empresa es abierta a utilizar equipos de diferentes vendedores pero también tiene preferencia por la marca Alcatel-Lucent; es fundamental que el gasto en equipos esté dentro del presupuesto dado o dentro de la máxima extensión que se menciona; finalmente, en lo que respecta al tiempo, se está programando culminar el proyecto de red en un año.

3.1.4 Definición de los objetivos técnicos

Cuando una organización crece depende más de la red y de sus aplicaciones. La tabla 3.5 identifica y prioriza los objetivos técnicos de acuerdo a lo analizado en las secciones anteriores. Esto direcciona para elegir el equipamiento, los protocolos, las características, etc. que se utilizan en el diseño.

TABLA N° 3.5 Objetivos técnicos

Objetivo técnico	Importancia	Comentarios
Rendimiento	20	Importante sobre todo en el sitio central.
Disponibilidad	25	Debe ser 99.9%.
Administrabilidad	5	No es muy crítico por el momento.
Seguridad	15	Importante en la transacción de información crítica.
Modernización	10	Soporte de aplicaciones IPv6.
Escalabilidad	25	Crítica para el crecimiento futuro.
Total	100	

Técnicamente los objetivos principales son la escalabilidad y la disponibilidad. Con ello, el operador asegura un buen servicio a sus clientes y un crecimiento futuro de la red. El rendimiento es fundamental para los equipos que se encuentran en la oficina central y concentran todo el tráfico. La seguridad y la modernización son necesarias para los clientes corporativos que realizan transacciones de información confidencial y utilizan aplicaciones modernas. La administración de la red es importante para un correcto monitoreo y soporte técnico de la red pero no se considera un punto primordial en comparación con los otros objetivos ya que los equipos actuales cuentan con un sistema de gestión predeterminado.

3.1.5 Definición de los límites técnicos

Los diseñadores de red pueden chocarse con límites técnicos durante el proceso de diseño. Identificar posibles compensaciones a estos límites es fundamental para evitar inconvenientes. La tabla 3.6 muestra los límites técnicos encontrados.

La red actual del operador es una red HFC que cuenta en su distribución con cableado coaxial, el cual limita la velocidad del servicio de datos mientras más usuarios se tengan. Lo ideal es utilizar fibra óptica en la distribución para ofrecer altas velocidades y aprovechar otras ventajas que ofrece la transmisión óptica. Adicionalmente, la red actual soporta aplicaciones IPv4, lo cual va a ser una limitante en un futuro cercano ya que las aplicaciones con IPv6 están empezando a desarrollarse y la red debe soportar estos

nuevos cambios tecnológicos.

TABLA N° 3.6 Límites técnicos

Límites técnicos	Datos reunidos (Situación actual)	Comentarios
Cables existentes	Cables de fibra óptica en su red troncal y cables coaxiales en su red de distribución.	Reemplazar el cableado de cobre por cables de fibra óptica.
Disponibilidad de ancho de banda	Velocidades hasta el abonado en el orden de los Kbps que varían de acuerdo a la cantidad de usuarios.	Actualizar las velocidades hacia el usuario para ofrecer servicios adicionales.
Compatibilidad de aplicación	Aplicaciones basadas en IPv4.	Obtener nuevos equipos de red que soporten IPv6.

3.1.6 Evaluación de la arquitectura de solución

En las secciones anteriores se ha analizado las características de la capa de aplicación y se ha logrado identificar lo que necesita el operador en varios aspectos. De acuerdo a ello, la opción tecnológica que ha de utilizarse en el diseño está basada en fibra óptica y en elementos ópticos pasivos (PON) para lograr un escenario FTTP.

a) Elección de la PON con FTTP

Las PON con FTTP cubren las siguientes necesidades y objetivos:

- En lo referente a las aplicaciones y servicios de red, al usar la fibra óptica en la distribución se tiene mayor capacidad para soportar las aplicaciones interactivas, IPTV, HDTV, etc., que requieren un mayor ancho de banda. Asimismo, se evita el robo de señal que se da cuando se utiliza el cable coaxial. Actualmente, no es posible robar la señal de una fibra óptica.
- Se cubre el objetivo de reducir los costos, sobre todo en la planta externa. Esto debido al uso de elementos pasivos que no necesitan energía eléctrica para su operación.
- Debido a que el operador tiene una red troncal de fibra óptica ya desplegada, se ahorra costos de implementación, por lo que habrá mayor posibilidad de que el proyecto de red esté dentro del presupuesto dado.

- Se cubre el objetivo de aumentar la escalabilidad debido a la baja atenuación que tiene la fibra óptica.

Las tecnologías PON principales son GPON y EPON, por lo que es necesario realizar un análisis comparativo entre ambas opciones para ver qué arquitectura se acomoda más a los objetivos que se tiene. Otra tecnología que se puede utilizar es DPoE, pero esta se monta sobre una infraestructura EPON.

Nota: Hay que tener en cuenta que en estas tecnologías se analiza solo las capas 2 y 1. Las capas 3, 4, 5 y 6 no se consideran en el diseño ya que involucran a los equipos de la redes de agregación y de núcleo.

b) Análisis comparativo entre GPON y EPON

En esta sección se realiza un análisis comparativo entre las dos principales tecnologías PON: GPON y EPON. Existen diferencias importantes entre ambas tecnologías y muchas veces se mencionan falacias respecto a ellas. A nivel mundial hay muchas posiciones sobre cuál tecnología es la más apropiada pero en este trabajo se sustenta de manera imparcial cada aspecto diferenciador y se elige la mejor opción para el diseño.

b.1) Diferencias entre EPON, GPON y Ethernet

Una falacia que se menciona constantemente es que "EPON es solo Ethernet". Esto es completamente falso debido a que EPON y Ethernet son protocolos diferentes. En el transcurso de esta sección se analizan las tramas de cada protocolo y se verifica que EPON, GPON y Ethernet son tecnologías muy distintas.

Inicialmente, Ethernet era una arquitectura punto a multipunto debido a que los dispositivos podían escuchar la transmisión de los otros equipos para ver si la red no se encontraba ocupada y se podía transmitir. Con ello, se evitaba que ocurrieran colisiones entre tramas. Actualmente, Ethernet utiliza una arquitectura peer-to-peer, en donde cada dispositivo actúa de manera autónoma. Por ende, las tramas se envían a un destino específico. En términos simples, Ethernet envía las tramas con un encabezado, una carga útil y un tráiler con una suma de chequeo de trama ó FCS.

En las tecnologías PON se utiliza una arquitectura punto a multipunto en la dirección descendente y punto a punto en la dirección ascendente. Esta diferencia es muy importante porque se entiende que los ONTs reciben información solo del OLT. Ellos no escuchan la transmisión de otros ONTs, es decir, estos equipos no pueden detectar colisiones. Consecuentemente, la PON requiere una arquitectura de red maestro-esclavo,

donde el OLT es el maestro y el ONT es el esclavo. Para ello, las tramas en la PON deben ir con un encabezado que encapsula a las tramas Ethernet. Esto se aplica tanto en GPON como en EPON. La figura 3.3 muestra las tramas para ambos casos.

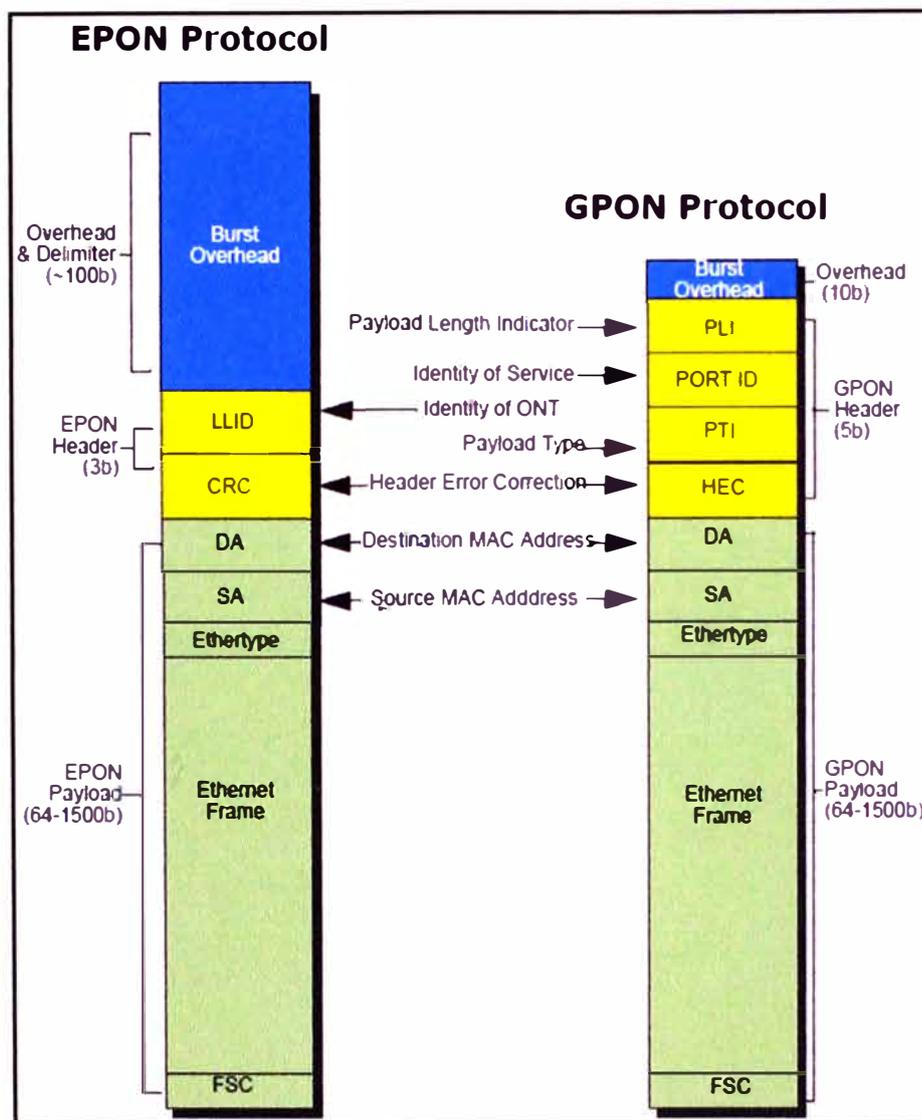


Figura 3.3 Encapsulación de una trama Ethernet con GPON y EPON

Fuente: Figura 2 de [12]

Las tecnologías EPON y GPON son muy diferentes debido a que los encabezados (preámbulo para Ethernet) que utilizan son distintos. En la figura 3.3 se observan dos tramas Ethernet iguales, una encapsulada con EPON y la otra con GPON. Se verifican algunas similitudes entre ambos protocolos, por ejemplo, ambos presentan una sección de overhead (mostrado en azul), una sección de encabezado (mostrado en amarillo) y una sección de carga útil (mostrado en verde). En ambos casos el overhead solo se utiliza en la dirección ascendente. Esta sección es utilizada por el OLT para obtener la señal de reloj y recuperar datos de los ONTs. El encabezado se utiliza tanto en la

dirección ascendente como descendente.

Se observan diferencias en la sección de encabezado (mostrado en amarillo). El encabezado EPON contiene dos campos: el LLID y el CRC. Este último es usado para verificar que no existan errores en el encabezado. Para el caso de GPON, el campo HEC o también CRC es el que realiza el chequeo de errores. El campo LLID de EPON identifica el origen de la trama. El campo Port ID del encabezado GPON es el análogo al campo LLID. Cada protocolo depende de sus identificadores para todo el direccionamiento en la PON. Específicamente, el ONT EPON utiliza el LLID para determinar si acepta o descarta un paquete mientras que el ONT GPON utiliza el Port-ID.

Con ello se confirma que EPON no es solo Ethernet. Cada uno tiene un esquema de direccionamiento distinto. EPON utiliza los LLIDs mientras que Ethernet utiliza sus direcciones MAC. Es importante tener esto claro para no llegar a confusiones al momento de analizar las ventajas y desventajas de EPON y GPON.

b.2) Diferencias entre las tramas EPON y GPON

En la figura 3.3 se observa que existen diferencias entre EPON y GPON. Ambos protocolos utilizan un identificador para su direccionamiento, pero el significado de cada uno es bastante distinto. En EPON, el LLID designa esencialmente un ONT en particular. En GPON, el Port ID designa no solo al ONT, sino también a un servicio dentro de ese ONT (por ejemplo, VoIP, IPTV, etc.). Esto es muy importante debido a que indica que GPON puede diferenciar y priorizar cualquier tipo de servicio dentro de su carga útil.

También, existen dos campos adicionales en GPON que no están presentes en el encabezado de EPON. Estos son el indicador de tamaño de carga útil (PLI) y el indicador de tipo de carga útil (PTI). El uso de estos campos brinda a GPON la habilidad de soportar ciertas características de calidad de servicio. El campo PLI, como su nombre lo indica, especifica el tamaño de la carga útil, lo cual es importante para los algoritmos de scheduling. El campo PTI de 3 bits indica si se requiere un manejo especial en la carga útil asociada, por ejemplo, puede brindar información adicional o indicar fragmentación del paquete.

La fragmentación de tramas es otra característica importante de GPON para reducir el retardo, por ejemplo, en el tráfico de voz. La figura 3.4 muestra dos métodos para transportar paquetes de alta y baja prioridad. En la primera mitad de la imagen se observa la técnica que utiliza EPON para transmitir dos tramas consecutivas, en donde se tiene que enviar completamente la primera trama antes de enviar la segunda. El problema con este método es que una trama de baja prioridad (trama #1 de la figura 3.4) puede ocasionar un retardo y jitter elevado a una trama de alta prioridad (trama #2 de la

figura 3.4). En la segunda mitad de la imagen se fragmenta la trama de baja prioridad para poder enviar la trama de alta prioridad con un retardo y jitter considerablemente menor para la trama #2. De aquí que la fragmentación se usa para proveer alta eficiencia de ancho de banda y baja latencia para tráficos sensibles al retardo.

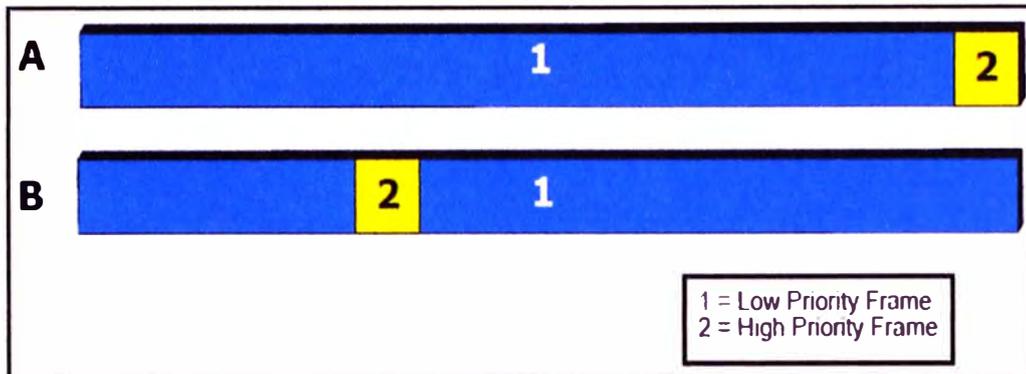


Figura 3.4 Fragmentación de tramas

Fuente: Figura 3 de [12]

GPON tiene otra característica importante llamada framing o entramado, en el cual las transmisiones en las direcciones descendente y ascendente se rompen en segmentos precisos de $125 \mu\text{s}$ (recíproco de la frecuencia de muestreo de 8 KHz para la voz por TDM) llamados tramas GPON. En la figura 3.5 se muestra esta última característica de GPON comparándola con EPON para el tráfico descendente.

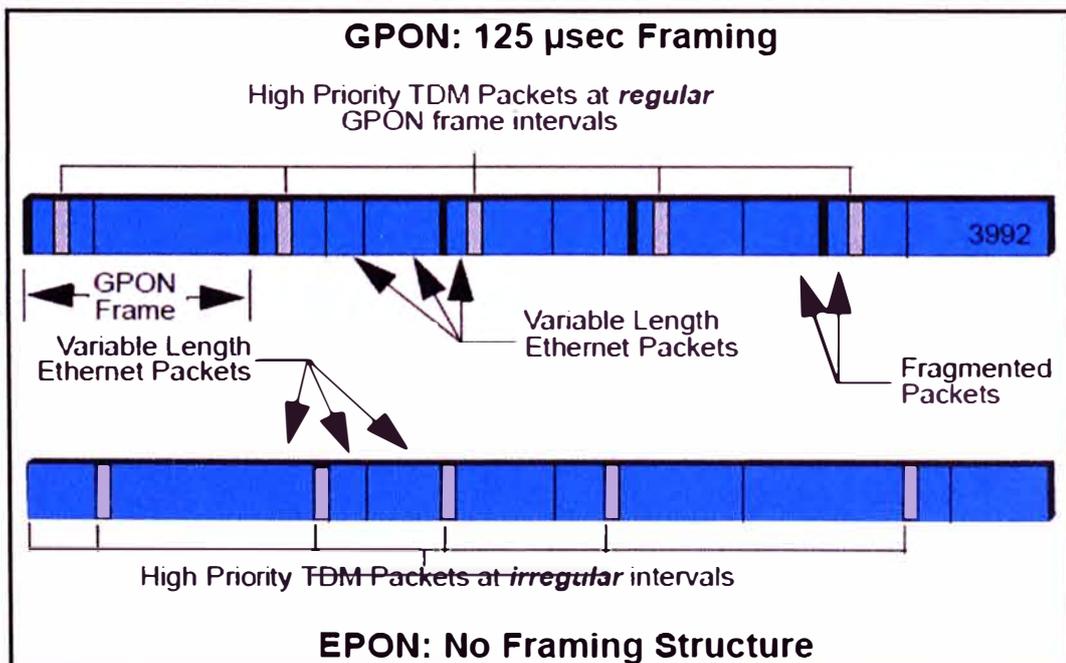


Figura 3.5 Diferencia en la estructura de trama de GPON y EPON

Fuente: Figura 4 de [12]

Al inicio de la trama GPON hay unos bloques pequeños (bloques de color negro) que contienen información de mantenimiento para todos los ONTs. Seguidamente, se envían las tramas Ethernet con o sin fragmentación a los ONTs. Esta estructura de entramado facilita el manejo de las ventanas para la asignación del ancho de banda dinámico (DBA) propio de GPON. Esto es muy importante para el envío de tráficos de alta prioridad como IPTV y la voz. EPON no presenta el concepto de entramado, consecuentemente, la QoS para tráficos sensibles al tiempo se deja completamente a los protocolos de capas superiores. Esto último implica tiempo y consumo de procesamiento.

b.3) Aspectos adicionales respecto a GPON y EPON

Una falacia que comúnmente se menciona es que GPON es un protocolo para ATM. GPON se utiliza principalmente para transportar Ethernet y como característica adicional también puede transportar celdas ATM. Como se ha visto, GPON es una tecnología muy distinta a ATM, tanto en su formato de trama como en su funcionamiento. Es muy importante no dejarse guiar por este tipo de mentiras.

También, debido a que el tráfico descendente se envía como broadcast a todos los ONTs, existe un riesgo de seguridad ya que los usuarios podrían, de alguna manera, ver el tráfico de otro usuario. Para ello GPON especifica dentro de su normalización utilizar la encriptación 128-bits AES, el cual es un algoritmo bastante seguro y muy difícil de descifrar. Ante ello, otra falacia que se menciona es que EPON también soporta encriptación. Si bien es cierto, actualmente algunos equipos EPON ya utilizan AES como mecanismo de seguridad, la verdad es que EPON no especifica ello en su norma y deja la seguridad a las capas superiores.

b.4) Comparación de las características físicas entre GPON y EPON

Con respecto a los parámetros físicos, existen algunas diferencias entre GPON y EPON. Por ejemplo, la velocidad que alcanza EPON en la dirección descendente es de 1.25 Gbps mientras que en GPON se llega a 2.5 Gbps. Ante ello, las compañías Teknovus y Fiberxon han logrado desarrollar chips para EPON que soportan la misma velocidad que GPON. Esto último es llamado "Turbo EPON".

Otras diferencias importantes es que la relación máxima que soporta EPON en los divisores de potencia es de 1:32, mientras que en GPON se puede utilizar divisores de 1:128. Con ello GPON logra dar servicio a una mayor cantidad de usuarios. En lo referente a la codificación, GPON utiliza NRZ, la cual es rápida aunque con cierta susceptibilidad a errores. EPON opera con la codificación 8B/10B, la cual genera una sobrecarga de bits de paridad pero brinda mayor robustez ante los errores.

El alcance de la red también es una característica distinta entre ambas tecnologías. Según la norma G.982 de la ITU-T existen 3 clases de ODNs: clase A, clase B y clase C. Estas clases se diferencian según el rango de pérdidas ópticas que soportan. Esto se observa en la tabla 3.7.

TABLA N° 3.7 Pérdidas ópticas para las clases de ODN

Fuente: Cuadro 3 de [13]

	Clase A	Clase B	Clase C
Pérdidas mínimas	5 dB	10 dB	15 dB
Pérdidas máximas	20 dB	25 dB	30 dB

EPON soporta las clases A y B, mientras que GPON soporta las clases A, B y C. Incluso, GPON puede soportar mayores atenuaciones donde se consideran ODNs de clases denominadas B+ y C+. Por ende, GPON logra un mayor alcance que EPON.

b.5) Elección de la opción tecnológica a utilizar

De acuerdo a lo que se ha analizado, se llega a las siguientes afirmaciones:

- EPON y Ethernet tratan a la información de manera distinta debido a que tienen diferencias importantes en su entramado. También, la topología que utiliza EPON es punto a multipunto sin el uso de switches como en Ethernet.
- GPON soporta características de calidad de servicio. EPON deja la QoS a las capas superiores.
- GPON transporta principalmente Ethernet y como característica adicional puede también transportar celdas ATM.
- GPON, de manera intrínseca, brinda seguridad en el envío de la información al utilizar el algoritmo de encriptación AES. Los equipos EPON actuales también utilizan esta forma de encriptación, pero esto no está dentro de la norma.
- Según las normas, GPON llega a 2.5 Gbps en la dirección descendente mientras que EPON solo logra 1.25 Gbps. Actualmente, EPON puede lograr velocidades como las de GPON a través de unos chips desarrollados por las compañías Teknovus y Fiberxon.
- GPON soporta una mayor relación en los divisores de potencia que EPON. Por ello, GPON puede brindar servicios a una mayor cantidad de usuarios.
- GPON, a diferencia de EPON, soporta ODNs clase B+, C y C+. Esto hace posible que GPON tenga un alcance mayor a los 20 Km.

GPON logra tener ventajas sobre EPON en lo referente a la calidad del servicio y en la

escalabilidad. Según lo que se ha analizado, la QoS es un servicio planificado y necesario para poder brindar aplicaciones de voz e IPTV en la red. Si bien es cierto, el diseño de la QoS no está dentro del alcance del presente trabajo, se entiende que en este aspecto GPON tiene ciertas ventajas en comparación con EPON. Con respecto a la escalabilidad, este es un objetivo técnico muy importante para el operador, por tal motivo, en el diseño se hará uso de la tecnología GPON.

Nota: Si se desea tener en cuenta los aspectos económicos de ambas tecnologías, se debe saber que los equipos GPON son un poco más costosos debido a su complejidad sobre todo en la QoS. Esto depende mucho del fabricante y en muchos casos la diferencia en comparación con EPON es mínima.

3.2 Planificación de la red

En esta fase se caracteriza la red existente. Para ello se analiza y se determina si la infraestructura de sistema actual puede soportar el sistema propuesto. De acuerdo a ese análisis, se sabe cómo debe ser la implementación de la opción tecnológica elegida.

3.2.1 Caracterización de la red existente

El operador cuenta con una red HFC desplegada en la zona norte de Lima. La mayoría de sus clientes tienen servicio de TV por cable y algunos tienen también servicio de Internet.

a) Red troncal de fibra óptica del operador

Como se observa en la figura 3.6, la red troncal del operador tiene una topología en forma de árbol desde el Head End o cabecera Torre Blanca (TVCL) hacia los nodos y Hubs de la red. Se tiene implementado 2 Hubs en Comas y en Huarangal, que ayudan a expandir más la cobertura. Los distritos a los cuales se puede brindar servicios son Comas, Carabaylo, Puente Piedra, Los Olivos y Ventanilla. Actualmente, solo se tienen clientes en los tres primeros distritos mencionados.

La figura 3.7 detalla la conexión entre los elementos concentradores en el Head End y los nodos de la planta externa. Se puede observar que las señales de video y de datos salen del CMTS a través de un combinador RF. Luego la señal resultante se envía a un divisor de potencia, que transmite la señal a la planta externa.

Para el caso del servicio de datos se necesita una señal de retorno o upstream que contiene la información que envía el usuario a la red. En la figura 3.7 se observa que la señal se envía desde el nodo, a través de una fibra óptica, hasta un receptor de retorno

en el Head End. Luego de ello, la señal se transmite a un combinador de datos para llegar finalmente al CMTS.



Figura 3.6 Red troncal del operador

Con respecto a las características físicas de la red troncal, los cables de fibra óptica son, en su mayoría, cables ADSS de 144 hilos y su tendido es de manera aérea. La fibra óptica que se utiliza es monomodo G.652-B. Las conexiones entre el CMTS y el transmisor o receptor de retorno utilizan cables coaxiales RG-6.

