Análisis comparativo del desempeño óptico de arquitecturas de redes PON

Julian Andres Carvajal Sanchez

Carlos Daniel Valverde Benavides

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Telecomunicaciones

Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT)

Popayán, 2022

Análisis comparativo del desempeño óptico de arquitecturas de redes PON.

Trabajo de grado para optar por el título de:
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Julian Andres Carvajal Sanchez

Carlos Daniel Valverde Benavides

Director: MSc Alejandro Toledo Tovar

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Telecomunicaciones

Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT)

Popayán, de 2022.

Tabla de Contenido

Introducción XI

1 Capítulo I. Marco Teórico. 14

1.1 Redes Ópticas Pasivas 14

1.1.1 Técnicas de Multiplexación 15

1.1.2 Arquitecturas PON 15

1.1.3 Topologías de las redes PON 17

1.1.4 Redes de acceso de fibra óptica hasta el lugar x (FTTx - *Fiber To The x*) 18

1.2 Evaluación del desempeño 19

1.2.1 Degradaciones ópticas 20

1.2.2 Parámetros de Desempeño Óptico 23

1.2.3 Técnicas de OPM 24

2 Capitulo ll. Caracterización de las arquitecturas PON definidas por FSAN. 26

2.1 Revisión de las arquitecturas PON definidas por FSAN 26

2.2 Caracterización General de una arquitectura PON 28

2.2.1 Arquitectura PON 29

2.2.2 Parámetros de diseño generales de PON 35

2.3 Caracterización Arquitecturas PON definidas por FSAN 42

2.3.1 GPON 42

2.3.2. XG-PON y XGS-PON 45

2.3.3. NGPON2 47

2.4. Resumen de las Arquitecturas PON Caracterizadas 50

3 Capitulo III. Metodología de desarrollo y simulación. 53

3.1 Metodología de simulación 53

3.2 Herramienta OPT-Sim de Synopsys 56

3.3 Modelo conceptual 58

3.3.2 Escenarios de simulación 58

3.3.3 Escenario 1: Arquitectura GPON 60

3.3.4 Escenario 2: Arquitectura XG-PON (XGS-PON) 62
3.3.5 Escenario 3: Arquitectura NG-PON2 63
3.4 Definición del modelo de red en el entorno de simulación (OptSim) 64
3.5 Aspectos para considerar en la Simulación. 68
4 Capitulo IV. Simulación y Evaluación del desempeño de las Arquitecturas PON 69
4.1 Modelos de Red implementados 69
4.1.1 Implementación del primer escenario de simulación G-PON 69
4.1.2 Implementación de XGPON 71
4.1.3 Implementación NG-PON2 72
4.2 Resultados y evaluación del desempeño de los escenarios de simulación. 75
4.2.1 Caso de estudio 1: Relación de división 1:32 77
4.2.2 Caso de estudio 2: Relación de división 1:64 85
4.2.3 Evaluación de los resultados obtenidos. 92
5 Capítulo V. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros 95
5.1 Conclusiones 95
5.2 Recomendaciones 97
5.3 Trabajos futuros 98
6 Bibliografía 99
Anexo A. GENERALIDADES DEL DESEMPEÑO OPTICO
Anexo B. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Índice de Figuras

Figura 1.1 Arquitectura de una red PON [4] 14
Figura 1.2 FTTx [13] 19
Figura 1.3 Efectos de dispersión en la fibra [20] 22
Figura 2.1 Ruta de evolución FSAN [26] 27
Figura 2.2 Arquitectura General PON 28
Figura 2.3 Arquitectura PON con 3 Splitters [33] 29
Figura 2.4 Arquitectura PON-ODN [35] 31
Figura 2.5 Ubicación Splitter [38] 32
Figura 2.6 Estructura Laser Fabry-Perot [33] 33
Figura 2.7 Estructura Laser DFB [33] 33
Figura 2.8 Enfoque Centralizado [37] 37
Figura 2.9 Enfoque en cascada [37] 37
Figura 2.10 Alcance y Alcance Diferencial [33] 39
Figura 2.11 NRZ y RZ [54] 40
Figura 2.12 Arquitectura de referencia GPON [39] 43
Figura 2.13 Arquitectura de Referencia XG-PON [63] 45
Figura 2.14 Arquitectura de referencia lógica de NG-PON2 [75] 48
Figura 3.1 Diagrama de Flujo simulación. 55
Figura 3.2 Esquema general 58
Figura 3.3 Esquema general de un enlace con multiplexación 58
Figura 3.4 Escenarios de Simulación 59
Figura 3.5 Esquema primer escenario de simulación 60
Figura 3.6 Esquema General Escenario 2 de Simulación 62
Figura 3.7 Esquema General Escenario 3 de Simulación 63
Figura 3.8 Modelo de Red FTTH BPON 65
Figura 3.9. Configuración de la señal de Video Mejorada 65
Figura 4.4.1 Transmisor de Datos 69
Figura 4.2 Transmisor de Video 70
Figura 4.3 Receptor Video y datos 70
Figura 4.4 Esquema de Red G-PON 71
Figura 4.5 Transmisor de Voz y Datos 71
Figura 4.6 Transmisor de Video 71
Figura 4.7 Receptor Voz, Datos y Video 72
Figura 4.8 Esquema General XG-PON 72
Figura 4.9 Transmisor de Voz y Datos 73
Figura 4.10 Transmisor Video 73

Figura 4.11 Receptor Voz, Datos y Video..... 74
Figura 4.12 Esquema General NG-PON2 74
Figura 4.13 Diagrama de Ojo 2.5 Gbps Back to back vs Recibido del sistema de datos en 5km.. 76
Figura 4.14 Diagrama de Ojo a 10 Gbps Back to back vs recibido del sistema de datos en 5km 76
Figura 4.15 Diagrama de ojo 16-QAM Back to back vs Recibido del sistema de video a 0.8 Gbps en 5km 77
Figura 4.16 Resultados de los parámetros de desempeño OPM de las arquitecturas PON en 5Km: a) Factor Q Voz y datos, b) Factor Q Video, c) Potencia de Recepción Voz y datos, d) Potencia de Recepción Video, e) Jitter Voz y datos, f) Jitter Video, g) BER Video. 79
Figura 4.17 Resultados de los parámetros de desempeño OPM de las arquitecturas PON en 10 Km: a) Factor Q Voz y datos, b) Factor Q Video, c) Potencia de Recepción Voz y datos, d) Potencia de Recepción Video, e) Jitter Voz y datos, f) Jitter Video, g) BER Video. 80
Figura 4.18 Resultados de los parámetros de desempeño OPM de las arquitecturas PON en 15 Km: a) Factor Q Voz y datos, b) Factor Q Video, c) Potencia de Recepción Voz y datos, d) Potencia de Recepción Video, e) Jitter Voz y datos, f) Jitter Video, g) BER Video. 82
Figura 4.19 Resultados de los parámetros de desempeño OPM de las arquitecturas PON en 20 Km: a) Factor Q Voz y datos, b) Factor Q Video, c) Potencia de Recepción Voz y datos, d) Potencia de Recepción Video, e) Jitter Voz y datos, f) Jitter Video, g) BER Video. 84
Figura 4.20 Resultados de los parámetros de desempeño OPM de las arquitecturas PON en 5Km: a) Potencia de Recepción Voz y datos, b) Potencia de Recepción Video, c) Factor Q Voz y datos, d) Factor Q Video, e) Jitter Voz y datos, f) Jitter Video, g) BER Video. 86
Figura 4.21 Resultados de los parámetros de desempeño OPM de las arquitecturas PON en 10 Km: a) Potencia de Recepción Voz y datos, b) Potencia de Recepción Video, c) Factor Q Voz y datos, d) Factor Q Video, e) Jitter Voz y datos, f) Jitter Video, g) BER Video. 88
Figura 4.22 Resultados de los parámetros de desempeño OPM de las arquitecturas PON en 15 Km: a) Potencia de Recepción Voz y datos, b) Potencia de Recepción Video, c) Factor Q Voz y datos, d) Factor Q Video, e) Jitter Voz y datos, f) Jitter Video, g) BER Video. 89
Figura 4.23 Resultados de los parámetros de desempeño OPM de las arquitecturas PON en 5Km: a) Potencia de Recepción Voz y datos, b) Potencia de Recepción Video, c) Factor Q Voz y datos, d) Factor Q Video, e) Jitter Voz y datos, f) Jitter Video, g) BER Video. 91

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Degradaciones Ópticas [21] 23
Tabla 2.1 Niveles de potencia para GPON [60] 44
Tabla 2.2 Niveles de potencia para XGPON [73] 47
Tabla 2.3 Perdidas de trayectoria de las clases de ODN [73] 47
Tabla 2.4 Niveles de potencia para NG-PON2 [76] 49
Tabla 2.5 Bandas para NG-PON2 [75] 50
Tabla 2.6 Características Generales de las principales Arquitecturas PON 51
Tabla 3.1 Características del Transmisor 60
Tabla 3.2 Características del Receptor 61
Tabla 3.3 Características Corning SSMF-28 61
Tabla 3.4 Características Generales 61
Tabla 3.5 Características Generales XG(S)-PON 62
Tabla 3.6 Características Generales NG-PON2 64
Tabla 3.7 Características Canales NG-PON2 64
Tabla 3.8 Características del Transmisor de la señal de Video. 66
Tabla 4.1 Datos Caneles NG-PON2 73
Tabla 4. Arquitecturas que destacan en los parámetros de desempeño a evaluar. 93
Tabla 4.. Resumen 94

Lista de Acrónimos

ADSL	*Asymmetric Digital Subscriber Line,* Línea de Abonado Digital Asimétrica
AES	*Advanced Encryption Standard,* Estándar de Cifrado Avanzado
AM-VSB	*Amplitud Modulation Vestigial Side Band,* Modulación de Amplitud con Banda Lateral Vestigial
APD	Avalanche Photodiode, Fotodiodo de Avalancha
APON	*Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network,* Redes Ópticas Pasivas con Modo de Transferencia Asíncrono
ATM	*Asynchronous Transfer Mode,* Modo de Transferencia Asíncrono
ATSC	*Advanced Television Systems Committee,* Comité de Sistemas de Televisión Avanzado
BER	*Bit Error Rate,* Tasa de Error de Bit
BGP	*Bandwidth Guaranteed Polling,* Sondeo de Ancho de Banda Garantizado
BPON	*Broadband Passive Optical Network,* Redes Ópticas Pasivas de Banda Ancha
CATV	*Cable Television,* Televisión por Cable
CM	*Cable Modem,* Cable Módem
CMTS	*Cable Modem Termination System,* Sistema de Terminación de Cable Módem
CNR	*Carrier to Noise Ratio,* Relación Portadora a Ruido
CO	*Central Office*, Oficina Central
CRC	*Cyclic Redundance Check,* Verificación de Redundancia Cíclica
CSMA/CD	*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection,* Acceso Múltiple con Escucha de Portadora y Detección de Colisiones
CSO	*Composite Second Order,* Composición de Segundo Orden
CTB	*Composite Triple Beat,* Composición de Triple Batido
DBA	*Dynamic Bandwidth Assignment,* Asignación de Ancho de Banda Dinámico
DFB	*Distributed feedback laser,* Láser de Retroalimentación Distribuida
DMIF	*Delivery Multimedia Integration Framework,* Marco de Integración de Entrega Multimedia
DSL	*Digital Subscriber Line,* Línea de Abonado Digital
DTE	*Data Terminal Equipment,* Equipo Terminal de Datos
DVB	*Digital Video Broadcasting,* Difusión de Video Digital
EDFA	*Erbium Doped Fiber Amplifier,* Amplificador de Fibra Dopada de Erbio
EFM	*Ethernet in the First Mile,* Ethernet en la Primera Milla
EMS	*Element Management System,* Elemento de Gestión del Sistema
EPON	*Ethernet Passive Optical Network,* Redes Ópticas Pasivas Ethernet
ERFC	*Complementary Error Function,* Función Complementaria de Error
ESNR	*Electrical Signal To Noise Ratio,* Relación Señal a Ruido Eléctrica
EVM	*Error Vector Magnitude,* Magnitud de Vector de Error
FCAPS	*Fault, Configurations, Accounting, Performance and Security,* Fallos, Configuraciones, Contabilidad, Rendimiento y Seguridad

FCS	*Frame Check Sequence,* Secuencia de Verificación de Trama
FEC	*Forward Error Correction,* Corrección de Errores Hacia Adelante
FSAN	*Full Service Access Network,* Red de Acceso de Servicio Completo
FTTB	*Fiber To The Building,* Fibra Hasta el Edificio
FTTC	*Fiber To The Curb,* Fibra Hasta la Acera
FTTH	*Fiber To The Home*, Fibra Hasta el Hogar
FTTN	*Fiber To The Neighborhood,* Fibra Hasta el Barrio o Vecindario
FTTx	*Fiber To The x,* Fibra hasta la *x*
GEM	*GPON Encapsulation Method,* Método de Encapsulamiento GPON
GEPON	*Gigabit Ethernet Passive Optical Network,* Red Óptica Pasiva Gigabit Ethernet
GFP	*Generic Framing Procedure,* Procedimiento de Entramado Genérico
GMII	*Gigabit Media Independent Interface,* Interfaz Gigabit Independiente del Medio
GPON	*Gigabit Capable Passive Optical Network,* Redes Ópticas Pasivas con *Capacidad de Gigabit*
GUI	*Graphic User Interface,* Interfaz Gráfica de Usuario
HDSL	*High Bit Rate Digital Subscriber Line,* Línea de Abonado Digital de Alta Velocidad
HDTV	*High Definition Television,* Televisión de Alta Definición
HFC	*Hybrid Fiber Coaxial,* Híbrido de Fibra y Coaxial
IDSL	*Integrated Services Digital Network Digital Subscriber Line*, Línea de Abonado Digital sobre la Red Digital de Servicios Integrados
IMD	*Intermodulation Distorsion,* Distorsión por Intermodulación
IP	*Internet Protocol,* Protocolo de Internet
IPACT	*Interleaved Polling with Adaptative Cycle Time,* Sondeo Intercalado con Ciclo de Tiempo Adaptativo
IPTV	*Internet Protocol Television,* Televisión Sobre Protocolo de Internet
IPTVCD	*IPTV Consumer Device,* Dispositivo IPTV del Consumidor
ISDN	*Integrated Services Digital Network,* Red Digital de Servicios Integrados
ISI	*Intersimbol Interference,* Interferencia Intersímbolo
ISO	*International Standards Organization,* Organización Internacional de Estándares
ISP	*Internet Service Provider,* Proveedor de Servicios de Internet
ITU	*International Telecommunication Union* – Unión Internacional de las Telecomunicaciones
LAN	*Local Area Network,* Red de Área Local
LLC	*Logical Link Control,* Control de Enlace lógico
LLID	*Logical Link ID,* Identificador de Enlace Lógico
MAC	*Medium Access Control,* Control de Acceso al Medio
MDI	*Medium Dependent Interface,* Interfaz Dependiente del Medio
MGCP	*Media Gateway Control Protocol,* Protocolo de Control de Pasarela de Medios
MPCP	*Multi point Control Protocol,* Protocolo de Control Punto a Multipunto
MPEG	*Moving Pictures Experts Group,* Grupo de Expertos en Imágenes en Movimiento
NRZ	*No Return To Zero,* No Retorno a Cero

NG-PON2	*New Generation PON 2,* Red de Nueva Generación PON 2
ODN	*Optical Distribution Network,* Red de Distribución Óptica
OFCOM	*Office of Communication,* Oficina de Comunicaciones
OLT	*Optical Line Terminal,* Terminal de Línea Óptico
ONT	*Optical Network Terminal,* Terminal de Red Óptico
ONU	*Optical Network Unit,* Unidad de Red Óptica
OPM	*Optical Performance Monitoring,* Monitoreo del Desempeño Optico
OSI	*Open System Interconnection,* Interconexión de Sistemas Abiertos
P2MP	*Point to Multipoint*, Punto-Multipunto
P2P	*Peer-to-peer*, Punto-Punto
PAL	*Phase Alternating Line,* Línea de Fase Alternada
PCS	*Physical Coding Sublayer,* Subnivel de Codificación Física
PLOAM	*Physical Layer-Operation and Maintenance,* Operaciones y Mantenimiento - Capa Física
PMA	*Physical Medium Attachment,* Subnivel de Unión con el Medio Físico
PMD	*Physical Medium Dependent,* Subnivel Dependiente del Medio Físico
P-OLT	*Packet OLT,* OLT de Paquetes
PON	*Passive Optical Network*, Red Óptica Pasiva
POTS	*Integrated Services Digital Network,* Red Digital de Servicios Integrados
PPV	*Pay Per View,* Pago por Ver
PSTN	*Public Switched Telephone Network,* Red Pública Telefónica Conmutada
QAM	*Quadrature Amplitude Modulation,* Modulación de Amplitud en Cuadratura
QoS	*Quality of Service*, Calidad del Servicio
RF	*Radio Frequency,* Radio Frecuencia
RS	*Reconciliation Sublayer,* Subnivel de Reconciliación
RTT	*Round Trip Time,* Tiempo de Ida y Vuelta
RZ	*Return To Zero,* Retorno a Cero
SBA	*Static Bandwidth Assignment,* Asignación Estática de Ancho De Banda
SCM	*Subcarrier Multiplexing,* Multiplexado de Subportadora
SDSL	*Symmetric Digital Subscriber Line,* Línea de Abonado Digital Simétrica
SDTV	*Standard Definition Television,* Televisión de Definición Estándar
SECAM	*Séquential Couleur á Mémoire,* Color Secuencial con Memoria
SHDSL	*Single Pair High Speed Digital Subscriber Line,* Línea de Abonado Digital de Alta Velocidad en un Solo Par
SLD	*Start LLID Delimiter,* Delimitador de Inicio de LLID
SMF	*Single Mode Fiber,* Fibra Monomodo
SNMP	*Simple Network Management Protocol,* Protocolo Simple de Gestión de Red
SNR	*Signal to Noise Ratio,* Relación Señal a Ruido
SPD	*Start Preamble Delimiter,* Delimitador de Inicio del Preámbulo
SPM	*Self-Phase Modulation,* Modulación de Fase Inducida
SPT	*Spectral Propagation Technique,* Técnica de Propagación Espectral

TDM	*Time Division Multiplexing,* Multiplexación por División de Tiempo
TDMA	*Time Division Multiple Access,* Acceso Múltiple por División de Tiempo
TS	*Time slot,* Intervalo de Tiempo
VBS	*Variable Bandwidth Simulation, S*imulación de Ancho de Banda Variable
VDSL	*Very High Bit Rate Digital Subscriber Line,* Línea de Abonado Digital de Muy Alta Velocidad
VoD	*Video on Demand,* Video bajo demanda
VoIP	*Voice over Internet Protocol,* Voz sobre Protocolo de Internet
V-OLT	*Video OLT,* OLT de Video
WDM	*Wavelength Division Multiplexer,* Multiplexor por División de Longitud de onda
XG-PON	*10 Gbit/s Passive Optical Network,* Redes ópticas pasivas con capacidad de 10 Gbit/s
XPM	*Cross-Phase Modulation,* Modulación de Fase Cruzada

Introducción

El crecimiento de las telecomunicaciones y la conectividad a redes inalámbricas ha permitido que el internet se integre a la vida cotidiana de las personas. Debido a esto, la demanda de servicios y aplicaciones multimedia tales como: videoconferencias, juegos de alta definición, televisión móvil, películas por pedido, aplicaciones de video interactivo, juegos, entre otras, se ha incrementado gradualmente, por lo que las empresas del sector se encuentran en la necesidad de implementar redes de acceso de banda ancha capaces de satisfacer las necesidades de los usuarios. Por lo que las redes de acceso implementadas por los operadores han venido aumentando su complejidad y su capacidad, debido a que los usuarios finales requieren un mayor ancho de banda para poder soportar la demanda de servicios. Algunos mecanismos de acceso como las líneas de abonado digitales (xDSL - *Digital Subscriber Line*) en cobre pueden satisfacer las necesidades pero no logran cubrir grandes distancias desde el operador hasta el usuario final, debido a esto los operadores han optado por extender sus redes de acceso en fibra lo más cercano posible al hogar, lo cual resulta una solución en cuanto a las tasas de transmisión y el ancho de banda requeridos por las aplicaciones y servicios mencionados anteriormente [1].

Las redes de acceso basadas en fibra han tomado gran relevancia en el mercado de las telecomunicaciones. Entre la que se puede destacar la Red Óptica Pasiva (PON - *Passive Optical Network)* la cual ofrece un gran ancho de banda, alta velocidad (hasta Gigabits por segundo (Gbps)), inmune a interferencias eléctricas, bajo requerimiento de energía, baja distorsión de la señal y bajo costo [2]. Debido a sus características, PON se ha comprometido con la expansión de la siguiente era tecnológica capaz de ofrecer arquitecturas con un gran ancho de banda y un costo reducido. Las cuales han venido evolucionando y siendo estandarizadas en los últimos años, a partir de esta evolución la Red de Acceso de Servicio Completo (FSAN - *Full Service Access Network*) se ha encargado de recopilar dichos estándares con el fin de brindar un camino a seguir frente a la implementación de las diferentes arquitecturas tales como: GPON (GPON-*Gigabit Passive Optical Network*) , XG-PON, XGS-PON y NG-PON 2 [3].

Con lo mencionado anteriormente, el presente trabajo de grado busca realizar un análisis del desempeño óptico de diferentes arquitecturas PON, bajo ciertos parámetros de diseño de los cuales se profundizará y se explicarán detalladamente en el desarrollo del documento, con el fin de sentar las bases para el estudio comparativo de las arquitecturas recopiladas por FSAN.

Con el fin de abordar los temas necesarios para el desarrollo de este trabajo de grado, el contenido consta de 5 capítulos que se distribuyen de la siguiente manera:

Capítulo 1. Marco Teórico

En el primer capítulo se realiza una recopilación de las generalidades teóricas de las redes de acceso PON, tales como las técnicas de multiplexación, principales arquitecturas y topologías. De igual forma se incluyen conceptos generales de la evaluación del desempeño óptico con el fin de comprender las degradaciones ópticas que afectan la calidad de servicio de las redes de acceso PON.

Capítulo 2. Caracterización de las arquitecturas PON definidas por FSAN

En el segundo capítulo se busca caracterizar las arquitecturas PON definidas por FSAN y lo que ha llevado a la evolución de estas, de igual forma se realiza la caracterización de una arquitectura PON con el fin de comprender de manera más específica los elementos que la componen y el funcionamiento lógico como técnicas de multiplexación o codificación, finalmente se llevará a cabo una descripción de GPON, XG-PON, XGS-PON y NG-PON2 con sus parámetros de diseño correspondientes.

Capítulo 3. Metodología de desarrollo y simulación

Se describe la metodología de desarrollo y su aplicación a la simulación, también incluye el estudio previo de la herramienta de simulación OptSim. Finalmente, se realiza el modelo conceptual de la simulación, y se definen las redes PON como un modelo (abstracción de la realidad), realizando el diseño de la simulación en diferentes escenarios, en el entorno que ofrece la herramienta software OptSim para realizar el monitoreo de las señales ópticas.

Capítulo 4. Simulación y Evaluación del desempeño de las Arquitecturas PON

Se implementan los escenarios de simulación con el fin de determinar el comportamiento de las arquitecturas frente a la variación de algunos de sus parámetros de diseño, se analizan los resultados y las conclusiones de la simulación.

Capítulo 5. Conclusiones, Recomendaciones y Trabajo futuro

En el capítulo final se realizan las conclusiones, recomendaciones y perspectivas a futuro, acerca del estudio comparativo, obtenido en el desarrollo del trabajo de grado.

1 Capítulo I. Marco Teórico.

En el presente capitulo se describen las generalidades de las redes de acceso PON, tales como las técnicas de multiplexación, principales arquitecturas, y topología de estas redes. De igual forma se incluyen conceptos generales de la evaluación del desempeño óptico, con el fin de comprender cómo las degradaciones ópticas afectan la calidad de servicio de las redes de acceso PON.

1.1 Redes Ópticas Pasivas

PON hace referencia a una red de acceso óptico y como se puede observar en la Figura 1.1 Arquitectura de una red PON [4] emplea una topología punto a multipunto, elementos pasivos (lo que permite a PON ser eficiente desde el punto de vista costo-eficiencia) y divisores ópticos (*Splitter*) con el fin de llevar datos desde un único punto de transmisión hasta cada uno de los diferentes destinos, simultáneamente y en las direcciones ascendente y descendente. Los sistemas PON consisten en un Terminal de Línea Óptica (OLT - *Optical Line Terminal*) en la oficina central del proveedor de servicios y su función principal es convertir, enmarcar, transmitir las señales y orientar la multiplexación para las diferentes Terminales de Red Óptica (ONT-*Optical Network Terminal*) donde se encuentra el usuario final. La ONT es la encargada de convertir las señales ópticas que se transmiten a través de la fibra en señales eléctricas, para después enviarlas a los suscriptores, de igual forma también pueden enviar y preparar diferentes tipos de datos provenientes del usuario para enviarlos de forma ascendente a la OLT. Finalmente, el último componente de la red PON es el Splitter el cual recibe la señal óptica de la OLT y la divide en múltiples señales hacia cada una de las ONTs [4].

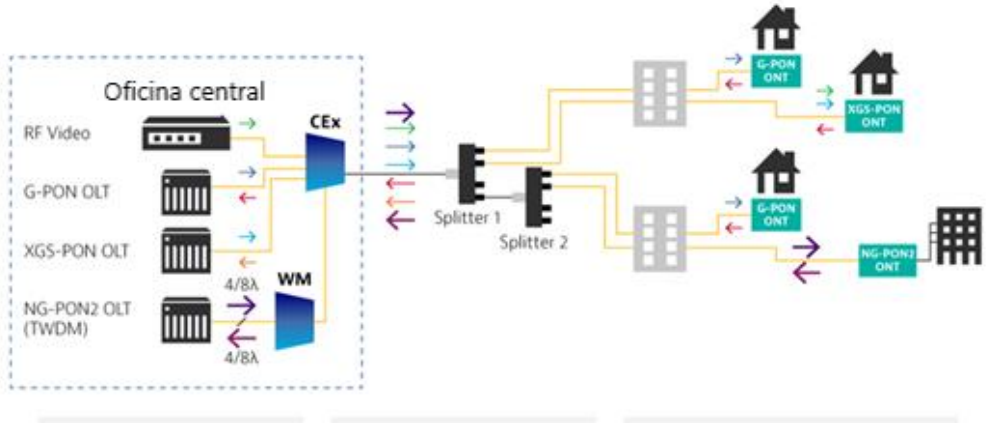


Figura 1.1 Arquitectura de una red PON [4]

Las redes PON fueron estandarizadas en 1998 en la especificación Red óptica Pasiva de Modo de Transferencia Asíncrona (ATM-PON - *Asynchronous Transfer Mode PON*) G.983.1, la cual fue reemplazada posteriormente por el estándar del Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-T) G.984 para GPON.Técnicas de Multiplexación

Las redes PON utilizan el mismo hilo de fibra tanto para el canal de subida como para el de bajada, por lo que los Splitter ópticos se comportan como un combinador. La forma en que se logra esta combinación es mediante dos técnicas de multiplexación que se han venido utilizando en el sector de las telecomunicaciones desde hace algún tiempo, estas son: Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*) y Multiplexación por División de Tiempo (TDM - *Time Division Multiplexing*) [4]. A continuación, se explica de manera breve en qué consisten estas dos técnicas, más adelante se explicará el proceso detallado dentro del funcionamiento de las redes PON.

- **WDM**

  Permite el tráfico bidireccional a través de una sola fibra utilizando una longitud de onda diferente en cada dirección del tráfico. WDM es atractiva para la transmisión de datos en las redes PON debido a sus ventajas como alto ancho de banda, fácil gestión, seguridad y su operabilidad con componentes pasivos [5]. A cada suscriptor se le asigna una longitud de onda individual y esta no se comparte con los otros suscriptores, como resultado de esto, se puede manejar cada canal o portadora con protocolos totalmente distintos (Transparencia al protocolo). Adicionalmente cada usuario puede utilizar la capacidad completa del canal la cual es superior a 100 Gbps con una única longitud de onda [6]. Es por esto que WDM se ha considerado una solución definitiva para la red de acceso óptico capaz de proporcionar un ancho de banda bastante considerable a cada usuario, sin embargo, la implementación masiva de esta tecnología se considera bastante costosa.

- **TDM**

  Este tipo de multiplexación permite el tráfico bidireccional de manera independiente a través de una sola fibra mediante el flujo de datos en diferentes instantes de tiempo. En las redes PON se utiliza TDM para el enlace de bajada y TDMA (TDMA - *Time-Division Multiple Access*) para el enlace de subida. En la actualidad TDM-PON es la solución de acceso óptico que más se ha desplegado por todo el mundo, la cual es capaz de proporcionar hasta 100 Mb/s a cada usuario final, sin embargo los servicios y el crecimiento de la red, demandan una capacidad mucho mayor [6].Arquitecturas PON

Actualmente las clases que dominan PON son Red PON con capacidad de Gigabit (GPON) y Ethernet sobre PON (EPON-*Ethernet Passive Optical Network*). Las cuales utilizan TDM y canales de longitud de onda independiente para los enlaces de subida y bajada.

Sin embargo, el creciente desarrollo de aplicaciones multimedia, juegos en línea, videoconferencias en alta definición, telemedicina, entre otras, ocasionó el incremento del ancho de banda y el tráfico en las redes de acceso ópticas, permitiendo la evolución de arquitecturas PON para satisfacer las demandas de los últimos servicios mencionados. Con la evolución de las redes PON ha sido necesaria la estandarización de estas por lo que la UIT-T y el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE- *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) han desarrollado una gran cantidad de estándares. El grupo encargado de recopilar y organizar estos estándares es FSAN, el cual brinda un camino a seguir en cuanto a cuáles estándares deberían ser tenidos en cuenta al momento de realizar una implementación de las arquitecturas. Dentro de estas arquitecturas se tienen:

- **GPON**

  Utiliza protocolos que se basan en IP, desarrollada y estandarizada por la UIT-T, se destaca por ser flexible en cuanto a los tipos de tráfico (voz, internet y televisión) y su método de encapsulación es capaz de empaquetar IP, Ethernet, VoIP, entre otros tipos de datos. La longitud de onda en el enlace de bajada es de 1490 nm y en el enlace de subida es de 1310 nm, con una velocidad de 2.4Gbps y 1.2Gbps respectivamente [7].

- **EPON**

  Estandarizado por la IEEE para lograr una operación óptima con dispositivos Ethernet, por lo que su implementación es mucho más económica. EPON puede garantizar velocidades simétricas de hasta 1.25 Gbps y un alcance de hasta 40 km según la relación de división. Debido a que se trabaja con longitudes de onda similares a GPON estas no pueden ser implementadas en la misma red PON [7].

- **10G-EPON**

  Estándar IEEE 802.3av avanzado de EPON, que logra aumentar la velocidad a 10 Gbps de manera simétrica. Adicional a ello trabaja en longitudes de onda diferentes a EPON, 1577 nm para el enlace de bajada y 1280 nm para el enlace de subida, por lo que le permite la interoperabilidad con las dos arquitecturas ya mencionadas en una red PON compartida [7].

- **XG(S)-PON**

Alcanza velocidades de 10 Gbps en el enlace de bajada y de 2.5 Gbps en enlace de subida. Comparte características de GPON en su primera generación, como la convención de formatos de datos, pero las longitudes de onda se desplazan a 1577 nm y 1280 nm para el flujo ascendente y descendente respectivamente. Con lo que se permite utilizar simultáneamente con las otras arquitecturas en una misma red PON. Esta arquitectura evolucionó a XGS-PON que opera en las mismas longitudes de onda de XG-PON, pero proporciona 10 Gbps simétricos, es decir en los dos enlaces.

- **NG-PON2**

Las Redes Ópticas Pasivas de Nueva Generación 2 (NG-PON2) son la evolución de PON, se desarrolló en el 2011, lo que condujo a un mayor alcance y capacidad en términos de usuarios y velocidad de transmisión de datos. Utiliza múltiples longitudes de onda para poder brindar un servicio simétrico de 40 Gbps [8]. NG-PON2 es el resultado de la demandante capacidad que requieren los últimos servicios de telecomunicaciones, y una solución viable para las nuevas redes que prometen ser tendencia en el mercado, como las redes inalámbricas 5G. Topologías de las redes PON

La topología se relaciona con la distribución y la conexión de enlaces mediante nodos. Para planificación y el diseño de las redes, algunas topologías solo se centran en la conexión de cada uno de los dispositivos de la red, mientras que otras tratan diferentes aspectos como la disponibilidad de la red y la redundancia de esta [9]**.** En la arquitectura de las redes de acceso PON se encuentran las siguientes topologías:

- **Topología Punto a Punto (P2P – *Peer-to-peer*)**

Se trata de un enlace directo entre el OLT y las ONUs mediante la fibra óptica, debido a su elevado costo no es una conexión muy utilizada para llevar la fibra hasta el hogar. El costo de esta topología aumenta con el número de ONUs o abonados, por lo que este tipo de conexión solo se ve contratado normalmente en empresas que requieren de un enlace dedicado para el servicio de acceso a internet [10].

- **Topología Punto a Multipunto (P2MP – Point to Multipoint)**

Este es el enlace predilecto para las redes de acceso PON, ya que los usuarios comparten un mismo tendido de fibra óptica, donde la señal que llega al Splitter se distribuye hacia las diferentes ONUs. Esta topología se incorpora en los estándares a las redes GPON y EPON. [9]

- **Topología Estrella**

  Consiste en la conexión del nodo central con un Splitter mediante un solo tendido de fibra óptica, el cual se encarga de dividir la señal a cada destino. Los divisores ópticos requieren de funciones específicas para la privacidad y seguridad, como protocolos de acceso múltiple o técnicas de multiplexación. La topología en estrella permite realizar de una manera eficaz y simple las modificaciones a la red, sin embargo, un fallo del enlace principal o del Splitter implicaría la caída completa del resto de abonados que dependan de ese divisor óptico [10].Redes de acceso de fibra óptica hasta el lugar x (FTTx - *Fiber To The x*)

Para proporcionar la conectividad de banda ancha en la red de acceso a las múltiples ONUs, hasta un punto cercano al usuario final, existe lo que se conoce como FTTx [11]. Este es un término genérico que se utiliza para describir una variedad de opciones de arquitecturas basadas en fibra óptica, especialmente para los últimos tramos de la red o lo que se conoce como la última milla. Al implementar la fibra óptica lo más cercano posible al usuario final, se puede aprovechar aspectos como la transmisión, conectividad y capacidad, con lo cual se disminuye el riesgo de que se produzcan cuellos de botella en las redes basadas en cobre convencionales. A continuación, se describen estas variaciones o arquitecturas de FTTx[12] :

- **Fibra hasta el hogar (FTTH - *Fiber To The Home*)**

  Se trata del enlace directo de fibra óptica hasta el gabinete de conexiones del abonado. Esto permite ofrecer el ancho de banda más alto posible a los suscriptores de la vivienda, por lo que también supone un costo elevado de instalación

- **Fibra hasta la antena (FTTA - *Fiber To The Home Antenna*)**

  Es una arquitectura de red en la cual se implementa la fibra óptica para la distribución de las señales de una estación base de banda ancha a un cabezal de radio remoto (RRH – *Radial Remote Head*). FTTA es un elemento esencial para las futuras generaciones de red inalámbricas y la tecnología 5G.

- **Fibra hasta la acometida del edificio (FTTB - *Fiber To The Home Building*)**

  Arquitectura similar a la FTTH, con la diferencia de que la terminación de la fibra se realiza en un domicilio que no es un lugar privado, de esta manera la implementación por fibra se puede hacer de manera escalable, en menor tiempo, menor costo y aprovechando la infraestructura de la red del edificio del abonado. El término FTTP o fibra hasta las instalaciones, se puede emplear como un término genérico para designar arquitecturas FTTH y FTTB cuando la red óptica incluye tanto edificios como viviendas.

