

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR



**FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN REDES DE COMUNICACIÓN**

**PERFIL DEL TRABAJO PREVIO LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:
MÁSTER EN REDES DE COMUNICACIÓN**

TEMA:

**“ESTUDIO Y DISEÑO DE UNA RED LR-PON DE ALTA DISPONIBILIDAD
EMPLEANDO CONMUTACIÓN ÓPTICA Y ENLACES REDUNDANTES”**

HOYOS MAROTO ANGEL JAVIER

Quito, julio de 2016

DEDICATORIA

A mi Dios por ayudarme a cumplir uno de mis sueños.

A mi amada esposa Diana que gracias a su apoyo, esfuerzo y sacrificio, he podido cumplir una de mis metas académicas.

A mis fuentes de inspiración, Sara y Sofía, que se ha convertido en mi verdadera fuerza de voluntad.

A mis padres Carmita y Angel, que gracias a su ejemplo y enseñanzas de familia que me han formado como una persona con una integridad y tenacidad inquebrantable.

A mis hermanos Tatiana y Gustavo, que fueron las principales personas que influyeron en tener una infancia muy feliz.

A mi director de tesis Dr. Germán Arévalo, por su confianza para desarrollar el presente tema de investigación.

A todos mis profesores y compañeros que durante nuestro tiempo de estudio, tuve la suerte de conocer a unos buenos profesionales y amigos.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción.	1
1.2. Antecedentes.	1
1.3. Justificación.	3
1.4. Objetivo General.....	8
1.5. Objetivos Específicos.	8
1.6. Resumen de contenido de capítulos.	9
2. ESTADO DEL ARTE.....	10
2.1. Introducción	11
2.2. El problema del cuello de botella de la última milla.	12
2.3. Arquitecturas.....	14
2.3.1. Topologías.....	15
2.3.2. Requerimientos de Upstream y Downstream	19
2.3.3. Ventajas de las redes PON.....	20
2.4. Componentes activos y pasivos	22
2.4.1. Acoplador óptico pasivo	22
2.4.2. Circulador.....	23
2.4.3. Splitter	25
2.4.4. Arrayed Waveguide Grating (AWG)	28
2.4.5. Optical Line Termination (OLT).....	30
2.4.6. ONUs/ONTs.....	31
2.4.7. Extensor de Alcance (RE).	32
2.4.8. Amplificador de fibra dopada de Erblio (EDFA).....	34
2.4.9. Amplificadores Ópticos Semiconductor (SOA).	36
2.5. Comparación de característica de amplificadores ópticos.....	39
2.5.1. Ventajas de los amplificadores EDFA:	40
2.5.2. Los EDFA también tienen sus limitaciones:	41
2.5.3. Ventajas de los amplificadores SOA:.....	43
2.5.4. Desventajas de los amplificadores SOA:	44
2.5.5. Elección del amplificador a utilizar en sistemas WDM.	45
2.6. Compensadores de Dispersión.....	46
2.7. WDM en redes ópticas pasivas	51

2.7.1.	Arquitectura.....	53
2.7.2.	Ventajas.....	55
2.8.	Conmutación Óptica.....	56
2.8.1.	Arquitectura.....	56
2.8.2.	Clasificación.....	59
2.9.	Long-Reach PON.....	61
3.	DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LR-PON.....	63
3.1.	Configuración de la simulación del sistema LR-PON.....	63
3.1.1.	DISEÑO DE LA OLT.....	70
3.1.2.	DISEÑO DEL FEEDER.....	73
3.1.3.	DISEÑO DEL EXTENSOR DE ALCANCE.....	77
3.1.4.	DISEÑO DEL NODO REMOTO.....	78
3.1.5.	DISEÑO DEL SWITCH ÓPTICO.....	80
3.1.6.	DISEÑO DE LA ONU.....	82
3.2.	ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA LR-PON.....	83
3.2.1.	CASO I: IMPACTO DEL USO DE UN COMPENSADOR DE DISPERSIÓN CROMÁTICA A 2.5Gbps/s CON MODULACIÓN NRZ.....	84
3.2.2.	CASO II: IMPACTO EN EL DESEMPEÑO DEL SISTEMA AL VARIAR EL FORMATO DE MODULACIÓN DEL CODIFICADOR A 2.5Gbps/s.....	86
3.2.3.	CASO III: IMPACTO EN EL DESEMPEÑO DEL SISTEMA AL VARIAR LA TASA DE BIT EN SEÑALES DE DOWNSTREAM Y UPSTREAM.....	95
3.2.4.	CASO IV: IMPACTO EN EL DESEMPEÑO DEL SISTEMA AL VARIAR LA GANANCIA EN EL EXTENSOR DE ALCANCE EN SEÑALES DE DOWNSTREAM Y UPSTREAM.....	107
3.2.5.	CASO V: IMPACTO EN EL DESEMPEÑO DEL SISTEMA WDM AL VARIAR EL RADIO DE EXTINCIÓN EN SEÑALES DE DOWNSTREAM Y UPSTREAM.....	110
3.2.6.	CASO VI: FUNCIONAMIENTO DE LA REDUNDANCIA EN EL SISTEMA LR-PON.....	116
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	121
5.1.	Conclusiones.....	121
5.2.	Recomendaciones.....	126
	BIBLIOGRAFÍA:.....	128

Índice de Figuras

Figura 1-1 Arquitectura General para una red WDM-PON.....	3
Figura 1-2 Sistema por Multiplexación de División de Onda.	6
Figura 1-3 Arquitectura LR-PON.	7
Figura 2-1 Unicast pasivo usando distintas longitudes de onda para diferentes ONT.	15
Figura 2-2 Tipos de topologías en redes PON.	17
Figura 2-3 Aumento de ONUs/ONTs en diferentes topologías.	18
Figura 2-4 Acoplador pasivo óptico 2 x 2.	23
Figura 2-5 Circulador de 4 puertos	24
Figura 2-6 Circulador asimétrico.....	25
Figura 2-7 Splitter/Acoplador pasivo in red TDM-PON y AWG en WDM-PON.	26
Figura 2-8 Alternativas de implementación de un splitter 1:16.	27
Figura 2-9 Funcionalidad de un AWG.	29
Figura 2-10 Funcionalidad de un AWG.	29
Figura 2-11 Terminal de Línea Óptico (OLT).....	30
Figura 2-12 Ejemplo de OLT y ONUs/ONTs.	31
Figura 2-13 ONT/ONU.	32
Figura 2-14 Topología del extensor de alcance.....	33
Figura 2-15 Proceso de bombeo del EDFA.	35
Figura 2-16 Estructura simplificada del SOA.	37
Figura 2-17 Ganancia y saturación en el SOA.....	38
Figura 2-18 Efecto de la dispersión cromática.	46
Figura 2-19 Dispersión total D por la contribución relativa de la dispersión por material DM y por la dispersión de guía de onda DG para fibras óptica monomodo convencionales.....	47
Figura 2-20 Esquema de un compensador óptico pasivo para un amplificador de línea.....	49
Figura 2-21 Ejemplo Mapa de dispersión cromática para un sistema WDM con 163 tramos y 40 longitudes de onda centradas en 1550.12nm.	50
Figura 2-22 Red WDM-PON.....	54
Figura 2-23 Switch basado en compuertas SOA.....	57
Figura 2-24 Router de longitud de onda.	58
Figura 2-25 LR-PON simplifica las redes de telecomunicaciones.	62
Figura 3-1 Simulación sistema LR-PON.	65
Figura 3-2 Diagrama de bloques sistema LR-PON.	66
Figura 3-3 Elementos de la OLT.	73
Figura 3-4 Elementos del feeder.....	76
Figura 3-5 Elementos Extensor de Alcance.	78
Figura 3-6 Elementos del Nodo Remoto	79
Figura 3-7 Switch óptico y Simulador en la OLT.	81
Figura 3-8 Switch óptico y Simulador en el Nodo Remoto.	82
Figura 3-9 Elementos de cada ONU.	83

Figura 3-10 Análisis de BER con/sin UDC.	85
Figura 3-11 Análisis de factor Q con/sin UDC.....	86
Figura 3-12 Amplitud del diagrama de ojo en downstream a 2.5Gbps a 70km a) 80Km b) y 100 Km c)	86
Figura 3-13 Longitud VS BER en upstream con NRZ y RZ.....	88
Figura 3-14 Longitud VS Valor Q en upstream con NRZ y RZ.	89
Figura 3-15 Diagrama de Ojo a 2.5 Gbps con codificación NRZ en upstream a 70km a), 90km b) y 100km c).....	90
Figura 3-16 Diagrama de Ojo a 2.5 Gbps con codificación RZ=0.6 en upstream a 70km a), 90km b) y 100km c)	90
Figura 3-17 Diagrama de Ojo a 2.5 Gbps con codificación RZ=0.8 en upstream a 70km a), 80km b) y 100km c)	90
Figura 3-18 Longitud VS BER en downstream con NRZ y RZ.	92
Figura 3-19 Longitud VS Valor Q en downstream con NRZ y RZ.	93
Figura 3-20 Diagrama de Ojo a 2.5 Gbps con codificación NRZ en downstream a 70km a), 90km b) y 100km c).	94
Figura 3-21 Diagrama de Ojo a 2.5 Gbps con codificación RZ=0.6 en downstream a 70km a), 90km b) y 100km c).	94
Figura 3-22 Diagrama de Ojo a 2.5 Gbps con codificación RZ=0.8 en downstream a 70km a), 80km b) y 100km c).	94
Figura 3-23 BER para diferentes tasas de bits en downstream con NRZ.....	96
Figura 3-24 Valor Q para diferentes tasas de bits en downstream con NRZ.	96
Figura 3-25 BER para diferentes tasas de bits en upstream con NRZ.	97
Figura 3-26 Valor Q para diferentes tasas de bits en upstream con NRZ.....	98
Figura 3-27 BER para diferentes tasas de bits en downstream con RZ=0.8.	99
Figura 3-28 Valor Q para diferentes tasas de bits en downstream con RZ=0.8.....	99
Figura 3-29 BER para diferentes tasas de bits en upstream con RZ=0.8.	100
Figura 3-30 Valor Q para diferentes tasas de bits en upstream con RZ=0.8.	101
Figura 3-31 BER para diferentes tasas de bits en downstream con RZ=0.6.	102
Figura 3-32 Valor Q para diferentes tasas de bits en downstream con RZ=0.6.....	102
Figura 3-33 BER para diferentes tasas de bits en upstream con RZ=0.6.	103
Figura 3-34 Valor Q para diferentes tasas de bits en upstream con RZ=0.6.	104
Figura 3-35 Diagrama de Ojo a 5Gbps en downstream con NRZ a) 70km, b) 80km y c) 900km.....	104
Figura 3-36 Diagrama de Ojo a 5Gbps en downstream con RZ 0.6 a) 70km, b) 80km y c) 90km.	105
Figura 3-37 Diagrama de Ojo a 5Gbps en downstream con RZ 0.8 a) 70km, b) 80km y c) 90km.	105
Figura 3-38 Diagrama de Ojo a 5Gbps en upstream con NRZ a) 70km, b) 80km y c) 90km	105
Figura 3-39 Diagrama de Ojo a 5Gbps en upstream con RZ 0.6 a) 70km, b) 80km y c) 90km	106
Figura 3-40 Diagrama de Ojo a 5Gbps en upstream con RZ 0.8 a) 70km, b) 80km y c) 90km	106

Figura 3-41 Valor de Q para upstream para distintas potencias en el RE.	108
Figura 3-42 Valor de Q para downstream para distintas potencias en el RE.	109
Figura 3-43 Valor de Q para downstream para el radio de extinción y NRZ.	112
Figura 3-44 Valor de Q para upstream para el radio de extinción y NRZ.	112
Figura 3-45 Valor de Q para downstream para el radio de extinción y RZ=0.8.	114
Figura 3-46 Valor de Q para upstream para el radio de extinción y RZ=0.8.	114
Figura 3-47 Diagrama de ojo para ER=20dB y NRZ en downstream a) 80 km, b) 90km y c) 100km.....	115
Figura 3-48 Diagrama de ojo para ER=20dB y NRZ en upstream a) 80 km, b) 90km y c) 100km.....	115
Figura 3-49 Diagrama de ojo para ER=20dB y RZ=0.8 en downstream a) 80 km, b) 90km y c) 100km.....	116
Figura 3-50 Diagrama de ojo para ER=20dB y RZ=0.8 en upstream a) 80 km, b) 90km y c) 100km.	116
Figura 3-51 Espectro de la señal en downstream en el Nodo Remoto por el feeder principal.....	117
Figura 3-52 Espectro de la señal en downstream en el Nodo Remoto por el feeder redundante.....	118
Figura 3-53 Diagrama de ojo de la recepción de la señal por el feeder principal a 90 km a) ONU/ONT downstream b) OLT upstream.	118
Figura 3-54 Espectro de la señal en upstream en la OLT por el feeder redundante.	119
Figura 3-55 Espectro de la señal en upstream en la OLT por el feeder principal. ...	119
Figura 3-56 Diagrama de ojo de la recepción de la señal por el feeder principal a 60 km a) ONU/ONT downstream b) OLT upstream.	120

Índice de Tablas

Tabla 2-1 Valores para downstream y upstream en diferentes estándares.	20
Tabla 2-2 Valores comerciales para splitter marca Corning.	28
Tabla 2-3 Características de los equipos activos.	32
Tabla 2-4 Parámetros Ópticos G.984.	34
Tabla 2-5 Parámetros de EDFAs.	36
Tabla 2-6 Características del SOA.	39
Tabla 3-1 Lista de parámetros usados para el sistema LR-PON.	69
Tabla 3-2 Parámetros ITU para fibra monomodo. (Datos tomados del mejor tipo de cada norma).....	74
Tabla 3-3 BER para NRZ sin UDC a 2.5Gbps.	84
Tabla 3-4 BER para NRZ con UDC a 2.5 Gbps.	84
Tabla 3-5 BER de NRZ y RZ para señales de upstream.	87
Tabla 3-6 Valor de factor Q de NRZ y RZ para señales de upstream.....	87
Tabla 3-7 BER de NRZ y RZ para señales de downstream.....	91
Tabla 3-8 Valor de factor Q de NRZ y RZ para señales de downstream.....	91
Tabla 3-9 Resumen de distancia máxima versus velocidad.....	106
Tabla 3-10 Valor de Q en upstream variando la ganancia en el RE.....	107
Tabla 3-11 Valor de Q en downstream variando la ganancia en el RE.....	108
Tabla 3-12 Valor de Q en downstream modulación NRZ.	110
Tabla 3-13 Valor de Q en upstream modulación NRZ.	111
Tabla 3-14 Valor de Q en downstream modulación RZ=0.8.	113
Tabla 3-15 Valor de Q en upstream modulación RZ=0.8.....	113

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción.

El presente trabajo se enfocará en el estudio y diseño de una red LR-PON de alta disponibilidad, empleando conmutación óptica y enlaces redundantes. El objetivo del presente estudio y diseño, es determinar datos particulares de la transmisión en redes tipo LR-PON, entre la Optical Line Terminal (OLT) y la Optical Network Unit (ONU), considerando una topología con enlaces redundantes y conmutadores ópticos, que permitan dar un nivel de seguridad al sistema, en caso de falla de alguno de los feeder.

La operación de la red LR-PON se analizará a través del empleo de software de simulación, como es MatLab y OptiSystem.

1.2. Antecedentes.

Para alcanzar una alto valor de factor Q y una baja tasa de error de bit (BER), necesarios para sistemas de transmisión de alta velocidad, se presenta en la siguiente investigación amplificadores EDFA ¹ , que en cierta manera, ayudan a reducir el ruido introducido por el efecto del amplificador de emisiones espontáneas (ASE) ².

¹ P. D. Townsend, G. Talli, C. W. Chow, E. M. MacHale, C. Antony, R. Davey, T. De Ridder, X. Z. Qiu, P. Ossieur, H. G. Krimmel, D. W. Smith, I. Lealman, A. Poustie, S. Randel, H. Rohde, "Long Reach Passive Optical Networks", National Chiao Tung UniBERSity IEEE, 2007.

² Huan Song, Byoung-Whi Kim y Biswanath Mukherjee, "Long-Reach Optical Access Networks: A Survey of Research Challenges, Demonstrations, and Bandwidth Assignment Mechanisms", IEEE Communications surveys & Tutorials, Vol 12, N°1, primer cuarto del año.

Otro factor a tener en cuenta, es la atenuación que se introduce especialmente a lo largo del recorrido de la fibra óptica y las pérdidas de inserción de cada uno de los elementos. Debido a que la presente investigación se basa en redes PON de largo alcance, se propone que la distancia mínima del enlace sea de 60km entre la OLT y la ONU.

Se analiza el uso de amplificadores ópticos dopados de erbio en los nodos remotos (EDFA)³, para transmitir una tasa estable de velocidad tanto en el downstream como en el upstream

En lugar de la topología tradicional de una red PON “árbol y rama” se implementa una topología de enlaces redundantes, donde cada segmento de la red PON tiene una topología árbol y rama tradicional, mientras que el OLT está conectado a través de un nodo remoto (RN) desplegado a 50km desde la OLT. El feeder redundante provee a la red LR-PON una alta disponibilidad para la protección de fallas, lo cual es verdaderamente importante para el manejo de la calidad de servicio (QoS) y los niveles de servicio acordados (SLA) ⁴.

Debido a la gran distancia que se ha considerado en el diseño de la red LR-PON, también se ha implementado tecnología de multiplexación por división de longitud de onda (WDM) ⁵ como la multiplexación por división de tiempo.(TDM) ⁶.

³ Lei Shi, Sang-Soo Lee, Huan Song, and Biswanath Mukherjee, Fellow, IEEE; “Energy-Efficient Long-Reach Passive Optical Network: A Network Planning Approach Based on User Behaviors”, IEEE Systems Journal, Vol. 4, No. 4, Diciembre 2010.

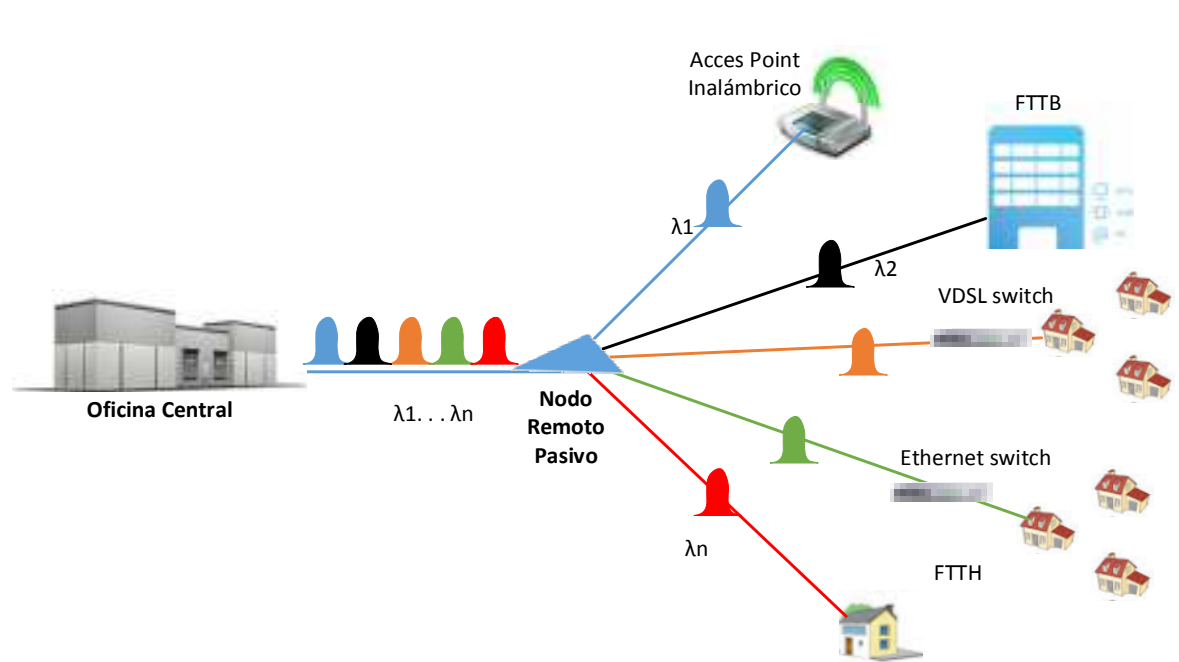
⁴ Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan y Galen H. Sasaki. (2010). “Optical Networks A Practical Perspective”. Inglaterra: Morgan Kaufmann

⁵ Anu Sheetal, “WDM-Passive Optical Networks”, Lambert Academi Publishing, 2012

⁶ Maged Abdullah Esmail y Habib Fathallah, “Long Reach PON Management and Protection System Based on Optical Coding,” The National Plan for Science & Technology (NPST) program by King Saud UniBERSity, Saudi Arabia, Project Number 09-ELE667-0. IEEE 2011.

1.3. Justificación.

Con el rápido crecimiento de las redes en el mundo, más y más énfasis se pone en el desempeño de la velocidad como de la conectividad. Altas velocidades son requeridas para comunicaciones de voz, descarga de música, juegos en línea, video conferencia, así como múltiples videos HD en streaming de tiempo real, las cuales son la clave fundamental para que se continúe descubriendo e investigando nuevas tecnologías, como es la concerniente a las redes ópticas pasivas (PON) y redes con arquitecturas de multiplexación por división de longitud de onda en redes ópticas pasivas (WDM-PON). Esta tecnología es confiable para incrementar el ancho de banda dividiendo una única fibra en múltiples longitudes de onda, cada una capaz de transportar el mismo ancho de banda que se transportaría en una sola fibra.



Fuente: el autor.

Figura 1-1 Arquitectura General para una red WDM-PON.

La Figura 1-1, ilustra la arquitectura general de una red WDM-PON. Como se observa en la figura anterior, WDM-PON puede pretender ser de una arquitectura de propósito general que puede servir para múltiples aplicaciones y para múltiples usuarios. La Oficina Central (CO) está conectada a cada usuario final a través de fibra óptica; en el medio de estos dos componentes está un splitter, el cual divide las distintas longitudes de onda de cada usuario. La longitud de onda de cada usuario es diferente entre ellos y depende del número de usuarios a ser atendidos. Hay dos tipos de transmisiones, las de downstream y las de upstream. La de downstream es una transmisión desde la Oficina Central hacia el usuario final, mientras que la upstream es una transmisión desde el usuario final hacia la Oficina Central. Cada transmisión tiene diferentes resultados de funcionamiento, dependiendo de los parámetros de diseño usados en la transmisión. Hoy en día las redes WDM-PON usan multiplexores y demultiplexores con el objetivo de dividir cada canal otorgado a cada suscriptor.

Una red PON es del tipo punto-multipunto (P2MP), cuya arquitectura no usa elementos con energía eléctrica para dividir la señal de los suscriptores. En vez de eso la señal es distribuida usando splitters ópticos que típicamente dividen la señal en 64 canales. Las redes ópticas pasivas (PON), están basada en una arquitectura de red que puede proveer gran cantidad de ancho de banda en la red de accesos, comparada con una red basada en cobre. Esta arquitectura puede servir para aplicaciones de clientes comerciales como residenciales.

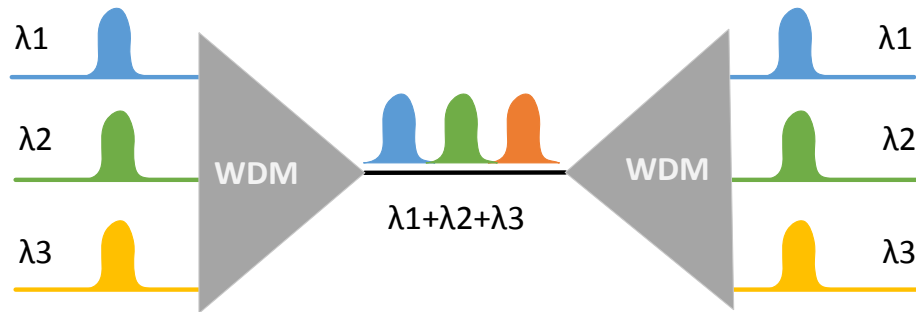
Incorporar multiplexación por longitud de onda (WDM), en una red óptica pasiva (PON), permite el soporte de una gran cantidad de ancho de banda comparada con red PON tradicional, la cual opera con una única longitud de onda, donde una onda es usada para transmisiones de upstream y otra onda separada es usada para transmisiones de downstream.

En el diseño de un sistema WDM-PON, varios parámetros son tomados en cuenta, como son la tasa de bit, potencia de transmisión, longitud de onda entre otros, pero estos deben ser correctamente considerados ya que afectarán directamente al desempeño del sistema.

Las redes PON son actualmente la clase más importante en sistemas de acceso por fibra en el mundo, y debido a la creciente demanda de un mayor ancho de banda, se ha empleado WDM con el que se puede soportar múltiples longitudes de onda tanto en el downstream como en el upstream. Redes PON basadas en WDM, colocan una longitud de onda separada para cada suscriptor, creando un canal seguro con una arquitectura punto-punto entre la Oficina Central y el usuario final.

En redes de acceso, existen muchas maneras de multiplexar datos en una línea de transmisión, como son la multiplexación por división de tiempo (TDM) y la multiplexación por longitud de onda (WDM). WDM es una multiplexación bidireccional que usa diferentes longitudes de onda tanto para señales de upstream como de downstream, cuyo propósito es incrementar la capacidad de transmisión y de recepción de un sistema con cables de fibra óptica. WDM es una tecnología que

transmite diferentes tipos de datos a distintas longitudes de onda sobre un único hilo de fibra óptica como se muestra en la Figura 1-2.



Fuente: el autor.

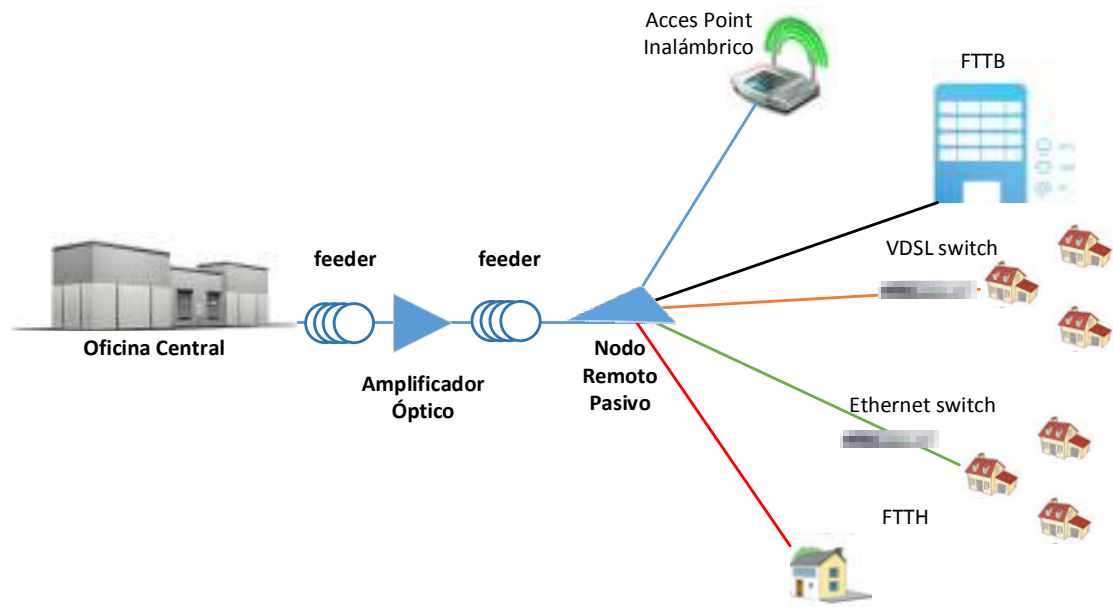
Figura 1-2 Sistema por Multiplexación de División de Onda.

Esta tecnología permite a los usuarios transmitir gran cantidad de volúmenes de datos, video o voz sobre un backbone de fibra óptica, y es posible debido a que hay diferentes velocidades de transmisión en un material con diferentes índices de refracción o elementos, que dependen de su desempeño, en función de la luz que los atraviesa. Este fenómeno es el mismo que el espectro de la luz solar, muestra diferentes colores en 1040 longitudes de onda visibles, cuando este rayo atraviesa un prisma con diferentes índices de refracción. En otras palabras, luz invisible de un sistema de transmisión WDM, es enviado a través de una fibra óptica por diferentes rutas dependiendo de la longitud de onda. Es por estos que un sistema WDM, también es llamado multiplexación cromática.

WDM puede proveer mayor ancho de banda sobre mayores distancias, dedicando mayor ancho de banda para cada usuario e incrementa el presupuesto de potencia de cada longitud de onda, haciéndola menos sensible a pérdidas ópticas incurridas en cada splitter.

Para que un sistema WDM-PON pueda tener un mayor presupuesto de potencia, se han estudiado y desarrollado las redes ópticas pasivas de largo alcance.

El objetivo de una red óptica pasiva de largo alcance (LR-PON), “usar una gran capacidad y mayor división de longitudes de onda de una red PON para que se pueda alcanzar o exceder los 100 km de distancia, combinando una red de acceso tipo óptico y una red metropolitana en un solo sistema”⁷, lo que hace que la red PON sea más que una opción para una red de accesos. Para alcanzar estas distancias, se requiere de elementos intermedios con amplificadores ópticos entre la OLT y el Nodo remoto como se indica en la Figura 1-3.



Fuente: el autor.

Figura 1-3 Arquitectura LR-PON.

El funcionamiento de una red LR-PON, puede ser examinada desde algunos parámetros.

⁷ R. Davey, P. Healey, I. Hope, P. Watkinson, D. Payne, O. Marmur, J. Ruhmann, & Y. Zuiderveld “DWDM reach extension of a GPON to 135 km” J. Lightwave Technol., pp. 29-31, Enero 2006.

En el actual estudio se ha simulado una red LR-PON, para comparar el comportamiento de la transmisión de un sistema óptico pasivo por multiplexación de división de onda analizando en diferentes formatos de modulación, tasa de bit, radio de extinción, longitudes de onda, entre otras, para observar el resultado que se obtiene en BER y factor Q usando el software Optisystem con cosimulación con Matlab.

Además se ha simulado un sistema de switching óptico, el cual permite tener una redundancia de comunicación entre la OLT y el ONU, de manera que automáticamente se detecte que si el feeder principal no se encuentra enviando información, conmute hacia un feeder redundante, o viceversa, lo que permite tener una alta fiabilidad en el sistema.

1.4. Objetivo General.

Estudio y diseño de una red LR-PON de alta disponibilidad empleando conmutación óptica y enlaces redundantes.

1.5. Objetivos Específicos.

1. Estudiar cada uno de los componentes que son considerados en un sistema pasivo óptico, especialmente los considerados para implementar un sistema PON de largo alcance (LR-PON).
2. Analizar las características del funcionamiento de los diferentes tipos de amplificadores ópticos.
3. Diseñar un sistema de conmutación óptica que permita, de manera automática, realizar el cambio de feeder entre la OLT y la ONU, para que el sistema no pierda la comunicación y se tenga un alto nivel de seguridad ante fallas en el enlace.

4. Analizar el comportamiento de una red LR-PON, empleado técnicas de simulación, mediante el software Optisystem y cosimulación con Matlab.
5. Analizar el comportamiento de un sistema LR-PON respecto a las diferentes características que pueden afectar al enlace en distancias mayores a 60km.

1.6. Resumen de contenido de capítulos.

Esta tesis se ha dividido en cinco capítulos, dichos capítulos muestran el estudio y el diseño de la simulación de la siguiente manera:

- Capítulo 1: Presenta una breve descripción de los sistemas WDM y de los sistemas LR-PON, además de indicar los objetivos planteados para la presente tesis.
- Capítulo 2: Presenta un estudio de la necesidad del aumento de ancho de banda, ventajas de una red PON y los elementos básicos que la componen. Además se estudia algunos elementos de la conmutación óptica.
- Capítulo 3: Presenta un análisis comparativo entre los diferentes amplificadores ópticos.
- Capítulo 4: Presenta una descripción detallada de los criterios de diseño para la simulación LR-PON con sus respectivos enlaces redundantes y la conmutación óptica considerada. Además se muestra un análisis completo del funcionamiento del sistema variando diferentes parámetros característicos del sistema como son: La tasa de transmisión, radio de extinción, distancia del enlace, entre otros.

- Capítulo5: Se concentra en las conclusiones realizadas en este trabajo de tesis y recomendaciones para el mejoramiento del desempeño del sistema LR-PON, con sus enlaces redundantes.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción

El internet en los últimos años se ha vuelto fenomenalmente popular, donde el usuario requiere un acceso a mayor ancho de banda y por el que está dispuesto a pagar, a pesar de que la economía global ha mostrado una contracción y hasta una gran disminución en economías emergentes.

Muchos de los desarrollos actuales en redes de acceso de banda ancha basadas en tecnologías ópticas, se han logrado gracias a la participación activa y estimulante de agencias de regulación y control de los gobiernos. Estos entes son los responsables de implementar políticas que ayuden al desarrollo de redes de accesos de banda ancha, de manera que la tasa de analfabetismo tecnológico se reduzca en las ciudades.

Entre los países de la Unión Europea, México, Canadá, Japón, Chile y Estados Unidos, para finales del 2011 se tenían un total de 2 billones de comunicaciones de accesos, de los cuales 1.35 billones son suscriptores móviles, seguido por 379 millones de conexiones por cobre, 175 millones de conexiones por líneas ADSL, 94 millones por conexiones por redes coaxiales y 43 millones de conexiones de fibra óptica.

A finales del 2011, las conexiones por cobre tuvieron un decrecimiento del 1.8%, de igual manera los suscriptores de DSL tuvieron un decrecimiento del 55.8 %, pero las conexiones por cable coaxial tuvieron un crecimiento del 30% y especialmente la tecnología fibra hasta el hogar, ahora representa el 13.7% de las conexiones totales de acceso hacia los suscriptores. Desde el 2007 al 2011 se ha tenido un aumento de

279 millones de suscriptores, de los cuales, la fibra óptica tiene un aumento de 114%, DSL 20%, coaxial de 37% y comunicaciones móviles en un 18%.

Debido a este crecimiento de suscriptores y a pesar de la recesión económica, en el 2015 las industrias de telecomunicaciones han realizado una inversión de 1.35 trillones USD, considerando que el 2009 se había invertido 1.29 trillones USD.⁸.

Esta tendencia, de aumento de suscriptores y de inversión en la industria de las telecomunicaciones, especialmente en las comunicaciones ópticas, han creado una intensa necesidad de acceso a aplicaciones en tiempo real y gran ancho de banda que se espera se mantenga, a pesar de las complicaciones económicas globales que se han presentado.

2.2. El problema del cuello de botella de la última milla.

La última milla se mantiene como el mayor cuello de botella entre redes locales (LAN) de alta capacidad y la red de suscriptor. La gran capacidad de ancho de banda en el backbone de las empresas de telecomunicaciones, debe alcanzar las redes del usuario a través de redes de accesos.

Las actuales tecnologías de banda ancha, que están altamente desplegadas para proveer servicios en la última milla son DSL y Coaxial cable modem (CM).

DSL está construida en base a la telefonía tradicional por cable de par trenzado, el cual provee servicios de datos utilizando la tecnología de Modulación Digital a través del modem DSL en las instalaciones del suscriptor y a través del Acceso Multiplexado de Línea Digital del Suscriptor (DSLAM), en la Oficina Central del

⁸ OECD Organization for Economic CO-Operation and Development, "OECD Communications Outlook" 2013. Pág 27 – 30.

proveedor (CO). La tasa de datos provista por DSL, es típicamente ofrecida en el rango de 128 kbps a 1.5 Mbps.

El cable modem es otra tecnología basada en sistemas de televisión por cable, utilizada para dar servicios de banda ancha. Esta tecnología entrega servicios de datos a través de frecuencias de canales de video analógicos, ofreciendo teóricamente mejores tasas de transmisión que la DSL. Sin embargo al contrario de DSL, donde un cierto ancho de banda es utilizado por varios suscriptores, el CM utiliza el ancho de banda para compartir con todos los suscriptores de la red, muy parecido al funcionamiento de las redes LAN. Por lo tanto es complicado que se pueda ofrecer una alta tasa de transmisión en CM comparado con DSL, especialmente en horas pico.