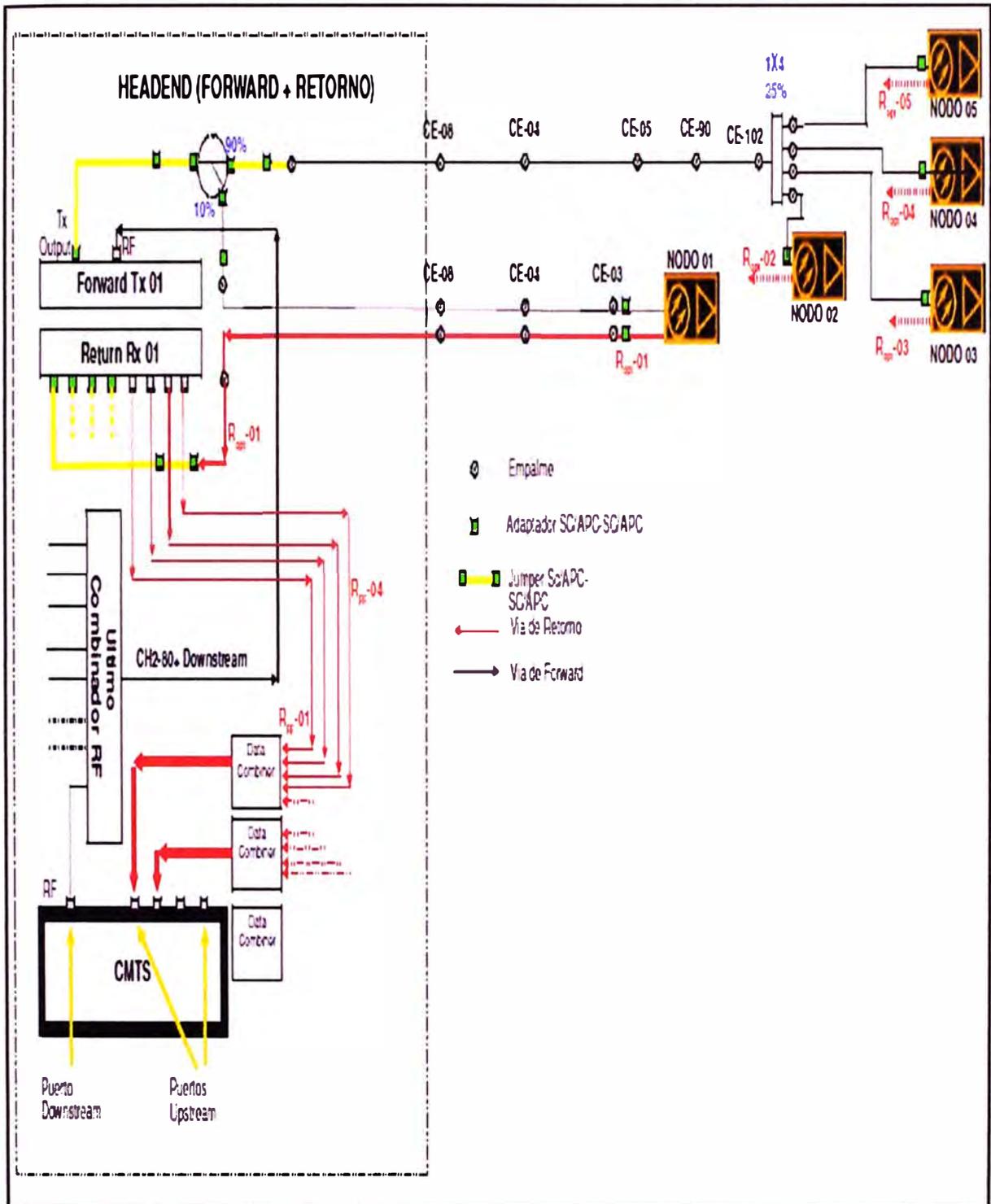


Figura 3.7 Elementos del Head End y de la planta externa del operador

b) Red de distribución de cobre del operador

La red de distribución de cobre tiene una topología física como se muestra en la figura 3.8. En ella se observa que desde el receptor óptico-eléctrico o nodo se distribuye la señal a través de un cable coaxial 0.5 hacia los amplificadores. Luego de ello, el cable llega a los taps respectivos para enviar la señal a los usuarios a través de un cable coaxial RG-6. Toda la conexión se realiza de manera aérea.

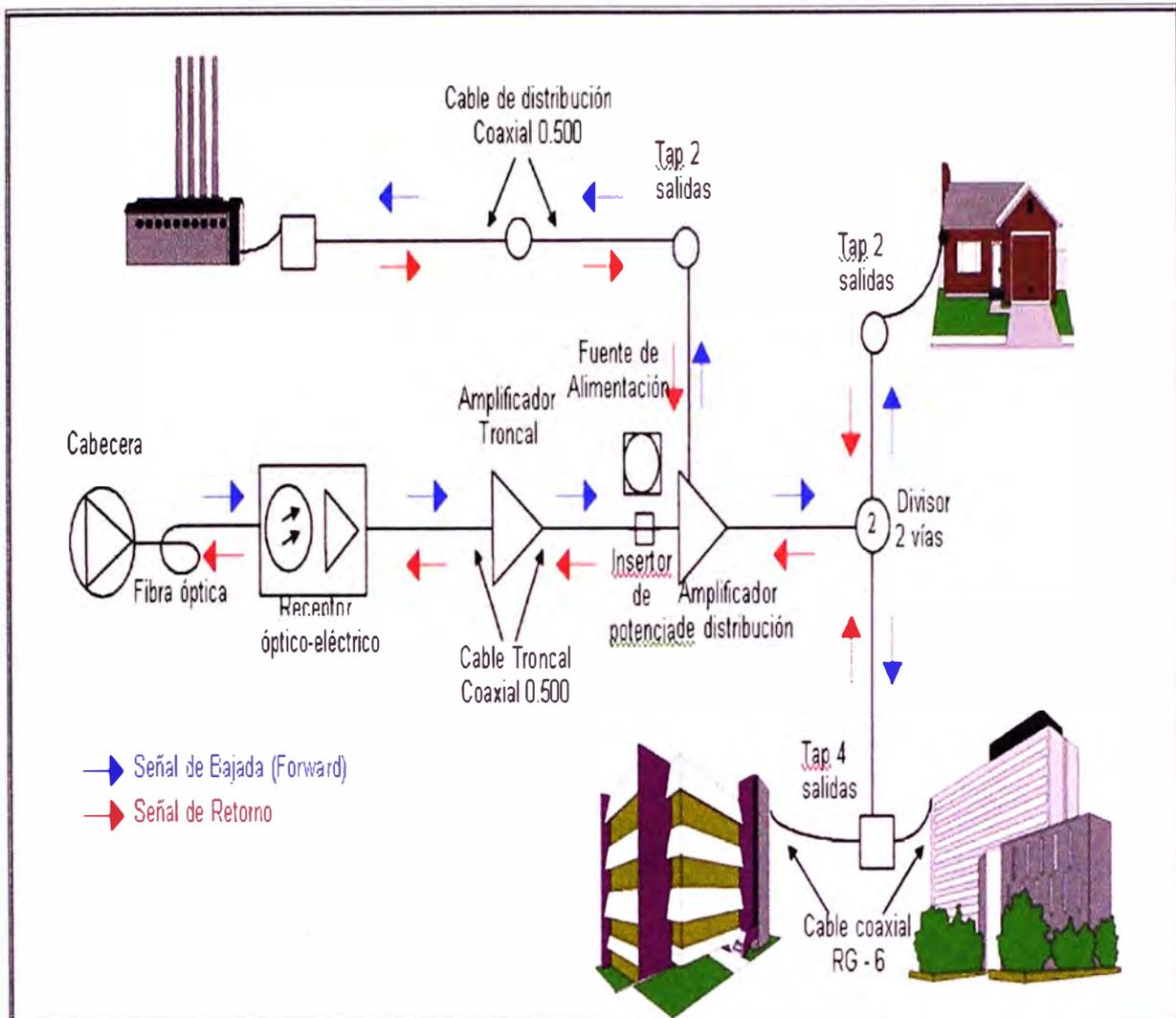


Figura 3.8 Distribución de cobre de la red del operador

c) Análisis de la demanda

No es objetivo de este trabajo realizar un minucioso análisis del mercado debido a que el operador ya lo tiene evaluado. Actualmente, se tiene 3525 abonados principalmente en los distritos de Comas, Puente Piedra y Carabayllo, y su expansión está llegando a otros distritos como Ventanilla y Los Olivos. En estos distritos se tiene una población residencial, en su mayoría, de clase media a baja y se observa un grado alto de potenciales clientes corporativos.

El Triple Play tiene como objetivo principal de mercado los hogares de clase media y clientes importantes. El servicio de voz debe ser brindado principalmente al mercado corporativo, ya que con la masificación de la telefonía celular no se ve una demanda muy alta de este servicio para el usuario común. Por ello, para los clientes residenciales se pretende tener planes para adquirir servicios Dual Play o para cada servicio de manera independiente.

El objetivo es realizar el diseño de una red piloto en una zona de Carabayllo que tiene



Figura 3.10 Cobertura objetivo para la red piloto

d) Análisis del entorno

No es objetivo del trabajo realizar un análisis minucioso del entorno, debido a que el operador realiza esta evaluación constantemente. En esta sección se describen algunas características de las empresas competidoras para visualizar la condición actual del operador frente a su competencia.

- **CablePerú:** Posee una cobertura en los distritos de Los Olivos, Comas, Puente Piedra, San Martín de Porres y Callao. Brinda únicamente servicio de televisión por cable analógico con más de 80 canales a un precio similar al del operador.
- **Cablemas:** Posee una cobertura en varios distritos de Lima. Brinda servicio de Internet, telefonía y de televisión por cable analógico con más de 100 canales a un precio relativamente aceptable para los usuarios en general. Todos sus servicios lo brindan a través de una red HFC.
- **BestCable:** Posee una cobertura en los distritos de San Juan de Lurigancho, Ancón,

Ventanilla, Pachacamac y Cieneguilla. Brinda servicio de televisión por cable analógico y próximamente brindará el servicio de Internet fija. La cantidad de canales y sus precios son similares a los del operador.

- **Movistar:** Posee una cobertura en todos los distritos de Lima. Brinda servicios de televisión por cable digital normalizado y de alta definición. Sus servicios de Internet y telefonía fija utilizan principalmente la tecnología DSL. Ofrece más de 100 canales y sus precios, sólo para televisión, duplican a los del operador. Si los usuarios solicitan adicionalmente servicios de Internet y de voz, los precios aumentan de manera considerable dependiendo de la velocidad que se quiere para el servicio de datos.
- **Claro:** Posee una cobertura en casi todos los distritos de Lima. Brinda servicios de Internet, telefonía, televisión por cable digital normalizado y de alta definición. Sus servicios los brinda a través de una red HFC. Ofrece más de 100 canales y sus precios aumentan dependiendo de la velocidad que se quiere para el servicio de datos.

3.2.2 Cambios recomendados para la red existente

De acuerdo a lo visto en la sección anterior, los cambios que se identifican y se recomiendan para la red actual del operador son los siguientes:

- Migrar la red de distribución de cobre a fibra óptica para cumplir, con miras a futuro, los nuevos requerimientos de aplicaciones como IPTV, VoIP y servicio de Internet con velocidades superiores a las de la competencia.
- Utilizar elementos pasivos en la red de distribución para ahorrar costos en operación y mantenimiento.
- Mejorar la escalabilidad de la red.
- Tener una redundancia de enlace troncal para aumentar la disponibilidad del servicio sobre todo para los clientes importantes o corporativos.
- Mejorar la seguridad en la información para evitar robo de señal y afectación de la calidad del servicio.
- Tener una gestión centralizada para un mejor monitoreo y administración de la red.
- Aplicar QoS de manera eficiente para poder personalizar mejor el servicio ofrecido de acuerdo a los requerimientos de los usuarios.
- Actualizar la red para que este basada en conmutación de paquetes y así aprovechar las ventajas que ella brinda. Esto sobre todo para el envío del video y la voz.

3.3 Diseño de la red

Los requerimientos iniciales que se derivan de la planificación influyen directamente

en el diseño de la red. En esta sección se detalla el diseño que cumple con los requerimientos técnicos y de negocio. Se incorpora las especificaciones para que se soporte disponibilidad, confiabilidad, seguridad, escalabilidad y rendimiento. Estas especificaciones de diseño son la base para las actividades de la implementación.

El diseño de solución de red está basado en la tecnología GPON y comprende principalmente la capa 1 del modelo OSI, aunque hay ciertas características en la capa de convergencia de transmisión que se consideran de capa 2. No se analizan las capas superiores debido a que involucran a los equipos de agregación y de núcleo.

A nivel de capa 2 se utiliza también Ethernet, por lo que se empieza el diseño en base a este protocolo. La arquitectura de Ethernet debe soportar los requerimientos de los clientes, tanto residenciales como corporativos.

En lo referente a la capa 1, se explica todos los parámetros físicos que se tienen que considerar en un sistema con fibras ópticas. Se termina el diseño con el despliegue de la red piloto en la zona objetivo y se muestran las proyecciones de cobertura y capacidad.

3.3.1 Diseño de la infraestructura de capa 2

El diseño de capa 2 utiliza Ethernet como tecnología de transporte debido al auge que tiene a nivel mundial. Se utilizan VLANs en el diseño para diferenciar a los clientes y/o servicios. Esta arquitectura comprende también las características de capa 2 de los elementos en una red GPON.

Nota: Si se utiliza ATM, la separación de tráfico se da con el uso de diferentes circuitos virtuales permanentes (PVCs). Este enfoque no es eficiente y sólo debe utilizarse en caso no se tenga Ethernet como tecnología de transporte. En caso se utilice TDM, se puede emular este tráfico como tramas de Ethernet para aprovechar los beneficios de utilizar las VLANs.

a) Modos de envío para el tráfico Ethernet en GPON

Un OLT puede funcionar como un switch de capa 2 con tres interfaces: la interfaz de red que sale del hub de servicio (shub) hacia la red de agregación, la interfaz de acceso entre el shub y las tarjetas LTs que tienen los puertos PON, y por último, la interfaz de control para el shub. La figura 3.11 muestra estas interconexiones entre el shub y los LTs dentro del OLT.

En general, el aprendizaje de las direcciones MAC es como cualquier switch Ethernet, pero se tiene en cuenta las siguientes reglas de envío:

- Access -> Network

- Network -> Access
- Network -> Network
- Control -> Access
- Control -> Network

De acuerdo a ello, existen dos modos de envío para aprovisionar las VLANs: de conexión cruzada y de puente inteligente.

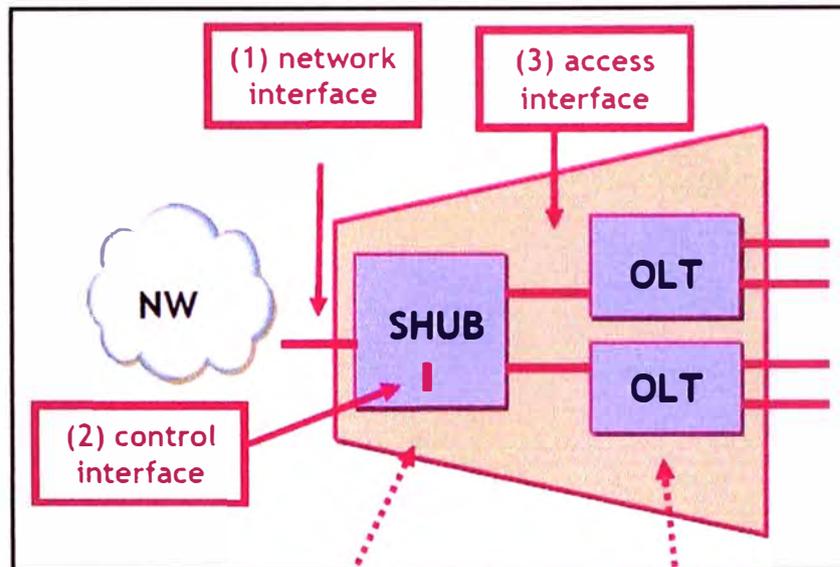


Figura 3.11 OLT como switch de capa 2

Fuente: [14]

a.1) Modo de envío de conexión cruzada

El modo de conexión cruzada tiene las siguientes características principales:

- La VLAN se asocia a un solo abonado.
- La VLAN se asigna según el modelo del suscriptor (orientada a conexión).
- Se tiene la opción stacked que ayuda en la escalabilidad.
- El tráfico ascendente siempre va hacia la red. No hay comunicación de usuario a usuario.
- Soporta broadcast de la red al usuario.
- Útil en aplicaciones de negocio.

En el diseño se utiliza este modo de envío para los clientes importantes y/o corporativos de la red debido a que asigna una VLAN exclusiva para cada abonado. Esto hace posible tratar los servicios de cada cliente de manera personalizada. En el diseño de la red piloto no se utiliza este modo de envío debido a que sólo se tienen clientes residenciales comunes. La figura 3.12 muestra el escenario para el modo de envío de conexión cruzada.

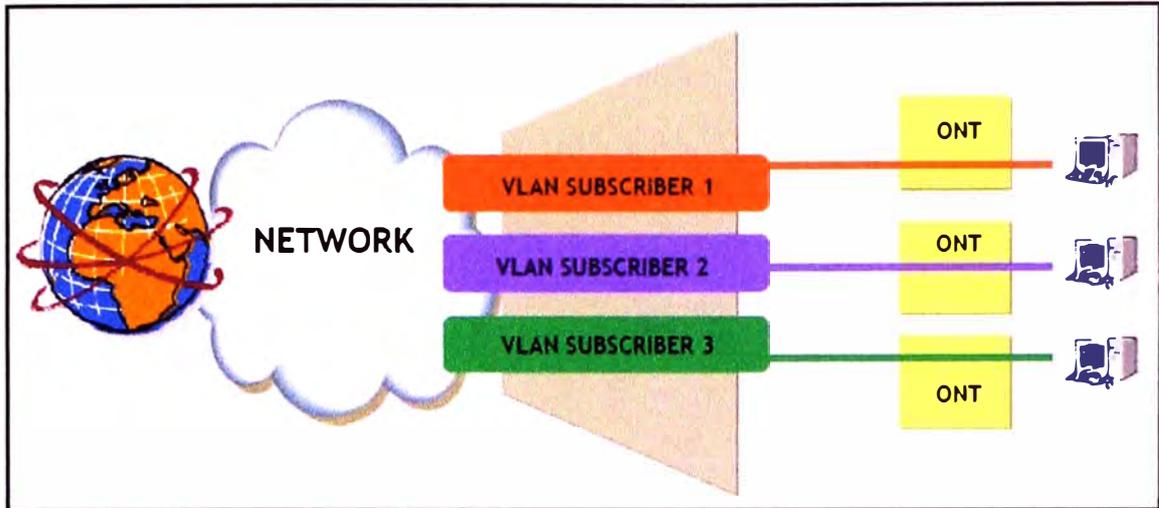


Figura 3.12 Modo de envío de conexión cruzada para clientes importantes

Fuente: [14]

Nota: En caso se tuvieran 2 OLTs, las VLANs que se usan entre ambos deben ser distintas. En caso contrario, se tiene el riesgo de que el tráfico broadcast congestione a los nodos debido a que la comunicación de usuario a usuario puede darse. Esto se observa en la figura 3.13.

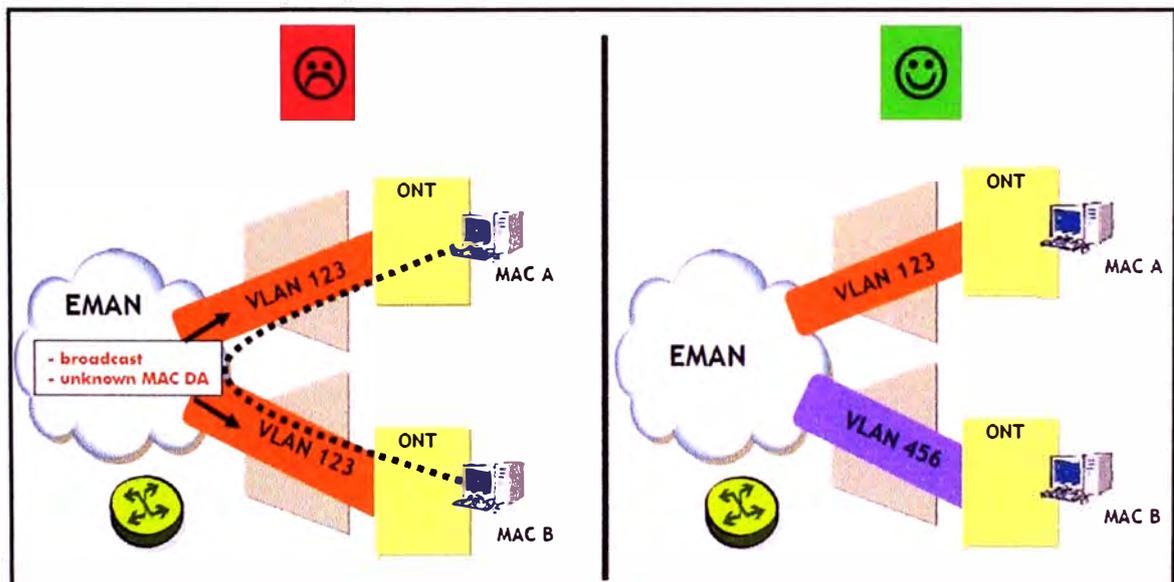


Figura 3.13 Diferentes VLANs para diferentes OLTs

Fuente: [14]

a.2) Modo de envío de puente inteligente

El modo de conexión de puente inteligente o modo de conexión ibridge tiene las siguientes características principales:

- La VLAN se encuentra asociada a un número de usuarios.

- La VLAN se asigna según el modelo de servicio.
- El tráfico ascendente siempre va hacia la red. No hay comunicación de usuario a usuario.
- Se bloquea el tráfico broadcast de la red al usuario (aunque se puede habilitar).
- Útil para aplicaciones residenciales.

En el diseño se utiliza este modo de envío para los clientes residenciales comunes debido a que asigna una VLAN para cada servicio. De esta manera, se evita utilizar una gran cantidad de etiquetas para clientes que tienen servicios similares. En el diseño de la red piloto se utiliza este escenario debido a que sólo se tienen clientes residenciales comunes. La figura 3.14 muestra el escenario para el modo de envío de conexión ibridge:

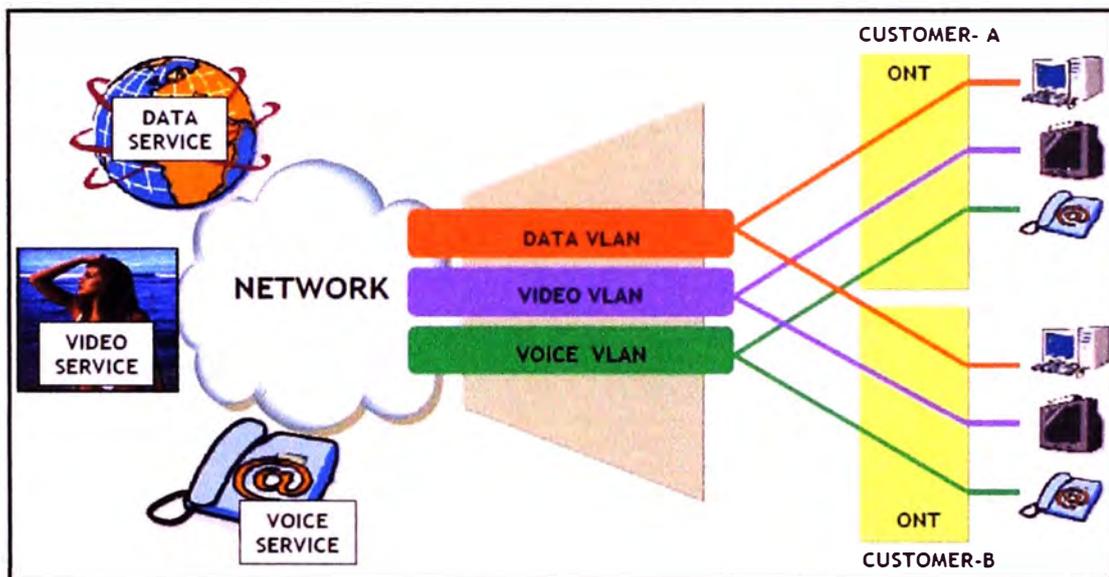


Figura 3.14 Modo de envío de conexión ibridge para clientes residenciales comunes

Fuente: [14]

El modo de envío de conexión ibridge deberá utilizarse plenamente cuando el operador brinde el servicio de voz y video de manera paquetizada (proyección a futuro). Debido a que en el diseño todavía se contempla brindar servicio de video analógico, se necesita un EDFA aparte para el envío exclusivo del tráfico de video.

b) Manejo de etiquetas para las VLANs en GPON

Las VLANs se utilizan para segmentar dominios de broadcast muy grandes en segmentos de red más pequeños. Para ello se agrega un etiquetado a las tramas Ethernet. Las especificaciones de las VLANs se encuentran en la norma IEEE 802.1q. La tabla 3.8 muestra los campos que tiene el etiquetado de VLAN con la cantidad de bits de cada uno.

TABLA N° 3.8 Formato del etiquetado de VLAN

Fuente: Capítulo 3 de [15]

No. of bits	16	3	1	12
Frame field	TPID	PRIORITY	CFI	VID

Cada uno de estos campos se describe a continuación:

- **Identificador de protocolo de etiqueta (TPID):** Establecido en el valor de 0x8100. Con este campo, el switch que recibe la trama sabe que tiene que analizar el campo de información de control de etiqueta, el cual comprende los otros tres siguientes campos.
- **3 bits de prioridad del usuario:** Utilizado en la norma 802.1p para características de calidad de servicio.
- **1 bit de identificador de formato ideal (CFI):** Utilizado para Token Ring.
- **12 bits del ID de la VLAN (VID):** Número de identificación de la VLAN. Admite hasta 4096 IDs.

En el diseño, el uso del campo VID y de los bits de prioridad (bits p) son importantes para los modos de marcado y de etiquetado.

b.1) Modos de marcado para el tráfico Ethernet

Existen dos modos de marcados: confiable y no confiable. Estos solo se aplican al tráfico ascendente. En la figura 3.15 se observa que la marcación se realiza con los bits p y la C-VLAN (VLAN del cliente), los cuales son asignados por el gateway residencial (RG). La conexión entre el OLT y el ONT siempre será confiable, por lo que el modo no confiable se da entre el ONT y el RG.

Las diferencias entre los modos de marcado son las siguientes:

- **Modo confiable:** La C-VLAN y los bits p que llegan al ONT del RG se envían sin ningún cambio al OLT.
- **Modo no confiable:** La C-VLAN se cambia a cero y los bits p se cambian por los valores predeterminados antes de enviar la trama del ONT al OLT.

En el modo confiable, si el tráfico no es etiquetado antes de llegar al ONT, la priorización se da a nivel de capa 3 con el campo DSCP del encabezado IP y el ONT replica esta priorización en los bits p.

Nota: Si el RG y el ONT son un mismo equipo, los modos de marcado funcionan de manera interna de la misma manera que se ha descrito.

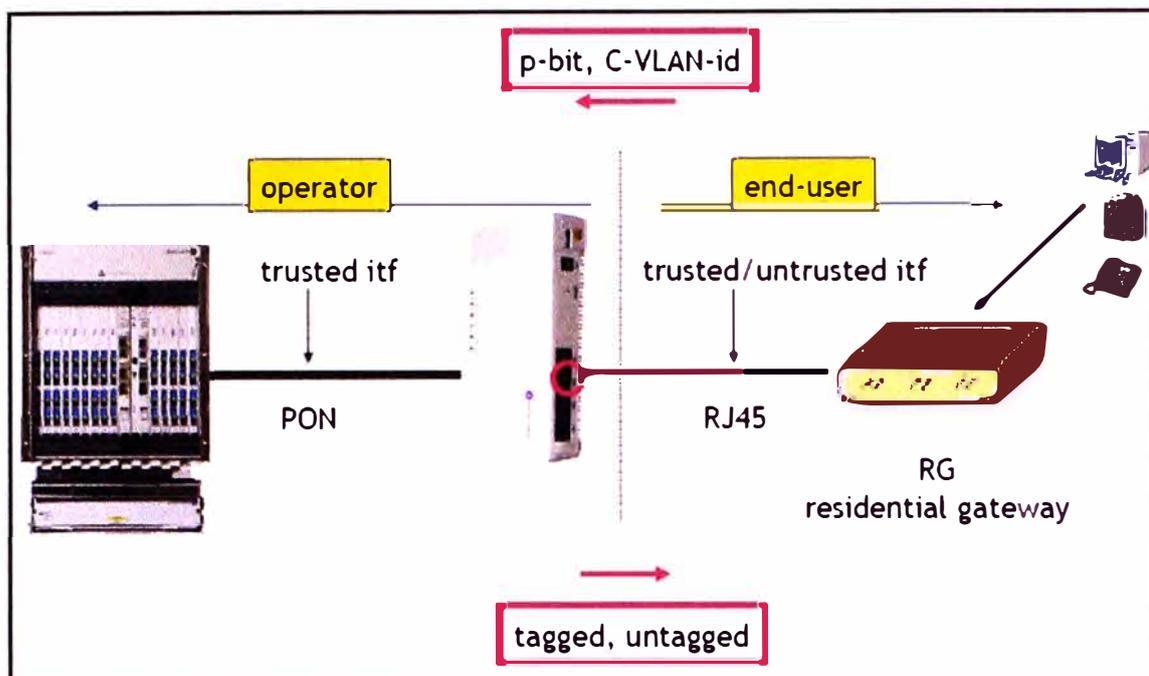


Figura 3.15 Modos de marcado confiable y no confiable

Fuente: [14]

b.2) Modos de etiquetado para el tráfico Ethernet

Se tienen tres casos para los modos de etiquetado: apilado, no apilado y passthrough. La figura 3.16 muestra el funcionamiento de los dos primeros.