- **Fibra hasta el nodo (FTTN - *Fiber To The Home Node*)**

  Los enlaces de fibra óptica terminan en un nodo central próximo a los domicilios o edificios de los usuarios finales. Desde el nodo hasta la ubicación del abonado, se implementa la red de acceso en cobre o coaxial. La capacidad y la distancia del canal se ven afectadas y deben ser tenidas en cuenta para tener menor probabilidad de afectar la velocidad de forma significativa.

- **Fibra hasta la cabina (FTTC – *Fiber To The Cabinet*)**

  En este caso hablamos de un modelo en el que la red de fibra óptica llega a un stand ubicado cerca de las casas y oficinas donde ha de usarse esta tecnología. Estos puntos de conexión, también llamados armarios o cabinas de telecomunicaciones, generalmente se encuentran a una distancia de 300 o 500 metros de los destinos finales.

Las redes de acceso basadas en fibra pueden ser implementadas con cualquiera de las arquitecturas mencionadas anteriormente, sin embargo, cada una de las diferentes arquitecturas de FTTx aportan una serie de ventajas y características, las cuales se hacen más adecuadas o convenientes unas sobre otras según los requerimientos del abonado y las capacidades del operador. En la Figura 1.2 se puede observar cada una de las arquitecturas mencionadas.

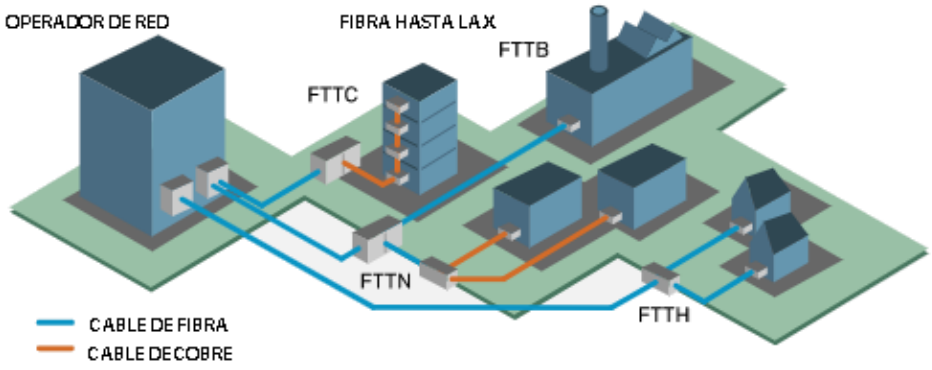


Figura 1.2 FTTx [13]Evaluación del desempeño

El análisis del desempeño óptico es esencial para garantizar el funcionamiento de alta calidad de cualquier sistema de fibra óptica. De hecho, una red óptica eficiente y confiable, como una red PON, depende de las pruebas y mediciones de desempeño adecuadas [14].

Dentro del análisis del desempeño óptico se encuentran dos grandes grupos de parámetros, los cuales son: Degradaciones Ópticas y Parámetros de Monitoreo Óptico [15].

Entre las degradaciones ópticas se puede encontrar la Dispersión cromática, Dispersión del modo de polarización, Degradación de la relación señal a ruido óptica (OSNR - *Optical Signal To Noise Ratio*), No linealidad de la fibra, entre otras. Teniendo en cuenta estas degradaciones, los Parámetros de Desempeño óptico (OPM - *Optical Performance Monitoring*) son un medio potencial que ayuda a mantener el funcionamiento de las redes PON, y garantizar una buena calidad de servicio [16].

1.1.1 Degradaciones ópticas

De manera general se tienen tres efectos que afectan la transmisión de la luz mediante la fibra óptica, estos son [17]:

- Atenuación: pérdida de la potencia de la luz o decaimiento de la fuerza de la señal, a medida que la señal se propaga a través de la fibra.

- Dispersión: ensanchamiento de los pulsos de luz a medida que viajan por la fibra.

- Efectos no lineales: efectos acumulativos producto de la interacción de la luz con el material por el cual viaja, como resultado se ocasionan cambios en la onda de luz e interacciones entre la misma.

Cada uno de los efectos mencionados anteriormente limitan la distancia máxima de transmisión y la velocidad de bits, y se presentan en diferentes fenómenos los cuales se describen a continuación [14]:

- **Dispersión cromática (CD - *Chromatic Dispersion*)**

  Este fenómeno se produce por el cambio de medio del pulso luminoso (generado por el transmisor óptico), que descompone el ancho espectral en las longitudes de onda que lo componen. Estas longitudes de onda viajan a velocidades distintas sobre el núcleo de la fibra, llegando al fotodetector en tiempos diferenciados, resultando en una forma de onda distinta a la original.

- **Dispersión del modo de polarización (PMD-*Polarization Mode Dispersion*)**

  La PMD tiene un origen físico, es un fenómeno conocido como birrefringencia. En esencia, se trata de un desfase producido en las constantes de propagación, respecto de sus ejes ortogonales. Este parámetro es muy difícil de medir y compensar, y depende de las condiciones físicas del cable [18].

Es de destacar que la dispersión cromática y la dispersión del modo de polarización afectan las comunicaciones de fibra óptica de larga distancia mayores a 50 km y que operan a más de 10 Gbps.

- **No linealidades de la fibra**

Los efectos no lineales se pueden presentar cuando uno o más campos ópticos con varias longitudes de onda se propagan por la misma fibra óptica, con valores elevados de potencia y velocidad de transmisión [19]. Los siguientes efectos no lineales tienden a degradar significativamente la integridad de la señal: [20]

- **La modulación de Auto-Fase (SPM - *Self-Phase Modulation*):** Se presenta debido a que el índice de refracción de la fibra tiene un componente que depende de la intensidad de la señal; este índice de refracción no lineal induce un desplazamiento de fase que es proporcional a la intensidad del pulso. Es por esto que las diferentes partes del pulso se ven sometidas a diferentes cambios de fase, lo que da lugar a que se produzca un "*chirp*"[1] en el pulso, lo que también modificará los efectos de la dispersión cromática.

- **Modulación de Fase Cruzada (XPM - *Cross-Phase Modulation*):** Se genera cuando dos o más canales ópticos son transmitidos simultáneamente a través de la fibra óptica, usando la técnica de WDM, debido a que el índice de refracción efectivo, para una onda incidente, no solo depende de la intensidad de esa onda, sino también de la intensidad de cualquier otra onda que se propague a través del canal, debido a la interacción entre ellas. Cuando dos o más señales se propagan simultáneamente, el impacto de XPM es similar a SPM

- **Mezcla de Cuarta Onda (FWM - *Four-Wave Mixing*):** Cuando dos o más señales ópticas de frecuencias centrales diferentes se propagan en una fibra, se puede dar una mezcla de señales que genera nuevos componentes de interferencia de la señal óptica; esto debido a la dependencia del índice de refracción de la fibra con la potencia de la señal, lo que causa un medio no lineal de propagación y crea las condiciones para la mezcla de la señal.

- **Dispersión estimulada de Brillouin:** El fenómeno usado para medir temperatura y deformación a lo largo de una fibra óptica, reside en la interacción entre la luz que viaja por un medio y el medio en sí. Cuando la luz viaja por la fibra, la mayor cantidad continua adelante y una parte de ella es reflejada continuamente. El estudio en frecuencia de esa

[1] Fenómeno en el láser donde la longitud de onda de la luz emitida cambia durante la modulación.

luz reflejada y el tiempo de tránsito hace posible la determinación de la magnitud del evento y su localización a lo largo de decenas de kilómetros.

- **Efecto de dispersión Ramán:** El efecto no lineal que afecta a la monitorización de la fibra en servicio es el efecto de dispersión Raman. Este efecto transfiere la energía y, por tanto, la longitud de onda entre dos señales que se desplazan por la misma fibra, atenuando y por lo tanto degradando la señal.

La Figura 1.3, muestra el resumen de los efectos de dispersión lineales y no lineales que afectan la transmisión de señales en la fibra óptica.

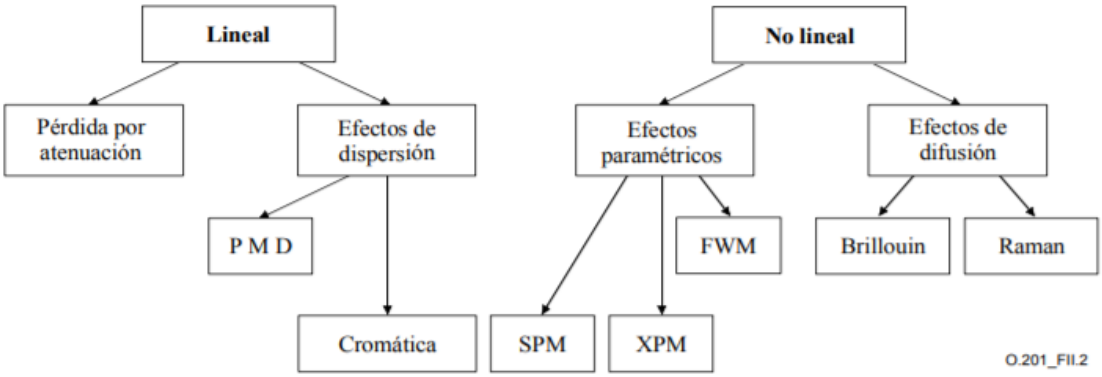


Figura 1.3 Efectos de dispersión en la fibra [20]

En la Tabla 1.1 se enumeran y categorizan las principales degradaciones de los sistemas en la capa óptica que limitan la capacidad del sistema para transportar información.

Teniendo en cuenta la Tabla 1.1, todas estas degradaciones pueden causar graves daños en la señal óptica hasta un nivel en el que el receptor ya no puede detectar los datos con una tasa de error razonable. A continuación, se definen los niveles de los efectos de estas degradaciones [21]:

- Bajo: cuando la probabilidad de que el efecto sea lo suficientemente grave como para causar una penalización de x dB es decir un evento cada 10 años.

- Medio: cuando la probabilidad de que el efecto sea lo suficientemente grave como para causar una penalización de x dB es decir un evento por año.

- Elevado: cuando la probabilidad de que el efecto sea lo suficientemente grave como para causar una penalización de x dB es decir 10 eventos por año.

Variación de la Degradación	Frecuencia de Ocurrencia Relativa en sistemas de hasta 10 Gbps	Frecuencia de Ocurrencia Relativa en sistemas de 40 Gbps y 100 Gbps	Descripción
Atenuación	Elevada	Elevada	N/A
Variaciones de la Potencia del Canal Óptico debido a Variaciones de Ganancia	Elevada	Elevada	N/A
Desviación de la Frecuencia (o Longitud de Onda) del Valor Nominal	Elevada	Elevada	Rec. ITU-T G.692
Dispersión por Modo de Polarización (PMD) (primer orden y órdenes superiores)	Media	Baja	Apéndice II/G.663
Mezcla de Cuatro Ondas (FWM)	Media	Media	Apéndice II/G.663
Ruido de Emisión Espontánea Amplificada (ASE) en Amplificación Óptica	Media	Media	Apéndice II/G.663
Dispersión Cromática	Media	Baja	Apéndice II/G.663
Pendiente de Dispersión Cromática	Media	Baja	Recs. ITU-T G.652, G.653, G.655
Reflexiones	Media	Media	Apéndice III/G.663
Ruido de Láser	Media	Media	
Diafonía entre Canales	Media	Media	Sup. ITU-T 39
Diafonía Interferométrica	Media	Media	Sup. ITU-T 39
Modulación de Fase Cruzada (XPM)	Baja	Baja	Apéndice II/G.663
La modulación de Auto-Fase (SPM)	Baja	Baja	Apéndice II/G.663
Modulación de polarización cruzada (XPolM)	Baja	Baja	Apéndice II/G.663
Difusión Estimulada de Brillouin (SBS)	Baja	Baja	Apéndice II/G.650.2, Apéndice II/G.663
Difusión Estimulada de Raman (SRS)	Baja	Baja	Apéndice II/G.663

Tabla 1.1 Degradaciones Ópticas [21]

1.1.2 Parámetros de Desempeño Óptico

Los parámetros ópticos que se pueden medir utilizando la tecnología actual en sistemas de transmisión óptica son [21]:

- Longitud de onda de canal.
- Potencia de canal.
- Potencia total.
- Factor de Calidad (factor Q) y Tasa de Error de Bit (BER- *Bit Error Rate*).
- Relación Señal a Ruido Óptico[2]

[2] Cuando no está presente una conformación de ruido significativa.

Para los parámetros de monitoreo óptico, la longitud de onda de cada canal es indispensable, ya que sin ella no sería posible trasportar información. Una vez haya sido asignada una longitud de onda, la BER junto con la OSNR se convierten en parámetros importantes que brindan información relevante en cuanto a la calidad de la señal óptica o desempeño del sistema, y finalmente la potencia por canal se constituye en un parámetro de monitoreo relevante para obtener información adicional del canal [15]

1.1.3 Técnicas de OPM

Los avances en las telecomunicaciones han permitido una caracterización más precisa de las señales ópticas, todo esto ha posibilitado que se aumente la capacidad de transmisión utilizando la amplitud, la fase y la polarización de las ondas ópticas para enviar información a velocidades de datos cada vez mayores. No obstante, a mayores velocidades de transmisión, incluso una débil deficiencia en el enlace podría distorsionar gravemente algunas de las propiedades de las ondas ópticas que a su vez afectarían la capacidad de información. Para gestionar la red de comunicaciones con mayor seguridad y plena utilización es necesario un enfoque integral de OPM. Esto significa desarrollar un conjunto de mediciones, métodos y herramientas que, a través de la metrología, permiten satisfacer los exigentes requisitos que deben cumplir las redes ópticas en la actualidad [16].

OPM puede realizarse midiendo los cambios en los datos y determinando los cambios "en tiempo real" resultantes de diversas deficiencias, de manera que un cambio en un efecto particular cambiará un parámetro medido. Para ello se pueden emplear:

- Las técnicas en el dominio del tiempo: las cuales se basan en la observación de varias muestras tomadas a una distancia específica de la red de fibra para luego realizar el análisis del efecto de degradación en esa señal muestreada lo cual proporciona el cálculo general del efecto de degradación de toda la señal.

- Las técnicas en el dominio de la frecuencia: estas son más precisas que las técnicas en el dominio del tiempo y se clasifican en dos categorías, espectro óptico y espectro de Radio Frecuencia (RF- *Radio Frequency*) , el análisis de estos espectros permite monitorear cambios en la potencia de un tono de RF o en la distribución de potencia del canal espectral [22].

A continuación, se listan las medidas de nivel físico para OPM, que se pueden realizar en una señal óptica [23]:

- Potencia promedio (por longitud de onda o agregado).
- Potencia pico.
- Forma del pulso/bit.
- Diagrama del ojo.
- Autocorrelación de la intensidad/campo (incluyendo el orden más alto).
- Espectro de amplitud de Potencia (espectro de RF).
- Espectro Óptico (longitud de onda).
- Histograma de Amplitud (síncrono y asíncrono).

Es importante aclarar que, si bien todas las medidas de desempeño óptico son importantes, en el presente trabajo de grado se van a trabajar las siguientes medidas que se profundizan en el Anexo A, las cuales logran definir de mejor manera cuál es el desempeño óptico de las arquitecturas a analizar, a continuación, se describen de manera general algunas de estos parámetros:

- **Diagrama del ojo**
  Un diagrama de ojo es simplemente una visualización gráfica de una señal de datos en serie con respecto al tiempo que muestra un patrón que se asemeja a un ojo [24]. Por lo anterior el diagrama de ojo permite analizar las formas de onda de los pulsos que se propagan en un enlace de comunicaciones, gracias a esto es posible apreciar la distorsión del canal, la severidad del ruido o interferencia y los errores de sincronismo en el receptor.

- **Espectro óptico**
  Una tecnología común para la monitorización de OSNR de canal es el método basado en el análisis del espectro óptico de la señal detectada. Los dispositivos sintonizables en longitud de onda para el monitoreo de OSNR de canal son filtros Fabry-Perot de fibra, filtros de rejilla Bragg de fibra, entre otras [14].

- **Potencia promedio**
  La potencia óptica a una longitud de onda determinada es el parámetro más básico en cualquier red de fibra. Otros parámetros o monitoreo de degradaciones dependerán de la medición de potencia óptica, por lo tanto, el monitoreo de potencia es el requisito básico para cualquier red óptica [14].

Como conclusión de este capítulo, se realiza una descripción teórica y generalizada de las redes ópticas pasivas, las tecnologías de multiplexación WDM y TDM; así mismo, se realiza una descripción de las redes de acceso FTTx, por último, se mencionaron los aspectos a tener en

cuenta para la evaluación del desempeño óptico y se mencionan las degradaciones a nivel físico que afectan las transmisiones ópticas. Todo esto con el fin de tener un panorama más claro a nivel teórico de lo que se va a desarrollar en el trabajo de grado.
En el siguiente capítulo se realiza una caracterización de las arquitecturas PON definidas por FSAN, las cuales son: GPON, XG-PON, XGS-PON y NG-PON2.

2 Capitulo ll. Caracterización de las arquitecturas PON definidas por FSAN.

En el presente capitulo se abarcan las arquitecturas PON definidas por FSAN y lo que ha llevado a la evolución de las mismas, de igual forma se realiza la caracterización de una arquitectura PON con el fin de comprender de manera más específica los elementos que la componen y el funcionamiento lógico como técnicas de multiplexación o codificación, finalmente se llevará a cabo una descripción de GPON, XG-PON, XGS-PON y NG-PON2 incluyendo sus planes de longitudes de onda, velocidades de transmisión, parámetros de potencia, entre otras.

2.1 Revisión de las arquitecturas PON definidas por FSAN

Gracias al auge que las redes PON han tenido desde hace unos años la ITU-T se ha encargado de estandarizarlas mediante diferentes recomendaciones, las cuales permiten tener una variedad importante de arquitecturas PON pero no se logra tener una visión clara en cuanto a cuales arquitecturas son las más relevantes y cuál es el camino a seguir para la evolución de las redes PON, porque si bien hay muchas direcciones en las que las redes podrían desarrollarse estas, deben reducirse a las que tienen más sentido para un mercado global [25]. Por lo tanto, apareció FSAN el cual es una organización conformada por operadores, laboratorios y proveedores de telecomunicaciones, que tiene como objetivo tomar las diferentes arquitecturas PON y trazar una hoja de ruta a seguir para su evolución, esta hoja de ruta transmite varios principios clave que han servido para orientar el desarrollo de estándares durante los últimos 10 años aproximadamente [25]. Dentro de esta hoja de ruta (ver Figura 2.1) FSAN en conjunto con la UIT-T proponen una evolución que arranca con una primera generación de PON conformada por la arquitectura GPON definida en la recomendación de la UIT-T G 984.1, después de esta generación, se evoluciona a la NG-PON1 el cual es un grupo de arquitecturas conformadas por XG-PON y XGS-PON que aparecieron para ofrecer bajos costos, amplia cobertura y una mayor capacidad con respecto a GPON, por último se llega a NG-PON2 la cual es una arquitectura basada en TWDM (TWDM – *Time Wavelenght Multiplexing*) que se plantea como el futuro de las Redes PON.

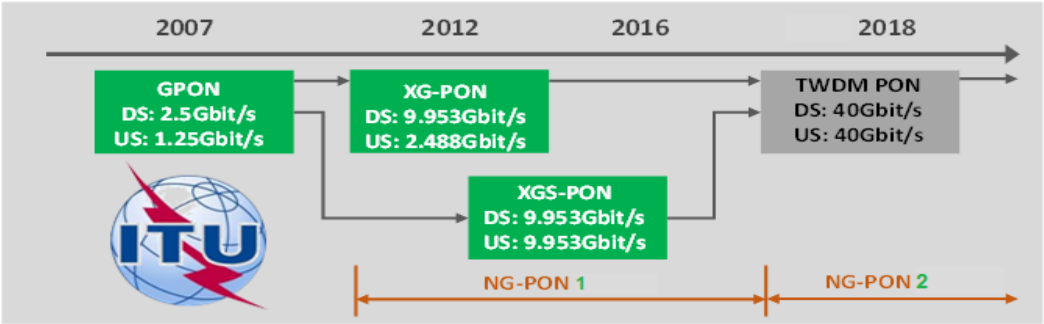


Figura 2.1 Ruta de evolución FSAN [26]

A continuación, se presentan las arquitecturas propuestas en la ruta de FSAN, las cuales son una evolución GPON y comienzan a ser tendencia en los últimos años para los operadores de telecomunicaciones, cuyos esfuerzos apuntan hacia el despliegue de redes 5G, el cuál es un factor importante que ha permitido la expansión de estas redes basadas en fibra [27].

El mercado de GPON ha experimentado un crecimiento significativo debido a los avances en las redes de fibra óptica, adicional a esto las redes de acceso basadas en GPON presentan una gran cantidad de características ventajosas, entre ellas se pueden destacar capacidades superiores a 1Gbps y distancias superiores a 20 km, sin que se pierda la calidad de servicio, por lo que ofrece gran fiabilidad [28]. Por tal motivo la arquitectura GPON se está utilizando ampliamente para servicios de banda ancha fija y se ha convertido en una solución masiva[29]. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, la creciente demanda y el exponencial crecimiento de los servicios de telecomunicaciones ha llevado a la evolución de GPON a lo que se conoce como XG-PON, la cual es considerada una de las soluciones más rentables para actualizar GPON debido a que pueden operar simultáneamente en una misma red óptica, por lo tanto XG-PON es una arquitectura clave para la próxima generación de sistemas de comunicación que pueden mejorar la confiabilidad y la velocidad de transmisión de datos siendo una solución prometedora para los cuellos de botella que se presenten en las redes de acceso de banda ancha [30].

Siendo mejoradas las capacidades de las redes basadas en XG-PON para el uso masivo del servicio triple-play (internet de alta velocidad, voz en tiempo real y video de alta calidad) sigue surgiendo una necesidad de capacidad enorme para acceder desde el abonado a las infraestructuras de red. Por lo que esta condición alienta a los operadores de telecomunicaciones a aumentar su capacidad mediante el uso de arquitecturas de red óptica pasivas simétricas con capacidad de 10 Gigabit (XGS-PON) con el cual se busca brindar servicios a una velocidad de 10 Gbps tanto para la dirección ascendente como la descendente [31].

Con las tres arquitecturas mencionadas anteriormente se logra dimensionar la evolución de las redes PON y el avance de estas. Los esfuerzos de las empresas del sector han llevado a desarrollar nuevos estándares como NG-PON2, con el cual se sigue incrementando la capacidad para ofrecer a los usuarios una tasa de bits alta y ultra alta [32]. En esta nueva generación de PON, es TWDM-PON la arquitectura selecciona por FSAN como una solución primaria, la cual tiene múltiples longitudes de onda para enlaces ascendentes y descendentes con transceptores sintonizables en las Terminales de Red Óptica (ONT-*Optical Network Terminal).* Así mismo se reconoce como una arquitectura prometedora para el diseño del *backhaul* móvil de 5G ofreciendo alta confiablidad, bajo costo de mantenimiento, alta capacidad y largo alcance de transmisión. Con TWDM-PON se cierra el paneo general de las arquitecturas a evaluar en el presente trabajo de grado, donde se considera que cada una de las seleccionadas (GPON, XG-PON, XGS-PON, NG-PON2) cumplen un papel importante en el mercado de las redes ópticas pasivas.

2.2 Caracterización General de una arquitectura PON

En general las redes de acceso óptico pasivo manejan una arquitectura en común definida por la recomendación UIT-T G983.1 para los sistemas de acceso óptico de banda ancha basados en PON, la cual sin importar la arquitectura (GPON, XG-PON, XGS-PON y NG-PON2) manejan los mismos elementos, por lo que se pueden desplegar sobre un mismo tendido de fibra óptica permitiendo la coexistencia de estas, teniendo únicamente variaciones en la capacidad de la arquitectura.

Las redes PON se definen con una arquitectura punto-multipunto la cual está compuesta por una sola línea de fibra óptica que se conecta a una Red de Distribución Óptica (ODN-*Optical Distribution Network*), que se encarga de distribuir la señal hasta N subscriptores o ONTs, tal como se puede observar en la Figura 2.2

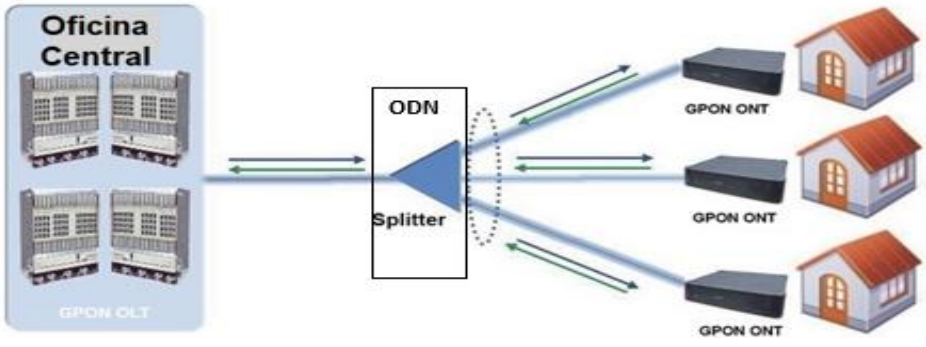


Figura 2.2 Arquitectura General PON

Es de destacar que el *Splitter* óptico pasivo que se puede observar en la Figura 2.2 se encuentra dentro de la ODN y dentro de esta red se puede tener uno o más *Splitter* conectados en cascada. Tal como se observa en la Figura 2.3, esta clase de variación donde en la ODN se tiene más de un *Splitter*, obedece a la necesidad que tenga el operador de tener cobertura en ubicaciones geográficamente dispersas, a menudo tiene sentido desplegar una cascada de divisores. En general el primer *Splitter* tiene una relación de división más baja, generalmente de 1:4 y la forma del área de servicio se puede adaptar dependiendo la ubicación de los *Splitter* [33].

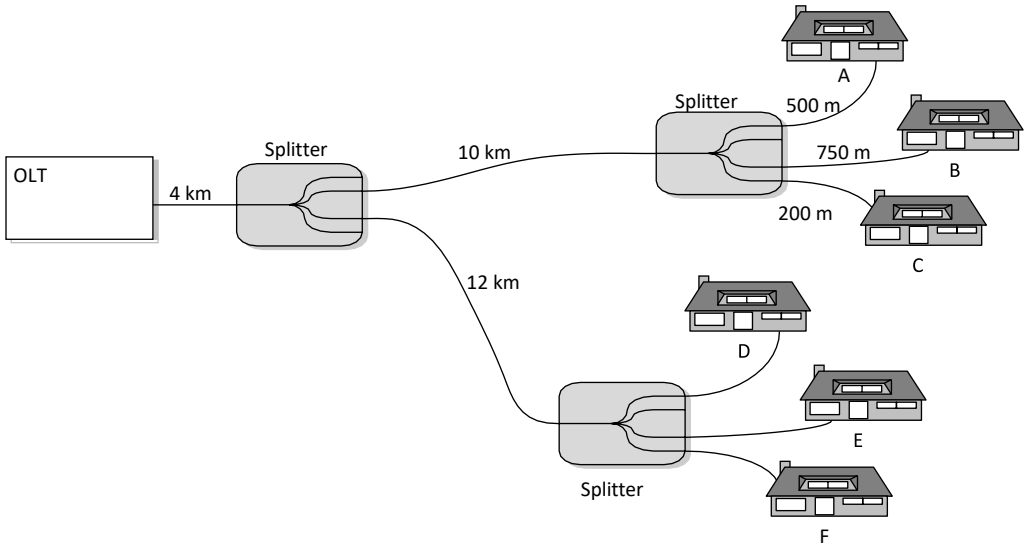


Figura 2.3 Arquitectura PON con 3 Splitters [33]Arquitectura PON

En el presente apartado, se describen los componentes de una red PON, tales como la OLT, la ONT, la ODN y los divisores ópticos.

A. Línea de Terminal Óptico (OLT)

La línea de Terminal Óptico es el punto de partida de la red óptica pasiva, que se conecta a un conmutador central a través de cables Ethernet. La función principal de la OLT es convertir, enmarcar y transmitir señales para la red PON y coordinar la multiplexación de terminales de la red óptica para la transmisión ascendente compartida [34]. De manera general la OLT transmite una señal descendente continua que transmite sincronización, control, administración y carga útil a las ONT. Teniendo esto en mente la OLT es el maestro de PON, ya que basándose en los compromisos de nivel de servicio y el tráfico ofrecido por las ONT, la OLT desarrolla continuamente un plan de asignación de capacidad ascendente [33].

La OLT tiene una serie de características que vale la pena recalcar las cuales son: [34]

- Un medio de multiplexación por división de longitud de onda para realizar una conversión electro / óptica de los datos en serie de la trama enlace de bajada y realizar una multiplexación por división de longitud de onda de estos.

- Un medio de generación de señales de control para realizar un protocolo de Control de Acceso a los Medios (MAC- *Media Access Control*), generar variables y señales de temporización utilizadas para los medios de procesamiento de tramas descendentes y ascendentes.

- Un medio para controlar el procesamiento de tramas en sentido descendente y en sentido ascendente utilizando las variables y señales de temporización generadas por las señales de control.

Por último, es de destacar que la OLT dentro de PON tiene dos direcciones flotantes: ascendente (obtener un tipo de distribución diferente de tráfico de datos y voz de los usuarios) y descendente (obtener tráfico de datos, voz y video de la red metropolitana o de una red de largo alcance y enviarlo a todos los módulos ONT por medio del ODN) [34].

B. Terminal de Red Óptico (ONT)

El Terminal de red óptico convierte las señales ópticas transmitidas a través de las fibras en señales eléctricas, las cuales se envían luego a suscriptores individuales. El ONT se encarga de enviar, agregar y preparar diferentes tipos de datos provenientes del cliente y enviarlos en sentido ascendente a la OLT, este proceso optimiza y reorganiza el flujo de datos para que se entreguen de manera más eficiente asignando el ancho de banda adecuado para que la entrega de datos fluya sin problemas [35]. Finalmente, el ONT puede conectarse mediante varios métodos y tipos de cable, como el cobre de par trenzado, coaxial, fibra óptica o de forma inalámbrica como el Wi-Fi.

Teniendo en cuenta lo anterior, hay una amplia variedad de diseños funcionales para los ONT y configuraciones de chasis las cuales están disponibles para adaptarse a las necesidades del cliente, el tamaño de un ONT puede variar desde una caja simple que puede estar unida al exterior o al interior de una casa hasta una unidad bastante sofisticada montada en un estante de electrónica interior para su uso en grandes aplicaciones, como complejos de apartamentos o edificios de oficinas. En el extremo de alto rendimiento, un ONT puede agregar y transportar varios tipos de tráfico de

información procedente del sitio del usuario y enviarlo de manera ascendente a través de una infraestructura PON de una sola fibra [36].

C. Red de Distribución Óptica (ODN)

La ODN es el medio de transmisión óptica para la conexión física de las ONT a las OLT. Dentro de la ODN, el cable de fibra óptica, los conectores de fibra óptica, los Splitter ópticos pasivos y los componentes auxiliares colaboran entre sí. La ODN tiene específicamente cinco segmentos que son: fibra de alimentación, punto de distribución óptica, fibra de distribución, punto de acceso óptico y fibra de caída. La fibra de alimentación comienza en el Marco de Distribución Óptica (ODF-*Optical Distribution Frame*) en la sala de telecomunicaciones de la oficina central y termina en el punto de distribución óptica para la cobertura de larga distancia. La fibra de distribución comienza desde el punto de distribución óptica hasta el punto de acceso y distribuye las fibras para las áreas a su alrededor. La fibra óptica de caída conecta el punto de acceso a los ONT, logrando la conexión con los hogares de los usuarios.
Por lo tanto, la ODN es el camino esencial para la transmisión de datos PON y su calidad afecta directamente el rendimiento, la confiabilidad y la escalabilidad del sistema PON [35].

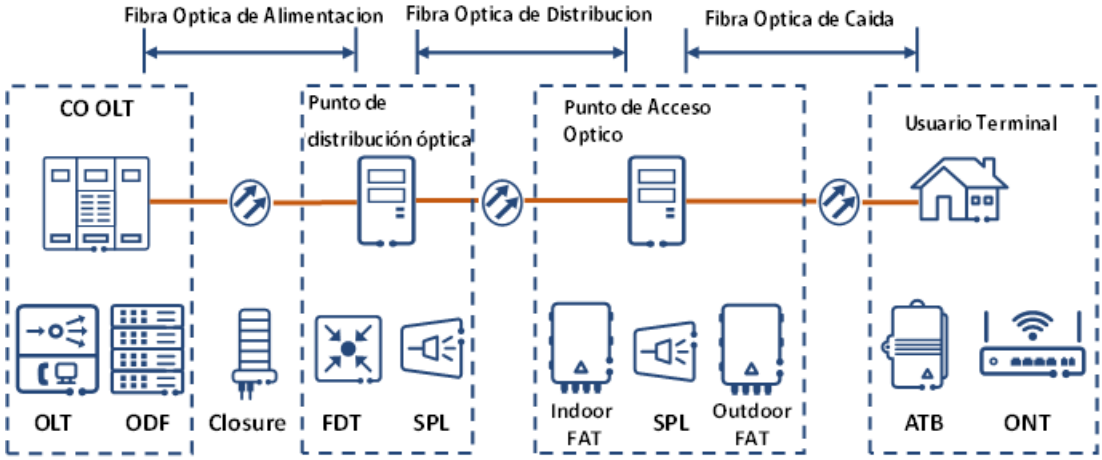


Figura 2.4 Arquitectura PON-ODN [35]

D. Divisores Ópticos (Splitter)

Los divisores ópticos juegan un papel importante en las redes PON donde una sola entrada óptica se divide en múltiples salidas, lo que permite compartir una sola interfaz PON entre muchos suscriptores. Los divisores ópticos no tienen componentes electrónicos activos por lo que no requieren energía para funcionar. Por lo general, se

instalan en cada red óptica entre el OLT y los ONT como se puede observar en la Figura 2.5.

El uso de divisores ópticos en PON permite al proveedor de servicios conservar fibras en la red troncal, esencialmente utilizando una fibra para alimentar hasta N usuarios finales [37].

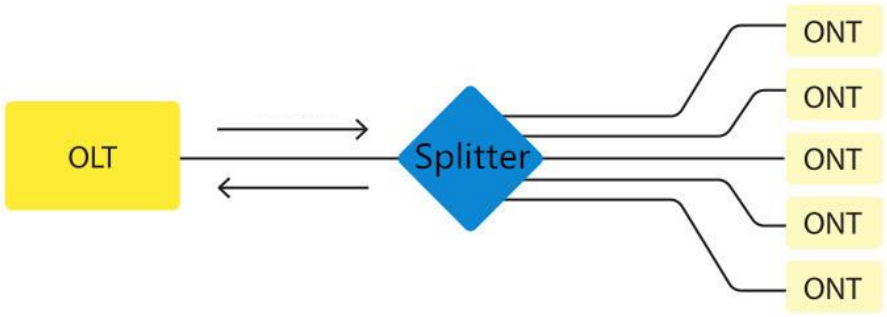


Figura 2.5 Ubicación Splitter [38]

2.2.1.1 Componentes y Elementos Ópticos de una Arquitectura PON

A. Transmisores Ópticos

Un láser es esencialmente un amplificador óptico encerrado dentro de una cavidad reflectante que hace que oscile mediante retroalimentación positiva. Los láseres de semiconductores utilizan semiconductores como medio de ganancia, mientras que los láseres de fibra suelen utilizar fibra dopada con erbio como medio de ganancia. Los láseres semiconductores son, por mucho, las fuentes de luz más populares para los sistemas de comunicación óptica, dado que son esencialmente uniones PN, se pueden fabricar en grandes volúmenes utilizando tecnología de semiconductores integrados muy avanzada [39].

Por lo anterior, los diodos láser basados en semiconductores se utilizan ampliamente como fuentes de luz en sistemas de comunicación por fibra óptica. Los principales tipos de láser aplicables a las PON son el láser Fabry-Perot (FP) y el Láser de Retroalimentación Distribuida (DFB- *Distributed feedback laser*) [33].