Las redes más modernas de CM son las llamadas Híbridas de Coaxial y Fibra (HFC), donde la fibra es instalada desde el head-end hacia el nodo óptico y mientras que la instalación final hacia el suscriptor, se hace a través de cable coaxial con sus respectivos repetidores y divisores ⁹. En esta configuración cada nodo óptico comparte 36Mbps, comúnmente entre 2000 casas pasadas, pero siendo un gran problema para los usuarios esta compartición, especialmente en horas pico.

Dado que DSL es capaz de ofrecer en general servicio de navegación y correo electrónico, esta tecnología no es la predilecta para dar servicios de aplicaciones de gran consumo de banda ancha. Por otra parte y debido a la distorsión de la señal, el área física que puede cubrir una oficina central con DSL está limitado a distancias menores de 5.5km; en general los proveedores de servicios a través de DSL no

⁹ Glen Kramer, "Ethernet Passive Optical Networks", Addison-Wesley, 2005, pág 67.

ofrecen sus servicios a distancias mayores de 3.7km, lo que potencialmente puede incrementar el costo del servicio. A pesar que existen otras tecnologías DSL, que pueden proveer mayores tasas de transmisión (VDLS, ADSL2, G.SHDSL), estas son más costosas e inclusive más limitadas en distancia.

De la misma manera CM, es incapaz de ofrecer servicios de banda ancha en grandes distancias con alta seguridad.¹⁰

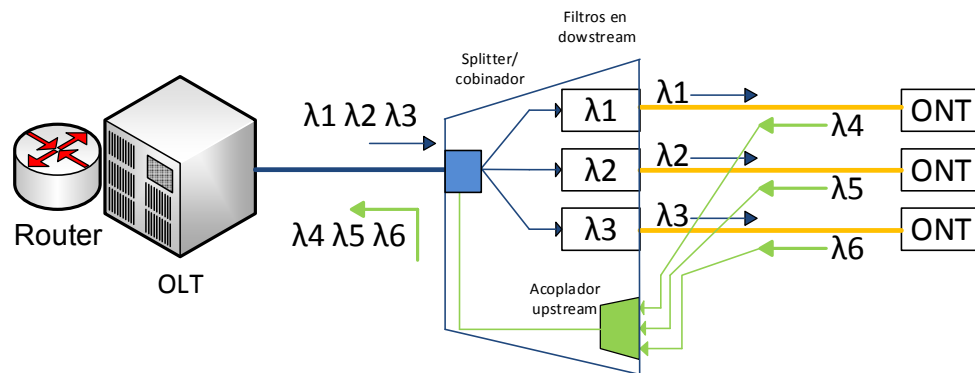
Para aliviar este problema de cuello de botella en el ancho de banda, las fibras ópticas han penetrado de manera profunda en la primera milla y de menor manera, pero en crecimiento exponencial, también en la última milla como es la fibra hasta el hogar (FFTH) y fibra hasta la acera (FTTC). Consecuentemente más compañías (AT&T, Verizon), han implementado en sus áreas de cobertura tecnologías de fibra óptica, en donde pueden ofrecer servicios triple play a los usuarios finales (voz, datos y video).

2.3. Arquitecturas

Las redes pasivas ópticas son de una tecnología full dúplex, que utilizan splitters ópticos económicos, en la dirección del downstream, para dividir una única fibra óptica proveniente desde el backbone de la red, en diferentes señales individuales hacia los suscriptores en la red de accesos. Las redes pasivas ópticas tienen estandarizada una topología básica como es la punto multipunto (P2MP) como se muestra en la Figura 2-1, donde el terminal de línea óptica (OLT), es el punto de control para toda la red PON y las unidades de red ópticas (ONU)/terminaciones de

¹⁰Ahmad R. Dhaini, "Next-Generation Passive Optical Networks Challenges and Solutions", AV AkademikerBERlag GmbH & Co. Kg, 20102, pág 5-6.

red ópticas (ONT). Todo el tráfico en downstream es por broadcast para todos los nodos de la red, de los cuales solo procesa la información el terminal que ha solicitado la información. El múltiple acceso por división de tiempo (TDMA) es utilizado para el tráfico en upstream que efectivamente tiene una arquitectura punto a punto (P2P), con datos transmitidos desde el nodo final hacia una OLT.



Fuente: el autor.

Figura 2-1 Unicast pasivo usando distintas longitudes de onda para diferentes ONT.

2.3.1. Topologías

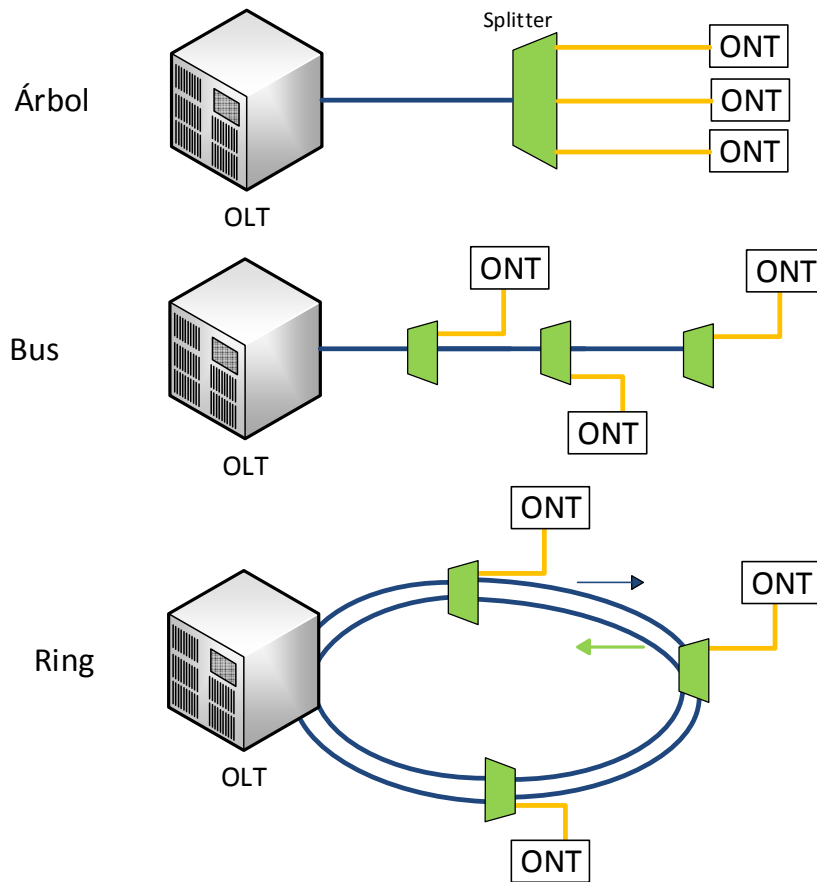
A pesar que las redes PON pueden tener diversas topologías, la topología física P2M es del tipo árbol y rama en su topología lógica, en donde la OLT tiene enlaces pasivos hacia las ONU/ONT a través de un splitter. Las señales ópticas en downstream son divididas en múltiples hilos de fibra óptica, mientras que en el upstream estas señales son combinadas usualmente usando TDMA en un único hilo de fibra.

A pesar de que físicamente se tiene una topología P2M, en el downstream lógicamente se tiene una topología P2P, esto gracias al uso de múltiples longitudes de onda. Filtros ópticos pasivos en el splitter pueden restringir el multicast, sea para

un pequeño grupo de usuarios o un usuario final, e inclusive restringir una única longitud de onda de un usuario como se muestra en la Figura 2-1. La Figura también nos sugiere la posibilidad de usar longitudes de onda, dedicadas para el upstream como una alternativa a TDMA en una única fibra óptica.

Además en la Figura 2-1 se muestran para el downstream y para el upstream, longitudes de onda diferentes para cada ONT, pero la longitud de onda en upstream puede ser la misma que la de downstream, usando esta última para generar una señal portadora en el upstream con el fin de ahorrar longitudes de onda, además se puede utilizar diferentes tipos de modulaciones para separar distintas señales. Si se necesita utilizar longitudes de onda muy cercanas entre ellas, de igual manera se puede usar modulaciones en la sub portadora. Una señal multiplexada en frecuencia en un grupo de sub portadoras, ayuda a conservar longitudes de onda y soportar un gran número de conexiones P2P.

La Figura 2-2 ilustra las topologías fundamentales en redes PON como son árbol, bus y anillo.



Fuente: el autor.

Figura 2-2 Tipos de topologías en redes PON.

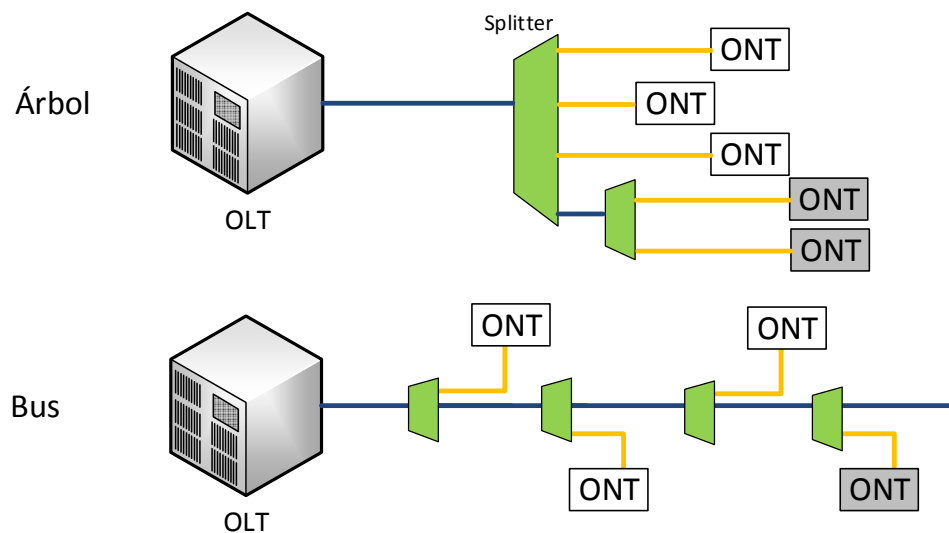
En la topología de árbol los asociados ONUs/ONT, están localizados a una distancia relativamente pequeña desde la OLT, la distancia entre un splitter hacia las ONUs/ONTs son similares y los splitters son los que eventualmente distribuyen la señal. Esta topología se utiliza en áreas urbanas donde los suscriptores están localizados muy cerca entre sí.

La topología en bus extiende considerablemente la distancia entre un grupo de ONUs/ONTs atendidas por la OLT, lo que la hace altamente usada en áreas rurales, donde la densidad de población es baja y los suscriptores están lejanos entre sí.

La topología en anillo es esencial donde la topología en bus tiene dos fibras troncales y provee protección contra fallas, donde cada fibra puede ser el back up de los servicios PON que está prestando la otra.

Todas las tres topologías pueden extender su capacidad como se muestra en la Figura 2-3 y puede crecer en forma de cascada como una segunda capa con su respectivo splitter.

Las topologías en bus y de anillo simplemente agregan un nuevo splitter a la fibra troncal o al anillo de fibra óptica¹¹.



Fuente: el autor.

Figura 2-3 Aumento de ONUs/ONTs en diferentes topologías.

¹¹Stephen Weinstein, Yuanqiu Luo y Ting Wang, "Passive Optical Networks, Enhancing the last miles Access" IEEE Press, 2012, pág. 27-30.

2.3.2. Requerimientos de Upstream y Downstream

Los requerimientos precisos para downstream y upstream se muestran en la Tabla 2-1, en donde estos son definidos por cada estándar.

Estos estándares comparten los siguientes requerimientos:

- Una única longitud de onda, usualmente de 1490 nm para transmisión de datos en el downstream y una diferente longitud de onda, usualmente a 1310 nm para la transmisión de upstream. Una segunda longitud de onda se usa para el downstream a 1550 nm, para proveer servicios de video.
- Un nodo óptico entre la OLT, ubicada en la oficina central y la ONT ubicada en las instalaciones del suscriptor, el cual contiene un splitter óptico pasivo para el downstream y acopladores ópticos pasivos en N:1, para el TDMA en las transmisiones de upstream.
- Capacidades agregadas, compartidas por todo el grupo de usuarios (32 usuarios) que para BPON corresponde 622.08Mbps/155.52Mbps (downstream/upstream), para EPON y 10G-PON, 1Gbps/1Gbps y 10 Gbps/10Gbps respectivamente y 2.488Gbps/1.244Gbps para GPON, para redes PON de siguiente generación XG-PON de 2.5Gbps de primera generación y 10Gbps para la siguiente generación, que se encuentran actualmente en desarrollo como una extensión del estándar GPON.
- Control de acceso al medio para facilitar la compartición de la capacidad de la transmisión del upstream.
- Medidas para asegurar la calidad de servicio (QoS), para diferentes clases de tráfico y configuraciones, fallas y desempeño en el sistema.

Tabla 2-1 Valores para downstream y upstream en diferentes estándares.

	BPON	GPON	XG-PON	EPON	10G-EPON
Clases	ITU-T G.983 B Y C	ITU-T G.984 A, B Y C	ITU-T G.987 N1, N2, E1 Y E2	IEEE 802.3ah PX10 Y PX20	IEEE 802.3av P(R)X10 P(R)X20 P(R)X30
Downstream	155.52Mbps 622.08 Mbps	1.244 Gbps 2.488 Gbps	9.952 Gbps	1 Gbps	1 Gbps 10 Gbps
Upstream	155.02 Mbps 622.08 Mbps	155.52 Mbps 622.08 Mbps 1.244 Gbps 2.488 Gbps	2.488 Gbps	1 Gbps	1 Gbps 10Gbps
Min/Max pérdidas de las clases de ODN					
Clase de ODN	Min/Max Pérdidas (dB)		Clase de ODN	Min/Max Pérdidas (dB)	
A	5/20		E2	20/35	
B	10/25		PX10	5/20	
C	15/30		PX20	10/24	
N1	14/29		P(R)X10	5/20	
N2	16/31		P(R)X20	10/24	
E1	18/33		P(R)X30	15/29	

2.3.3. Ventajas de las redes PON

Muchas de las propiedades de las redes PON se dan por el uso que se le da a la fibra, y por supuesto, de los elementos pasivos que componen la red, lo que sumado a la topología específica que se haya implementado sea bus, árbol o anillo, estas ofrecen ciertas ventajas unas sobre otras. Esto indudablemente otorga a las redes PON, dos importantes ventajas: ahorro de costes en la implementación y la gran capacidad de usuarios y ancho de banda que se les puede asignar.

Sin embargo estas no son las únicas ventajas que se puede mencionar, de las cuales se podría listar las más relevantes:

- Las redes PON permiten una conexión de grandes distancias entre la oficina central y las instalaciones de los suscriptores. Mientras que con DSL la máxima distancia es solo hasta 5.5 Km aproximadamente, una red PON puede operar a distancias mayores de 20 Km¹².
- Existe la posibilidad de proporcionar, a cada fuente de información, una longitud de onda diferente, evitando la mezcla de señales entre sí, facilitando la difusión de dicha información, desde la OLT a diferentes ONUs/ONTs. Por lo tanto las señales de voz y datos son enviadas por la segunda ventana de transmisión y las señales de video son enviadas por la tercera ventana, lo que provee una escalabilidad a las redes PON, donde una variedad de longitudes de onda son usadas por CWDM y DWDM.
- Debido al uso de CDWM y DWDM y además del uso de implementos pasivos en la red, ha hecho que se reduzca el costo de implementación de la planta externa.
- La instalación de elementos pasivos en la planta externa son muchos más económicos que los elementos activos, tanto para la operación así como el mantenimiento.
- El gran ancho de banda, que puede proveer por usuario, que en las redes PON puede ser de 10Gbps. La necesidad de incrementar el ancho de banda

¹²Trojer, Elmar, Dahlfors, Stefan, Hood, David y Mickelsson, Hansm "Current and next-generation PONs: A technical overview of present and future PON technology", Ericsson Review No. 2, 2008, pág 67.

debido a las nuevas aplicaciones en línea como son video en HD, juego en línea, entre otras, son una de las justificaciones para seleccionar una red que provea un gran ancho de banda¹³.

- Las señales en downstream son transmitidas por broadcast, mientras que en upstream son transmitidas usando TDMA.
- Encriptación puede ser usada para evitar el espionaje de las señales, tanto en upstream como en downstream.

2.4. Componentes activos y pasivos

Uno de los principales elementos en redes PON es el splitter/combinador, así como también el Arrayed Wave Guide Grating (AWG). En redes PON con TDM, el nodo Remoto (RN) es el que contiene el splitter/combinador y que opera de diferentes maneras, sean para procesar señales de upstream, como las de downstream. (Splitter para downstream, acoplador para upstream). En redes WDM-PON, el AWG es utilizado en lugar del splitter/acoplador en el nodo remoto.

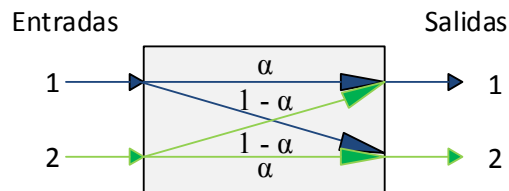
En las siguientes secciones se detallan algunos de los elementos principales de las redes PON.

2.4.1. Acoplador óptico pasivo

El acoplador óptico pasivo, es parte del splitter/combinador, el cual combina múltiples señales de diferentes fuentes, en una o más salidas de fibra óptica. La

¹³Juan Salvador Asensi Pla, "DESIGN OF PASSIVE OPTICAL NETWORK", BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, BRNO, 2011, pág 54.

Figura 2-4 ilustra un acoplador 2 x 2 con dos puertos de entrada y dos puertos de salida. Para la señal de entrada desde el puerto 1, una fracción α , $0 < \alpha < 1$, es acoplada a la salida por el puerto 1, y el restante es acoplado a la salida en el puerto 2, y lo mismo ocurre con el puerto de entrada 2. Como resultado, la señal de salida en ambos puertos, son una combinación de las dos señales de entrada.



Fuente: el autor.

Figura 2-4 Acoplador pasivo óptico 2 x 2.

Un acoplador 2 x 2 con $\alpha=0.5$ es también llamado acoplador de -3dB, el cual divide la señal de entrada en la mitad y la envía a cada una de las salidas.

Un acoplador también puede ser fabricado independientemente de la longitud de onda que lo atraviese o puede ser construido también para funcionar a una longitud de onda específica. Un acoplador que funciona independientemente de la longitud de onda que lo atraviesa, tiene el mismo coeficiente de acoplamiento sobre un amplio rango de longitudes de onda, mientras que un acoplador que funciona en una longitud de onda específica solo funciona específicamente para dicha frecuencia.

2.4.2. Circulador

La función básica de un circulador se muestra en la Figura 2-5. La luz ingresa a cualquier puerto en particular, por decir el puerto 1 y viaja a través del circulador para salir por el siguiente puerto es decir puerto 2. El dispositivo tiene una operación simétrica alrededor de un círculo.

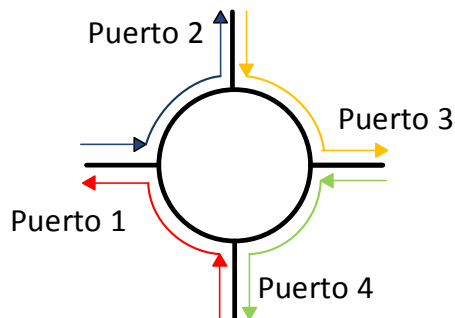


Figura 2-5 Circulador de 4 puertos

Fuente: el autor.

Los circuladores son dispositivos micro ópticos y pueden tener cualquier número de puertos, pero las versiones más comunes son de 3 y 4 puertos. También es común que estos dispositivos sean asimétricos es decir donde el último puerto por decir el cuatro no circula alrededor del puerto 1. Esta función se usa en sistemas donde por ejemplo la entrada en el puerto 1 está directamente conectada al laser donde ciertamente no se necesita que partes de la señal retorne nuevamente al puerto.

Una de las grandes atracciones del circulador es su relativamente bajo nivel de pérdida que típicamente entrega entre puerto y puerto alrededor de 0.5 a 1.5 dB.

Los circuladores son dispositivos muy versátiles y pueden ser usados en varias aplicaciones. Un ejemplo se muestra en la Figura 2-6. Aquí el enlace bidireccional consiste en dos hilos de fibra (uno para cada dirección) que están multiplexados

sobre un único hilo de fibra, lo que puede servir para ahorrar costos en la fibra por ejemplo. Claro si se hace algo como lo mostrado en la Figura 2-6. Se debe tener especial cuidado para minimizar la reflexión del enlace.

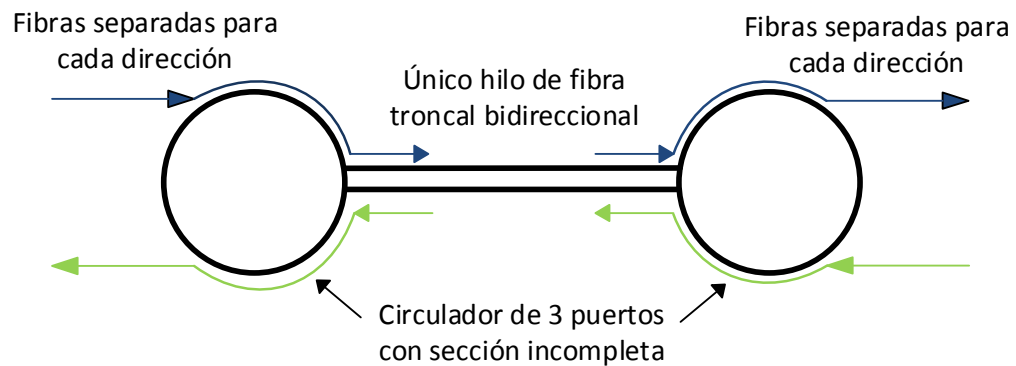
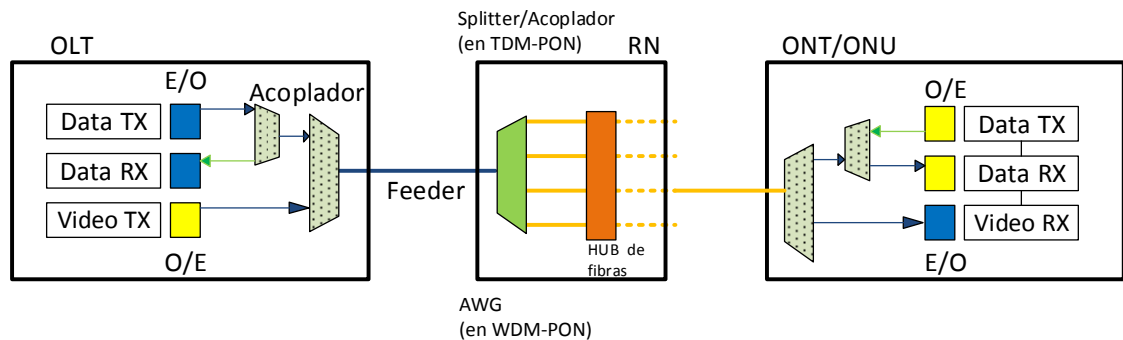


Figura 2-6 Circulador asimétrico.

Fuente: el autor.

2.4.3. Splitter

Contrario a los acopladores, un splitter 1 X N, es un elemento pasivo que divide la señal óptica portadora de una única entrada, en N salidas ópticas como se muestra en la Figura 2-7. Las fibras de distribución desde el splitter hacia los suscriptores, entregan la misma señal que envía la OLT hacia las ONUs/ONTs localizadas en diferentes lugares. La señal óptica de entrada es usualmente distribuida con una potencia uniforme sobre todas las N salidas, lo que ayuda a simplificar el diseño y el desarrollo de las ONUs/ONTs. Como se muestra en la Figura 2-7 el splitter desplegado en la red PON, es actualmente un splitter/acoplador combinando las señales desde diferentes ONUs/ONTs en el upstream, así como dividiendo la señal en sentido del downstream.



Fuente: el autor.

Figura 2-7 Splitter/Acouplador pasivo in red TDM-PON y AWG en WDM-PON.

El desarrollo de mejores tecnologías de fusión de los hilos de fibra óptica, ha reducido dramáticamente el costo de los splitter ópticos pasivos lo que han hecho que las redes PON sean aún más atractivas para su implementación.

La pérdida en el splitter es determinada por el número de puertos que este albergue, un splitter/acoplador óptico introduce al menos la misma pérdida en ambas direcciones de transmisión.

Hay muchas maneras de especificar el factor de división en un splitter o en varios splitters conectados en cascada. En la Figura 2-8 se ilustran tres maneras de obtener el factor de división en un splitter 1:16.

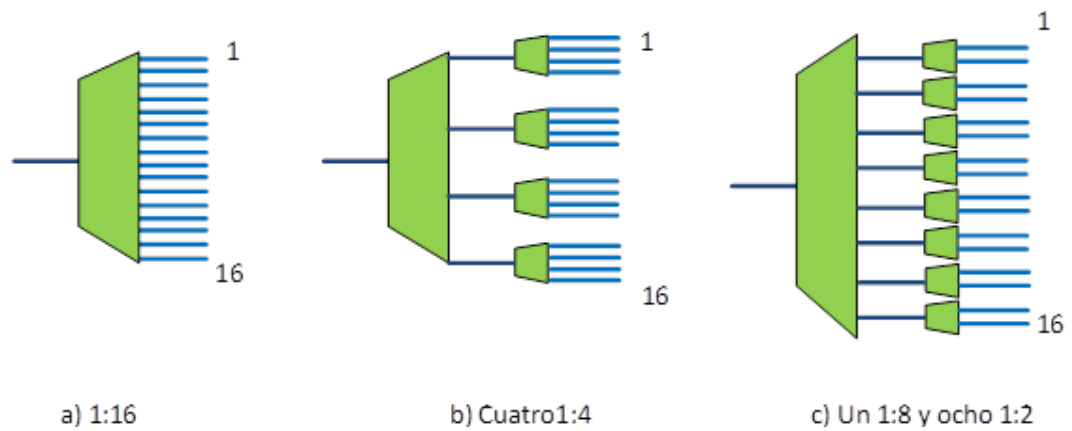


Figura 2-8 Alternativas de implementación de un splitter 1:16.

Como el número en redes PON se va incrementando mientras la red se va desplegando, la potencia de recepción decrece proporcionalmente haciendo que un splitter 1:64 sea el máximo permitido. La IEEE 802.3ah define los valores de división hasta 1:16. La ITU G.983 especifica factores de división de hasta 1:32 y la ITU G.984 permite factores de división de hasta 1:64.

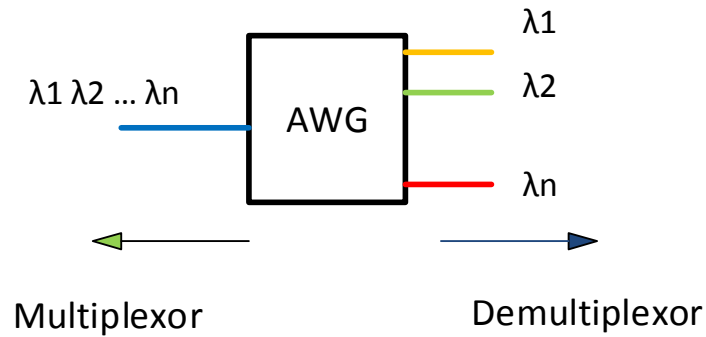
La Tabla 2-2 muestra los valores de splitters comerciales típicos. La pérdida de Inserción (IL), es la cantidad de señal que se pierde en el tránsito a través del dispositivo y está especificado en decibelios (dB). La Uniformidad es la máxima diferencia entre La Pérdida dependiente de la Polarización (PDL), es la variación de IL del splitter o el acoplador al variar los estados de la señal polarizada. La Pérdida de Retorno (RL) indica la cantidad de potencia que es reflejada nuevamente hacia el puerto de entrada, introduciendo pérdida a la señal que ingresa al dispositivo. La Directividad es la tasa de potencia radiada en la dirección de la salida a la media de la potencia radiada en todas las direcciones y es medida en dB.

Tabla 2-2 Valores comerciales para splitter marca Corning.

Ancho de Banda de doble ventana	Rango de Longitud de onda (ηm)	IL Típico (dB)	IL Máximo (dB)	Uniformidad (dB)	Pérdida de Retorno (dB)	Directividad	PDL (dB)
Splitter 1 x 2	1260-1360 y 1480-1580	3.20	3.6	0.7	≥ 55	≥ 50	0.2
Splitter 2 x 4	1260-1360 y 1480-1580	6.30	7.8	≥ 1.6	≥ 55	≥ 55	0.3
Splitter 2 x 8	1260-1360 y 1480-1580	10.20	11	2	≥ 55	≥ 55	0.2
Splitter 1 x 4	1260-1360 y 1480-1625	6.60	7	0.8	≥ 55	≥ 55	0.2
Splitter 1 x 8	1260-1360 y 1480-1625	9.80	10.4	≥ 1	≥ 55	≥ 55	0.2
Splitter 1 x 16	1260-1360 y 1480-1625	10.20	11	2	≥ 55	≥ 55	0.2
Splitter 1 x 32	1260-1360 y 1480-1625	15.70	17	≥ 1.5	≥ 55	≥ 55	0.3
Splitter 2 x 16	1260-1360 y 1480-1625	13.30	14.5	2.3	≥ 55	≥ 55	0.4
Splitter 2 x 32	1260-1360 y 1480-1625	17.00	17.5	2.5	≥ 55	≥ 55	0.4

2.4.4. Arrayed Waveguide Grating (AWG)

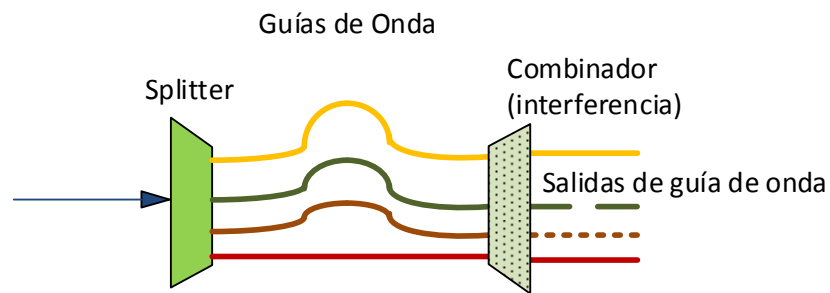
El AWG funcionalmente ilustrado en la Figura 2-9, es capaz de multiplexar un grupo de longitudes de onda en un único hilo de fibra óptica, como así también de separar las distintas señales portadoras, en diferentes longitudes de onda y entregarlas en cada salida óptica del AWG. En WDM-PON donde las ONUs/ONTs son atendidas por diferentes longitudes de onda, los AWG son usados para multiplexar/demultiplexar las señales en downstream y upstream respectivamente.



Fuente: el autor.

Figura 2-9 Funcionalidad de un AWG.

La operación de un AWG, se muestra en la Figura 2-10, en donde un único hilo de fibra óptica atraviesa el splitter óptico, e ingresa a un conjunto de guías de ondas paralelas entre sí pero de distintas longitudes. Estas guías de onda están separadas entre ellas la suficiente distancia para que el campo de una guía de onda no afecte a otra guía.



Fuente: el autor.

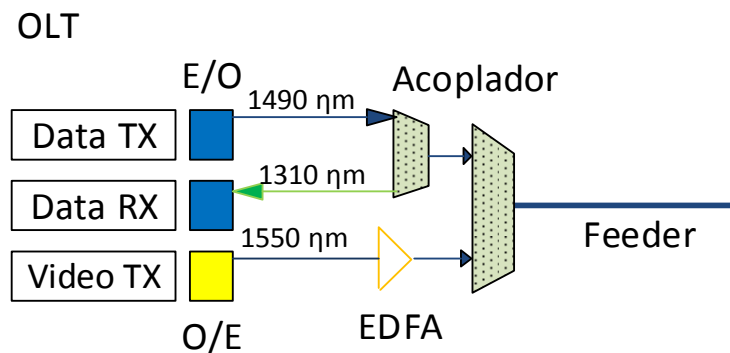
Figura 2-10 Funcionalidad de un AWG.

Cuando la señal sale del área de las guías de onda, estas atraviesan un combinador óptico y se interfieren entre ellas cuando ingresan a las guías de onda de salida. Las guías de onda y el espacio libre en un AWG, son diseñados para que cada puerto de salida reciba únicamente una longitud de onda. Un AWG también funciona como un

demultiplexor, usando un camino de luz 1→ 2→ 3→ 4→ 5 y como demultiplexor, usando la dirección contraria 5→ 4→ 3→ 2→ 1.

2.4.5. Optical Line Termination (OLT)

La OLT mostrada en la Figura 2-11, es el punto donde se entregan los servicios en la red PON y se encuentra localizado en la oficina central del proveedor. Típicamente provee señal de datos digitales y transmisión de voz usando los 1490 nm en el downstream, transmisión de video analógico usando los 1550 nm y recepción de señal de datos digital y voz a los 1310 nm.

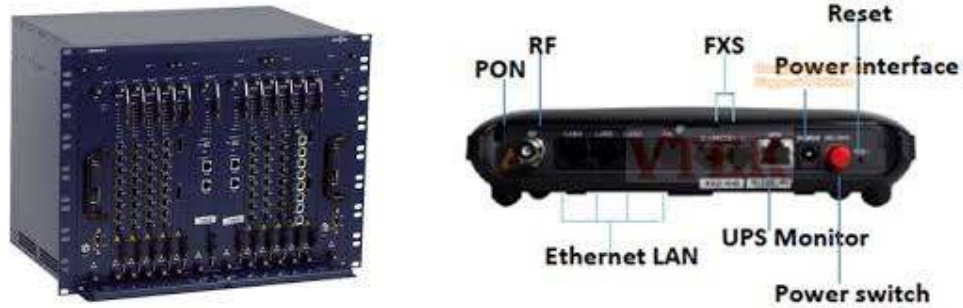


Fuente: el autor.

Figura 2-11 Terminal de Línea Óptica (OLT).

La OLT también transmite señal de voz y datos digitales en el downstream, a través de la ventana de 1490 nm usando un láser de realimentación distribuido (DFB). Las señales en upstream de voz y datos desde la ONUs/ONTs son recibidas con un detector en 1310 nm. El video analógico que se trasmite a 1550 nm, en ciertos casos, emplea un amplificador óptico dopado de erbio (EDFA), antes de transmitir la señal hacia los suscriptores.

La Figura 2-12 muestra un ejemplo de OLT y de ONUs/ONTs.

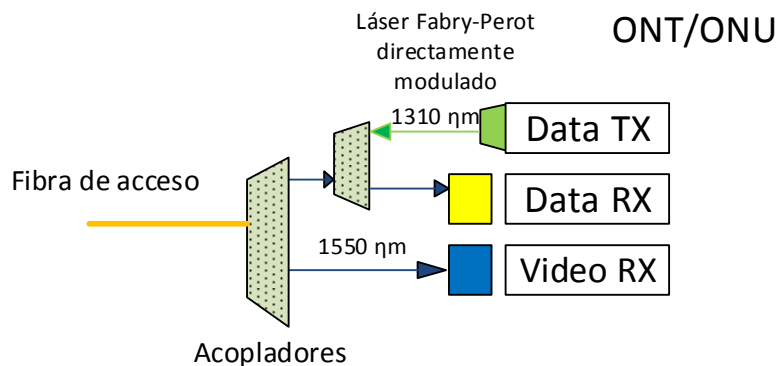


Fuente: shardasystems.com

Figura 2-12 Ejemplo de OLT y ONUs/ONTs.

2.4.6. ONUs/ONTs.

La ONU/ONT mostrada en la Figura 2-13 es el punto final de la red PON, usualmente localizada en las instalaciones del suscriptor. El término ONU se usa usualmente cuando estas unidades son para atender a varios terminales de red, mientras que el término ONT se usa cuando este equipo se usa solo para un terminal de red. Una ONU/ONT típicamente provee señal de datos digital y transmisión de voz con un láser de 1310 nm, mientras que para la recepción se usa un receptor a 1490 nm y para la recepción de video analógico, se usa un recetor de 1500 nm.



Fuente: el autor.

Figura 2-13 ONT/ONU.

Las señales de upstream de datos digitales y de voz se transmiten a una longitud de onda de 1310 nm, con un láser Fabry-Perot y una señal directamente modulada.

En la Tabla 2-3, se listan las características principales de la OLT y de la ONU/ONT como se especifica en el estándar.

Tabla 2-3 Características de los equipos activos.