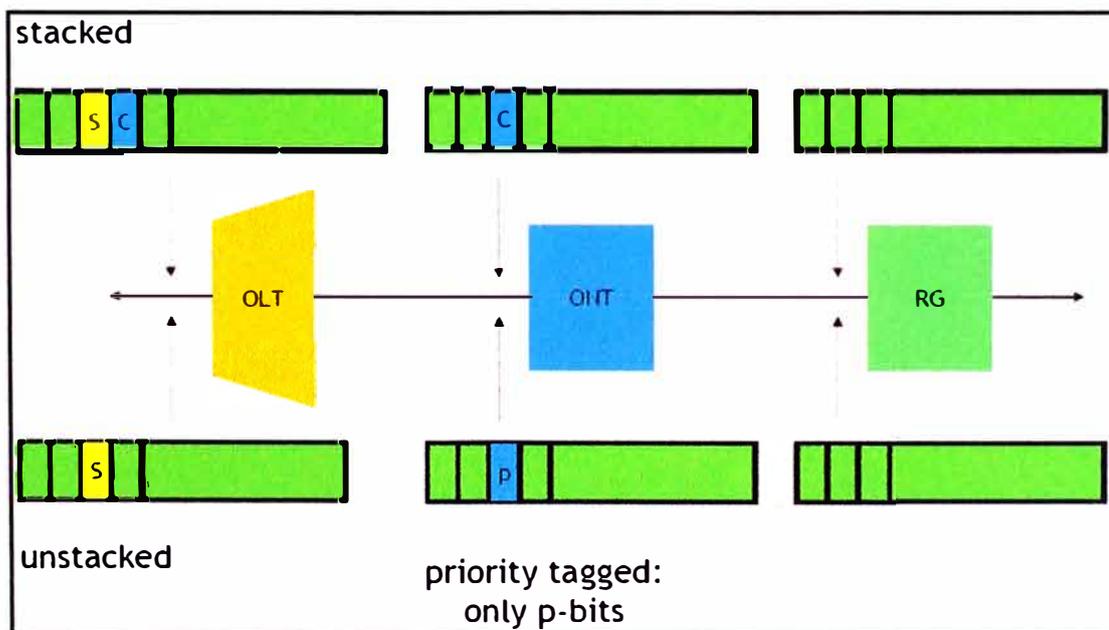


Figura 3.16 Modos de etiquetado apilado y no apilado

Fuente: [14]

Se denomina modo apilado cuando las tramas entre el ONT y la red de agregación o

núcleo se etiquetan con una C-VLAN. El modo no apilado se da cuando no existe esta C-VLAN. En caso se priorice el tráfico entre el OLT y el ONT en modo no apilado, se utiliza una VID igual a cero con los bits p respectivos. Para ambos modos de etiquetado, las tramas entre el OLT y la red de agregación o núcleo se encuentran etiquetadas con la S-VLAN (VLAN de suscriptor).

En el modo de etiquetado passthrough se utiliza una misma VID en todo el trayecto desde la red de agregación o núcleo hasta el RG. En la dirección ascendente la VLAN-ID que envía el RG es copiada en la C-VLAN en el ONT y luego en la S-VLAN en el OLT. Para la dirección descendente el proceso se da manera inversa. El funcionamiento del modo passthrough se muestra en la figura 3.17.

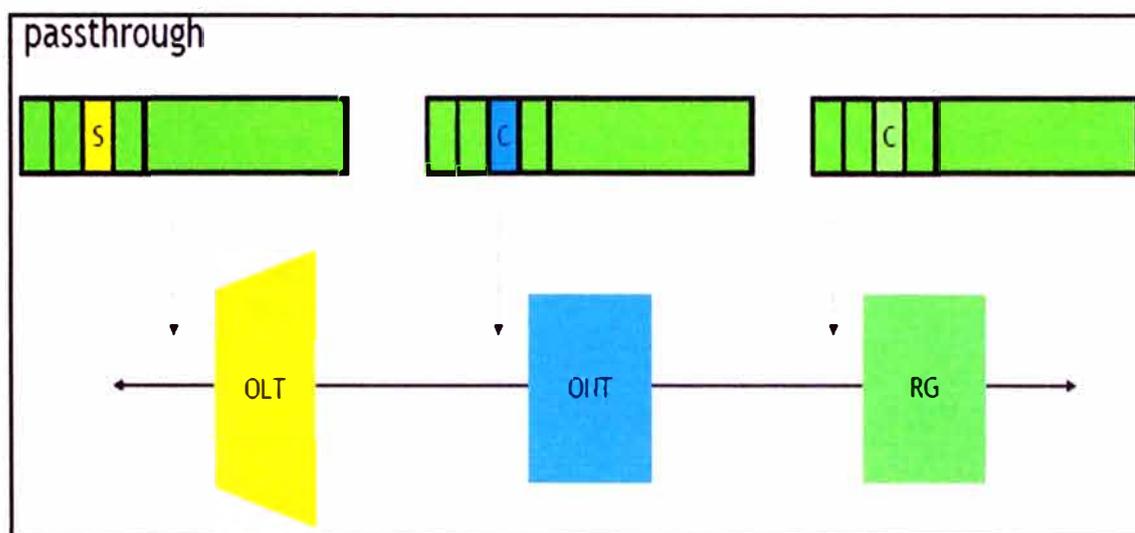


Figura 3.17 Modo de etiquetado passthrough

Fuente: [14]

El modo passthrough no se utiliza en el diseño debido a que el etiquetado lo realiza el RG, el cual se considera un equipo ajeno del operador. Este modo se puede utilizar en aplicaciones propias del operador en las que se controla al RG.

b.3) Modos de marcado y etiquetado en el diseño de capa 2

Se tienen seis casos (sin considerar el modo passthrough) que se pueden utilizar en el diseño. Dos para el tráfico en la dirección descendente y cuatro en la dirección ascendente.

b.3.1) Modos de marcado y etiquetado en la dirección descendente

En la dirección descendente no se utiliza el modo de marcado debido a que siempre es confiable. Por tal motivo, solo se analiza los modos de etiquetado.

Caso 1: Modo no apilado en la dirección descendente

Como se muestra en la figura 3.18, cuando una trama llega con la S-VLAN al OLT, se quita la etiqueta y se envía la trama al ONT con una VID igual a cero y los bits p respectivos. El ONT reenvía la trama al RG en caso el puerto se encuentre con encapsulación dot1q. Si el puerto del ONT está con encapsulación nula, la trama se envía sin etiquetar y la prioridad se especifica en el campo DSCP del encabezado IP. El OLT descarta las tramas que se reciben con las etiquetas S y C-VLANs.

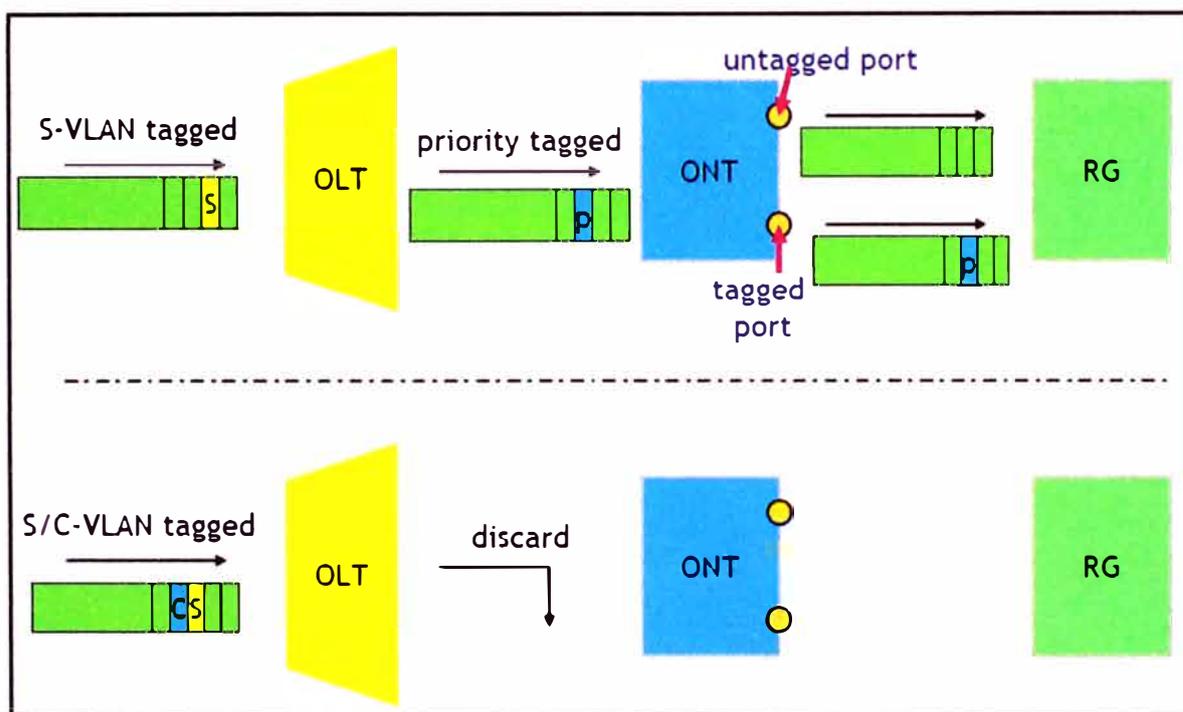


Figura 3.18 Modo no apilado en la dirección descendente

Fuente: [14]

Caso 2: Modo apilado en la dirección descendente

Como se observa en la figura 3.19, cuando una trama llega con las S y C-VLANs al OLT, se quita la S-VLAN y se envía la trama al ONT con la C-VLAN. El ONT reenvía la trama al RG en caso el puerto del ONT se encuentre con encapsulación dot1q. Si el puerto del ONT está con encapsulación nula, la trama se envía sin etiquetar y la prioridad se especifica en el campo DSCP del encabezado IP. En caso la trama llegue al OLT solo con la S-VLAN, la prioridad se especifica en el campo DSCP del encabezado IP y el tráfico se envía al RG sin etiquetar.

El modo apilado, con el uso de las S y C-VLANs, se utiliza en el diseño para el tráfico descendente. Con ello, en la red de acceso se procesa las tramas de acuerdo a la C-VLAN y se deja la S-VLAN para el proceso en la red de agregación y núcleo. De esta

manera, se jerarquiza el procesamiento de la información y se tiene mayor flexibilidad para etiquetar las tramas.

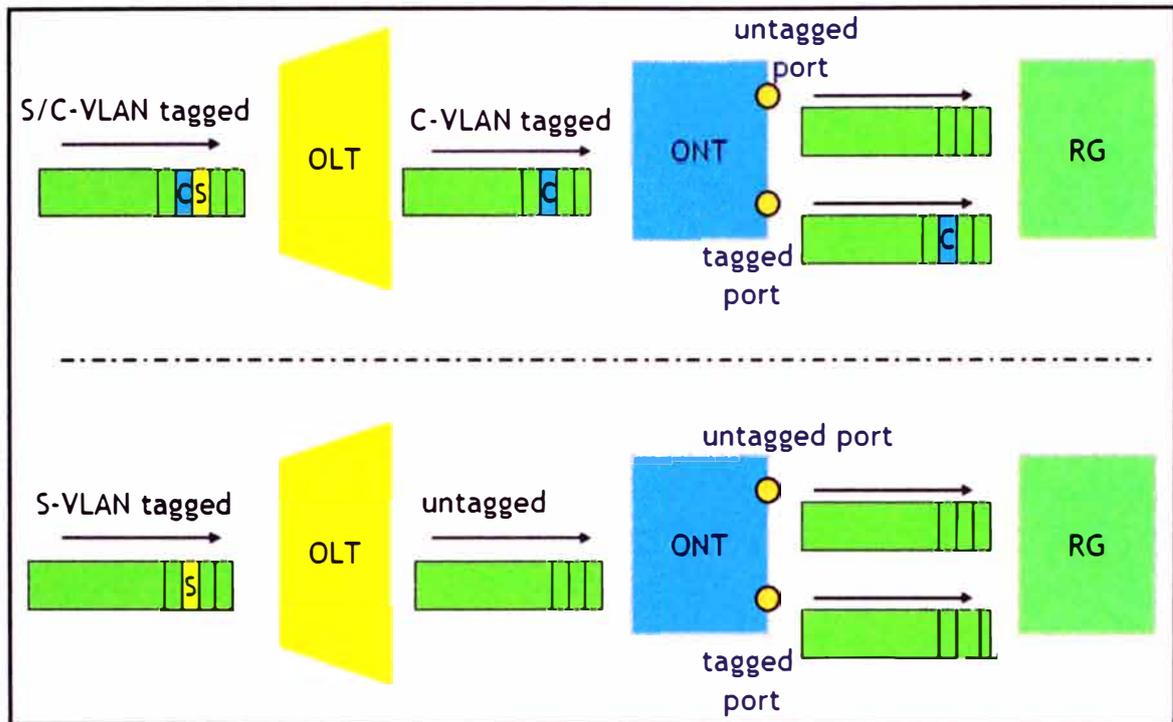


Figura 3.19 Modo apilado en la dirección descendente

Fuente: [14]

b.3.2) Modos de marcado y etiquetado en la dirección ascendente

En la dirección ascendente se utiliza tanto el modo de marcado como el modo de etiquetado. Por tal motivo, se tienen cuatro casos para analizar.

Caso 1: Modos no confiable y no apilado en la dirección ascendente

Como se muestra en la figura 3.20, las tramas pueden llegar al ONT de tres maneras distintas:

- Sin etiquetar.
- Con VID igual a cero y con bits p.
- Con una VID diferente a cero y con bits p.

Para todos los casos, el ONT envía las tramas al OLT con una VID igual a cero y los bits p predeterminados. El OLT únicamente cambia la VID por la S-VLAN y envía las tramas a la red de agregación.

El modo no confiable evita que los usuarios, que son propietarios del RG, puedan tomar ventajas en su transmisión al incluir prioridades que no les corresponde. El ONT quita estas prioridades a las tramas y envía el tráfico como "best effort".

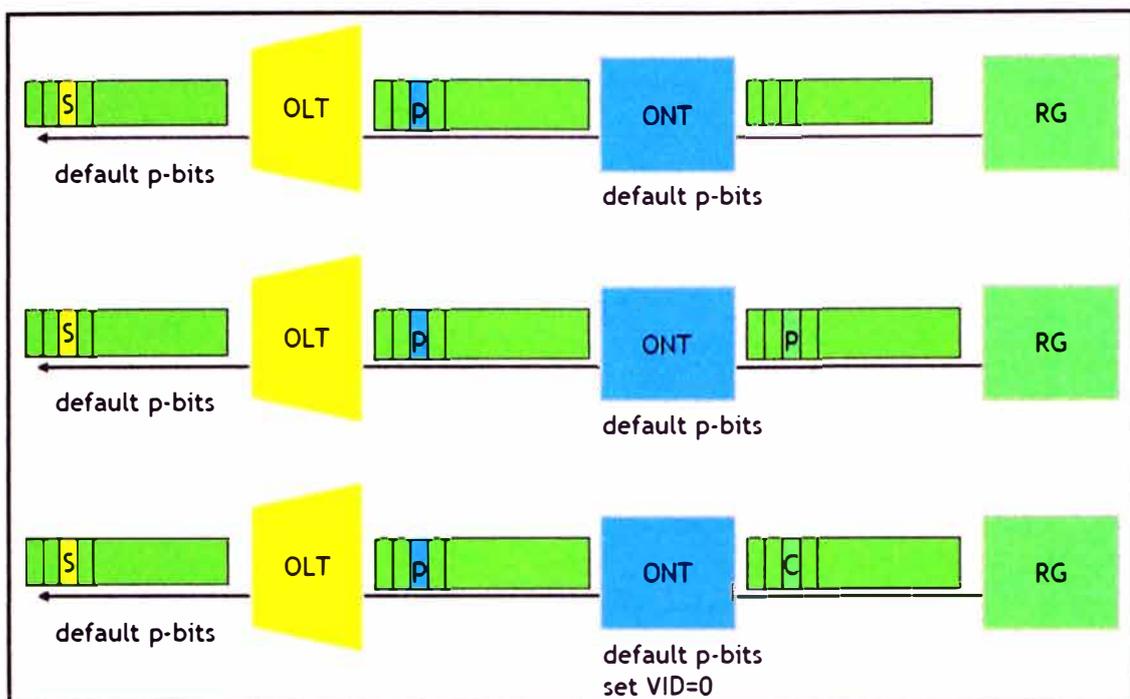


Figura 3.20 Modos no confiable y no apilado en la dirección ascendente

Fuente: [14]

Caso 2: Modos no confiable y apilado en la dirección ascendente

Como se observa en la figura 3.21, las tramas pueden llegar al ONT sin etiquetar, con VID igual a cero y con bits p ó con una VID diferente a cero y con bits p. Para todos los casos el ONT envía la trama al OLT con la C-VLAN y con los bits p predeterminados. El OLT agrega a las tramas la S-VLAN y las envía a la red de agregación.

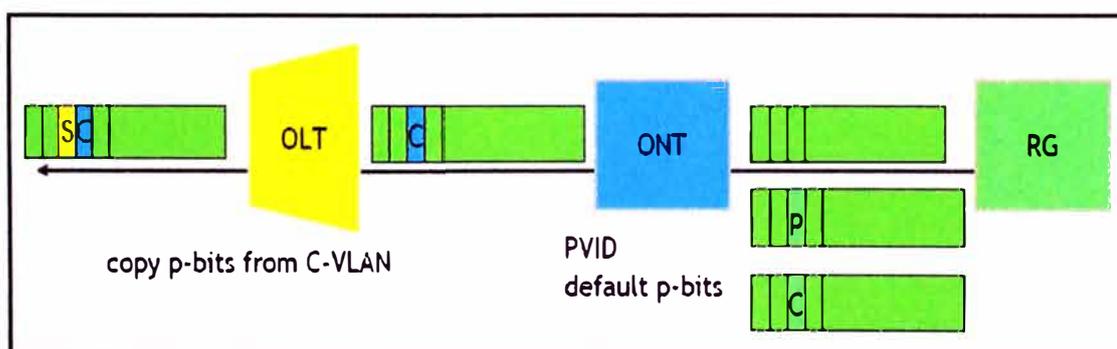


Figura 3.21 Modos no confiable y apilado en la dirección ascendente

Fuente: [14]

Caso 3: Modos confiable y no apilado en la dirección ascendente

Como se muestra en la figura 3.22, las tramas pueden llegar al ONT sin etiquetar, con VID igual a cero y con bits p ó con una VID diferente a cero y con bits p. Para todos los casos el ONT envía la trama al OLT con una VID igual a cero y con los bits p de prioridad.

Si la trama llega al ONT sin etiquetar, los bits p se especifican de acuerdo al campo DSCP del encabezado IP. El OLT cambia el VID cero por la S-VLAN y envía la trama a la red de agregación.

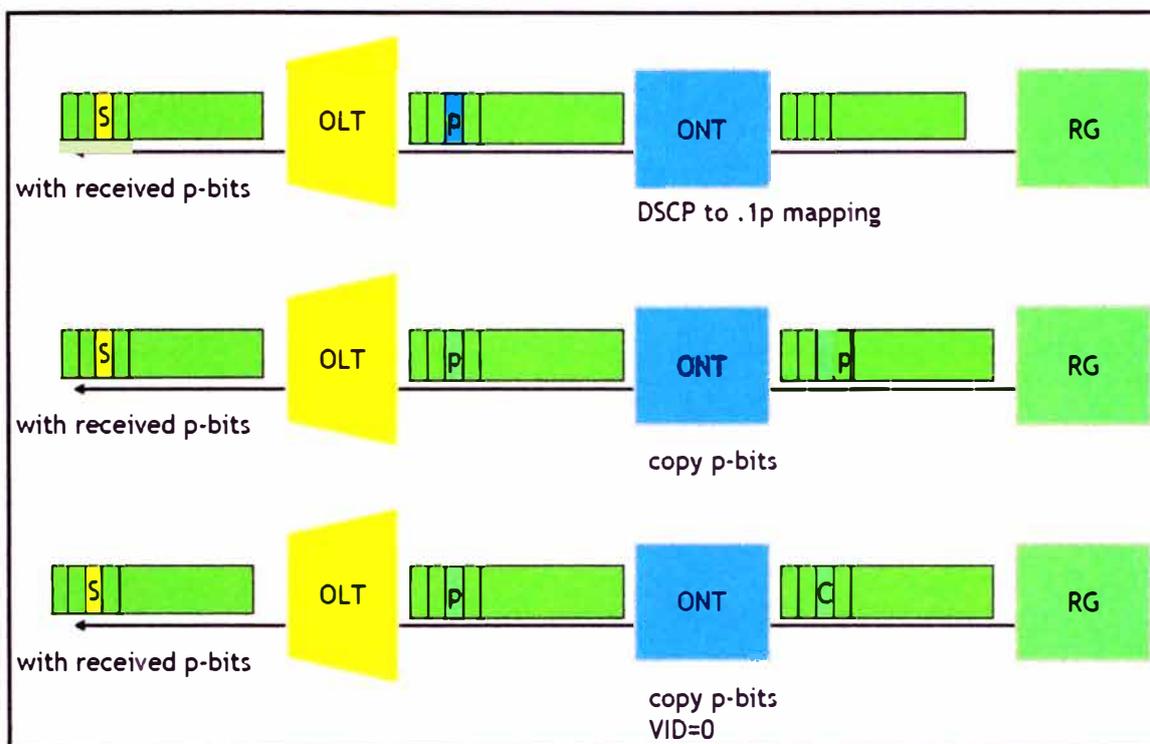


Figura 3.22 Modos confiable y no apilado en la dirección ascendente

Fuente: [14]

Caso 4: Modos confiable y apilado en la dirección ascendente

Como se observa en la figura 3.23, las tramas pueden llegar al ONT de tres maneras distintas:

- Sin etiquetar.
- Con VID igual a cero y con bits p.
- Con una VID diferente a cero y con bits p.

Para todos los casos el ONT envía la trama al OLT con la C-VLAN y con los bits p de prioridad. Si la trama llega al ONT sin etiquetar, los bits p se especifican de acuerdo al campo DSCP del encabezado IP. El OLT envía las tramas a la red de agregación con las S y C-VLANs y los bits p de prioridad en ambas etiquetas.

El modo confiable y apilado se utiliza en el diseño para el tráfico ascendente. Con ello, en la red de acceso se procesa las tramas de acuerdo a la C-VLAN y se deja la S-VLAN para el proceso en la red de agregación y núcleo. De esta manera, se jerarquiza el procesamiento de la información y se tiene mayor flexibilidad para etiquetar las tramas. Adicionalmente, se aplican las características de QoS con los bits p y los Port-IDs del

encabezado GPON.

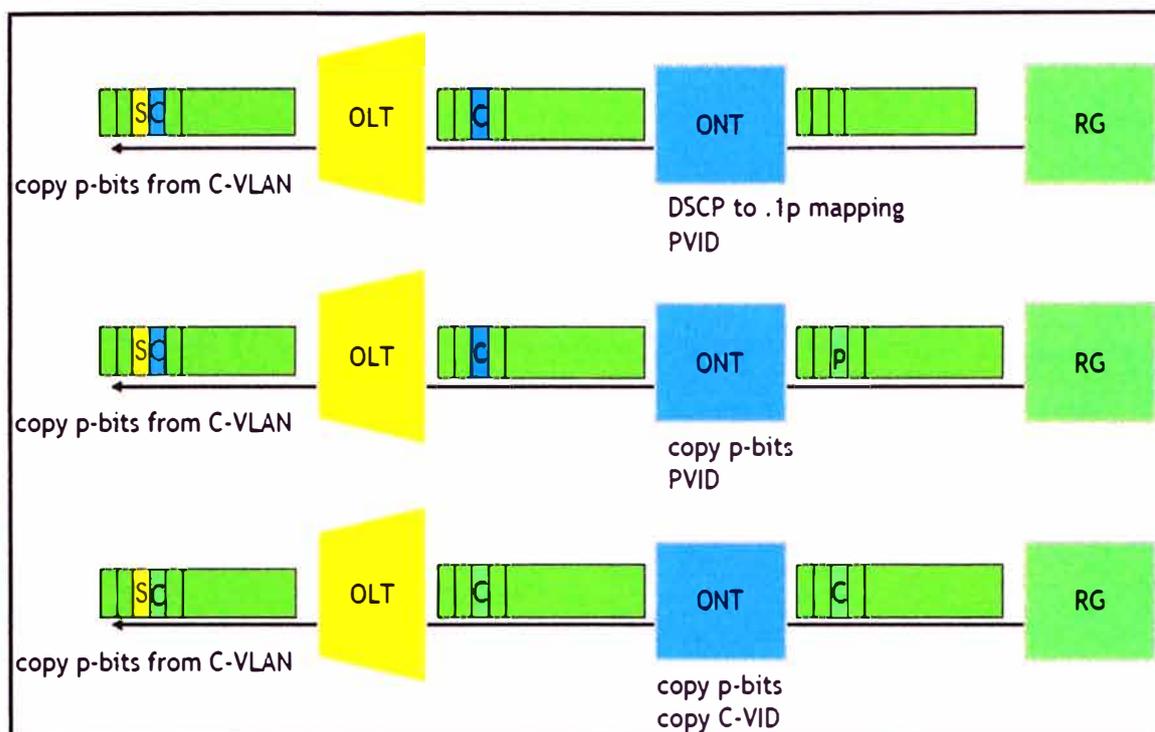


Figura 3.23 Modos confiable y apilado en la dirección ascendente

Fuente: [14]

3.3.2 Diseño de la infraestructura de capa 1

En esta sección se desarrolla la capa física del diseño. Se analiza la topología y los parámetros físicos importantes para un correcto funcionamiento de la red.

a) Topología física de la red óptica

Existen muchos tipos de topologías físicas, las cuales varían de acuerdo al segmento de red. Por ejemplo, para una red de núcleo, la topología que generalmente se utiliza es la de tipo anillo basada en fibra óptica. Esta estructura presenta una gran capacidad y cumple con los requerimientos de una red concentradora. Para el caso de una red de distribución óptica (ODN), las topologías que se utilizan son las siguientes:

- **Punto a punto:** Presenta una gran capacidad pero el costo de la planta externa es muy alto debido a que se utilizan una par de fibras por cada punto a punto.
- **Estrella activa:** Presenta una gran capacidad pero los costos de operación y mantenimiento son elevados. Los equipos electrónicos de la planta externa también tienen un costo alto.
- **Estrella pasiva:** Presenta una gran capacidad, se encuentra normalizada y la planta externa es flexible, pasiva y de bajo costo. Los gastos en la operación son bajos y se

soporta todos los servicios en una sola fibra óptica.