- **Fabry-Perot**.

Un láser FP se basa en la estructura de la Figura 2.6, cuya región activa corresponde a la cavidad resonante y se comprende de un material activo intercalado entre sustratos semiconductores dopados. Una capa reflectante dieléctrica en la cara posterior actúa como un espejo y la superficie frontal cortada funciona como un espejo parcialmente reflectante, que libera una fracción de la luz láser hacia el exterior [33].

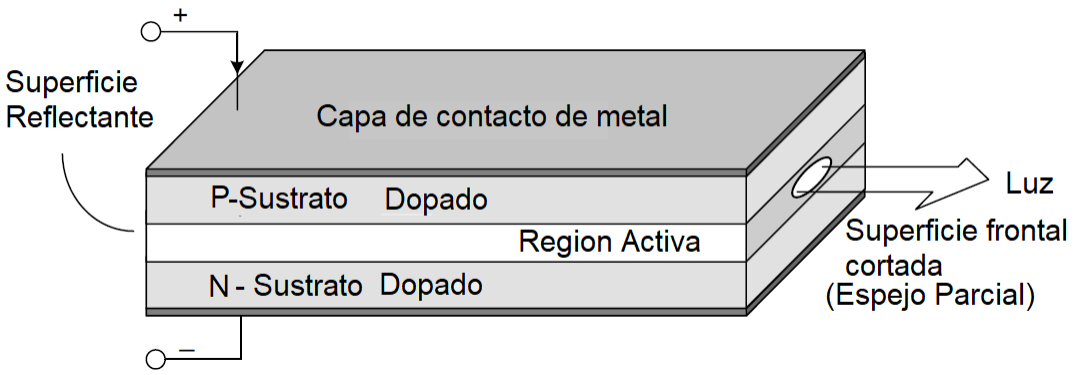


Figura 2.6 Estructura Laser Fabry-Perot [33]

- **Láser de Retroalimentación Distribuida (DFB).**

Los láseres DFB funcionan de manera similar a los láseres Fabry-Perot excepto por una rejilla de difracción que se ubica entre la capa de contacto de metal y el sustrato semiconductor dopado, tal como se puede observar en la Figura 2.7, esta rejilla restringe la longitud de onda operativa del láser principalmente a un solo modo de oscilación. Esto significa que, en relación con un láser Fabry-Perot, el láser DFB exhibe mucho menos ruido y distorsión [40].

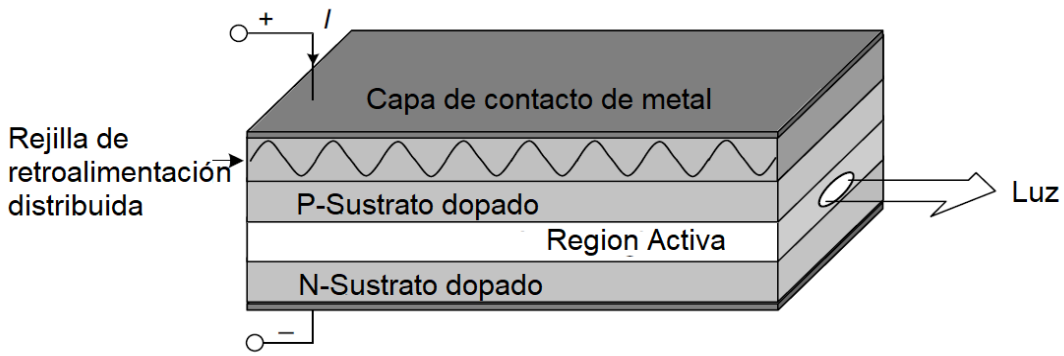


Figura 2.7 Estructura Laser DFB [33]

Los láseres DFB son intrínsecamente más complejos de fabricar que los láseres Fabry-Perot y, por lo tanto, son relativamente más caros. Sin embargo, hoy en día se requieren láseres DFB en casi todos los sistemas de transmisión de alta velocidad. Los láseres Fabry-Perot se utilizan para aplicaciones de comunicación de datos a distancias más cortas [41].

B. Receptores Ópticos

La función de un receptor óptico es convertir la señal óptica de nuevo en forma eléctrica y recuperar los datos transmitidos a través del sistema de ondas de luz. Su componente principal es un fotodetector que convierte la luz en electricidad mediante el efecto fotoeléctrico. Los requisitos de un fotodetector son similares a los de una fuente óptica, debe tener alta sensibilidad, respuesta rápida, bajo nivel de ruido, bajo costo y alta confiabilidad y su tamaño debe ser compatible con el tamaño del núcleo de la fibra [42].

Los fotodiodos basados en semiconductores son los dispositivos principales que satisfacen el conjunto de requisitos mencionados anteriormente. El más común es el fotodiodo PIN, ya que es un dispositivo estable y altamente confiable. Una segunda clase de fotodetectores de semiconductores es el Fotodiodo de Avalancha (APD - *Avalanche photodiode)* [33].

- **Fotodiodo PIN**

  Un diodo PIN consta de tres regiones de semiconductores, la P fuertemente dopada, la intrínseca I y las N secciones dopadas. Es esencial que la unión P-N tenga polarización inversa para hacer que los electrones móviles y los huecos se alejen de la unión, aumenta el ancho de la capa de agotamiento como resultado de esto las cargas inmóviles producen un campo eléctrico elevado en ambos extremos. Si las ondas de luz inciden en la superficie del PIN y se absorben en la región agotada de campo alto, los pares de electrones y huecos generados se moverán a una velocidad limitada por la saturación [43].

- **Fotodiodo de Avalancha (APD)**

  Es posible aumentar la sensibilidad de un fotodiodo al incluir un amplificador de bajo ruido directamente dentro de una estructura de diodo PIN. Si se introduce otra capa dopada con P en el lado N de la zona intrínseca, se puede generar un campo eléctrico elevado, lo que permite un proceso llamado ionización por impacto. Los fotoelectrones se aceleran a medida que se desplazan a través de esta zona de multiplicación y liberan más pares de electrones y huecos cuando chocan con la matriz del material. Este proceso produce una avalancha de portadores en el material, lo que resulta en una multiplicación de la fotocorriente primaria tipo PIN [33].

Teniendo en cuenta lo anterior, el fotodiodo PIN es el detector más utilizado en los sistemas de comunicación óptica ya que es relativamente fácil de fabricar, altamente fiable, tiene bajo ruido y es compatible con circuitos amplificadores de tensión y además es sensible a un gran ancho de banda debido a que no tiene mecanismo de ganancia [44].

C. Tipos de Fibra Óptica y Tipos de Cable

La fibra óptica que se utiliza principalmente para las PON es del tipo monomodo G.652c o G.652d. Las fibras G.652 (fibra monomodo, SMF) son actualmente las fibras más utilizadas, excepto para las redes de fibra hasta el hogar (FTTH).

Las fibras G.652 tienen cuatro variantes: G.652A, G.652B, G.652C y G.652D. Las fibras G.652A y G.652B tienen picos de agua, mientras que las fibras G.652C y G.652D eliminan los picos de agua para una operación de espectro completo [45]. Las fibras de la recomendación UIT-T G.657 la cual es la última edición del estándar de fibra óptica monomodo. Las fibras G.657 se aplican principalmente para las redes de acceso óptico de banda ancha en oficinas de telecomunicaciones y locales de clientes en edificios de apartamentos y viviendas unifamiliares. Existen dos categorías de ITU-T G.657: G.657.A y G.657.B. La fibra G.657.A cumple con la norma ITU-T G.652.D existente, pero proporciona un rendimiento de macro flexión aproximadamente diez veces mejor. G.657.B es una clase verdaderamente insensible a la flexión, con cientos de veces mejor que las fibras tradicionales monomodo y unas diez veces mejor que la clase G.657.A. La fibra G.657.B no cumple con ningún estándar anterior de UIT-T. G.657.A y G.657.B se pueden dividir en G.657.A1, G.657.A2, G.657.B2 y G.657.B3, que se distinguen por sus requisitos de macro flexión [46].

Por último, para mejorar la protección de las fibras se suelen encerrar dentro de algún tipo de estructura de cableado que proporciona una protección física y ambiental. Se utilizan diferentes diseños de cables según el lugar donde la red PON se vaya a implementar, esta estructura del cable variará mucho dependiendo de si el cable se va a extender en conductos subterráneos o dentro de la construcción, enterrado directamente en el suelo, instalado en postes exteriores o colocado bajo el agua, con el fin de evitar un estiramiento excesivo, el proceso de cableado generalmente incluye la incorporación de elementos de resistencia en el diseño del cable [36].

2.2.2 Parámetros de diseño generales de PON

En esta sección se buscan identificar cuáles son los principales parámetros de diseño que permiten construir y desarrollar una red PON en general, permitiendo así obtener un desempeño, alcance, número de abonados, disponibilidad, calidad de servicio o tasas de transmisión diferentes, según la variación de estos parámetros.

A. Relación de división

Inicialmente la relación de división juega un papel importante en las redes PON y en las redes de FTTH, ya que permiten que una sola interfaz óptica de PON se reparta entre muchos suscriptores. Esta relación es soportada por los divisores ópticos o splitters que como se ha venido hablando no manejan electrónica activa y no requieren de ningún tipo de energía para funcionar. Los Divisores Ópticos se instalan en cada red óptica, entre la OLT y las ONT. El divisor óptico cumple la función de repartir el costo y el ancho de banda de la OLT entre múltiples terminales ONT, además de reducir las líneas de fibra requeridas [47].

La cantidad máxima de ONT depende de la cantidad de puertos en la OLT y la relación de división mientras que el nivel de división óptica depende de una gran cantidad de factores, como el alcance máximo, la tasa de transmisión de bits, las pérdidas de conectores y cables, etc. Se puede reparar un máximo de 128 ONT para la tecnología GPON, pero al mismo tiempo, el alcance máximo de la red estará limitado debido a la restricción de mantenimiento, presupuesto de potencia óptica óptimo [48]. Existe una compensación entre la Calidad del Servicio (QoS – *Quality of Service*) y el consumo de energía: aumentar la relación de división disminuirá la disponibilidad y el consumo de energía a medida que el equipo OLT es compartido por más usuarios [49].

Con relaciones de división más altas, la red PON tiene ventajas y desventajas, dentro de los beneficios se pueden compartir los costos de la electrónica y la óptica OLT, así como los costos de la fibra de alimentación y los posibles costos de instalación nueva, además, estas divisiones permiten una mayor flexibilidad y la gestión de la fibra en la cabecera es más sencilla. Por el contrario, algunas de las limitaciones que presentan es la reducción del ancho de banda por ONT por lo que habrá un mayor costo de la óptica en OLT o ONT o en ambos, para lograr grandes presupuestos de potencia óptica [50].

B. Nivel de división Óptica

En la red PON, hay dos configuraciones comunes de divisores: enfoque centralizado y enfoque en cascada [51].

- **Enfoque centralizado**

El enfoque del divisor centralizado generalmente utiliza un divisor de 1:32 en un gabinete de planta exterior, como un terminal de distribución de fibra. El divisor 1:32 se conecta directamente a través de una sola fibra a un OLT en la oficina central y en

el otro lado del divisor, 32 fibras se enrutan a través de paneles de distribución, puertos de empalme o conectores de punto de acceso a los hogares de 32 clientes, donde se conecta a un ONT. Por lo tanto, la red PON conecta un puerto OLT a 32 ONT, tal como se puede observar en la Figura 2.8

Figura 2.8 Enfoque Centralizado [37]

- **Enfoque en cascada**

El enfoque en cascada puede utilizar un divisor de 1:4 que reside en un recinto exterior de la planta, el cual está conectado directamente a un puerto OLT en la oficina central, y cada una de las cuatro fibras que salen de este divisor de etapa 1 y se encamina a un terminal de acceso que alberga un divisor de etapa 2 de 1:8. En este escenario, habría un total de 32 fibras (4×8) llegando a 32 hogares. Es posible tener más de dos etapas de división en un sistema en cascada, y la relación de división general puede variar (1×16 = 4×4, 1×32 = 4×8, 1×64 = 4x4x4) tal como se puede observar en la Figura 2.9.

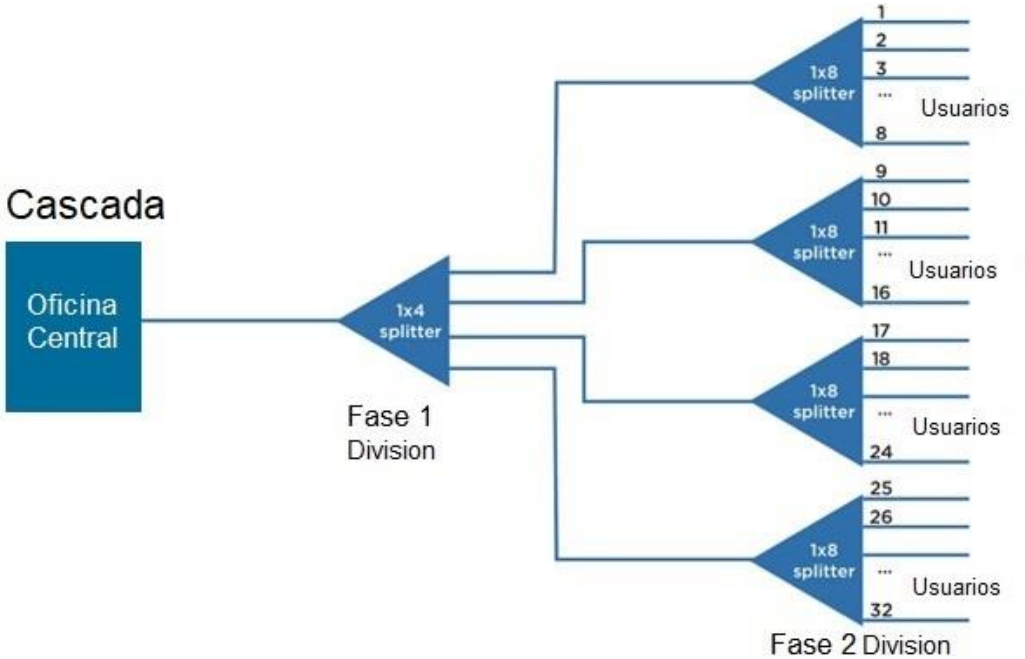


Figura 2.9 Enfoque en cascada [37]

Según lo anterior, en las redes de enfoque centralizado todos los divisores PON están ubicados en un solo punto, lo que maximizará la utilización del OLT y proporcionará un

único punto de acceso para la resolución de problemas, pero dado que los divisores ópticos deben conectarse al cliente a través de empalmes o conectores individuales, el costo de los cables de distribución será muy alto. En las redes con enfoque en cascada los divisores PON están ubicados en dos o más ubicaciones diferentes, lo que minimiza la cantidad de fibras ópticas que deben desplegarse para brindar servicio, pero puede crear un uso ineficiente de los puertos del OLT que puede derivar en un aumento del tiempo de activación de los clientes.

En general, el enfoque centralizado ofrece mayor flexibilidad, menores costos operativos y un acceso más fácil para los técnicos, mientras que el enfoque en cascada puede generar un retorno de la inversión más rápido, menores costos iniciales y menores costos de fibra. Es importante comprender ambos enfoques en detalle para decidir cuál es el mejor enfoque. Para la mayoría de las aplicaciones, se recomienda el enfoque centralizado [37].

C. Alcance y Alcance Diferencial

Una de las características más importantes que tienen las redes PON es su gran alcance, pero dicho alcance se puede manejar de dos maneras, las cuales son: [33]

- **Alcance**

El alcance es la longitud total que tiene el cable de fibra que va desde la OLT hasta la ONT más lejana de la red, en la Figura 2.10 se puede observar que el alcance de esa red es de 30 km [33].

- **Alcance Diferencial**

El alcance diferencial es la diferencia en la longitud de la fibra entre la ONT más lejana y la más cercana, en la Figura 2.10 se observa, si solo se tuviera en cuenta a los suscriptores A, B y C, el alcance diferencial sería cero esto debido a que cada uno está a 30 km del OLT, aunque teniendo en cuenta que se tiene un suscriptor D en la red el alcance diferencial de la red se convierte en 10 km.

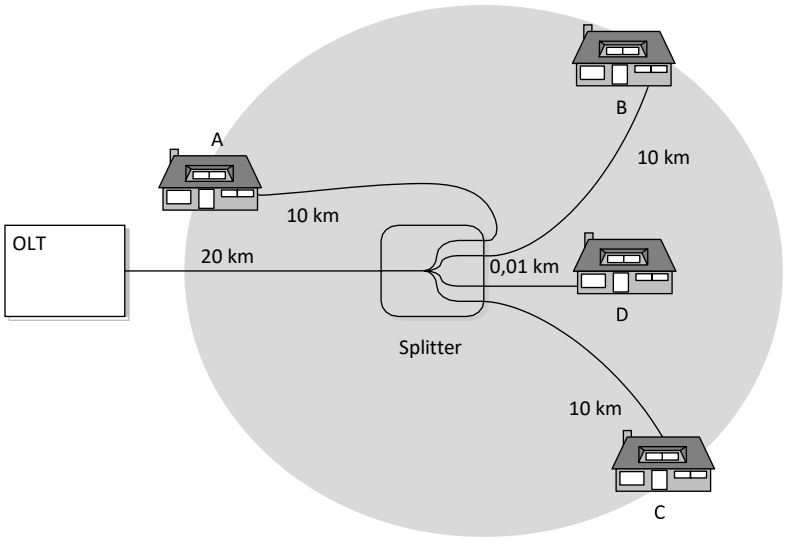


Figura 2.10 Alcance y Alcance Diferencial [33]

D. Formatos de Modulación

Los sistemas de comunicación transmiten señales mediante una serie de tecnologías de codificación y las redes basadas en señales ópticas como las redes PON no son la excepción, si bien es cierto que en las transmisiones con señales eléctricas los voltajes pueden oscilar entre un nivel negativo y positivo, en las señales ópticas la luz puede cambiar entre un nivel de intensidad (esto debido a qué no hay luz negativa) [52].

- **No retorno a cero**

No retorno a cero (NRZ – *No Return To Zero*) es el formato de codificación más utilizado en los sistemas de comunicación óptica. Es un código binario donde los 1 corresponden a una condición significativa, por ejemplo, un pulso de luz, y los 0 corresponden a otra condición significativa, por ejemplo, sin luz. No hay condición de reposo u otro nivel de condición neutral mientras ocurre la transición entre dos condiciones consecutivas, tal como se puede observar en la Figura 2.11[53].

- **Retorno a Cero**

Retorno a cero (RZ - *Return To Zero*) describe un código de línea utilizado en señales de telecomunicaciones en el que la señal cae (vuelve) a cero entre cada pulso. Esto tiene lugar incluso si se producen varios 0 o 1 consecutivos en la señal. La señal se sincroniza automáticamente, esto significa que no es necesario enviar un reloj separado junto con la señal, pero sufre el uso del doble de ancho de banda para lograr la misma velocidad de datos en comparación con el formato NRZ.

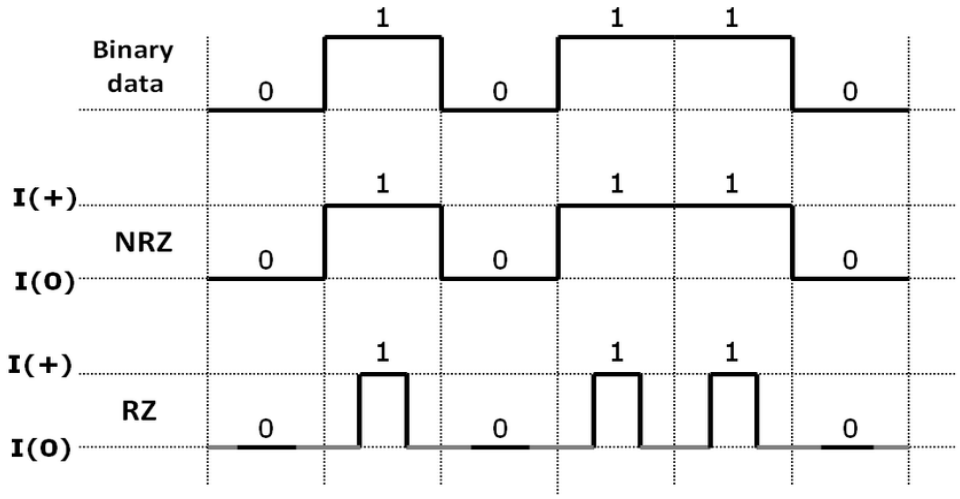


Figura 2.11 NRZ y RZ [53]

En comparación con NRZ, una modulación RZ a la misma velocidad de datos requiere un ancho de banda espectral más amplio porque el ancho de pulso en el dominio del tiempo solo ocupa la mitad de la ranura de bits. Como resultado, la señal óptica modulada en RZ sufre más de las degradaciones dependientes del ancho de banda, como la dispersión cromática en el modo de polarización y la dispersión de la función de transferencia en los amplificadores eléctricos de banda ancha. Por otro lado, los pulsos ópticos modulados por RZ tienen un pico de potencia más alto en comparación con una forma de onda NRZ de la misma potencia promedio, por lo que la relación señal-ruido (OSNR) puede ser mejor que la de NRZ en los puntos de decisión que se usan comúnmente en sistemas de fibra óptica de larga distancia y el impacto de la dispersión cromática se puede minimizar [54].

E. Técnicas de Multiplexación

- **TDM**

El multiplexor por división de tiempo se define como un dispositivo que distribuye una serie de canales periódicamente en el tiempo a través de la modulación de pulsos. Cada pulso corresponde a un canal y está intercalado entre los de otros canales. Por lo tanto, una señal multiplexada por división de tiempo siempre se compone mediante muestreo síncrono de los canales con pulsos desplazados entre sí. La multiplexación por división de tiempo se ha vuelto muy importante no solo en la transmisión sino también en la conmutación, particularmente en conexión con los sistemas digitales [55].

En TDM cada entrada de canal se muestrea periódicamente y se le asigna un determinado lote de tiempo dentro de la salida de señal digital, en el extremo de transmisión, un conmutador muestrea secuencialmente los canales, lo que da como

resultado un tren de muestras de amplitud, después de esto, el codificador convierte secuencialmente cada muestra en un código binario, por lo que la salida del codificador es una cadena de dígitos binarios que representan el canal 1, el canal 2, etc. Estos bits se combinan con bits de trama para la sincronización del multiplexor/demultiplexor y los bits de señalización para el control de la red y luego se transmiten. El receptor o demultiplexor recupera el tiempo y la sincronización de la trama, lo que permite que el decodificador asigne cada muestra a la salida del canal adecuado [56].

- **WDM**

En los sistemas de comunicación óptica, se ha introducido la Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM) para aumentar la capacidad de transmisión sin tener que instalar nuevas fibras. WDM es una técnica que permite multiplexar señales de diferentes canales de longitud de onda en una fibra óptica, transmitirlas juntas y demultiplexarlas. En la actualidad, WDM se utiliza ampliamente en redes de transporte ópticas y ofrece capacidad y calidad de transmisión que pueden satisfacer la creciente demanda de tráfico [57].

WDM se refiere a un esquema de multiplexación y transmisión en fibras ópticas donde diferentes longitudes de onda se modulan de forma independiente, es decir llevan información de los transmisores a los receptores después de modularse, estas longitudes de onda se multiplexan en el transmisor mediante filtros WDM pasivos e igualmente se separan en el receptor mediante los mismos filtros o detección coherente que suele implicar un oscilador local sintonizable (láser).

WDM es un medio eficiente para aumentar la capacidad de transporte o el ancho de banda utilizable, particularmente de fibras ópticas monomodo. También permite la separación del tráfico de diferentes clientes en el dominio de la longitud de onda [58].

- **TWDM**

TDM / WDM PON tiene los beneficios de la alta capacidad ofrecida por TDM-PON y el alto número de longitudes de onda ofrecidas por WDM-PON. Generalmente, los TDM/ WDM PON se pueden clasificar en esquemas híbridos estáticos y dinámicos. En el esquema estático, las longitudes de onda asignadas para cada ONT no se pueden cambiar durante la operación. Mientras que, en el caso dinámico, las longitudes de onda se cambian dinámicamente de acuerdo con la operación y la comunicación [59].

El esquema dinámico ofrece algunas ventajas para PON, incluido el equilibrio de carga, la resistencia y la función de ahorro de energía, pero al mismo tiempo, las ONU deben emplear receptores en modo ráfaga debido al cambio frecuente en las longitudes de onda [60].

TWDM es la solución principal para NG-PON2 ya que era más compatible con la aplicación residencial de alto volumen. El TWDM-PON de línea de base utiliza cuatro canales (λ – Longitudes de onda) bidireccionales espaciados DWDM (DWDM - *Dense Wavelength-Division Multiplexing*), cada uno con una velocidad de línea de 10 Gbps en sentido descendente y 2,5 Gbps en sentido ascendente. Esto da como resultado una capacidad de descarga agregada de 40 Gbps y una capacidad de subida de 10 Gbps [61].

2.3 Caracterización Arquitecturas PON definidas por FSAN

Una vez realizada la caracterización general de una arquitectura PON con sus componentes y elementos más fundamentales, se procede a caracterizar finalmente cada una de las arquitecturas PON a evaluar de una manera más específica, con el fin de comprender las capacidades de estas.

2.3.1 GPON

GPON hace parte de la primera generación de PON, es una arquitectura que se encuentra estandarizada por la UIT-T en las recomendaciones 984.1, 2, 3, 4 y 5. Esta arquitectura emplea un divisor de potencia como nodo remoto para transmitir todos los datos a cada uno de los usuarios en el enlace de bajada, donde la información es transmitida desde la OLT hacia las diferentes ONTs de manera broadcast o difusión, como ocurre con los servicios de televisión o radio, sin embargo cada ONT se encarga de discriminar la información que le corresponde de acuerdo a un identificador con el que la ONT la reconoce.

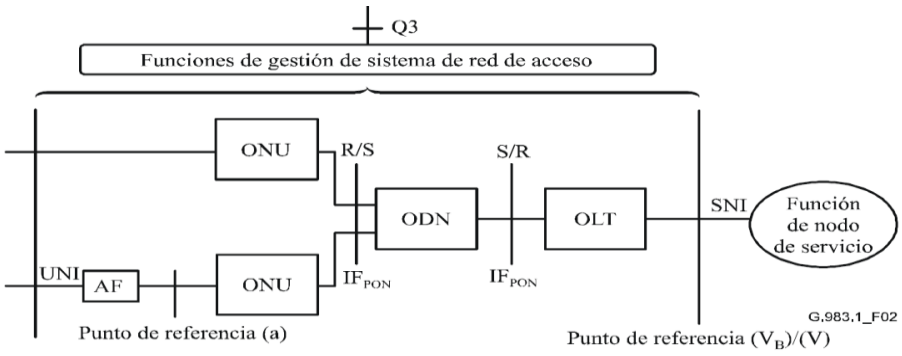


Figura 2.12 Arquitectura de referencia GPON [39]

En la Figura 2.12 se representa la arquitectura de referencia de GPON donde el Elemento de Red (NE-*Network Element*) hace referencia a un equipo que utiliza longitudes de onda diferentes a las de las OLTs y las ONTs, por lo que cuando se incorporan en las redes se debe implementar el módulo WDM para multiplexar las diferentes longitudes de onda. La función de adaptación (AF-*Adaptation Function*) es un equipo adicional que se utiliza para cambiar la interfaz en el lado del suscriptor o las ONTs y puede ser implementado según las recomendaciones del operador en la conmutación de la red. R/S y S/R representan el punto de la red donde la conexión se establece entre la OLT y la ONT en el enlace de subida y de bajada respectivamente.

Multiplexación

Se utiliza TDMA para multiplexar las señales y evitar colisión entre los datos de diferentes usuarios, la OLT envía información en tramas de 125us donde se encapsula toda la información que irá a cada uno de los destinatarios [62].

Bandas

Como es habitual en las arquitecturas PON, GPON opera en unas longitudes de onda distintas para cada una de las direcciones, en la banda S a 1490 nm para el enlace de bajada y en la banda O a 1310 nm para en enlace de subida [8].

Velocidad

GPON es una arquitectura que trabaja con velocidades simétricas y asimétricas, pero la velocidad más utilizada normalmente es la de 1.25 Gbps para el envío de datos ascendente y de 2.5 Gbps para el envío de datos descendente. Adicional a esto, debe admitir servicios que requieren un retardo de transferencia de señal medio máximo de 1.5 ms [50].

Niveles de potencia óptica

Los niveles de potencia óptica descritos por la recomendación de 984.2 para una velocidad de 1.25 Gbps y 2.5 Gbps se describen en la Tabla 2.1.

Elemento	Unidad	Valor Nominal
OLT		
Potencia media de transmisión(min)	dBm	+15
Potencia media de transmisión(min)	dBm	+5
Sensibilidad mínima	dBm	-28
ONT		
Potencia media de transmisión(min)	dBm	+0.5
Potencia media de transmisión(min)	dBm	+5
Sensibilidad mínima	dBm	-27

Tabla 2.1 Niveles de potencia para GPON [60]

GPON es capaz de soportar una amplia gama de servicios como: voz, TDM, Ethernet, ATM, línea compartida, extensión inalámbrica, entre otros, además la aplicación más popular para esta arquitectura es la FTTH, la cual tiene las siguientes categorías: simétrica, servicios de banda ancha asimétrica, Sistemas de Transporte Óptico de Paquetes (POTS -*Packet Optical Transport Systems*) y Red Digital de Servicios Integrados (IDSN - *Integrated Services Digital Network*). Así mismo, se requiere que GPON sea compatible con todos los servicios conocidos actualmente y los nuevos que se están implementando para suscriptores residenciales y comerciales.

En cuanto a la topología de GPON se utiliza una arquitectura de red en árbol PON tradicional con los componentes ya explicados anteriormente. La ODN se define por las clases A, B, B+, C y C+, la más popular es la clase B+ donde se "divide" la señal hasta en 64 intervalos de tiempo diferentes para 64 usuarios [64].

El alcance lógico de la arquitectura GPON se determina por la máxima distancia que puede alcanzar entre la ONT y la OLT a nivel de protocolo la cual corresponde a un valor de 60 km mientras que el alcance físico es la máxima distancia física entre los mismos y corresponde a 20km [64].

Según la recomendación, se debe cumplir con un objetivo de diseño de sección óptica de una tasa de error de bits (BER) no peor que $1x10^{-12}$ para un caso extremo de atenuación y dispersión de la trayectoria óptica. La codificación normalmente empleada en las arquitecturas GPON en las dos direcciones es una codificación sin retorno a cero (NRZ).

2.3.2. XG-PON y XGS-PON

El XG-PON puede ser simétrico o asimétrico. XG-PON asimétrico se denomina XG-PON1 con una velocidad de datos de 10 Gbps para las transmisiones descendentes y de 2,5 Gbps para las transmisiones ascendentes. El XG-PON simétrico se denomina XG-PON2 o XGS-PON con una velocidad de datos de 10 Gbps para las transmisiones ascendentes y descendentes, pero necesita láseres costosos en las ONU [65].

Arquitectura de referencia

En la Figura 2.13 se muestra una configuración de referencia simple y de alto nivel de XG-PON, que muestra una configuración de referencia de alto nivel comparte las mismas características con la de GPON la cual se observa en la Figura 2.12.

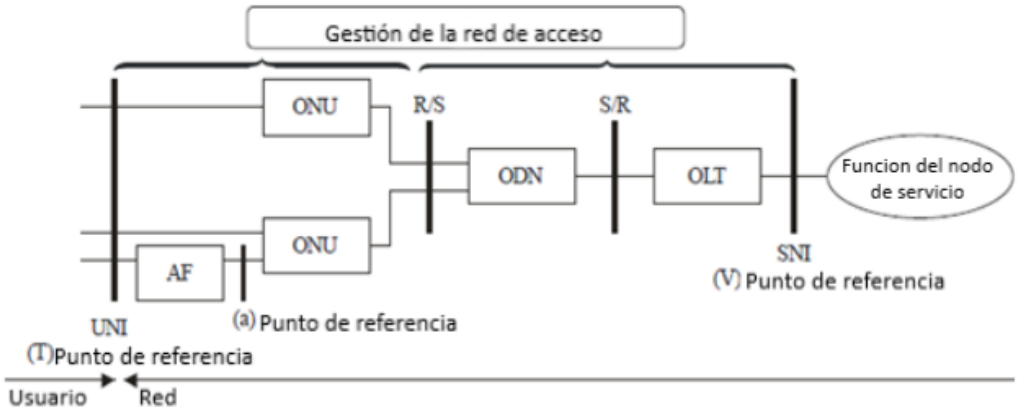


Figura 2.13 Arquitectura de Referencia XG-PON [63]

Relación de división

Debido a que muchos operadores de red han construido su infraestructura ODN con un factor de división de 1:32 o 1:64 para la norma GPON, esta división de 1:64, sujeta al balance de pérdida total, será el requisito mínimo para permitir la coexistencia de XG-PON con su antecesor. Algunos operadores de redes expresaron su interés de extender el factor de división más allá de 1:64 en favor de mejorar la economía general del sistema, pudiendo alcanzar relaciones de división de 1:128 o incluso 1:256 [66].

Distancia

XG-PON debe admitir una longitud máxima de fibra de al menos 20 km en las peores condiciones, siendo este el máximo valor definido para GPON, lo cual supone un incremento de prestaciones en cuanto al alcance se refiere. Además, se ha definido una distancia máxima de fibra diferencial de 20 km, y una segunda variante opcional de 40 km [63].

Bandas

Debido a las demandas específicas del mercado y la industria de transceptores ópticos, el grupo FSAN / UIT-T seleccionó el ancho de banda entre 1575 nm y 1580 nm para la transmisión descendente y 1260 nm a 1280 nm para la transmisión ascendente. La elección de la banda adecuada no fue fácil debido principalmente a la necesidad de una banda de guarda que evite la interferencia entre las señales de las longitudes de onda cercanas [67].

Velocidad

XG-PON presenta una transmisión asimétrica de datos de 10 Gbps en sentido descendente y 2,5 Gbps en sentido ascendente. Mientras que XGS-PON presenta una transmisión simétrica de datos de 10 Gbps en sentido descendente y 10 Gbps en sentido ascendente [68].

Multiplexación

XG-PON utiliza WDM tanto para las rutas descendentes como ascendentes del sistema. Esto significaba que XG-PON requeriría dos bandas de longitud de onda que estuvieran suficientemente aisladas de todas las demás longitudes de onda [69].

Formatos de modulación.

Tradicionalmente, hay dos formatos de modulación posibles: sin retorno a cero (NRZ) y retorno a cero (RZ) para XG-PON. [70] Sin retorno a cero (NRZ) ha sido el formato de modulación más dominante, ya que no es sensible al ruido de fase del láser, requiere un ancho de banda eléctrico relativamente bajo para el transmisor y los receptores en comparación con RZ y la configuración más simple de transmisor y receptor [71].

Niveles de potencia óptica

En la Tabla 2.2 se describen los parámetros de potencia de transmisión y sensibilidad para la primera versión de XG-PON para una velocidad 10 Gbps en el enlace de bajada y 2.5 Gbps para el enlace de subida.

