

Análisis del desempeño a nivel de simulación de una
amplificación óptica híbrida HOA, para una arquitectura de red
de línea mixta MLR de tipo NG-PON



Universidad
del Cauca

María José Bravo Reyes
Gisselle Adriana Mercado Legarda

Trabajo de Grado

Director:
Gustavo Adolfo Gómez Agredo
MsC. en Electrónica y Telecomunicaciones

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT
Popayán, 2023

Análisis del desempeño a nivel de simulación de una amplificación
óptica híbrida HOA, para una arquitectura de red de línea mixta MLR
de tipo NG-PON

María José Bravo Reyes
Gisselle Adriana Mercado Legarda

Documento final de Trabajo de Grado presentado a la Facultad de Ingeniería en
Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca para optar por el título
de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Director:
MsC. Gustavo Adolfo Gómez Agredo

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT
Popayán, 2023

*Quiero dedicar este trabajo principalmente a Dios,
cuya guía y fortaleza han sido fundamentales en este camino . . .
A mi querida familia, por su amor incondicional y apoyo constante . . .
A mis amigos, por su aliento y compañía en cada etapa de este proyecto.
Sin su apoyo, este logro no habría sido posible.
Gracias a todos por ser mi fuente de inspiración y motivación . . .*

María José Bravo Reyes

*Me gustaría dedicar las primeras frases de mi trabajo
a cierta compañera y mi núcleo familiar,
quienes fueron un apoyo fundamental
en medio de un largo camino,
un tesoro que tuve la fortuna de encontrar . . .
De no haber sido por ellos,
no habría podido escribir ni la primera letra de esta tesis . . .
Siempre hay cosas que investigar en todas partes,
como dice el dicho "la ignorancia es la desgracia del investigador". . .*

Gisselle Adriana Mercado Legarda

AGRADECIMIENTOS

Al MsC. Gustavo Adolfo Gómez Agredo, nuestro director de tesis, por creer en nosotras y su valiosa orientación.

Agradecemos al grupo de investigación de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT y al Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, su apoyo y recursos han sido fundamentales en nuestra formación académica y en la culminación de este proyecto.

Gracias a todos los que, de una u otra forma, contribuyeron a la realización de este trabajo de grado.

A nuestras familias que con paciencia y amor han soportado los errores que hemos cometido y siempre han estado ahí. Sin ellos, no habríamos podido culminar esta etapa de nuestras vidas.

Gracias a cada uno de ustedes por formar parte de esta etapa significativa de nuestras vidas.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABLAS	XI
LISTA DE ACRÓNIMOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XVII
INTRODUCTION	XXI
1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES	1
1.1. Arquitecturas de redes PON	1
1.1.1. Arquitecturas NG-PON1	8
1.1.2. Arquitecturas NG-PON2	12
1.1.3. Redes de Velocidad de Línea Única	18
1.1.4. Redes de Velocidad de Línea Mixta	20
1.2. Amplificación óptica	23
1.2.1. EDFA	25
1.2.2. RAMAN	29
1.2.3. SOA	32
1.2.4. Amplificación óptica híbrida	35
1.3. Monitoreo del Desempeño Óptico	39
1.3.1. Parámetros de monitoreo	40
1.3.2. Correlación de las degradaciones ópticas	43
1.3.3. Técnicas de OPM	53
2. MARCO METODOLÓGICO	57
2.1. Estructura del proyecto	57
2.1.1. Metodología para el control del proyecto	60
2.2. Herramienta de simulación	62
2.2.1. OptSim	62
2.3. Metodología de Simulación	65
2.4. Modelo de simulación	68
2.4.1. Desarrollo del modelo de simulación	68
2.5. Casos de estudio	77

3. Análisis del desempeño de una red óptica MLR-DWDM de tipo NG-PON implementando HOA	79
3.1. AMPLIFICACIÓN ÓPTICA HÍBRIDA EN MODO BOOSTER y PRE-AMPLIFICADOR	79
3.1.1. Caso 1: Amplificador Raman-EDFA en Serie modo Preamplificador	81
3.1.2. Caso 2: Amplificador Raman-EDFA en Paralelo modo Preamplificador	85
3.1.3. Caso 3: Amplificador Raman-EDFA en Serie-Paralelo modo Preamplificador	90
3.1.4. Caso 4: Amplificador Raman-EDFA en Serie modo Booster	94
3.1.5. Caso 5: Amplificador Raman-EDFA en Paralelo modo Booster	99
3.1.6. Caso 6: Amplificador Raman-EDFA en Serie-Paralelo modo Booster	103
4. Conclusiones, Recomendaciones Y Trabajos Futuros	110
4.1. CONCLUSIONES	110
4.2. RECOMENDACIONES	111
4.3. TRABAJOS FUTUROS	112
REFERENCIAS	120
ANEXOS	121