La figura 3.24 resume las diferentes topologías de distribución óptica.

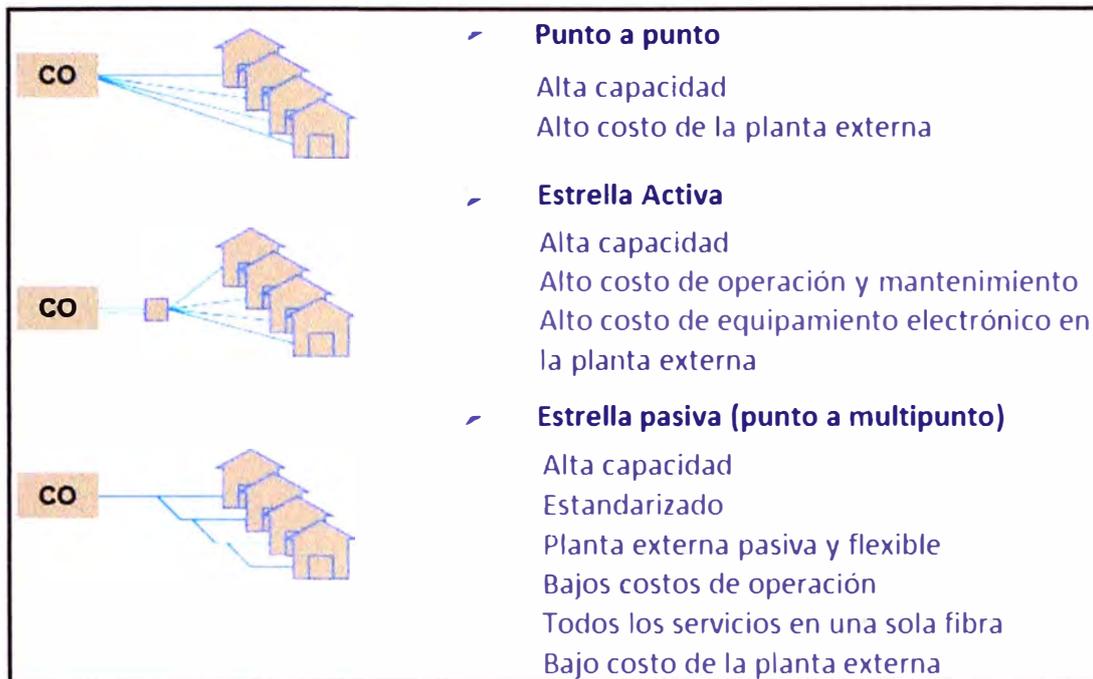


Figura 3.24 Topologías de distribución óptica

El diseño utiliza la topología en estrella pasiva o punto a multipunto. Esta estructura presenta mayores beneficios y es con la que la tecnología GPON se encuentra normalizada.

b) Arquitecturas de la ODN

Como se muestra en la figura 3.25, la ODN presenta tres secciones: alimentadora, distribuidora y descargadora.

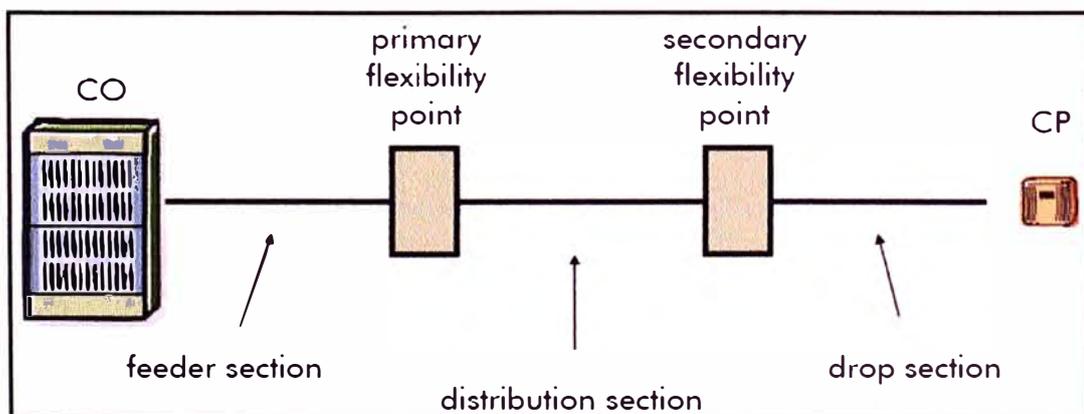


Figura 3.25 Secciones de fibra de la PON

Fuente: [3]

El OLT se encuentra en la CO, el ONT en la CP y los divisores de potencia óptica o *splitters* en los puntos de flexibilidad primario y secundario. En base a estos últimos, se tienen dos arquitecturas para la ODN: con *splitters* centralizados y con *splitters* distribuidos.

b.1) Arquitectura de la ODN con *splitters* centralizados

La figura 3.26 muestra la arquitectura con *splitters* centralizados.

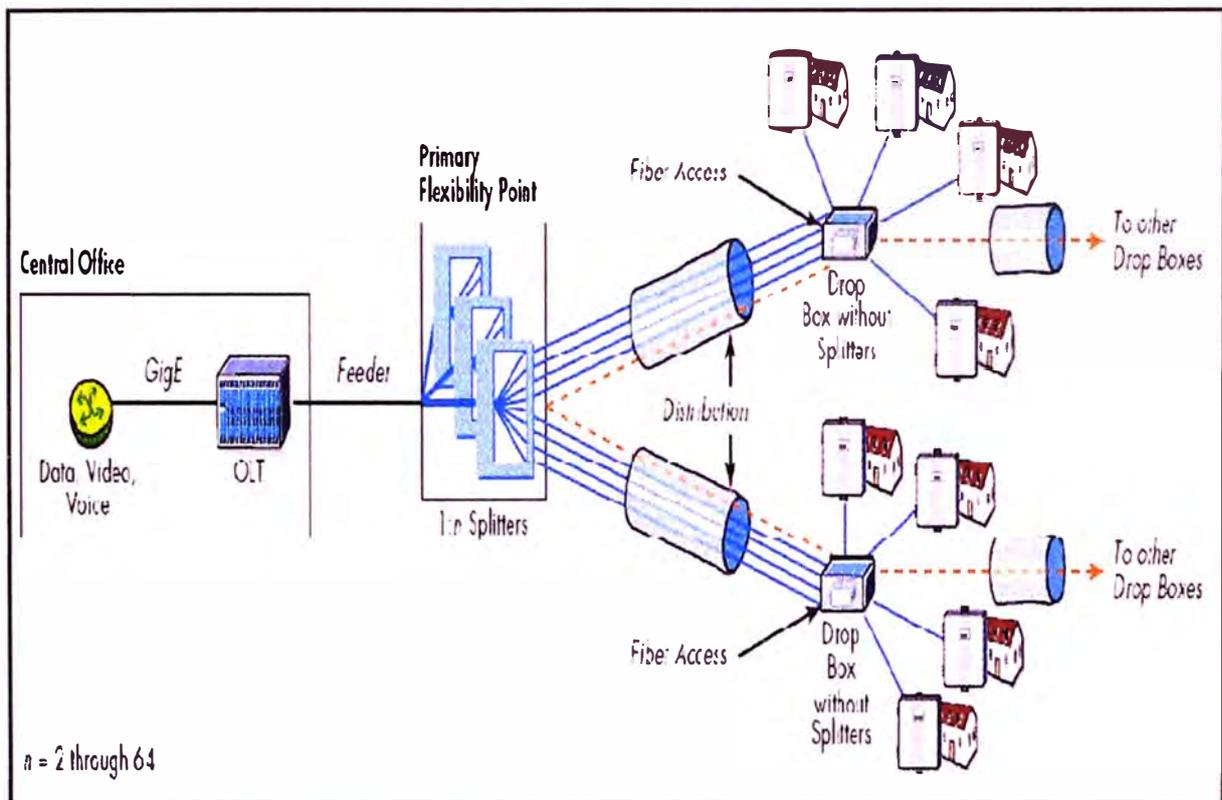


Figura 3.26 Arquitectura de la ODN con *splitters* centralizados

Fuente: [3]

En este escenario todos los *splitters* se encuentran en el punto de flexibilidad primario y conectan la planta alimentadora con la planta distribuidora. La caja de descarga separa una fibra del cable de distribución para cada abonado. Las fibras que continúan el trayecto sólo pasan (sin cortarlas) a través de la caja y salen por otro cable de fibra óptica hasta otra caja descargadora.

En el diseño se utiliza esta arquitectura en lugares donde haya edificaciones o condominios que concentren una gran cantidad de clientes en un espacio relativamente pequeño. Asimismo, se trata de usar *splitters* de alta relación para brindar servicio a más abonados. En la zona objetivo para la red piloto, no es necesario tener una arquitectura centralizada debido a que no hay condominios ni edificios.

b.2) Arquitectura de la ODN con *splitters* distribuidos

La figura 3.27 muestra la arquitectura con *splitters* distribuidos.

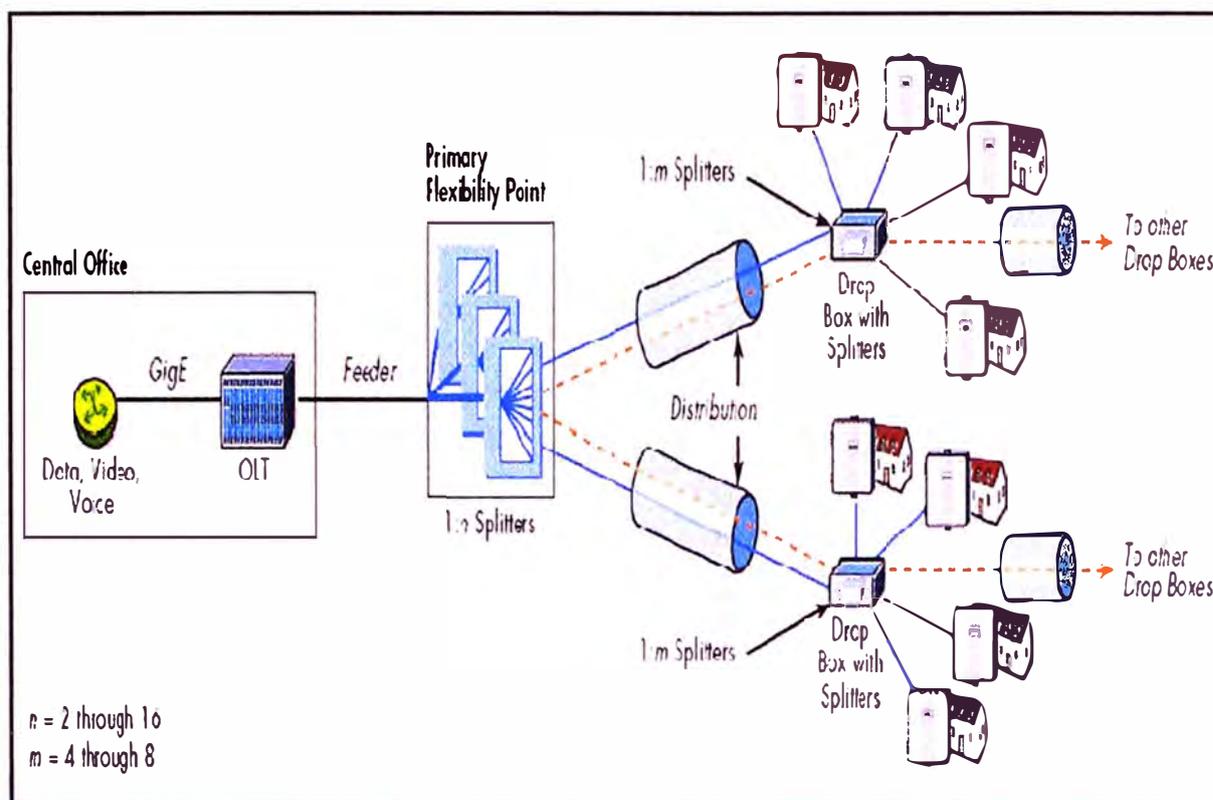


Figura 3.27 Arquitectura de la ODN con *splitters* distribuidos

Fuente: [3]

En este escenario se tienen varios puntos de flexibilidad que se conectan en cascada. Los *splitters* del punto de flexibilidad primario se conectan a otros *splitters* que se encuentran en las cajas de descarga o puntos de flexibilidad secundarios. De esta manera, una fibra óptica puede brindar servicios a varios abonados minimizando los costos en el uso de cables distribuidores. Por ejemplo, si la fibra alimentadora llega a un *splitter* de 1:4 en el punto de flexibilidad primario y la fibra distribuidora llega a un *splitter* de 1:8 en la caja de descarga, entonces un grupo de 8 clientes necesita una sola fibra en la distribución. Sin embargo, si solo 1 de los 8 abonados se conecta a la red, el *splitter* de 1:8 no se estaría utilizando de manera óptima y se tendrían recursos para 7 clientes innecesariamente. En este caso, este escenario puede tener un alto costo de operación y un pobre uso de los puertos del OLT.

En ciertas situaciones de implementación, en donde se requieren altas potencias iniciales debido a la larga distancia del bucle local, el modelo distribuido puede ofrecer ciertas ventajas para reducir el efecto de la dispersión de Brillouin estimulada (SBS) que se da por una estimulación de luz intensa. Para ello, los *splitters* en el punto de

flexibilidad primario se colocan en la oficina central y pueden inmediatamente reducir el alto nivel de potencia.

En el diseño, incluyendo la red piloto, se utiliza la arquitectura de *splitters* distribuidos en las situaciones en las que la arquitectura de *splitters* centralizados no presenta ninguna ventaja. De esta manera, se tiene mayor flexibilidad para abarcar áreas extensas. También, la combinación de los *splitters* primarios y secundarios debe dar conectividad a la mayor cantidad posible de clientes para utilizar los recursos del OLT al máximo.

c) Redundancia en la alimentación de la PON

La norma ITU-T G.984.1 especifica tres tipos de redundancias entre el OLT y el ONT, los cuales son los siguientes:

- **Tipo A:** Redundancia con fibra de repuesto sin LTs u ONTs adicionales.
- **Tipo B:** Redundancia hasta el primer *splitter*, adicionando LTs y fibras alimentadoras redundantes.
- **Tipo C:** Redundancia en la ruta completa, adicionando LTs, fibras, *splitters* y ONTs.

En el diseño se utiliza una redundancia tipo B parcial (tipo B-) en el que se implementa una fibra óptica alimentadora redundante (1+1) desde el OLT hasta el *splitter* óptico primario. Las rutas que tomen las fibras redundantes deben ser geográficamente separadas para evitar cortes de fibra simultáneos. No existen LTs redundantes, por lo que no existe protección de hardware y software de esa tarjeta. La figura 3.28 muestra la protección tipo B-.

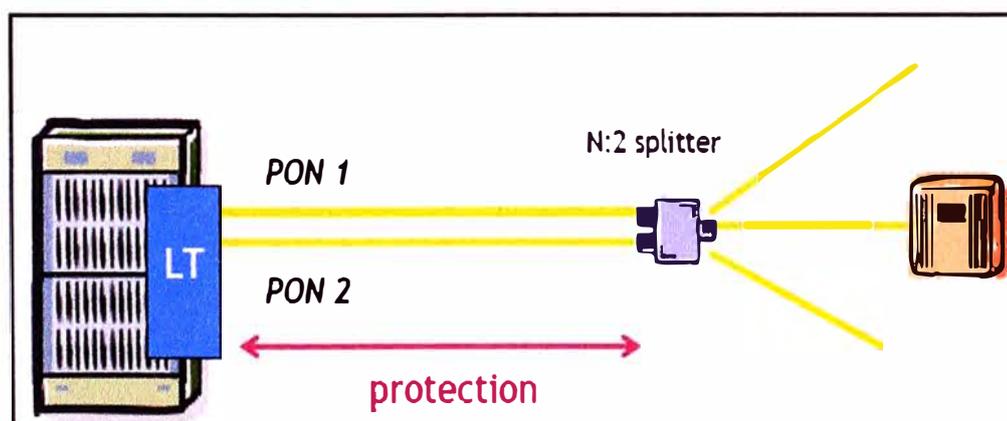


Figura 3.28 Redundancia en la alimentación de la PON

Fuente: [3]

Este escenario reduce la capacidad del LT en un 50%, por lo que en el diseño de la red piloto no se incluye la redundancia ya que se tienen únicamente clientes residenciales

comunes. Sólo se utiliza esta protección cuando se tienen clientes importantes o corporativos en los que un corte en la red implica pérdidas económicas críticas para el cliente.

d) Presupuesto de potencia óptica para el cálculo de las distancias máximas

La distancia que se puede admitir físicamente entre el OLT y el ONT depende de las pérdidas de potencias que restan los diferentes componentes en el trayecto como los *splitters*, el acoplador WDM, la atenuación de la fibra óptica por kilómetro (dependiendo de la longitud de onda), los conectores y los empalmes. Si se tiene superposición de video, se debe considerar también toda degradación debida al efecto Raman.

El análisis está basado principalmente de la norma ITU-T G.984.2, en el cual se especifica la capa dependiente de los medios físicos. En esta recomendación se indican los parámetros físicos que deben cumplir los componentes de la PON. Las enmiendas 1 y 2 de la misma norma adicionan apéndices que mejoran los parámetros para el escenario de 2.488 Gbps en el sentido descendente y 1.244 Gbps en el sentido ascendente. Este escenario es el que más se ha desarrollado a nivel mundial y el que se utiliza en el diseño.

En el apéndice 3 de la recomendación (enmienda 1) se mencionan las aplicaciones que actualmente tiene la industria con GPON a velocidades de 2.488/1.244 Gbps. Estas aplicaciones se muestran en la figura 3.29.

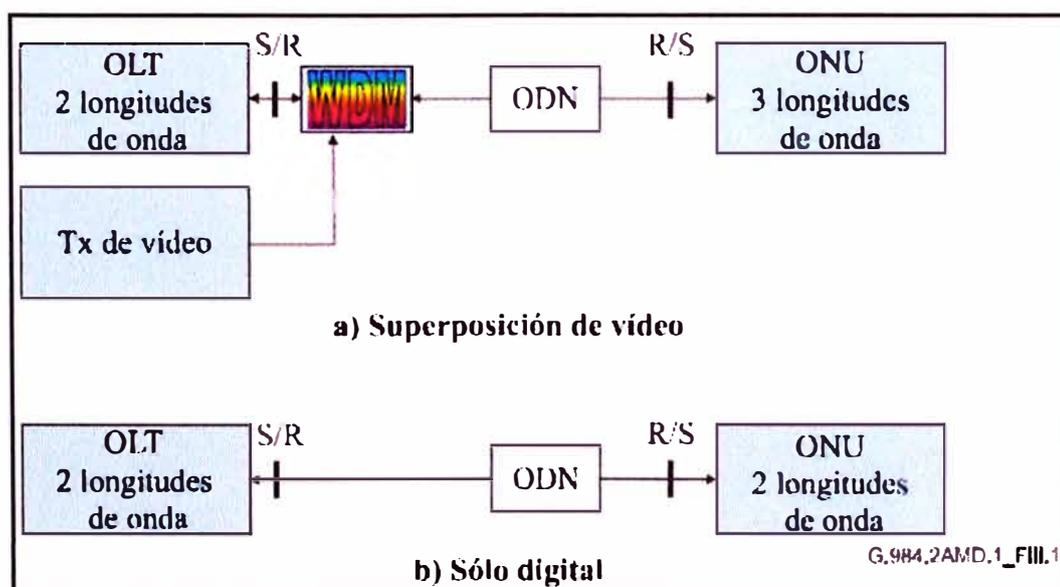


Figura 3.29 Aplicaciones actuales de GPON

Fuente: Apéndice III de [16]

La aplicación con superposición de video se realiza en el diseño de la red. La

aplicación solo digital es la proyección a futuro (con IPTV), la cual debe soportar el diseño según los requerimientos iniciales. En el apéndice de la norma, las especificaciones ópticas que se establecen son para las dos aplicaciones, lo cual asegura el funcionamiento correcto del diseño actual y de las proyecciones futuras.

El apéndice 3 nos da las especificaciones ópticas para tener un presupuesto de potencia para una ODN clase B+, la cual para las longitudes de onda de 1490 y 1310 nm soporta una atenuación mínima de 13 dB y una máxima de 28 dB. Con este rango de atenuación, el alcance puede llegar a los 20 Km y se pueden utilizar *splitters* máximos de 1:64.

El apéndice 5 de la recomendación (enmienda 2), indica especificaciones ópticas para tener un presupuesto de potencia para una ODN clase C+, la cual para las longitudes de onda de 1490 y 1310 nm soporta una atenuación mínima de 17 dB y una máxima de 32 dB. Con ello, el alcance puede llegar a los 60 Km y se pueden utilizar *splitters* máximos de 1:128.

Sin embargo, cuando se tiene superposición de video, las atenuaciones que se soportan son menores. El rango varía si se transmite video analógico o digital, soportando para este último una atenuación mayor. Por ello, para el diseño no se utiliza una ODN clase C+, ya que la distancia del OLT al ONT depende de la atenuación de la señal analógica. Por tal motivo, se utiliza una ODN clase B+ e igualmente se realizan los cálculos de distancia sin superposición de video y con una ODN clase C+ para ver las ventajas de la red a futuro.

d.1) Niveles de potencia óptica en el OLT y la ONU con una ODN clase B+

En el escenario de 2.488/1.244 Gbps, la ITU-T especifica los niveles de potencia óptica para el OLT y la ONU con una ODN clase B+. Estos niveles se muestran en la tabla 3.9.

Las penalidades consideran la degradación total debido a las reflexiones, la interferencia entre símbolos, el ruido de partición de modo y la fluctuación de fase. La suma de estas pérdidas no debe superar los valores que se muestran en la tabla 3.9. Las atenuaciones mínimas y máximas en las ODNs clase B+ y C+ toman en cuenta estas penalidades, por lo que no se consideran en el presupuesto de potencia óptica para el cálculo de las distancia máximas.

El efecto Raman en la longitud de onda que puede producirse en sentido descendente no se incluye en la penalidad. Por tal motivo, la degradación por este efecto de la señal de superposición de video debería considerarse, sin embargo, se queda compensada por la menor atenuación en la fibra a 1490 nm.

TABLA N° 3.9 Niveles de potencia para 2,488/1,244 Gbps con una ODN clase B+

Fuente: Apéndice III de [16]

Características	Unidad	Monofibra
OLT:		OLT
Mínima potencia media inyectada	dBm	+1.5
Máxima potencia media inyectada	dBm	+5
Penalidad óptica en sentido descendente	dB	0.5
Mínima sensibilidad	dBm	-28
Mínima sobrecarga	dbm	-8
ONU:		ONU
Mínima potencia media inyectada	dBm	+0.5
Máxima potencia media inyectada	dBm	+5
Penalidad óptica en sentido ascendente	dB	0.5
Mínima sensibilidad	dBm	-27
Mínima sobrecarga	dbm	-8

d.2) Niveles de potencia óptica en el OLT y la ONU con una ODN clase C+

Para el escenario de 2.488/1.244 Gbps, la ITU-T especifica los niveles de potencia óptica para el OLT y la ONU con una ODN clase C+. Estos niveles se muestran en la tabla 3.10.

Todas las consideraciones para la clase B+ se aplican también para este caso. La característica adicional más importante es el FEC en la capa TC para la operación, lo que permite tener una mayor tasa de error en la recepción y una mejor sensibilidad. También, el rango de longitudes de onda en el sentido ascendente disminuye al rango de 1290 a 1330 nm, lo cual se detalla en la recomendación ITU-T G.984.5.

Si se comparan los valores de la tabla 3.10 con los de la tabla 3.9, se observa que en el OLT las potencias medias inyectadas aumentan sus valores con la ODN clase C+. Igualmente, con la misma ODN, las mínimas sensibilidades y sobrecargas disminuyen tanto en el OLT como en la ONU. Esto produce mayores valores de atenuación permisibles con la ODN clase C+, lo que a su vez, permite tener un mayor alcance en comparación con la ODN clase B+.

TABLA N° 3.10 Niveles de potencia para 2,488/1,244 Gbps con una ODN clase C+

Fuente: Apéndice V de [16]

Características	Unidad	Monofibra
OLT con alcance extendido:		OLT
Mínima potencia media inyectada	dBm	+3
Máxima potencia media inyectada	dBm	+7
Penalidad óptica en sentido descendente	dB	1
Tasa de error (Pre-FEC) [Nota 1]		10^{-4}
Mínima sensibilidad [Nota 1]	dBm	-32
Mínima sobrecarga	dbm	-12
Rango de longitudes de onda ascendente (G.984.5)	nm	1290-1330
ONU:		ONU
Mínima potencia media inyectada	dBm	+0.5
Máxima potencia media inyectada	dBm	+5
Penalidad óptica en sentido ascendente	dB	0.5
Rango de longitudes de onda ascendente (G.984.5)	nm	1290-1330
Tasa de error (Pre-FEC) [Nota 2]		10^{-4}
Mínima sensibilidad [Nota 2]	dBm	-30
Mínima sobrecarga [Nota 3]	dbm	-8
<p>Nota 1 - La sensibilidad en el OLT asume el uso opcional de capacidades FEC RS (255,239) en la capa TC, así como mejoras intrínsecas en la tecnología de los detectores, por ejemplo, preamplificadores SOA.</p> <p>Nota 2 - La sensibilidad en la ONU asume el uso opcional de capacidades FEC RS (255,239) en la capa TC con tecnología de detectores de la ONU para clase B+.</p> <p>Nota 3 - La sobrecarga para la ONU se considera -8 dBm igual que para la clase B+, aunque para esta aplicación -10 dBm es suficiente.</p>		

d.3) Niveles de potencia en el EDFA y la ONU para transmitir video analógico

La aplicación con superposición de video utiliza un EDFA que amplifica la potencia óptica en la longitud de onda de 1550 nm. La amplificación que normalmente se soporta es de +23 dBm.

Adicionalmente, existen parámetros importantes para mantener una alta calidad de la señal de video analógica. Entre estos se encuentra la relación portadora a ruido (CNR). La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de los Estados Unidos y la Sociedad de Ingenieros de Telecomunicaciones por Cable (SCTE) han establecido que el CNR

mínimo es de 43 dB. La mayoría de los operadores de CATV mantienen un valor mayor a 47 dB y aseguran una buena calidad de la señal de video.

La gráfica de la figura 3.30 muestra la relación entre el CNR y la potencia de recepción en el lado del ONT. En el diseño se considera una sensibilidad de -5 dBm para tener un CNR mayor a 48 dB y brindar un buen servicio. Con ello, se tiene una atenuación máxima de 28 dB que es igual a la máxima atenuación en una ODN clase B+. Para este escenario es inútil utilizar una ODN clase C+.