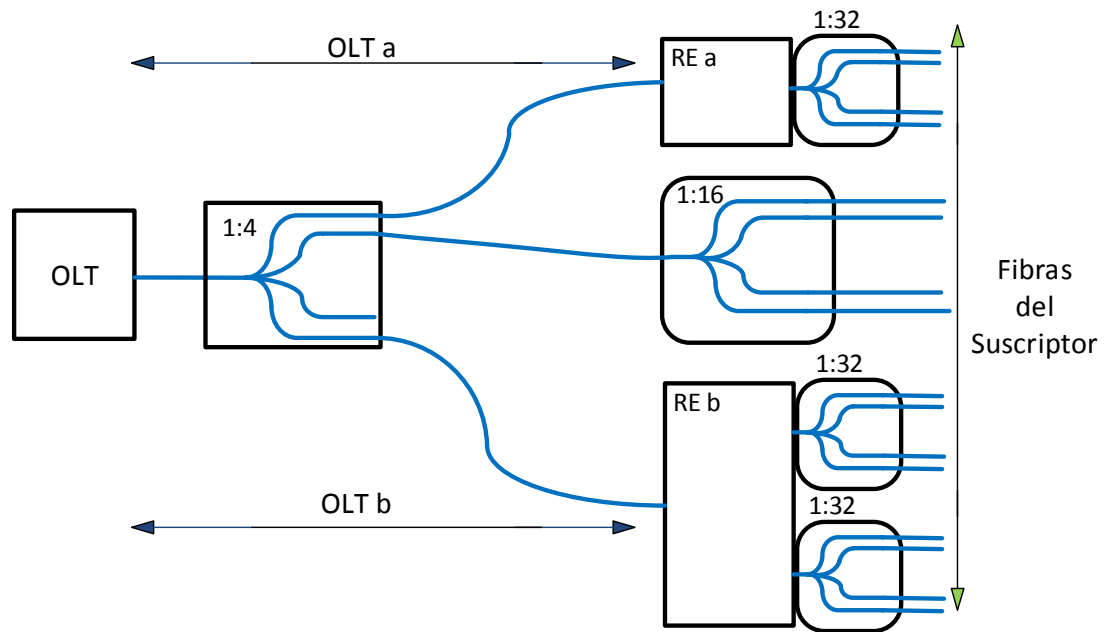
Equipo	Servicio	Láser	Longitud de onda nm
OLT	Datos y Voz (Downstream)	DFB	1480-1500 (típico 1490)
	Video Analógico (Downstream)	DFB	1550-1650 (típico 1550)
ONU/ONT	Datos y voz (Upstream)	Fabry-Perot	1260-1360 (típico 1310)

2.4.7. Extensor de Alcance (RE).

Un Extensor de Alcance (RE), es un elemento activo ubicado en la red de distribución óptica (ODN), que sirve para aumentar el presupuesto de potencia del enlace y por lo tanto extender su alcance y su relación de división. La extensión del alcance se realiza en la capa física únicamente, sea esta por amplificación de la

señal óptica o de la conversión de la señal óptica a eléctrica para regenerarla y transmitir nuevamente en óptico, todo esto sin cambiar los protocolos de los estándares como son ITUG.987 y ITUG.984¹⁴.

El RE es insertado en la cabecera de las ODN de clase B o C, el cuál atiende a un conjunto de ONUs/ONTs y en la parte final del enlace troncal óptico se conecta a la OLT. En la OLT muy cerca de esta, se puede estar dividiendo la fibra óptica en algunos hilos de fibra y cada uno de estos puede o no tener un RE, como se muestra en la Figura 2-14. Esta opción permite que se pueda atender a áreas con diferentes distribuciones, como pueden ser zonas centrales en ciudades o valles alejados.



Fuente: el autor.

Figura 2-14 Topología del extensor de alcance.

¹⁴Dave Hood,y Elmar Trojer, "Gigabit Capable Passive Optical Networks", A Jhon Wily & Sons INC. Publications, 2012, pág 118.

Las recomendaciones de la norma G.984.6, específica que los parámetros ópticos a ser considerados en el medio físico, dependen si es una RE tipo óptico-amplificado o una RE óptico-eléctrico-óptico, como se puede ver en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4 Parámetros Ópticos G.984

Parámetro	RE tipo OEO	RE tipo OA
Atenuación en upstream	14-27.5 dB	≤ 28dB
Atenuación en downstream	11-23 dB	≤ 23dB
Máxima penalidad del camino óptico	1 dB	1 dB
Máximo alcance de la OLT	60 km	60 km

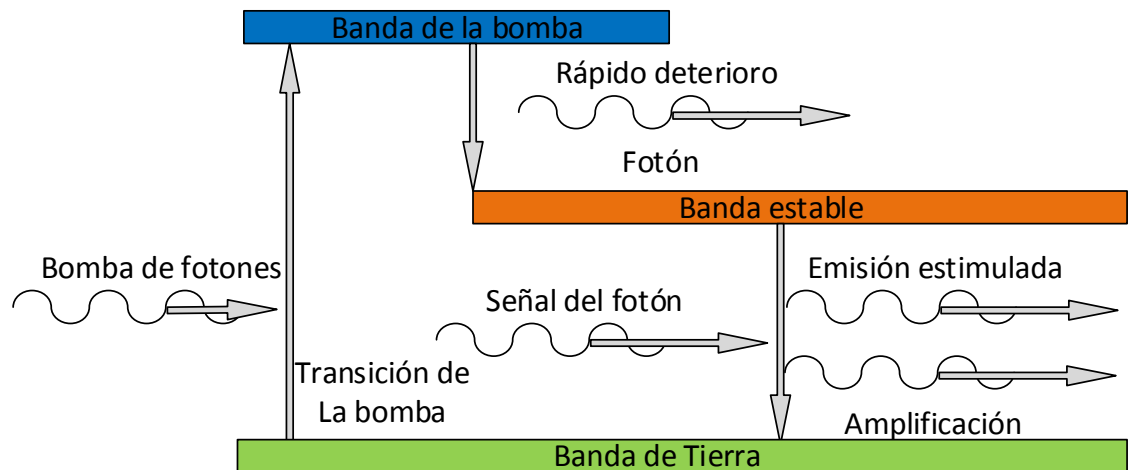
Un extensor de alcance es un equipo activo, el cual requiere de alimentación eléctrica y de protección contra fallas ante pérdida de la energía primaria, además de comunicación para la administración del equipo. El RE debe también poseer protección contra el medio ambiente y un sitio en donde pueda tener sus seguridades físicas.

Todo este costo adicional, hace más difícil justificar el costo del negocio para una red GPON y si en verdad se requiere un elemento activo para extender el alcance, lo que se ha preferido en el mercado es la instalación de una mini OLT.

2.4.8. Amplificador de fibra dopada de Erblio (EDFA).

Como se muestra en la Figura 2-15, los EDFA tienen un funcionamiento mediante un bombeo de señal óptica. Al dopar con iones de erbio el núcleo de una fibra óptica se provoca un ensanchamiento de las bandas de transición, esto a su vez provoca un ensanchamiento considerable del rango de longitudes de onda que pueden ser

amplificadas. Este efecto puede mejorarse añadiendo al núcleo, aluminio y óxido de germanio.



Fuente: el autor.

Figura 2-15 Proceso de bombeo del EDFA.

La bomba de luz es inyectada en la misma dirección que la señal a través de un splitter por fusión de fibra o TFF. Este arreglo provee una baja ASE, pero limita la ganancia. Además el TFF es apropiado para recibir preamplificadores.

El bombeo en ambas direcciones, duplica la ganancia en el amplificador, pero aumenta el efecto del ASE.

Originalmente los EDFA, eran usados en la banda C (1530 a 1560 nm), porque el pico de ganancia que se produce por el erbio, decae rápidamente fuera de esta región. Con ciertas mejoras realizadas al dopar el erbio, la capacidad de amplificación se ha ampliado para láseres con bombeo óptico de alta potencia (hasta los 0.5W) y por ende la extensión de la longitud del enlace de fibra óptica. En la actualidad se tiene EDFA para la banda L (1570 a 1600 nm) con una ganancia de 2dB. La Tabla 2-5 muestra los parámetros típicos para los EDFA.

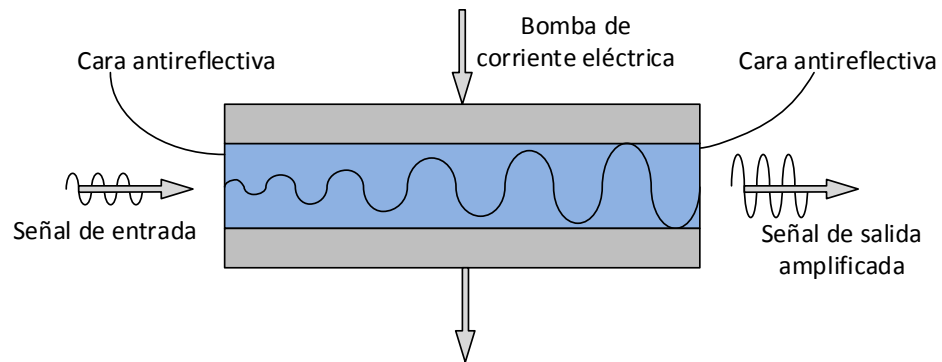
Tabla 2-5 Parámetros de EDFAs.

Parámetro	EDFA a 1550 nm (banda C)	EDFA a 1570 nm (banda L)
Pico de ganancia	30 dB	22 dB
Longitud de onda de operación	1550 nm	1570 nm
Ancho de banda de la ganancia	40 nm	25 nm
Figura de Ruido	5 dB	6 dB
Potencia óptica de salida	+17 (hasta +26) dBm	+13 (hasta +17) dBm
Plano de la ganancia	1.5 dB	1.5 dB
Potencia de la fibra de bombeo acoplada	250 – 300 mW	300 – 400 mW

2.4.9. Amplificadores Ópticos Semiconductor (SOA).

Un amplificador óptico semiconductor (SOA), es similar a un láser semiconductor pero sin el resonador, en lugar de este tiene espejos colocados de manera angular y recubiertos de un material anti reflectivo. A pesar de este recubrimiento, se disipa una pequeña cantidad de energía (0.01%), lo que evita un riesgo de oscilación. Sin un mecanismo de retroalimentación, la luz pasa a través de la región activa una sola vez, haciendo que esta se amplifique por emisión estimulada.

Una bomba de corriente eléctrica crea la inversión de carga que es un prerrequisito para producir ganancia. En la Figura 2-16 se muestra la estructura de un amplificador (SOA).

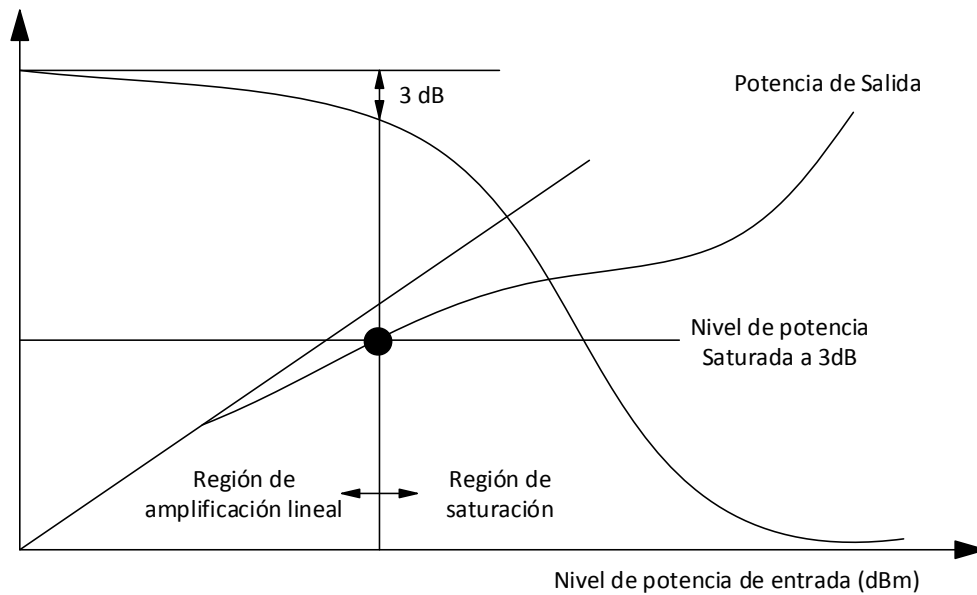


Fuente: el autor.

Figura 2-16 Estructura simplificada del SOA.

Un SOA se caracteriza por los siguientes parámetros básicos: ganancia, ancho de banda de la ganancia, potencia de saturación, figura de ruido, y sensibilidad de la polarización.

La ganancia de un SOA depende de la bomba de corriente y del nivel de la potencia de entrada. La Figura 2-17, muestra que el SOA provee una gran ganancia para señales con poca potencia de entrada. El SOA opera en la región no saturada. En el puerto de entrada, la señal sigue siendo amplificada, pero declina la ganancia. Para altos niveles de potencia de entrada, la ganancia se acerca a la unidad y la señal de salida tiene una potencia igual que la potencia de entrada. El nivel de potencia de salida con una reducción de 3dB de ganancia, es llamado potencia de saturación. Operar el SOA por encima de la potencia de saturación, fuera de la región lineal, degrada la calidad de la señal. Este nivel de potencia junto con la ganancia del SOA, definen la máxima potencia de entrada permitida.



Fuente: el autor.

Figura 2-17 Ganancia y saturación en el SOA.

La Figura 2-17 muestra cómo se incrementa la corriente y la ganancia hasta saturar la señal de salida. Por lo tanto, una bomba de corriente es una herramienta para ajustar la ganancia y el nivel de potencia de salida para una aplicación específica.

Los SOA pueden operar a cualquier longitud de onda soportada por la fibra óptica, con un ancho de banda desde varios nanómetros hasta 140 nm. Además los SOA, añaden el efecto de ruido por la emisión espontánea amplificada (ASE), a la señal óptica de salida.

Para suprimir el efecto del ruido por ASE, los SOA son combinados con filtros ópticos.

La Tabla 2-6, enlista las características típicas de los SOA usados en GPON con extensor de alcance y XG-PON en la OLT:

Tabla 2-6 Características del SOA.

SOA en el extensor de alcance en GPON		
Parámetros	SOA a 1490 nm	SOA a 1310 nm
Pico de ganancia	26 dB	29 dB
Longitud de onda de operación	1490 nm	1310 nm
Ancho de banda de la ganancia	30 nm	40 nm
Potencia de Saturación	+ 9 dBm	+9 dB
Figura de Ruido	8 dB	7.5 dB
Sensibilidad de polarización	1.5 dB	1.9 dB
Corriente de polarización	390 mA	420 mA
Consumo de potencia	4W	5W
SOA en el extensor de alcance en GPON		
Parámetros	SOA a 1570 nm	SOA a 1260 nm
Pico de ganancia	9.5 dB	9,5 dB
Longitud de onda de operación	1570 nm	1260 nm
Ancho de banda de la ganancia	40 nm	40 nm
Potencia de Saturación	+12dBm	+11 dBm
Corriente de polarización	300 mA	300 mA
Consumo de potencia	3W	4W

2.5. Comparación de característica de amplificadores ópticos.

La distancia de transmisión de cualquier sistema de comunicaciones ópticas, está limitado eventualmente por las pérdidas en el conductor de fibra óptica. Para sistemas ópticos que abarcan grandes distancias, tradicionalmente se usan repetidores opto electrónicos, en donde la señal óptica es primero convertida en corriente eléctrica y luego regenerada usando transmisores. Estos regeneradores se vuelven muy complejos y costoso para sistemas con multiplexores WDM. Una alternativa adicional para el manejo de estas pérdidas es el uso de amplificadores ópticos, los cuales amplifican directamente la señal sin requerir la conversión de la señal al dominio eléctrico. Desde los años 80, se han desarrollado una gran cantidad

de tipos de amplificadores ópticos tal como son los EDFA y los SOA haciendo que el uso de estos en sistemas de grandes distancias se extendiera en los noventa. Para el año 1996 los amplificadores ópticos ya fueron parte de cables de fibra óptica entre los océanos Pacífico y Atlántico¹⁵.

Revisando distintos estudios, comparando la funcionalidad de los amplificadores EDFA y SOA en sistemas ópticos, se puede detallar las siguientes características^{16,17}.

2.5.1. Ventajas de los amplificadores EDFA:

- Es significativa más simple y tiene menores tiempos de falla que un repetidor.
- Es económico comparado con un repetidor.
- Puede trabajar a relativamente cualquier velocidad.
- Físicamente puede ser lo suficientemente pequeño para ser colocado en una tabla de circuitos.
- Puede producir una señal con una ganancia óptica de 25dB e inclusive algunos amplificadores pueden tener ganancia de 50 dB y hasta mayores.
- Puede amplificar diferentes longitudes de onda simultáneamente (pero con pequeñas limitaciones).
- No necesita del conocimiento de la codificación digital. Tanto amplitud (pulso), modulación y coherencia de la luz son amplificados. En algunas

¹⁵ Govind e. Agrawal, "Fiber-Optic Communications Systems", a Jhon Wiley & Sons INC: Publications, 2002. Página 226.

¹⁶ Harry J. R. Dutton, "Understanding Optical Communications"; IBM Corporation, International Technical Support Organization, Septiembre 1998 pág. 175 a 177.

¹⁷ Miguel A. Yépez T., "Sistemas láser con amplificadores semiconductores y de fibra óptica", Universidad Nacional Autónoma de México, México DF, 2012.

aplicaciones actuales como son la distribución de señal de TV que es modulada en AM, también es amplificada. Esto significa por ejemplo, en cables submarinos que ya se encuentran instalados y se cambia la tecnología de transmisión, los amplificadores no son afectados.

- No existe un retardo efectivo en el amplificador, el único retardo que se presenta es el tiempo que le toma a la señal óptica propagarse a través de algunos metros de la fibra óptica monomodo.
- En sistemas que se ha planeado el uso de OTDR para el monitoreo ante fallas en el enlace, los EDFA no representa un problema para estos, siempre y cuando exista un correcto diseño y la ubicación de aisladores en el sistema.
- Los amplificadores ópticos pueden saturarse igual que su contraparte eléctrica. Sin embargo los EDFA se saturan lentamente y tienen un tiempo constante muy largo, que corresponden a unos 11ms (upper-state lifetime del Erbium). Por lo tanto cuando el EDFA se satura, este solo pierde cierta ganancia, además este no recorta picos, ni distorsiona la señal como un amplificador eléctrico, de hecho los EDFA operan usualmente en saturación. Si hay múltiples longitudes de onda en una única fibra, potencialmente los EDFA introducen interferencia entre los canales pero en un mínimo efecto, debido a la ganancia por el upper-state lifetime del Erbium.

2.5.2. Los EDFA también tienen sus limitaciones:

- El propio amplificador en si introduce algo de ruido (y este también amplifica el ruido recibido en la señal), pero este es trivial comparado con el ruido en

ambientes eléctricos, pero este ruido puede volverse significativo en un gran número de EDFAs conectados en cascada a lo largo de un enlace.

- Actualmente las fibras dopadas para amplificar no operan sobre el rango de longitudes de onda de interés, el rango usual es alrededor de 24nm (alrededor de 3000GHz), los amplificadores son construidos en un rango de 80nm .
- Los amplificadores entregan diferentes cantidades de ganancia a diferentes longitudes de onda, la ganancia en el espectro no es perfectamente plano. Esto puede ser un problema en sistemas WDM a lo largo de un enlace que tiene diferentes etapas de amplificación.
- Los amplificadores no recrean los pulsos, de hecho estos no conocen nada acerca de un pulso, estos amplifican cualquier señal que reciben.
- Los amplificadores por ellos mismo no crean dispersión, pero si el pulso llega dispersado este es amplificado tal como llegó, en comparación con los repetidores este es un aspecto negativo para el EDFA. Los repetidores reconstituyen y sincronizan nuevamente la señal así como también la amplifican. En sistemas ópticos, se debe compensar la dispersión con otros elementos.
- En muchos sistemas, los amplificadores son colocados más cerca entre ellos comparando con los repetidores. No se puede permitir que la señal se vuelva demasiado débil, antes de la re amplificación. En algunos sistemas a inicios de los años 90, esto produjo la necesidad de colocar amplificadores

cada 30 km, mientras que los repetidores pueden ser colocados hasta una distancia de 50km entre sí.

2.5.3. Ventajas de los amplificadores SOA:

- Es posible obtener un estado de emisión de longitud de onda múltiple estable mediante un arreglo basando en SOA, que a diferencia de los sistemas de emisión múltiple basados en EDFA, resulta mucho más simple.
- En sistemas con múltiples longitudes de onda implementados con amplificadores SOA, la polarización se mantiene estable.
- El SOA ofrece estabilidad ante los cambios en los estados de polarización, lo que permite poder manipular las diferentes componentes de la señal en el puerto de entrada. Esta característica permite obtener buenos resultados en la operación en longitudes de onda múltiples con un arreglo simple. Esta característica se logra gracias a que el SOA puede proporcionar ganancia a varias longitudes de onda simultáneamente, sin que exista competencia entre ellas. Además, la separación entre longitudes de onda puede ser de hasta unos 0.8 nm.
- Una de las mejores ventajas de los SOA es que estos pueden integrarse con otros componentes en un sustrato plano. Por ejemplo un transmisor WDM que puede ser construido de 10 láseres, pueden ser acoplados en un único sustrato. En este caso, un SOA podría integrarse en la salida, para superar algunas de las pérdidas de acoplamiento.

- El atractivo de un SOA es que esencialmente es un láser de InGaAsP, que está funcionando por debajo de su punto de umbral y que puede operar en todas las bandas de longitud de onda de la fibra que se extiende desde los 1280 nm en banda O, hasta los 1650 nm de la banda U. Los SOA son particularmente útiles en la banda O, donde otras tecnologías de amplificadores ópticos son más difíciles de poner en práctica.

2.5.4. Desventajas de los amplificadores SOA:

- Entregan mucha menor potencia (unos pocos miliwatios). Esto es usualmente suficiente para una operación en un sistema con un único canal, pero en sistemas WDM se requieren entregar estos miliwatios pero por canal. Los amplificadores SOA prácticamente amplifican una única longitud de onda.
- El acoplamiento de la fibra de entrada en el chip tiende a producir muchas pérdidas y por lo tanto reduce la eficacia del amplificador. El amplificador debe tener una ganancia adicional para superar la pérdida en la cara de entrada.
- Los SOA tienden a ser ruidoso.
- Pueden producir diafonía grave cuando se amplifican múltiples canales ópticos. Esto se debe principalmente alrededor del nivel de potencia, donde los amplificadores se saturan.

2.5.5. Elección del amplificador a utilizar en sistemas WDM.

El EDFA fue tal vez el catalizador más importante para ayudar al despliegue de los sistemas WDM¹⁸. El uso de WDM y EDFA redujo drásticamente el costo de los sistemas de transmisión de larga distancia y logró el aumento de su capacidad. En cada lugar donde se encontraba un regenerador, un solo amplificador óptico podría reemplazar todo un conjunto de regeneradores más costosos, uno por cada fibra.

Esto resultó ser tan convincente que casi todas las empresas proveedoras de servicios de larga distancia, ampliamente han desplegado sistemas WDM amplificados en la actualidad. Los sistemas WDM con EDFA se desplegaron a mediados de la década de los 90 y hoy en día están alcanzando capacidades más de 1 Tbps sobre una sola fibra. Al mismo tiempo, las tasas de transmisión de bits, en un solo canal se han elevado a 10 Gbps.

Con la llegada de EDFA, se evidenció un nuevo problema como fue la dispersión cromática.

En lugar de regenerar la señal cada 40 a 80 km, las señales se transmitieron ahora a través mayores distancias debido al uso de EDFA, lo que provocó que los pulsos se dispersen significativamente. En investigaciones desarrolladas se encontraron varias técnicas para hacer frente a la dispersión cromática. El espectro de transmisión podría reducirse aún más, mediante el uso de un dispositivo externo para activar el láser (llamado modulación externa), en lugar de encender el láser directamente (llamado modulación directa). El uso de moduladores externos, junto con láseres

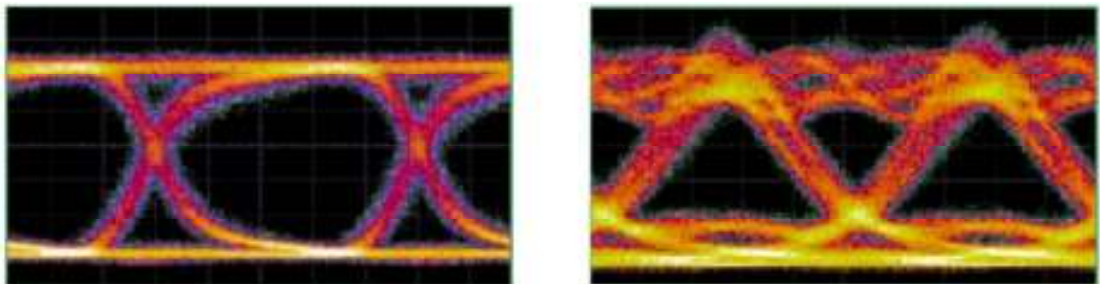
¹⁸ Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan y Galen H. Sasaki, "Optical Networks A practical Perspective", Elsevier Inc., 2010. Página 35.

DFB y EDFA permite a los sistemas lograr distancias de unos 600 km a 2,5 Gbps entre regeneradores, sobre fibra monomodo estándar de 1,55 micras.

Originalmente, el funcionamiento de un EDFA por sí mismo se limita a la región 1530 a 1560 nm¹⁹, que es el origen de la banda convencional con designación de banda C. Sin embargo, las mejoras en los diseños de fibra dopada con erbio y el uso de láseres de bombeo que funcionan a longitudes de onda diferentes de las usadas en la banda C, han permitido el uso de amplificadores EDFA en la banda L. Un EDFA necesita ser bombeado ópticamente, lo que se logra con los láseres de 980- y 1480 nm para la operación en banda C y por láser de 960 nm para el uso de la banda L.

2.6. Compensadores de Dispersión

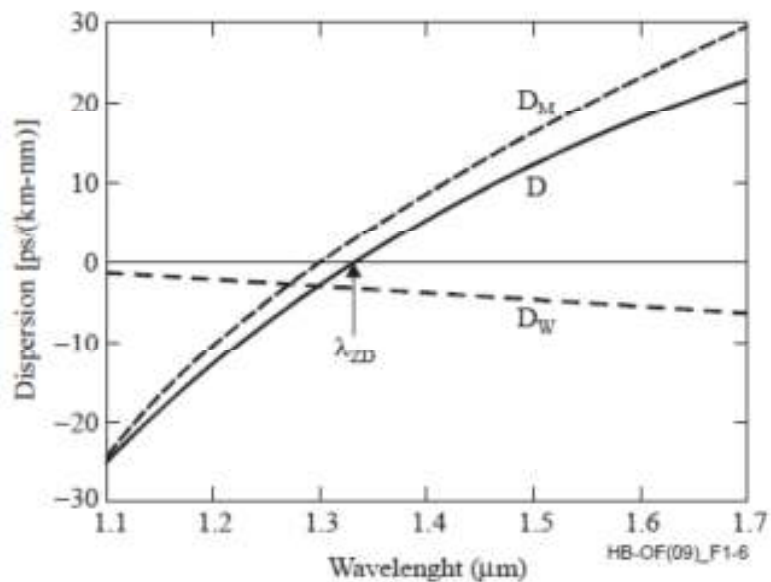
La dispersión cromática es causada por el retardo en diferentes cantidades de la velocidad de grupo, en un sistema compuesto de distintas longitudes de onda y es definida como el esparcimiento de un pulso de luz en una fibra óptica. Las consecuencias de la dispersión cromática se pueden ver en la Figura 2-18.



Fuente: *Optical fibres cables and systems ITU-T Manual 2009* pág. 11
Figura 2-18 Efecto de la dispersión cromática.

¹⁹ Gerd Keiser, "Optical Communications Essentials", the McGraw-Hill Companies, 2003. Página 194.

La dispersión cromática se debe esencialmente a dos contribuciones: por el material y por la guía de onda. La dispersión por el material se produce por el índice de refracción del silicio, que cambia con respecto a las distintas longitudes de onda. La dispersión por guía de onda, se produce por las propiedades dispersivas propias de la guía de onda. Un ejemplo de la interacción entre estas dos contribuciones en la dispersión total en la fibra, se muestra en la Figura 2-19. Desde el punto de vista práctico, una propiedad importante es que la dispersión por guía de onda, tiene signo opuesto con respecto a la dispersión por material, en el rango mayor de 1300nm.



Fuente: Optical fibres cables and systems ITU-T Manual 2009 pág.11
 Figura 2-19 Dispersión total D por la contribución relativa de la dispersión por material D_M y por la dispersión de guía de onda D_W para fibras ópticas monomodo convencionales

Esta propiedad puede ser usada para desarrollar fibras con dispersión desfasada, escogiendo valores para distintos radios de núcleos y diferentes índices de refracción. La longitud de onda con dispersión cero es desplazada de la región de

1300 nm a una región alrededor de 1500nm, para coincidir con la región de menor pérdida. (ITU-T G655).

Así como los amplificadores ópticos resuelven el problema de atenuación en la fibra óptica, al mismo tiempo incrementan el problema de la dispersión cromática, haciendo que la dispersión inducida, degrade la señal transmitida a lo largo de un enlace que tiene algunos amplificadores. En principio los efectos de la dispersión pueden ser minimizados, usando un láser con ancho de línea reducido y que opere en una longitud de onda cercana a la región de cero dispersión de la fibra, sin embargo no en todas las ocasiones es práctico que se opere cerca dicha región, debido a los efectos no lineales de la fibra óptica.

La compensación de dispersión cromática, trata de resolver estos problemas de una manera práctica cancelando el ensanchamiento del pulso, haciendo que la señal de entrada recibida sea restaurada. Estos métodos de compensación pueden ser clasificados como activos (usados en el transmisor o en el receptor) o pasivos (elemento óptico a lo largo del enlace de fibra).

Algunos métodos de compensación activos se encuentran en la recomendación UIT-T G.691, como son el prechirp aplicado en el transmisor óptico para obtener una compresión del pulso²⁰.

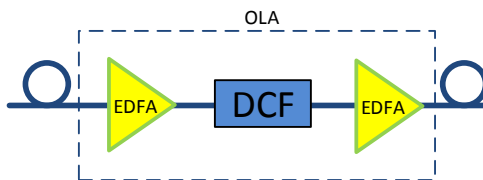
Sin embargo la técnica de mayor uso es el método pasivo. La compensación de dispersión cromática pasiva definida en la recomendación UIT-T G.691, puede ser usada en enlaces long-haul/multi-span. El compensador de dispersión cromática

²⁰ UIT-T G691, "Interfaces ópticas para los sistemas monocanal STM-64 y otros sistemas de la jerarquía digital síncrona con amplificadores ópticos", UIT 29 de marzo de 2006, pág 22.

(CDU), puede estar compuesto por fibras ópticas compensadas (DCF) o fibras escalonadas. Estos compensadores pueden ser usados con amplificadores de potencia y/o receptores ópticos con pre amplificadores, así como con amplificadores de línea en medio del enlace de fibra óptica.

Una solución práctica para un sistema con canales a 10Gbps, es insertar un módulo DCF (de 6-8 km de DCF) con amplificadores separados entre ellos alrededor de 80 km. La fibra DCF compensa la dispersión cromática, mientras que el amplificador reduce el efecto de la atenuación en la fibra. Este simple esquema sufre de dos problemas, la atenuación en la fibra DCF puede ser compensada incrementando la ganancia del amplificador, a expensas que se genere ruido por la emisión espontánea amplificada. El segundo problema es que debido al pequeño campo modal del diámetro de la fibra DCF, esta causa que se aumente los efectos no lineales.

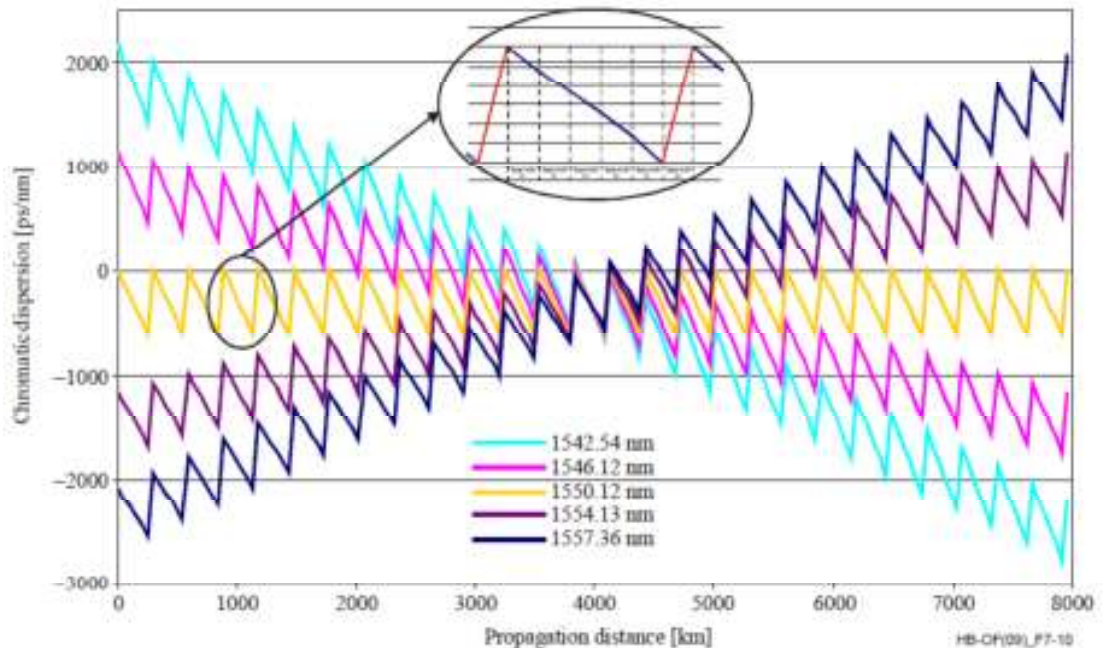
Estos dos problemas pueden ser solucionados insertando en la fibra DCF, dos etapas de amplificación una como preamplificador y otra como amplificador de potencia como se puede ver en la Figura 2-20.



Fuente: *Optical fibres cables and systems ITU-T Manual 2009* pág.174
Figura 2-20 Esquema de un compensador óptico pasivo para un amplificador de línea

Para poder dar una imagen del comportamiento de la dispersión cromática a lo largo de un enlace se usa un mapa de dispersión, el cuál es desarrollado dada una longitud de onda de operación en función de la distancia desde el transmisor hasta el receptor óptico.

En un sistema DWDM se puede compensar la dispersión cromática en una longitud de onda, pero típicamente no se puede compensar exactamente en otras longitudes del sistema, como se muestra en la Figura 2-21. La diferencia residual de la dispersión entre los canales puede ser minimizada a lo largo del sistema usando compensadores de dispersión, junto con compensadores de pendiente o equalizadores.



Fuente: *Optical fibres cables and systems ITU-T Manual 2009* pág.174
Figura 2-21 Ejemplo Mapa de dispersión cromática para un sistema WDM con 163 tramos y 40 longitudes de onda centradas en 1550.12nm.

El efecto de la dispersión cromática también puede variar dependiendo de la temperatura, lo que en un sistema de alta velocidad y de una gran distancia, puede ser compensado en parte por un compensador de dispersión pasivo y por otra parte por un compensador de dispersión cromático adaptativo.

Para una transmisión aceptable en sistemas DWDM de grandes distancias con un espaciado entre canales pequeño (100GHz), no solo es suficiente el limitar la dispersión de extremo a extremo, si no también se requiere que el coeficiente de dispersión de la fibra óptica tenga un mínimo valor, con el fin de reducir los efectos no lineales como son la mezcla de cuatro ondas (FWM) y la modulación de fase cruzada (XPM). Determinar el valor del coeficiente de dispersión de la fibra, se deben tener en cuenta muchos factores como son el espaciado de canal, nivel de potencia, distancia del enlace, etc.

En conclusión el diseño del mapa de dispersión para cada sección óptica debe ser en concordancia con los requerimientos de transmisión y principalmente se debe encontrar el balance entre la limitación de los efectos no lineales y el esparcimiento del pulso.