Los niveles de potencia óptica de XG-PON y XGS-PON van a depender de las clases de ODN, las pérdidas de trayectoria óptica para cada una (Tabla 2.3); Nominal 1 (N1), Nominal 2 (N2), Extendido 1 (E1) y Extendido 2 (E2) son las siguientes:

Elemento	Unidad	Valor Nominal					
OLT							
Clase ODN		N1	N2		E1	E2	
			N2a	N2b		E2a	E2b
Potencia media de transmisión (min)	dBm	+2	+4	+10.5	+6	+8	+14.5
Potencia media de transmisión (Max)	dBm	+6	+8	+12.5	+10	+12	+16.5
Sensibilidad mínima	dBm	-27.5	-29.5		-31.5	-33.5	
ONT							
Clase ODN		N1	N2		E1	E2	
			N2a	N2b		E2a	E2b
Potencia media de transmisión (min)	dBm	+2	+2		+2	+2	
Potencia media de transmisión (Max)	dBm	+7	+7		+7	+7	
Sensibilidad mínima	dBm	-28	-28	-21.5	-28	-28	-21.5

Tabla 2.2 Niveles de potencia para XGPON [73]

Clases de ODN	Unidad	N1	N2	E1	E2
Pérdidas de trayectoria óptica Mínimas	dB	14	16	18	20
Pérdidas de trayectoria óptica Máximas	dB	29	31	33	35

Tabla 2.3 Perdidas de trayectoria de las clases de ODN [72]

2.3.3. NGPON2

La tendencia a incrementar la capacidad requerida por los servicios de telecomunicaciones llevó a desarrollar una segunda generación de PON conocida como NG-PON2. Esta nueva generación se estandariza en la serie ITU-T G989 .1 .2 y .3 denominada Redes ópticas pasivas con capacidad de 40 Gigabits (NG-PON2), capaz de un rendimiento total de 40 Gbps correspondiente a 4 canales con una capacidad de 10 Gbps simétrica. Dentro del estándar se encuentran dos arquitecturas fundamentales TWDM-PON y PtP WDM-PON [73], la primera de ellas es la mejor arquitectura identificada para el cumplimiento de los requisitos de esta nueva generación, se basa principalmente en un método híbrido de multiplexación por división en el tiempo y de longitud de onda.

La arquitectura de NG-PON2 es similar a la de sus antecesores sin embargo se incorporan nuevas y mejores prestaciones de las cuales se hablará más adelante.

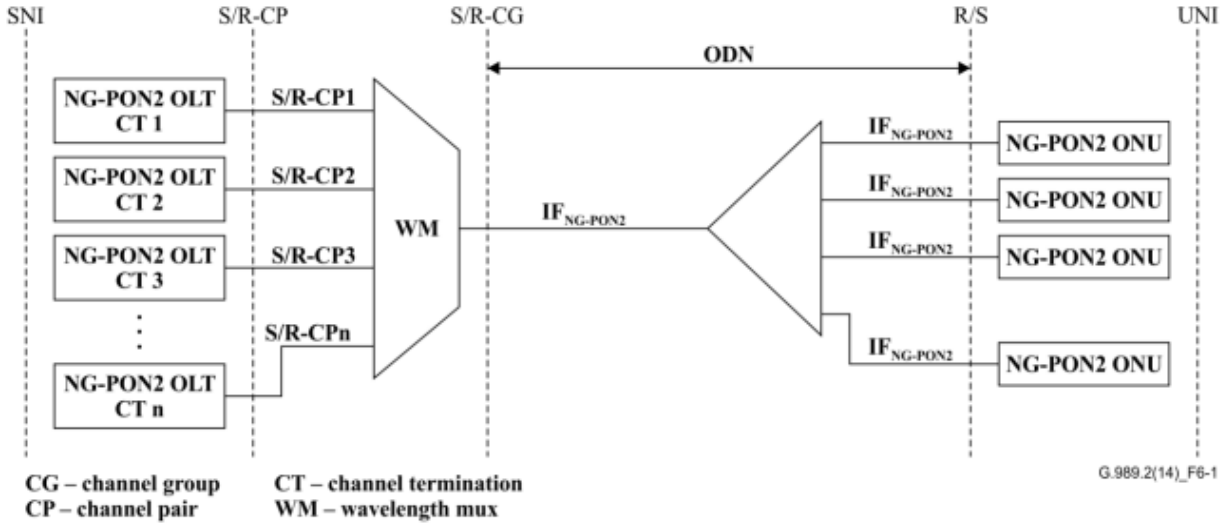


Figura 2.14 Arquitectura de referencia lógica de NG-PON2 [74]

En la Figura 2.14 representa la arquitectura de referencia lógica para el sistema NG-PON2 de múltiples longitudes de onda. Los puntos de referencia de la Figura 2.14 se definen de la siguiente manera:

- S: Interfaz de envío a la red
- R: Interfaz de recepción de la red
- S/R, R/S: Combinación de los puntos S y R existentes simultáneamente en una sola fibra, cuando se opera en modo bidireccional. El punto S/R está referenciando el lado de la ONT mientras que el punto R/S referencia el lado de la OLT.

La OLT se encuentra compuesta por múltiples terminaciones de canal (CT- *Channel Termination*) conectadas a un multiplexor de longitud de onda (WM- *Wavelength Multiplexer*). El punto de referencia S/R-CG es donde la OLT envía y recibe datos de las ONTs mediante un conjunto de pares pertenecientes a los enlaces de subida y de bajada denominados Grupo de Canal (CG- *Channel Group*). La ODN corresponde desde la salida del WM hasta el punto R/S, que es la entrada de las ONTs.

Cada ONT está equipada con un transmisor y un receptor sintonizable, el transmisor y receptor debe poder ajustarse a los canales de longitud de onda TDWM en sentido ascendente y descendente asignados dentro de las bandas según corresponda que se especifican más adelante. Adicionalmente la recomendación especifica un mínimo de cuatro canales TDWM con extensión de hasta ocho canales, lo que la hace la primera en la especificación de PON en el mercado que opera a múltiples longitudes de onda [73]. Cuenta con una capacidad de alcanzar

hasta 60 km y 40 km máximo de fibra diferencial, finalmente la relación de división es de al menos 1:256 [73].

A continuación, se proporciona una descripción general de los requisitos del sistema NG-PON2

Velocidades

Presenta tres tasas nominales de en el enlace de subida y de bajada por canal es de destacar que NG-PON2 maneja entre 4 y 8 canales [74]:

- 10 Gbps en el enlace de bajada y 10 Gbps en el enlace de subida por canal.
- 10 Gbps en el enlace de bajada y 2.5 Gbps en el enlace de subida por canal.
- 2.5 Gbps en el enlace de bajada y 2.5 Gbps en el enlace de subida por canal.

Niveles de potencia óptica

En la Tabla 2.4 se describen los parámetros de potencia de la interfaz óptica de transmisión y recepción para los canales de TWDM. La recomendación 989.2 especifica dos tipos de enlaces, sin embargo, para la caracterización de NG-PON2 se describen los del enlace tipo A los cuales se basan en la suposición implícita de no utilizar preamplificadores ópticos en el receptor OLT, por lo que se requiere un transmisor ONT más potente.

Elemento	Valor nominal				
OLT					
CLASE ODN		N1	N2	E1	E2
Potencia media de transmisión (min)	dBm	+3.0	+5.0	+7.0	+9.0
Potencia media de transmisión (Max)	dBm	+7.0	+9.0	+11.0	+11.0
Sensibilidad mínima	dBm	-26.5	-28.5	-31.5	NA
ONT					
CLASE ONT		N1	N2	E1	E2
Potencia media de transmisión (min)	dBm	+4.0	+4.0	+4.0	+4.0
Potencia media de transmisión (Max)	dBm	+9.0	+9.0	+9.0	+9.0
Sensibilidad mínima	dBm	-28.0	-28.0	-28.0	-28.0

Tabla 2.4 Niveles de potencia para NG-PON2 [76]

Las cuatro clases de pérdidas de trayectoria óptica (OPL de ODN descritas en la Tabla 2.4 Nominal 1 (N1), Nominal 2 (N2), Extendido 1 (E1) y Extendido 2 (E2) permiten la operabilidad de infraestructura de la fibra instalada con las otras arquitecturas, por lo que la implementación de NG-PON2 en una misma ODN de GPON y XG-PON es posible [76].

Bandas

La asignación de bandas fue realizada con el propósito de permitir la coexistencia de NG-PON2 con sus predecesores, además de ser flexible para adaptarse a los escenarios de implementación y expansión futura, permitiendo actualizaciones en su capacidad de una manera escalable en cuanto al crecimiento de los servicios [73].

Estos requisitos se logran cumplir ofreciendo la posibilidad de acceder a múltiples longitudes de onda que puedan separarse tanto física como lógicamente, para poder ser gestionadas de manera independiente [74].

TWDM – PON		
ENLACE DE SUBIDA		
BANDA		**Valor nominal**
ANCHA	nm	1524-1544
REDUCIDA	nm	1528-1540
ESTRECHA	nm	1532-1540
ENLACE DE BAJADA		
-	nm	1596-1603

Tabla 2.5 Bandas para NG-PON2 [74]

2.4. Resumen de las Arquitecturas PON Caracterizadas

La labor de investigación llevada a cabo en este capítulo permite tener una caracterización de las principales arquitecturas PON, estas características se resumen en la Tabla 2.6, donde se puede observar los principales valores para tener en cuenta para cada una de las arquitecturas PON.
Además, se realizó un contexto teórico de las características y parámetros más importantes de la arquitectura general de PON, entre los cuales se destacan: el funcionamiento de los elementos principales que componen la arquitectura general de PON y que están presentes en todas las arquitecturas de PON, tal como la ODN, la ONT o ONU y la OLT, adicionalmente se detalló el funcionamiento de algunos componentes presentes en los elementos ya mencionados, tales como: los divisores ópticos, los transceptores ópticos, los cuales están compuestos tanto por un transmisor como por un receptor óptico, los tipos de fibra óptica a tener en cuenta y por ultimo los atenuadores.

Ítem	GPON		XG-PON		XGS-PON		NG-PON 2		
Recomendación	ITU-T G.984		ITU-T G.987		ITU-T G.9087		ITU-T G.989.1		
Subida	Velocidad	Bandas	Velocidad	Bandas	Velocidad	Bandas	Canales	Velocidad x Canal	Bandas
	1.2 Gbps	1310 nm	2.5 Gbps	1260-1280 nm	10 Gbps	1260-1280 nm	4 a 8	10 Gbps 2.5 Gbps	1524-1540 nm
Bajada	2.5 Gbps	1490-1550 nm	10 Gbps	1575-1580 nm	10 Gbps	1575-1580 nm		10 Gbps 2.5 Gbps	1596-1603 nm
Multiplexación	TDM		WDM		WDM		TWDM		
Perdidas	29 dB a 31 dB (Nominales)		29 dB a 31 dB (Nominales)		29 dB a 31 dB (Nominales)		29 dB a 31 dB (Nominales)		
Relación de división	1:64 (1:256 en el nivel lógico)		1:64 (1:256 en el nivel lógico)		1:64 (1:256 en el nivel lógico)		1:64 a 1:256		
Distancia	20 km (60 km en el nivel lógico)		20 km (60 km en el nivel lógico)		20 km (60 km en el nivel lógico)		Hasta 60 km		

Tabla 2.6 Características Generales de las principales Arquitecturas PON

Cada uno de los elementos analizados a lo largo de este capítulo, permite definir cuáles van a ser los parámetros de diseño más importantes que se tendrán en cuenta para llevar a cabo los análisis de desempeño respectivos de cada una de estas arquitecturas, estos parámetros de diseño se derivan de las características generales de la arquitectura PON, y son los siguientes:

- **Relación de división**-Número de abonados

  A partir del número de abonados para tener en cuenta se definirá un parámetro tan importante como lo es la relación de división que tendrá la red, se debe tomar a consideración que una mayor relación de división conlleva a necesitar una mayor potencia de transmisión, debido a que la potencia se dividirá en cada uno de los abonados y adicionalmente se replantea la distancia máxima que puede alcanzar la red alcanzado una calidad de servicio aceptable para cada usuario final. Este es un parámetro que en cuánto más grande sea la relación de división será más atractivo para los operadores, sin embargo, se tendrá la necesidad de transmitir con mayor potencia para poder soportar el alcance físico de toda la red.

- **Tipos de fibra**

  Este parámetro cobra especial relevancia en el diseño de una red PON ya que dependiendo del tipo de fibra a trabajar se tendrá una cierta dispersión cromática, la cual afecta la manera en la que se manejará el balance del enlace.

- **Transmisor y Receptor**
  Estos elementos cobran especial relevancia ya que presentan varias opciones para escoger dependiendo de las necesidades que se tengan, a nivel de transmisores se tienen dos principales que son el FP y DFB y a nivel de receptores se cuenta con dos Fotodiodo PIN y fotodiodo de Avalancha, la escogencia de alguno de estos dependerá de la velocidad a trabajar y las distancias que se quieran alcanzar.

- **Velocidades para trabajar**
  Este parámetro es uno de los más importantes a tener en cuenta en el diseño de una red ya que afectara la escogencia del transmisor y receptor a trabajar, ya que a mayores velocidades la señal se vuelve más susceptible a diferentes degradaciones tal como se revisó en el capítulo 1 de este trabajo y además limitará en la cantidad de abonados a trabajar.

- **Distancias**
  Las distancias afectaran de manera negativa el rendimiento de la red ya que a mayores distancias la señal es más susceptible a degradaciones tales como la atenuación, lo que conlleva a que las perdidas en el sistema puedan incrementar por lo que es necesario tener un balance óptimo en el enlace para poder alcanzar la mayor distancia posible sin alterar drásticamente la calidad de la señal.

- **Potencia de transmisión y sensibilidad de recepción**
  Finalmente, los parámetros para tener en cuenta para el diseño de las arquitecturas son las potencias con las que transmite cada uno de los elementos y la capacidad que tienen para recibir una reproducción aceptable de la señal modulada. Esto junto con el balance del enlace permitirá saber el uso de atenuadores con sus valores correspondientes para comprobar que la red se encuentra diseñada correctamente.

En el capítulo ll se revisaron y caracterizaron las arquitecturas PON definidas por FSAN las cuales presentan gran impacto en el mercado de las telecomunicaciones, se identificaron los elementos que la componen tanto lógica como físicamente, los cuales sirvieron de base para especificar las principales características de diseño de las redes PON.
A continuación, en el capítulo lll de este trabajo de grado se describe la metodología a seguir y los escenarios de simulación, con el fin de definir los métodos y en qué condiciones se van a desarrollar los entornos de simulación de las arquitecturas definidas, y finalmente llevar a cabo el estudio de cada una de ellas mediante los resultados obtenidos en dichos escenarios.

3 Capitulo III. Metodología de desarrollo y simulación.

En el presente capitulo comienza la exploración del entorno de simulación con el fin de llevar a cabo la implementación del diseño y el estudio del desempeño de las arquitecturas caracterizadas en los capítulos anteriores. Primero se plantea una metodología la cual permitirá desarrollar de manera progresiva y exitosa la simulación, posterior a ello se define el software donde se trabajará, y se finaliza con una definición del modelo de la red de manera conceptual y en el software de simulación.

3.1 Metodología de simulación

Para el presente trabajo de grado enfocado en el área de la investigación es indispensable la implementación de sistemas informáticos que simulen el comportamiento de los sistemas de comunicación ópticos.

Cabe resaltar que para poder obtener resultados confiables en cualquier modelo que se desarrolle es necesario abarcar con profundidad los conocimientos acerca de los elementos o fenómenos que se desean simular [77]. Para iniciar el proceso de simulación se debe desarrollar una metodología que permita la integración de técnicas y métodos con los que se pueda abordar cada una de las actividades del proyecto de forma homogénea, estas definen artefactos, roles y actividades junto con prácticas y técnicas recomendadas, con el fin de modelar y simular cualquier sistema de comunicaciones [78].

Para ello, se debe definir dentro de la metodología (para este proyecto de grado se adaptó la metodología propuesta en [77] denominada “Metodología para la Simulación de Equipos de Telecomunicaciones”) , donde se definen una serie de etapas que se adaptan a las necesidades del proyecto, en el análisis comparativo del desempeño óptico de arquitecturas de redes PON. Estas etapas en el desarrollo de la simulación son las siguientes:

a. Formulación del problema y plan de estudios mediante fundamentos teóricos: En esta etapa se debe analizar el problema a resolver y entender cómo interactúan las variables que lo componen entre sí y las posibles restricciones a las que estará sujeto el sistema planteado.

b. Recolección y procesamiento de datos: Se debe poder identificar y recolectar los datos que sean importantes para la simulación con el fin de ser analizados.

c. Definición de un modelo conceptual: En esta etapa se definen los conceptos que se utilizan para ayudar a conocer, comprender o simular los elementos de simulación con el fin de incluir las entidades más importantes y las relaciones entre ellos.

d. Formulación de un modelo de simulación definiendo el modelo de red y los escenarios de simulación: Se debe diseñar un modelo lógico de la solución cuyos resultados sean los que se esperan obtener de acuerdo con los objetivos. Para esto, debe tenerse claridad acerca de las relaciones lógicas que componen el modelo, sus variables, definiciones y demás parámetros que afecten el comportamiento del sistema a simular.

e. Realizar pruebas: Se debe poder identificar y recolectar los datos que sean importantes para la simulación, para después ser analizados.

f. Implementación de escenarios de simulación mediante el software: Una vez hecho lo anterior, se deberá definir en las herramientas y lenguajes de programación los diferentes casos de uso necesarios o adecuados para la implementación del sistema propuesto.

g. Recolección de datos: Se debe poder identificar y recolectar los datos que sean importantes para la simulación, para después ser analizados.

h. Evaluación del modelo y de los parámetros de diseño estimados: Una vez identificados los parámetros de diseño mediante los diferentes casos de uso estimados se deberá realizar la evaluación de los parámetros de diseño más críticos en la implementación de los modelos.

i. Validación del software: En esta etapa debe evaluarse el comportamiento del modelo implementado y estudiar si hace lo que se espera, además, verificar si las relaciones y variables planteadas son las adecuadas. Se recomienda si es posible, realizar simulaciones de las que se conozca previamente los resultados para validar el funcionamiento.

j. Análisis de los datos obtenidos con la simulación: Una vez realizada la validación, se realizan las simulaciones y se procede a estudiar los resultados para sugerir posibles cambios en el modelo.

k. Obtención de resultados del análisis comparativo del desempeño óptico de arquitecturas de redes PON (GPON, XG-PON y NG-PON2)

l. Documentación de resultados: Se sugiere documentar los aspectos técnicos del modelo propuesto y su modo de operación, en algunos casos es recomendado la creación de un manual de usuario.

Para el correcto desarrollo del estudio comparativo de los diferentes escenarios de las arquitecturas PON a evaluar en el presente trabajo de grado, se debe tener en cuenta que no se elaborará una herramienta de software de simulación si no que por el contrario se encontrará una, la cual permita implementar dichos escenarios con el fin de validar los objetivos planteados del trabajo. Adicionalmente en la Figura 3.1. se ilustra el diagrama de flujo este se adapta de [15] mediante el cual se llevará a cabo la simulación del proyecto.

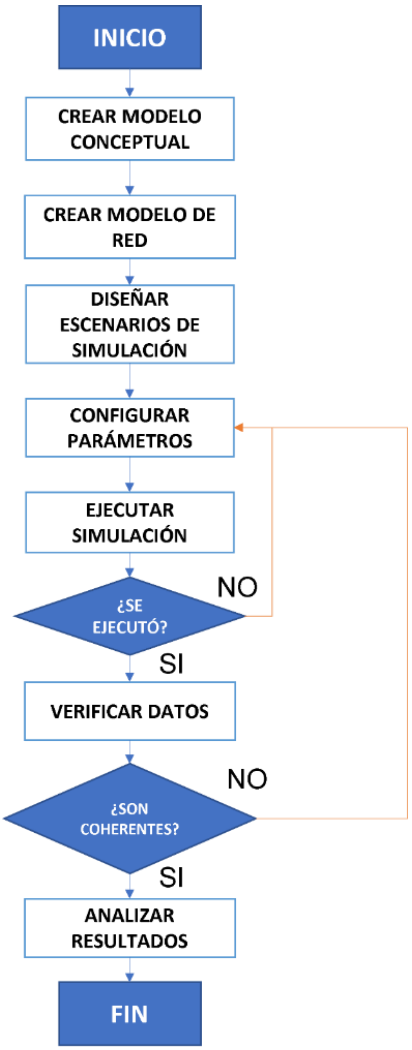


Figura 3.1 Diagrama de Flujo simulación.

3.2 Herramienta OPT-Sim de Synopsys

OptSim es un paquete avanzado de simulación de sistemas de comunicación óptica diseñado para ingeniería profesional e investigación de WDM, DWDM, TDM, CATV, LAN óptica, bus óptico paralelo y otros sistemas ópticos emergentes en telecomunicaciones, comunicaciones de datos y otras aplicaciones. Se puede utilizar para diseñar sistemas de comunicación óptica y simularlos para determinar su rendimiento teniendo en cuenta varios parámetros.
OptSim representa un sistema de comunicación óptica como un conjunto de bloques interconectados, y cada bloque representa un componente o subsistema del sistema de comunicación. A medida que se pasan señales físicas entre componentes en un sistema de comunicación del mundo real, los datos de la señal se pasan entre modelos de componentes en la simulación OptSim.

OptSim incluye una extensa biblioteca de modelos de componentes de los componentes más utilizados para la ingeniería de sistemas electroópticos. Esta biblioteca de componentes se amplía continuamente a través de la investigación y la colaboración continuas con especialistas en simulación de renombre mundial en los principales centros de tecnología óptica de todo el mundo. [79]

OptSim ofrece varias estrategias diferentes para simular un sistema óptico determinado. En orden de mayor precisión y esfuerzo computacional, estas estrategias son [79]:

A. Técnica de Propagación Espectral (SPT - *Spectral Propagation Technique*): las señales se propagan en la red como espectros de potencia, teniendo en cuenta la pérdida de componentes y el ruido. Los espectros, los niveles de potencia y la relación señal óptica a ruido (OSNR) se pueden evaluar en cualquier punto de la red.

B. Simulación de Ancho de Banda Variable (VBS - *Variable Bandwidth Simulation)* las señales se propagan en la red como muestras en el dominio del tiempo sobre un ancho de banda seleccionable por el usuario. VBS simula el rendimiento de la fibra y otros componentes ópticos. VBS se puede utilizar con diferentes modelos de fibra:

    a. Modelo de fibra simplificado: VBS solo tiene en cuenta el atenuador (fibra solo con pérdida) o la atenuación y la dispersión (fibra lineal). En ambos casos la simulación es estrictamente lineal.

b. Modelo completo: VBS tiene en cuenta todos los efectos de la fibra, lineales y no lineales. Esta es la estrategia de simulación más completa y poderosa

Un aspecto importante que caracteriza a OptSim es la utilización de una doble máquina de simulación, definiendo dos modos de simulación, modo bloque y modo muestra:

- Modo de bloque: En este se realizan simulaciones en las que los datos de la señal que pasan entre los componentes representan todo el tiempo simulado en un bloque de datos. La ventaja de este enfoque es que los modelos y algoritmos de componentes pueden trabajar fácilmente con toda la señal, transformándola entre los dominios de tiempo y frecuencia para operar en los datos en el dominio más conveniente para el algoritmo de simulación.

- Modo de muestra: En este modo se realiza simulaciones en las que los datos de la señal que pasan entre los componentes representan una sola muestra o paso de tiempo a la vez. A diferencia del enfoque de simulación en modo de bloque, donde un modelo de componente solo puede pasar datos a otro modelo de componente una vez durante el curso de la simulación, cubriendo todo el tiempo simulado en un bloque de datos, en el enfoque de simulación en modo de muestra, un modelo de componente pasará una nueva muestra datos a otro modelo de componente en cada paso de tiempo de la simulación. Una ventaja de este enfoque es que las simulaciones se pueden realizar durante una cantidad ilimitada de tiempo simulado cubriendo una longitud de secuencia transmitida ilimitada. En este modo, el procesamiento de la señal se realiza completamente en el dominio del tiempo.

Además, la herramienta se compone de un modo de análisis donde se puede observar el comportamiento del sistema a partir de gráficas analíticas. Como se mencionó en el apartado anterior se tienen dos máquinas o motores de simulación, por lo tanto, se tienen dos modos de análisis, tanto el modo de análisis del modo en bloque y modo de análisis del modo de muestra.

En concordancia con los objetivos del presente trabajo de grado y teniendo en cuenta que la Universidad del Cauca dispone actualmente de la licencia de OptSim, se ha definido trabajar exclusivamente con dicho entorno de simulación, debido a que es una herramienta amigable, fácil de estudiar y manejar en poco tiempo.

3.3 Modelo conceptual

En el presente apartado se define una red característica, como un modelo (abstracción de la realidad) en OptSim, el cual permite realizar la evaluación del desempeño a nivel físico de las diferentes arquitecturas PON definidas por FSAN. El modelo está compuesto por una Red PON y en el escenario de simulación propuesto se realiza la evaluación del desempeño con base en los parámetros OPM a nivel físico, con el fin de cumplir los objetivos propuestos.

De acuerdo con la metodología de simulación, se debe crear un modelo conceptual que va de lo general a lo específico. Como primera medida en la Figura 3.2 se muestra un esquema general del modelo y en la Figura 3.3 un esquema general de un enlace con multiplexación.

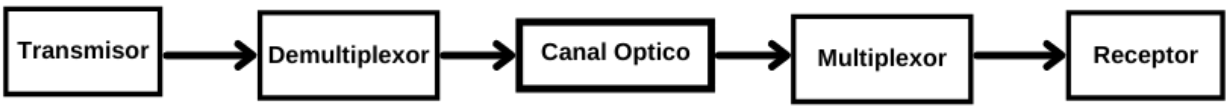


Figura 3.2 Esquema general

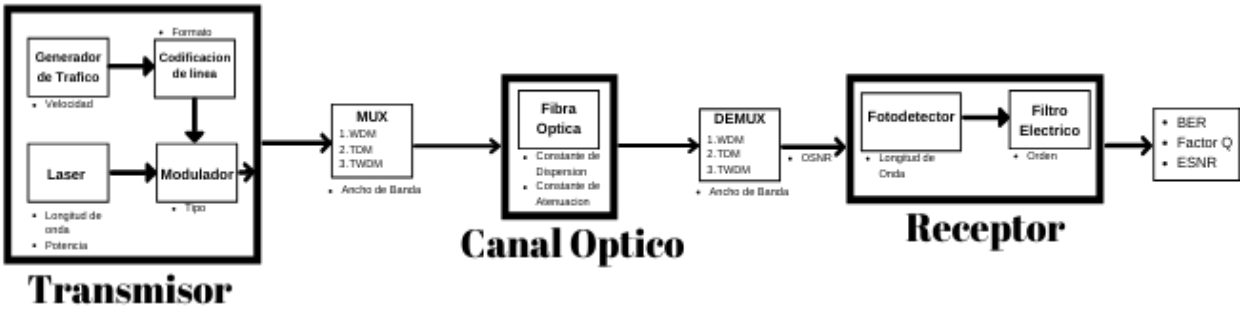


Figura 3.3 Esquema general de un enlace con multiplexación

3.3.1 Escenarios de simulación

Con el fin de poder cumplir los objetivos del proyecto de grado se definen tres escenarios de estudio, donde se analiza el desempeño óptico mediante la BER, factor Q, Diagrama del ojo, y Jitter de cada una de las arquitecturas definidas anteriormente (GPON, XG-PON, y NG-PON2) en el enlace de bajada. En cada escenario que corresponde a una arquitectura PON diferente se plantean dos casos de estudio, que dependerán de un parámetro de diseño como lo es la relación de división. Anteriormente en el apartado 2.4 donde se describen los parámetros de diseño más relevantes a la hora de implementar una red PON, se destaca dicho parámetro debido a que el número de usuario que alcance con una relación de división podría repercutir en otros factores como alcance, ancho de banda, costos, potencias entre otros. Por lo tanto, para el primer caso

de estudio se utilizará una relación de división de 1:32 lo cual es habitual en las redes PON con capacidad de Gigabit según el estándar de la ITU-T 984. y para el segundo caso de estudio se utilizará una relación de 1:64 con el fin de observar si es conveniente sacrificar un mayor alcance en lo que respecta al número de usuarios para poder obtener un desempeño óptico aceptable de acuerdo con los parámetros OPM. Los otros parámetros de diseño se tendrán en cuenta para poder evaluar el desempeño de la red, estos se dividen en fijos y variables, en los fijos se tendrán la codificación, tipo de láser, modulador, sensibilidad del receptor, potencia de transmisión y tipo de fibra, mientras que en los parámetros variables se encontrará la distancia, para este parámetros variables se realizara una variación de la distancia entre la ONT y la OLT, que permita obtener un desempeño aceptable en cada una de las arquitecturas.

En los siguientes apartados se presentan las características y parámetros de configuración de los elementos utilizados para la implementación de cada escenario de simulación.

En la Figura 3.4 se observan los escenarios de simulación propuestos y lo explicado anteriormente.

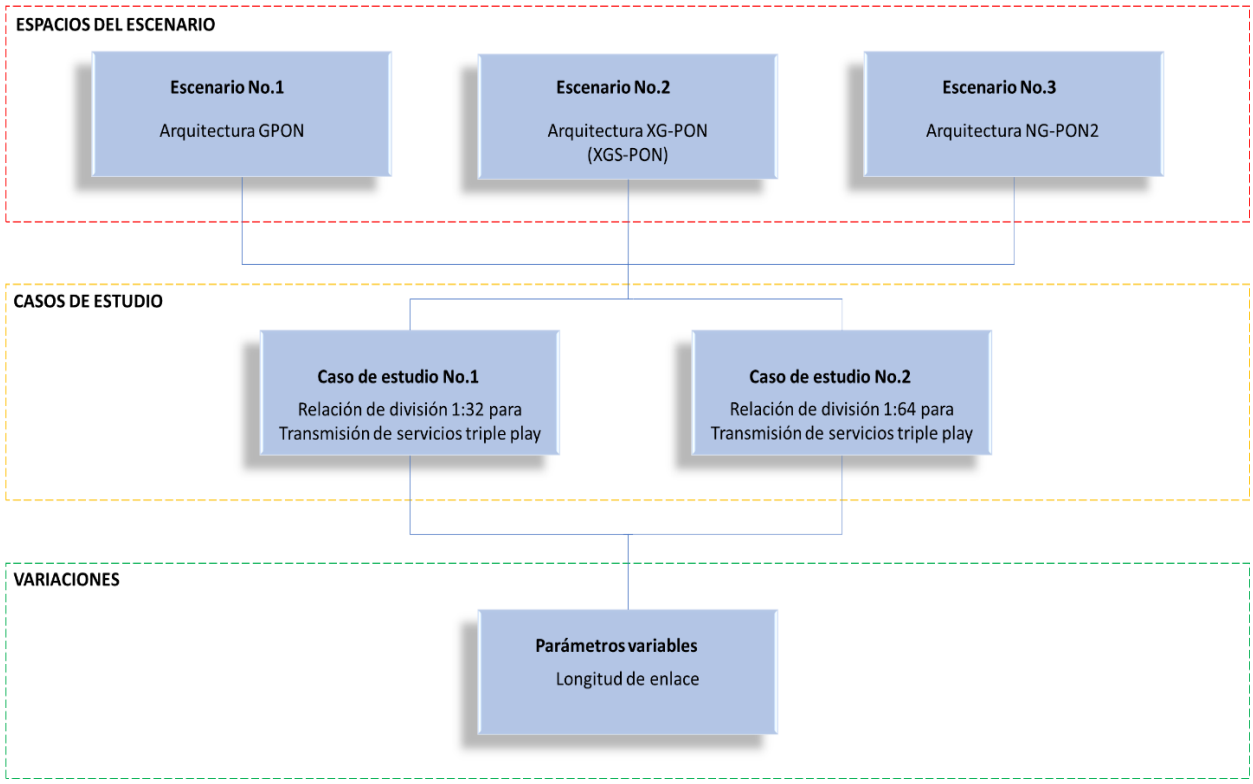


Figura 3.4 Escenarios de Simulación

3.3.2 Escenario 1: Arquitectura GPON

Para el primer escenario de simulación se requiere analizar el desempeño de una red basada en la arquitectura GPON de acuerdo con los parámetros de la caracterización de esta arquitectura realizada en los capítulos anteriores. Se utiliza un láser Fabry-Perot con una de longitud de onda de 1490 nm, la potencia del transmisor se ajusta a la potencia máxima según los estándares de la UIT-T correspondiente a 0 dBm, un modulador Mach-Zender con un formato de modulacion NRZ-OOK, un cable de fibra óptica monomodo (SMF) G.652 con una longitud variable, y finalmente para el receptor óptico se tiene un fotodiodo de avalancha (APD – Avalanche Photodiode).

Los casos de estudio se realizan en la relación de división del canal de transmisión y para el primer escenario de simulación son los siguientes:

- Caso de estudio 1: Relación de división 1:32
- Caso de estudio 2: Relación de división 1:64

En la Figura 3.5 se encuentra el esquema de manera conceptual del primer escenario de simulación.

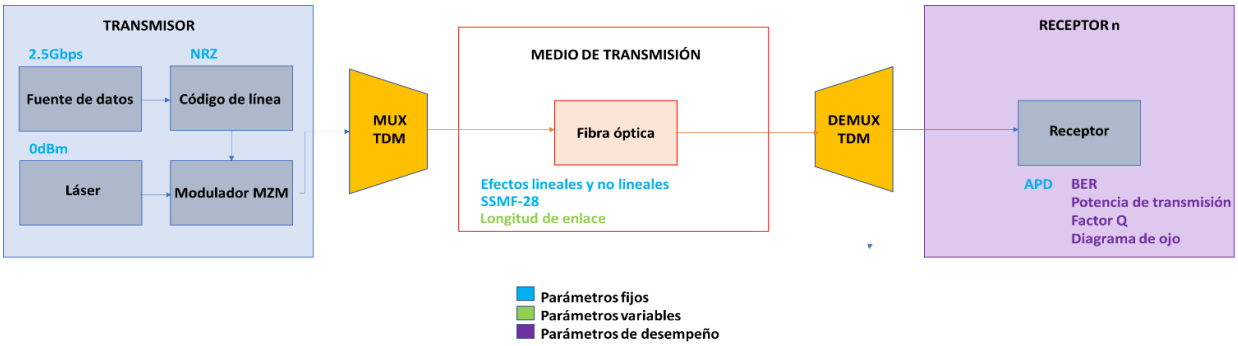


Figura 3.5 Esquema primer escenario de simulación

En la Tabla 3.1 y Tabla 3.2 se encuentran resumidas las características y parámetros técnicos del transmisor y el receptor de los escenarios de simulación con el cual se plantea el diseño de la red GPON para las distintas relaciones de división. En los otros dos escenarios de simulación las características del transmisor y receptor son iguales.

CARÁTERISTICAS DEL TRANSMISOR	
PARÁMETROS	VALORES
Modulador	MZM
Potencia de Tx del Laser	0 dBm
Formato de Modulación	NRZ

Tabla 3.1 Características del Transmisor

CARÁTERISTICAS DEL RECEPTOR	
PARÁMETROS	VALORES
Sensibilidad	-30 dBm
Factor Q	7 dB
BER	1 e-12

Tabla 3.2 Características del Receptor

En la Tabla 3.3 se presentan las características y especificaciones técnicas de la fibra Corning SSMF-28 la cual se va a utilizar para el enlace de todos los escenarios de simulación. Por practicidad solo se describirá en el primer escenario debido a que en las demás arquitecturas PON se utiliza la misma fibra.

ATRIBUTO	DETALLE	VALOR
Diámetro de campo modal	Rango de valores nominales	9.2-10.4µm
	Tolerancia	±0.5µm
Diámetro de revestimiento	Nominal	125µm
	Tolerancia	±0.7µm
Atenuación	1550 nm	≤ 0.35dB/Km
PMD	Valor del diseño para el enlace	0.2ps/$Km^{1/2}$
	Máximo de Fibra Individual	0.2ps/$Km^{1/2}$
Coeficiente de Dispersión Cromática	1550 nm	16ps/nm*Km

Tabla 3.3 Características Corning SSMF-28

Para terminar con la descripción del primer escenario de simulación, en la Tabla 3.4 se encuentra los parámetros generales de la red.