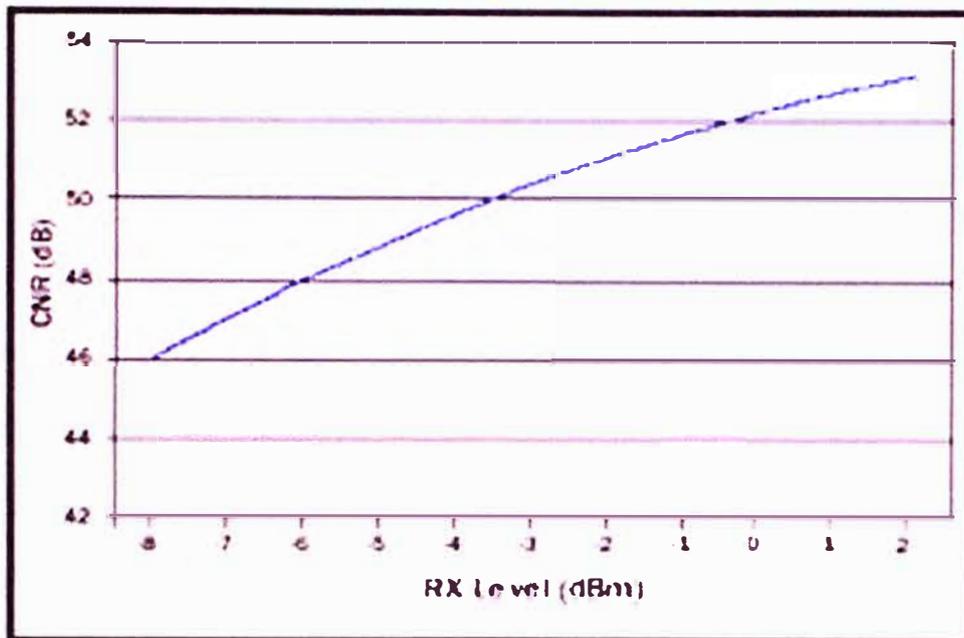


Figura 3.30 Sensibilidad en el ONT para la señal de video analógico

Fuente: Figura 2 de [17]

d.4) Selección de los transmisores y receptores ópticos

Las tablas 3.11 y 3.12 muestran los parámetros físicos para las fuentes de luz y los detectores ópticos según la norma ITU-T G.984.2.

Los SFPs en el OLT y ONT cumplen con los requisitos de ambas tablas pero las potencias de transmisión y la sensibilidad varían si se utiliza una ODN clase B+ ó C+. También, se pueden adicionar características para una mejor transmisión y detección de los haces de luz. Debido a que en el diseño se utiliza una ODN clase B+ con superposición de video, los tipos de fuentes y detectores en la red son los siguientes:

- **En el OLT:** Fuente SLM, DFB para clase B+
Detector APD para clase B+
- **En el ONT:** Fuente SLM, DFB para clase B+
Detector APD para clase B+
- **En el EDFA:** Fuente SLM, DFB con mecanismos de supresión de SBS.

TABLA N° 3.11 Parámetros de la interfaz óptica a 2,488 Gbps en sentido descendente
Fuente: Cuadro 2c de [16]

Elementos	Unidad	Fibra única
Transmisor OLT		
Velocidad binaria nominal	Mbps	2488,32
Longitud de onda de trabajo	nm	1480-1500
Código de línea	-	NRZ pseudoaleatorizado
Máxima reflectancia del equipo, medida a la longitud de onda del transmisor	dB	NA
Mínima ORL de ODN (Notas 1 y 2)	dB	mayor que 32
Potencia óptica inyectada sin entrada en el transmisor	dBm	NA
Relación de extinción (Nota 4)	dB	mayor que 8.2
Tolerancia a la potencia luminosa incidente en el transmisor	dB	mayor que -15
Si el láser es SLM - Máxima anchura entre puntos de -20 dB (Nota 3)	nm	1
Si el láser es SLM - Mínima relación de supresión en modo lateral	dB	30
Receptor ONU		
Máxima reflectancia del equipo, medida a la longitud de onda del receptor	dB	menor que -20
Inmunidad a dígitos idénticos consecutivos	bit	mayor que 72
Tolerancia a la fluctuación de fase	-	Figura 5 de la Rec. ITU-T G.984.2
Tolerancia a la potencia óptica reflejada	dB	menor que 10
<p>Nota 1 - El valor de "ORL mínima de la ODN" debe ser mayor a 20 dB en los casos opcionales descritos en el apéndice I/G.983.1.</p> <p>Nota 2 - Los valores de la reflectancia del transmisor ONU en el caso de que el valor de la "ORL mínima de la ODN" sea 20 se describen en el apéndice II/G.983.1.</p> <p>Nota 3 - En la Rec. ITU-T G.957 se hace referencia a la máxima anchura entre los puntos de -20 dB, y a la relación mínima de supresión en modo lateral.</p> <p>Nota 4 - La relación de extinción de 8.2 dB tuvo una relajación del valor de 10 dB. Este nuevo valor implica una mejora en los receptores ONU en 0.5 dB en la modulación de amplitud óptica.</p>		

TABLA N° 3.12 Parámetros de la interfaz óptica a 1,244 Gbps en sentido ascendente

Fuente: Cuadro 2f-1 de [16]

Elementos	Unidad	Fibra única
Transmisor ONU		
Velocidad binaria	Mbps	1244,16
Código de línea	-	NRZ pseudoaleatorizado
Máxima reflectancia del equipo, medida a la longitud de onda del transmisor	dB	menor que -6
Mínima ORL de la ODN (Notas 1 y 2)	dB	mayor que 32
Potencia óptica inyectada sin entrada al transmisor	dBm	menor que la sensibilidad mínima -10
Máxima activación de Tx (Nota 3)	bits	16
Máxima desactivación de Tx (Nota 3)	bits	16
Relación de extinción	dB	mayor que 10
Si el láser es SLM - Máxima anchura entre puntos de -20 dB (Nota 4)	nm	1
Si el láser es SLM - Mínima relación de supresión en modo lateral	db	30
Transferencia de fluctuación de fase	-	Figura 4 de la Rec. ITU-T G.984.2
Receptor OLT		
Máxima reflectancia de equipo, medida a la longitud de onda del receptor	dB	menor que -20
Inmunidad a dígitos idénticos consecutivos	bit	mayor que 72
Tolerancia a la fluctuación de fase	-	NA
Tolerancia a la potencia óptica reflejada	dB	menor que 10
<p>Nota 1 - El valor de la "ORL mínima de la ODN" debe ser mayor que 20 dB en los casos opcionales descritos en el apéndice I/G.983.1</p> <p>Nota 2 - Los valores de reflectancia del transmisor ONU en el caso de que el valor de "ORL mínima de la ODN" sea 20 dB se describen en el apéndice II/G.983.1</p> <p>Nota 3 - Los bits de activación se utilizan para la prepolarización del láser. En su contraparte, los bits de desactivación se envían inmediatamente luego del timeslot asignado.</p> <p>Nota 4 - En la Rec. ITU-T G.957 se hace referencia a los valores de la máxima anchura entre puntos de -20 dB y la mínima relación de supresión en modo lateral.</p>		

Las fuentes SLM envían un solo haz de luz, lo cual evita que se produzca dispersión modal. También, al ser un láser con realimentación distribuida (DFB) se disminuye notablemente la dispersión cromática. Los mecanismos de supresión de SBS son necesarios en el EDFA debido a la alta potencia de transmisión que se utiliza.

Si se considera una ODN clase C+, que es la proyección a futuro, los tipos de fuentes y detectores tendrían que cambiarse por los siguientes:

- **En el OLT :** Fuente SLM, DFB para clase C+
 Detector APD con FEC para clase C+ (puede utilizar preamplificador SOA)
- **En el ONT:** Fuente SLM, DFB para clase C+
 Detector PIN con FEC para clase C+

Para este caso, el FEC permite que el sistema pueda soportar tasas de errores mayores, por lo que el ONT puede utilizar detectores PIN. Debido a que la ODN clase C+ soporta una distancia mayor que la ODN clase B+, puede ser necesario tener preamplificadores SOA en el OLT.

d.5) Selección de la fibra óptica

El tipo de fibra óptica que se debe utilizar en GPON, según la ITU-T, es la monomodo de acuerdo a la norma G.652. En el diseño se usa la fibra tipo B de la recomendación, que es la que el operador tiene en su red troncal. Las especificaciones para esta fibra óptica monomodo se muestran en la tabla 3.13.

TABLA N° 3.13 Características de la fibra óptica monomodo G.652-B

Fuente: TABLA N° 2 de [18]

Características	Fibra de dispersión estándar G.652-B
Coeficiente de atenuación (dB/Km)	< 0.4 (1310 nm) < 0.35 (1550 nm)
Coeficiente de dispersión cromática (ps/(nm*Km))	< 3.5 (1288-1339 nm) < 5.3 (1270-1360 nm) < 20 (1550 nm)
Coeficiente de PMD (ps/Km ^{1/2})	< 0.2

d.6) Selección de los divisores de potencia o *splitters*

Existen dos tipos de *splitters* principales: FBT y PLC. Como se observa en la figura 3.31, los *splitters* PLC se fabrican con tecnología más moderna, por lo que son más

compactos, uniformes y presentan menor pérdida de inserción que los *splitters* FBT. Por ello, los *splitters* PLC son los que se utilizan en el diseño.

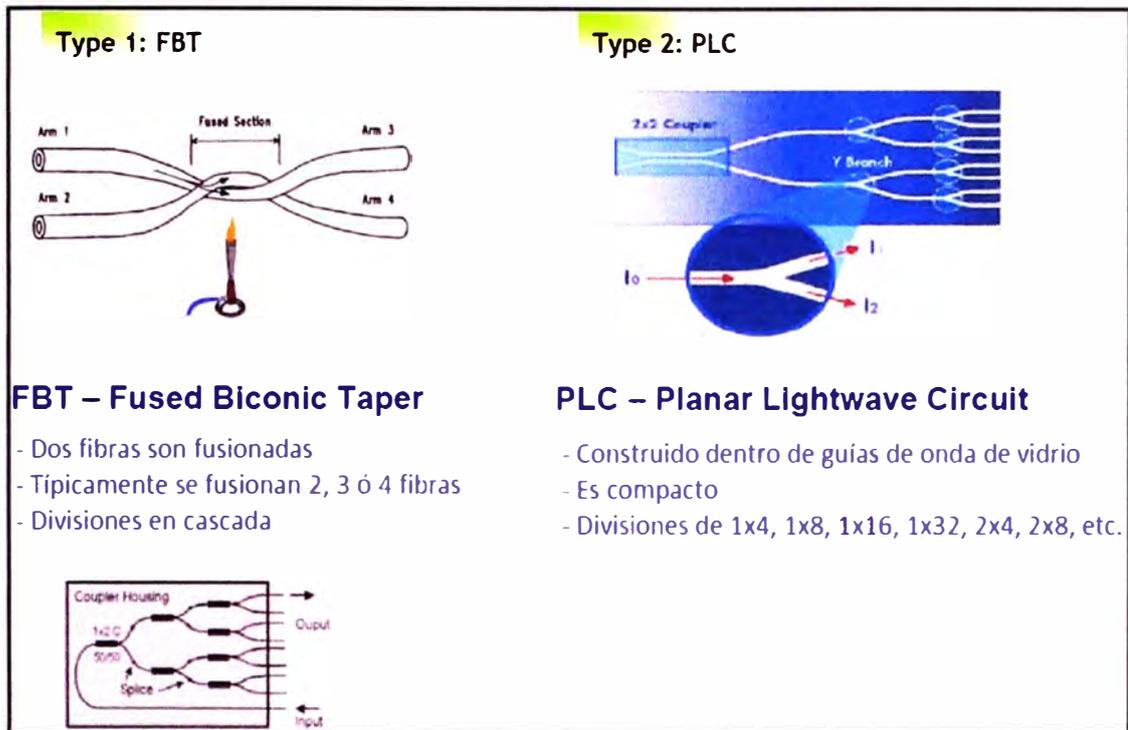


Figura 3.31 Tipos de *splitters*

Existen también dos formas para integrar los *splitters* en la red: por empalmes y por conectores. Este es un factor importante al momento de realizar los cálculos de pérdidas de potencia. La figura 3.32 compara estas formas de integración de los *splitters*.



Figura 3.32 Formas de integración de los *splitters*

El uso de conectores en vez de empalmes, facilita el mantenimiento y el monitoreo de la red una vez que se encuentre operativa. Esto debido a que hay más puntos de medición en la red. Sin embargo, los conectores presentan una mayor pérdida de inserción que los empalmes, por lo que no es adecuado en escenarios donde se tengan varios *splitters* en cascada. En el diseño se utiliza la conexión por empalmes para poder tener un mejor alcance en la red.

d.7) Selección del tipo de empalme

Existen dos tipos de empalmes principales: mecánicos y por fusión.

- **Empalme mecánico:** Es realizado de manera manual por personal especializado. Se utilizan herramientas simples para alinear y orientar las fibras ópticas. Es susceptible a errores y puede consumir mucho tiempo para su realización. Debido a su simplicidad, es menos costoso que un empalme por fusión.
- **Empalme por fusión:** Es realizado por empalmadoras especiales que utilizan arcos voltaicos para fusionar las fibras ópticas. La misma máquina alinea y orienta las fibras ópticas de manera más exacta que en los empalmes mecánicos, por lo que las pérdidas de inserción son menores. Se consume menos tiempo y es poco susceptible a errores. Debido a su complejidad, es más costoso que un empalme mecánico. La figura 3.33 muestra una máquina empalmadora típica.

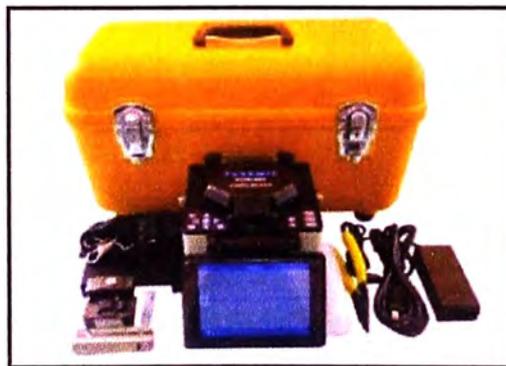


Figura 3.33 Máquina empalmadora

Fuente: [3]

En el diseño se utiliza empalmes por fusión debido a que el operador cuenta con máquinas empalmadoras y con personal calificado para la realización de estos empalmes.

d.8) Acoplador WDM para el escenario con superposición de video

En el diseño se utiliza un acoplador WDM para multiplexar la señal de video analógica

y la señal de datos que transmiten el EDFA y el OLT respectivamente. Con ello, en la dirección descendente, se transportan las señales en las longitudes de onda de 1490 nm (datos) y 1550 nm (video) en una sola fibra óptica. En la dirección ascendente, el acoplador envía únicamente la señal de datos a 1310 nm, por lo que no es necesaria una multiplexación.

La norma ITU-T G.984.5 especifica los parámetros físicos para este acoplador WDM, el cual es llamado WDM1r. La norma menciona también que el acoplador puede soportar las redes de acceso de siguiente generación (NGA), que se refiere al uso de la tecnología XG-PON. La tabla 3.14 muestra las especificaciones más importantes del acoplador WDM1r.

TABLA N° 3.14 Especificaciones para el acoplador WDM1r

Fuente: Enmienda 1 de [19]

Especificaciones	Valor
Pérdidas sin conectores - banda GPON	≤ 1.0 dB (1290-1330 y 1480-1500 nm)
Pérdidas sin conectores - banda de video RF	≤ 1.7 dB (1550-1560 nm)
Potencia máxima en el puerto de video RF	+23 dBm
Pérdida de retorno	> 50 dB

d.9) Cálculo de las distancias máximas

En esta sección se realiza el cálculo de las distancias máximas para el diseño y para la proyección de la red a futuro. Por ende, se necesita las pérdidas de inserción de los componentes ópticos pasivos. Estas pérdidas se muestran en la tabla 3.15.

TABLA N° 3.15 Pérdidas de inserción de los componentes ópticos pasivos en la ODN

Componentes ópticos/ODN	Pérdidas (dB)
<i>Splitter</i> 1x128	23.7
<i>Splitter</i> 1x64	20.1
<i>Splitter</i> 1x32	17.4
<i>Splitter</i> 1x16	13.8
<i>Splitter</i> 1x8	10.5
<i>Splitter</i> 1x4	7
<i>Splitter</i> 1x2	3.5
Empalmes por fusión	0.1
Conectores	0.3

Nota: Indiferentemente del tipo de conector, el valor de la pérdida de inserción que se muestra en la tabla 3.15 se aplica en todos los casos. Las pérdidas que produce el acoplador WDM1r se muestran en la tabla 3.14.

De acuerdo a las tablas 3.9 y 3.10, se tienen balances de atenuación distintos para las ODNs clases B+ y C+. Estos balances se muestran en las tablas 3.16 y 3.17.

TABLA N° 3.16 Balance de atenuación para una ODN clase B+
Fuente: Apéndice III de [16]

Características	Unidad	Monofibra
Mínima atenuación óptica a 1490 nm	dB	13
Mínima atenuación óptica a 1310 nm	dB	13
Máxima atenuación óptica a 1490 nm	dB	28
Máxima atenuación óptica a 1310 nm	dB	28

TABLA N° 3.17 Balance de atenuación para una ODN clase C+
Fuente: Apéndice V de [16]

Características	Unidad	Monofibra
Mínima atenuación óptica a 1490 nm	dB	17
Mínima atenuación óptica a 1310 nm	dB	17
Máxima atenuación óptica a 1490 nm	dB	32
Máxima atenuación óptica a 1310 nm	dB	32

Para la aplicación con superposición de video, el balance de atenuación es 28 dB debido a los +23 dBm de potencia máxima que transmite el EDFA y a los -5 dBm de sensibilidad mínima del ONT.

La ecuación 3.1 se aplica en el cálculo de las distancias máximas entre el OLT y el ONT. Esta relación se puede utilizar en todos los escenarios GPON con FTTP.

$$A_{\min} \leq A_C + A_E + A_{\text{WDM1r}} + A_{\text{splitters}} + \alpha \cdot d \leq A_{\max} \quad (3.1)$$

$$A_E = \#E \cdot 0.1 \quad (\text{Ver tabla 3.15})$$

$$A_C = \#C \cdot 0.3 \quad (\text{Ver tabla 3.15})$$

Donde:

A_{\min} : Atenuación mínima para la ODN en dB

A_{\max} : Atenuación máxima para la ODN en dB

- A_C : Atenuación de conectores en todo el enlace en dB
- A_E : Atenuación de empalmes en todo el enlace en dB
- A_{WDM1r} : Atenuación de inserción del acoplador WDM en dB
- $A_{splitters}$: Atenuación de inserción de los *splitters* en dB
- α : Coeficiente de atenuación de la fibra óptica en dB/Km
- d : Distancia del enlace óptico en Km
- #E: Número de empalmes en todo el enlace
- #C: Número de conectores en todo el enlace

El diseño considera tanto el escenario con *splitters* centralizados como el escenario con *splitters* distribuidos. Este último se utiliza en la red piloto con dos *splitters* en cascada para no aumentar el costo de la planta externa. En las siguientes sub-secciones se realizan los cálculos para los escenarios con superposición de video y sin superposición de video. De esta manera, se verifica el alcance de la red a futuro con IPTV.

d.9.1) Cálculo de las distancias máximas con superposición de video

Se analiza de manera separada el escenario con *splitters* centralizados y el escenario con *splitters* distribuidos. En cada caso se aplica dos veces la ecuación 3.1 para analizar las atenuaciones de la señal de datos y la señal de video. Los escenarios son con una ODN clase B+, la cual tiene un balance de atenuación de 28 dB de acuerdo a la tabla 3.16. La señal de video soporta la misma atenuación máxima, por lo que se realiza una comparativa entre la señal de datos con la de video para saber cuál restringe la distancia máxima. Estos casos no se analizan con una ODN clase C+, ya que con ella la señal de video analógica siempre limita la distancia entre el OLT y el ONT.

Escenario 1: *Splitters* centralizados con superposición de video

El escenario se muestra en la figura 3.34.

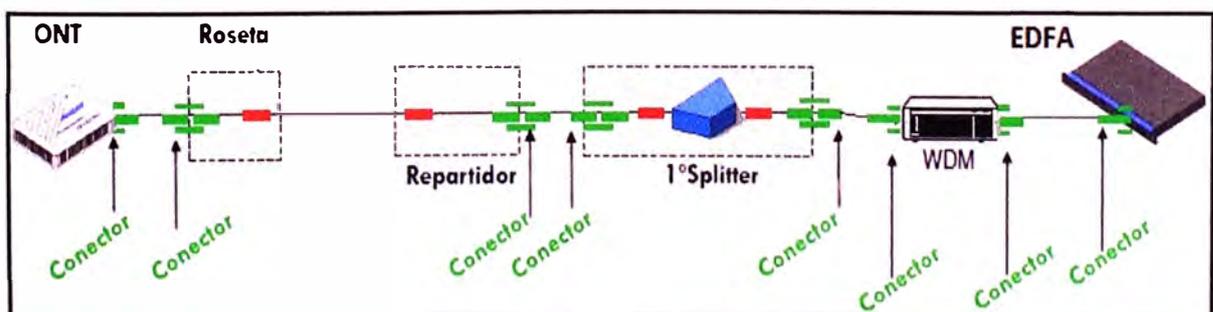


Figura 3.34 Escenario con *splitters* centralizados con superposición de video

Primero, se calculan las distancias máximas de acuerdo a la atenuación de la señal de video analógico:

- $A_{\min} = 0$ y $A_{\max} = 28$
- $A_{\text{WDM1r}} = 1.7$ (tabla 3.14) para la longitud de onda de 1550 nm.
- De la figura 3.34, #E = 4 (en rojo) y #C = 8 (en verde).
- $\alpha = 0.35$ dB/Km (tabla 3.13) para la longitud de onda de 1550 nm (tráfico descendente).
- No hay tráfico ascendente para la señal de video analógico.
- Se reemplazan los valores en la inecuación 3.1.

$$0 \leq 8*0.3 + 4*0.1 + 1.7 + A_{\text{splitter}} + 0.35*d \leq 28$$

$$A_{\text{splitter}} + 0.35*d \leq 23.5$$

Con un splitter de 1x64, $A_{\text{splitter}} = 20.1$ (tabla 3.15), entonces $d \leq 9.71$ Km

Con un splitter de 1x32, $A_{\text{splitter}} = 17.4$ (tabla 3.15), entonces $d \leq 17.43$ Km

Con un splitter de 1x16, $A_{\text{splitter}} = 13.8$ (tabla 3.15), entonces $d \leq 27.71$ Km

- *Splitters* de menor relación ofrecen distancias mayores pero se usa de manera ineficiente los recursos del OLT.

Segundo, se calculan las distancias máximas de acuerdo a la atenuación de la señal de datos:

- En la figura 3.34, en vez del EDFA, se considera al OLT.
- $A_{\min} = 13$ y $A_{\max} = 28$ (tabla 3.16) para una ODN clase B+.
- $A_{\text{WDM1r}} = 1$ (tabla 3.14) para las longitudes de onda de 1310 y 1490 nm.
- De la figura 3.34, #E = 4 (en rojo) y #C = 8 (en verde).
- $\alpha = 0.4$ dB/Km para la longitud de onda de 1310 nm (tráfico ascendente).
- $\alpha = 0.37$ dB/Km aprox. para la longitud de onda de 1490 nm (tráfico descendente).
- Se considera $\alpha = 0.4$ dB/Km (tabla 3.13) debido a que acota más el valor de la distancia máxima.
- Se reemplazan los valores en la inecuación 3.1.

$$13 \leq 8*0.3 + 4*0.1 + 1 + A_{\text{splitter}} + 0.4*d \leq 28$$

$$9.2 \leq A_{\text{splitter}} + 0.4*d \leq 24.2$$

Con un splitter de 1x64, $A_{\text{splitter}} = 20.1$ (tabla 3.15), entonces $d \leq 10.25$ Km

Con un splitter de 1x32, $A_{\text{splitter}} = 17.4$ (tabla 3.15), entonces $d \leq 17$ Km

Con un splitter de 1x16, $A_{\text{splitter}} = 13.8$ (tabla 3.15), entonces $d \leq 26$ Km

- *Splitters* de menor relación ofrecen distancias mayores pero se usa de manera

ineficiente los recursos del OLT.

- El efecto Raman no se considera debido a que los equipos actuales reducen este crosstalk.

Finalmente, comparando los resultados, las distancias máximas son las siguientes:

- **Con un *splitter* de 1x64, $d \leq 9.71$ Km**, por lo que restringe la atenuación de la señal de video.
- **Con un *splitter* de 1x32, $d \leq 17$ Km**, por lo que restringe la atenuación de la señal de datos.
- **Con un *splitter* de 1x16, $d \leq 26$ Km**, por lo que restringe la atenuación de la señal de datos.

Se obtiene que la mayor distancia con un *splitter* de 1x64 es de 9.71 Km. Este caso es el que mejor utiliza los recursos del OLT y el que se aplica en el diseño de la red en lugares donde hay edificios y condominios.

Escenario 2: *Splitters* distribuidos con superposición de video

El escenario se muestra en la figura 3.35.

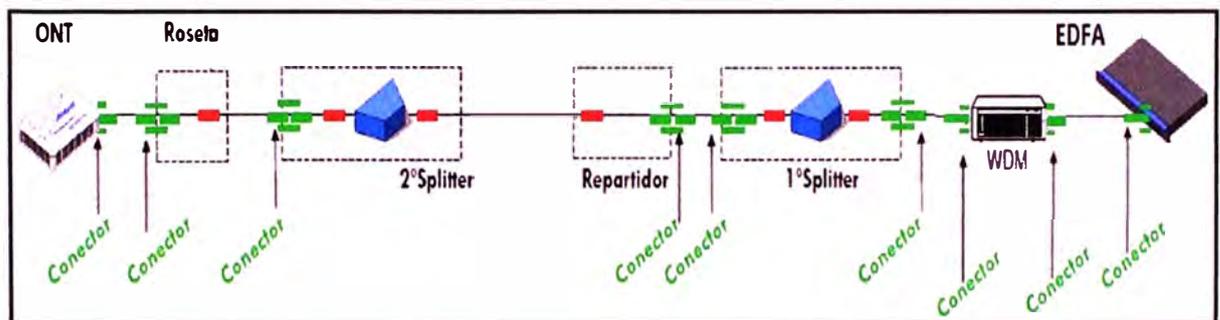


Figura 3.35 Escenario con *splitters* distribuidos con superposición de video

Primero, se calculan las distancias máximas de acuerdo a la atenuación de la señal de video analógico:

- $A_{\min} = 0$ y $A_{\max} = 28$
- $A_{\text{WDM1r}} = 1.7$ (tabla 3.14) para la longitud de onda de 1550 nm.
- De la figura 3.35, $\#E = 6$ (en rojo) y $\#C = 9$ (en verde).
- $\alpha = 0.35$ dB/Km (tabla 3.13) para la longitud de onda de 1550 nm (tráfico descendente).
- No hay tráfico ascendente para la señal de video analógico.
- Se reemplazan los valores en la inecuación 3.1.

$$0 \leq 9 \cdot 0.3 + 6 \cdot 0.1 + 1.7 + A_{\text{splitters}} + 0.35 \cdot d \leq 28$$

$$A_{splitters} + 0.35*d \leq 23$$

De acuerdo a la tabla 3.15:

Con **splitters** de **1x32 y 1x2**, $A_{splitters} = 17.4 + 3.5 = 20.9$, entonces **d ≤ 6 Km**

Con **splitters** de **1x16 y 1x4**, $A_{splitters} = 13.8 + 7 = 20.8$, entonces **d ≤ 6.29 Km**

Con **splitters** de **1x16 y 1x2**, $A_{splitters} = 13.8 + 3.5 = 17.3$, entonces **d ≤ 16.29 Km**

Con **splitters** de **1x8 y 1x8**, $A_{splitters} = 10.5 + 10.5 = 21$, entonces **d ≤ 5.71 Km**

Con **splitters** de **1x8 y 1x4**, $A_{splitters} = 10.5 + 7 = 17.5$, entonces **d ≤ 15.71 Km**

Con **splitters** de **1x8 y 1x2**, $A_{splitters} = 10.5 + 3.5 = 14$, entonces **d ≤ 25.71 Km**

- **Splitters** de menor relación ofrecen distancias mayores pero se usa de manera ineficiente los recursos del OLT.