2.7. WDM en redes ópticas pasivas

Las redes WDM PON, han sido intensamente investigadas como una potencial tecnología para redes PON de nueva generación (NG-PON). Las redes PON usan múltiples longitudes de onda en un único hilo de fibra óptica, multiplicando así la capacidad del sistema sin incrementar la velocidad de datos. Diferentes propuestas han sido presentadas de las cuales la mayoría de estas, se han enfocado en la

arquitectura de la red, donde un router de longitud de onda pasivo es usado para reemplazar el splitter pasivo en la ODN. Como resultado de esto, cada OLT-ONU tiene asignada una longitud de onda permanente y requieren de un transmisor/receptor, para poder formar el enlace punto-punto.

El router de longitud de onda pasivo, se encuentra localizado en el nodo remoto y se compone de un AWG, o un conjunto de pequeños filtros de láminas (TFF). Un AWG puede operar sobre múltiples rangos de espectral libre, permitiendo el uso del mismo dispositivo tanto para transmisiones en upstream como de downstream. Como el AWG debe ser instalado en el exterior su funcionamiento no debe depender de la temperatura. Un AWG tiene una pérdida óptica de alrededor de 5 dB, lo que aproximadamente es 12dB menor que un splitter de potencia de 1 x 32.

Teniendo en cuenta el segundo AWG que se ubica en la CO, una red WDM-PON basada con una arquitectura usando AWG puede reducir el presupuesto de potencia de 28 dB a 21 dB, potencializando el uso de recursos WDM menos costosos.

Realizar una reforma en una red PON existente, a una red P2P WDM-PON, requiere el reemplazo de los splitters de potencia con routers AWG, sin embargo esta mejora no es particularmente deseable debido a que se puede incurrir en cortes de servicio y tiempos de inactividad, que pueden resultar perjudiciales para la parte económica del negocio. Una red PON centralizada (topología en estrella), puede ser mejorada de una manera más fácil a una red WDM-PON, mientras que para redes PON con topología árbol-rama, se vuelve impráctico poder realizar esta mejora. En cambio

en las ONUs/ONTs, se usan selectores de longitud de onda, junto con un filtro pasa banda de 1 dB y en la OLT se usa un AWG o un conjunto de TFF. Todos estos cambios son compensados por el hecho de que la velocidad de línea ahora puede ser reducida en un factor de cuatro, mientras que a cada usuario se le puede ofrecer velocidades ocho veces mayores, que las velocidades originales en PON.

Las múltiples longitudes de onda que se emplean en WDM-PON, pueden ser usadas para separar redes ópticas en varias redes PON virtuales, coexistiendo en la misma infraestructura física, o se puede decir que las distintas longitudes de onda se pueden usar estadísticamente, multiplexándolas para proveer un uso de longitudes de ondas más eficiente y obteniendo menos retardos en las ONUs/ONTs.

En una red WDM-PON, se usa una longitud de onda dedicada para cada ONUs/ONTs, con lo que se obtiene una mejor privacidad y una mejor escalabilidad, porque cada ONUs/ONTs recibe únicamente su longitud de onda correspondiente. Las redes WDM-PON son la siguiente generación en el desarrollo de las redes de accesos.

2.7.1. Arquitectura.

En principio, la arquitectura de las redes WDM-PON tiene una arquitectura similar de una red PON. Una representación de una red WDM-PON se muestra en la Figura

2-22.

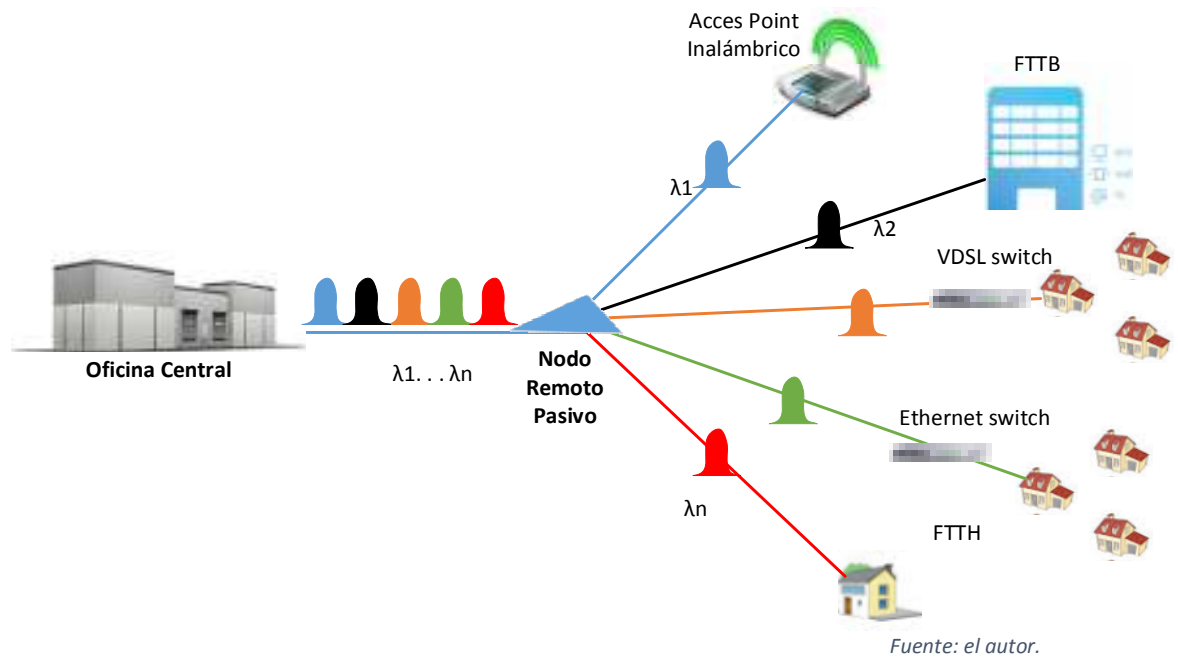


Figura 2-22 Red WDM-PON.

Una red WDM-PON provee escalabilidad ya que puede soportar múltiples longitudes de onda sobre la misma infraestructura de fibra óptica, y no sufre de pérdidas de potencia debido a la división de la señal. Diferentes longitudes de onda pueden operar a diferentes tasas de bits de ser necesario, además de soportar diferentes servicios sobre la misma red.

En la dirección del downstream en una WDM-PON, los canales de longitud de onda son ruteados desde la OLT hacia la ONU/ONT por el AWG pasivo, el cual se encuentra en el nodo remoto en donde antes se ubicaba el splitter usado en una TDM-PON convencional. El AWG, es un elemento óptico pasivo con la propiedad especial de periodicidad de ciclo natural, en donde diferentes espectros son

ruteados al mismo puerto de salida, lo que permite el reuso espacial de canales de longitud de onda.

WDM-PON, es una tecnología de acceso que tiene el potencial de alterar la infraestructura existente. WDM-PON, crea una base de longitudes de onda con una arquitectura punto-punto, sobre una topología física punto –multipunto de fibra óptica. El simple concepto de WDM-PON, es transportar datos desde los hogares, negocios y toda clase de servicios, sobre una única plataforma. Esta gran capacidad de alcance y escalabilidad en el ancho de banda hace que se pueda servir a muchos más suscriptores. WDM-PON hace uso de WDM-Multiplexores y WDM-Demultiplexores, lo que asegura que las señales de datos puedan ser divididas en varias salidas individuales que son conectadas a edificios u hogares. Una red WDM-PON tiene un alcance entre la OLT y la ONU/ONT de 100km.

2.7.2. Ventajas.

Una red WDM-PON tiene varias ventajas por diferentes razones:

- Como las tecnologías TDM-PON como BPON, EPON y GPON envían la misma señal a todos los suscriptores ONU/ONT en broadcast, se crea un riesgo de seguridad. WDM-PON evita este riesgo separando el uso longitudes de onda.
- WDM-PON es capaz de proveer escalabilidad y dedicar ancho de banda simétrico, que se vuelve la mayor ventaja en el mercado.
- Entregar diferentes tasas de bits y protocolos sobre la misma red óptica pasiva.

- Proveer una solución end to end con ONUs/ONTs colorless, se trasladan en un costo menor en el inventario.
- Entregar varios servicios por enlaces en longitudes de onda diferentes.
- Longitudes de onda punto-punto son fácilmente mejoradas sin interrumpir el servicio en otros usuarios.
- WDM-PON son la estrategia con mejor costo-efectivo, para inversión de futuro.

2.8. Conmutación Óptica

El término acuñado del inglés switch o conmutador, es un dispositivo usado para intercambiar señales desde ciertos puertos de entrada, a ciertos puertos de salida. Sin embargo, un switch puede ser un dispositivo simple con pocos componentes en su interior, o puede llegar a ser muy complejo con dispositivos como control de bloques, buffers con retardos de línea, filtros, convertidores de longitud de onda entre otros. Además un switch puede ser tanto un componente, como un nodo completo en una red²¹.

2.8.1. Arquitectura.

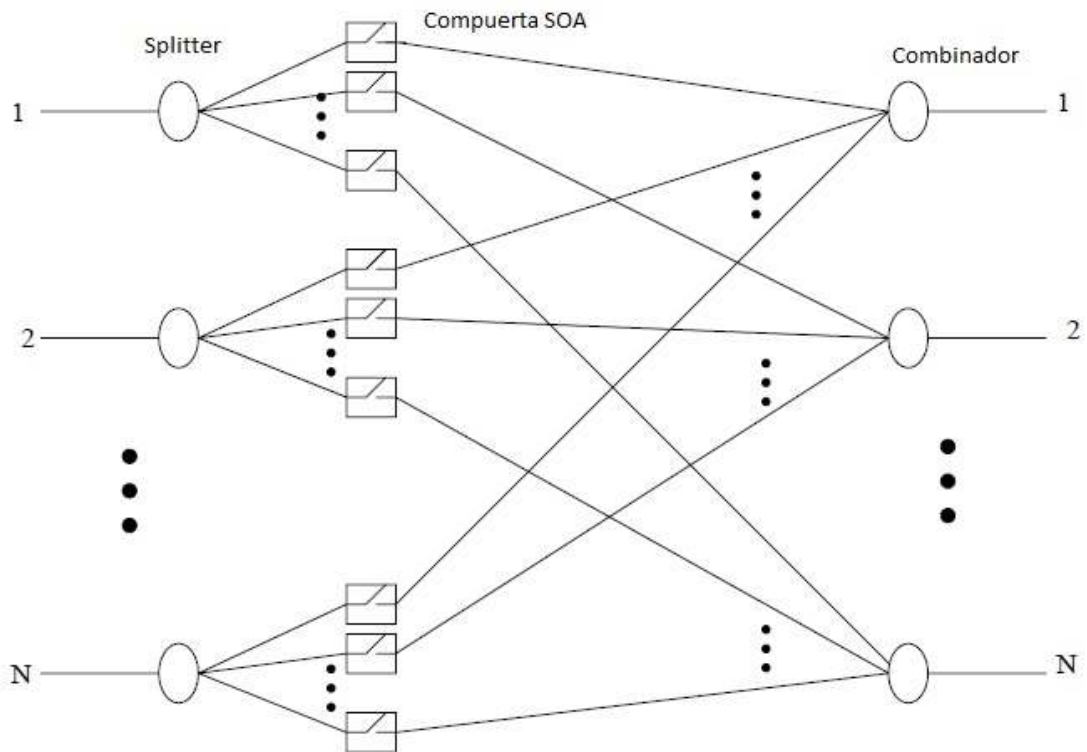
Se han definido dos tipos básicos de switch ópticos, como son el switch de espacio y el router de longitud de onda.

Un switch de espacio simplemente conmuta las señales desde cada puerto de entrada a cierto puerto de salida. Hay muchas maneras de implementar un switch

²¹ Elena Siren, "Optical Packet Switching", Helsinki University of Technology, department of Electrical and Communications Engineering Networking Laboratory, Espoo, Finland, March 26, 2002, PÁGINAS 26 a 29.

de espacio, pero el uso de tecnología con amplificadores SOA, parece ser la mejor alternativa (Figura 2-23).

Los SOA y compuertas SOA, son los componentes básicos en redes ópticas, además estos switch pueden ser usados como convertidores de longitud de onda.



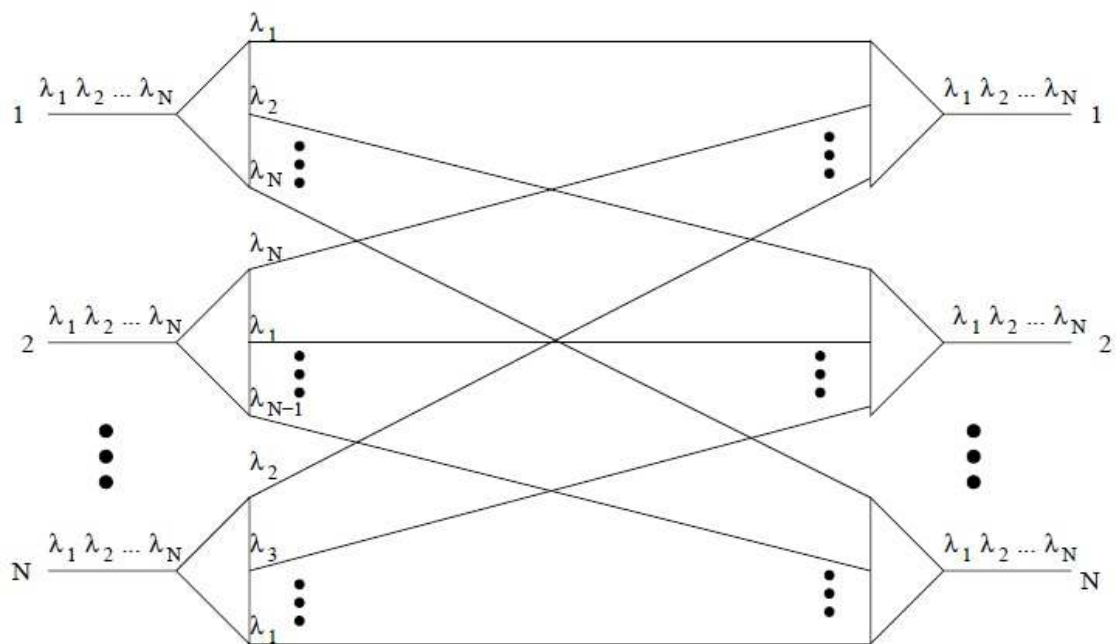
Fuente: Elena Síren, "Optical Packet Switching".

Figura 2-23 Switch basado en compuertas SOA.

El switch basado en compuertas SOA NxN mostrado en la Figura 2-23 consiste de N $1 \times N$ splitters, N^2 compuertas SOA y N $N \times 1$ combinadores. Cada entrada i es dividida en las N compuertas. Si la señal es conmutada a la salida j, la compuerta j está en estado *ON* y las otras compuertas están en estado *OFF*. Todas las compuertas con el mismo índice, están conectadas a un combinador el cual está conectado a su vez a su salida con el mismo índice. Si únicamente un paquete

puede ser procesado a la vez hacia una salida, entonces únicamente una sola compuerta permite el paso del paquete hacia dicha salida.

Un router de longitud de onda puede ser no reconfigurable o reconfigurable. El router de longitud de onda mostrado en la Figura 2-24 corresponde a un no configurable.



Fuente: Elena Síren, "Optical Packet Switching".

Figura 2-24 Router de longitud de onda.

Una señal desde la entrada i , con una longitud de onda j , está siempre direccionada hacia el mismo puerto de salida k . Un ejemplo de este tipo de router, es el AWG Multiplexor (AWGM). El AWGM consiste, en dos acopladores en estrella y un arreglo de AWG entre ellos. El acoplador en estrella divide las señales desde los puertos de entrada hacia todos los AWG, los cuales tienen diferentes longitudes. El retardo que la señal experimenta depende de la longitud de la guía de onda y de la longitud de onda de la señal. En el segundo acoplador en estrella, la diferencia de

fases causa que la señal sea reconstruida y re combinada únicamente a un único puerto de salida.

A pesar de que un router de longitud de onda no tiene las propiedades de un switch, es altamente usado en redes ópticas conmutadas por paquetes. La idea básica es que cada paquete es primero convertido a cierta longitud de onda y después redireccionando al AWGM. El AWGM selecciona el puerto de salida para cada paquete de acuerdo al puerto de entrada y la longitud de onda, entonces cada paquete es enviado a su puerto de salida predeterminado.

Un router de longitud de onda reconfigurable, es capaz de conmutar paquetes por sí mismo. Un router de longitud de onda no configurable, puede modificarse para volverse configurable añadiéndole a este switch de espacio entre los multiplexores y los demultiplexores que lo conforma. El principio de operación es el siguiente. Primero la señal de cada entrada es demultiplexada y cada señal con su longitud de onda i es guiada hacia el switch i . Los switches son capaces de conmutar la señal desde cualquier puerto de entrada hacia cualquier puerto de salida. Finalmente un multiplexor en el puerto de salida j , recibe las M señales con M longitudes de onda multiplexadas y las envía combinadas a su puerto de fibra j .

2.8.2. Clasificación

Los switches pueden ser clasificados como ópticos y electrónicos. Los switch electrónicos son dispositivos más naturales comparados con un switch óptico, y son a la vez más fáciles de implementar. En redes ópticas se tienen dos grandes

problemas, la conmutación electrónica es lenta comparada a la velocidad de propagación en la fibra óptica, la opto electrónica y la conversión de electrónico a óptico necesita de retardos aún mayores. Los switch ópticos con dispositivos en los cuales los datos se mantienen en su forma óptica, pero el control se realiza de manera electrónica.

Los switch también se pueden clasificar en relacionales y lógicos. La primera clase incluye elementos switching, cuyo contenido en canales no afecta a la conmutación. El otro tipo de elementos switching son los dispositivos lógicos. En los switches lógicos el contenido de canales, controlan la conmutación entre entradas y salidas.

Una clasificación más familiar son los switch por conmutación de circuitos y de paquetes. Los dispositivos relacionales son usados para la conmutación por circuito, y los lógicos son usados para la conmutación por paquetes. La conmutación por circuitos es más fácil de implementar, debido a que la velocidad de conmutación es más lenta que una conmutación por paquetes, pero por otro lado son ineficientes.

La tercera alternativa de clasificación es basada en la fidelidad del switch. La clasificación más ordinaria es sobre los switch espaciales, los cuales simplemente conmutan lo que contienen en la señal de entrada hacia una salida. Estos switch son incapaces de conmutar longitudes de onda, por lo que a veces también son llamados cross-connect ópticos.

En redes WDM se requieren de switch más precisos, sin embargo, switch espaciales son importantes componentes de switch más complejos dentro del sistema.

2.9. Long-Reach PON

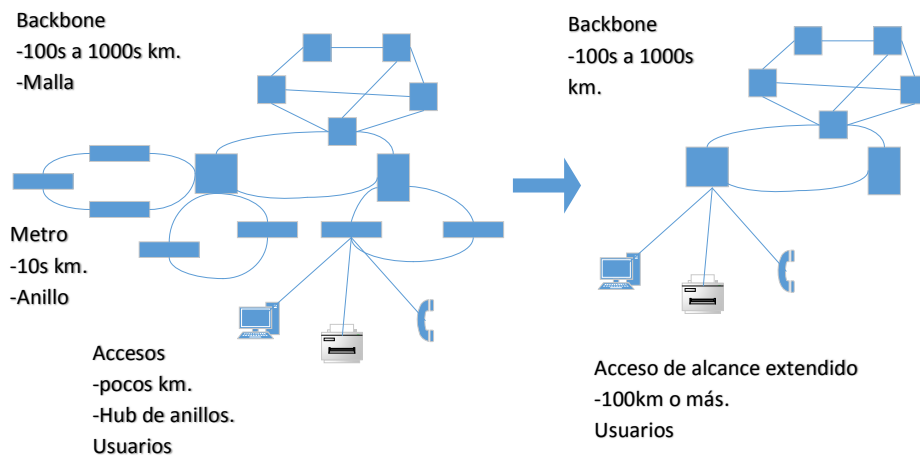
Long- Reach Passive Optical Networks, han sido propuestas como la mejor solución costo-efectiva para redes ópticas de acceso de banda ancha. LR-PON extiende la cobertura de una red PON tradicional desde un rango de 20km a 100kmm e inclusive aún más, explotando la tecnología de los amplificadores ópticos y WDM.

Una arquitectura general de LR-PON está compuesta de una extensión de la fibra óptica desde la CO, hasta el splitter óptico y el usuario que comparten dicha fibra. Comparando con PON, las LR-PON consolidan múltiples OLT y CO donde estas estén localizadas, reduciendo significativamente el correspondiente costo de Operación (Opex) de la red, debido a la extensión de su cobertura geográfica. También se pueden alcanzar ahorros debido al reemplazo de la tecnología de Jerarquía Digital Sincrónica (SDH), debido al uso de fibras ópticas compartidas. En general las LR-PON pueden simplificar la red, reduciendo el número de equipos e interfaces, elementos de la red, e inclusive nodos.

A pesar de que la idea de extender el alcance de una red PON has surcado desde ya hace algún tiempo, es recientemente que se ha desarrollado su penetración en redes de acceso ópticas debido a la gran demanda de mayor ancho de banda y servicios en hogares residenciales y PYMES, lo que ha causado que se produzca una combinación entre redes metropolitanas y redes de acceso. La Figura 2-25, muestra como las LR-PON simplifican una red de telecomunicaciones.

Una red de telecomunicaciones convencional consiste en redes de acceso, redes metropolitanas y en el backbone de la red también llamado núcleo de la red. Sin

embargo, con el desarrollo de tecnologías para extender el alcance de las redes, las redes metropolitanas están siendo absorbidas por las redes de acceso. Como resultado la jerarquía de una red de telecomunicaciones puede ser simplificada con el acceso de cabecera es decir la CO cerca del backbone de la red. Así el costo de capital y el costo de operación pueden ser significativamente reducidos, debido a que se deben administrar menores unidades de control. Nótese que el termino LR-PON no es totalmente correcto ya que no todos los componentes en la red son pasivos, pero este término ha sido usado ampliamente en la literatura relacionada²².



Fuente: el autor.

Figura 2-25 LR-PON simplifica las redes de telecomunicaciones.

²² Byrav Ramamurthy, George Rouskas y Krishna M. Sivalingam, "Next-Generation Internet Architectures and Protocols", Cambridge UniBERSity Press 2011, pág 30 a 31.

3. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LR-PON

3.1. Configuración de la simulación del sistema LR-PON.

Con el objetivo de analizar el comportamiento de un sistema LR-PON, se han configurado los siguientes parámetros:

El transmisor consiste en una fuente de datos (bits) de 2.5, 5 y 10 Gbps, modulación NRZ y un generador de bits pseudorandómico (PSRB). El receptor consiste en un diodo PIN, analizador de BER y factor Q, filtro Bessel, un generador 3R y por último la sección del Extensor de Rango que está compuesto por un amplificador óptico y un compensador de dispersión cromática. El diagrama completo de la simulación del sistema de comunicación se muestra en la Figura 3-1 y el diagrama de bloques se muestra en la Figura 3-2. El sistema WDM-PON usa en su transmisor un láser semiconductor a una longitud de onda de 1550nm. El receptor óptico convierte la señal óptica en una señal eléctrica nuevamente y mientras que el Nodo Remoto es el encargado de compensar la dispersión cromática y amplificar la señal hacia el ONU.

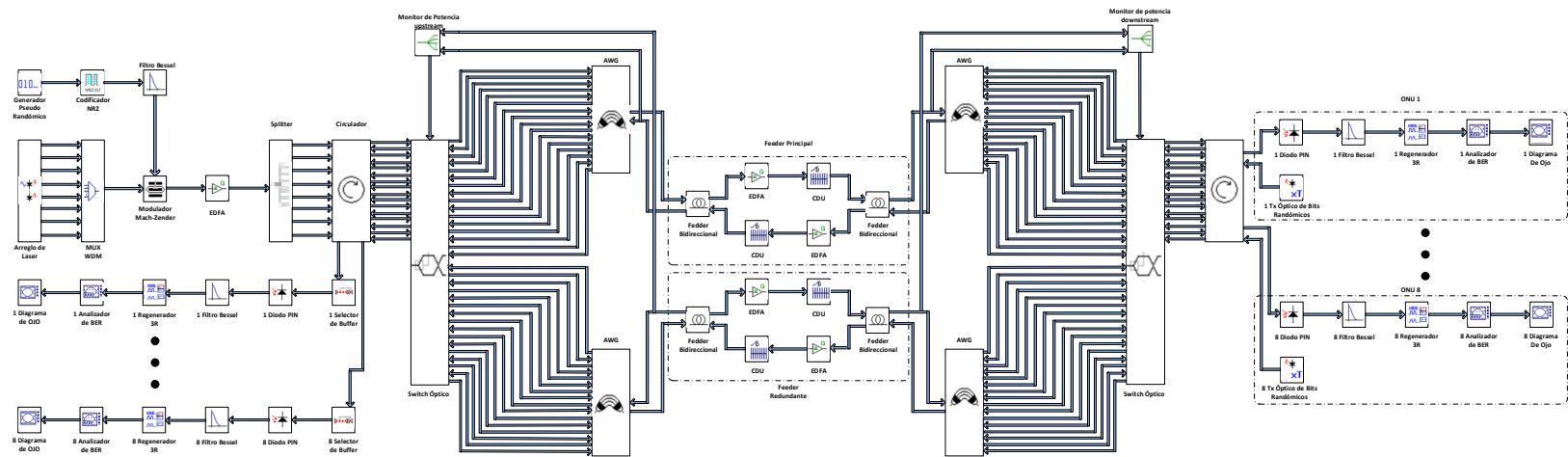
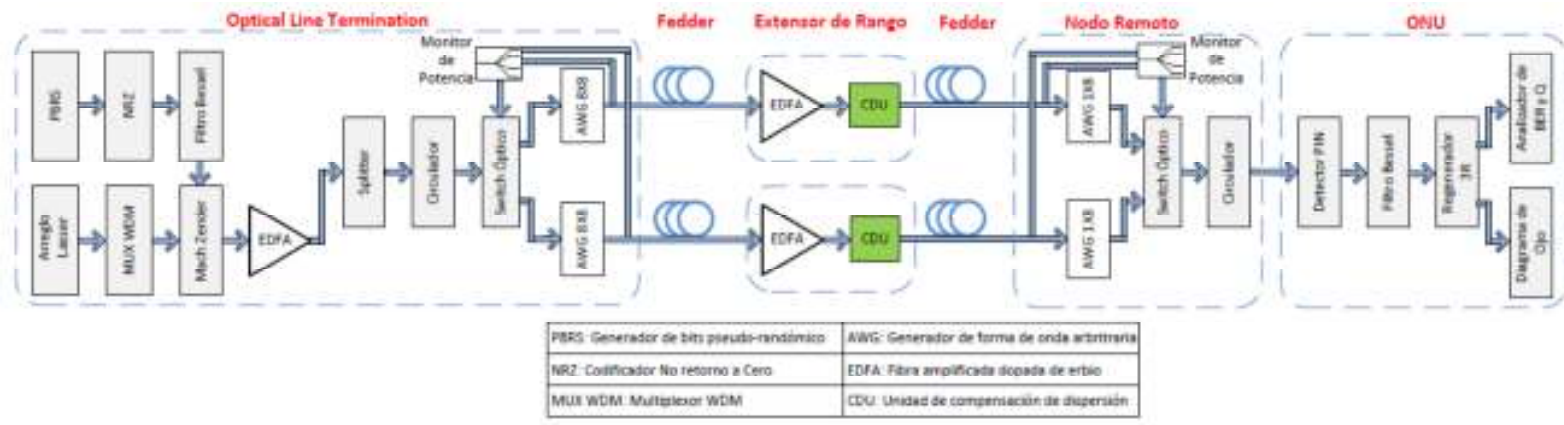


Figura 3-1 Simulación sistema LR-PON.

Fuente: el autor.



Fuente: el autor.

Figura 3-2 Diagrama de bloques sistema LR-PON.

El modelo del sistema LR-PON mostrado en la Figura 3-1, tiene una fuente laser externa CW con un ancho de línea de 10 MHz. En la primera fase de la OLT se ha considerado un generador pseudorandómico de secuencias de bit (PBRs), con una tasa de bit variable de 2.5, 5 y 10 Gbps, el cual en cada secuencia de bit se usa una diferente semilla para asegurar que haya una trama de bits distinta, en cada canal del sistema WDM.

La segunda fase tiene un codificador/modulador, el cual se ha configurado tanto como NRZ y RZ con diferentes ciclos de trabajo, esto para evaluar el comportamiento del sistema.

Para convertir la señal eléctrica en óptica, se ha configurado un arreglo de ocho láser con una longitud de onda de 1550nm y una separación de canal de 50 GHz, que junto con un multiplexor WDM a un ancho de banda de 10GHz y un modulador Mach-Zender, conforman la tercera etapa en el transmisor.

En la cuarta etapa del transmisor se tiene un amplificador EDFA con una ganancia de 15 dB y una figura de ruido de 6 dB.

Seguido del amplificador se tiene un splitter y un circulador, este último sirve para recibir las señales de upstream desde las ONU posteriormente configuradas.

Para asegurar que exista redundancia en el enlace, en la quinta fase del transmisor, se han considerado dos feeder conectados entre la OLT y la ONT, pero para seleccionar que feeder es el que se encuentra en funcionamiento, se ha colocado una sexta etapa compuesta de switch ópticos, que gracias a un monitoreo de la

potencia óptica, se selecciona que feeder es el que está en funcionamiento en caso de falla de cualquiera de ellos.

Para simular la falla del enlace se ha considerado, de la misma manera, un selector que permite falsear un supuesto daño en cualquiera de los dos feeder.

Debido a que se debe asegurar la redundancia en el enlace, también se ha considerado AWG 8x8 conectado a cada feeder con una longitud de onda 1550 nm y un ancho de banda de 10 GHz, los mismos que comprenden la etapa 7 del transmisor.

En la etapa del feeder, se ha considerado un amplificador con ganancia de 3dB y una unidad que compensa la dispersión cromática (UDC) en el primer tramo (50Km), y a continuación se ha colocado un nuevo feeder que variará entre diferentes distancias para realizar el análisis del desempeño de la red LR-PON. Tanto el feeder, amplificador y la unidad de dispersión cromática, son considerados para el feeder principal y redundante, como así también en downstream como en upstream.

De la misma manera que la salida del transmisor en su última etapa, en el nodo remoto, se ha considerado un AWG de 1x8 conectado a cada feeder, el cual permite que las señales de upstream sean enviadas hacia el transmisor.

De igual manera que en el transmisor, en el nodo remoto, se tienen switch ópticos que permiten seleccionar el feeder que funcionará para la simulación. Para separar las señales de downstream y de upstream se coloca un circulador que conectado a un diodo receptor tipo PIN, se convierte la señal óptica a eléctrica.

Para determinar el desempeño del sistema, se ha colocado un generador 3R, para que junto con un Analizador de BER, factor Q y diagrama de Ojo, en conjunto, permitirán obtener los datos para ser posteriormente analizados.

En el sentido del upstream, es decir desde la ONU hacia la ONT, en la primera fase, se tiene un transmisor óptico configurado de manera que se generen bits pseudorandómicos en cada uno de las ocho ONU considerados en la simulación. La señal en upstream, recorre los mismos elementos hacia la OLT que la señal de downstream, en donde, el circulador separa la señal de upstream y con un diodo PIN se recupera la señal óptica a eléctrica nuevamente, para que junto con un generador 3R, un analizador de BER, factor Q y diagrama de Ojo, se obtienen los datos para determinar el desempeño de la señal.

En la tabla 3-1, se muestra un listado de algunos de los parámetros configurados en la simulación de la red LR-PON.

Tabla 3-1 Lista de parámetros usados para el sistema LR-PON

N°	Parámetro	Valor	N°	Parámetro	Valor
1	Frec. 1er. canal	1550 nm	8	Responsividad	0.7 A/W
2	Frec. De espaciamiento	50 GHz	9	Corrientes oscuras	10nA
3	Potencia/ganancia OLT	5dBm/15dB	10	Ruido termal	79.99×10^{-24} W/Hz
4	Radio de extinción	20dB	11	Dispersión	1675 ps/nm /km
5	Ancho de línea	10 MHz	12	Solapamiento de dispersión	$0.075 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$
6	Potencia ONU	5dBm	13	Ganancia RE	3dB
7	Pérdida de retorno	60 dB	14	UDC	-837.5

En las siguientes secciones, se detallará las configuraciones de cada uno de los elementos que se ha considerado en la simulación del sistema LR-PON redundante.

3.1.1. DISEÑO DE LA OLT

En la OLT se ha considerado el diseño de 8 canales, tanto en el downstream como en el upstream. En el downstream, se emplea para la generación de la señal eléctrica un módulo generador de bits pseudorandómico, que para garantizar que la generación de datos, no sean repetitivos en cada canal se ha habilitado la opción de “Generar semillas randómicas”, además para que no se generen bits 0 de manera consecutiva, se ha empleado la siguiente fórmula: $(\text{Time window} * 3 / 100) * \text{Bit rate}$. Tanto los parámetros de Time Window como Bit Rate, son valores globales que afectan a todo el entorno de la simulación, pero el único parámetro que es modificado para realizar el análisis de los diferentes casos de la red LR-PON en la OLT es Bit Rate (2.5, 5 y 10 Gbps).

Para codificar los bits generados se emplea tanto un modulador NRZ (Sin retorno a cero) y RZ (Con retorno a 0), que para cada uno de ellos, se ha configurado que el tiempo de subida y de bajada de un bit, se aplique la siguiente fórmula: $1 / (\text{Bit rate}) * 0.05$, es decir, estos tiempos corresponden al 5% de la tasa de bit configurada en la simulación. Se han considerado dos codificadores en la simulación, pero no funcionan simultáneamente ya que cada uno es empleado en el análisis de los diferentes casos del desempeño del sistema LR-PON.

Con la señal codificada sea con RZ o NRZ, a continuación se considera un Filtro-Bessel pasa bajos el cual aplica la siguiente fórmula: $0.75 * \text{Bit rate}$, es decir, la frecuencia de corte del filtro aplica al 25% de la frecuencia codificada.

Paralelamente a la generación de la señal eléctrica, se utiliza un arreglo de laser de ocho salidas para formar los ocho canales que tendrá el sistema, con una potencia de 5dBm, cuyo canal superior es de 1550nm y con una frecuencia de espaciamiento de 50GHz hacia abajo, produciendo que el canal inferior llega hasta los 1547.2 nm de longitud de onda.

Cada laser tiene un ancho de línea espectral de 10 MHz.

Para combinar los 8 canales generados, se usa un multiplexor WDM, que de la misma manera que el arreglo de láser, mantiene la frecuencia superior de 1550 nm y un espaciamiento de 50GHz.

Tanto con la señal eléctrica en bits codificados y los arreglos de láser multiplexados generados, en conjunto, ingresan a un modulador Mach-Zender, el cual los bits generados o los datos generados, por decirlo de otra manera, ya han sido convertidos en señales ópticas.

Con la señal de datos de los 8 canales ópticos generados, se prepara la señal para ser transmitida al feeder a través de un amplificador óptico EDFA, que se ha configurado con una ganancia de 15dB y una figura de ruido de 6 dB. Con la ganancia antes indicada y a la distancia máxima del enlace que es de 100km, se

tiene una atenuación de -25.11 dB con lo que respecto a la norma ITUT- G 984²³ para sistemas GPON se está dentro del máximo permitido.

Para el upstream, de la misma manera, se ha considerado 8 canales generados desde la ONU que cada uno de estos canales en la OLT están compuestos por un fotodetector PIN con una responsividad de 0.7 A/W y un ruido térmico de 79.89×10^{-24} W/Hz. A continuación del fotodetector, para eliminar ciertas frecuencias de ruido, se utiliza un filtro Bessel pasa bajos con una frecuencia de corte de $0.75 \times \text{Bit rate}$ y para poder analizar los bits enviados desde la ONU hacia la ONT, se utiliza un regenerador conectado a un analizador BER obteniendo así los valores de factor Q y BER a ser analizados desde el numeral 4.2.

Tanto para combinar y separar las señales de downstream y las de upstream respectivamente, se utiliza un circulador óptico.

Para que el sistema cumpla con la redundancia, es decir que exista un feeder adicional entre la OLT y la ONU, se ha escogido switch ópticos conectados cada uno a un AWG de 8x8 proveniente desde cada feeder. Cada AWG tiene como longitud de onda 1550nm y un espaciamiento de 50GHz, para poder procesar tanto las señales ópticas de downstream como de upstream.