LISTA DE FIGURAS

1.1. Hoja de ruta de evolución de redes PON del grupo FSAN. Tomada de [14].	2
1.2. Arquitectura de red PON desplegada. Tomada de [18].	3
1.3. Arquitectura básica de una red GPON. Adaptada de [8].	6
1.4. Arquitectura HSP. Tomada de [22].	8
1.5. Diagrama coexistencia de GPON y XG-PON. Tomada de [25].	9
1.6. Arquitectura de referencia de la red XG-PON. Tomada de [16].	10
1.7. Escenario de aplicación de redes FTTx en redes XGS-PON. Adaptada de [26].	11
1.8. Arquitectura básica de NG-PON2. Tomada de [27]	13
1.9. Migración de GPON a NG-PON2. Tomada de [27].	13
1.10. Arquitectura lógica de referencia NG-PON2. Tomada de [17].	14
1.11. Asignación de recursos de una red SLR. Adaptada de [30].	19
1.12. Espaciados de sub-banda y canal para sistemas MLR/SLR WDM. Adaptada de [31].	20
1.13. Red óptica de Velocidad de Línea Mixta (MLR). Adaptada de [34]. . .	21
1.14. Arquitectura de red óptica MLR-WDM. Tomada de [35]	22
1.15. Amplificador de Potencia. Adaptada de [38].	24
1.16. Preamplificador. Adaptada de [38].	25
1.17. Amplificador en Línea. Adaptada de [38].	25
1.18. Configuración básica de un EDFA. Adaptada de [37].	26
1.19. Diagrama de transiciones y bandas de EDFA. Adaptada de [42].	27
1.20. Diagrama de transiciones y bandas de EDFA. Adaptada de [42].	28
1.21. Ganancia espectral Raman del silicio. Tomada de [43].	30
1.22. Espectros de ganancia de cinco longitudes de onda de bombeo diferentes [51].	30
1.23. Configuración básica de un Raman. Adaptada de [37].	31
1.24. Configuración básica de un SOA. Adaptada de [37].	32
1.25. Tipos de estructura SOA: a)guías de ondas con perfil en cresta (RW), b) Heteroestructura Enterrada (BH). Tomada de [53].	33
1.26. Estructura de banda simplificada de un semiconductor en cuasi-equilibrio. Tomada de [56].	34
1.27. Tipos de estructura SOA: a)guías de ondas con perfil en cresta (RW), b) Heteroestructura Enterrada (BH). Tomada de [57].	35
1.28. Partición de ganancia en un amplificador. Tomada de [59].	36
1.29. Espectros de ganancia de un amplificador híbrido. Tomada de [59].	37
1.30. HOA Serie. Adaptada de [59].	37
1.31. HOA Paralelo. Adaptada de [59].	38
1.32. HOA Serie-Paralelo. Adaptada de [59].	39
1.33. Niveles del Monitoreo del Desempeño Óptico (OPM). Adaptada de [61].	40
1.34. Factor de Calidad.	41

1.35. Relación Factor Q vs BER.	42
1.36. Medición de la OSNR para un sistema DWDM.	42
1.37. Diagrama de Ojo. (a) Canal NRZ-OOK (2.5 Gbps); (b) Canal RZ-OOK (10 Gbps).	43
1.38. Clasificación de los efectos lineales.	44
1.39. Dispersión por modo de polarización [63].	45
1.40. Dispersión Cromática.	45
1.41. Pérdida de fibra en función de la longitud de onda y la frecuencia.	48
1.42. Clasificación de los efectos no lineales.	48
1.43. Efecto de la SPM sobre un pulso que se propaga.	49
1.44. Principios de la mezcla de cuatro ondas.	50
1.45. Efecto de la FWM en un sistema GPON.	51
1.46. Técnicas OPM.	54
2.1. Actividades trabajo de grado.	59
2.2. Grafo de red de actividades.	62
2.3. Entorno de simulación OptSim.	63
2.4. Técnicas de simulación de la Herramienta OptSim.	64
2.5. Diagrama de flujo para el entorno de simulación.	67
2.6. Escenario general de simulación de la red MLR-DWDM NG-PON inicial.	70
2.7. Diagrama de ojo Back-to-Back para (a) OOK-NRZ a 2.5 (b) OOK-RZ a 10 y (c) DPSK-RZ a 40 Gbps.	71
2.8. Espectro óptico de los 10 canales (a) propagado y (b) después del Splitter de nivel 1.	72
2.9. Espectro óptico en Rx de canal superior para (a) OOK-NRZ a 2.5 (b) OOK-RZ a 10 y (c) DPSK-RZ a 40 Gbps.	73
2.10. Diagrama de ojo en Rx de canal superior para (a) OOK-NRZ a 2.5 (b) OOK-RZ a 10 y (c) DPSK-RZ a 40 Gbps.	73
2.11. Diagrama del ojo Rx en canal superior (a) 2.5 (b) 10 y (c) 40 Gbps con compensación al 100 %.	75
2.12. Espectro óptico en Rx de canal superior para (a) 2.5 (b)10 y (c) 40 Gbps con compensación al 100 %.	76
2.13. Casos de estudio.	77
3.1. Configuraciones de Amplificador Óptico Híbrido para (a) Raman-EDFA configurado en Serie, (b) Raman-EDFA configurado en Paralelo y (c) Raman-EDFA configurado en Serie-Paralelo.	79
3.2. Escenario de simulación del Preamplificador Óptico Híbrido Serie.	80
3.3. Escenario de simulación del Amplificador Óptico Híbrido modo Booster.	81
3.4. Espectro óptico de los 10 canales dispuesto en recepción (a) no amplificados (b) implementando Preamplificador Raman-EDFA en Serie.	82