Segundo, se calculan las distancias máximas de acuerdo a la atenuación de la señal de datos:

- En la figura 3.35, en vez del EDFA, se considera al OLT.
- $A_{min} = 13$ y $A_{max} = 28$ (tabla 3.16) para una ODN clase B+.
- $A_{WDM1r} = 1$ (tabla 3.14) para las longitudes de onda de 1310 y 1490 nm.
- De la figura 3.35, #E = 6 (en rojo) y #C = 9 (en verde).
- $\alpha = 0.4$ dB/Km para la longitud de onda de 1310 nm (tráfico ascendente).
- $\alpha = 0.37$ dB/Km aprox. para la longitud de onda de 1490 nm (tráfico descendente).
- Se considera $\alpha = 0.4$ dB/Km (tabla 3.13) debido a que acota más el valor de la distancia máxima.
- Se reemplazan los valores en la inecuación 3.1.

$$13 \leq 9*0.3 + 6*0.1 + 1 + A_{splitter} + 0.4*d \leq 28$$

$$8.7 \leq A_{splitter} + 0.4*d \leq 23.7$$

De acuerdo a la tabla 3.15:

Con **splitters** de **1x32 y 1x2**, $A_{splitters} = 17.4 + 3.5 = 20.9$, entonces **d ≤ 7 Km**

Con **splitters** de **1x16 y 1x4**, $A_{splitters} = 13.8 + 7 = 20.8$, entonces **d ≤ 7.25 Km**

Con **splitters** de **1x16 y 1x2**, $A_{splitters} = 13.8 + 3.5 = 17.3$, entonces **d ≤ 16 Km**

Con **splitters** de **1x8 y 1x8**, $A_{splitters} = 10.5 + 10.5 = 21$, entonces **d ≤ 6.75 Km**

Con **splitters** de **1x8 y 1x4**, $A_{splitters} = 10.5 + 7 = 17.5$, entonces **d ≤ 15.5 Km**

Con **splitters** de **1x8 y 1x2**, $A_{splitters} = 10.5 + 3.5 = 14$, entonces **d ≤ 24.25 Km**

- **Splitters** de menor relación ofrecen distancias mayores pero se usa de manera ineficiente los recursos del OLT.
- El efecto Raman no se considera debido a que los equipos actuales reducen este

crosstalk.

Finalmente, comparando los resultados, las distancias máximas son las siguientes:

- Con **splitters** de 1x32 y 1x2, $d \leq 6$ Km. Restringe la atenuación de la señal de video.
- Con **splitters** de 1x16 y 1x4, $d \leq 6.29$ Km. Restringe la atenuación de la señal de video.
- Con **splitters** de 1x16 y 1x2, $d \leq 16$ Km. Restringe la atenuación de la señal de datos.
- Con **splitters** de 1x8 y 1x8, $d \leq 5.71$ Km. Restringe la atenuación de la señal de video.
- Con **splitters** de 1x8 y 1x4, $d \leq 15.5$ Km. Restringe la atenuación de la señal de datos.
- Con **splitters** de 1x8 y 1x2, $d \leq 24.25$ Km. Restringe la atenuación de la señal de datos.

Se obtiene que los casos que utilizan de manera óptima los recursos del OLT son las combinaciones de *splitters* de 1x32 con 1x2, 1x16 con 1x4 y 1x8 con 1x8. El segundo es el que permite tener una mayor distancia, la cual es de 6.29 Km. En el diseño se utilizan estos tres casos de manera combinada dependiendo de la distribución de los clientes en el área de cobertura. Para el diseño de la red piloto se utilizan los dos primeros casos para dar servicios a los clientes actuales del operador en la zona objetivo.

d.9.2) Cálculo de las distancias máximas sin superposición de video

Se analiza de manera separada el escenario con *splitters* centralizados y el escenario con *splitters* distribuidos. Estos casos son las proyecciones de alcance para la red a futuro, en el cual se brindará IPTV en vez de video analógico. Se realiza una comparativa de las distancias máximas que se obtienen con una ODN clase B+ y clase C+.

Escenario 1: *Splitters* centralizados sin superposición de video

El escenario se muestra en la figura 3.36.

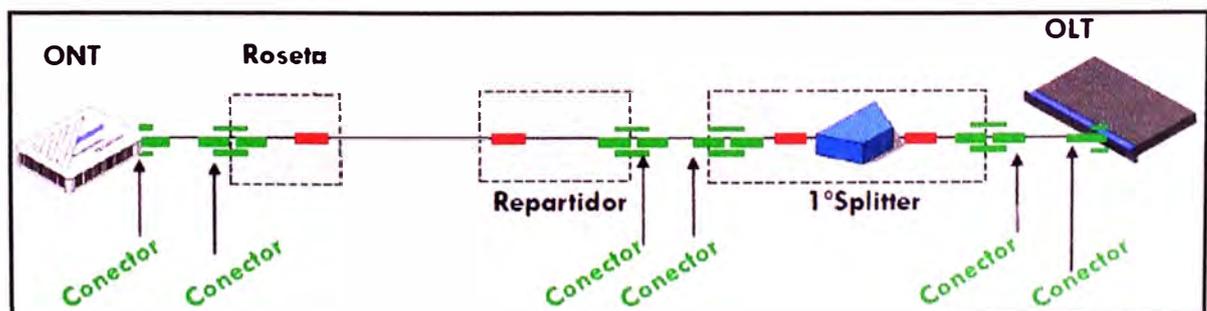


Figura 3.36 Escenario con *splitters* centralizados sin superposición de video

No se utiliza un acoplador WDM1r al no tener superposición de video, por lo que $A_{WDM1r} = 0$.

i. Con una ODN clase B+

- $A_{min} = 13$ y $A_{m\acute{a}x} = 28$ (tabla 3.16)
- De la figura 3.36, #E = 4 (en rojo) y #C = 6 (en verde).
- $\alpha = 0.4$ dB/Km para la longitud de onda de 1310 nm (tráfico ascendente).
- $\alpha = 0.37$ dB/Km aprox. para la longitud de onda de 1490 nm (tráfico descendente).
- Se considera $\alpha = 0.4$ dB/Km (tabla 3.13) debido a que acota más el valor de la distancia máxima.
- Se reemplazan los valores en la inecuación 3.1.

$$13 \leq 6*0.3 + 4*0.1 + A_{splitter} + 0.4*d \leq 28$$

$$10.8 \leq A_{splitter} + 0.4*d \leq 25.8$$

Con un **splitter de 1x64**, $A_{splitter} = 20.1$ (tabla 3.15), entonces **$d \leq 14.25$ Km**

Con un **splitter de 1x32**, $A_{splitter} = 17.4$ (tabla 3.15), entonces **$d \leq 21$ Km**

Con un **splitter de 1x16**, $A_{splitter} = 13.8$ (tabla 3.15), entonces **$d \leq 30$ Km**

- **Splitters** de menor relación ofrecen distancias mayores pero se usa de manera ineficiente los recursos del OLT.

ii. Con una ODN clase C+

- $A_{min} = 17$ y $A_{m\acute{a}x} = 32$ (tabla 3.17)
- De la figura 3.36, #E = 4 (en rojo) y #C = 6 (en verde).
- $\alpha = 0.4$ dB/Km para la longitud de onda de 1310 nm (tráfico ascendente).
- $\alpha = 0.37$ dB/Km aprox. para la longitud de onda de 1490 nm (tráfico descendente).
- Se considera $\alpha = 0.4$ dB/Km (tabla 3.13) debido a que acota más el valor de la distancia máxima.
- Se reemplazan los valores en la inecuación 3.1.

$$17 \leq 6*0.3 + 4*0.1 + A_{splitter} + 0.4*d \leq 32$$

$$14.8 \leq A_{splitter} + 0.4*d \leq 29.8$$

Con un **splitter de 1x128**, $A_{splitter} = 23.7$ (tabla 3.15), entonces **$d \leq 15.25$ Km**

Con un **splitter de 1x64**, $A_{splitter} = 20.1$ (tabla 3.15), entonces **$d \leq 24.25$ Km**

Con un **splitter de 1x32**, $A_{splitter} = 17.4$ (tabla 3.15), entonces **$d \leq 31$ Km**

Con un **splitter de 1x16**, $A_{splitter} = 13.8$ (tabla 3.15), entonces **2.5 Km $\leq d \leq 40$ Km**

- *Splitters* de menor relación ofrecen distancias mayores pero se usa de manera ineficiente los recursos del OLT.

Con una ODN clase B+ y un *splitter* de 1x64, se utiliza óptimamente los recursos del OLT y se logra una distancia máxima de 14.25 Km. Con una ODN clase C+ se logra una distancia máxima de 15.25 Km con un *splitter* de 1x128 para un uso óptimo de los recursos del OLT. La ODN clase C+ se podrá utilizar en la red a futuro del operador para condominios y edificios.

Escenario 2: *Splitters* distribuidos sin superposición de video

El escenario se muestra en la figura 3.37.

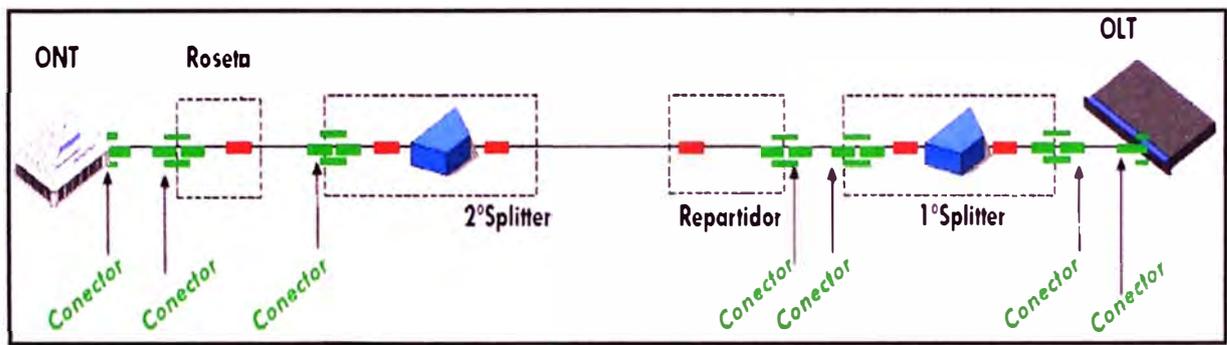


Figura 3.37 Escenario con *splitters* distribuidos sin superposición de video

No se utiliza un acoplador WDM1r al no tener superposición de video, por lo que $A_{WDM1r} = 0$.

i. Con una ODN clase B+

- $A_{min} = 13$ y $A_{máx} = 28$ (tabla 3.16)
- De la figura 3.37, #E = 6 (en rojo) y #C = 7 (en verde).
- $\alpha = 0.4$ dB/Km para la longitud de onda de 1310 nm (tráfico ascendente).
- $\alpha = 0.37$ dB/Km aprox. para la longitud de onda de 1490 nm (tráfico descendente).
- Se considera $\alpha = 0.4$ dB/Km (tabla 3.13) debido a que acota más el valor de la distancia máxima.
- Se reemplazan los valores en la inecuación 3.1.

$$13 \leq 7 \cdot 0.3 + 6 \cdot 0.1 + A_{splitters} + 0.4 \cdot d \leq 28$$

$$10.3 \leq A_{splitters} + 0.4 \cdot d \leq 25.3$$

De acuerdo a la tabla 3.15:

Con *splitters* de 1x32 y 1x2, $A_{splitters} = 17.4 + 3.5 = 20.9$, entonces $d \leq 11$ Km

Con *splitters* de 1x16 y 1x4, $A_{\text{splitters}} = 13.8 + 7 = 20.8$, entonces $d \leq 11.25$ Km

Con *splitters* de 1x16 y 1x2, $A_{\text{splitters}} = 13.8 + 3.5 = 17.3$, entonces $d \leq 20$ Km

Con *splitters* de 1x8 y 1x8, $A_{\text{splitters}} = 10.5 + 10.5 = 21$, entonces $d \leq 10.75$ Km

Con *splitters* de 1x8 y 1x4, $A_{\text{splitters}} = 10.5 + 7 = 17.5$, entonces $d \leq 19.5$ Km

Con *splitters* de 1x8 y 1x2, $A_{\text{splitters}} = 10.5 + 3.5 = 14$, entonces $d \leq 28.25$ Km

- *Splitters* de menor relación ofrecen distancias mayores pero se usa de manera ineficiente los recursos del OLT.

ii. Con una ODN clase C+

- $A_{\text{min}} = 17$ y $A_{\text{máx}} = 32$ (tabla 3.17)
- De la figura 3.37, #E = 6 (en rojo) y #C = 7 (en verde).
- $\alpha = 0.4$ dB/Km para la longitud de onda de 1310 nm (tráfico ascendente).
- $\alpha = 0.37$ dB/Km aprox. para la longitud de onda de 1490 nm (tráfico descendente).
- Se considera $\alpha = 0.4$ dB/Km (tabla 3.13) debido a que acota más el valor de la distancia máxima.
- Se reemplazan los valores en la inecuación 3.1.

$$17 \leq 7 \cdot 0.3 + 6 \cdot 0.1 + A_{\text{splitters}} + 0.4 \cdot d \leq 32$$

$$14.3 \leq A_{\text{splitters}} + 0.4 \cdot d \leq 29.3$$

De acuerdo a la tabla 3.15:

Con *splitters* de 1x64 y 1x2, $A_{\text{splitters}} = 20.1 + 3.5 = 23.6$, entonces $d \leq 14.25$ Km

Con *splitters* de 1x32 y 1x4, $A_{\text{splitters}} = 17.4 + 7 = 24.4$, entonces $d \leq 12.25$ Km

Con *splitters* de 1x32 y 1x2, $A_{\text{splitters}} = 17.4 + 3.5 = 20.9$, entonces $d \leq 21$ Km

Con *splitters* de 1x16 y 1x8, $A_{\text{splitters}} = 13.8 + 10.5 = 24.3$, entonces $d \leq 12.5$ Km

Con *splitters* de 1x16 y 1x4, $A_{\text{splitters}} = 13.8 + 7 = 20.8$, entonces $d \leq 21.25$ Km

Con *splitters* de 1x16 y 1x2, $A_{\text{splitters}} = 13.8 + 3.5 = 17.3$, entonces $d \leq 30$ Km

Con *splitters* de 1x8 y 1x8, $A_{\text{splitters}} = 10.5 + 10.5 = 21$, entonces $d \leq 20.75$ Km

Con *splitters* de 1x8 y 1x4, $A_{\text{splitters}} = 10.5 + 7 = 17.5$, entonces $d \leq 29.5$ Km

Con *splitters* de 1x8 y 1x2, $A_{\text{splitters}} = 10.5 + 3.5 = 14$, entonces $d \leq 38.25$ Km

- *Splitters* de menor relación ofrecen distancias mayores pero se usa de manera ineficiente los recursos del OLT.

Con la ODN clase B+, los casos que utilizan óptimamente los recursos del OLT son las combinaciones de *splitters* de 1x32 con 1x2, 1x16 con 1x4 y 1x8 con 1x8. De estos, el segundo logra la mayor distancia con 11.25 Km. Con la ODN clase C+, los casos que utilizan óptimamente los recursos del OLT son las combinaciones de *splitters* de 1x64 con

1x2, 1x32 con 1x4 y 1x16 con 1x8. De estos, el primero logra la mayor distancia con 14.25 Km. La red a futuro podrá utilizar estos tres últimos casos de manera combinada dependiendo de la distribución de los clientes en el área de cobertura.

e) Análisis de la pérdida de retorno óptico y la reflectancia

La pérdida de retorno óptico (ORL) y la reflectancia indican la pérdida de potencia que se produce por la señal reflejada. Es muy importante medirlas en el enlace end-to-end debido a que pueden causar inconvenientes en la red. Los efectos no deseados que producen son los siguientes:

- Interferencia con las señales de la fuente de luz.
- Alta tasa de error en los sistemas digitales.
- Baja relación señal a ruido del sistema.
- Fuertes fluctuaciones en la potencia de salida del láser.
- Daño permanente al láser.

La norma G.984.2 brinda recomendaciones para la ORL y las reflectancias en el ONT, el OLT y la ODN. Adicionalmente, la norma G.984.5 brinda el ORL mínimo en el acoplador WDM1r. Estos valores máximos y/o mínimos se muestran en las tablas 3.11, 3.12 y 3.14.

En resumen, la ITU-T indica que la ORL de la ODN debe ser mayor a 32 dB hacia el OLT y el ONT. El acoplador WDM1r debe tener una ORL mayor a 50 dB hacia el OLT y la ODN. Igualmente, la reflectancia tanto del ONT como del OLT hacia la ODN debe ser menor a -20 dB. Dentro de la ODN, las reflectancias deben ser menores a -35 dB.

Las redes FTTP deben tener conectores y empalmes que tengan una ORL que cumpla con las recomendaciones de la ITU-T. Los conectores SC/APC y SC/UPC, que se muestran en la figura 3.38, son los más usados en la redes PON. Cada uno tiene características distintas.

- **Conector SC/APC:** Conector de contacto físico angular (aprox. 8°) que produce pérdidas por reflexión bastante bajas. Tiene una reflectancia de aproximadamente -60 dB, por lo que se utiliza para enviar tráfico de video analógico por la fibra óptica. Generalmente es de color verde.
- **Conector SC/UPC:** Conector de contacto físico recto. Tiene una reflectancia de aproximadamente -50 dB. Es adecuado para la mayoría de las aplicaciones y es más fácil de reparar que el conector APC. Generalmente es de color azul.

Los empalmes tienen una reflectancia de -50 dB, por lo que cumplen con los requerimientos de la ITU-T al igual que los conectores SC/APC y SC/UPC. Sin embargo, es necesario verificar los valores de ORL al momento de la implementación. Si los

conectores o los empalmes no se han hecho correctamente, las reflectancias pueden no ser las óptimas.

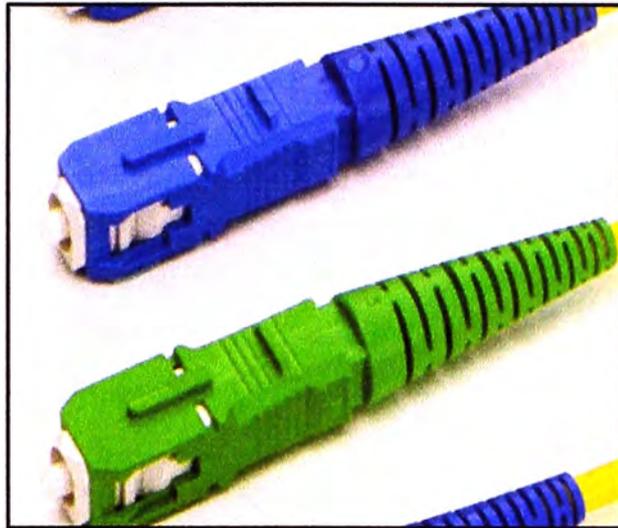


Figura 3.38 Conectores SC/UPC y SC/APC

Fuente: Figura 5 de [17]

En el diseño de la red se utilizan conectores SC/APC para el envío de la señal de video. Esto debido a la menor reflectancia que tienen en comparación con los conectores SC/UPC. El OLT usa conectores SC/UPC ya que solo transmite y recibe la señal de datos. Finalmente, en el equipamiento se utilizan los conectores de la siguiente manera:

- ONT -> Conector SC/APC
- OLT -> Conector SC/UPC
- EDFA -> Conector SC/APC
- WDM1r -> Conector SC/APC hacia la ODN y el EDFA, y conector SC/UPC hacia el OLT.

f) Análisis de la dispersión cromática

La dispersión cromática se da como resultado de la combinación de la dispersión de material y la dispersión de guía de onda. La primera ocurre cuando diferentes longitudes de luz se propagan a diferentes velocidades. La segunda se da cuando parte de la luz se propaga por el revestimiento de la fibra a mayor velocidad que la luz que viaja por el núcleo. Debido a ello, ocurre un ensanchamiento del pulso que produce interferencia intersímbolo y degrada la señal. Para fuentes de luz muy monocromáticas, el ensanchamiento del pulso está dado por la ecuación 3.2.

$$\sigma_c = D_c * L * \sigma_\lambda \quad (3.2)$$

Donde:

σ_c : Ensanchamiento del pulso causado por la dispersión cromática en ps

σ_λ : Valor de la anchura espectral de la fuente de luz en nm

D_c : Coeficiente de dispersión cromática en ps/(nm*Km)

L: Longitud del enlace en Km

Según la tabla 3.13, el mayor coeficiente de dispersión cromática para la fibra óptica monomodo G.652-B es de 20 ps/(nm*Km) en la longitud de onda de 1550 nm. De acuerdo a los cálculos que se han realizado, la máxima distancia en los escenarios con superposición de video es de 26 Km con un *splitter* centralizado de 1x16. Esta longitud del enlace se considera en el cálculo del ensanchamiento del pulso. Como se utilizan láseres DFB, la anchura espectral es menor o igual a 0.001 nm. Si se reemplazan los valores en la ecuación 3.2 se tiene lo siguiente:

$$\sigma_c = 20 * 26 * 0.001 = 0.52 \text{ ps}$$

Generalmente, para una velocidad de transmisión de T_B , el ensanchamiento por dispersión debe ser menor o igual al 25% de $1/T_B$. En GPON, el caso más crítico se da para el tráfico descendente, en el que se tiene una velocidad aproximada de 2.5 Gbps. De acuerdo a este valor, σ_c debe ser menor o igual a 400 ps. Si se compara con los 0.52 ps, se comprueba que la dispersión cromática no afecta al diseño de la red con superposición de video analógico.

Igualmente, de acuerdo a los cálculos que se han realizado, la máxima distancia en los escenarios sin superposición de video es de 40 Km con un *splitter* centralizado de 1x16 y con una ODN clase C+. En este caso, la longitud de onda de trabajo es de 1490 nm, por lo que el coeficiente de dispersión cromática es aproximadamente 15 ps/(nm*Km). Como para estos escenarios también se utilizan láseres DFB, la anchura espectral es menor o igual a 0.001 nm. Si se reemplazan los valores en la ecuación 3.2 se tiene lo siguiente:

$$\sigma_c = 15 * 40 * 0.001 = 0.6 \text{ ps}$$

Este valor es pequeño en comparación con los 400 ps. Se comprueba que la dispersión cromática no afecta a la aplicación sin superposición de video, que es la proyección de la red a futuro.

g) Análisis de la dispersión por polarización de modo o PMD

La dispersión por polarización de modo ocurre cuando un modo se propaga más rápido que otro. Depende de la circularidad, la longitud de onda y la tensión sobre la fibra óptica. El ensanchamiento del pulso debido a esta dispersión está dado por la relación 3.3.

$$\sigma_p = D_p * L^{1/2} \quad (3.3)$$

Donde:

σ_p : Ensanchamiento del pulso causado por la PMD en ps

D_c : Coeficiente de PMD en ps/Km^{1/2}

L: Longitud del enlace en Km

Según la tabla 3.13, el coeficiente de dispersión por polarización de modo para la fibra óptica monomodo G.652-B tiene un valor máximo de 0.2 ps/Km^{1/2} para cualquier longitud de onda. Nuevamente, se toman las distancias máximas calculadas para los escenarios con y sin superposición de video. Si se reemplazan los valores en la ecuación 3.3 se tiene lo siguiente:

$$\sigma_p = 0.2 * 26^{1/2} = 1.02 \text{ ps (valor máximo en escenario con superposición de video)}$$

$$\sigma_p = 0.2 * 40^{1/2} = 1.26 \text{ ps (valor máximo en escenario sin superposición de video)}$$

Análogo a la sección anterior, σ_p debe ser menor o igual a 400 ps. Si se compara con los valores obtenidos, se comprueba que la PMD no afecta al diseño ni a la red a futuro.

h) Velocidades admisibles para los clientes

Según las normas de la ITU-T, GPON puede admitir una velocidad de 2.488 Gbps en la dirección descendente y 1.244 Gbps en la dirección ascendente. Como se quiere utilizar al máximo los recursos del OLT, en el diseño se tiene a 64 clientes asociados a cada puerto PON. Por ello, en promedio, cada abonado puede tener una velocidad de 38.875 Mbps en la dirección descendente y 19.438 Mbps en la dirección ascendente.

De acuerdo a la tabla 3.1, la velocidad mínima en la dirección descendente debe ser 27 Mbps para cada abonado (con IPTV). Si a este valor se le resta la velocidad requerida para el video (18 Mbps), en la dirección ascendente se necesita aproximadamente 9 Mbps. GPON cubre estas expectativas del operador sin ningún problema asociando 64 abonados por puerto PON.

Si se analiza la red a futuro con una ODN clase C+, considerándose 128 clientes por

puerto PON para utilizar los recursos del OLT al máximo, se tiene en promedio para cada abonado 19.438 Mbps en la dirección descendente y 9.719 Mbps en la dirección ascendente. En este caso, GPON necesita aplicar la QoS para soportar los requerimientos del operador.

La QoS en GPON es un aspecto importante debido a que no solo prioriza los tráficos, sino que también monitorea y asigna de manera dinámica los anchos de banda de acuerdo a la utilización de cada abonado. El diseño de la QoS es necesario para poder brindar un servicio eficiente y libre de congestión, sobre todo cuando se tiene conectados 128 abonados en cada puerto PON.

En el diseño de la red, debido a que todavía se brinda video analógico, se tienen 18 Mbps libres para cualquier otro uso. Sin embargo, ya cuando se migre a IPTV, la QoS tendrá mayor importancia.

i) Despliegue de la red piloto

En la red piloto se utiliza un escenario con *splitters* distribuidos. Debido a la distribución de los clientes en la zona objetivo, se usan las combinaciones de *splitters* de 1x32 con 1x2 y de 1x16 con 1x4.

En la figura 3.39 se observa el enlace troncal o la sección alimentadora desde la cabecera TVCL (donde se encuentra el OLT, el amplificador EDFA y el acoplador WDM1r) hasta los *splitters* primarios en Leguía. De acuerdo a la planificación, esta red troncal ya está implementada con cables ADSS de 144 hilos de fibra óptica. En la red piloto se utiliza únicamente 8 de estos hilos, uno para cada *splitter* primario.