Para que el sistema conmute entre uno u otro feeder, se han diseñado monitores de potencia que evalúan cuál de estos tienen la mayor potencia óptica, así se habilita el uno u otro AWG. Se han considerado monitores de potencia tanto en la OLT como en el Nodo Remoto, para habilitar los AWG respectivamente.

²³ En G-PON class B+ la máxima atenuación permitida es de 28dB. D. Hood y E, Trojer, "GIGABIT-CAPABLE PASSIVE OPTICAL NETWORKS" A JHON WILEY &SONS, pág. 23, 2012.

Todos los elementos considerados para el diseño de la OLT, se muestran en la Figura 3-3.

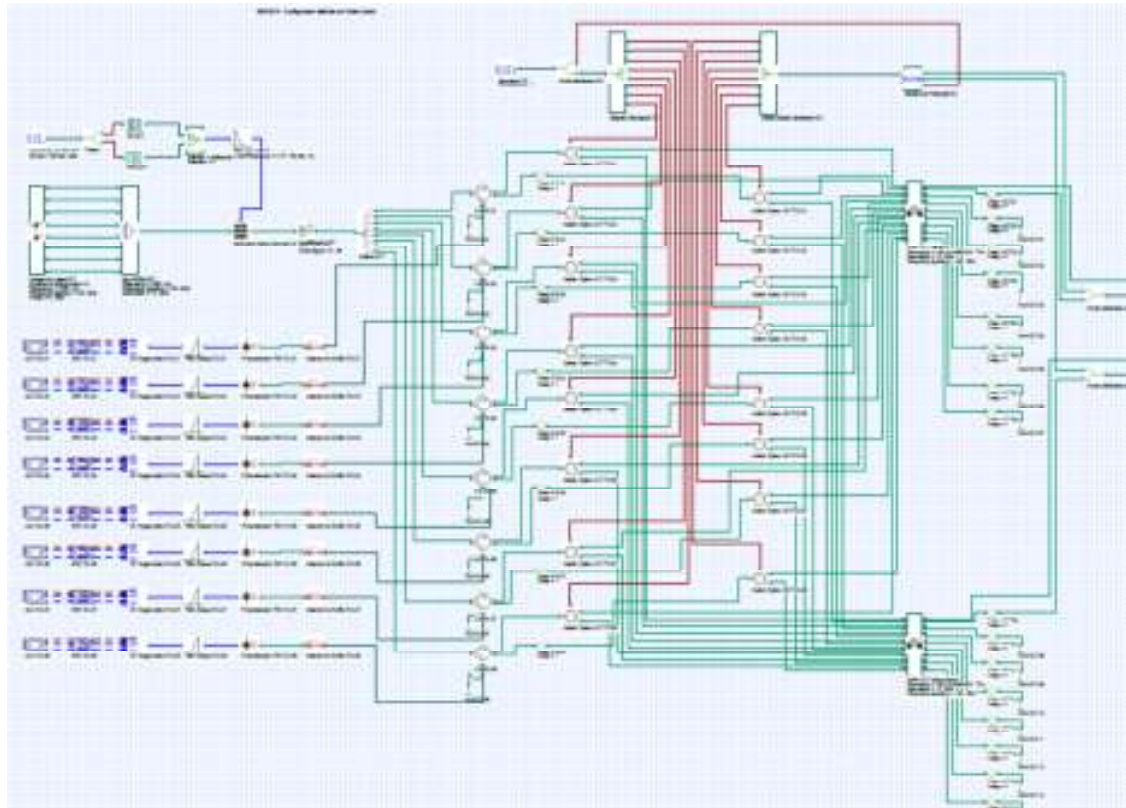


Figura 3-3 Elementos de la OLT.

Fuente: Optisystem V 12.2

3.1.2. DISEÑO DEL FEEDER

Una vez que en la OLT se han considerado switch ópticos, que permiten seleccionar el feeder a ser utilizado, es decir que exista redundancia en el enlace, el sistema LR-PON diseñado cuenta con dos feeder, los cuales se han dividido en dos tramos. Como el objetivo de la red LR-PON es tener un alcance entre la OLT y el ONU de entre 90 km y 100 km, el primer tramo que se ha considerado es de 50km y el segundo tramo es de máximo 50 km.

Estos tramos son separados por un Extensor de Alcance (RE) que es detallado en el siguiente numeral.

Las fibras normalizadas monomodo por la UIT se presentan en la Tabla 3-2^{24, 25, 26}:

Tabla 3-2 Parámetros ITU para fibra monomodo. (Datos tomados del mejor tipo de cada norma).

Atributo	ITU-T G.652.D		ITU-T G.655.E		ITU-T G.657.B	
	Detalle	Valor	Detalle	Valor	Detalle	Valor
Diámetro del campo modal	Longitud de onda	1310 nm	Longitud de onda	1500 nm	Longitud de onda	1310 nm
	Rango de valores nominales	8.6-9.5 μm	Rango de valores nominales	8-11 μm	Rango de valores nominales	8.6-9.5 μm
	Tolerancia	±0.6 μm	Tolerancia	±0.6 μm	Tolerancia	±0.4 μm
Diámetro del revestimiento	Nominal	125.0 μm	Nominal	125.0 μm	Nominal	125.0 μm
	Tolerancia	±1 μm	Tolerancia	±1 μm	Tolerancia	±0.7 μm
Error de concentricidad del núcleo	Máxima	0.6 μm	Máxima	0.6 μm	Máxima	0.5 μm
No circularidad del revestimiento	Máxima	1.00%	Máxima	1.00%	Máxima	1.00%
Longitud de onda de corte del cable	Máxima	1260 nm	Máxima	1450 nm	Máxima	1260 nm
Pérdida al micro dobles	Radio	30 mm	Radio	30 mm	Radio	10 mm
	Número de vueltas	100	Número de vueltas	100	Número de vueltas	1
	Máximo a 1625 nm	0.1 dB	Máximo a 1625 nm	0.1 dB	Máximo a 1625 nm	0.1 dB
Prueba de estrés	Mínimo	0.69 GPa	Mínimo	0.69 GPa	Mínimo	0.69 GPa
Coefficiente de dispersión cromática	D1550	17 ps/nm × km	Dmin(λ): 1460-1550 nm ps/nm × km	$\frac{5.42}{90}(\lambda - 1460)$		

²⁴ UIT-T G652, "Características de la fibra óptica y cable monomodo", UIT 3 de marzo de 2003., pág. 10.

²⁵ UIT-T G655, "Características de la dispersión desplazada no nula en fibra óptica y cable monomodo", UIT noviembre de 2009., pág. 9-10.

²⁶ UIT-T G657, "Características de la fibra óptica y cable monomodo insensible a pérdidas por deflexión en redes de acceso", UIT 29 de octubre de 2012., pág. 8-9, 2012.

			$D_{min}(\lambda): \frac{3.30}{75}(\lambda - 1550)$ 1550-1625 nm ps/nm × km			
			$D_{max}(\lambda): \frac{4.65}{90}(\lambda - 1460)$ 1460-1550 nm			
			$D_{max}(\lambda): \frac{4.12}{75}(\lambda - 1550)$ 1550-1625 nm			
	<i>S1550</i>	0.092 ps/nm ² × km			<i>S0max</i>	0.11 ps/nm ² × km
Atributos del Cable						
Atributo	Detalle	Valor	Detalle	Valor	Detalle	Valor
Coeficiente de atenuación	Máximo desde 1310 nm a 1625 nm	0.4 dB/km	Máximo a 1625 nm	0.4 dB/km	Máximo a 1625 nm	0.4 dB/km
	Máximo a 1383 nm ±3 nm	0.4 dB/km				
	Máximo a 1550 nm	0.3 dB/km	Máximo a 1550 nm	0.35 dB/km	Máximo a 1550 nm	0.35 dB/km
Coeficiente de PMD	M	20 cables	M	20 cables	M	20 cables
	Q	0.01%	Q	0.01%	Q	0.01%
	Máximo PMDQ	0.20 ps/ km	Máximo PMDQ	0.20 ps/ km	Máximo PMDQ	0.20 ps/ km

La fibra ITU G-657 debido a sus atributos de baja atenuación, es usada comúnmente como cable en acometida hacia el lugar del cliente.

La ITU G-652 y la ITU G-655 se diferencian porque la primera es la monomodo estándar (SSMF) y la segunda es fibra de dispersión desplazada no nula (NZDSF). La primera tiene una dispersión cromática de alrededor de 17 ps/(nm*km) mientras que la segunda tiene una dispersión menor (desplazada hacia cero pero no nula) típicamente de alrededor de 4 ps/(nm*km).

Se ha decidido emplear la G652D porque se ha querido compatibilizar el estudio con la fibra óptica que más se encuentra instalada actualmente en el mundo y además que sus características más dispersivas hacen que el considerar este tipo de fibra, constituya un caso más crítico a tener en cuenta que la ITU G-655. Esta tendencia se corrobora sobre la base que todos los artículos científicos que se han empleado como referencia para el presente trabajo de tesis.

Los parámetros más relevantes a ser tomados en cuenta son (ITU G-652D): que la atenuación por kilómetros considerada es de 0.3 dB/km, una dispersión cromática de 17 ps/nm/km, un retardo de grupo de 0.2 ps/km y se han habilitado los efectos de las no linealidades como Self phase y Cross-phase con el fin de obtener valores mucho más reales.

La distancia del segundo tramo varía entre las distancias de 10, 20, 30, 40 y 50 km, para realizar el análisis del desempeño del sistema LR-PON a diferentes distancias.

En la Figura 3-4 se observa el diseño del feeder en cada uno de sus tramos.



Fuente: Optisystem V 12.2

Figura 3-4 Elementos del feeder.

3.1.3. DISEÑO DEL EXTENSOR DE ALCANCE

Entre los dos tramos de feeder, se encuentra el Extensor de alcance es decir a 50km de la OLT. Debido a esta distancia, lo que primero se ha realizado para recuperar la señal es usar un amplificador de 3dB de ganancia, para duplicar la potencia que se está recibiendo desde la OLT a los 50 km.

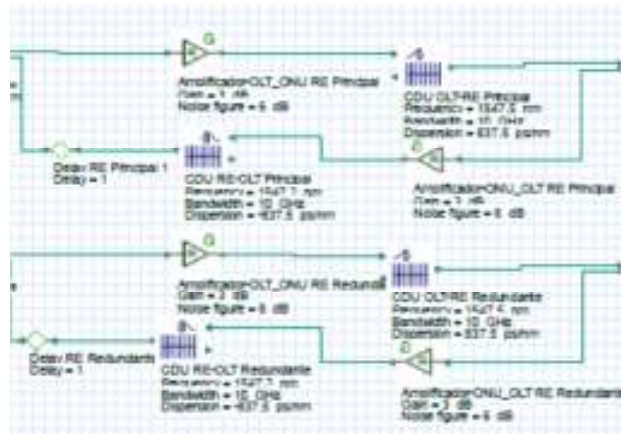
Como a la distancia de 50km la dispersión que sufre la señal que atraviesa el feeder se vuelve un factor relevante, se ha considerado agregar un compensador de dispersión cromática de un valor de $-837.5 \text{ ps}/\eta\text{m}$, el cual fue calculado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}UDC &= \text{Dispersión} * \text{Longitud} \\UDC &= 16.75 \frac{\frac{\text{ps}}{\eta\text{m}}}{\text{km}} * 50 \text{ km} \\UDC &= 837.5 \text{ ps}/\eta\text{m}\end{aligned}$$

Debido que se requiere compensar la dispersión de la señal óptica, el valor a ser colocado en el compensador de dispersión cromática es:

$$UDC = -837.5 \text{ ps}/\eta\text{m}$$

El diseño del Extensor de Alcance se muestra en la Figura 3-5.

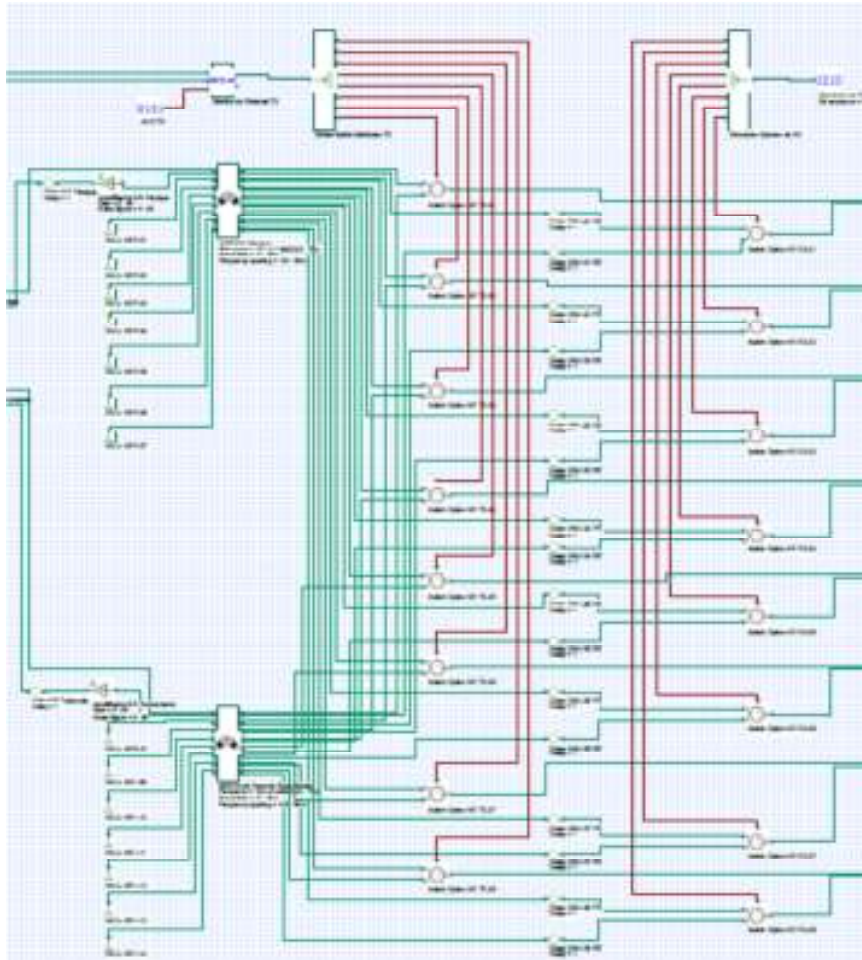


Fuente: Optisystem V 12.2

Figura 3-5 Elementos Extensor de Alcance.

3.1.4. DISEÑO DEL NODO REMOTO

En el nodo remoto, se ha considerado para cada feeder un AWG de 1x8, que sirve para tomar las 8 señales generadas desde las ONU hacia la OLT y las señales de downstream para cada ONU.



Fuente: Optisystem V 12.2

Figura 3-6 Elementos del Nodo Remoto

Estos AWG tienen la misma configuración que los AWG que se encuentran en la OLT, es decir una longitud de onda de 1550nm y frecuencia de espaciamiento de 50Ghz. Y de la misma manera que en la OLT, se deben colocar switch ópticos que permiten que las señales ópticas circulen por uno y otro feeder.

Los elementos del Nodo Remoto se muestran en la Figura 3.6.

3.1.5. DISEÑO DEL SWITCH ÓPTICO

Para que tanto el feeder principal como el redundante entren en funcionamiento de manera alternada, dependiendo de que si existe un fallo en uno u otro camino, se ha diseñado una conmutación óptica que en base a la evaluación del mayor nivel de potencia de la señal que se encuentra en cada feeder y se selecciona que camino de la señal entra en funcionamiento.

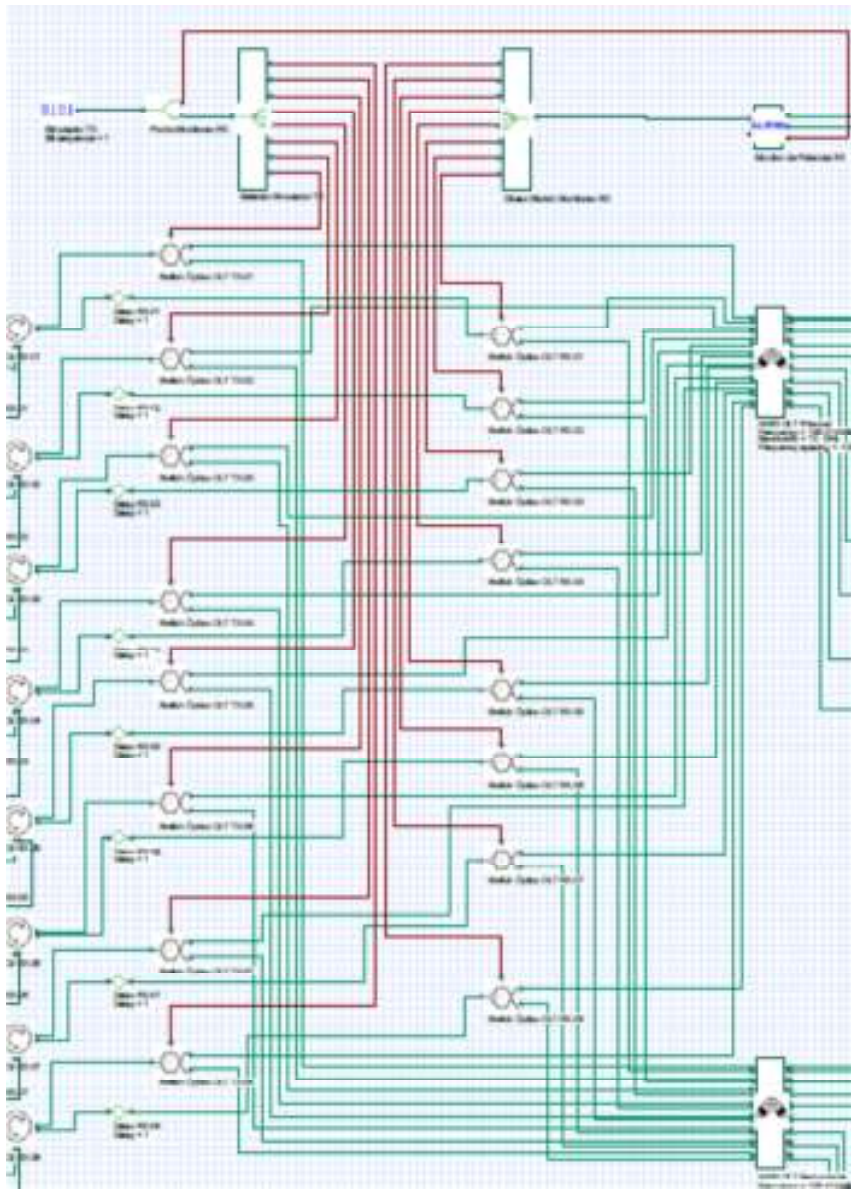
Este elemento llamado Monitor de Potencia, tanto en el downstream como en el upstream, se conectan directamente, justo a la llegada de las señale a los AWG en el Nodo Remoto y en la OLT respectivamente, con lo que se garantiza que en cada sentido, se evalúe la señal una vez que han recorrido cualquiera de los dos feeder.

El Monitor de Potencia es un elemento programado en Matlab que puede trabajar en un cosimulación con Optisystem mientras dicha simulación está en ejecución. La programación determina cuál es la mayor potencia que se encuentra en cada feeder en cualquier longitud de onda y finalmente compara entre estas dos potencias determinando cuál es la mayor, dando como resultado un uno o un cero lógicos, señal que es conectada hacia los switch ópticos para escoger el feeder con mayor potencia, tanto en la OLT como en el Nodo Remoto, respectivamente.

Para simular que uno de los feeder se encuentra en funcionamiento, se han considerado switch ópticos adicionales tanto en la OLT como en el Nodo Remoto, los que nos permiten que tanto en downstream la señal se recorra un camino

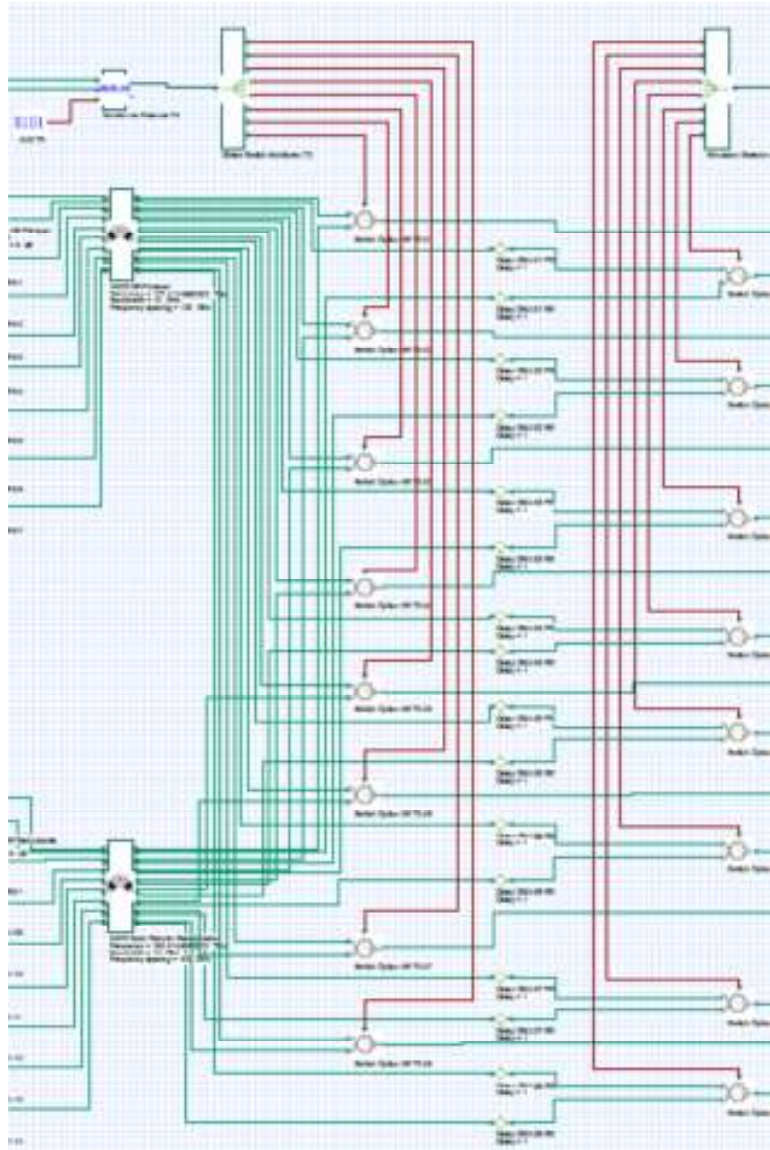
mientras que en el upstream, si se desea, la señal recorra un camino en un feeder diferente.

La conexión de los Monitores de Potencia y los simuladores se muestran en la Figura 3-7 y 3-8, tanto para la OLT como el Nodo Remoto.



Fuente: Optisystem V 12.2

Figura 3-7 Switch óptico y Simulador en la OLT.



Fuente: Optisystem V 12.2

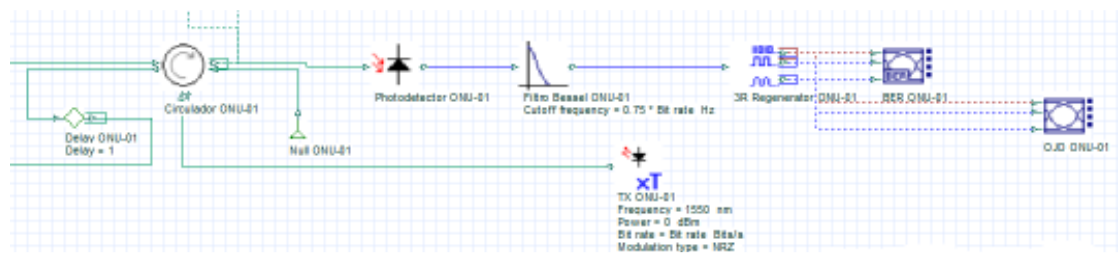
Figura 3-8 Switch óptico y Simulador en el Nodo Remoto.

3.1.6. DISEÑO DE LA ONU

Una vez que las señales del downstream han llegado hacia las ONU, es necesario el uso de un circulador óptico para poder juntar tanto las señales de upstream generadas por cada ONU como las señales generadas desde la OLT.

Para las señales de downstream, se emplea un foto detector PIN, que de la misma manera que en la OLT, se ha configurado con una responsividad de 0.7 A/W y un ruido térmico de 79.89×10^{-24} W/Hz. A continuación del fotodetector, para eliminar ciertas frecuencias de ruido, se utiliza un filtro Bessel pasa bajos con una frecuencia de corte de $0.75 * \text{Bit rate}$ y para poder analizar los bits enviados desde la ONU hacia la ONT, se utiliza un regenerador 3R conectado a una analizador BER y factor Q. Para la generación de la señal de upstream, se usa un transmisor óptico en el que tiene embebido en su configuración un generador pseudorandómico de bits, con las mismas características del usado en la OLT y un codificador que se puede configurar tanto con NRZ o RZ, mismos que son variados para evaluar el desempeño de las señales de upstream.

Los elementos considerados en cada ONU se muestran en la Figura 3-9.



Fuente: Optisystem V 12.2

Figura 3-9 Elementos de cada ONU.

3.2. ANALISIS DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA LR-PON

Para realizar un análisis completo del desempeño del sistema LR-PON, la simulación ha sido creada con la capacidad de poder variar los datos de codificación, distancia y redundancia, lo que produce que se generen distintos caso de estudio a ser analizados en los siguientes numerales.

3.2.1. CASO I: IMPACTO DEL USO DE UN COMPENSADOR DE DISPERSION CROMÁTICA A 2.5Gbps/s CON MODULACIÓN NRZ.

Para enlaces de distancia superiores a 50 km, se debe tener en cuenta la dispersión cromática que puede afectar el valor del BER al final del enlace. El BER muestra cuántos de los bits recibidos están con error, por lo que para la simulación se ha configurado los siguientes parámetros: longitud de onda de transmisión 1550nm y 1547.2 nm, modulación NRZ, espaciamiento de frecuencias de 50 GHz y un radio de extinción de 20 dB.

El resultado de la simulación del sistema LR-PON para señales de downstream variando la distancia, a una velocidad de 2.5Gbps para las longitudes de onda de 1550 nm y 1547,2 nm se muestra en las Tablas 3-4 y 3.4.

Tabla 3-3 BER para NRZ sin UDC a 2.5Gbps.

N°	Longitud	BER para NRZ		Q Factor para NRZ	
		1550	1547.2	1550	1547.2
1	70	3.55E-102	4.26E-79	20.4573	18.7904
2	80	3.65E-36	1.41E-33	11.393	11.0177
3	90	8.35E-10	4.32E-10	5.73197	6.75706
4	100	3.12E-05	2.33E-03	3.39218	2.8293

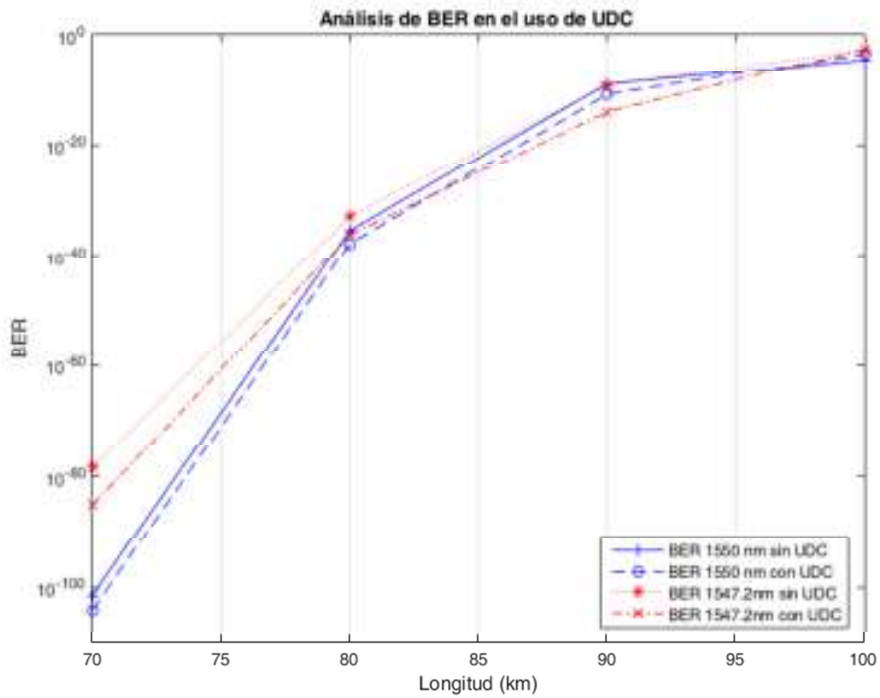
Tabla 3-4 BER para NRZ con UDC a 2.5 Gbps.

N°	Longitud	BER para NRZ		Q Factor para NRZ	
		1550	1547.2	1550	1547.2
1	70	8.14E-105	7.65E-86	21.7085	19.598
2	80	1.73E-38	5.88E-37	12.92	12.645
3	90	1.18E-11	8.92E-15	6.68154	7.66533
4	100	3.29E-04	2.63E-03	3.40588	2.79055

Como se puede observar en las Figura 3-10 y 3-11, el uso de un compensador de dispersión aumenta notablemente tanto el factor Q como el BER. Se observa que

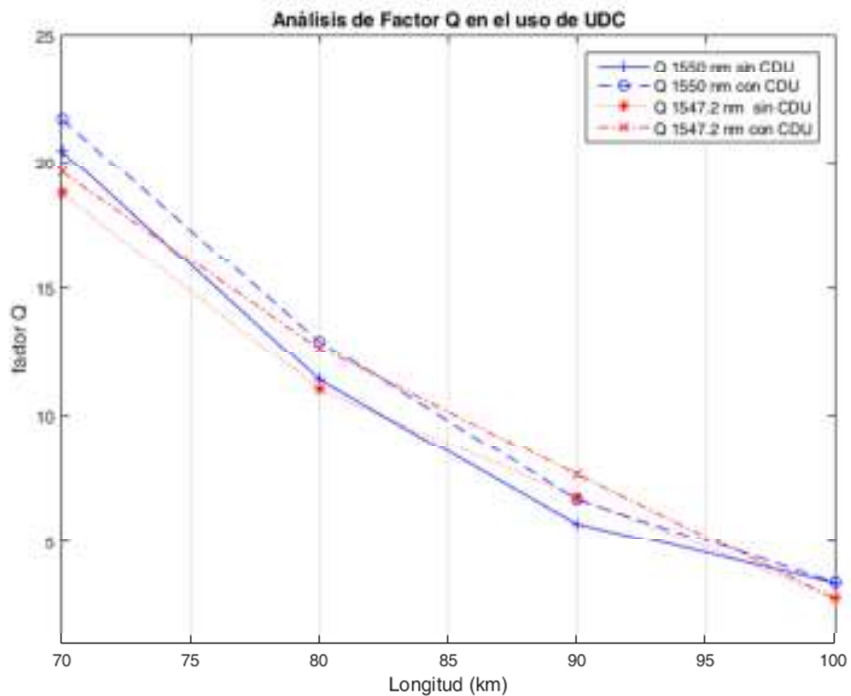
existe una mejora en promedio del 7% en el BER y un 10% en factor Q, lo que indica que el uso de un compensador de dispersión mejora el desempeño del sistema.

Como se observa en la Figura 3-12, la amplitud del diagrama de ojo con el sistema utilizando el compensador de dispersión, es máxima a 70 km.



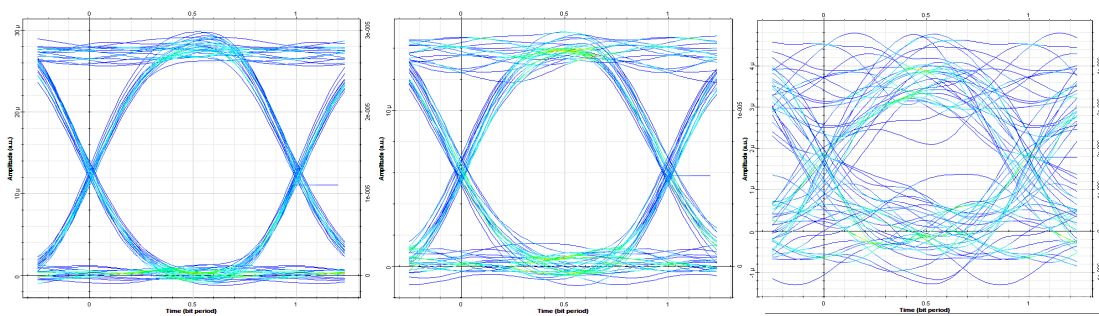
Fuente: el autor.

Figura 3-10 Análisis de BER con/sin UDC.



Fuente: el autor.

Figura 3-11 Análisis de factor Q con/sin UDC.



Fuente: Optisystem V 12.2

a) b) c)
Figura 3-12 Amplitud del diagrama de ojo en downstream a 2.5Gbps a 70km a) 80Km b) y 100 Km c)

3.2.2. CASO II: IMPACTO EN EL DESEMPEÑO DEL SISTEMA AL VARIAR EL FORMATO DE MODULACIÓN DEL CODIFICADOR A 2.5Gbps/s.

Para el análisis del sistema se han configurado los siguientes parámetros: frecuencia de transmisión de 1550nm, ganancia del amplificador en la OLT 15dB, ganancia del

amplificador del extensor de alcance de 3dB, radio de extinción de 20dB, valor del UDC de $-837.5 \text{ ps}/\eta\text{m}$ y potencia de la ONU de 5dBm.

El resultado de la simulación en el sistema LR-PON para señales de upstream, variando la modulación del codificador a una velocidad de operación de 2.5Gbps y para las longitudes de onda de 1550 ηm y 1547.2 ηm se muestran en las Tablas 3-5 y 3-6.

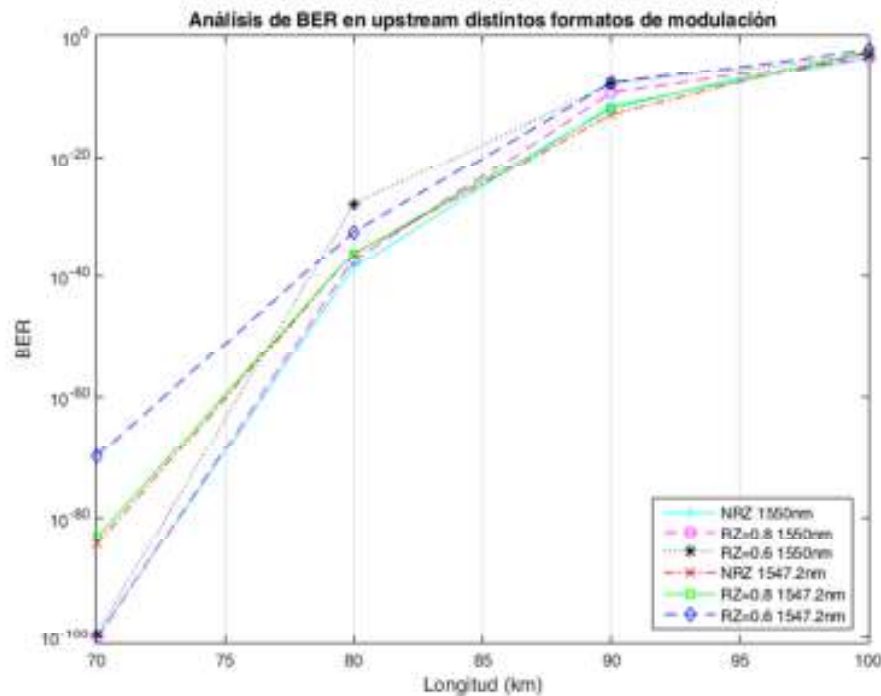
Tabla 3-5 BER de NRZ y RZ para señales de upstream.

N°	Longitud	BER para NRZ		BER para RZ=0.8		BER para RZ=0.6	
		1550	1547.2	1550	1547.2	1550	1547.2
1	70	1.24E-100	3.08E-85	7.64E-101	4.34E-84	4.03E-100	1.37E-70
2	80	3.58E-39	7.09E-37	6.23E-38	7.40E-37	1.04E-28	3.18E-33
3	90	1.89E-12	8.23E-14	2.55E-10	7.56E-13	7.84E-09	1.04E-08
4	100	2.78E-04	2.08E-03	2.57E-04	3.40E-03	9.79E-04	5.45E-03

Tabla 3-6 Valor de factor Q de NRZ y RZ para señales de upstream.