CARACTERISTICAS GENERALES GPON	
PARAMETROS	VALORES
Velocidad de la fuente de datos	2.5 Gbps
Tecnología de Red	TDM
Banda	Banda S
Ventana	1490 nm
Estándar Utilizado	ITU-T G.984
Tipo de Fibra	Corning SSMF -28
Espaciamiento de los canales WDM	-
Número de canales implementados	1

Tabla 3.4 Características Generales

3.3.3 Escenario 2: Arquitectura XG-PON (XGS-PON)

El escenario 2 de simulación corresponde al análisis del desempeño de una red basada en una arquitectura XG-PON y XGS-PON, es conveniente desarrollar estás dos arquitecturas en un mismo escenario de simulación debido a que el presente trabajo de grado se centra en analizar el enlace de bajada, el cual es el mismo para las dos arquitecturas mencionadas. Según la caracterización realizada en el capítulo 2, se utiliza un láser Fabry-Perot con una de longitud de onda de 1575-1580 nm, una potencia de la transmisión que se ajusta a 8 dBm y a una de 0dbm, un modulador Mach-Zender con un formato de codificación NRZ, un cable de fibra óptica monomodo (SMF) G.652 con una longitud variable, y finalmente para el receptor óptico se tiene un fotodiodo de avalancha (APD – *Avalanche Photodiode*).

Los casos de estudio se realizan en la relación de división de canal de transmisión y para el segundo escenario de simulación son los siguientes:

- Caso de estudio 1: Relación de división 1:32
- Caso de estudio 2: Relación de división 1:64

En la Figura 3.6 se encuentra el esquema de manera conceptual del segundo escenario de simulación.

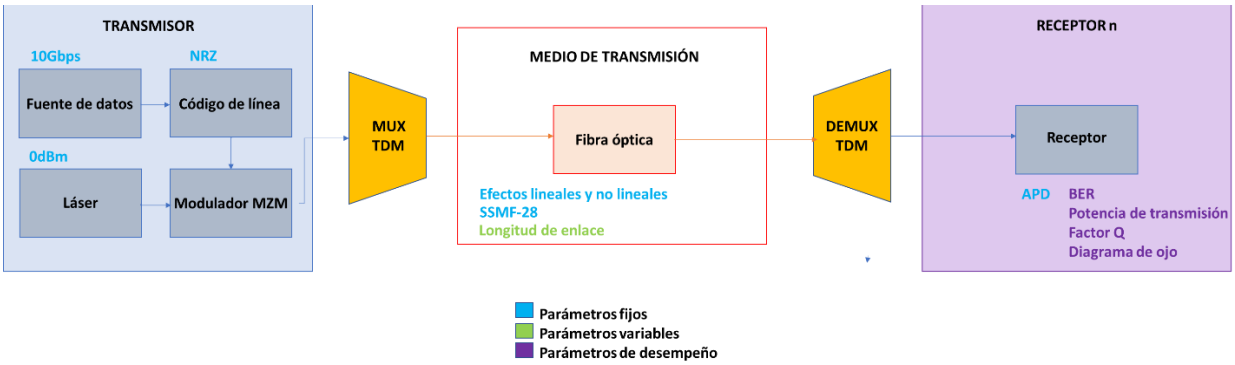


Figura 3.6 Esquema General Escenario 2 de Simulación

Siguiendo con los parámetros generales de la red XG-PON se describen en la Tabla 3.5.

CARACTERISTICAS GENERALES XG(S)-PON	
PARAMETROS	VALORES
Velocidad de la fuente de datos	10 Gbps
Tecnología de Red	WDM
Banda	Banda L
Ventana	1575-1580 nm
Estándar Utilizado	ITU-T G.987
Tipo de Fibra	Corning SSMF -28

Tabla 3.5 Características Generales XG(S)-PON

3.3.4 Escenario 3: Arquitectura NG-PON2

En el escenario 3 de simulación se evalúa el desempeño de una red basada en una arquitectura NG-PON2, para este escenario la tasa de bits transmitida por cada láser es de 10 Gbps en el enlace de bajada, la cual es la más atrayente, se utilizan cuatro láseres para obtener 40Gbps. La longitud de onda del láser Fabry-Perot es de 1596 a 1603 nm, con una potencia de transmisión que se ajusta a 8 dBm y a una de 0dbm, un modulador Mach-Zender con un formato de codificación NRZ, un cable de fibra óptica monomodo (SMF) G.652 con una longitud variable, y finalmente para el receptor óptico se tiene un APD.
Los casos de estudio se rea*lizan en la relación d*e división de canal de transmisión y para el tercer escenario de simulación son los siguientes:

- Caso de estudio 1: Relación de división 1:32
- Caso de estudio 2: Relación de división 1:64

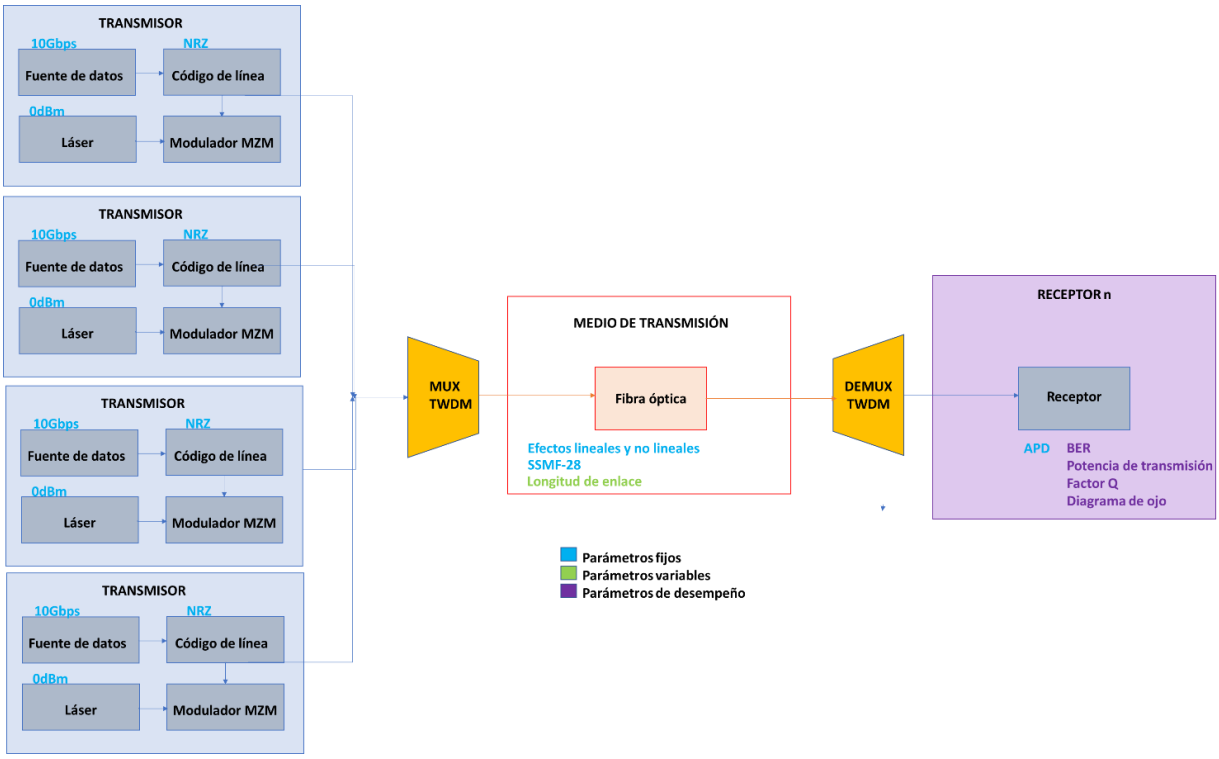


Figura 3.7 Esquema General Escenario 3 de Simulación

En la Figura 3.7 se encuentra el esquema de manera conceptual del escenario 3 de simulación.

CARACTERISTICAS GENERALES NG-PON2	
PARAMETROS	VALORES
Velocidad de la fuente de datos x Canal	10 Gbps
Tecnología de Red	TWDM
Banda	Banda L
Ventana	1596-1603 nm
Estándar Utilizado	ITU-T G989
Tipo de Fibra	Corning SSMF -28
Espaciamiento de los canales WDM	100 Mhz
Número de canales implementados	4

Tabla 3.6 Características Generales NG-PON2

Por último, en la Tabla 3.7 se encuentran las características que tendrá cada uno de los canales en NG-PON2.

Canales	Frecuencia (Thz)	Longitud de Onda (nm)	Potencia (dBm)	Velocidad (Gbps)
CH1	187.8	1.596,3890	0	10
CH2	187.7	1.597,1894	0	10
CH3	187.6	1.598,0408	0	10
CH4	187.5	1.598,8931	0	10

Tabla 3.7 Características Canales NG-PON2

Las características y parámetros técnicos del transmisor y el receptor al igual que el tipo de fibra con el cual se plantea el diseño de la red XG-PON, se encuentran en la Tabla 3.1 Características del Transmisor, Tabla 3.2 Características del Receptor y Tabla 3.3 Características Corning SSMF-28 del primer escenario de simulación.

3.4 Definición del modelo de red en el entorno de simulación (OptSim)

En esta sección se define el modelo de red sobre el cual se desarrollan las simulaciones, que consiste en una red con topología en árbol, ya que según [80] se tiene que la topología en árbol presenta un mejor desempeño en una red GPON.

La definición del modelo de red se basa en el modelo FTTH BPON (Ver Figura 3.8) traído como ejemplo por defecto en la herramienta OptSim, es de destacar que para el modelo de red del escenario de simulación de la arquitectura de NG-PON2 se tendrá una variación en la OLT donde se pasa de un transmisor (Ver Figura 3.8) a tener 4 Transmisores.

En las Tablas 3.1 a la 3.6 tenemos las características que se van a aplicar en el modelo de red presente en la Figura 3.8.

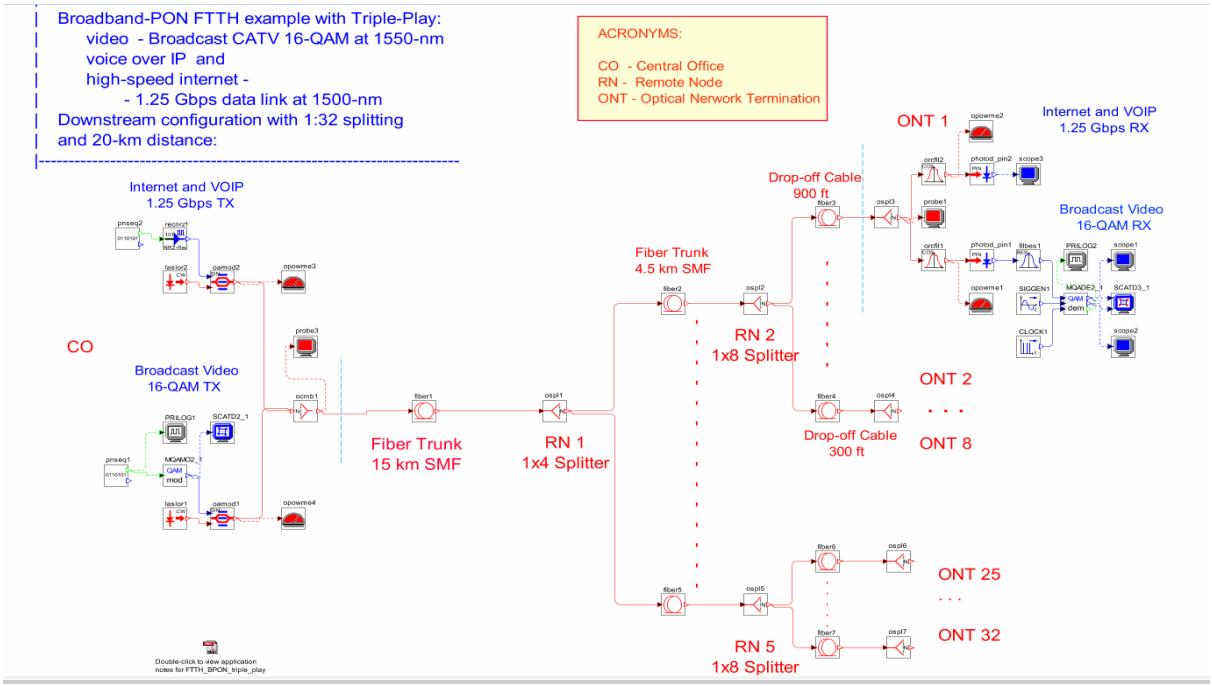


Figura 3.8 Modelo de Red FTTH BPON

En la Figura 3.8. se tiene un transmisor Broadcast de video el cual no cumple con los requisitos de desempeño del protocolo MPEG-2, por lo tanto para este caso se toma la propuesta definida en [15](Ver Figura 3.9), la cual mejora considerablemente el desempeño de la señal de video cumpliendo con el protocolo MPEG-2, esta configuración se va a realizar con los parámetros de la Tabla 3.8.

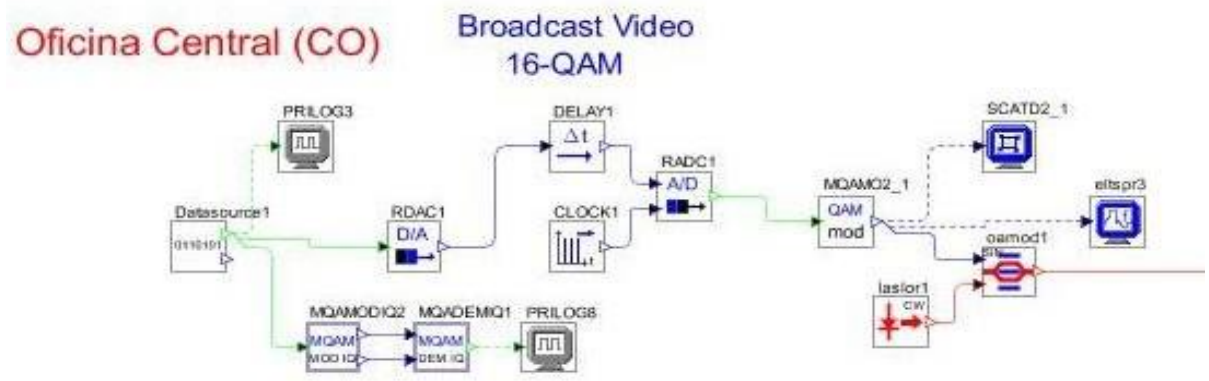


Figura 3.9. Configuración de la señal de Video Mejorada

SERVICIO DE CATV DIGITAL	
Formato de modulación multinivel	16-QAM
Velocidad de transmisión	0.8 Gbps
Portadora	1000 MHz
Tipo de modulación óptica	Externa
Potencia de transmisión	8 dBm
Longitud de Onda	1550 nm (Banda C)
Sensibilidad de Recepción	-16.3 dBm

Tabla 3.8 Características del Transmisor de la señal de Video.

Los elementos que se van a usar en la herramienta de simulación son los siguientes:

a. March Zender Modulator

Este componente simula un modulador de entrada única. Hay dos modelos diferentes disponibles: características de entrada-salida en forma lineal y sin2.

b. CW Laser

Este modelo implementa un láser de onda continúa simplificada (CW). Hay dos opciones disponibles para el ancho de banda de ruido de fase láser: ideal (ancho de banda infinito) o realista (ancho de banda limitado), para este trabajo de grado se va a usar la opción ideal.

c. PIN Fotodiodo

Este modelo implementa un fotodiodo PIN. La corriente de salida generada por el proceso de fotodetección depende de la potencia óptica de entrada y de la corriente oscura y este modelo también se considera el ruido de disparo.

d. Optical Splitter

Este componente implementa un divisor balanceado con la misma atenuación en cada salida.

e. Fuente de Datos

Este componente simula un generador de señales lógicas pseudoaleatorias o deterministas. La velocidad en baudios, la longitud de la secuencia y el nivel de la señal lógica (número de bits por símbolo) se pueden personalizar.

f. NRZ

Este componente simula el controlador rectangular NRZ. Tiene una señal de salida eléctrica que puede asumir uno de los dos niveles eléctricos dependiendo del bit

transmitido. Cuando se alimenta un "1" en el controlador, la señal de salida está en el nivel bajo durante todo el tiempo de bit. Cuando se introduce un "0" en el controlador, la señal de salida está en el nivel alto durante todo el tiempo de bit. El cambio entre los dos niveles puede ser instantáneo si el campo Pendiente de tiempo se establece en cero, o no de otra manera, con la pendiente de tiempo deseada.

g. Fibra

Este componente modela la propagación de la señal óptica a lo largo de un tramo de fibra óptica. Es uno de los componentes fundamentales y más complejos de la biblioteca OptSim.

h. Filtro Coseno Alzado

Este modelo implementa un filtro de función de transferencia de coseno elevado.
El filtro óptico de coseno elevado es útil en muchas simulaciones en las que no se conoce en detalle la forma exacta de los filtros y se desea describir los filtros simplemente con su frecuencia central y banda de paso.

i. Electrical Scope

Este componente simula un osciloscopio para señales eléctricas. Recopila datos que estarán disponibles para los siguientes diagramas:

- Amplitud de la señal eléctrica
- Diagrama de ojo
- Histograma en el instante de muestreo óptimo
- Espectro de potencia de la señal eléctrica

j. Modulador QAM

Genera una señal modulada digitalmente en formato M-QAM (código Gray). El número de niveles de modulación está determinado por la dimensión de la señal lógica de entrada; por esta razón, solo se permite una señal lógica que tenga un número par de bits.

k. Demodulador QAM

Toma una señal analítica modulada M-QAM, obtiene las dos señales de banda base en cuadratura y la cadena de bits detectada en una señal lógica de salida. No se utiliza ningún filtro coincidente.

3.5 Aspectos para considerar en la Simulación.

Para este proyecto de grado se usa el modelo de simulación VBS Full, donde se considera un modelo de fibra completo (efectos lineales y no lineales).

Es importante destacar que la dispersión cromática (la cual está relacionada intrínsecamente con la fibra) es la degradación óptica más importante en el contexto metropolitano, porque es la que mayor incidencia tiene en el desempeño de una red metropolitana, cuando la señal óptica proveniente del láser se propaga a través del canal óptico. Con respecto a la diafonía óptica, cabe resaltar que debido a que el multiplexor y el demultiplexor se consideran ideales, la incidencia que tiene esta degradación en el desempeño de la red metropolitana para efectos de la simulación no se tiene en cuenta.
Para los escenarios de simulación, se necesita definir un plan de frecuencias con el fin de asegurar un buen desempeño del sistema, de acuerdo con las recomendaciones de la ITU-T.

Finalmente, después de haber descrito, adaptado y aplicado la metodología adaptada en 3.1., estudiado y escogido la herramienta de simulación, diseñado la simulación, definido el modelo conceptual y el modelo de red con sus respectivos escenarios y configuración de parámetros, a continuación, se procede a analizar los datos de los resultados de las pruebas que permitan evaluar el desempeño de las arquitecturas PON.

4 Capitulo IV. Simulación y Evaluación del desempeño de las Arquitecturas PON

El presente capitulo comprende el desarrollo y la implementación mediante el software Optsim de los diferentes escenarios de simulación mencionados anteriormente, para poder evaluar y analizar el desempeño de las arquitecturas GPON, XG-PON y NG-PON2 con los servicios de triple play. El análisis de los casos de estudio en cada uno de los escenarios de simulación se basa principalmente en la observación de los parámetros de desempeño como Factor Q, Jitter, BER y potencia de la señal de transmisión , con una potencia fija y una variación de las distancias del enlace en el dominio del tiempo (*Scope*), lo cual va a permitir analizar el efecto causado por la dispersión cromática que depende de algunos factores como el tipo de fibra y de la velocidad de la transmisión de datos [81]. Así mismo se podrá determinar con los parámetros a evaluar los niveles de error de transmisión de bit, los niveles más altos de calidad de la señal, los niveles de ruido de fase y los niveles de atenuación en el sistema.

4.1 Modelos de Red implementados

En este apartado se presenta la implementación de los escenarios de simulación en la herramienta de simulación Optism y los componentes más importantes que se utilizan en una red de fibra óptica con servicios triple play. Siguiendo la metodología descrita en el capítulo 3 se estudiaron los componentes de la red desde lo general a lo específico y a continuación se muestran los esquemas en el entorno de simulación que permitieron implementar las arquitecturas G-PON, XG-PON y NG-PON2. Cabe resaltar que muchos de los modelos utilizados se encontraron como ejemplos en OptSim® de *Synopsis* y fueron adaptados para cumplir con las características de diseño de cada una de las arquitecturas.

4.1.1 Implementación del primer escenario de simulación G-PON

Como primera medida se implementa el transmisor de la red G-PON, el cual consta con un transmisor para el servicio de voz y datos y otro para el servicio de televisión (Ver Figura 4.4.1 y Figura 4.2), como se muestra en la Figura 4.2. La configuración y elementos utilizados para el transmisor de esta arquitectura se puede encontrar en la tabla 3.1 del trabajo de grado.

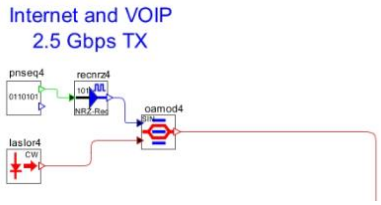


Figura 4.4.1 Transmisor de Datos

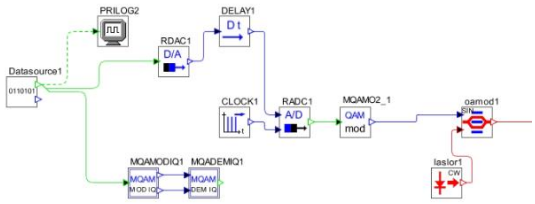


Figura 4.2 Transmisor de Video

El transmisor de la arquitectura GPON se ilustra en las Figura 4.4.1Figura 4.2, el cual también cuenta con dos transmisores independientes, para el servicio de televisión y para el servicio de voz y datos. Las especificaciones y elementos utilizados se encuentran en la tabla 3.2 del trabajo de grado

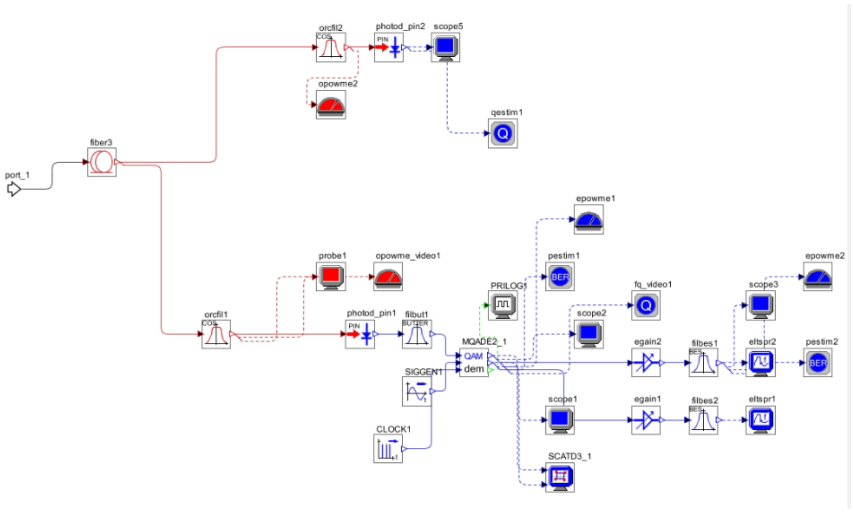


Figura 4.3 Receptor Video y datos

Finalmente, el esquema de la red GPON completa se presenta en la Figura 4.4 con 64 ONTs. Esta implementación cumple con el diseño de una de las arquitecturas propuestas por FSAN para el estudio de los parámetros de desempeño de esta. Las especificaciones de la arquitectura GPON se pueden encontrar en la tabla 3.4 del trabajo de grado.

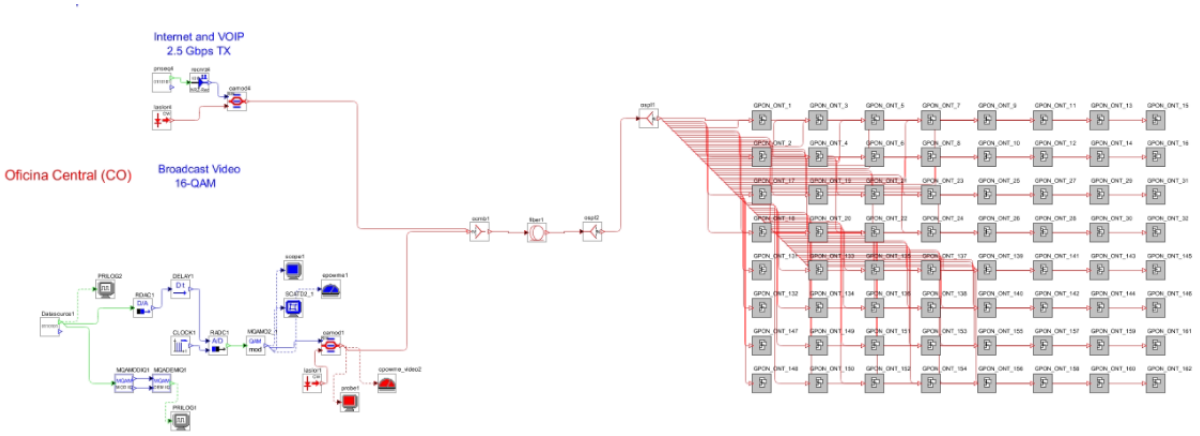


Figura 4.4 Esquema de Red G-PON

4.1.2 Implementación del segundo escenario de simulación XGPON

La segunda arquitectura implementada en el software es XGPON, esta arquitectura se diseña de manera similar a GPON sin embargo tiene algunos parámetros en la implementación que son específicos y únicos de la arquitectura.

Para la transmisión se tiene el mismo principio de la anterior arquitectura, el cual cuenta con un transmisor para el servicio de voz y datos y otro para el servicio de televisión, como se puede observar en la Figura 4.5, Figura 4.6

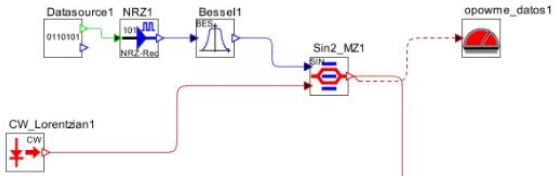


Figura 4.5 Transmisor de Voz y Datos

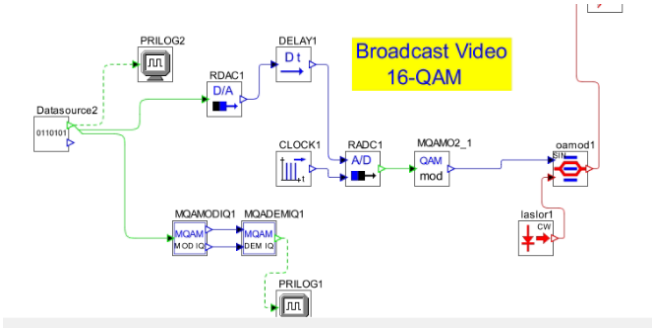


Figura 4.6 Transmisor de Video

Los receptores de XGPON se presentan en la Figura 4.7, con el mismo principio de la red GPON.

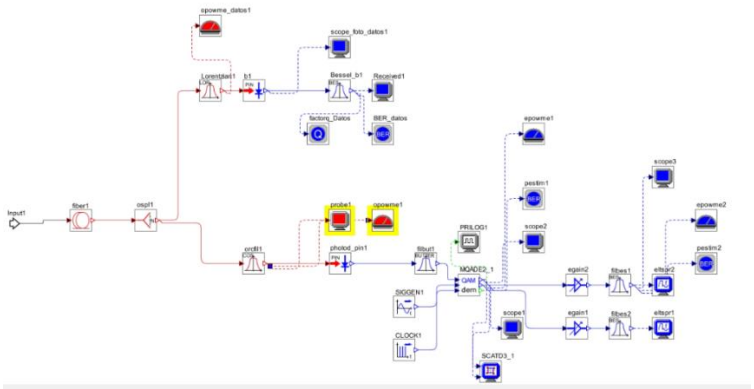


Figura 4.7 Receptor Voz, Datos y Video

Por último, en la Figura 4.8 se presenta el esquema general de la arquitectura XGPON caracterizada con los parámetros de diseño propios.

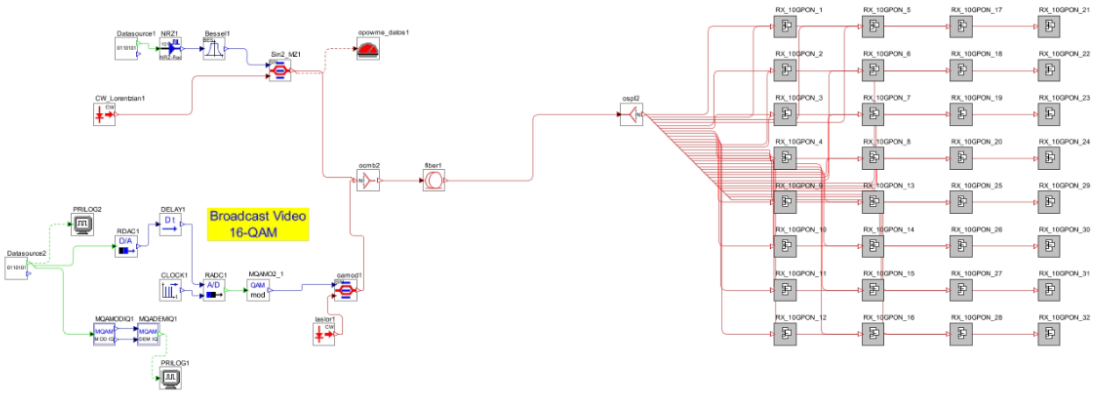


Figura 4.8 Esquema General XG-PON

4.1.3 Implementación del segundo escenario de simulación NG-PON2

Por último, se implementa la arquitectura NG-PON2, la cuál es la última propuesta por FSAN y que permitirá realizar el análisis comparativo entre las tres arquitecturas ya mencionadas. El diseño esta arquitectura en comparación con las otras dos es un poco diferente, ya que en el transmisor como se ve en la Figura 4.9, se tiene un transmisor con 4 canales, cada uno con una velocidad de 10Gbps, es de destacar que este transmisor se toma de [82] esto debido a que este se usa cuando la distancia requerida no es muy grande.

Cada canal transmitido se está manejando en las siguientes frecuencias y longitudes de onda. (Ver Tabla 4.1.)

Canales	Frecuencia (Thz)	Longitud de Onda (nm)	Potencia (dBm)
CH1	187.8	1.596,3890	0
CH2	187.7	1.597,1894	0
CH3	187.6	1.598,0408	0
CH4	187.5	1.598,8931	0

Tabla 4.1 Datos Caneles NG-PON2

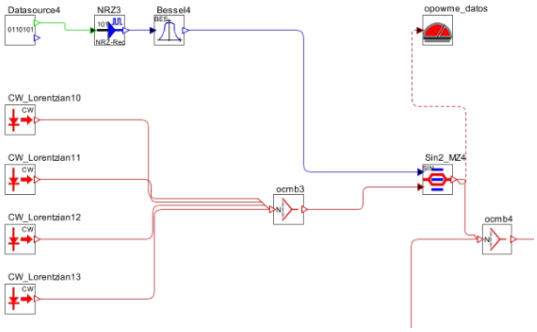


Figura 4.9 Transmisor de Voz y Datos

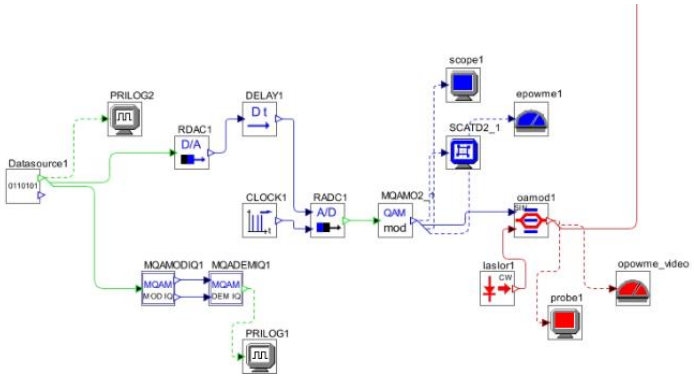


Figura 4.10 Transmisor Video

Las ONTs de NG-PON2 siguen manejando el mismo concepto de las dos arquitecturas mencionadas anteriormente, se maneja uno para voz y datos y otro para televisión.

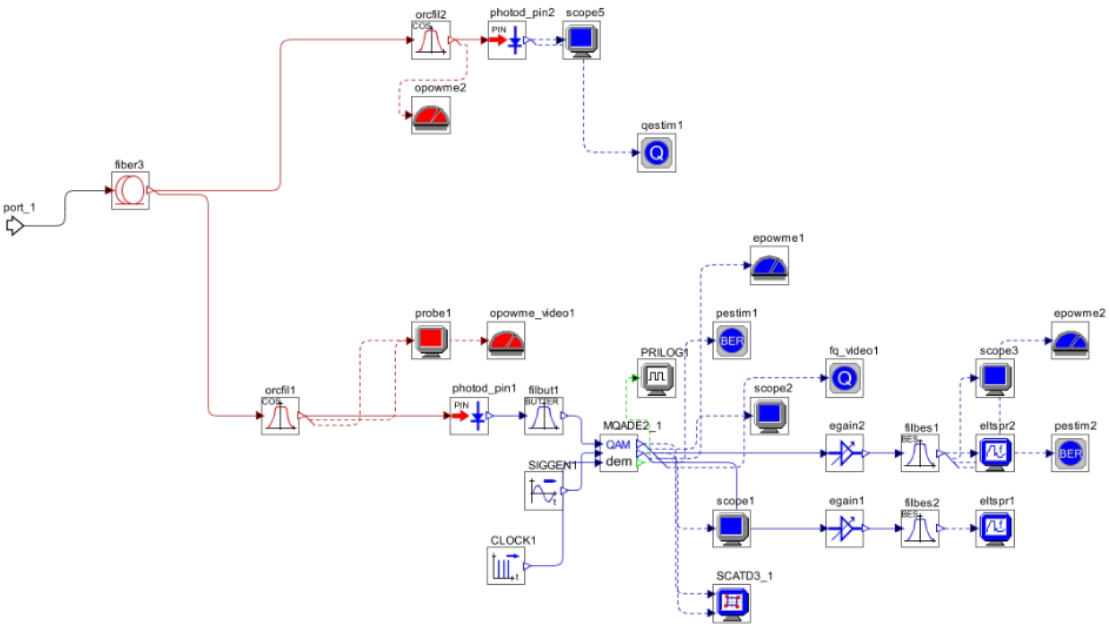


Figura 4.11 Receptor Voz, Datos y Video

Finalmente, el modelo de red de NG-PON2 se presenta en la Figura 4.12 y sus parámetros de diseño se pueden encontrar en la tabla 3.6 del trabajo de grado.

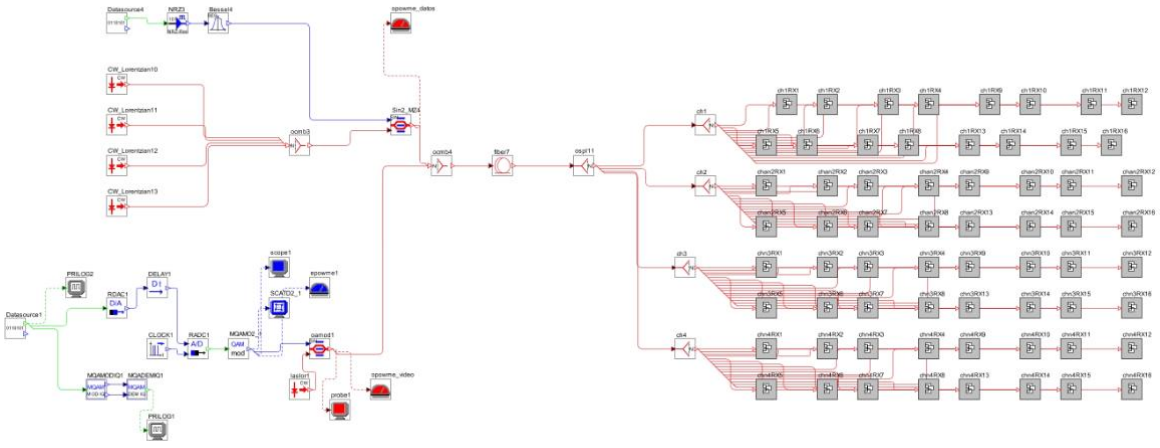


Figura 4.12 Esquema General NG-PON2

De esta manera culmina la implementación de cada una de las arquitecturas propuestas por FSAN para realizar la evaluación del desempeño óptico basado en los parámetros de desempeño OPM[3].