En la figura 3.40 se observa la sección distribuidora de la red piloto, donde se tienen 8 *splitters* primarios y 16 *splitters* secundarios. Todos los *splitters* primarios de 1x2 se conectan con los *splitters* secundarios de 1x32 y los *splitters* primarios de 1x4 se conectan con los *splitters* secundarios de 1x16. Para estos enlaces se utilizan los cables ADSS de 48 hilos que el operador cuenta en su almacén y que son usados para integrar a los nodos de la red HFC.

De acuerdo a la planificación, en la zona objetivo se tienen 160 abonados en cada lado de la Av. Túpac Amaru distribuidos de manera uniforme, por lo que cada par de *splitters* secundarios de 1x32 y 1x16 debe dar conexión a 40 clientes. Como se observa en la figura 3.40, se tiene la posibilidad de brindar servicios a otros 64 abonados con los *splitters* desplegados. Incluso, si se conectan *splitters* secundarios a las ramas de los *splitters* primarios de 1x4 que no se están utilizando, se pueden conectar hasta 128 clientes adicionales.

En general, se ubican los *splitters* en el cruce de las avenidas o calles para que sea

más fácil distribuir las ramas de fibra óptica. La conexión debe ser lo más lineal posible evitando los rutas en forma de escalera, ya que esto complica la distribución de nuevas ramas. Por ello, los splitters primarios en Miraflores y Ángeles se han separado debido a la distribución de las calles en esa zona. Para los otros casos, los *splitters* primarios de 1x2 y 1x4 se ubican en los mismos sitios.



Figura 3.39 Sección alimentadora de la red piloto

En el escenario con *splitters* distribuidos y con superposición de video, la distancia máxima con la combinación de *splitters* de 1x32 y 1x2 es de 6 Km y con la combinación de *splitters* de 1x16 y 1x4 es de 6.29 Km. La tabla 3.18 muestra las distancias de cada segmento de red para verificar si el diseño está dentro de los límites que se han calculado.

TABLA N° 3.18 Distancias desde la cabecera hasta los *splitters* secundarios

Splitter secundario	Distancias (Km)		Total
	Cabecera – SPT primario	SPT primario – SPT secundario	
Ayacuho	3.3	0.33	3.63
Piérola	3.3	0.52	3.82
Sánchez Cerro	3.3	0.38	3.68
Mariátegui	3.3	0.61	3.91
Pardo1	3.56	0.28	3.84
Pardo2	3.56	0.46	4.02
3 de Octubre	3.56	0.3	3.86
Balta	3.56	0.59	4.15
Laureles1	3.76	0.3	4.06
Diego Ferre	3.76	0.48	4.24
Simón Bolívar	3.76	0.28	4.04
Laureles2	3.76	0.52	4.28
Calle4	4.09	0.17	4.26
Ángeles	4.24	0.31	4.55
Orquideas	4.09	0.25	4.34
Tulipanes	3.76	0.58	4.34

Todos los casos tienen un margen para la sección descargadora o acometida mayor a 1 Km, lo cual es suficiente para poder brindar los servicios a los clientes en la cobertura de la red piloto.

j) Proyecciones del área de cobertura

El alcance de la red piloto es alrededor de 6 Km. Si se refleja esto en un mapa, la cobertura potencial sería aproximadamente como se muestra en la figura 3.41. La cobertura potencial de la red piloto es bastante amplia, abarcando casi todo el distrito de

Carabayllo y parte de Puente Piedra.

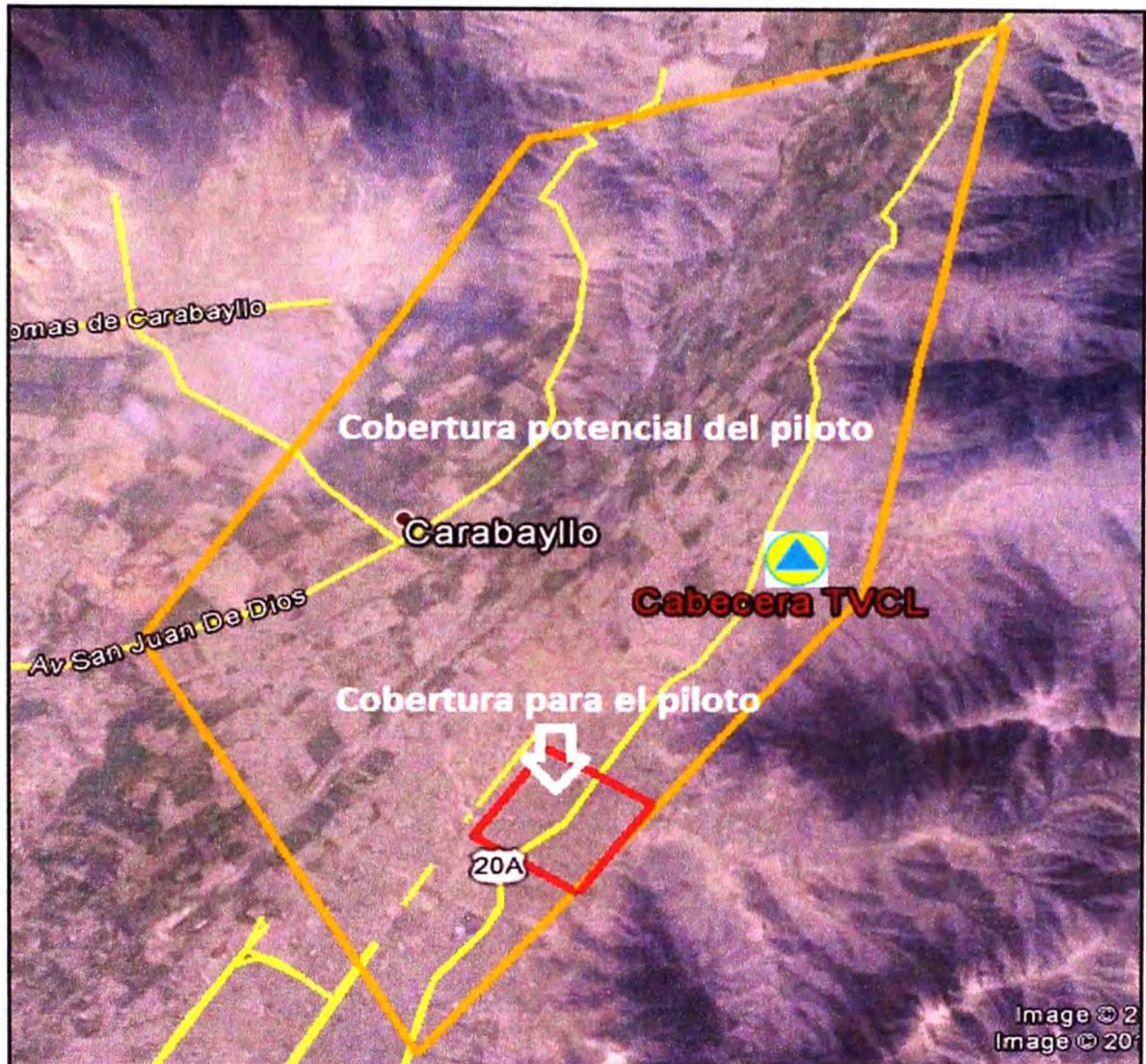


Figura 3.41 Cobertura potencial de la red piloto

Sin embargo, si se utiliza un escenario sin superposición de video con una ODN clase C+, las distancias máximas pueden aumentar a 15.25 Km si se utiliza un *splitter* centralizado y a 14.25 Km si se usa la combinación de *splitters* distribuidos de 1x64 con 1x2. Si para estos casos, se considera un alcance alrededor de los 14 Km y se refleja en un mapa, la cobertura potencial para la red a futuro sería aproximadamente como lo muestra la figura 3.42. La cobertura para la red a futuro es más amplia que la cobertura potencial de la red piloto, abarcando todos los distritos de Carabayllo, Comas y Puente Piedra.

Un detalle que resalta en las figuras 3.41 y 3.42 es que la ubicación de la cabecera no es idónea para el despliegue de la red. Si el OLT estuviera en un lugar más céntrico, el área de cobertura prácticamente se duplicaría y se tendría más clientes potenciales.

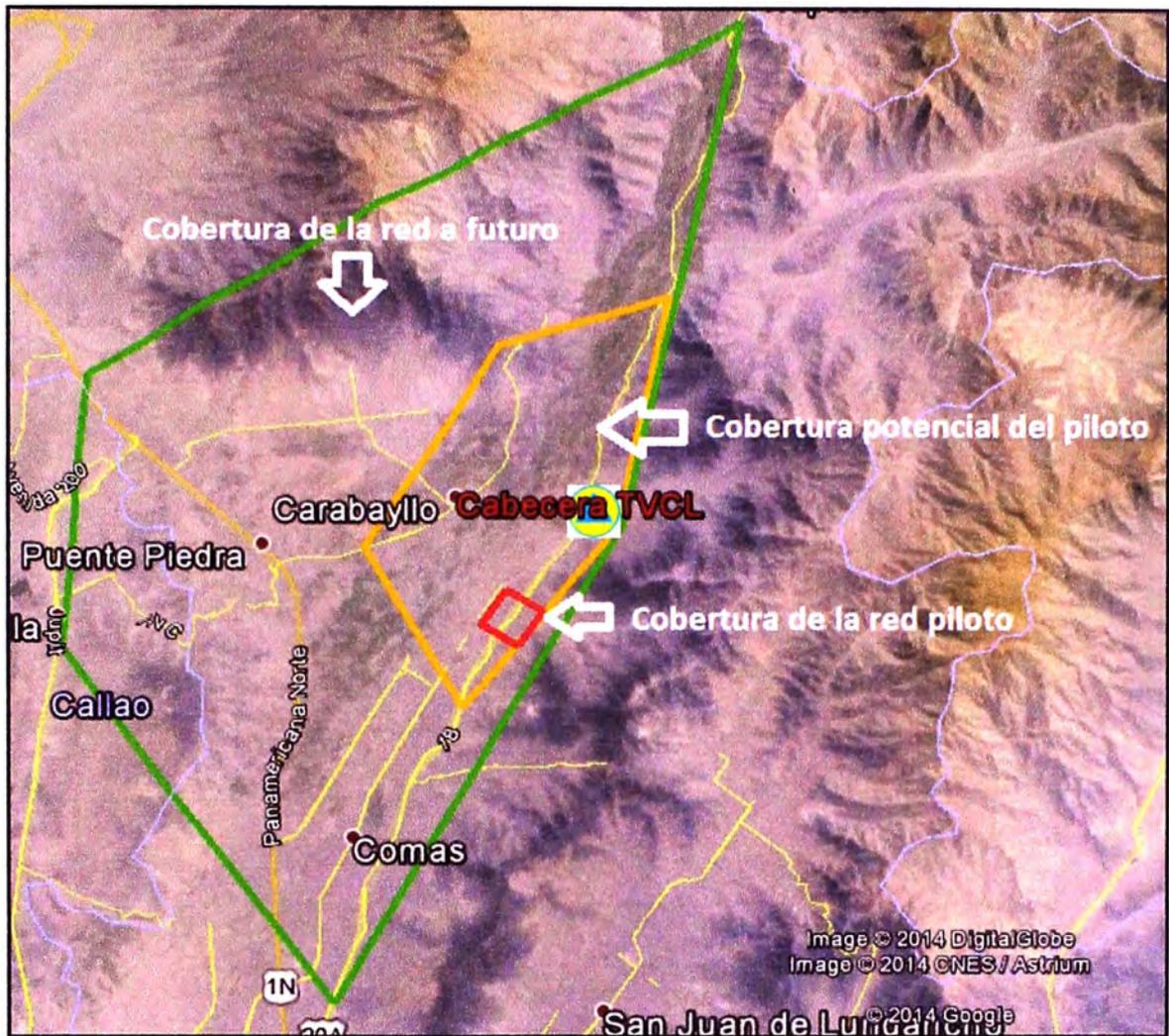


Figura 3.42 Cobertura de la red a futuro

k) Tipos de cables de fibra óptica para la red

Debido a que las instalaciones subterráneas son muy costosas e implican mayor tiempo de trabajo, en la implementación de la red se utilizan cables ADSS ideales para instalaciones aéreas. El operador ya tiene instalado estos cables de 144 hilos en el enlace troncal, los cuales son útiles para conectar una gran cantidad de *splitters* primarios. También, entre los *splitters* primarios y secundarios se tienen instalados cables de 48 hilos que son suficientes para cumplir los requerimientos del diseño. Para la sección de descarga se necesitan cables de gran densidad de fibras ópticas, por ejemplo, si se utilizan *splitters* de 1x64 ó 1x128. En este caso, se puede utilizar cables ADSS de 72 a 144 hilos que el operador tiene en su almacén.

Las características más importantes de los cables ADSS son las siguientes:

- Tienen forma cilíndrica.
- Contienen tubos holgados.
- Contienen doble cubierta de polietileno.

- Contienen elementos de refuerzo de hilos de arámida entre ambas cubiertas.
- Contienen relleno con un compuesto de impermeabilización.
- La cubierta exterior del cable puede ser resistente a potenciales eléctricos de 12 KV (clase A) ó 24 KV (clase B).
- Existen varios diseños específicos de acuerdo a las condiciones de carga (viento y hielo).

En la figura 3.43 se observa la estructura del cable ADSS.

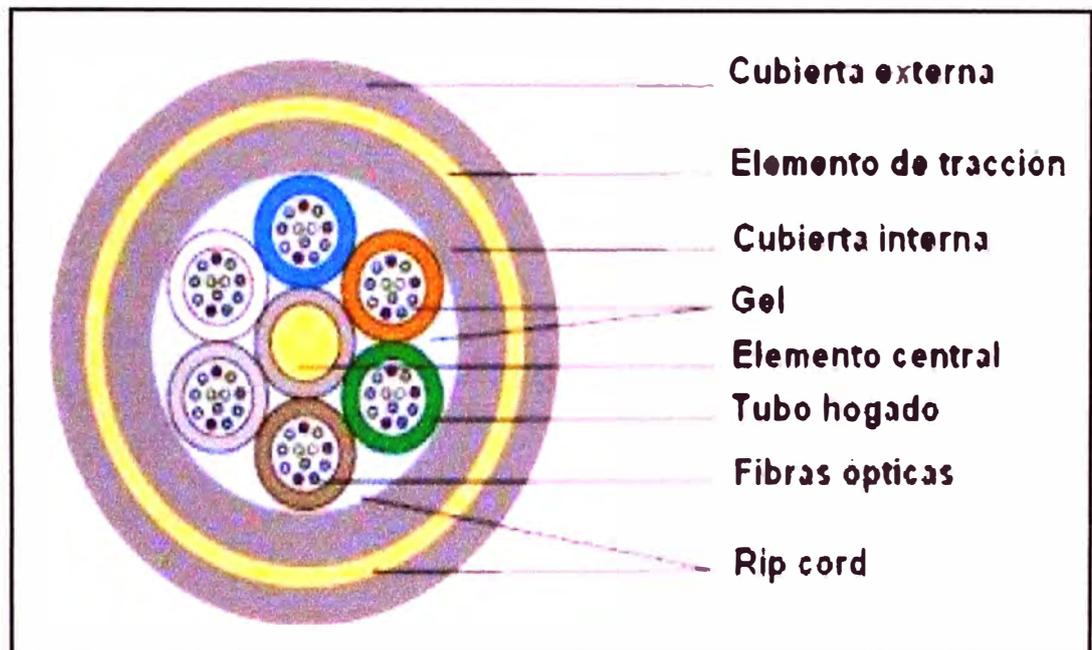


Figura 3.43 Estructura del cable ADSS

Fuente: [20]

Una opción adicional y que la ITU-T recomienda en la norma G.982 es el uso de cables de estructura tipo cinta o Ribbon. Estos cables proporcionan la máxima densidad de fibras (hasta 600) debido a su diseño en base a recubrimientos de cintas. Su instalación puede ser también de manera aérea. La figura 3.44 muestra la estructura de los cables Ribbon.

Existen máquinas empalmadoras para este tipo de cable que empalman hasta 24 fibras a la vez, lo que ahorra tiempo en la instalación. Esta es otra ventaja importante del cable tipo cinta. La figura 3.45 muestra una máquina empalmadora para cables Ribbon.

Queda a criterio del operador si utiliza también los cables Ribbon para la implementación de la red o si utiliza únicamente el cable ADSS. El objetivo de esta sección es netamente informativo. No está dentro del alcance del trabajo entrar en detalles de la fase de implementación.

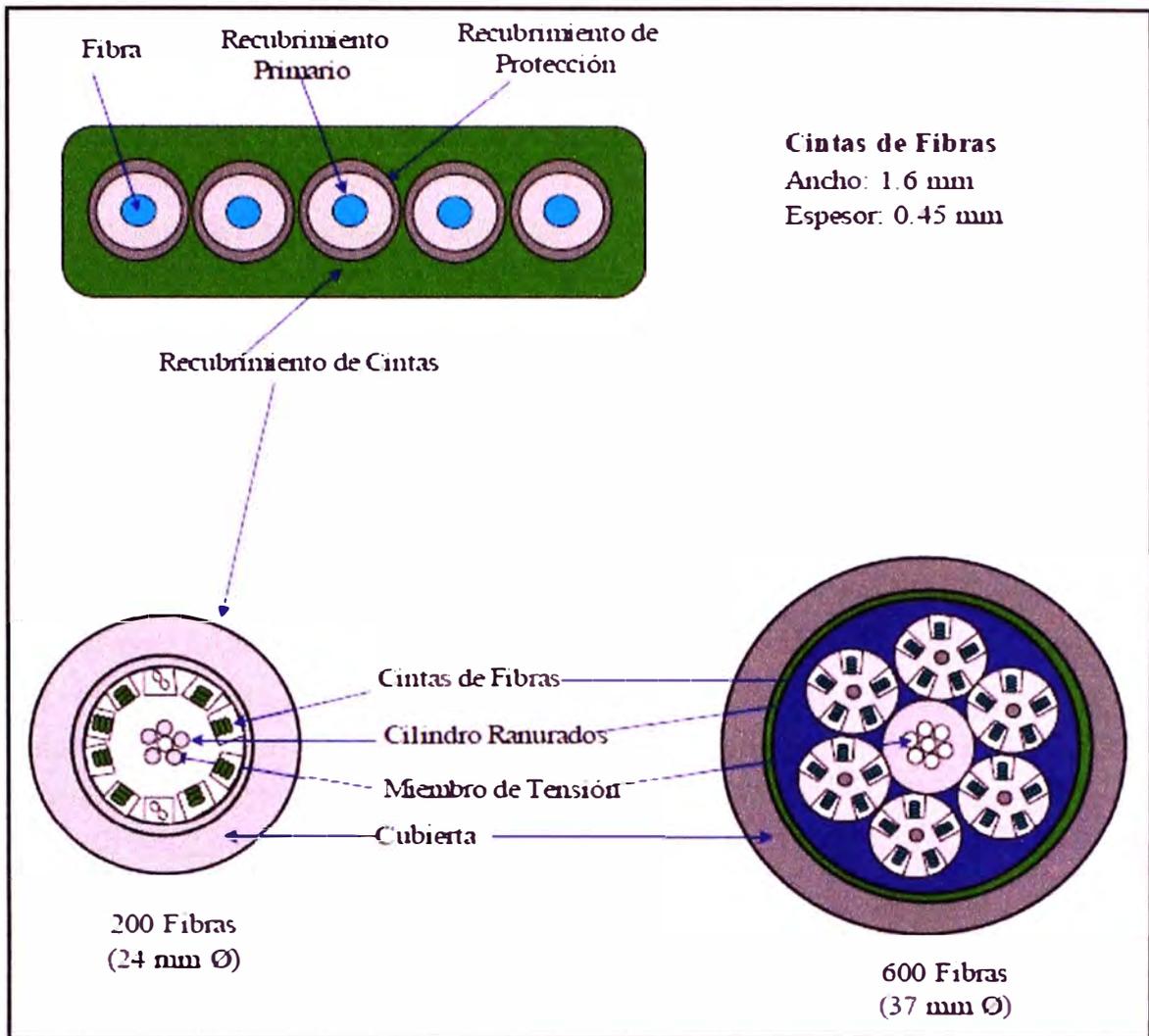


Figura 3.44 Estructura del cable Ribbon

Fuente: Capítulo 3 de [21]

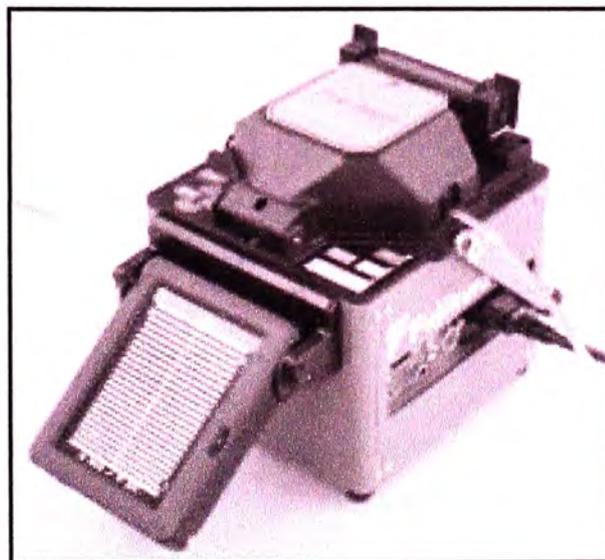


Figura 3.45 Máquina empalmadora para cable Ribbon

Fuente: Figura 1 de [22]

3.4 Equipamiento para la red

En esta sección se describe el equipamiento a utilizar en la red. Se tiene como referencia a la familia 7342 ISAM de Alcatel-Lucent, que es la marca de preferencia del operador. Esta familia de equipos GPON incluye al OLT, a las diferentes series de ONTs y a los acopladores de video (WDM1r). Se detallan las características de los equipos que se utilizan en el diseño de acuerdo a los requerimientos que se han discutido. Se considera que la red va a brindar servicio mínimamente a los 3525 abondos actuales del operador.

3.4.1 Terminal de línea óptica

Es también conocido como Packet OLT ó P-OLT. El que se utiliza en el diseño es el OLTS-M. La figura 3.46 muestra el chasis completo de este equipo. En la parte superior se encuentran los breakers que están conectados a la alimentación eléctrica. También se tiene el punto a tierra y algunas funciones de alarmas relativos al energizado. En la parte inferior se encuentran 8 fans que ofrecen aire forzado para mantener al equipo en las temperaturas correctas de funcionamiento. Se cuenta con LEDs que indican si hay falla de fan. El chasis de este equipo puede soportar 14 tarjetas LTs, 2 tarjetas NTs y una tarjeta ACU para control de alarmas. Las características de cada una se describen en las siguientes sub-secciones.

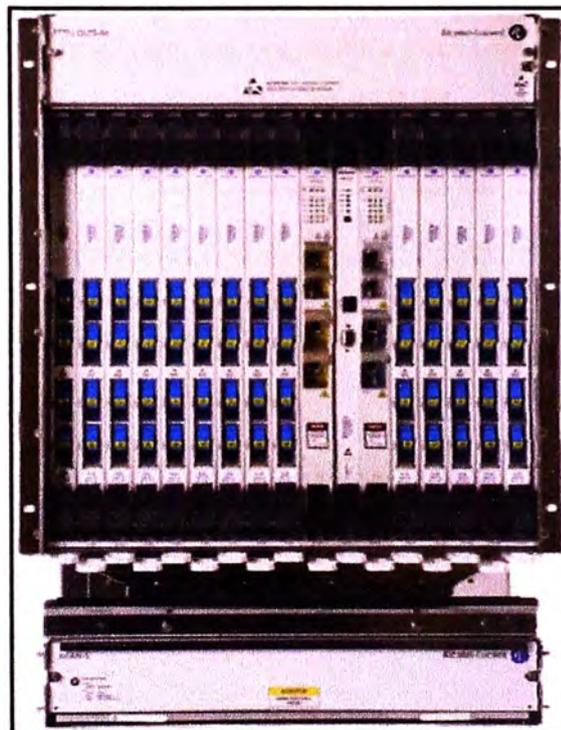


Figura 3.46 OLTS-M

Fuente: [23]

a) Unidad de control de larmas

La tarjeta ACU tiene 5 LEDs que indican diferentes niveles de condición de falla. Posee dos conectores seriales que se utilizan para administración local, análogos a un puerto consola, y dos puertos RJ-45 para administración del equipo fuera de banda. Un puerto serial y un puerto RJ-45 se encuentran en la parte frontal de la tarjeta y los otros dos puertos se encuentran en la parte dorsal. Esta tarjeta es usada para administrar el equipo y para actividades de operación y mantenimiento. La figura 3.47 muestra la tarjeta ACU.

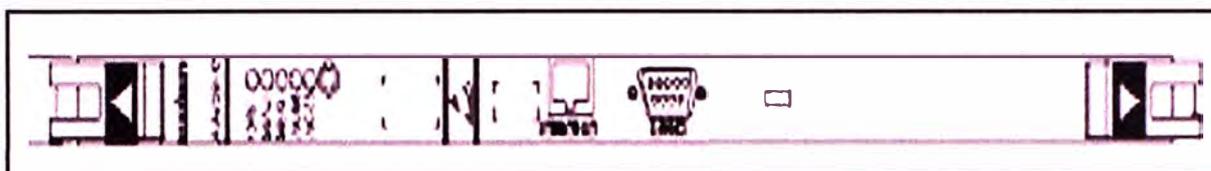


Figura 3.47 Tarjeta ACU

Fuente: [23]

b) Terminal de red

La tarjeta NT es usada principalmente para la conexión del OLT con los equipos agregadores. Existen varios tipos de tarjetas NTs que se diferencian en la capacidad de procesamiento y en la velocidad de enlace que tienen con otra tarjeta NT y con las tarjetas LTs. En el diseño se utilizan dos tarjetas EHNT-B redundantes, que son suficientes para los requerimientos del operador y para un escenario con superposición de video. La tarjeta EHNT-B se muestra en la figura 3.48.

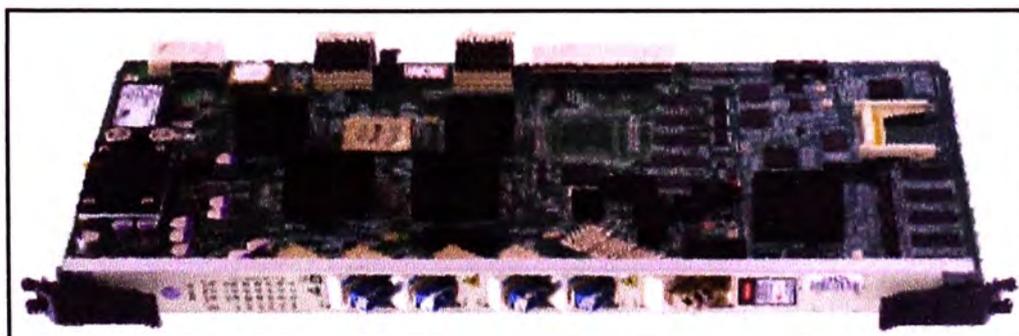


Figura 3.48 Tarjeta EHNT-B

Fuente: [23]

Las características principales de esta tarjeta son las siguientes:

- Tiene una matriz de conmutación de capa 2 de 48 Gbps.
- Soporta hasta 16000 entradas de direcciones MAC.