N°	Longitud	Q para NRZ		Q para RZ=0.8		Q para RZ=0.6	
		1550	1547.2	1550	1547.2	1550	1547.2
1	70	21.261	19.5269	21.2843	19.3926	21.2068	17.7216
2	80	13.0409	12.6305	12.8212	12.6277	11.0545	11.9516
3	90	6.9446	7.37484	6.21556	7.07319	5.65296	5.60342
4	100	3.45127	2.8652	3.47273	2.70321	3.09598	2.54508

Las Figuras 3-13 y 3-14, muestran el desempeño del sistema LR-PON, en varios formatos de codificación para las señales en upstream a diferentes longitudes.



Fuente: el autor.

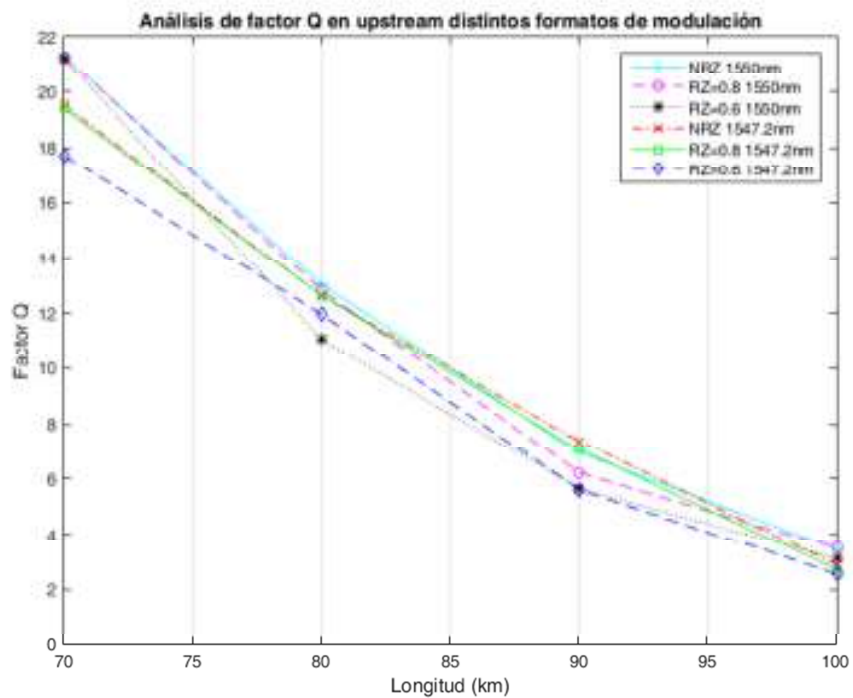
Figura 3-13 Longitud VS BER en upstream con NRZ y RZ.

La Figura 3-13 muestra los resultados de la simulación que el BER se incrementa con el aumento de la distancia de transmisión y prácticamente el sistema LR-PON se vuelve casi independiente del formato de transmisión a distancias mayores a 95km. La modulación NRZ tiene un mejor desempeño que RZ=0.8 seguido de RZ=0.6 y para distancias mayores a los 100 km el valor del BER sobrepasa el 1×10^{-9} permitido.

La Figura 3-14 muestra los resultados del valor del factor Q en el sistema LR-PON. El valor Q se incrementa debido al deterioro que se produce por el efecto de la mezcla de cuatro ondas (FWM) y el ruido debido a la amplificación de emisión espontánea (ASE). Además el gráfico nos muestra que para distancias mayores a 95km el valor de Q decrementa por debajo de su máximo permitido de 6dB.

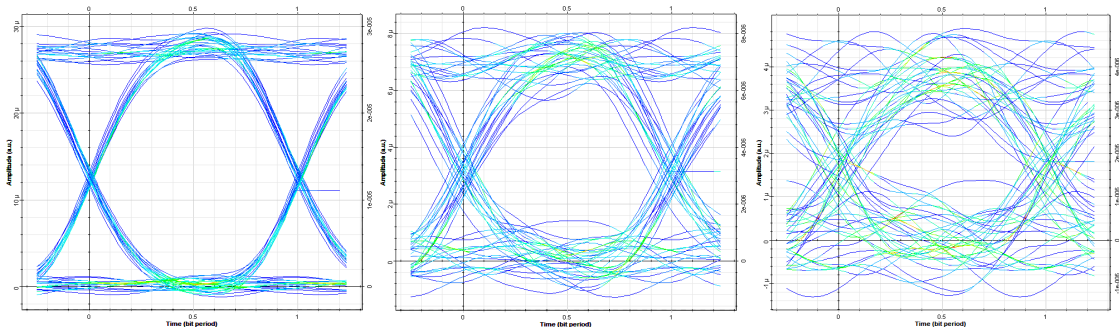
La Figura 3-15 muestra el análisis del BER para la codificación NRZ, a tres distintas distancias de las cuales a 70km se muestra la mayor amplitud del diagrama de ojo. En las figuras 3-16 y 3-17 se analiza el BER para una codificación RZ con ciclos de trabajo de 0.8 y 0.6 además de variar la distancia de transmisión.

De todos los resultados mostrados anteriormente se concluye que una modulación con NRZ es la mejor de las tres codificaciones para señales en upstream.



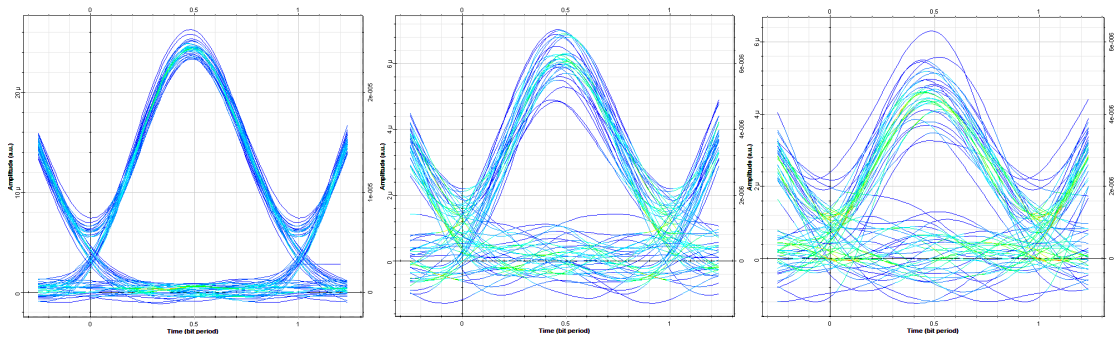
Fuente: el autor.

Figura 3-14 Longitud VS Valor Q en upstream con NRZ y RZ.



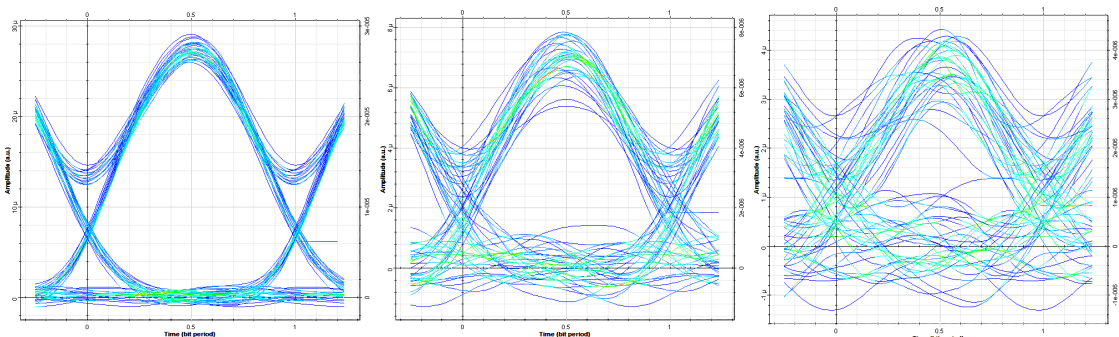
Fuente: Optisystem V 12.2

a) b) c)
 Figura 3-15 Diagrama de Ojo a 2.5 Gbps con codificación NRZ en upstream a 70km a), 90km b) y 100km c)



Fuente: Optisystem V 12.2.

a) b) c)
 Figura 3-16 Diagrama de Ojo a 2.5 Gbps con codificación RZ=0.6 en upstream a 70km a), 90km b) y 100km c)



Fuente: Optisystem V 12.2

a) b) c)
 Figura 3-17 Diagrama de Ojo a 2.5 Gbps con codificación RZ=0.8 en upstream a 70km a), 80km b) y 100km c)

En las Tablas 3-7 y 3-8, se muestra el resultado de la simulación del sistema LR-PON para las señales downstream a una velocidad de transmisión de 2.5Gbps y variando el formato de codificación en NRZ, RZ=0.6 y RZ=0.8.

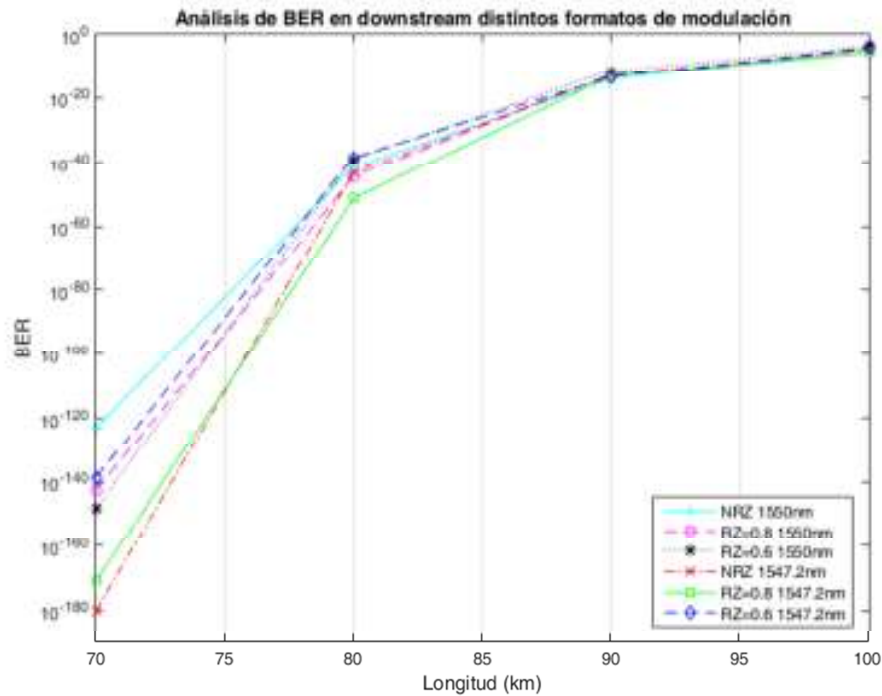
Tabla 3-7 BER de NRZ y RZ para señales de downstream.

N°	Longitud	BER para NRZ		BER para RZ=0.8		BER para RZ=0.6	
		1550	1547.2	1550	1547.2	1550	1547.2
1	70	1.18E-123	7.66E-181	2.11E-143	1.17E-171	4.51E-149	1.71E-139
2	80	3.89E-42	5.25E-44	3.06E-45	4.82E-52	1.33E-39	3.81E-39
3	90	8.30694-15	1.63E-13	2.22E-13	9.17E-14	4.67E-12	4.24E-14
4	100	3.10E-05	2.52E-05	6.67E-05	2.61E-06	3.07E-04	1.12E-04

Tabla 3-8 Valor de factor Q de NRZ y RZ para señales de downstream.

N°	Longitud	Q para NRZ		Q para RZ=0.8		Q para RZ=0.6	
		1550	1547.2	1550	1547.2	1550	1547.2
1	70	23.6206	28.6514	25.4701	27.9042	25.9769	25.1139
2	80	13.5508	13.8631	14.0662	15.1341	13.1163	13.0358
3	90	7.67337	7.28352	7.2403	7.36009	6.81474	7.46221
4	100	3.99892	4.05317	3.81991	4.55461	3.42406	3.68636

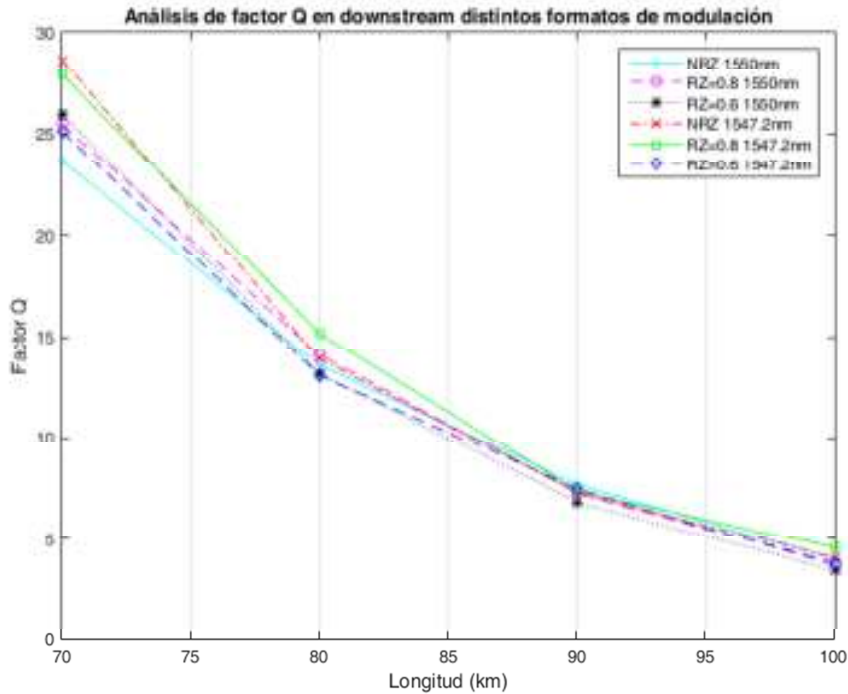
En las Figura 3-18 y 3-19, se puede observar el desempeño del sistema de LR-PON, variando los diferentes formatos de transmisión BERsus la distancia para las señales en downstream.



Fuente: el autor.

Figura 3-18 Longitud VS BER en downstream con NRZ y RZ.

La Figura 3-18 se muestra como una función de la distancia de transmisión a una velocidad de 2.5Gbps. El gráfico muestra que el BER se incrementa mientras aumenta la distancia de transmisión y el sistema se vuelve prácticamente independiente del formato de transmisión para distancia mayores a 95km. La modulación NRZ es la que muestra mejor desempeño en el sistema a una longitud de onda de 1547.2 nm.



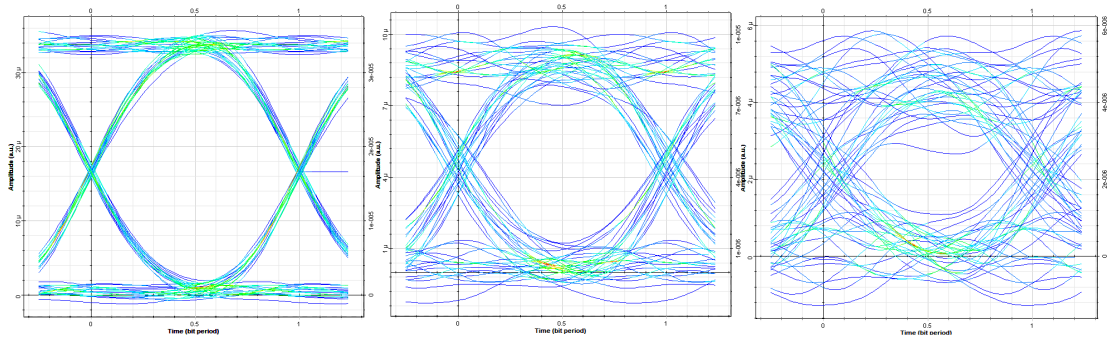
Fuente: el autor.

Figura 3-19 Longitud VS Valor Q en downstream con NRZ y RZ.

La Figura 3-19 muestra el desempeño del valor Q en el sistema LR-PON variando la distancia de transmisión. El valor Q se incrementa debido al deterioro que se produce por el efecto de mezcla de cuatro ondas (FWM) y el ruido debido a la amplificación de emisión espontánea (ASE). Además el gráfico nos muestra que para distancias mayores a 95km el valor de Q decrementa por debajo de su máximo permitido de 6dB.

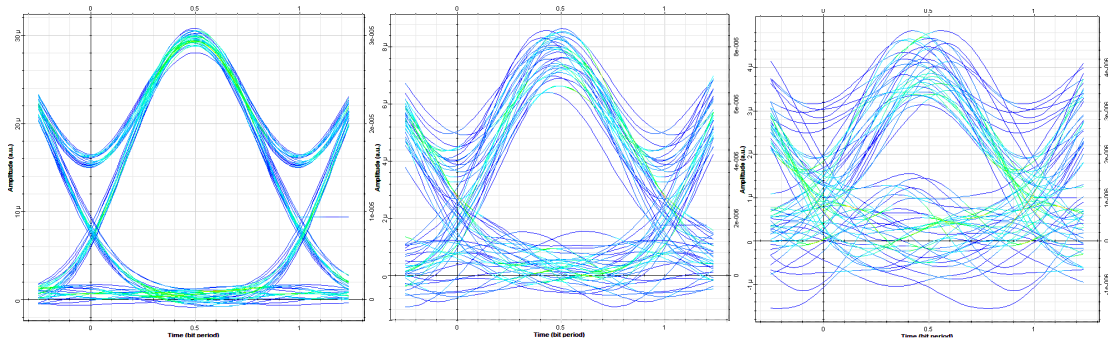
La Figura 3-20 muestra el análisis del BER para la codificación NRZ a tres distintas distancias, de las cuales, a 70km se muestra la mayor amplitud del diagrama de ojo. En las figuras 3-21 y 3-22 se analiza el BER para una codificación RZ con ciclos de trabajo de 0.8 y 0.6, además de variar la distancia de transmisión.

De todos los resultados mostrados anteriormente se concluye que una modulación con NRZ, es la mejor de las tres codificaciones para señales en downstream.



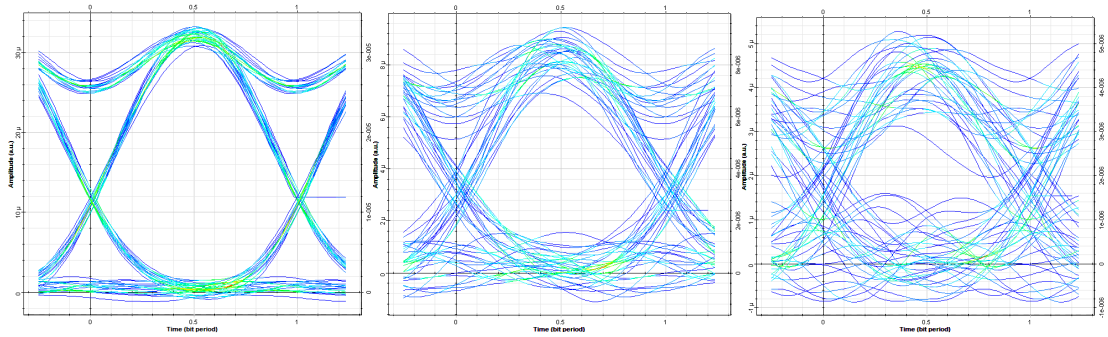
Fuente: Optisystem V 12.2.

a) b) c)
 Figura 3-20 Diagrama de Ojo a 2.5 Gbps con codificación NRZ en downstream a 70km a), 90km b) y 100km c).



Fuente: Optisystem V 12.2

a) b) c)
 Figura 3-21 Diagrama de Ojo a 2.5 Gbps con codificación RZ=0.6 en downstream a 70km a), 90km b) y 100km c).



Fuente: Optisystem V 12.2.

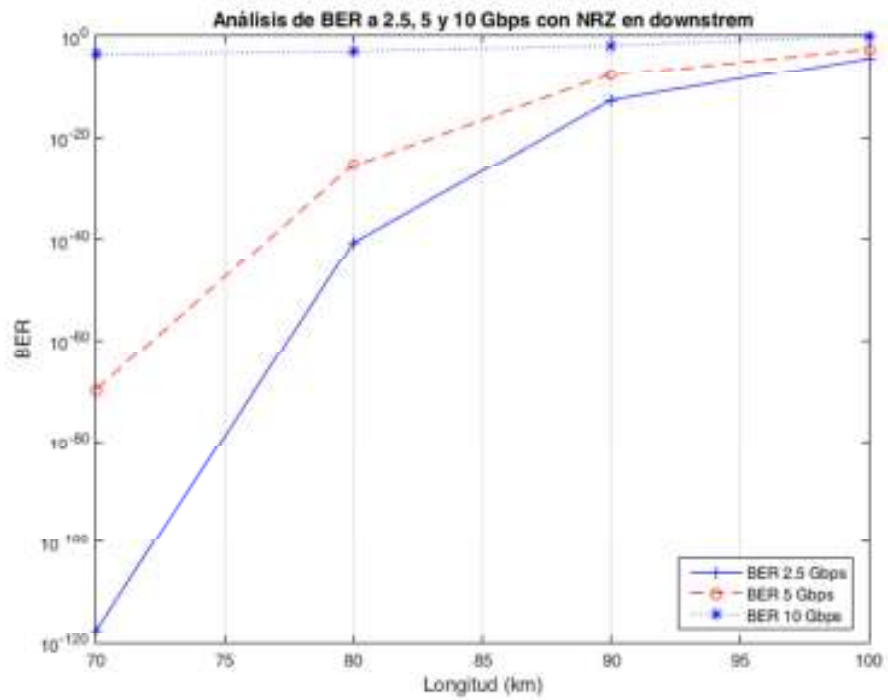
a) b) c)
 Figura 3-22 Diagrama de Ojo a 2.5 Gbps con codificación RZ=0.8 en downstream a 70km a), 80km b) y 100km c).

3.2.3. CASO III: IMPACTO EN EL DESEMPEÑO DEL SISTEMA AL VARIAR LA TASA DE BIT EN SEÑALES DE DOWNSTREAM Y UPSTREAM.

La distancia de un enlace es determinada por la proporción de la potencia de la señal recibida y el umbral del receptor, por lo tanto los factores como la atenuación de la señal, pérdidas de inserción, entre otras, son determinantes para que la señal alcance una distancia máxima. Otro factor importante para determinar la distancia de un enlace es el BER, el cual muestra cuantos de los totales de bits recibidos tienen error.

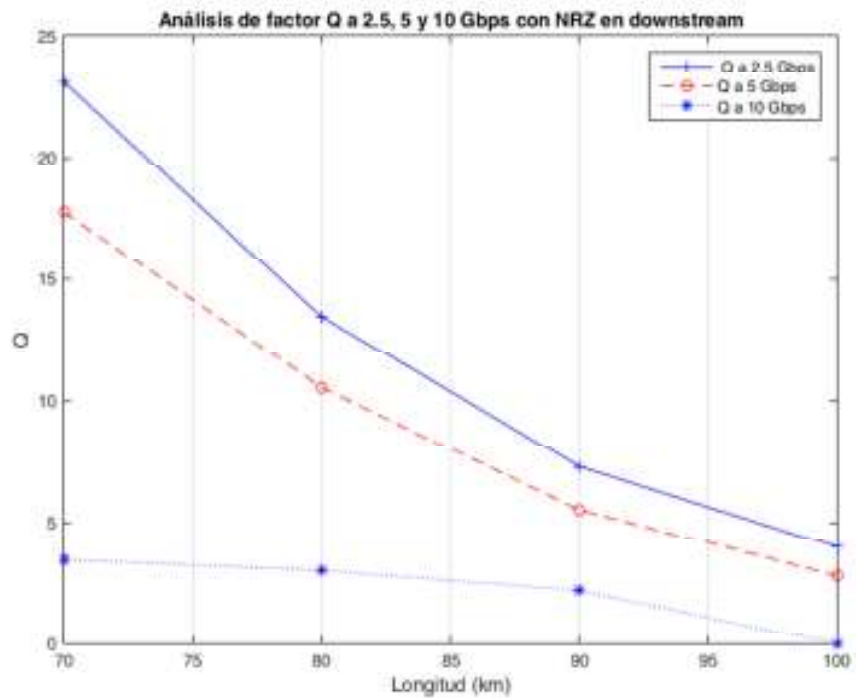
Para el análisis del sistema se han configurado los siguientes parámetros: frecuencia de transmisión de 1550nm, ganancia del amplificador en la OLT 15dB, ganancia del amplificador del extensor de rango de 3dB, radio de extinción de 20dB, valor del UDC de -837.5 ps/nm, y potencia de la ONU de 5dBm.

Los resultados de la simulación para el sistema LR-PON, para señales de downstream en tasas de bit de 2.5, 5 y 10 Gbps y codificación NRZ, se muestran en la Figura 3-23 para el BER y la Figura 3-24 para el valor de Q. Prácticamente el valor del BER y Q a 2.5Gbps y 5 Gbps, se mantienen por debajo del umbral permitido (1×10^{-9} y 6dB respectivamente) hasta los 90 km, mientras que a 10 Gbps en la ONU se tendrían que aplicar otras técnicas para recuperar la señal como FEC (Forward Error Correction).



Fuente: el autor.

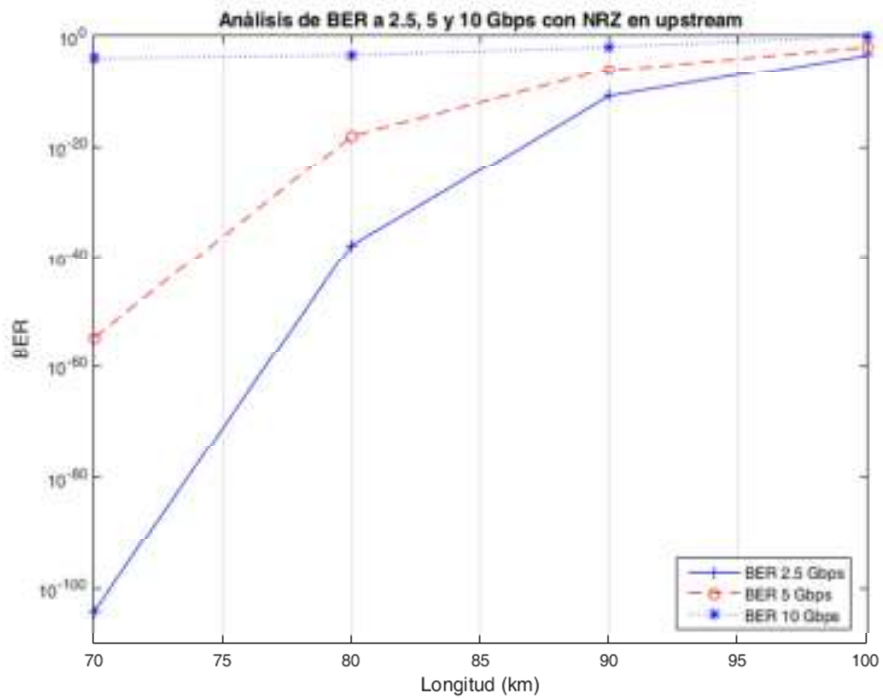
Figura 3-23 BER para diferentes tasas de bits en downstream con NRZ.



Fuente: el autor.

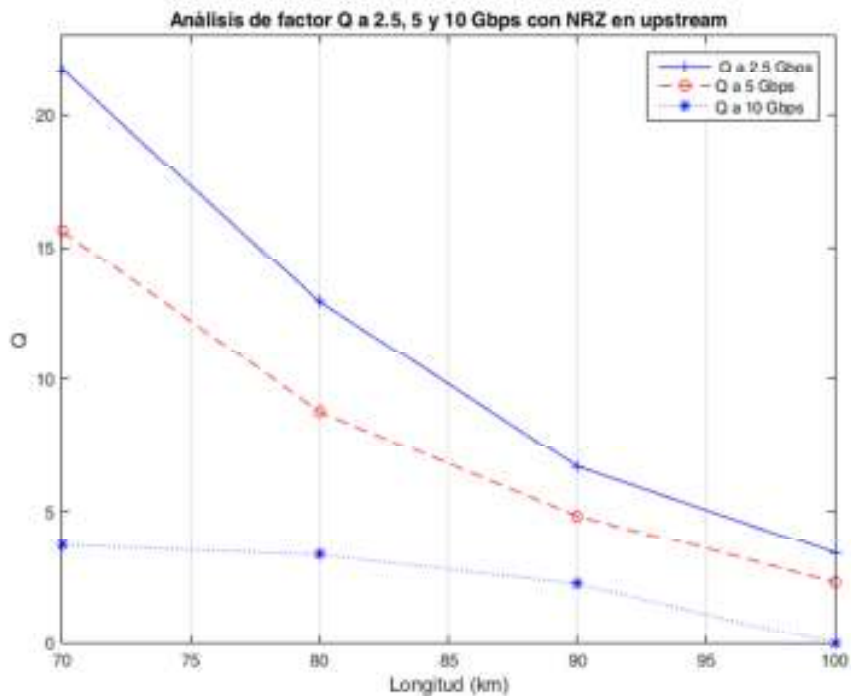
Figura 3-24 Valor Q para diferentes tasas de bits en downstream con NRZ.

Los resultados de la simulación para el sistema LR-PON, para señales de upstream en tasas de bit de 2.5, 5 y 10 Gbps y codificación NRZ, se muestran en la Figura 3-25 para el BER y la Figura 3-26 para el valor de Q. Prácticamente el valor del BER y Q a 2.5Gbps y 5 Gbps se mantiene por debajo del umbral permitido (1×10^{-9} y 6dB respectivamente) hasta los 85 km, mientras que a 10 Gbps en la ONU se tendrían que aplicar otras técnicas para recuperar la señal como FEC (Forward Error Correction).



Fuente: el autor.

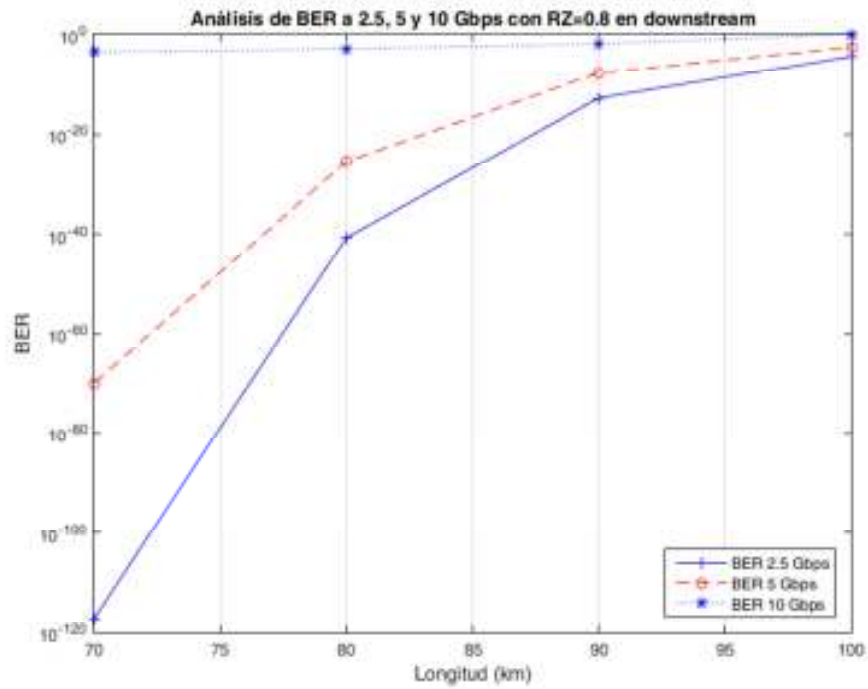
Figura 3-25 BER para diferentes tasas de bits en upstream con NRZ.



Fuente: el autor.

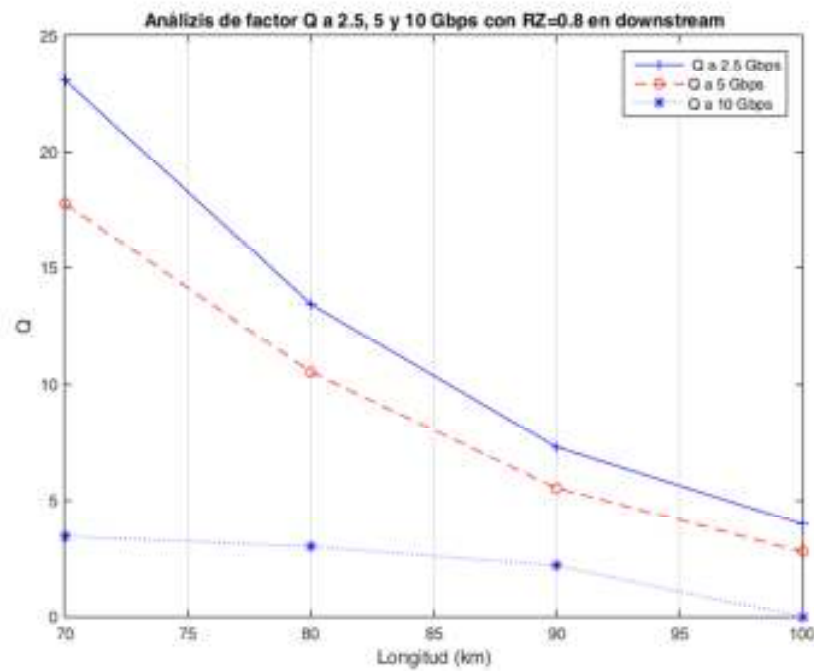
Figura 3-26 Valor Q para diferentes tasas de bits en upstream con NRZ.

Los resultados de la simulación para el sistema LR-PON, para señales de downstream en tasas de bit de 2.5, 5 y 10 Gbps y codificación RZ=0.8, se muestran en la Figura 3-27 para el BER y la Figura 3-28 para el valor de Q. Prácticamente el valor del BER y Q a 2.5Gbps y 5 Gbps se mantiene por debajo del umbral permitido (1×10^{-9} y 6dB respectivamente) hasta aproximadamente los 90 km, mientras que a 10 Gbps en la ONU se tendrían que aplicar otras técnicas para recuperar la señal como FEC (Forward Error Correction).



Fuente: el autor.

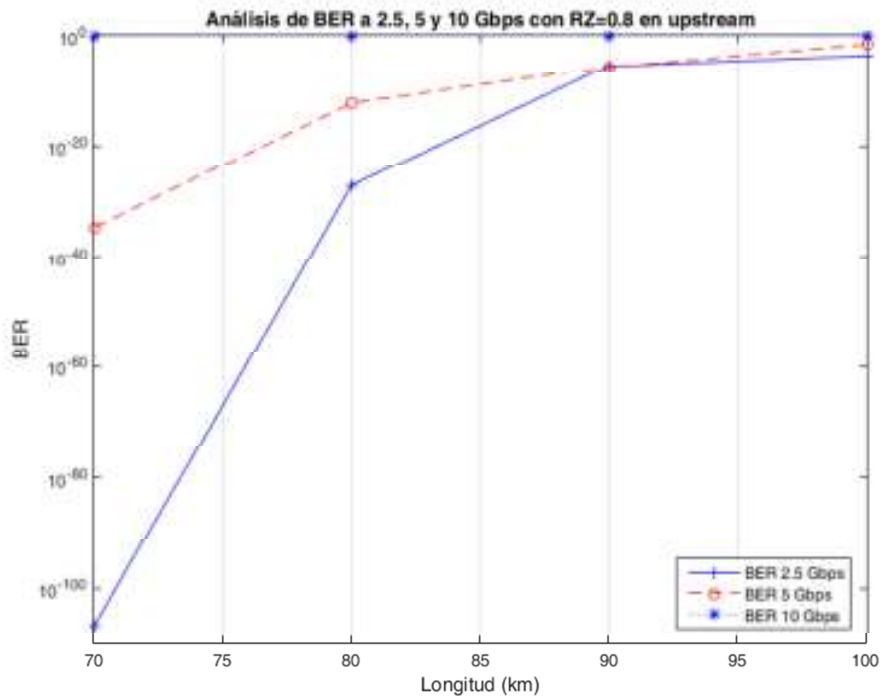
Figura 3-27 BER para diferentes tasas de bits en downstream con RZ=0.8.



Fuente: el autor.