[3] BER, Jitter, Potencia de recepción y Factor Q

4.2 Resultados y evaluación del desempeño de los escenarios de simulación.

En este apartado se muestra la recopilación de las diferentes gráficas obtenidas de los escenarios y casos de estudio descritos, a través de la herramienta OptSim. Los parámetros que permiten evaluar el desempeño de una red PON con arquitectura FTTH, son los considerados en la capa de calidad de la señal, estos son: BER, Factor Q, Jitter y Potencia de transmisión, que resultan de gran importancia al momento de avaluar el desempeño cuando el servicio Triple Play se conforma por servicios digitales como VoIP, Internet y CATV digital [80].

Una vez finalizado cada conjunto de gráficas se tendrán en cuenta los parámetros OPM para determinar el desempeño obtenido en cada escenario de simulación y se determina la que obtiene un resultado más alto basado en los criterios que se establecen a continuación:

- La arquitectura o arquitecturas con mejor desempeño BER en el servicio triple play para un número de 32 y 64 usuarios se determina a partir de sus niveles más bajos con relación a las otras arquitecturas, este análisis podrá determinar cuál es la arquitectura que se destaca sobre las otras por obtener los niveles más bajos de error de transmisión en el sistema.
- La arquitectura o arquitecturas con mejor desempeño en el factor Q en el servicio triple play para un número de 32 y 64 usuarios se determina a partir de sus niveles más altos con relación a las otras arquitecturas, este análisis podrá determinar cuál es la arquitectura que se destaca sobre las otras por obtener los niveles más altos de calidad en el sistema.
- La arquitectura o arquitecturas con mejor desempeño en el parámetro Jitter en el servicio triple play para un número de 32 y 64 usuarios se determina a partir de sus niveles más bajos con relación a las otras arquitecturas, este análisis podrá determinar cuál es la arquitectura que se destaca sobre las otras por obtener los niveles más bajos de ruido de fase en el sistema.
- La arquitectura o arquitecturas con mejor desempeño en el parámetro de potencia óptica del receptor en el servicio triple play para un número de 32 y 64 usuarios se determina a partir de sus niveles más altos con relación a las otras arquitecturas, este análisis podrá determinar cuál es la arquitectura que se destaca sobre las otras por obtener los niveles más bajos de atenuación en el sistema.

Primero se verifica que en cada escenario de simulación se esté transmitiendo y recibiendo una señal coherente, esto se realiza mediante la comparación del diagrama de ojo obtenido del modelo Back to Back en el sistema de datos y de video con la señal recibida en el modelo implementado. Cabe resaltar que para el presente trabajo de grado los diagramas de ojo no son un parámetro de desempeño a evaluar, sin embargo, se hace uso de ellos para verificar la concordancia de la señal que se transmite.

En la Figura 4.13 se ilustra el diagrama de ojo de la señal de datos transmitida a una velocidad de 2.5 Gbps y una distancia de 5km, la cual se va a emplear en el primer escenario de simulación correspondiente a la arquitectura GPON. La Figura 4.14 ilustra la señal de datos transmitida a 10 Gbps que se emplea en los escenarios de simulación 2 y 3 con una distancia de 5km, que corresponden a XG-PON y NG-PON2 respectivamente, recordando que el último de estos se implementa con 4 transmisores a 10 Gbps. Por último, en la Figura 4.15 se encuentra la señal de video a una velocidad de 0.8 Gbps, una modulación de 16-QAM y una distancia de 5km, dicha señal se implementa en todos los escenarios de simulación.

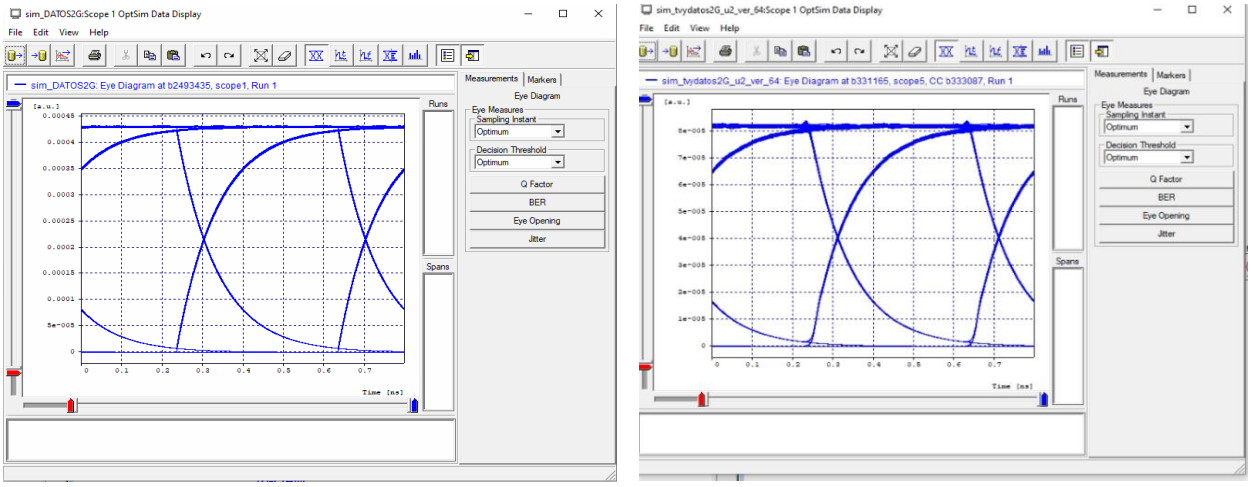


Figura 4.13 Diagrama de Ojo 2.5 Gbps Back to back vs Recibido del sistema de datos en 5km

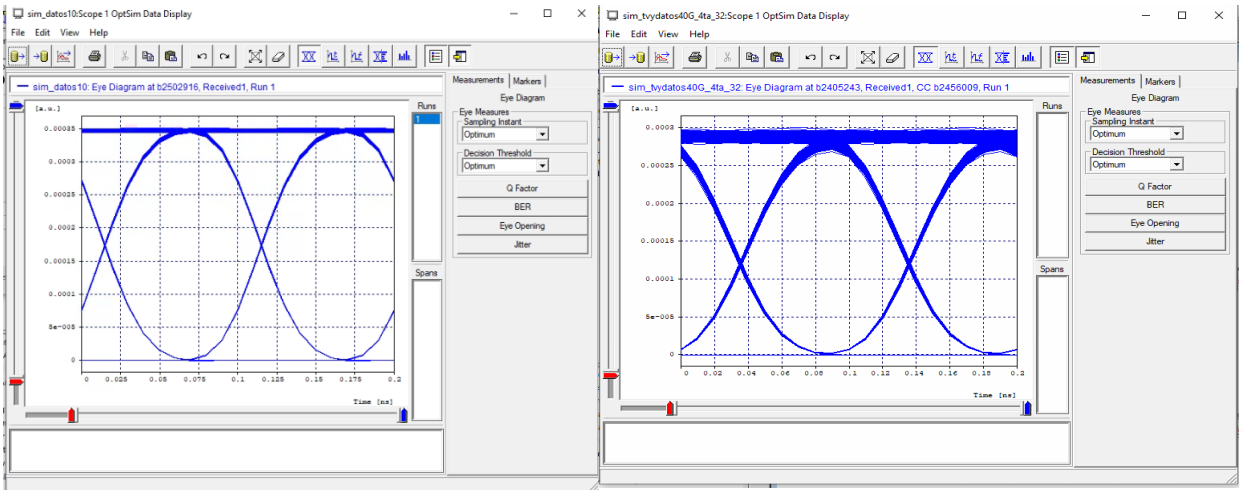


Figura 4.14 Diagrama de Ojo a 10 Gbps Back to back vs recibido del sistema de datos en 5km

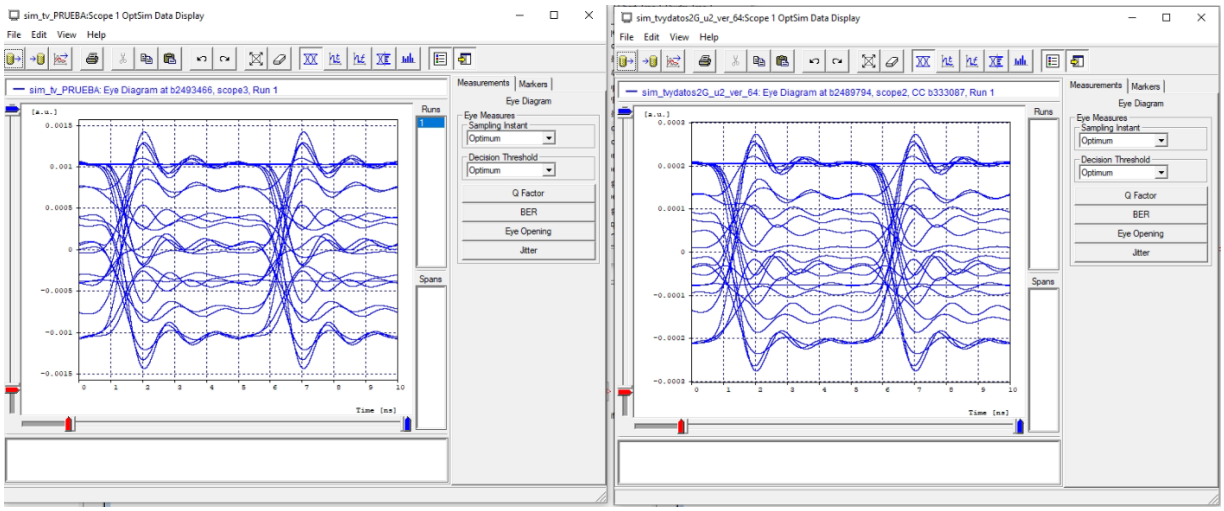


Figura 4.15 Diagrama de ojo 16-QAM Back to back vs Recibido del sistema de video a 0.8 Gbps en 5km

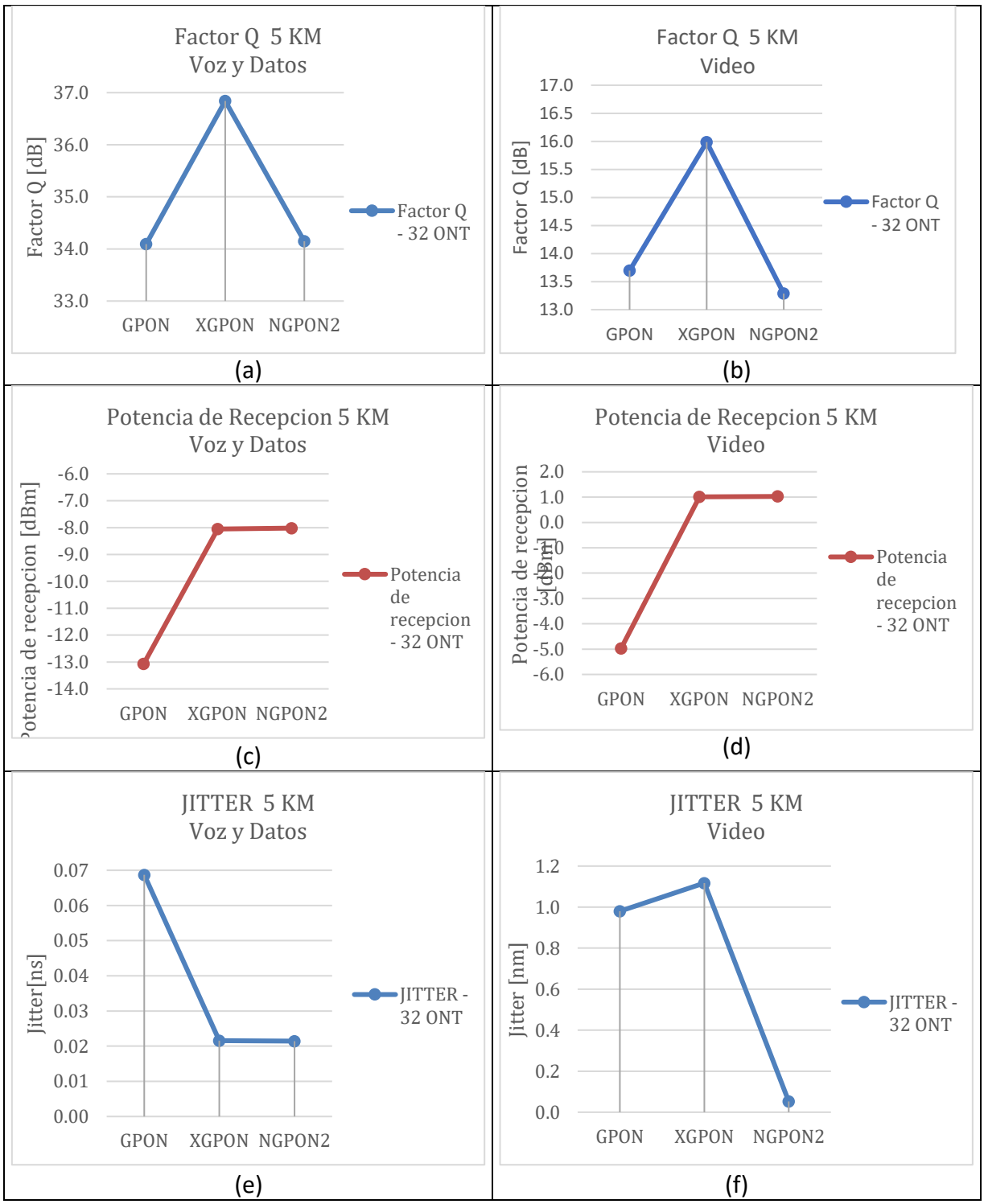
Como se observa en los diagramas de ojo de la Figura 4.13, Figura 4.14 y Figura 4.15 las señales de video y datos transmitida que se obtiene mediante el modelo Back to back se asemeja a la señal que reciben las ONTs. Una vez realizada esta comprobación de las señales que se van a utilizar en los tres escenarios de simulación, se procede en el trabajo de grado a realizar los casos de estudio en la herramienta Optsim.

4.2.1 Caso de estudio 1: Relación de división 1:32

En el primer caso de estudio se simulan los escenarios G-PON, XG-PON, NG-PON2 ofreciendo el servicio triple play con una relación de división de 1:32 y diferentes longitudes de enlace (5, 10, 15 y 20 km), para un total de 12 simulaciones realizadas. Las siguientes gráficas se construyen a partir de los datos presentes en las tablas del Anexo B, en estas tablas se encuentran los valores obtenidos en la medición de los parámetros de desempeño óptico (Factor Q, Potencia de Recepción, Jitter y BER) en cada una de las simulaciones realizadas de acuerdo con la metodología definida para sus casos de estudio y escenarios.

Para este apartado se procede a describir cada una de las tablas y gráficas con los resultados obtenidos, y al finalizar cada caso de estudio se realiza el análisis de los resultados obtenidos.

Parámetros de desempeño en el Caso de estudio No 1. Para una longitud del enlace de 5Km



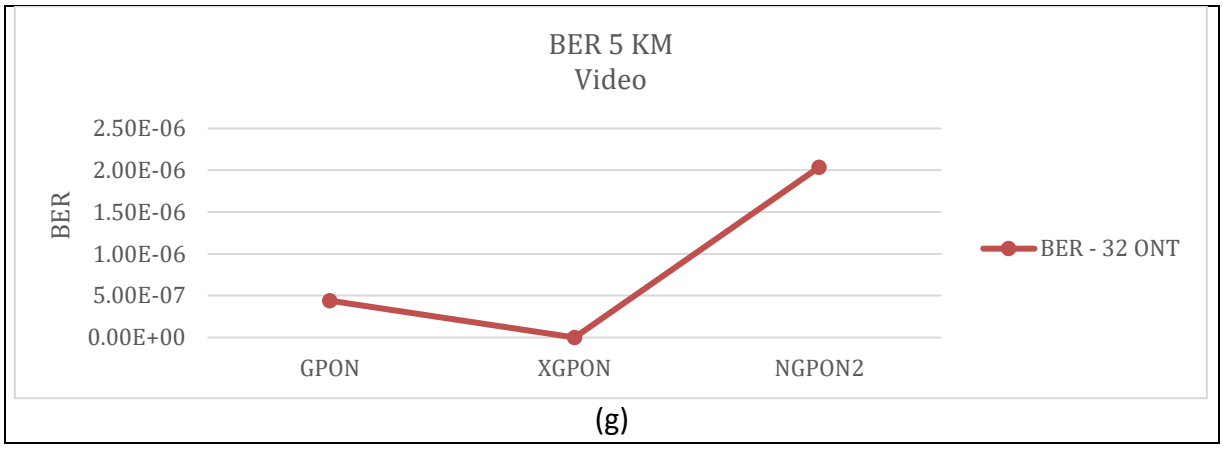
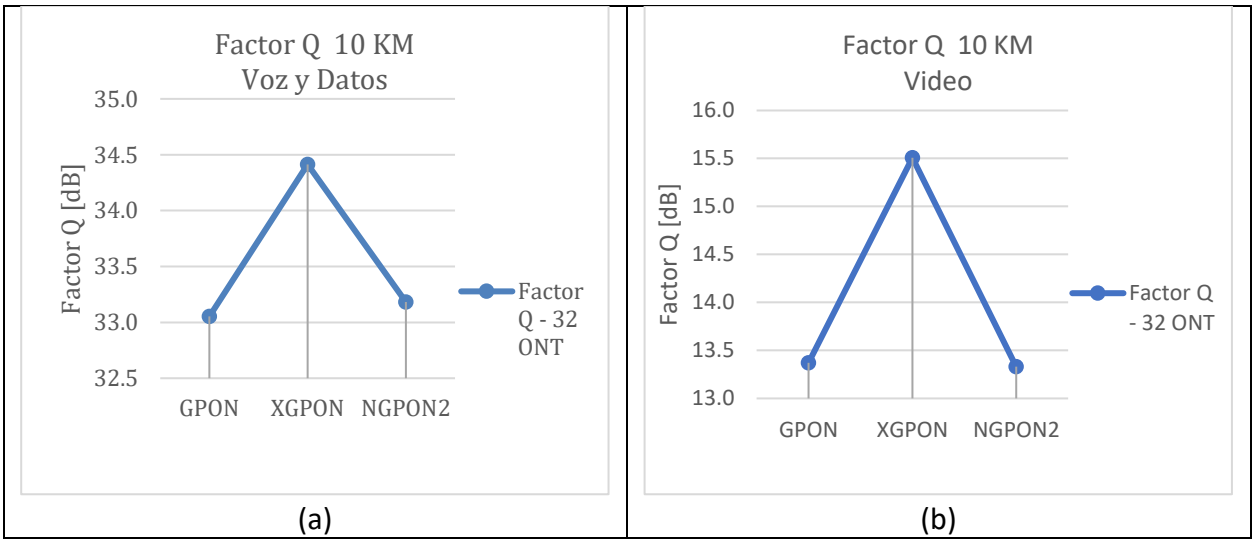


Figura 4.16 Resultados de los parámetros de desempeño OPM de las arquitecturas PON en 5Km: a) Factor Q Voz y datos, b) Factor Q Video, c) Potencia de Recepción Voz y datos, d) Potencia de Recepción Video, e) Jitter Voz y datos, f) Jitter Video, g) BER Video.

A una distancia de 5 Km según los resultados obtenidos en la Figura 4.16 se puede observar que en XG-PON obtiene valores más altos el parámetro de factor Q comparado con los de las otras arquitecturas, mientras que la potencia de recepción con valores más altos se obtiene en XG-PON y NG-PON2, de igual forma el parámetro Jitter obtiene los resultados más bajos en estas dos arquitecturas. En cuanto a la BER es de destacar que en todas las arquitecturas con los servicios de voz y datos no se obtiene una variación en el valor ($1 * 10^{-40}$) por lo que todas las arquitecturas cumplen con el estándar propuesto por la UIT-T. Finalmente en video si se obtienen algunas variaciones con el sistema de 16 QAM, en cuanto al factor Q los valores más altos los sigue ofreciendo XG-PON, la potencia de recepción siguen siendo XG-PON y NG-PON2 lo más altos, el Jitter ofrece valores más bajos en NG-PON2 y en la BER en XG-PON es la que presenta una menor tasa de transmisión con respecto a las otras dos.

Parámetros de desempeño en el Caso de estudio No 1 para una Longitud del enlace de 10 Km.



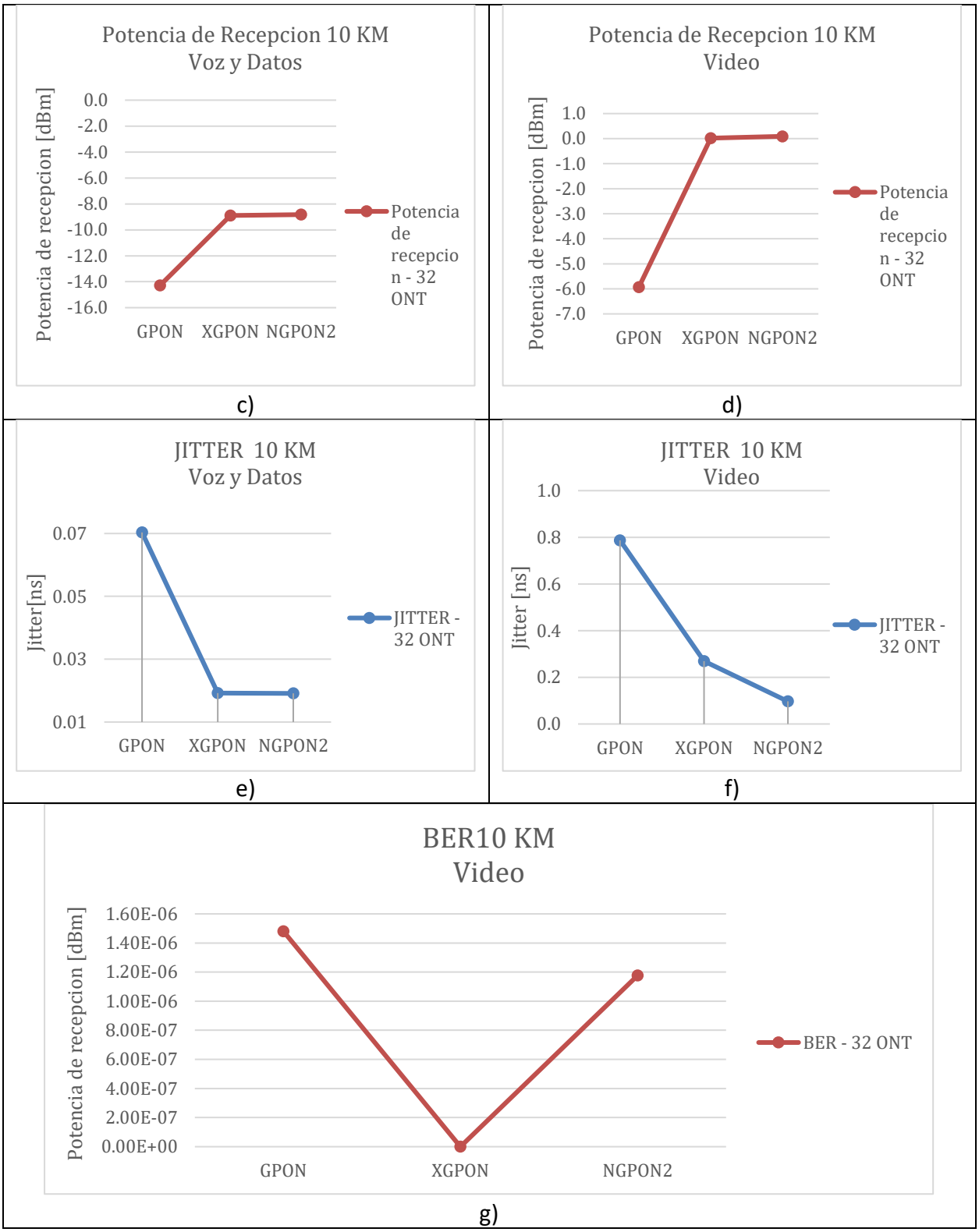
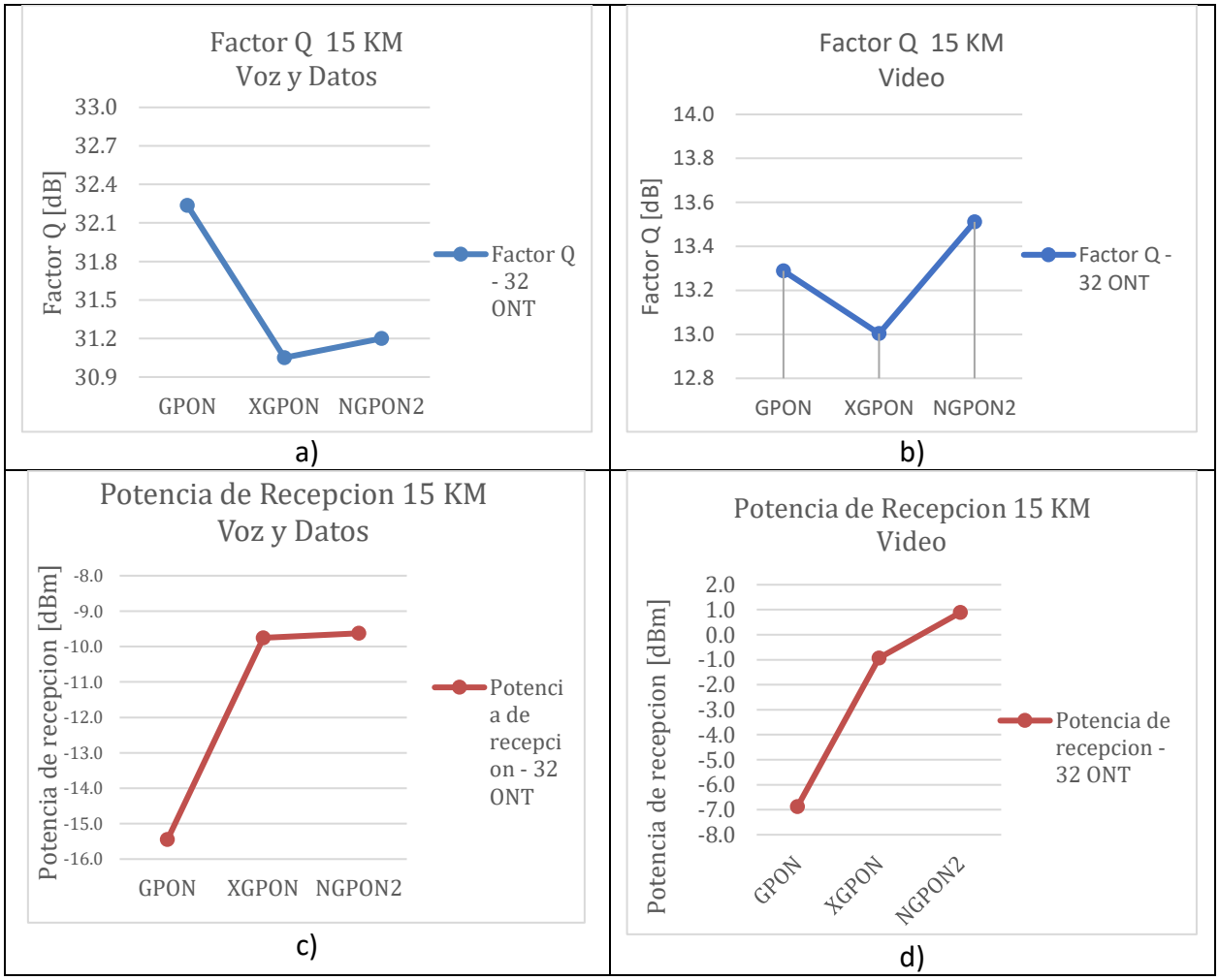


Figura 4.17 Resultados de los parámetros de desempeño OPM de las arquitecturas PON en 10 Km: a) Factor Q Voz y datos, b) Factor Q Video, c) Potencia de Recepción Voz y datos, d) Potencia de Recepción Video, e) Jitter Voz y datos, f) Jitter Video, g) BER Video.

En la Figura 4.17 se ilustran los resultados de los diferentes escenarios de simulación a una longitud del enlace de 10 Km, en la cual el factor de Q a esta distancia obtiene valores más altos en el escenario de simulación XG-PON, mientras que la potencia de recepción y el Jitter obtienen los resultados más altos y bajos respectivamente tanto en XG-PON como en NG-PON2. En el parámetro BER en voz y datos no se tiene una variación en el valor ($1 * 10^{-40}$). Finalmente, de los resultados en video la BER presenta los valores más bajos en XG-PON, el Jitter más bajo en NG-PON2, el valor más alto en el factor Q se da en la arquitectura XG-PON y la potencia de recepción con los valores más altos está en XG-PON y NG-PON2

Parámetros de desempeño en el Caso de estudio No 1 para una Longitud del enlace de 15 Km.



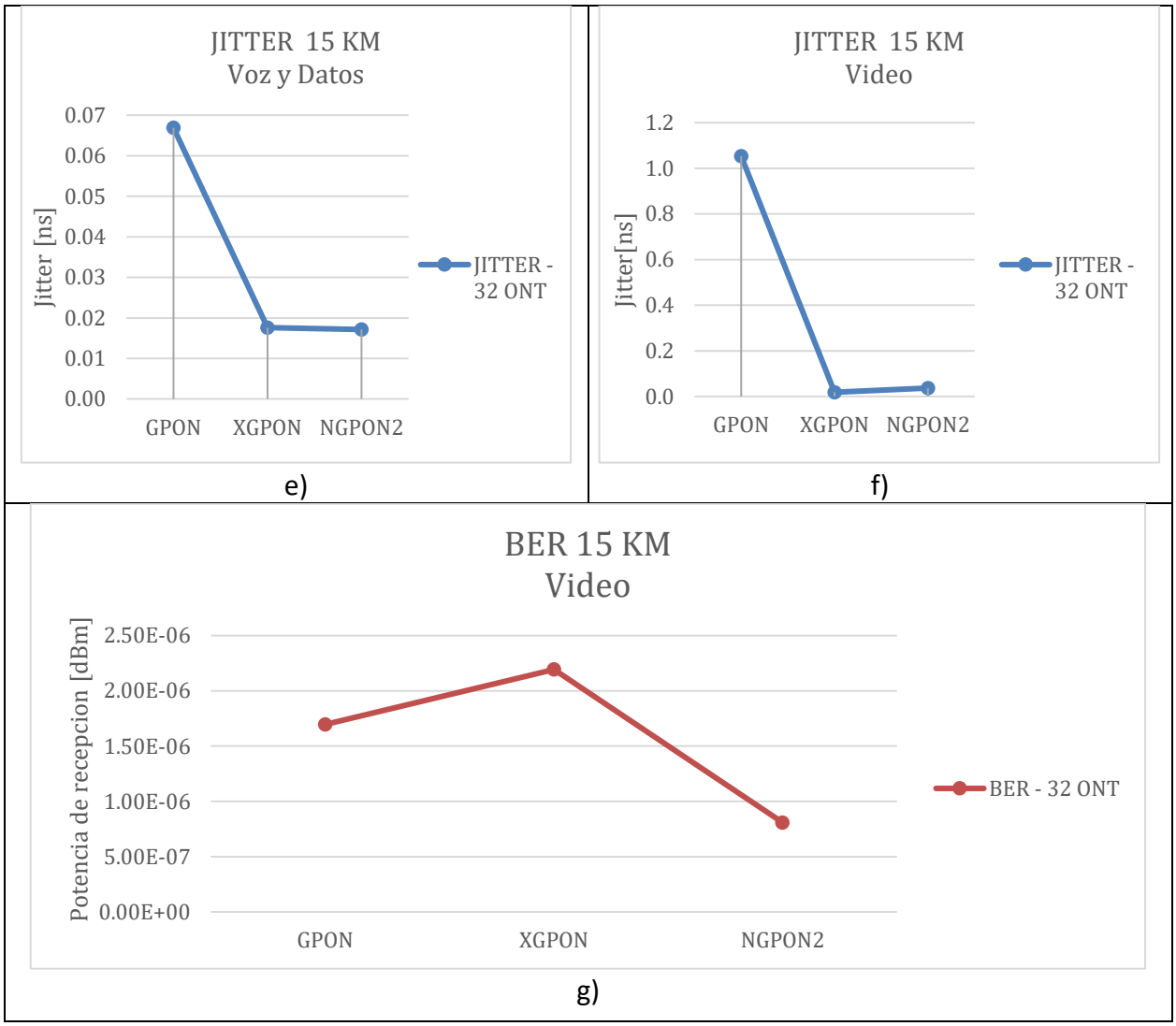
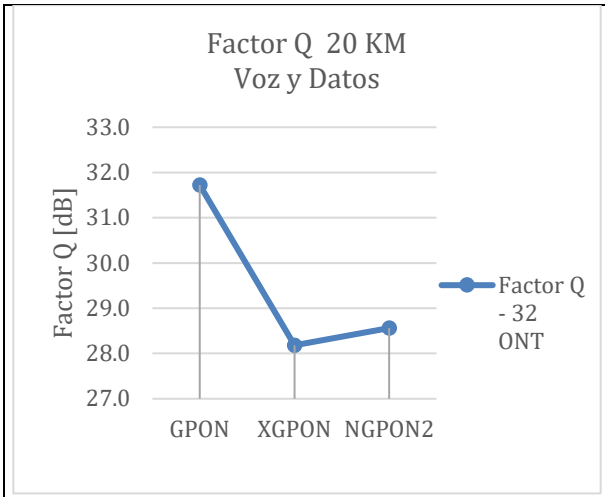


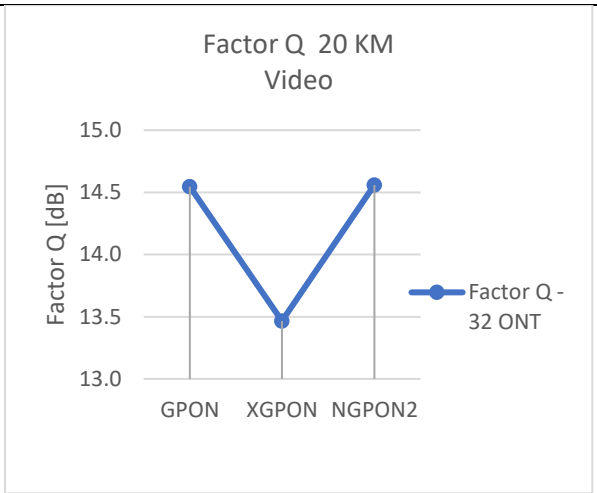
Figura 4.18 Resultados de los parámetros de desempeño OPM de las arquitecturas PON en 15 Km: a) Factor Q Voz y datos, b) Factor Q Video, c) Potencia de Recepción Voz y datos, d) Potencia de Recepción Video, e) Jitter Voz y datos, f) Jitter Video, g) BER Video.

En la Figura 4.18 se ilustran los resultados de los diferentes escenarios de simulación a una longitud del enlace de 15 Km, y de acuerdo con las gráficas el escenario donde se obtiene un valor más alto en el factor Q en voz y datos es GPON mientras que en video es NG-PON2. La potencia de recepción en ambos servicios obtiene los valores más altos en NG-PON2, el Jitter más bajo se presenta en XG-PON2 y NG-PON2 para ambos servicios y finalmente la BER en video es más baja para la arquitectura NG-PON2.