- Se conecta a buses eHCL (de 1 Gbps) en el backplane para la interconexión con cada tarjeta LT.
- Tiene 4 puertos SFP ópticos de 1 Gbps para la conexión con la red de agregación.
- Tiene un puerto XFP óptico de 10 Gbps para la conexión con la red de agregación.
- Tiene un puerto XFP eléctrico de 10 Gbps para la conexión, en el backplane, con la tarjeta NT redundante.

c) Terminal de línea

La tarjeta LT es la que contiene los puertos PON que se conectan a la ODN, que puede ser clase B+ o C+. Existen varios tipos de tarjetas LTs que se diferencian en la cantidad de puertos que contienen y en su capacidad de procesamiento. En el diseño se utilizan las tarjetas GLT4-A con 4 puertos PON cada una para una ODN clase B+. Si cada puerto PON soporta 64 abonados, se puede tener un total de 3584 abonados utilizando 14 de estas tarjetas en el OLTS-M. Esto es suficiente para brindar servicios a todos los clientes actuales del operador en un escenario con superposición de video. Otras características de esta tarjeta son:

- Tiene un switch interno de capa 2.
- Se conecta a un bus eHCL (de 1 Gbps) en el backplane para la interconexión con la tarjeta NT.
- Posee una interfaz XAUI (10 Gbps) para la conexión, en el backplane, con la tarjeta NT.

La figura 3.49 muestra la tarjeta GLT4-A.

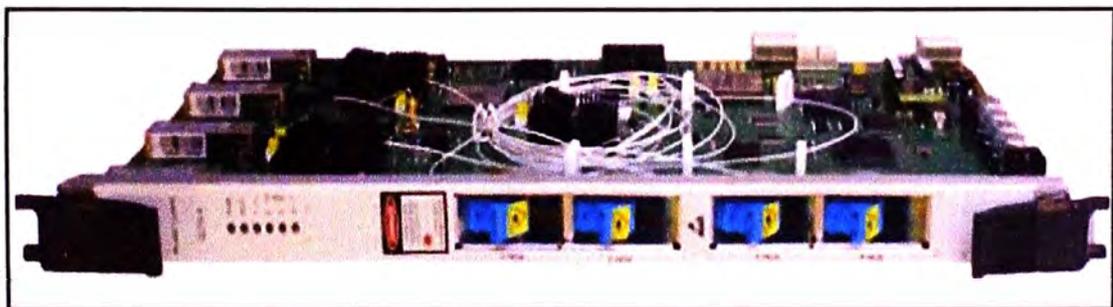


Figura 3.49 Tarjeta GLT4-A

Fuente: [23]

d) Módulos SFP y XFP

Los módulos SFP y XFP que se utilizan en la tarjeta NT deben ser de Alcatel-Lucent para evitar problemas de interoperabilidad de hardware. Estos módulos son full dúplex y los conectores son del tipo LC. Se tienen SFPs para la segunda (1310 nm) y tercera

(1550 nm) ventana. Para el caso de los XFPs, se tienen para la primera (850 nm) y para la tercera ventana. Los módulos que se utilizan dependen del diseño de la red de agregación. La figura 3.50 muestra los módulos SFP y XFP de Alcatel-Lucent.

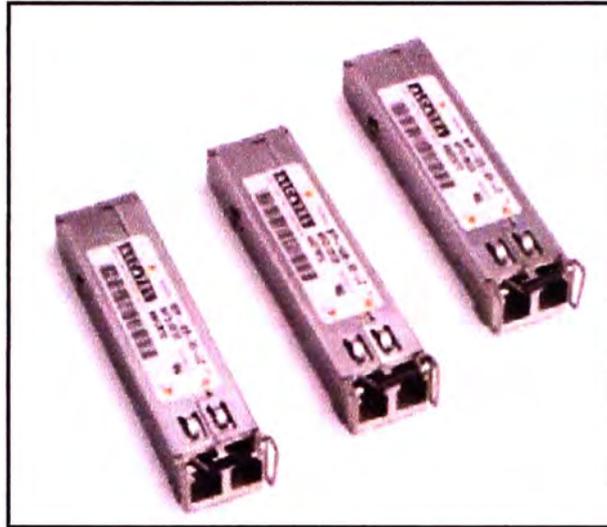


Figura 3.50 Módulos SFP y XFP

Fuente: [23]

e) Terminales de red y línea para la red a futuro

Adicionalmente, se describen las tarjetas que se pueden utilizar cuando se tenga un escenario sin superposición de video (brindando IPTV).

La tarjeta NT que se recomienda usar es la EXNT-A, que se caracteriza por tener una matriz de conmutación de 200 Gbps y 4 interfaces XFP para la interconexión, en el backplane, con la tarjeta NT redundante. También, posee interfaces XAUI para la conexión con las tarjetas LTs. La figura 3.51 muestra la tarjeta EXNT-A.

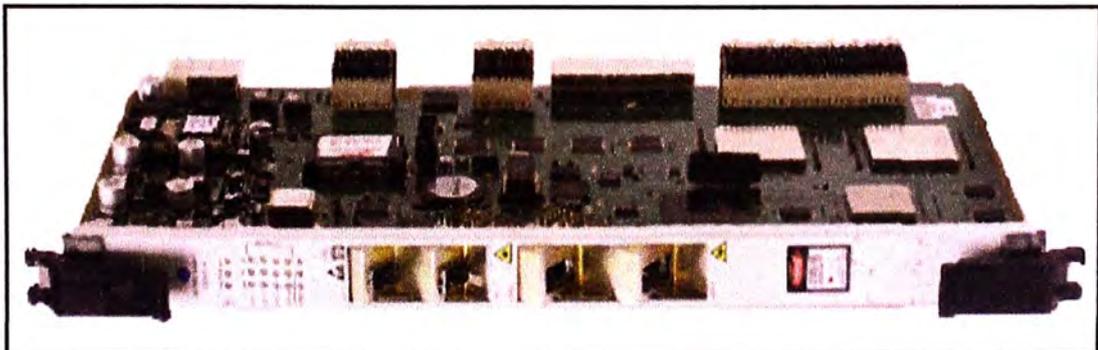


Figura 3.51 Tarjeta EXNT-A

Fuente: [23]

Para el caso de las tarjetas LTs, se recomienda usar la NGLT-A que se caracteriza

principalmente por tener 8 puertos SFP PON. Cada uno de estos puertos soporta hasta 128 abonados con una ODN clase C+. Si se consideran 14 de estas tarjetas en el OLTS-M, se puede brindar servicios a 14336 abonados. También, cuenta con extensiones mejoradas para utilizar la QoS. La figura 3.52 muestra la tarjeta NGLT-A.

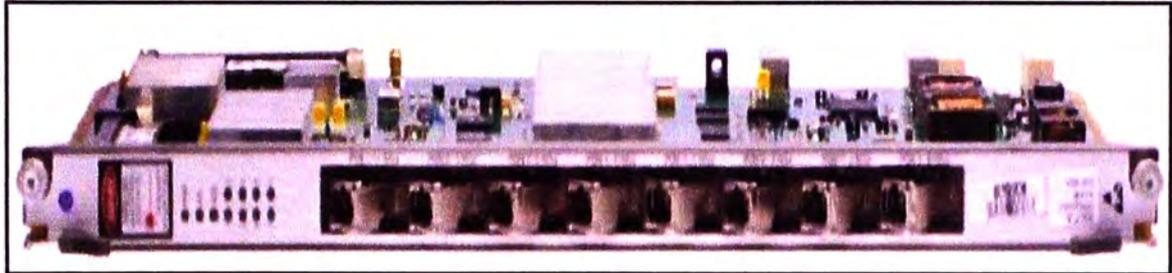


Figura 3.52 Tarjeta NGLT-A

Fuente: [23]

3.4.2 Acoplador de video

En el escenario con superposición de video es necesario utilizar los acopladores WDM1r. Para ello, Alcatel-Lucent cuenta con un rack de acopladores que ayuda a ordenar la instalación de estos equipos y las fibras ópticas. Este rack es llamado FIST-GR2 y se muestra en la figura 3.53.



Figura 3.53 Rack FIST-GR2

Fuente: [23]

Dentro de este rack, se pueden tener hasta 15 sub-unidades llamadas VCS, en donde cada una puede tener hasta 6 bandejas VCW4-A. En ellas se encuentran 4 acopladores con las conexiones respectivas hacia el V-OLT (EDFA), P-OLT y la ODN. La figura 3.54 muestra la bandeja VCW4-A.

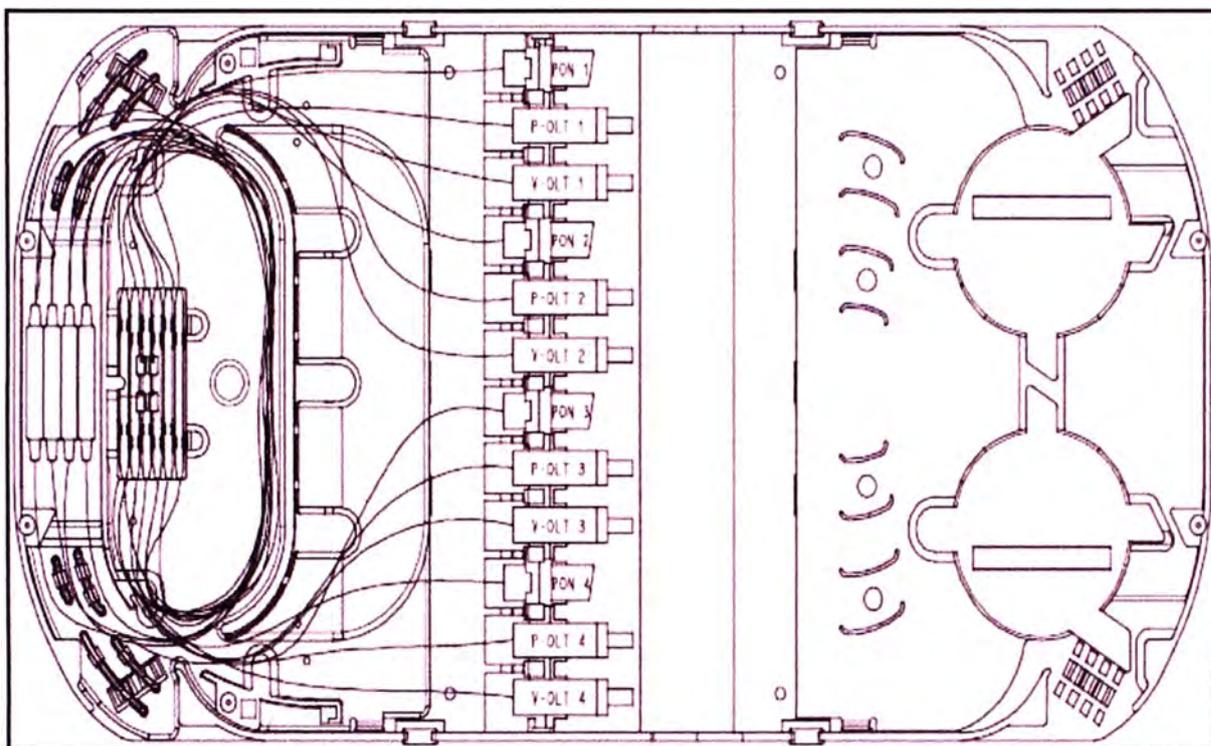


Figura 3.54 Bandeja VCW4-A

Fuente: Figura 55-1 de [24]

El rack FIST-GR2 puede tener hasta 90 bandejas VCW4-A, por lo que en total se tienen 360 salidas a la ODN. Esto es suficiente para soportar las conexiones de 6 OLTS-M con tarjetas GLT4-A.

3.4.3 Terminal de red óptica

Existe una gran variedad de series de ONTs de Alcatel-Lucent de acuerdo a lo que el cliente requiera. Pueden tener interfaces para video en RF, entradas POTs para telefonía, entradas E1/T1 e incluso pueden brindar conexión inalámbrica (WiFi). Los ONTs también se diferencian dependiendo de su ubicación dentro del dominio del cliente: pueden ser Outdoor o Indoor. Generalmente, los clientes residenciales utilizan ONTs Indoor. Los ONTs Outdoor se pueden usar para clientes corporativos.

Un ONT que cumple con todas las aplicaciones y los servicios planificados del operador es el ONT Indoor I-241W-P para clientes residenciales, que se muestra en la figura 3.55. Este equipo brinda servicio de Internet, telefonía, video RF y WiFi.

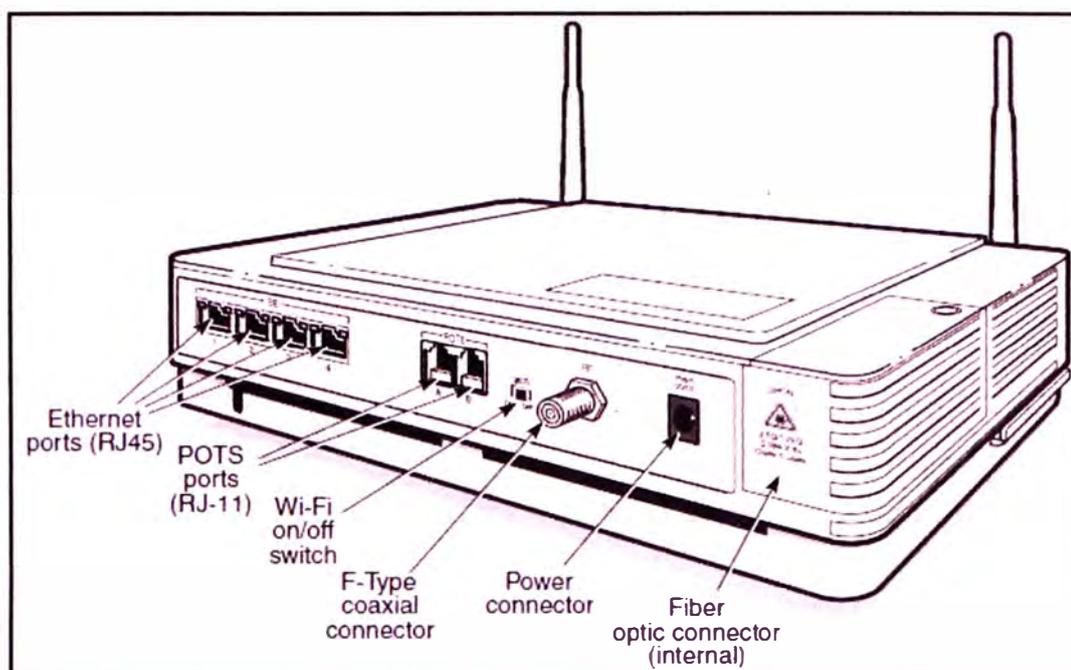


Figura 3.55 ONT I-241W-P

Fuente: Figura 12-40 de [25]

Debido a que los clientes pueden no necesitar todos los servicios que brinda el I-241W-P, existen otros tipos de ONTs que brindan solo algunos servicios de los que se ha mencionado. La figura 3.56 muestra varios ejemplos de ONTs de Alcatel-Lucent que se pueden utilizar en el diseño de red.

<ul style="list-style-type: none"> ➤ Indoor series <ul style="list-style-type: none"> ▪ 2 POTS, 2 100M Eth, 1 RF-video ▪ 2 POTS, 4 1G Eth ▪ 2 100M Eth ▪ 2 1G Eth ➤ Outdoor series <ul style="list-style-type: none"> ▪ 4 POTS, 2 100M Eth, 1 RF-video ▪ 2 POTS, 1 100M Eth ➤ Business series <ul style="list-style-type: none"> ▪ 8 POTS, 1 G Eth, 1 RF-video, 2 E1 ▪ 8 POST, 1 G Eth, 2 E1 ➤ Modular series <ul style="list-style-type: none"> ▪ 24 POTS; 12 GbEth ▪ 24 POTS; 12 GbEth; RF-video 	
--	--

Figura 3.56 Serie de ONTs

Fuente: [23]

3.4.4 Amplificador de fibra dopada con erbio o EDFA

Para enviar la señal de video RF se necesita un EDFA ó V-OLT en la cabecera. Alcatel-Lucent no cuenta con estos amplificadores, por lo que en el diseño se utilizan EDFAs de la marca Tuolima. Un ejemplo de este equipo se muestra en la figura 3.57.



Figura 3.57 EDFA

Fuente: [26]

Cada puerto PON necesita un amplificador, por lo que se necesitan 56 EDFAs si se utilizan todos los puertos del OLTS-M con tarjetas GLT4-A. Existen EDFAs que poseen una mayor cantidad de puertos de salida, pero debido a que el operador cuenta con los equipos Tuolima en su almacén, se descarta la compra de nuevos equipos.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE COSTOS

En este capítulo se analizan los costos para verificar si los gastos de equipamiento están dentro del presupuesto que se ha dado en la fase de preparación de la red. Esto es importante para saber si finalmente el diseño de red es viable o no.

El OLTS-M con 14 tarjetas GLT4-A puede brindar servicio a 3584 abonados. Se toma este equipamiento para dar conexión a los 3525 clientes actuales del operador y poder brindar un margen para futuros clientes. Adicionalmente, se consideran los siguientes puntos críticos:

- Se utilizan las tarjetas EHNT-B redundantes en el OLTS-M.
- Se considera que todos los puertos de las tarjetas NTs se encuentran en uso.
- El rack FIST-GR2 contiene 14 bandejas VCW4-A.
- Todos los abonados utilizan el ONT I-241W-P.
- Se utilizan 56 amplificadores Tuolima.
- Se utilizan *splitters* distribuidos de 1x16 con 1x4 asociados a todos los puertos PON.
- No se considera redundancia de enlace troncal debido a que todos los clientes actuales del operador son residenciales.

Según la tabla 3.4, el presupuesto para el equipamiento es de \$ 1'000,000 pudiéndose extender hasta \$ 78,000. La tabla 4.1 muestra los costos unitarios, la cantidad y el costo total del equipamiento. Este último valor es de \$ 1'017,280, lo que indica que el diseño de red es viable.

Se recalca que los costos mostrados en la tabla 4.1 son para un caso extremo. En realidad el gasto es menor debido a que no es necesario, por ejemplo, utilizar el ONT I-241W-P para todos los abonados. Hay clientes que no desean el servicio de VoIP ó el servicio de WiFi y se puede utilizar otra serie de ONT más económica. Igualmente, es probable que no se requiera utilizar todos los puertos de las tarjetas EHNT-B, por lo que no es necesario comprar tantos SFPs. El objetivo en esta sección es demostrar que en circunstancias críticas el gasto en equipamiento está dentro del margen presupuestal.

TABLA N° 4.1 Costos de equipamiento para la nueva red GPON

Equipamiento	Cantidad	Costo (\$)
OLTS-M con elementos de energizado	1	7000
Fans para el OLTS-M	8	800
Tarjeta EHNT-B	2	4000
Tarjeta ACU	1	2000
Tarjeta GLT4-A	14	21000
SFP óptico de 1Gbps	8	3200
XFP óptico de 10 Gbps	2	1200
XFP eléctrico de 10 Gbps	2	1000
Rack FIST-GR2	1	5000
Sub-unidad VCS	3	3000
Bandeja VCW4-A	14	7000
ONT I-241W-P	3584	896000
EDFA	56	28000
<i>Splitter</i> 1x4	56	2240
<i>Splitter</i> 1x16	224	35840
Total		1'017,280

Nota: Los precios tomados son referenciales.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a lo que se ha realizado, se describen las siguientes conclusiones:

- 1 Se demuestra que GPON presenta ventajas en la capa física y en la QoS, inherentes en la misma norma, que EPON no las soporta.
- 2 El enfoque de diseño de “arriba hacia abajo”, en base al modelo OSI, es menos susceptible a errores debido a que toma en consideración aspectos importantes que no se visualizan si se utiliza el enfoque de “abajo hacia arriba”.
- 3 Las tres primeras fases del ciclo de vida de la red son útiles para ordenar un procedimiento de diseño y para visualizar mejor todos los factores importantes tanto técnicos como empresariales.
- 4 En GPON, Ethernet se utiliza junto con la norma IEEE 802.1q para el uso de etiquetados. Esto permite segmentar la red lógicamente y tratar las tramas de manera distinta en cada VLAN.
- 5 El modo de envío de conexión cruzada se aplica para los clientes importantes o corporativos debido a que se personaliza el tráfico de cada abonado.
- 6 El modo de envío de conexión ibridge se aplica para los clientes residenciales comunes debido a que se evita utilizar un gran número de etiquetas para abonados con las mismas características de servicio.
- 7 El modo de marcado confiable permite brindar a los abonados características de QoS necesarias para un buen servicio.
- 8 El modo de etiquetado apilado brinda una jerarquía de etiquetas para separar la administración del tráfico de las redes de acceso y agregación. Además, se ofrece más flexibilidad al tener una mayor capacidad de etiquetado.
- 9 El uso de una arquitectura con *splitters* centralizados es aplicable sólo cuando se tiene una gran cantidad de abonados en un espacio relativamente pequeño.
- 10 La arquitectura con *splitters* distribuidos permite tener mayor flexibilidad al cubrir áreas más extensas.
- 11 Se demuestra que en el escenario con superposición de video, la distancia máxima

entre el OLT y el ONT es de 9.71 Km con *splitters* centralizados y alrededor de los 6 Km con dos *splitters* distribuidos. En estos casos, se consideran 64 abonados por puerto PON para un uso eficiente de los recursos del OLT.

- 12 Se demuestra que en el escenario sin superposición de video, la distancia máxima entre el OLT y el ONT es de 15.25 Km con *splitters* centralizados y alrededor de los 12.5 Km con dos *splitters* distribuidos. En estos casos, se consideran 128 abonados por puerto PON para un uso eficiente de los recursos del OLT.
- 13 El conector SC/APC se utiliza para enviar video analógico a través de la red debido a que posee el más bajo ORL de todos los conectores.
- 14 En la red GPON, la dispersión cromática se puede despreciar si se utilizan láseres DFB.
- 15 La dispersión por polarización de modo no afecta al sistema debido a la velocidad máxima de 2.488 Gbps que soporta GPON.

Después de elaborar el diseño de red, se recomienda lo siguiente:

- 1 Las redes basadas en cobre deben empezar a migrarse a las redes PON con FTTP.
- 2 Se debe utilizar GPON en un diseño de red de acceso óptico para la siguiente generación.
- 3 Se debe utilizar Ethernet con etiquetado de VLAN para una red de acceso PON.
- 4 Se debe brindar todos los tipos de aplicaciones y servicios de manera paquetizada.
- 5 Se debe utilizar *splitters* que cubran la máxima capacidad del puerto PON.
- 6 Se deben integrar los *splitters* a través de empalmes en vez de conectores si se requiere un buen alcance de la red.
- 7 Se debe utilizar una ODN clase B+ en caso se tenga un escenario con superposición de video.
- 8 Se debe utilizar una ODN clase C+ en caso se tenga un escenario sin superposición de video si se requiere un buen alcance de la red.
- 9 Se debe realizar el diseño de los servicios de una red inteligente para una operación eficiente de la red. Estos servicios incluyen la QoS, la seguridad y el multicast.
- 10 Se debe realizar un análisis de costo de equipamiento para verificar que se esté dentro del margen presupuestal.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Dirección General de Regulación y Asuntos Internacionales de Comunicaciones, "Boletín Estadístico II-T 2013", Ministerio de Transporte y Comunicaciones – Perú, 2013.
- [2] CCNA Exploration v4.1, "Módulo 4: Acceso a la WAN", Cisco – Estados Unidos, 2010.
- [3] Technology Overview, "PON-Passive Optical Networking", Alcatel-Lucent University – Estados Unidos, 2011.
- [4] IEEE 802.3 Study Group, Ethernet in the First Mile, "Point to Multipoint EPON Tutorial", Metro Ethernet Forum – Estados Unidos, 2005.
- [5] Eric Lynskey, "Preamble modifications for 1000BASE-PX networks", University of New Hampshire InterOperability Laboratory – Estados Unidos, 2006.
- [6] Eric Lynskey, "Discovery Process for EPON", University of New Hampshire InterOperability Laboratory – Estados Unidos, 2004.
- [7] Curtis Knittle, "DPoE Architecture, Specifications, Qualification", IEEE/ITU Joint Workshop – Estados Unidos, 2012.
- [8] Trademark Notice, "Next-Generation PON Evolution", Huawei – China, 2010.
- [9] Steve Gorshe y Jeff Mandin, "Introduction to IEEE 802.3av 10G EPON", China Communications – China, 2009.
- [10] Wang Xinsheng, "Insights into Next-Generation PON Evolution", ZTE – China, 2012.
- [11] CCDA, "Designing for Cisco Internetwork Solutions (DESGN) 2.1", Cisco – Estados Unidos, 2010.
- [12] David Cleary, "White Paper - EPON or GPON", Optical Solutions – Estados Unidos, 2005.
- [13] Recomendación UIT-T G.982, "Redes de acceso óptico para el soporte de servicios que funcionan con velocidades binarias de hasta la velocidad primaria de

- la RDSI o velocidades binarias equivalentes”, Unión Internacional de Telecomunicaciones - Estados Unidos, 1996.
- [14] Training, “7342 FTTU Operator - VLAN Provisioning”, Alcatel-Lucent University – Estados Unidos, 2009.
 - [15] CCNA Exploration v4.1, “Módulo 3: Conmutación y conexión inalámbrica de LAN”, Cisco – Estados Unidos, 2010.
 - [16] Recomendación UIT-T G.984.2, “Redes ópticas pasivas con capacidad de gigabits: Especificación de la capa dependiente de los medios físicos”, Unión Internacional de Telecomunicaciones – Estados Unidos, 2003.
 - [17] White Paper, “Connectors in FTTP Networks”, ADC – Estados Unidos, 2006.
 - [18] Recommendation ITU-T G.652, “Characteristics of a single-mode optical fibre and cable”, International Telecommunication Union – Estados Unidos, 2009.
 - [19] Recommendation ITU-T G.984.5, “G-PON: Enhancement band”, International Telecommunication Union – Estados Unidos, 2007.
 - [20] Especificación técnica, “Cable óptico aéreo autosoportado – AS”, Furukawa – Japón, 2012.
 - [21] Eduardo Belleza Zamora, “Redes y sistemas de fibra óptica”, Universidad Nacional de Ingeniería – Perú, 2013.
 - [22] Toshiro Mizushima, Sachie Morita, Hiroshi Sugawara, Takeshi Sato y Shounosuke Yaguchi, “24-Fiber Ribbon Fusion Splicer”, Fujikura – Japón, 2003.
 - [23] Training, “7342 ISAM FTTU”, Alcatel-Lucent University – Estados Unidos, 2011.
 - [24] ETSI Product Information Manual, “7342 ISAM FTTU P-OLT R4.9.00”, Alcatel-Lucent - Estados Unidos, 2013.
 - [25] ONT Product Information Manual, “7342 ISAM FTTU ONT R04.08.04”, Alcatel-Lucent - Estados Unidos, 2012.
 - [26] Datasheet, “EDFA”, Tuolima – China, 2014.