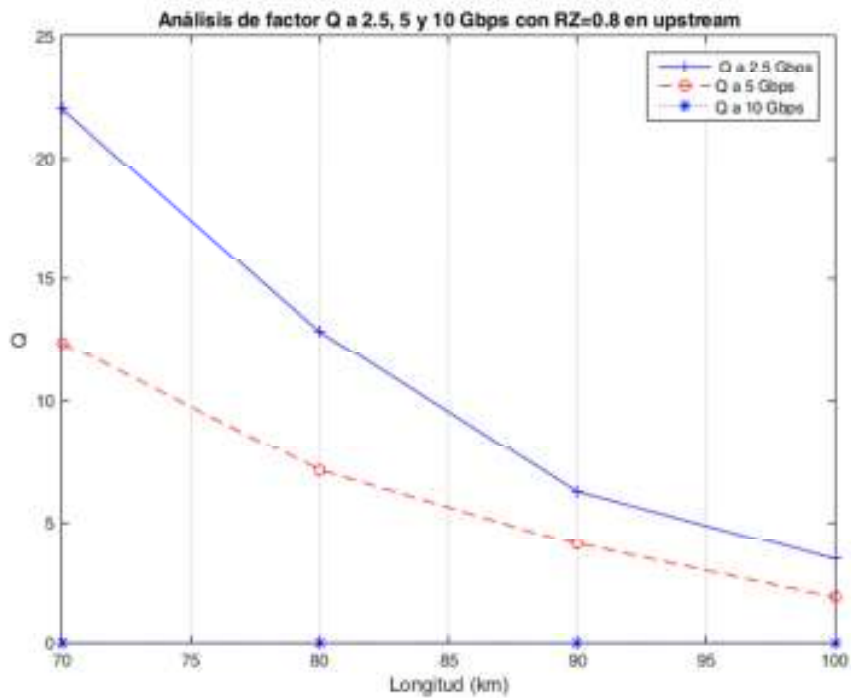
Figura 3-28 Valor Q para diferentes tasas de bits en downstream con RZ=0.8.

Los resultados de la simulación para el sistema LR-PON, para señales de upstream en tasas de bit de 2.5, 5 y 10 Gbps y codificación RZ=0.8, se muestran en la Figura 3-29 para el BER y la Figura 3-30 para el valor de Q. Prácticamente el valor del BER y Q a 2.5Gbps se mantiene por debajo del umbral permitido (1×10^{-9} y 6dB respectivamente) hasta los 85 km, a 5Gbps la transmisión se mantiene por debajo de los 80km, mientras que a 10 Gbps en la ONU se tendrían que aplicar otras técnicas para recuperar la señal como FEC (Forward Error Correction).



Fuente: el autor.

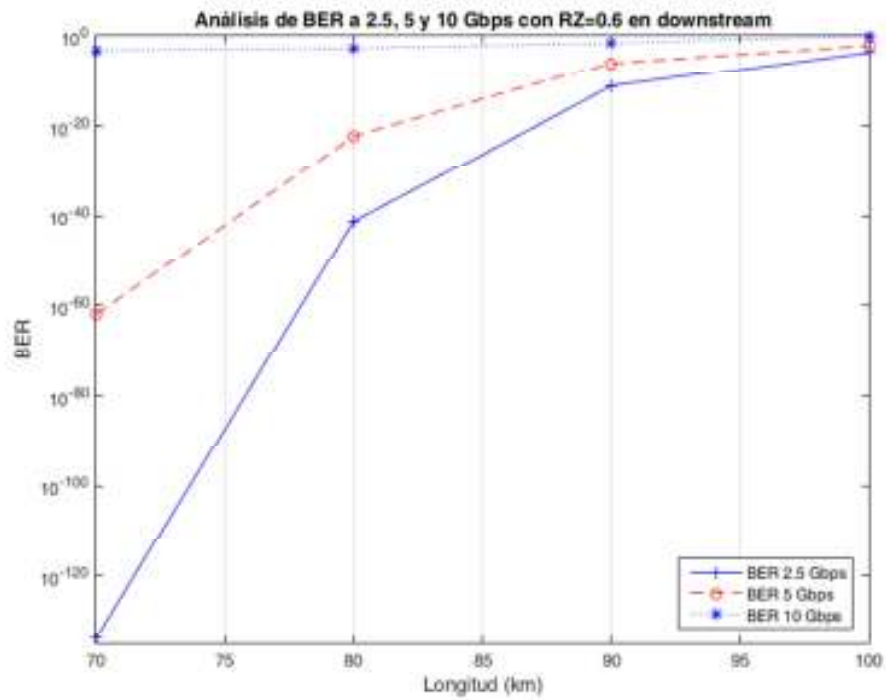
Figura 3-29 BER para diferentes tasas de bits en upstream con RZ=0.8.



Fuente: el autor.

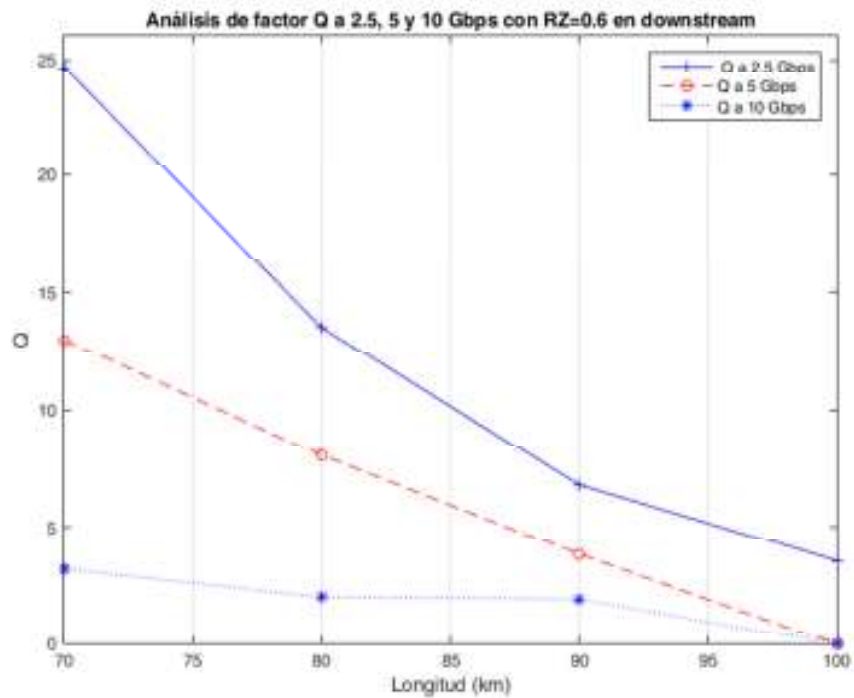
Figura 3-30 Valor Q para diferentes tasas de bits en upstream con RZ=0.8.

Los resultados de la simulación para el sistema LR-PON para señales de downstream en tasas de bit de 2.5, 5 y 10 Gbps y codificación RZ=0.6, se muestran en la Figura 3-31 para el BER y la Figura 3-32 para el valor de Q. Prácticamente el valor del BER y Q a 2.5Gbps se mantiene por debajo del umbral permitido (1×10^{-9} y 6dB respectivamente) hasta los 95 km, a 5Gbps la transmisión se mantiene por debajo de los 80 km, mientras que a 10 Gbps en la ONU se tendrían que aplicar otras técnicas para recuperar la señal como FEC (Forward Error Correction).



Fuente: el autor.

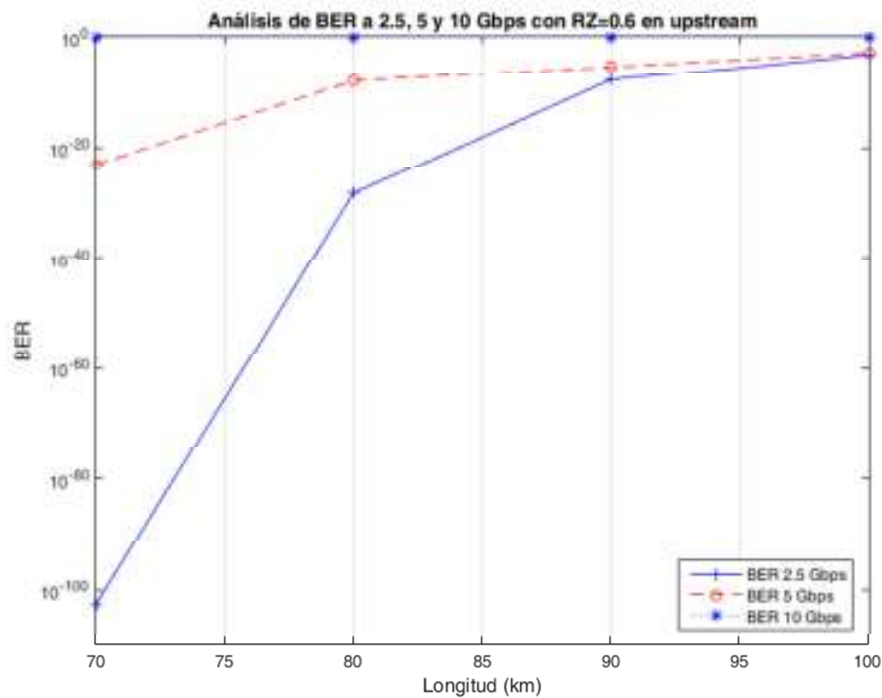
Figura 3-31 BER para diferentes tasas de bits en downstream con RZ=0.6.



Fuente: el autor.

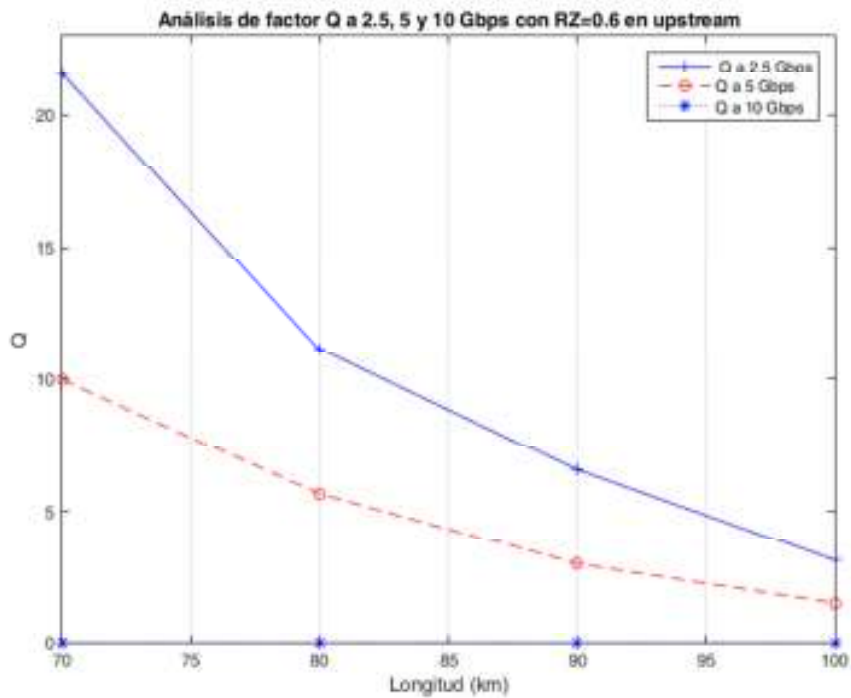
Figura 3-32 Valor Q para diferentes tasas de bits en downstream con RZ=0.6.

Los resultados de la simulación para el sistema LR-PON, para señales de upstream en tasas de bit de 2.5, 5 y 10 Gbps y codificación RZ=0.6, se muestran en la Figura 3-33 para el BER y la Figura 3-34 para el valor de Q. Prácticamente el valor del BER y Q a 2.5Gbps se mantiene por debajo del umbral permitido (1×10^{-9} y 6dB respetivamente) hasta los 90 km, a 5Gbps la transmisión se mantiene por debajo de los 80 km, mientras que a 10 Gbps en la ONU se tendrían que aplicar otras técnicas para recuperar la señal como FEC (Forward Error Correction).



Fuente: el autor.

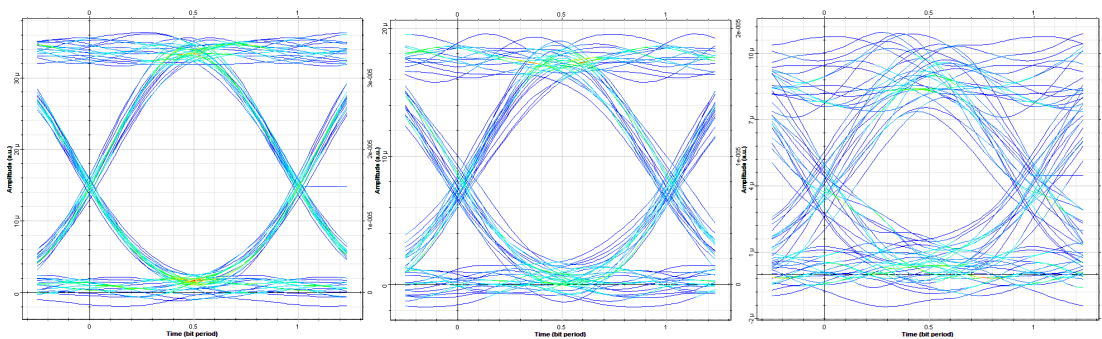
Figura 3-33 BER para diferentes tasas de bits en upstream con RZ=0.6.



Fuente: el autor.

Figura 3-34 Valor Q para diferentes tasas de bits en upstream con RZ=0.6.

Desde las Figuras 3-35 a 3-40, se observan los diagramas de ojo para distintas codificaciones, tanto en downstream como en upstream a la velocidad máxima de 5Gbps.



Fuente: Optisystem V 12.2

a) b) c)
Figura 3-35 Diagrama de Ojo a 5Gbps en downstream con NRZ a) 70km, b) 80km y c) 900km.

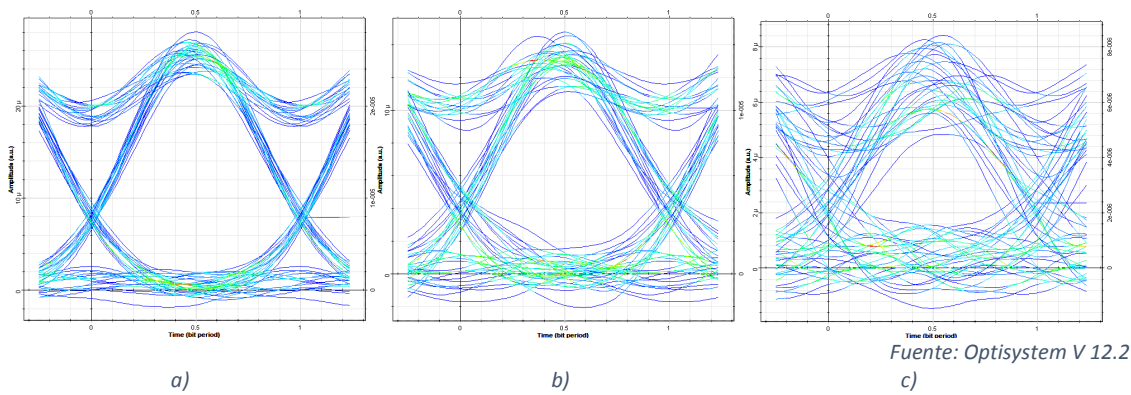


Figura 3-36 Diagrama de Ojo a 5Gbps en downstream con RZ 0.6 a) 70km, b) 80km y c) 90km.

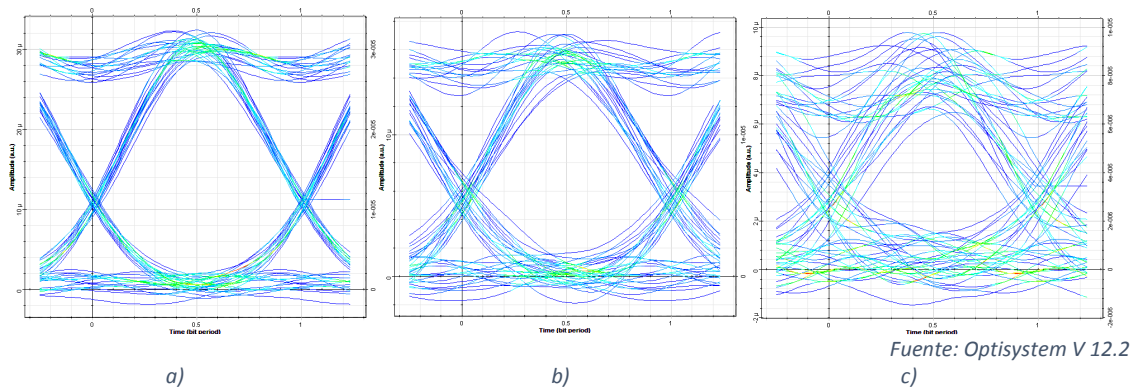


Figura 3-37 Diagrama de Ojo a 5Gbps en downstream con RZ 0.8 a) 70km, b) 80km y c) 90km.

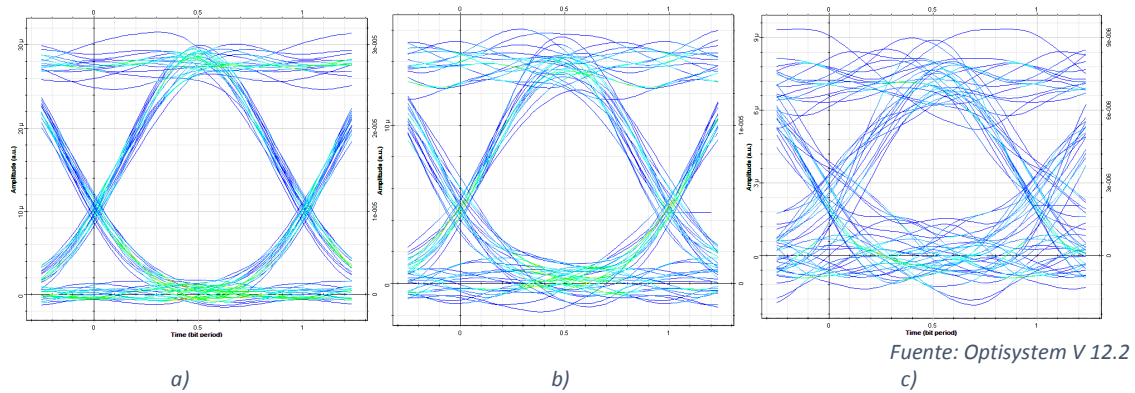
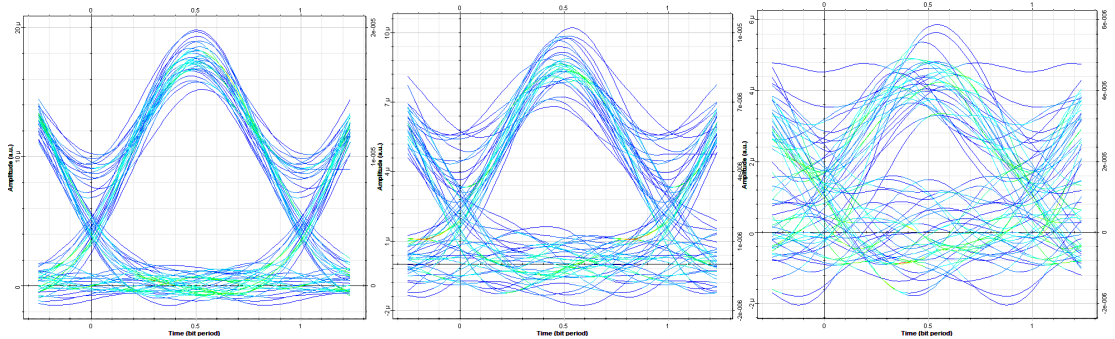
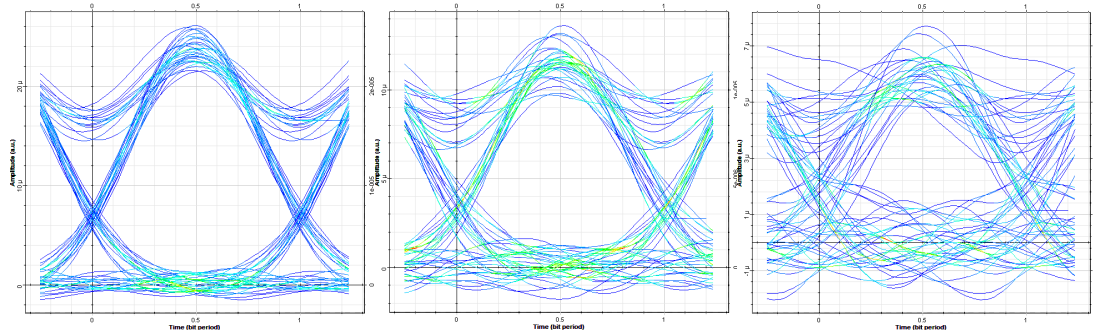


Figura 3-38 Diagrama de Ojo a 5Gbps en upstream con NRZ a) 70km, b) 80km y c) 90km



Fuente: Optisystem V 12.2

a) b) c)
 Figura 3-39 Diagrama de Ojo a 5Gbps en upstream con RZ 0.6 a) 70km, b) 80km y c) 90km



Fuente: Optisystem V 12.2

a) b) c)
 Figura 3-40 Diagrama de Ojo a 5Gbps en upstream con RZ 0.8 a) 70km, b) 80km y c) 90km

En la Tabla 3-9, se muestra el resumen de las distancias máximas alcanzadas en base a las diferentes velocidades evaluadas.

Tabla 3-9 Resumen de distancia máxima versus velocidad.

Bit Rate Gbps	Máxima distancia de transmisión en downstream		Máxima distancia de transmisión en upstream	
	NRZ	RZ	NRZ	RZ
2.5 Gbps	90 km	90 km	85 km	85 km
5Gbps	90 km	85 km	85 km	85 km
10Gbps	80 km *	80 km *	---	---

*Se deben aplicar técnicas de FEC para que funcione el enlace.

3.2.4. CASO IV: IMPACTO EN EL DESEMPEÑO DEL SISTEMA AL VARIAR LA GANANCIA EN EL EXTENSOR DE ALCANCE EN SEÑALES DE DOWNSTREAM Y UPSTREAM.

Para el análisis del sistema, se han configurado los siguientes parámetros: frecuencia de trasmisión de 1550nm, ganancia del amplificador en la OLT 15dB, tasa de bit de 2.5Gbps, radio de extinción de 20dB, valor del UDC de -837.5 ps/nm, distancia del enlace de 90 km y potencia de la ONU de 5dBm.

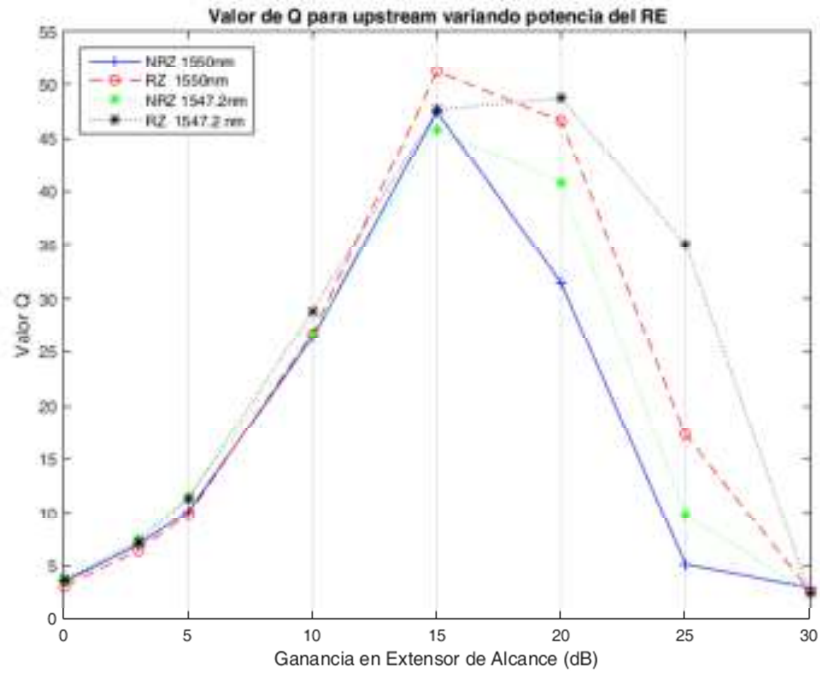
Los resultados de la simulación para el sistema LR-PON, para señales de upstream, con diferentes ganancias en el extensor de rango y codificación NRZ y RZ=0.8, se muestran en la Tabla 3-10, mientras que para downstream los resultados se muestran en la Tabla 3-11.

Tabla 3-10 Valor de Q en upstream variando la ganancia en el RE.

N°	Gan. RE	Q para NRZ		Q para RZ=0.8	
		1550 nm	1547.2 nm	1550 nm	1547.2 nm
1	0	3.53401	3.81688	3.1323	3.63457
2	3	6.94461	7.37485	6.42326	7.16064
3	5	10.0994	11.5784	9.80112	11.3252
4	10	26.3865	26.648	26.7887	28.8852
5	15	47.4742	45.861	51.1772	47.6407
6	20	31.4035	40.8164	46.6236	48.7432
7	25	5.14542	9.73896	17.2456	35.0605
8	30	2.98646	2.54594	2.63572	2.55358

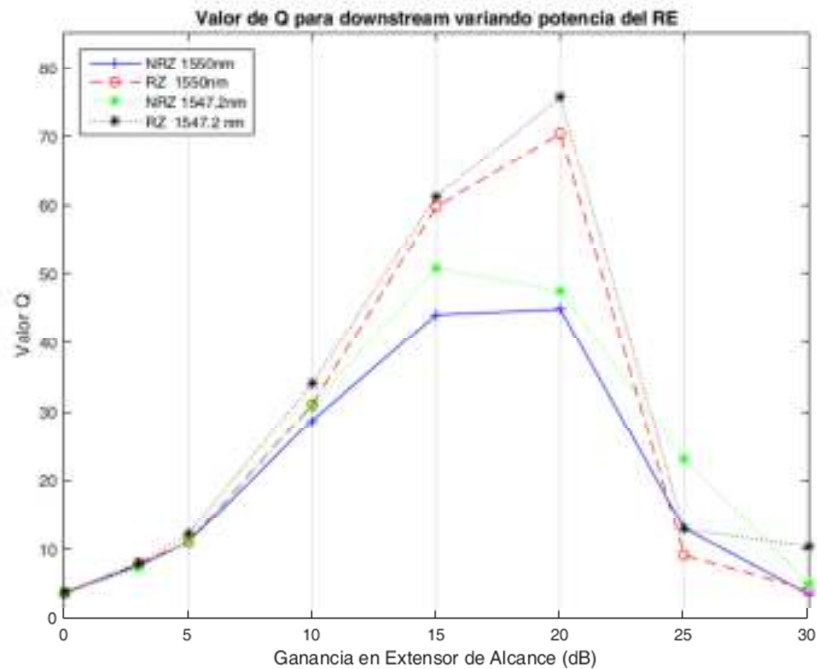
Tabla 3-11 Valor de Q en downstream variando la ganancia en el RE.

N°	Gan. RE	Q para NRZ		Q para RZ=0.8	
		1550 nm	1547.2 nm	1550 nm	1547.2 nm
1	0	3.78862	3.62945	3.7089	3.85672
2	3	7.67337	7.28353	7.89244	7.98033
3	5	11.0393	11.1193	11.0295	12.2015
4	10	28.7355	30.8947	31.0254	34.0473
5	15	44.0711	50.7567	59.7991	61.2897
6	20	44.8534	47.4273	70.4062	75.6109
7	25	12.9955	23.0952	9.11505	12.858
8	30	3.5907	5.16978	4.26967	10.4145



Fuente: el autor.

Figura 3-41 Valor de Q para upstream para distintas potencias en el RE.



Fuente: el autor.

Figura 3-42 Valor de Q para downstream para distintas potencias en el RE.

En las Figuras 3-41 y Figura 3-42, se muestra la representación gráfica para los valores de Q, tanto en downstream como un upstream para 1550nm y 1547.2nm. En dichas gráficas se puede observar que desde una potencia de 0dB a 20dB, el valor de Q aumenta mientras que desde 20dB en adelante el valor de Q decrece de manera exponencial. Este efecto se puede entender debido a que en sistemas WDM-PON a altas potencias, las diferentes longitudes de onda tienden a solaparse entre ellas debido a efectos como la mezcla de cuatro ondas y la modulación de fase cruzada. Debido a que la separación de canales del sistema es de únicamente de 50GHz, el XPM produce una gran interferencia en los canales adyacentes, produciendo distorsión y haciendo que el sistema deteriore su funcionamiento de muy rápida manera a partir de los 20 dB.

3.2.5. CASO V: IMPACTO EN EL DESEMPEÑO DEL SISTEMA WDM AL VARIAR EL RADIO DE EXTINCIÓN EN SEÑALES DE DOWNSTREAM Y UPSTREAM.

Para el análisis del sistema se han configurado los siguientes parámetros: frecuencia de transmisión de 1550nm, ganancia del amplificador en la OLT 15dB, tasa de bit de 2.5Gbps, potencia del extensor de alcance de 3dB, valor del UDC de -837.5 ps/nm y potencia de la ONU de 5dBm.

Los resultados de la simulación para el sistema LR-PON, para señales de downstream, con diferentes radios de extinción a diferentes distancias y codificación NRZ, se muestran en la Tabla 3-12, mientras que para upstream los resultados se muestran en la Tabla 3-13.

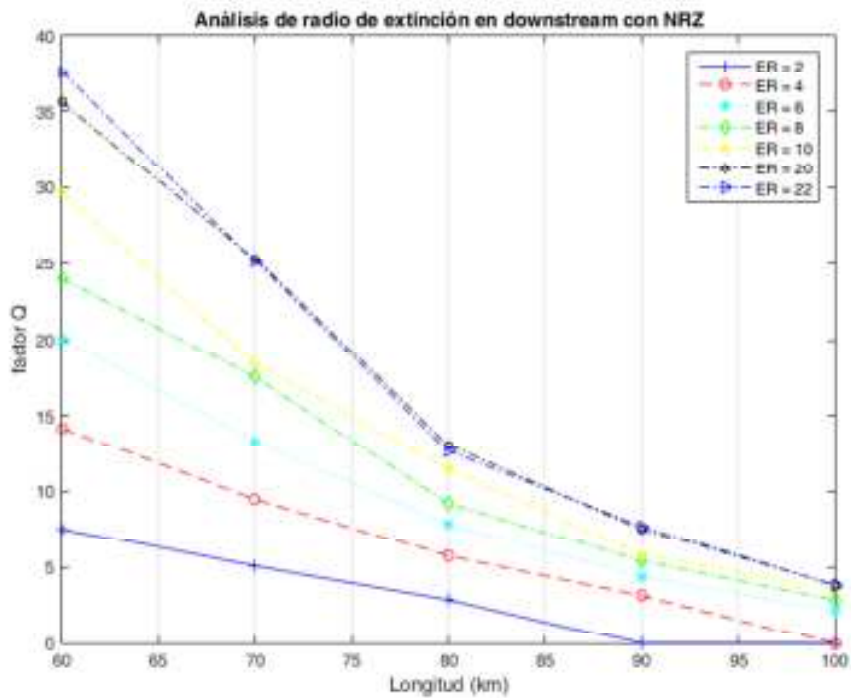
Tabla 3-12 Valor de Q en downstream modulación NRZ.

N°	Longitud	ER=2	ER=4	ER=6	ER=8	ER=10	ER=20	ER=22
1	60	7.53299	14.1967	20.0826	23.9844	29.7094	35.6023	37.5963
2	70	5.07679	9.48654	13.3006	17.501	18.3578	25.3225	25.1627
3	80	2.89572	5.73606	7.8475	9.2246	11.5038	13.0473	12.6526
4	90	0	3.15472	4.38565	5.40048	5.81263	7.512	7.72107
5	100	0	0	2.19301	2.88331	3.55631	3.86324	3.82006

Tabla 3-13 Valor de Q en upstream modulación NRZ

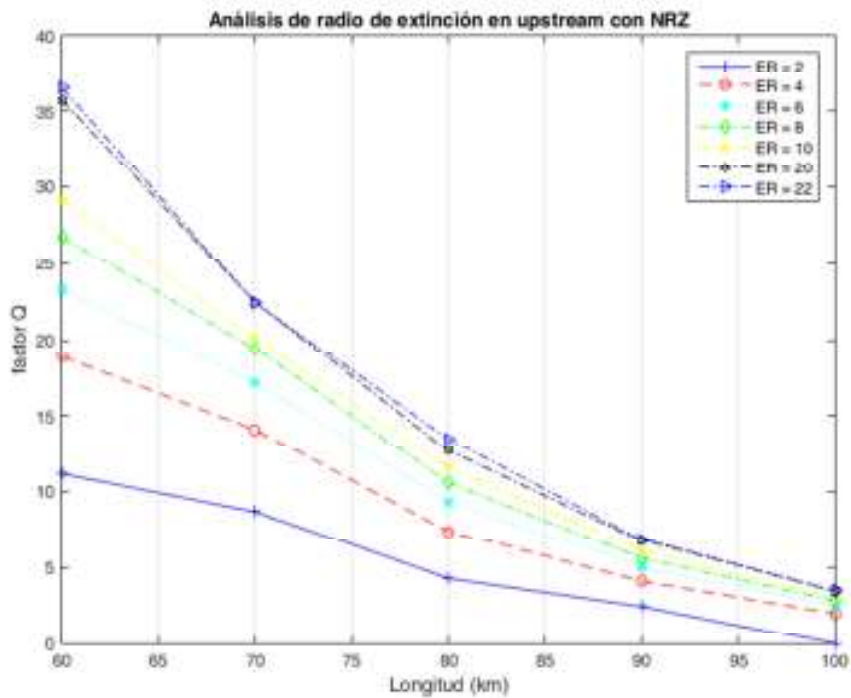
N°	Longitud	ER=2	ER=4	ER=6	ER=8	ER=10	ER=20	ER=22
1	60	11.1651	18.8375	23.281	26.7631	29.1634	35.7194	36.5239
2	70	8.68101	14.1031	17.1775	19.402	20.0935	22.4593	22.4104
3	80	4.28984	7.3953	9.34265	10.5758	11.5882	12.7038	13.4738
4	90	2.47551	4.10149	4.96501	5.60894	6.11615	6.77289	6.84212
5	100	0	2.02807	2.54403	2.85257	3.04535	3.46007	3.48941

En las Figuras 3-43 y 3-44, se puede observar claramente que el valor de Q decrece, mientras aumenta la distancia del enlace para una modulación NRZ. También se puede observar que el valor del radio de extinción de 20dB, es el más óptimo ya que a partir de un valor mayor el valor de Q no mejora considerablemente el sistema. Además se observa que para una distancia de hasta 90 km, el valor de Q se mantiene por encima del valor mínimo de 6dB.



Fuente: el autor.

Figura 3-43 Valor de Q para downstream para el radio de extinción y NRZ.



Fuente: el autor.

Figura 3-44 Valor de Q para upstream para el radio de extinción y NRZ.

Los resultados de la simulación para el sistema LR-PON, para señales de downstream, con diferentes radios de extinción, a diferentes distancias y codificación RZ=0.8, se muestran en la Tabla 3-14, mientras que para upstream los resultados se muestran en la Tabla 3-15.

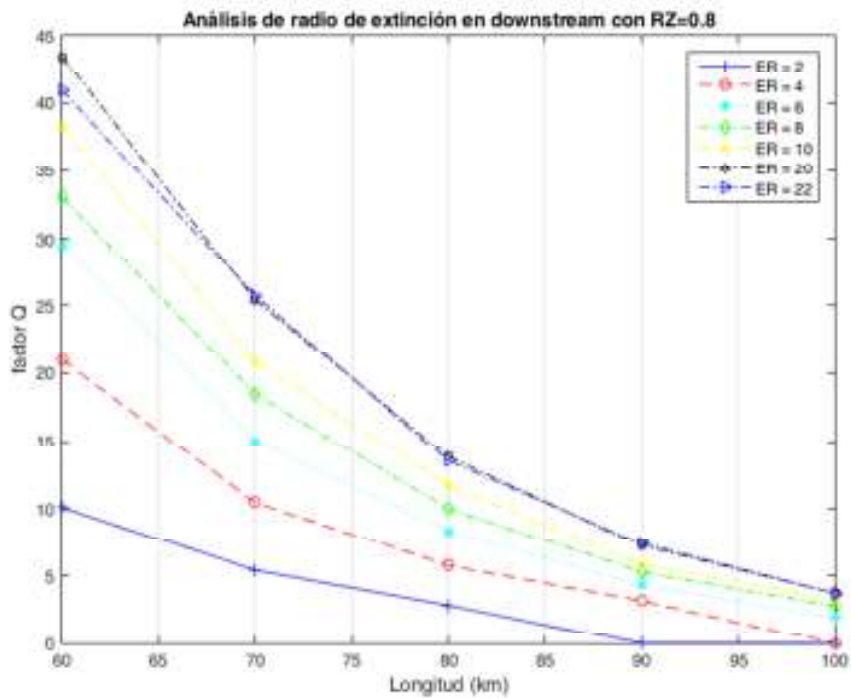
Tabla 3-14 Valor de Q en downstream modulación RZ=0.8.