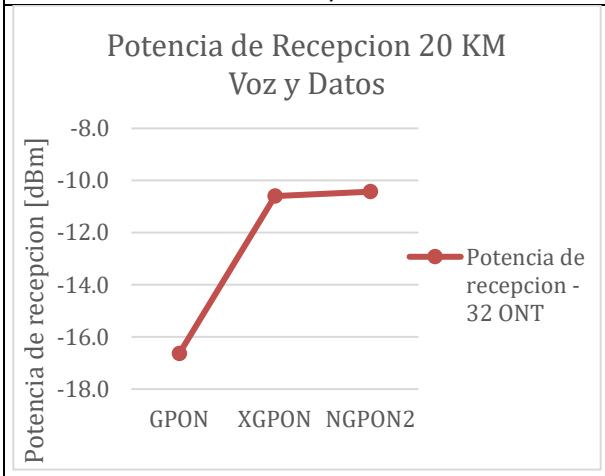
Parámetros de desempeño en el Caso de estudio No 1. Para una longitud del enlace de 20 Km



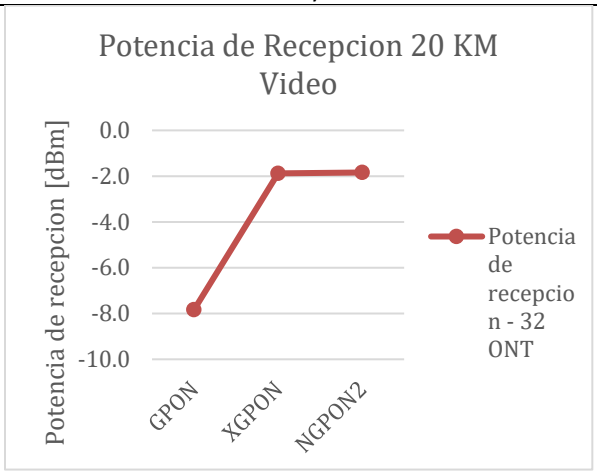
a)



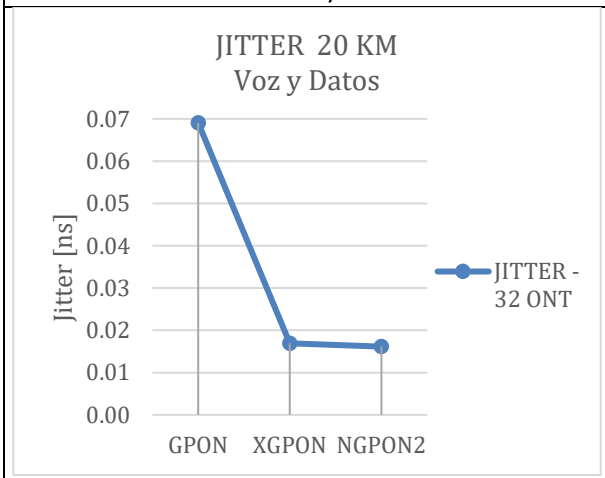
b)



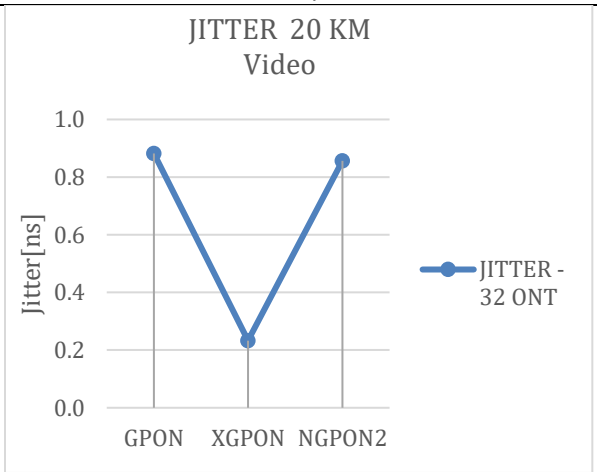
c)



d)



e)



f)

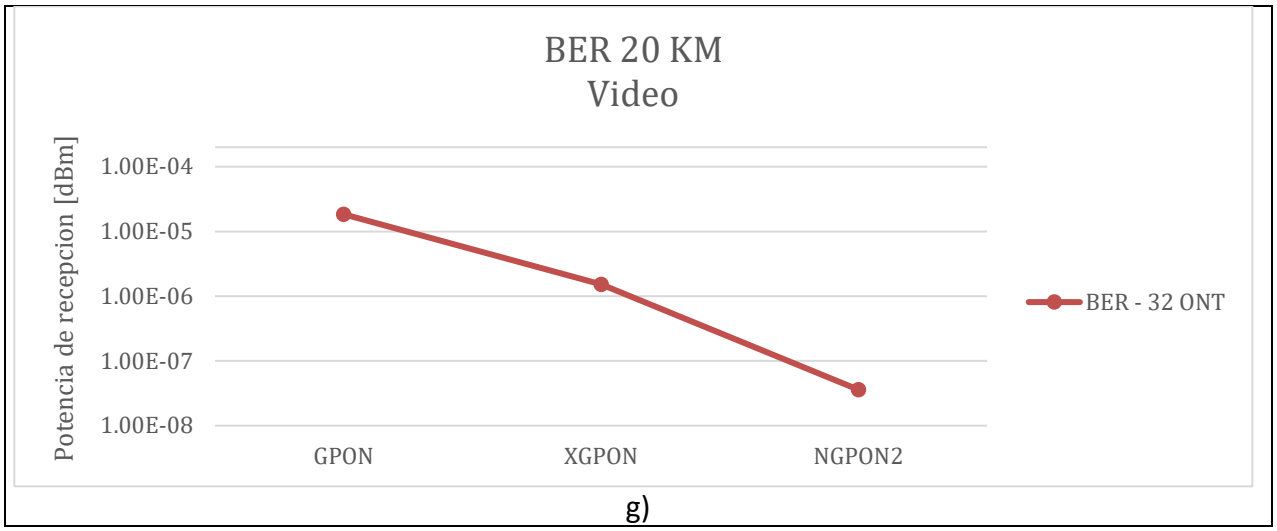


Figura 4.19 Resultados de los parámetros de desempeño OPM de las arquitecturas PON en 20 Km: a) Factor Q Voz y datos, b) Factor Q Video, c) Potencia de Recepción Voz y datos, d) Potencia de Recepción Video, e) Jitter Voz y datos, f) Jitter Video, g) BER Video.

Al seguir incrementando la distancia, la arquitectura GPON comienza a mostrar valores más altos en el factor de calidad mientras que la potencia de recepción en ambos servicios presenta valores más altos en XG-PON y NG-PON2. El Jitter en voz y datos presenta los valores más bajos en XG-PON y NG-PON2, mientras que el Jitter en video obtiene el valor más bajo en XG-PON, finalmente la BER en video con los resultados más bajos se encuentra en el escenario de NG-PON2.

Análisis del desempeño caso de estudio 1 Relación de división 1:32

A una distancia de 5 y 10 km se observa en las gráficas que las arquitecturas con un desempeño más alto en cada uno de los parámetros analizados son XG-PON y NG-PON2, esto se debe a que la longitud de onda al ser mayor con respecto a la de GPON, la atenuación es pequeña para estas longitudes por lo que la potencia de recepción es más alta para estas arquitecturas. Por otro lado, las cortas distancias (hasta 10km) la dispersión cromática y otros efectos no lineales, no afectan de manera significativa la señal al utilizar altas tasas de transmisión como lo es 10Gbps, sim embargo a distancias de 15 y 20 km se obtienen valores más altos en el factor Q en GPON debido a que estos efectos comienzan a perturbar el desempeño en arquitecturas de alta velocidad de transmisión como lo son XG-PON y NG-PON2, esto sugiere o indica que para poder compensar dichos efectos se tendría que recurrir a fibras de compensación.

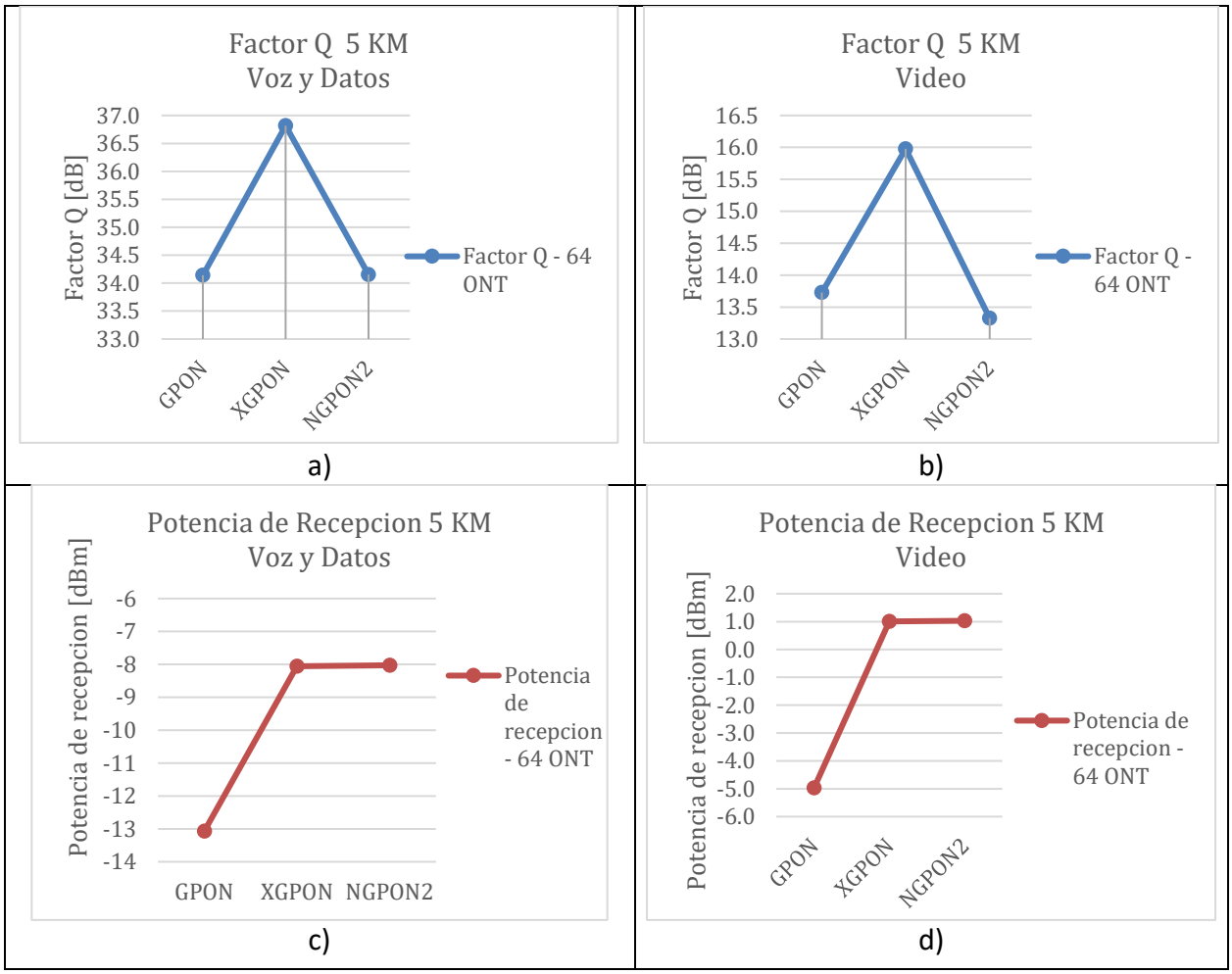
Del anterior grupo de gráficos que representan los resultados obtenidos en las simulaciones, se observa que los parámetros de desempeño del servicio Internet/VoIP evaluados en cada una de las arquitecturas PON evaluadas mantienen una dependencia de la distancia existente entre el OLT y cada ONT que compone la red y se ven afectados por la tasa de transmisión y la longitud de onda con la que opera cada arquitectura. Además, se puede observar de manera individual

en cada escenario que los resultados de la BER y del Jitter se ven directamente relacionados con la distancia, es decir que al incrementar la distancia entre el OLT y el ONT, sus valores aumentan, mientras que los parámetros como factor Q y potencia en la recepción se ven inversamente relacionados con la distancia, es decir a mayores distancias sus valores disminuyen.

4.2.2 Caso de estudio 2: Relación de división 1:64

Siguiendo con la metodología del caso de estudio 1, para este segundo caso se simulan los mismos escenarios de simulación (GPON, XG-PON y NG-PON2) ofreciendo el servicio triple play pero con una relación de división 1:64 para determinar qué tanto influye este incremento en el desempeño de cada uno de los escenarios. Todos los resultados de las gráficas se pueden comprobar igualmente en las tablas del Anexo B. Igualmente que en el caso de estudio 1 primero se procede a describir cada uno de los resultados para luego realizar el análisis del desempeño.

Parámetros de desempeño en el Caso de estudio No 2. Para una longitud del enlace de 5 Km



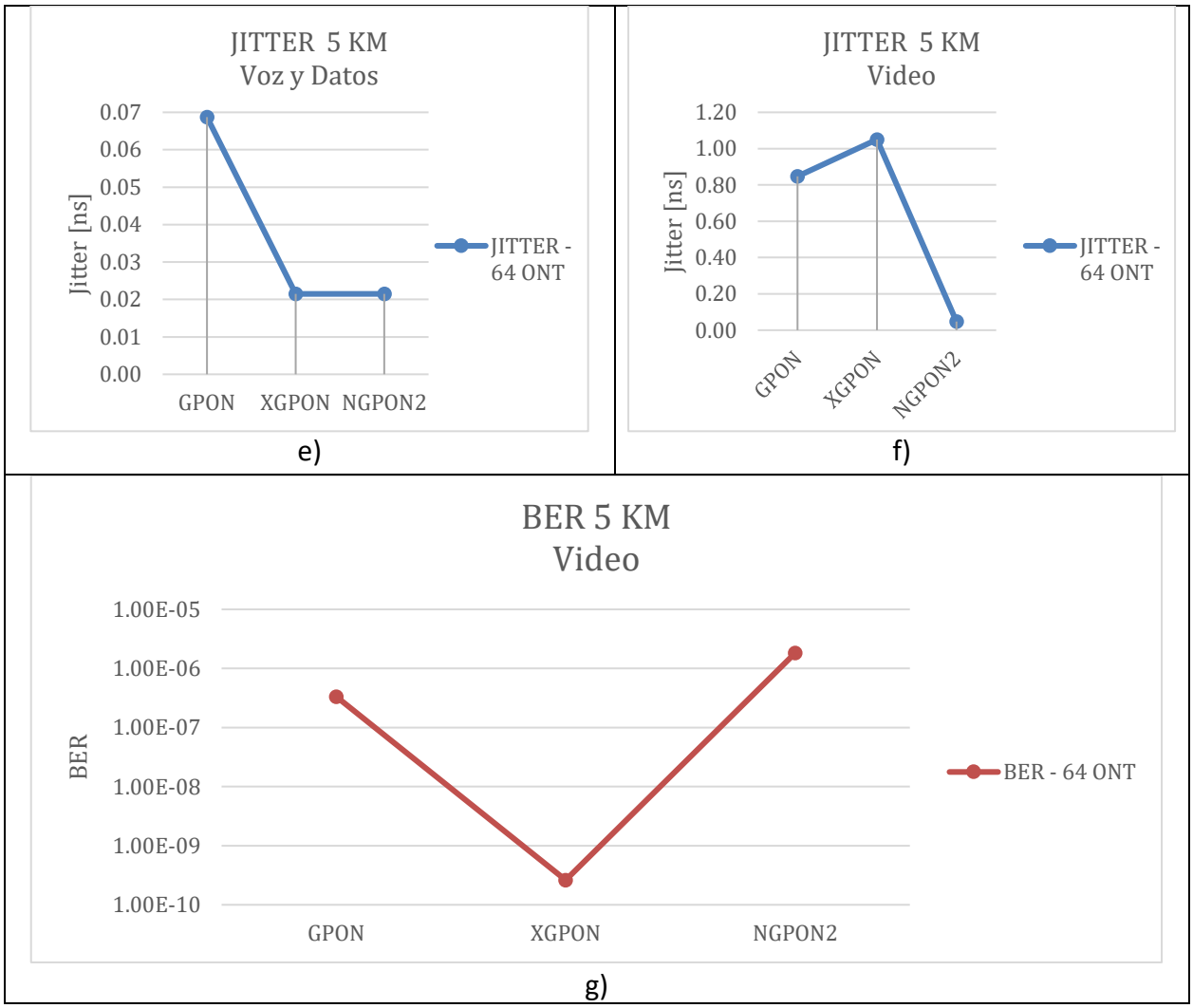
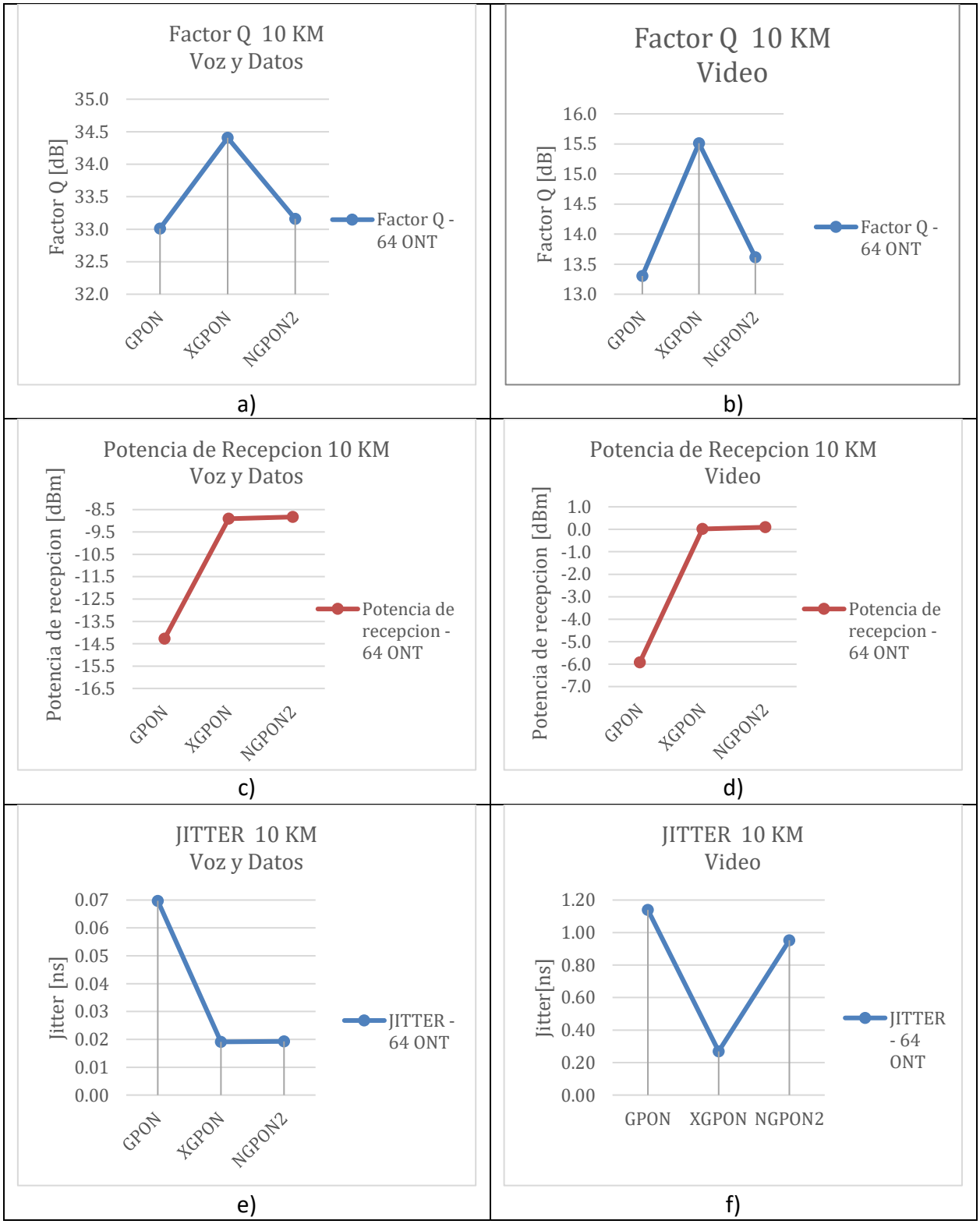


Figura 4.20 Resultados de los parámetros de desempeño OPM de las arquitecturas PON en 5Km: a) Potencia de Recepción Voz y datos, b) Potencia de Recepción Video, c) Factor Q Voz y datos, d) Factor Q Video, e) Jitter Voz y datos, f) Jitter Video, g) BER Video.

A una distancia de 5 Km según los resultados obtenidos en la Figura 4.20 se puede observar que en XG-PON obtiene valores más altos el parámetro de factor Q comparado con los de las otras arquitecturas, mientras que la potencia de recepción con valores más altos se obtiene en XG-PON y NG-PON2, de igual forma el parámetro Jitter obtiene los resultados más bajos en estas dos arquitecturas. En cuanto a la BER es de destacar que en todas las arquitecturas con los servicios de voz y datos no se obtiene una variación en el valor ($1 * 10^{-40}$) por lo que todas las arquitecturas cumplen con el estándar propuesto por la UIT-T. Finalmente en video si se obtienen algunas variaciones con el sistema de 16 QAM, en cuanto al factor Q los valores más altos los sigue ofreciendo XG-PON, la potencia de recepción siguen siendo XG-PON y NG-PON2 lo más altos, el Jitter ofrece valores más bajos en NG-PON2 y en la BER en XG-PON.

Parámetros de desempeño en el Caso de estudio No 2. Para una longitud del enlace de 10 Km



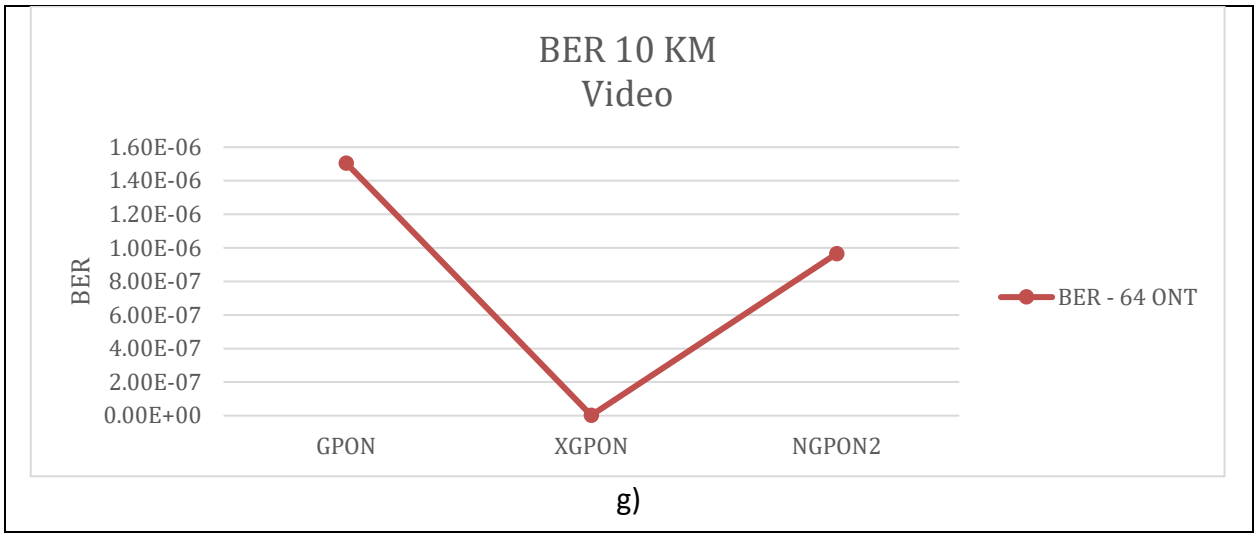
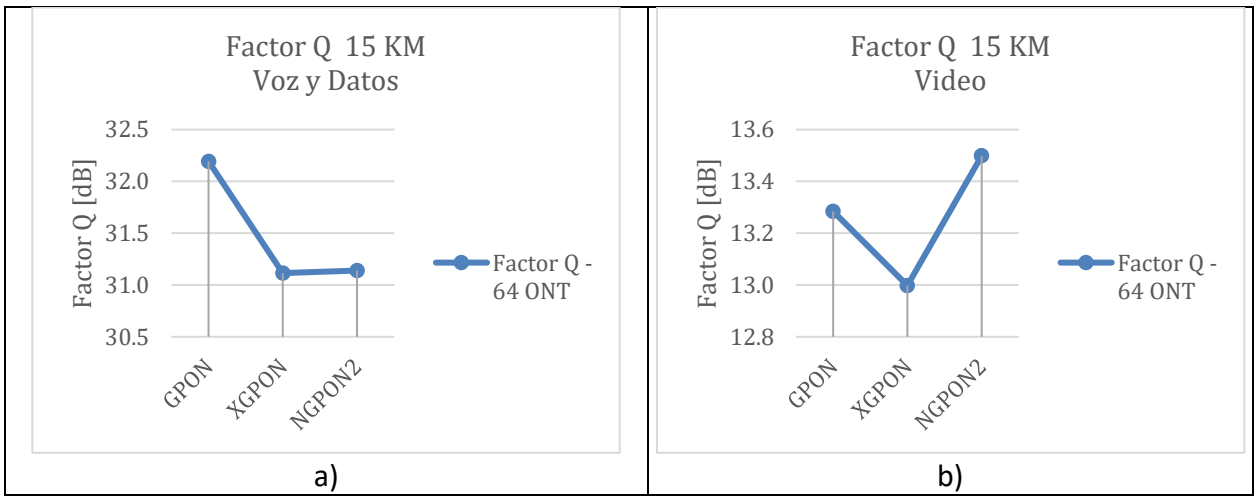


Figura 4.21 Resultados de los parámetros de desempeño OPM de las arquitecturas PON en 10 Km: a) Potencia de Recepción Voz y datos, b) Potencia de Recepción Video, c) Factor Q Voz y datos, d) Factor Q Video, e) Jitter Voz y datos, f) Jitter Video, g) BER Video.

A una distancia de 10 Km según los resultados obtenidos en la Figura 4.21 se puede observar que en XG-PON obtiene valores más altos el parámetro de factor Q comparado con los de las otras arquitecturas, mientras que la potencia de recepción con valores más altos se obtiene en XG-PON y NG-PON2, de igual forma el parámetro Jitter obtiene los resultados más bajos en estas dos arquitecturas. En cuanto a la BER es de destacar que en todas las arquitecturas con los servicios de voz y datos no se obtiene una variación en el valor ($1 * 10^{-40}$) por lo que todas las arquitecturas cumplen con el estándar propuesto por la UIT-T. Finalmente en video si se obtienen algunas variaciones con el sistema de 16 QAM, en cuanto al factor Q los valores más altos los sigue ofreciendo XG-PON, la potencia de recepción siguen siendo XG-PON y NG-PON2 lo más altos, el Jitter y la VER ofrece valores más bajos en XG-PON.

Parámetros de desempeño en el Caso de estudio No 2. Para una longitud del enlace de 15 Km



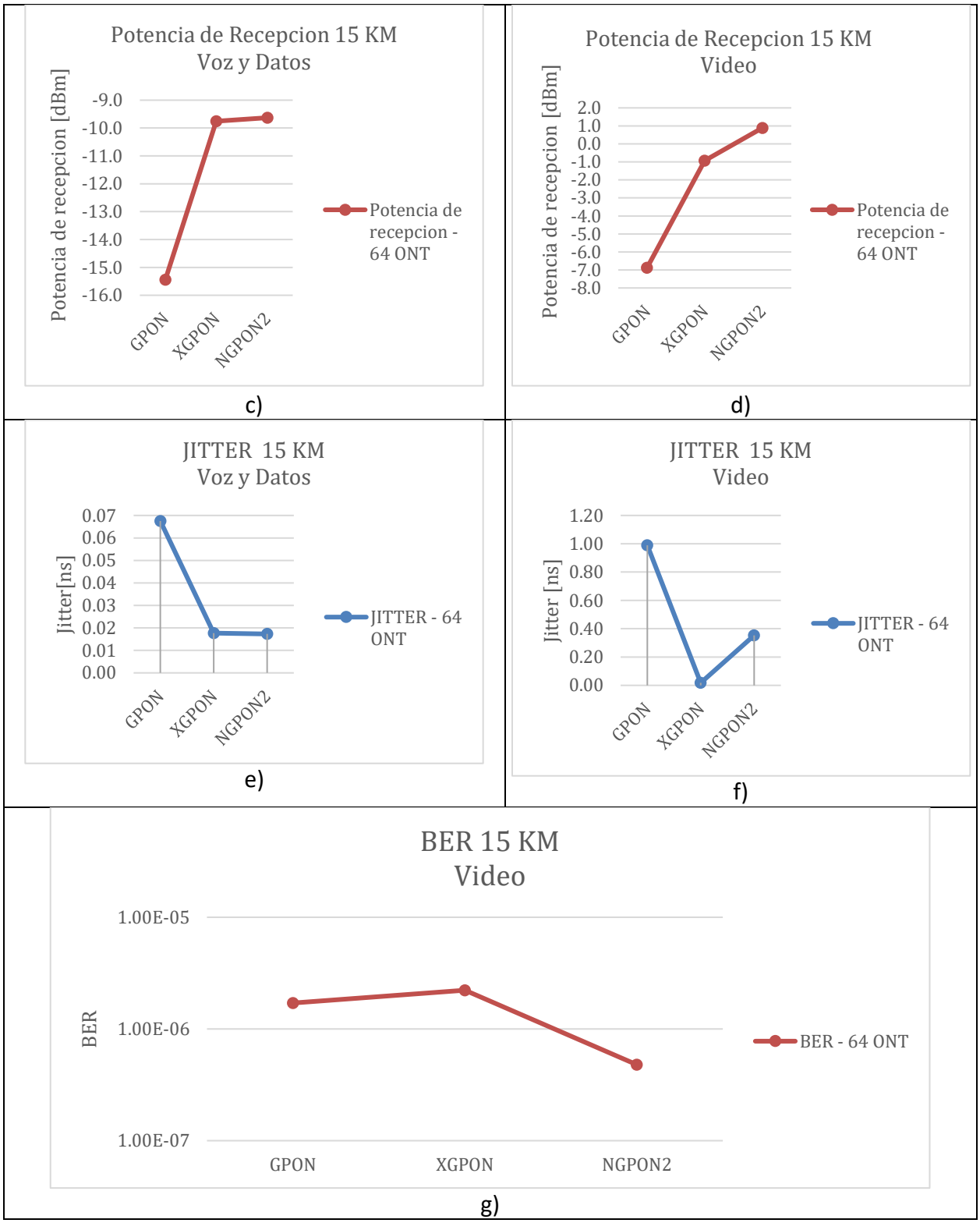
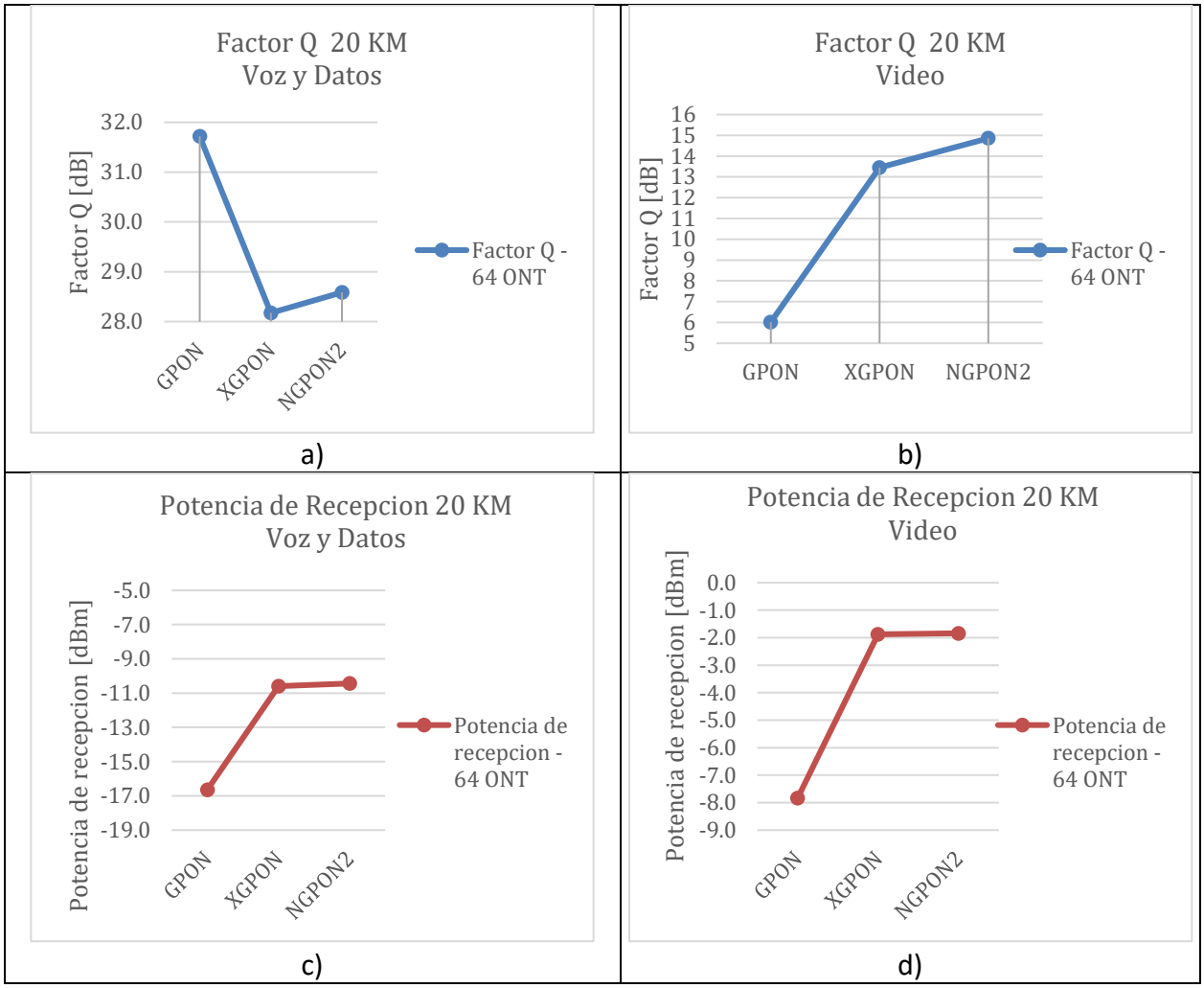


Figura 4.22 Resultados de los parámetros de desempeño OPM de las arquitecturas PON en 15 Km: a) Potencia de Recepción Voz y datos, b) Potencia de Recepción Video, c) Factor Q Voz y datos, d) Factor Q Video, e) Jitter Voz y datos, f) Jitter Video, g) BER Video.

A una distancia de 15 Km según los resultados obtenidos en la Figura 4.22 se puede observar que en G-PON obtiene valores más altos el parámetro de factor Q comparado con los de las otras arquitecturas, mientras que la potencia de recepción con valores más altos se obtiene en NG-PON2, de igual forma el parámetro Jitter obtiene los resultados más bajos en XG-PON y NG-PON2. En cuanto a la BER es de destacar que en todas las arquitecturas con los servicios de voz y datos no se obtiene una variación en el valor ($1 * 10^{-40}$) por lo que todas las arquitecturas cumplen con el estándar propuesto por la UIT-T. Finalmente en video si se obtienen algunas variaciones con el sistema de 16 QAM, en cuanto al factor Q los valores más altos se obtienen en NG-PON2, la potencia de recepción los valores más altos se obtienen en NG-PON2, el Jitter ofrece valores más bajos en XG-PON y la BER más baja se obtiene en NG-PON2.