N°	Longitud	ER=2	ER=4	ER=6	ER=8	ER=10	ER=20	ER=22
1	60	10.0653	20.9622	29.5752	33.0624	38.2966	43.4484	40.9313
2	70	5.4095	10.4382	15.0137	18.4503	20.8444	25.4286	25.7511
3	80	2.85957	5.74659	8.28739	9.97856	11.7214	13.8182	13.5157
4	90	0	3.19269	4.3279	5.2761	5.79718	7.20905	7.37587
5	100	0	0	1.96146	2.81292	3.29556	3.73413	3.72583

Tabla 3-15 Valor de Q en upstream modulación RZ=0.8.

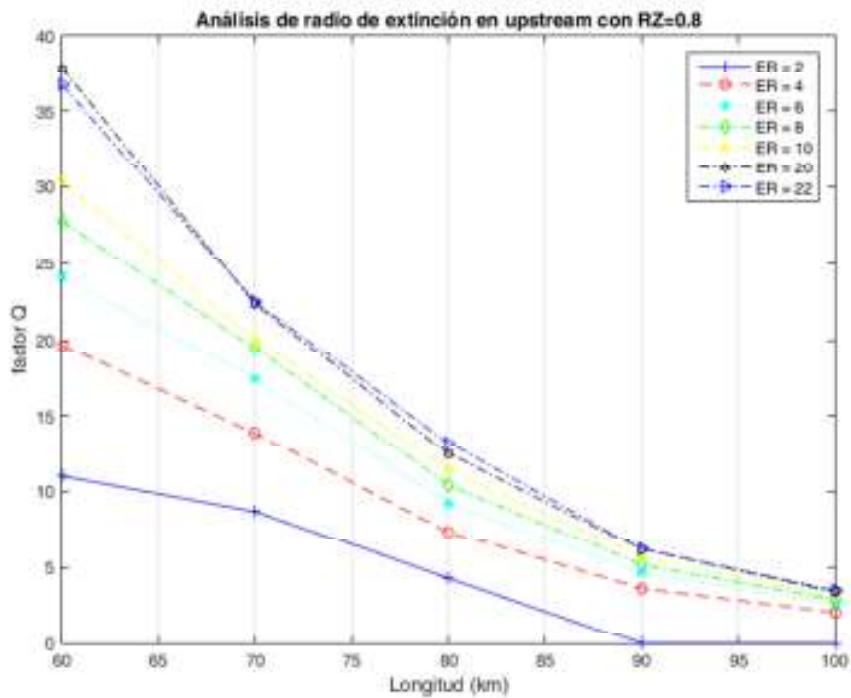
N°	Longitud	ER=2	ER=4	ER=6	ER=8	ER=10	ER=20	ER=22
1	60	11.0135	19.613	24.0927	27.8005	30.4171	37.8123	36.7158
2	70	8.6943	13.8768	17.4156	19.4206	20.0201	22.3254	22.4757
3	80	4.29953	7.34271	9.25364	10.4401	11.4329	12.4985	13.2122
4	90	0	3.6366	4.60403	5.1734	5.70169	6.17858	6.18899
5	100	0	2.10448	2.64983	2.91215	3.08196	3.41931	3.49975

En las Figuras 3-45 y 3-46, se puede observar claramente que el valor de Q decrece, mientras aumenta la distancia del enlace para una modulación RZ=0.8. También se puede observar que el valor del radio de extinción de 20dB, es el más óptimo ya que a partir de un valor mayor, el valor de Q no mejora considerablemente el sistema. Además se observa que para una distancia de hasta 90 km, el valor de Q se mantiene por encima del valor mínimo de 6dB.



Fuente: el autor.

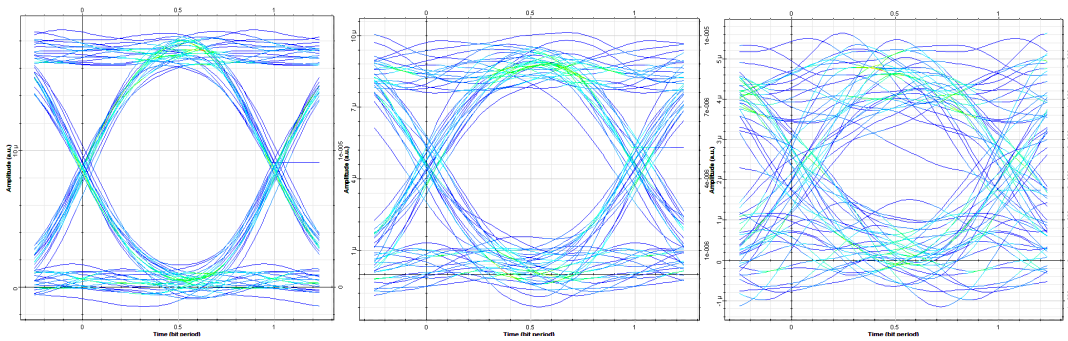
Figura 3-45 Valor de Q para downstream para el radio de extinción y RZ=0.8.



Fuente: el autor.

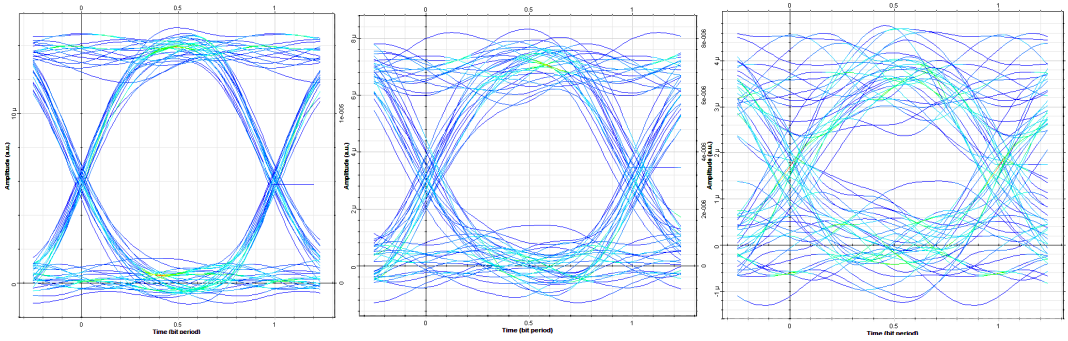
Figura 3-46 Valor de Q para upstream para el radio de extinción y RZ=0.8.

Desde las Figuras 3-47 a 3-50, se observan los diferentes diagramas de ojo para un radio de extinción de 20dB, tanto para modulación NRZ y RZ=0.8. Las figuras muestran una mayor amplitud para señales de upstream que para las de downstream, esto debido a que las señales desde la OLT, deben recorrer una mayor distancia hasta llegar al extensor de alcance donde se encuentra el UDC.



Fuente: Optisystem V 12.2

a) b) c)
 Figura 3-47 Diagrama de ojo para ER=20dB y NRZ en downstream a) 80 km, b) 90km y c) 100km.



Fuente: Optisystem V 12.2

a) b) c)
 Figura 3-48 Diagrama de ojo para ER=20dB y NRZ en upstream a) 80 km, b) 90km y c) 100km.

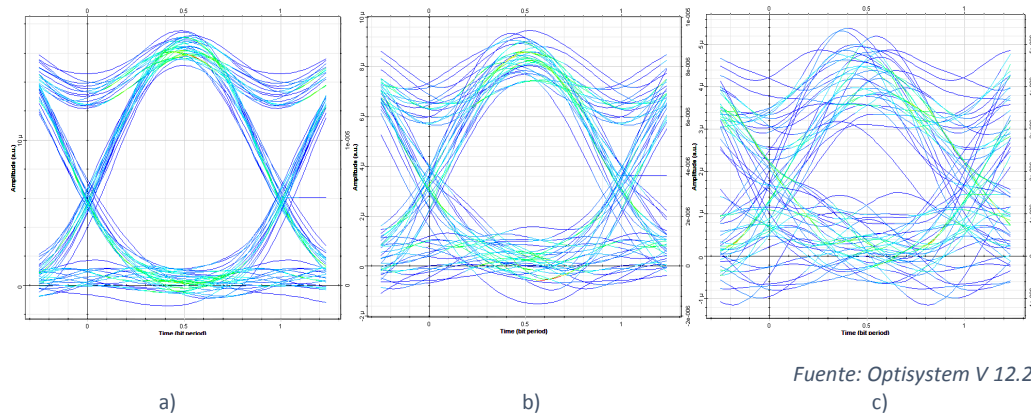


Figura 3-49 Diagrama de ojo para $ER=20\text{dB}$ y $RZ=0.8$ en downstream a) 80 km, b) 90km y c) 100km.

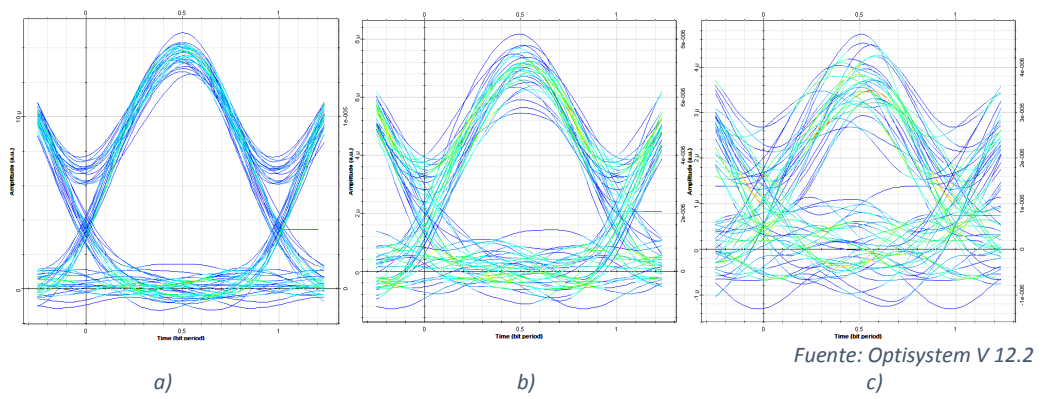


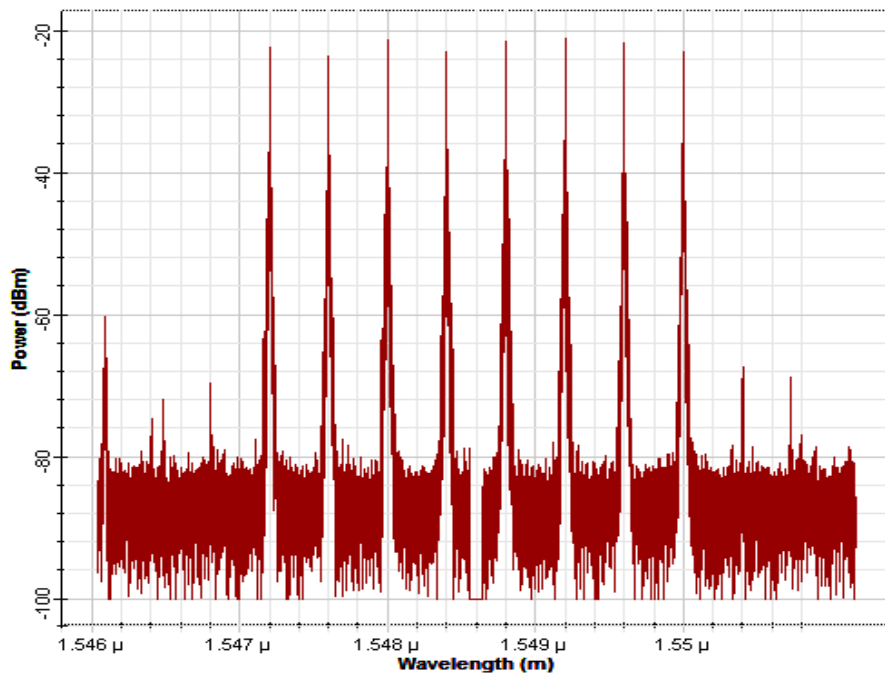
Figura 3-50 Diagrama de ojo para $ER=20\text{dB}$ y $RZ=0.8$ en upstream a) 80 km, b) 90km y c) 100km.

3.2.6. CASO VI: FUNCIONAMIENTO DE LA REDUNDANCIA EN EL SISTEMA LRPN.

Para el análisis del sistema se han configurado los siguientes parámetros: frecuencia de transmisión de 1550nm , ganancia del amplificador en la OLT 15dB , tasa de bit de 2.5Gbps , potencia del extensor de alcance de 3dB , valor del UDC de -837.5 ps/nm ,

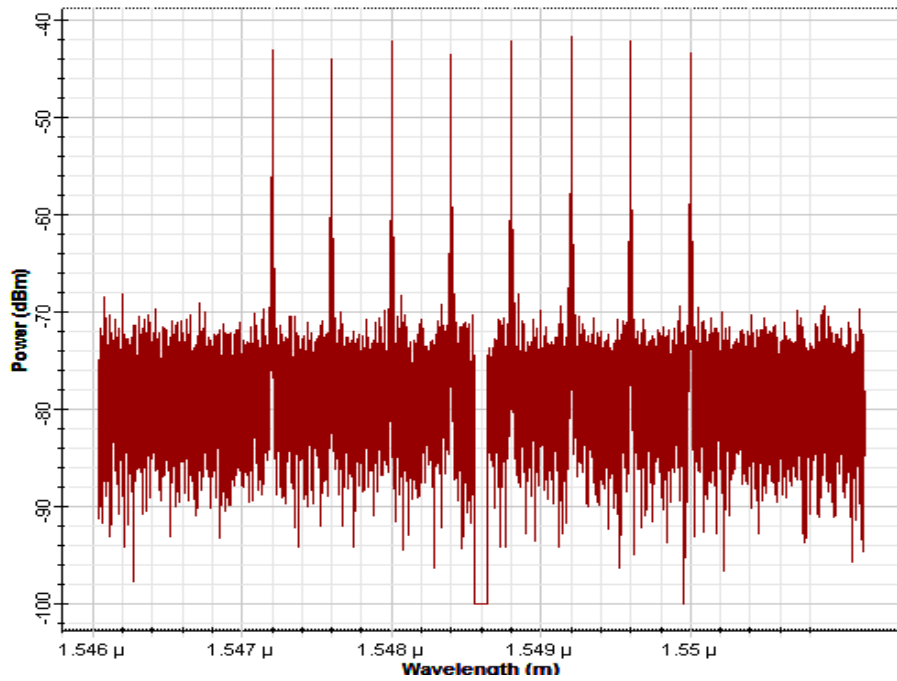
potencia de la ONU de 5dBm, longitud del feeder principal 90 km y del feeder redundante es de 60km.

Con la ayuda de los simuladores de falla, se puede tener el caso que la señal en downstream recorra el feeder principal y como se muestran en la Figura 3-51, la potencia de la señal tiene un promedio de -21dBm, mientras que la potencia de la señal que recorre el feeder Redundante tiene en promedio -43dBm como se observa en la Figura 3-52, por lo que a la salida del Monitor de Potencia se enviará un 0 lógico para que solo se procese la señal del feeder principal en el Nodo Remoto como se muestra en la Figura 3-53.



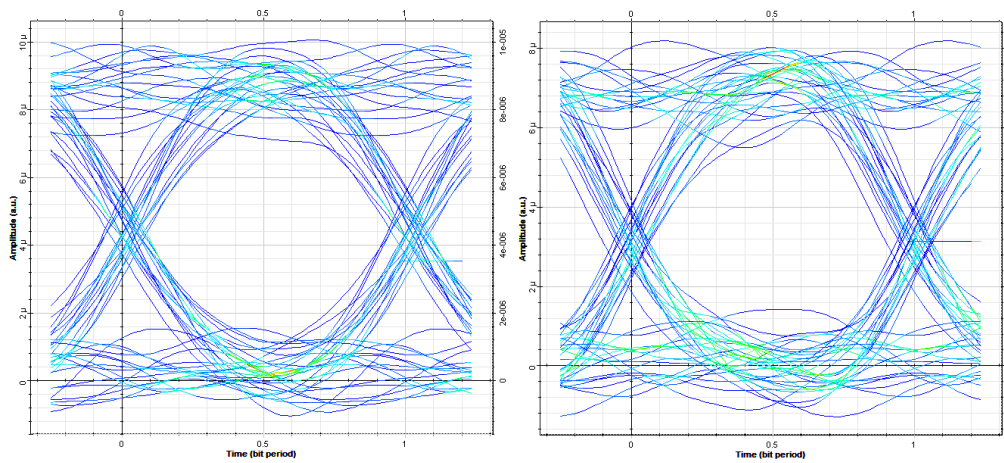
Fuente: Optisystem V 12.2

Figura 3-51 Espectro de la señal en downstream en el Nodo Remoto por el feeder principal.



Fuente: Optisystem V 12.2

Figura 3-52 Espectro de la señal en downstream en el Nodo Remoto por el feeder redundante.



Fuente: Optisystem V 12.2

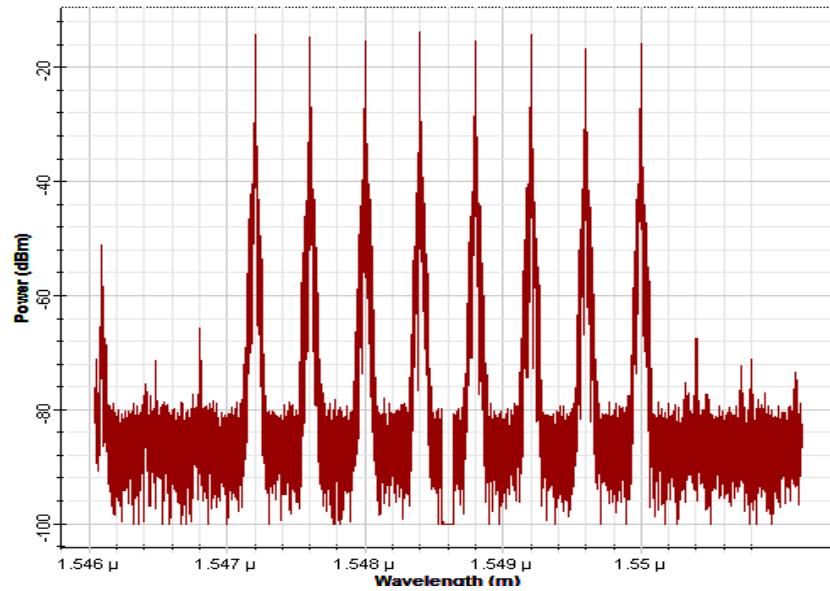
a)

b)

Figura 3-53 Diagrama de ojo de la recepción de la señal por el feeder principal a 90 km a) ONU/ONT downstream b) OLT upstream.

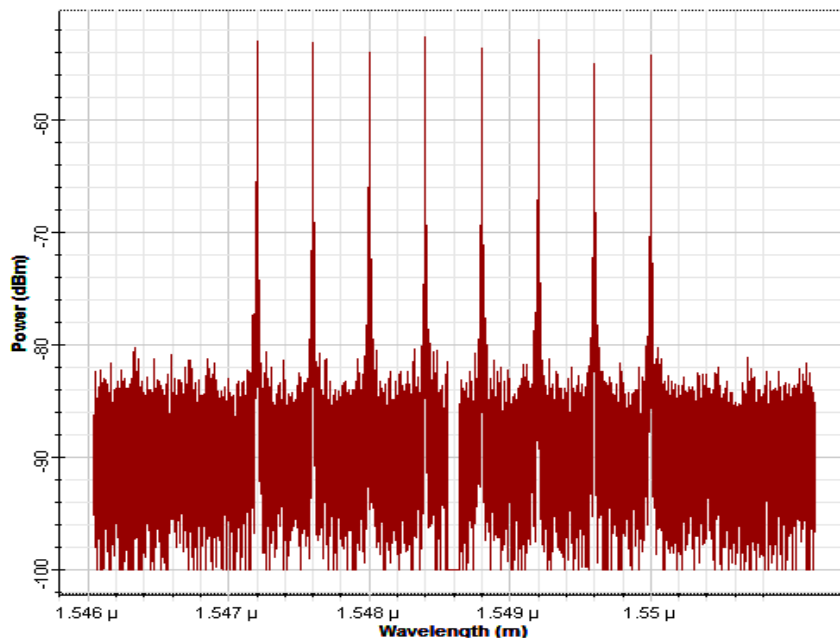
Para el caso del upstream que se ha simulado que la señal recorra el feeder redundante y como se muestran en la Figura 3-54, la potencia de la señal tiene un promedio de -17dBm, mientras que la potencia de la señal que recorre el feeder

Principal tiene en promedio -53dBm como se observa en la Figura 3-55, por lo que a la salida del Monitor de Potencia se enviará un 1 lógico, para que solo se procese la señal del feeder redundante en la OLT como se muestra en la Figura 3-56.



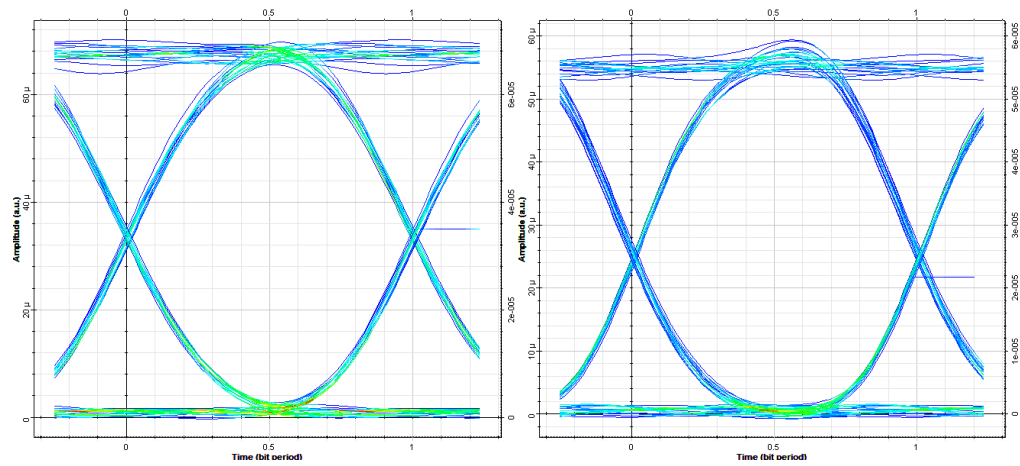
Fuente: Optisystem V 12.2

Figura 3-54 Espectro de la señal en upstream en la OLT por el feeder redundante.



Fuente: Optisystem V 12.2

Figura 3-55 Espectro de la señal en upstream en la OLT por el feeder principal.



Fuente: Optisystem V 12.2

Figura 3-56 Diagrama de ojo de la recepción de la señal por el feeder principal a 60 km a) ONU/ONT downstream b) OLT upstream.

Con los Monitores de Potencia programados en Matlab y en conjunto con los switch ópticos, el sistema LR-PON tiene una disponibilidad en cualquiera de los dos feeder considerados, y de manera automática el sistema en conjunto, determina que señal es la procesada siempre y cuando dicha señal tenga la mayor potencia una vez que ha travesado los dos feeder.

Cabe indicar que la simulación se realiza con elementos bidireccionales, con lo que se demuestra que la conmutación óptica mediante los monitores de potencia se realizar de manera automática.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo final, realizamos las conclusiones al presente trabajo de investigación desarrollado a través de todos los capítulos. En el presente trabajo llevado a cabo, se han observado que a altas tasas de transmisión (> 2.5Gbps) para señales en downstream, los efectos no lineales en la fibra óptica son el mayor factor limitante y necesitan de un manejo adecuado mientras se diseña un sistema de comunicaciones de alta capacidad.

En el presente trabajo se ha realizado el estudio de la Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM), en redes ópticas pasivas de largo alcance, además de crear un sistema de conmutación óptica que permite obtener una redundancia en los feeder que conectan el Terminal de Línea Óptico (OLT) y el Nodo Remoto (NR). El análisis de la Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM) en redes ópticas pasivas, ha sido realizado bajo diferentes condiciones de operación, como son a tasas de bits de 2.5, 5 y 10 Gbps, en formato NRZ y se han realizado comparaciones en formato NRZ contra RZ en ciclos de trabajo de 0,6 y 0,8, operando a una tasa de bits de 2.5 Gbps. Para de la redundancia, se han utilizado simuladores de falla en cada uno de los feeder, para que el sistema de manera totalmente independiente determine la fibra óptica que debe ser procesada.

5.1. Conclusiones

El desempeño del sistema se ve degradado debido a los efectos no lineales en la fibra óptica como son la auto modulación de fase (Self phase modulation SPM),

modulación de fase cruzada (Cross phase modulation XPM) y por la mezcla de cuatro ondas (Four Wave mixing FWM) a tasas de transmisión mayores a 2.5 Gbps. Los resultados obtenidos durante el presente estudio se resumen a continuación:

Capítulo 2: Debido al estudio realizado de los aspectos y elementos de las redes PON y comparando con otras redes de accesos, se concluye que las redes PON tiene una gran proyección y uso en redes convergentes, además de presentar un costo Capex y Opex atractivo para una empresa proveedora de servicio de comunicaciones.

Capítulo 3: Comparando los dos tipos de amplificadores ópticos como son EDFA y SOA, se puede se determina que un amplificador EDFA, es el que debe ser usado para sistema WDM, ya que ofrecen un alto espectro para la amplificación de distintas longitudes de onda, pero con la limitación de que cada una de ellas, recibe una ganancia no uniforme, además de que se debe tener en consideración el efecto que se produce por la dispersión cromática de la señal óptica, que viaja a través de grandes longitudes de fibra.

Capítulo 4: Se muestran las configuraciones realizadas en los distintos elementos del sistema LR-PON previa a la simulación, además del desarrollo de la conmutación óptica a través de la cosimulación con Matlab.

A continuación se muestran las conclusiones obtenidas en los diferentes casos planteados:

- Con el uso de compensadores de dispersión cromática, el sistema de transmisión mejora en un 10% su desempeño, teniendo en cuenta que estos elementos están ubicados a los 50 km de distancia entre la OLT y el NR; El uso de los compensadores se vuelve un factor importante a tener en cuenta, ya que ayudan a mitigar los efectos no lineales sobre los feeder.
- En el caso donde se ha variado los distintos formatos entre NRZ y RZ con ciclos de trabajo de 0.6 y 0.8 a 2.5 Gbps, se ha encontrado que el formato NRZ es el que mejor desempeño muestra en el sistema, seguido por RZ=0.8 y por último RZ=0.6 . El desempeño del sistema con RZ es el peor de los comparados, debido los efectos no lineales de la emisión espontanea amplificada (ASE), en donde el ruido produce que algunos bits incremente su amplitud constructivamente, mientras que en otros produce el efecto contrario. Este ruido induce randomicamente diferentes amplitudes de pulso a lo largo de distintos bits, produciendo que el efecto no lineal de auto modulación se produzca, además se observó que la longitud de onda de 1547.2 nm es la que muestra mejores valores para BER y factor Q.

- Al variar las tasas de transmisión desde 2,5, 5 y 10 Gbps con una ganancia de 3dB en el extensor de alcance para señales de downstream, el valor del BER alcanza un valor de 1×10^{-9} cerca de los 95 km de distancia a 2.5Gbps, mientras que a 5 Gbps la distancia máxima alcanzada es de 90 km, pero a 10 Gbps, en el sistema se deberá implementar técnicas como corrección de errores hacia adelante (forward error correction FEC), para permitir la comunicación. Para el upstream a 2.5Gbps la máxima distancia alcanzada es de 95 km, mientras que a 5 Gbps la distancia máxima es de 80 km y a 10 Gbps se deberá aplicar técnicas como FEC para permitir la comunicación en el sistema.
- Se ha simulado un sistema de ocho canales bidireccionales a 2.5 Gbps a una distancia de 90 km, en donde se ha variado la ganancia en el extensor de alcance (RE), encontrando que el valor de Q para la potencia de la señal de entrada se incrementa hasta los 15dB en downstream y a 20 dB en el upstream, en donde se observa que a partir de estos puntos la señal decrece rápidamente, esto se produce debido a la interferencia intercanal y los efectos no lineales como son XPM y FWM.
- Adicionalmente se analiza el impacto de variar el radio de extinción en el modulador desde 2 a 22 dB, a distancias de transmisión entre 60 km a 100 km, en donde se concluye que cuando se incrementa el radio de extinción

hasta los 20 dB el valor de Q se incrementa pero para un valor superior el sistema se deteriora, es decir para valores mayores el sistema sufre una saturación.

Al investigar el desempeño de un sistema LR-PON con enlaces redundantes, en distintas condiciones al variar ciertos parámetros se puede determinar las siguientes observaciones:

- El desempeño del sistema WDM-PON es afectado de gran manera por los efectos no lineales.
- Los datos que viajan con una velocidad de transmisión menor, pueden alcanzar mayores distancias.
- La máxima distancia alcanzada a 2.5 Gbps fue de 95 km, teniendo en cuenta que se tiene un amplificador de únicamente 3 dB en el extensor de alcance, por lo que aumentado la ganancia de este elemento, se podrían obtener distancias mucho mayores, ya que se pueden contar con amplificadores EDFA de ganancias de 25 dB en promedio e inclusive mayores.
- La simulación muestra que el desempeño del sistema tiene un mejor comportamiento a tasas de bits de 2.5Gbps, tanto en el downstream como en el upstream. El sistema con un formato NRZ también puede alcanzar velocidades de 5 Gbps.

5.2. Recomendaciones

Hoy en día lo que buscan las investigaciones y empresas proveedoras de servicios de telecomunicaciones, es que un sistema tenga un costo efectivo para la convergencia de servicios como son web, datos, internet, televisión, entre otros. Un operador de CATV puede brindar ahora servicios de internet bajo demanda, a través de realizar un multicast óptico en una red PON, mejorando y ofreciendo sus servicios a alta calidad. Ahora entregar al suscriptor videos bajo demanda, streaming en tiempo real y juegos en línea, pueden ser integrados en el sistema, cumpliendo con las necesidades crecientes de ancho de banda de los suscriptores actuales, con lo que se alcanzaría un nuevo concepto de hogares digitales.

Sin embargo todos estos servicios requerirán de seguridad, confianza, economía y abundante ancho de banda, por lo que en el backbone de la red se requerirá una avanzada ingeniería de tráfico, multicast escalable, administración de plataformas de video, almacenamiento y tecnología de comunicaciones ópticas.

Si un sistema está diseñado en base a las siguientes recomendaciones, un sistema de comunicaciones ópticas mejorará notablemente y su tasa de error de bit decrecerá de manera significativa:

- En general el formato NRZ es el más adecuado para sistemas a tasas de bits a 5Gbps, comparando con formatos RZ a distintos ciclos de trabajo. El formato NRZ ha permitido mejorar la sensibilidad del receptor.

- Para sistemas WDM-PON con tasas mayores a 2.5 Gbps, el radio de extinción en el modulador se vuelve un parámetro importante. El valor del radio de extinción de 20 dB es el que mostró mejor desempeño del sistema y en donde el efecto de auto modulación de fase fue mínimo.
- La redundancia en los feeder asegura una alta disponibilidad del sistema en donde se debe garantizar que los SLA que se ofrezca al cliente, sean los más altos para volver al sistema confiable y competitivo frente a otras tecnologías de accesos.

BIBLIOGRAFÍA:

- [1] P. D. Townsend, G. Talli, C. W. Chow, E. M. MacHale, C. Antony, R. Davey, T. De Ridder, X. Z. Qiu, P. Ossieur, H. G. Krimmel, D. W. Smith, I. Lealman, A. Poustie, S. Randel, H. Rohde, "Long Reach Passive Optical Networks", National Chiao Tung UniBERSity IEEE, 2007.
- [2] Huan Song, Byoung-Whi Kim y Biswanath Mukherjee, "Long-Reach Optical Access Networks: A Survey of Research Challenges, Demonstrations, and Bandwidth Assignment Mechanisms", IEEE Communications surveys & Tutorials, Vol 12, N°1, primer cuarto del año.
- [3] Lei Shi, Sang-Soo Lee, Huan Song, and Biswanath Mukherjee, Fellow, IEEE;"Energy-Efficient Long-Reach Passive Optical Network: A Network Planning Approach Based on User Behaviors", IEEE Systems Journal, Vol. 4, No. 4, Diciembre 2010.
- [4] Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan y Galen H. Sasaki. (2010). "Optical Networks A Practical Perspective". Inglaterra: Morgan Kaufmann
- [5] Anu Sheetal, "WDM-Passive Optical Networks", Lambert Academy Publishing,2012
- [6] Maged Abdullah Esmail y Habib Fathallah, "Long Reach PON Management and Protection System Based on Optical Coding," The National Plan for Science & Technology (NPST) program by King Saud UniBERSity, Saudi Arabia, Project Number 09-ELE667-0. IEEE 2011.
- [7] R. Davey, P. Healey, I. Hope, P. Watkinson, D. Payne, O. Marmur, J. Ruhmann, & Y. Zuiderveld "DWDM reach extension of a GPON to 135 km" J. Lihgtwave Technol., pp. 29-31, Enero 2006.
- [8] OECD Organization For Economic CO-Operation and Development, "OECD Communications Outlook" 2013. Capítulo 1.
- [9] Glen Kramer, "Ethernet Passive Optical Networks", Addison-Wesley, 2005.
- [10]Ahmad R. Dhaini, "Next-Generation Passive Optical Networks Challenges and Solutions", AV AkademikerBERlag GmbH & Co. Kg, 20102.
- [11]Stephen Weinstein, Yuanqiu Luo y Ting Wang, "Passive Optical Networks, Enhancing the last miles Access" IEEE Press, 2012.
- [12]Trojer, Elmar, Dahlfort, Stefan, Hood, David y Mickelsson, Hansm "Current and next-generation PONs: A technical oBERview of present and future PON technology", Ericsson Review No. 2, 2008.
- [13]Juan Salvador Asensi Pla, "DESIGN OF PASSIVE OPTICAL NETWORK", Brno UniBERSity of technology, BRNO, 2011.
- [14]Dave Hood y Elmar Trojer, "Gigabit Capable Passive Optical Networks", a Jhon Wiley & Sons INC: Publications, 2012.
- [15]Govind e. Agrawal, "Fiber-Optic Communications Systems", a Jhon Wiley & Sons INC: Publications, 2002.
- [16]Harry J. R. Dutton, "Understanding Optical Communications"; IBM Corporation, International Technical Support Organization, Septiembre 1998.
- [17]Miguel A. Yépez T., "Sistemas láser con amplificadores semiconductores y de fibra óptica", UniBERSidad Nacional Autónoma de México, México DF, 2012.

- [18]Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan y Galen H. Sasaki, "Optical Networks A practical Perspective", Elsevier Inc., 2010.
- [19]Gerd Keiser, "Optical Communications Essentials", the McGraw-Hill Companies, 2003.
- [20]UIT-T G691, "Interfaces ópticas para los sistemas monocanal STM-64 y otros sistemas de la jerarquía digital síncrona con amplificadores ópticos", UIT 29 de marzo de 2006.
- [21]Elena Siren, "Optical Packet Switching", Helsinki UniBERSity of Technology, department of Electrical and Communications Engineering Networking Laboratory, Espoo, Finland, Marzo 26, 2002.
- [22]Byrav Ramamurthy, George Rouskas y Krishna M. Sivalingam, "Next-Generation Internet Architectures and Protocols", Cambridge UniBERSity Press 2011.
- [23] D. Hood y E. Trojer, "GIGABIT-CAPABLE PASSIVE OPTICAL NETWORKS" A JHON WILEY & SONS, 2012.
- [24]UIT-T G652, "Características de la fibra óptica y cable monomodo", UIT 3 de marzo de 2003.
- [25]UIT-T G655, "Características de la dispersión desplazada no nula en fibra óptica y cable monomodo", UIT noviembre de 2009.
- [26]UIT-T G657, "Características de la fibra óptica y cable monomodo insensible a pérdidas por deflexión en redes de acceso ", UIT 29 de octubre de 2012.