Parámetros de desempeño en el Caso de estudio No 2. Para una longitud del enlace de 20 Km



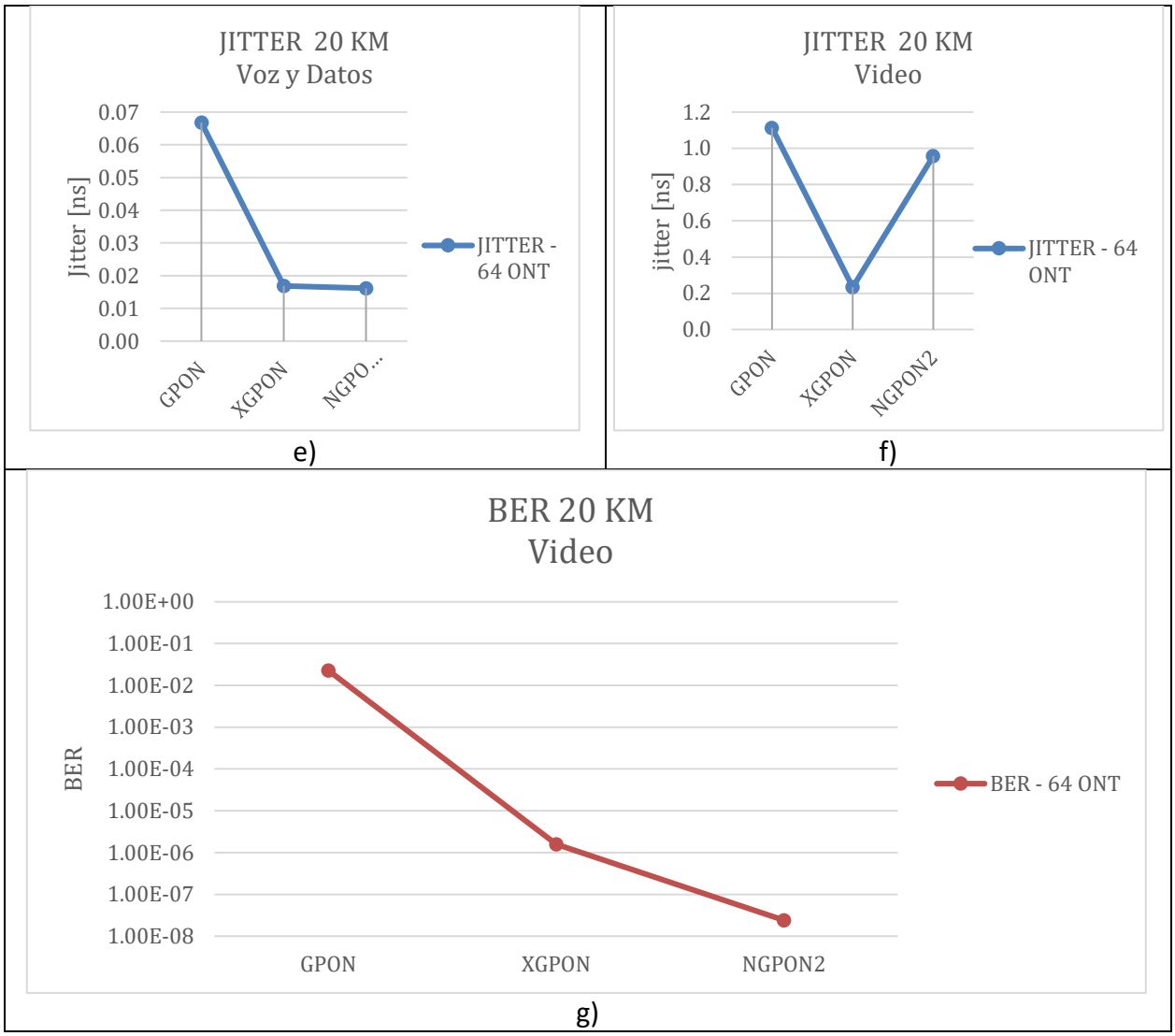


Figura 4.23 Resultados de los parámetros de desempeño OPM de las arquitecturas PON en 5Km: a) Potencia de Recepción Voz y datos, b) Potencia de Recepción Video, c) Factor Q Voz y datos, d) Factor Q Video, e) Jitter Voz y datos, f) Jitter Video, g) BER Video.

A una distancia de 20 Km según los resultados obtenidos en la Figura 4.23 se puede observar que en G-PON obtiene valores más altos el parámetro de factor Q comparado con los de las otras arquitecturas, mientras que la potencia de recepción con valores más altos se obtiene en XG-PON y NG-PON2, de igual forma el parámetro Jitter obtiene los resultados más bajos en XG-PON y NG-PON2. En cuanto a la BER es de destacar que en todas las arquitecturas con los servicios de voz y datos no se obtiene una variación en el valor ($1 * 10^{-40}$) por lo que todas las arquitecturas cumplen con el estándar propuesto por la UIT-T. Finalmente en video si se obtienen algunas variaciones con el sistema de 16 QAM, en cuanto al factor Q los valores más altos se obtienen en NG-PON2, la potencia de recepción los valores más altos se obtienen en XG-PON y NG-PON2, el Jitter ofrece valores más bajos en XG-PON y la BER más baja se obtiene en NG-PON2.

Análisis del desempeño caso de estudio 2 Relación de división 1:64

En el presente apartado se realiza el análisis del caso de estudio 2 donde se incrementa el número de usuarios a 64. Según los datos obtenidos no hay un cambio significativo con el caso de estudio 1 por lo que un incremento en la relación de división al doble de ONTs para estás arquitecturas y con distancias hasta 20km no altera en gran medida el desempeño de los parámetros evaluados. Esto se debe a diferentes factores, el primero de ellos es a al modo en que Optsim simula el comportamiento de la red, ya que no tiene en cuenta el uso de la capacidad máxima por cada usuario, y la segunda se debe a que todavía se mantiene el número de usuarios bajo el estándar para cada una de las arquitecturas, donde el máximo permitido es de 1:64, lo cual permite que el desempeño óptico no se altere con respecto a relaciones inferiores.

4.2.3 Evaluación de los resultados obtenidos.

En la Tabla 4.2. se puede observar bajo qué parámetro de desempeño destaca cada escenario de simulación teniendo en cuenta cada uno de los casos de estudio, por ejemplo los niveles de error más bajos en el sistema para la señal de video a cortas distancias se comporta mejor en una arquitectura XG-PON mientras que distancias superiores a 15 Km lo hace en NG-PON2, tanto para el caso de estudio 1 como para el caso de estudio 2, esto significa que el número de usuarios no es relevante para el parámetro BER cuando se trabaja a distancias inferiores a 20 Km, sin embargo si se quiere reducir la tasa de error de bit en el sistema se debe implementar una arquitectura de mayor complejidad y por ende mayor costo como lo es NG-PON2, pero si la distancia es menor a 15 Km con una arquitectura XG-PON es más que suficiente para alcanzar una BER de video óptima para los 64 usuarios.

A menores distancias el parámetro de calidad de la señal XG-PON ofrece un mejor desempeño, mientras que para mayores distancias NG-PON2 y GPON son las arquitectura que destacan sobre XG-PON, por lo que se puede decir que a grandes distancias la calidad de la señal no se ve tan afectada en arquitecturas como NG-PON2 y GPON, mientras que a cortas distancias XG-PON ofrece una mejor calidad de señal, es de destacar que si bien se tienen variaciones importantes del Factor Q en cada una de los escenarios de simulación, todos en este parámetro ofrecen resultados aceptables.

XG-PON ofrece niveles Jitter más bajos, con lo cual las fluctuaciones temporales de los períodos de bit de la señal digital que dificultan el proceso de muestreo y recuperación de los datos en la recepción van a ser menores, XG-PON es ideal en servicios multimedia por internet como radio y telefonía IP ya que los paquetes transmitidos llegaran con una mayor precisión con respecto a las otras arquitecturas.

En cuanto a la potencia de recepción en todos los casos de estudio se obtuvieron mejores resultados en NG-PON2 esto gracias a que se tienen 4 canales en el transmisor funcionando en conjunto por lo que la atenuación de la señal es menor, pero se debe tener en cuenta que esto repercutiría en un aumento de costos al momento de implementación.

	Arquitectura destacada según el parámetro de:			
Distancia	**BER Video**	**Factor Q**	**Jitter**	**Potencia en el Receptor**
32 ONT				
5	XG-PON	XG-PON	NG-PON2	NG-PON2
10	XG-PON	XG-PON	NG-PON2	XG-PON / NGPON2
15	NG-PON2	GPON / NG-PON2	XG-PON / NGPON2	NG-PON2
20	NG-PON2	GPON / NG-PON2	XG-PON	NG-PON2
64 ONT				
5	XG-PON	XG-PON	NG-PON2	XG-PON / NGPON2
10	XG-PON	XG-PON	XG-PON	XG-PON / NGPON2
15	NG-PON2	GPON / NG-PON2	XG-PON	NG-PON2
20	NG-PON2	GPON / NG-PON2	XG-PON	XG-PON / NGPON2

Tabla 4.2 Arquitecturas que destacan en los parámetros de desempeño a evaluar

Una vez realizada la evaluación de cada uno de los parámetros de desempeño en el enlace de bajada de los diferentes escenarios de simulación y los casos de estudio propuestos, se construye la Tabla 4.3 en la cual se presentan las principales arquitecturas propuestas por FSAN y que actualmente presentan una mayor relevancia en el mercado de las redes basadas en fibra óptica FTTH. Con esta tabla se pretende aclarar que basados en el análisis del desempeño realizado en este capítulo, se puede determinar cuál arquitectura PON es la más adecuada para las necesidades o requisitos que pueda presentar un prestador de servicio. Por ejemplo, si se requiere alcanzar a un número pequeño de usuarios que están a una gran distancia, pero el factor limitante es el costo, la arquitectura GPON es muy conveniente para cumplir dicho requerimiento, sin embargo, si los costos en la implementación no son un problema pensando en la escalabilidad, velocidad y capacidad de la red, las arquitecturas XG-PON y NG-PON2 ofrecen la solución más optima. Estas dos últimas redes son ideales por su robustes, adaptación a las arquitecturas existentes y disponibilidad para soportar la alta demanda de los futuros servicios tecnológicos que incluyen redes de quinta generación (5G) y el internet de las cosas (IOT- *Internet of Things*).

Requisitos	Arquitecturas		
	GPON	XG(S)-PON	NG-PON2
Cortas distancias		X	X
Mayores Distancias	X	X	X
Mayor Relación división		X	X
Menor Relación división	X	X	X
Baja Complejidad (Costos)	X		
Alta Complejidad (Costos)		X	X
Escalabilidad			X

Tabla 4.3. Resumen

Una vez terminado el presente capítulo se da como cumplimiento al tercer y último objetivo específico al analizar a nivel de simulación, el desempeño óptico en el enlace de bajada de cada una de las arquitecturas PON propuestas por FSAN frente a sus características de diseño y por ende al objetivo general del presente trabajo de grado "Analizar comparativamente el desempeño óptico, en el enlace de bajada de diferentes arquitecturas de redes PON en cuanto a las características de diseño más relevantes de las mismas"

En el último capítulo se presentan las conclusiones, resultado del desarrollo del presente proyecto, de igual forma como las recomendaciones y trabajos futuros que se relacionan con las arquitecturas GPON, XG(S)-PON y NG-PON2.

5 Capítulo V. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

En el presente capítulo se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros que surgieron durante el desarrollo trabajo de grado. Las conclusiones se dan de acuerdo con los resultados obtenidos de la evaluación de las arquitecturas PON que se analizaron en la herramienta de simulación Optsim. Las recomendaciones comprenden algunos aspectos relacionados con la implementación de las arquitecturas en el software de simulación y los trabajos futuros propuestos son entorno a las arquitecturas PON analizadas.

5.1 Conclusiones

Dentro de la caracterización de la arquitectura general de PON se pudo identificar cuáles son los parámetros de diseño más relevantes al momento de implementar una red de acceso basada en fibra óptica, los cuales son el tipo de fibra de la cual dependerá en gran medida la dispersión cromática, los transmisores y receptores que se eligen dependiendo la velocidad y distancias a trabajar, la velocidad de transmisión, distancias del enlace y potencia de transmisión y recepción.

Para diseñar e implementar los modelos de las arquitecturas PON en el software de Optsim fue necesario adaptar de los ejemplos propuestos por la herramienta, otros modelos de diferentes proyectos y artículos con los que se proponían mejoras en el sistema de red. Adicional a ello se recomienda realizar un análisis en el dominio de la frecuencia para obtener un analizar el impacto de otros efectos lineales y no lineales.

En los resultados obtenidos de cada una de las arquitecturas PON evaluadas, se evidencia que existe una gran cantidad de oportunidades al implementar NG-PON2 sobre las arquitecturas de primera generación como lo son GPON y XG-PON, ofreciendo un mejor desempeño óptico a distancias iguales o superiores a 20 Km, con una velocidad de transmisión de hasta 40 Gbps, mayor número de usuarios que compartan la misma tasa de transmisión, atenuación de la señal y una BER en video más baja, lo que repercute en un mejor desempeño del sistema.

Las arquitecturas basadas en GPON permiten una solución económica y a la vez robusta, si bien en los resultados obtenidos esta arquitectura no destaca sobre las otras, existen una serie de aspectos por lo cual se hace conveniente su implementación en algunos casos. Al ser una red PON de menor complejidad es menos propensa a sufrir efectos como la dispersión cromática (el cual afecta en gran manera a señales con tasas superiores a 10 Gbps), efecto que se debe compensar mediante fibras dopadas con erbio y que incrementa el costo de implementación.

NG-PON2 es una arquitectura que permite la coexistencia e interoperabilidad con arquitecturas anteriores como lo son GPON y XG-PON y funcionar como una red híbrida. Esto permite la implementación de dicha arquitectura como una solución para comenzar a actualizar las redes basadas en fibra y en un futuro llegar a reemplazarlas en su totalidad, debido a sus altas velocidades de hasta 40 Gbps y previendo la alta demanda de los futuros servicios tecnológicos.

El BER permite hacer una estimación de la calidad de una señal, sin embargo, para tener una certeza sobre la integridad de la señal en determinado punto de la red se debe determinar el Factor Q, sin olvidar en ningún momento la potencia con la que se excita el fotodetector y permite recuperar la información dependiendo directamente de la sensibilidad del sensor. Finalmente, la potencia de entrada que percibe el receptor se ve afectada por múltiples factores, como son la atenuación, el ruido, el Jitter y efectos propios de la fibra óptica.

Aumentar la relación de división en las arquitecturas PON no produce un cambio importante sobre su desempeño, permaneciendo estable al ofrecer los servicios Triple Play, esto se debe a que estadísticamente la mayor parte de los usuarios no estarán conectados a la red todo el tiempo y si lo están, no todos generarán un tráfico importante en la red, permitiendo que cada usuario experimente la capacidad total del enlace durante una fracción del tiempo en el que se presta el servicio de acuerdo con el nivel de Splitter (1:64).

La señal de video recibida tiene una menor calidad comparada con las señales de voz y datos debido a que ésta debe ser modulada variando sus parámetros de amplitud y fase por medio de la modulación multinivel 16-QAM, para poder ser transmitida a través de la fibra. La naturaleza de los pulsos de la señal recibidos cambia debido a las diferentes amplitudes que deben tomar causando fenómenos en el diagrama de ojo como: ISI, Jitter, disminución de altura y amplitud, disminución del Factor Q, y produciendo finalmente una señal afectada por la cantidad de información presente en cada instante de tiempo generando una mayor tasa de errores de bit. Es por esta razón que se dice que el servicio de video consume un mayor ancho de banda y capacidad de la red.

En el presente trabajo de grado se logró aplicar y consolidar conocimientos adquiridos en asignaturas cursadas, no solamente de redes ópticas, sino también en las que las temáticas impartidas guardan relación con modulación multinivel, entre otros temas. Además, se logró adquirir nuevos conocimientos entorno a redes ópticas de acceso, dada su gran actualidad y trascendencia en el campo investigativo de las telecomunicaciones y que de cierta manera carecen de un tratamiento destacado y profundo en las asignaturas impartidas en la facultad enmarcadas en el estudio de este tipo de tecnologías.

5.2 Recomendaciones

Es importante definir en el modelo conceptual basado en una metodología de simulación clara y ordenada los escenarios de simulación que permitan un mayor entendimiento y una implementación adecuada de los sistemas a simular.

Se debe tener una adecuada exploración, buen manejo y conocimiento detallado de la herramienta de simulación para evitar inconvenientes en el momento de la implementación, simulación y pruebas. Para lo anterior, se recomienda consultar y hacer un ejercicio de lectura minuciosa a los manuales o guías de usuario que ofrece la herramienta para su manejo. Se recomienda aplicar el modelo de jerarquías de OptSim cuando los módulos a utilizar, como el receptor, están conformados por una gran cantidad de componentes, esto con el fin de encapsularlos en un solo elemento, de tal manera que la red quede simplificada y mejor organizada.

Se debe definir adecuadamente el alcance del proyecto al inicio de este, puesto que la temática de redes PON es muy extensa y da lugar a una gran variedad ideas secundarias que pueden desviar el desarrollo apropiado de los objetivos propuestos en proyecto.

5.3 Trabajos futuros

A continuación, se presentan algunas propuestas sobre trabajos futuros que se identificaron luego del desarrollo de este proyecto de grado:

- Realizar un estudio comparativo de las mismas arquitecturas PON propuestas por FSAN en el enlace de subida
- Proponer diferentes variables en los parámetros de diseño de las arquitecturas PON para analizar el impacto de estos, un mayor número de usuarios, potencias de transmisión o distancias superiores a 20 km.
- Si bien el presente trabajo investigativo sirve como base para otros trabajos de grado donde se busque analizar y comparar el desempeño de diferentes arquitecturas PON, a futuro es importante desarrollar otros proyectos que permitan incrementar las longitudes del enlace, por lo que es necesario implementar en las redes otro tipo de elementos como amplificadores, compensadores, o si bien utilizar diferentes formatos de codificación y modulación.
- Profundizar en un estudio cuantitativo acerca de los costos de implementación de las diferentes arquitecturas PON evaluadas en el presente trabajo de grado.
- Si bien es cierto se ha elegido método de multiplexación a TWDM para NGPON2, existen estudios previos respecto como TDM-PON, WDM-PON y OFDM-PON los cuales se recomienda analizarlos y evaluar su eficiencia.
- Investigar acerca de las soluciones ópticas que ofrecen las arquitecturas PON frente a las redes de nueva generación 5G, teniendo en cuenta el despliegue de las arquitecturas ya existentes.
- Analizar comparativamente otras arquitecturas PON tales como GE-PON, SUPER-PON, diferentes a las definidas por FSAN.
- En el trabajo se realiza un análisis del desempeño en el dominio del tiempo, como trabajo futuro se podría realizar en este mismo análisis en el dominio de la frecuencia sobre todo para arquitecturas como NG-PON2 donde se transmite con 4 canales.
- Para seguir mejorando la señal de video se propone cambiar el orden del formato de modulación como por ejemplo 4-QAM o 8-QAM.

6 Bibliografía

[1] Hernandez, C, Gutierrez, V, y Espinosa, D, «Impacto y masificacion del uso de las redes gpon en colombia frente a otras tecnologias», *redes ing.*, vol. 2, n.º 1, p. 86, nov. 2011, doi: 10.14483/2248762X.7186.

[2] M. Kumari, R. Sharma, y A. Sheetal, «Passive Optical Network Evolution to Next Generation Passive Optical Network: A Review», en *2018 6th Edition of International Conference on Wireless Networks & Embedded Systems (WECON)*, Rajpura (near Chandigarh), India, nov. 2018, pp. 102-107. doi: 10.1109/WECON.2018.8782066.

[3] The Full Service Access Network, «FSAN Roadmap», *FSAN*. https://www.fsan.org/roadmap/

[4] CISCO, «What Is Passive Optical Networking (PON)?», *CISCO*, 2021. https://www.cisco.com/c/en/us/products/switches/what-is-passive-optical-networking.html (accedido 8 de marzo de 2020).

[5] D. Kim, B. G. Kim, T. Bo, y H. Kim, «Performance Improvement of RSOA-based Coherent WDM PON Using SBS Suppression and Erasing Frequency-Dithering Tone», en *2018 23rd Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)*, Jeju Island, Korea (South), jul. 2018, pp. 1-2. doi: 10.1109/OECC.2018.8730017.

[6] Y. C. Chung y Y. Takushima, «Wavelength-Division-Multiplexed Passive Optical Networks (WDM PONs)», en *Optical Fiber Telecommunications*, Elsevier, 2013, pp. 927-984. doi: 10.1016/B978-0-12-396960-6.00023-7.

[7] VIAVI, «Passive Optical Network (PON)», *VIAVI*, 2021. https://www.viavisolutions.com/en-us/passive-optical-network-pon (accedido 8 de marzo de 2020).

[8] S. Garg, M. Aggarwal, y A. Dixit, «Power, Cost and Reach Based Evaluation of Next Generation Passive Optical Networks Architectures», en *2018 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, Indore, India, dic. 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/ANTS.2018.8710127.

[9] Cortes, A., «Planificación de las topologías de las redes de acceso Fiber to the Home con tecnologías Gigabit Passive Optical Network», *Revista Prisma Tecnológico*, 2019, doi: https://doi.org/10.33412/pri.v10.1.2165.

[10] Marchukov, Y., «Desarrollo de una aplicación gráfica para el diseño de infraestructuras FTTH», UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA, 2011.

[11] Sahu Neeraj, Kher Sanjay, Saxena Manoj, y Sahu Atulkumar, «Introduction of Fiber To The Home Technology», 2019, doi: 10.13140/RG.2.2.23634.20169.

[12] VIAVI, «Diseño e implementación de redes FTTx», 2021. https://www.viavisolutions.com/es-es/diseno-e-implementacion-de-redes-fttx

[13] AlliedTelesis, «Fiber to the X (FTTx)», *AlliedTelesis*. https://www.alliedtelesis.com/en/solutions/fttx

[14] A. E. Willner y Z. Pan, «Optical Characterization, Diagnosis, and Performance Monitoring for PON», en *Passive Optical Networks*, Elsevier, 2007, pp. 267-300. doi: 10.1016/B978-012373853-0.50013-3.

[15] A. Escallón, V. Ruiz, y G. López, «Evaluación del desempeño físico de un sistema FTTH-GPON para servicios Quad Play después de la incorporación de un módulo RoF», *TecnoL.*, vol. 23, n.º 47, pp. 23-61, ene. 2020, doi: 10.22430/22565337.1391.

[16] TotalBoox y TBX, *Optical Performance Monitoring*. Elsevier Science, 2010. Accedido: 12 de octubre de 2020. [En línea]. Disponible en: http://www.totalboox.com/book/id-6295024479002010310

[17] A. Escallon Portilla, A. Tovar, y J. Lis, «Incidencia de los parametros que afectan la calidad de la señal optica en el desempeño de una red metropolitana WDM», *Revista colombiana de tecnologias de avanzada (RCTA)*, vol. 2, pp. 12-19, abr. 2008.

[18] Urrutia, P, «El efecto de dispersión en las Fibras Opticas», *Revista ElectroIndustria*, 2012. http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1967&ni=el-efecto-de-dispersion-en-las-fibras-opticas

[19] A. Puerres Alquedán y D.Salazar, «Estudio y simulación de los efectos no lineales modulación cruzada de fase (XPM) y mezcla de cuatro ondas (FWM) en una fibra óptica monomodo», jun. 2016, Accedido: 28 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17222

[20] J. Perafán, A. Tovar, H. Ordóñez, y J. Agredo, «Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM», *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 20, ene. 2011.

[21] UIT-T, «Recomendacion UIT-T G.697». 2016.

[22] K. Barman y M. Kumar Rai, «Pilot Tone based CD and PMD Monitoring Technique for Photonic Networks», *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 9, n.º 47, dic. 2016, doi: 10.17485/ijst/2015/v8i1/106808.

[23] D. C. Kilper *et al.*, «Optical Performance Monitoring», *J. Lightwave Technol.*, vol. 22, n.º 1, pp. 294-304, ene. 2004, doi: 10.1109/JLT.2003.822154.

[24] L. E. Frenzel, «Testing Considerations», en *Handbook of Serial Communications Interfaces*, Elsevier, 2016, pp. 229-232. doi: 10.1016/B978-0-12-800629-0.00062-0.

[25] D. Nesset, «PON Roadmap [Invited]», *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 9, n.º 1, p. A71, ene. 2017, doi: 10.1364/JOCN.9.000A71.

[26] «Evolution of the GPON Technology», *Huawei*. https://forum.huawei.com/carrier/user/en/thread-445959.html

[27] S. K. Wadhwani Preeti, «GPON Market Size By Component (Product [Optical Line Terminal (OLT), Optical Network Terminal (ONT)], Service [Professional Service, Managed Service]), By Technology (2.5 GPON, XG-PON, XGS-PON, NG-PON2), By Application (Fiber to the Home (FTTH), Other FTTX, Mobile Backhaul), By End-Use (Residential, Business [IT & Telecom, BFSI, Healthcare, Government]), Industry Analysis Report, Regional Outlook, Growth Potential, Competitive Market Share & Forecast, 2020 – 2026», *Global Market Insights*, 2020. https://www.gminsights.com/industry-analysis/gigabit-passive-optical-network-equipment-market

[28] Cingles Comunications, «¿Por qué usar un sistema de distribución GPON?», *Cingles Comunications*. https://cinglescomunicacions.com/es/por-que-usar-un-sistema-de-distribucion-gpon/ (accedido 31 de marzo de 2021).

[29] G. D. Hantoro y G. Wibisono, «GPON Performance Analysis for 5G Backhaul Solutions», en *TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference*, 2018, pp. 1544-1547. doi: 10.1109/TENCON.2018.8650520.

[30] B. J. Hamza *et al.*, «Performance Enhancement of SCM/WDM-RoF-XGPON System for Bidirectional Transmission With Square Root Module», *IEEE Access*, vol. 9, pp. 49487-49503, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3065285.

[31] N. Solihah y M. I. Nashiruddin, «Performance Evaluation of the 10 Gigabit Symmetric PON for Triple-Play Services», en *2020 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat)*, 2020, pp. 136-143. doi: 10.1109/Comnetsat50391.2020.9328964.
[32] D. Ulloa, G. Arevalo, y R. Gaudino, «Optimal Deployment of Next-Generation PON for High and Ultra-High Bandwidth Demand Scenarios in Large Urban Areas», en *2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Bari, Italy, jul. 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICTON51198.2020.9203528.
[33] D. Hood y E. Trojer, *Gigabit-capable passive optical networks*. Hoboken: Wiley, 2012.
[34] Z. Aria, «Basic Knowledge About Optical Line Terminal (OLT)», *Medium*. https://medium.com/@AriaZhu/basic-knowledge-about-optical-line-terminal-olt-3b7b3744da0b#:~:text=What%20Is%20OLT%3F,gateway%20(VGW)%20uplink%20cards.
[35] Fs Community, «ABC of PON: Understanding OLT, ONU, ONT and ODN», *Fs Community*. https://community.fs.com/blog/abc-of-pon-understanding-olt-onu-ont-and-odn.html
[36] G. Keiser, *FTTX concepts and applications*. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons : IEEE, 2006.
[37] K. Zhang, «Understanding the Split Ratios and Splitting Level of Optical Splitters», *Medium*, 1 de noviembre de 2016. https://medium.com/@kerryzhang/understanding-the-split-ratios-and-splitting-level-of-optical-splitters-8a340242a5b7 (accedido 21 de abril de 2021).
[38] «What Is a Fiber Optic Splitter?», *Blog*, 22 de abril de 2021. https://community.fs.com/blog/what-is-a-fiber-optic-splitter-2.html (accedido 21 de abril de 2021).
[39] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, y G. H. Sasaki, «Components», en *Optical Networks*, Elsevier, 2010, pp. 113-243. doi: 10.1016/B978-0-12-374092-2.50011-4.
[40] D. Large y J. Farmer, «Upstream Issues», en *Broadband Cable Access Networks*, Elsevier, 2009, pp. 215-264. doi: 10.1016/B978-0-12-374401-2.00008-5.
[41] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, y G. H. Sasaki, *Optical networks: a practical perspective*, 3rd ed. Amsterdam ; Boston: Elsevier/Morgan Kaufmann, 2010.
[42] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*, 3rd ed. New York: Wiley-Interscience, 2002.
[43] L. N. Binh, *Optical fiber communication systems with MATLAB and Simulink models*. 2015. Accedido: 21 de abril de 2021. [En línea]. Disponible en: https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=1763554
[44] «Receptores Opticos». Universidad de Aquino Bolivia, 2007. [En línea]. Disponible en: https://comunicacionesopticas.files.wordpress.com/2007/10/receptores-opticos-informe.pdf
[45] «Huawei-Single-Mode Optical Fiber». https://info.support.huawei.com/network/ptmngsys/Web/WDMkg/en/30_fiber.html (accedido 21 de abril de 2021).
[46] «ITU-T Standards for Various Optical Fibers», *Blog*, 22 de abril de 2021. https://community.fs.com/blog/itu-t-standards-for-various-optical-fibers.html (accedido 21 de abril de 2021).
[47] B. Lee, «DIVISORES ÓPTICOS PASIVOS», May-2015 p. 16.
[48] H. Gupta, P. Gupta, P. Kumar, A. K. Gupta, y P. Kumar Mathur, «Passive Optical Networks: Review and Road Ahead», en *TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference*, Jeju, Korea (South), oct. 2018, pp. 0919-0924. doi: 10.1109/TENCON.2018.8650204.

[49] S. Lambert, J. Montalvo, J. A. Torrijos, B. Lannoo, D. Colle, y M. Pickavet, «Energy efficiency analysis of next-generation passive optical network (NG-PON) technologies in a major city network», en *2013 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Cartagena, Spain, jun. 2013, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICTON.2013.6602846.
[50] ITU-T, «Recommendation ITU-T G.984.1 Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics». 2008.
[51] «Fiber Splitter: Centralized Splitting vs Distributed Splitting», *Blog*, 22 de abril de 2021. https://community.fs.com/blog/centralized-splitting-vs-distributed-splitting-in-pon-based-ftth-networks.html (accedido 21 de abril de 2021).
[52] S. V. Kartalopoulos, *Introduction to DWDM technology: data in a rainbow*. Bellingham, Wash: SPIE Optical Engineering Press, 2000.
[53] S. Kaya, «Photo-thermal control of surface plasmon mode propagation at telecom wavelengths», PhD Thesis, 2016.
[54] J. Cuatindioy Imbachi, «Evaluación del uso de decodificación RS con el algoritmo euclidiano e información erasure sobre el desempeño de las redes NG_PON 1», Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia., 2017. [En línea]. Disponible en: http://hdl.handle.net/10495/13244
[55] M. J. Simmonds y L. Ceuppens, «Time division multiplexing», en *Telecommunications Engineer's Reference Book*, Elsevier, 1993, pp. 21-1-21-16. doi: 10.1016/B978-0-7506-1162-6.50027-7.
[56] D. R. Smith, *Digital Transmission Systems*. Boston, MA: Springer US, 2004. doi: 10.1007/978-1-4419-8933-8.
[57] L. Wosinski, N. Zhu, y Z. Wang, «Wavelength selective devices for WDM communication systems», en *2009 IEEE 3rd International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems (ANTS)*, New Delhi, India, dic. 2009, pp. 1-3. doi: 10.1109/ANTS.2009.5409849.
[58] K. Grobe y M. Eiselt, Eds., «Introduction To WDM», en *Wavelength Division Multiplexing*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013, pp. 1-5. doi: 10.1002/9781118755068.ch01.
[59] J. Kani, «Enabling Technologies for Future Scalable and Flexible WDM-PON and WDM/TDM-PON Systems», *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 16, n.º 5, pp. 1290-1297, sep. 2010, doi: 10.1109/JSTQE.2009.2035640.
[60] A. M. Ragheb y H. Fathallah, «Performance analysis of next generation-PON (NG-PON) architectures», en *8th International Conference on High-capacity Optical Networks and Emerging Technologies*, Riyadh, Saudi Arabia, dic. 2011, pp. 339-345. doi: 10.1109/HONET.2011.6149766.
[61] D. Nesset, «NG-PON2 Technology and Standards», *J. Lightwave Technol.*, vol. 33, n.º 5, pp. 1136-1143, mar. 2015, doi: 10.1109/JLT.2015.2389115.
[62] E. T. López, «FTTH Course - Module 9», 2015, doi: 10.13140/RG.2.1.4525.4241.
[63] ITU-T, «Recommendation ITU-T G.984.2 Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Physical media dependent (PMD) layer specification». 2008.
[64] F. Selmanovic y E. Skaljo, «GPON in Telecommunication Network», en *International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems*, Moscow, Russia, oct. 2010, pp. 1012-1016. doi: 10.1109/ICUMT.2010.5676500.

[65] S. M. Faizan Shah Fareed Gillani, M. A. Khan, y M. K. Shahid, «Reach extendibility of passive optical network technologies», *Optical Switching and Networking*, vol. 18, pp. 211-221, nov. 2015, doi: 10.1016/j.osn.2015.07.004.
[66] ITU-T, «Recommendation ITU-T G.987.1 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements». 2016.
[67] B. Batagelj y V. Eržen, «NG-PON1: Technology presentation, implementation in practice and coexistence with the GPON system», *Elektrotehniski Vestnik/Electrotechnical Review*, vol. 79, pp. 117-122, 2012.
[68] A. Kaur, M. L. Singh, y A. Sheetal, «Simulative analysis of co-existing 2.5 G/10 G asymmetric XG-PON system using RZ and NRZ data formats», *Optik*, vol. 125, n.º 14, pp. 3637-3640, jul. 2014, doi: 10.1016/j.ijleo.2014.01.074.
[69] F. J. Effenberger, «The XG-PON System: Cost Effective 10 Gb/s Access», *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, n.º 4, pp. 403-409, 2011, doi: 10.1109/JLT.2010.2084989.
[70] A. Kaur, A. Sheetal, y R. Miglani, «Impact of optical modulation formats on 10 G/2.5 G asymmetric XG-PON system», *Optik*, vol. 149, pp. 351-358, nov. 2017, doi: 10.1016/j.ijleo.2017.09.063.
[72] R. Chhilar, J. Khurana, y S. Gandhi, «Modulation formats in optical communication system», 2011.
[72] ITU-T, «Recommendation ITU-T G.987.2 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification». 2016.
[73] J. S. Wey *et al.*, «Physical Layer Aspects of NG-PON2 Standards—Part 1: Optical Link Design [Invited]», *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 8, n.º 1, p. 33, ene. 2016, doi: 10.1364/JOCN.8.000033.
[74] ITU-T, «Recommendation ITU-T G.989.1 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements». 2013.
[75] ITU-T, «Recommendation ITU-T G.989.2 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification». 2019.
[76] A. O. Maria, M. Yacelga-Pinto, y G. V. Arevalo, «Experimental evaluation of a NG-PON2 network», en *2018 IEEE Third Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, Cuenca, Ecuador, oct. 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/ETCM.2018.8580339.
[77] J. M. C. Muñoz, «Metodología para la Simulación de Equipos de Telecomunicaciones». 1995.
[79] E. Gabriel, «Metodologías de desarrollo de software» [en línea]. Tesis de Licenciatura en Sistemas y Computación. Facultad de Química e Ingeniería "Fray Rogelio Bacon". Universidad Católica Argentina, 2015. Disponible en: http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/metodologias-desarrollo-software.pdf .
[79] RSoft Design Group, «OptSim User Guide». [En línea]. Disponible en: https://dokumen.tips/documents/39865643-optsim-guide.html
[80] J. D. Delgado Lasso y J. C. Marcillo Bravo, «Impacto de la topología de red FTTH-GEPON en el desempeño de servicios triple play», dic. 2016, Accedido: 1 de septiembre de 2021. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/1539
[82] A. F. E. Portilla y J.R BARRIOS, «Criterios para el monitoreo del canal óptico y la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana WDM», 2008, doi: 10.13140/RG.2.2.21119.15529.

[82] D. Martín González, «Análisis de prestaciones de láseres en redes de acceso ópticas pasivas de siguiente generación NG-PON2 (Next Generation Passive Optical Networks)», info:eu-repo/semantics/masterThesis, 2017. [En línea]. Disponible en: http://uvadoc.uva.es/handle/10324/26094