3.5.	Diagrama de ojo de la red MLR-DWDM implementando Preamplificador Raman-EDFA Serie para el canal (a) CH 1: DPSK-RZ 40 Gbps (b) CH 2: OOK-RZ 10 Gbps (c) CH 4: OOK-NRZ 2.5 Gbps y (d) CH 10: DPSK-RZ 40 Gbps.	83
3.6.	BER vs longitud del segmento de alimentación para los canales (a) CH1: 40 Gbps (b) CH2: 10 Gbps (c) CH4: 2.5 Gbps (d) CH10: 40 Gbps. . . .	84
3.7.	Factor Q vs longitud del segmento de alimentación para los canales (a) CH1: 40 Gbps (b) CH2: 10 Gbps (c) CH4: 2.5 Gbps (d) CH10: 40 Gbps.	84
3.8.	Potencia Recepción vs longitud del segmento de alimentación para los canales (a) CH1: 40 Gbps (b) CH2: 10 Gbps (c) CH4: 2.5 Gbps (d) CH10: 40 Gbps.	85
3.9.	Espectro óptico de los 10 canales dispuesto en recepción (a) no amplificados (b) implementando Preamplificador Raman-EDFA Paralelo. . . .	86
3.10.	Diagrama de ojo de la red MLR-DWDM implementando el Preamplificador Raman-EDFA Paralelo (a) CH1: 40 Gbps (b) CH2: 10 Gbps (c) CH4: 2.5 Gbps (d) CH10: 40 Gbps.	87
3.11.	Potencia de recepción vs longitud del segmento de alimentación en un rango de 20 a 120 km para los canales de recepción de (a) 2.5 Gbps (b) 10 Gbps y (c) 40 Gbps.	88
3.12.	Factor Q vs longitud del segmento de alimentación en un rango de 20 a 120 km para los canales de recepción de (a) 2.5 Gbps (b) 10 Gbps y (c) 40 Gbps.	89
3.13.	Tasa de Error de Bit (BER) vs longitud del segmento de alimentación en un rango de 20 a 60 km para los canales de recepción (a) CH 1: 40 Gbps (b) CH 2: 10 Gbps (c) CH 4: 2.5 Gbps y (d) CH 10: 40 Gbps. . .	89
3.14.	Espectro óptico de los 10 canales dispuesto en recepción (a) no amplificados (b) con Preamplificador Raman-EDFA Serie-Paralelo.	91
3.15.	Diagramas de Ojo para la Configuración Óptima del Preamplificador Serie-Paralelo (a) CH1:40 Gbps (b) CH2: 10 Gbps (c) CH4: 2.5 Gbps (d) CH10: 40 Gbps.	91
3.16.	Factor Q vs longitud del segmento de alimentación en un rango de 20 a 120 km para los canales de recepción de (a) 2.5 Gbps (b) 10 Gbps y (c) 40 Gbps.	93
3.17.	Potencia de recepción vs longitud del segmento de alimentación en un rango de 20 a 120 km para los canales de recepción de (a) 2.5 Gbps (b) 10 Gbps y (c) 40 Gbps.	93
3.18.	Tasa de Error de Bit (BER) vs longitud del segmento de alimentación en un rango de 20 a 120 km para los canales de recepción (a) CH 1: 40 Gbps (b) CH 2: 10 Gbps (c) CH 4: 2.5 Gbps y (d) rango de 20 a 80 km para el canal CH 10: 40 Gbps.	94
3.19.	Espectro óptico de los 10 canales de recepción dispuesto en la red MLR-DWDM (a) no amplificada y (b) amplificada.	95

3.20. Diagramas de ojo para la red MLR-DWDM implementando el amplificador Serie en modo Booster (a) CH1:40 Gbps (b) CH2: 10 Gbps (c) CH4: 2.5 Gbps (d) CH10: 40 Gbps.	96
3.21. Potencia de recepción vs longitud del segmento de alimentación en un rango de 20 a 120 km para los canales de recepción de (a) 2.5 Gbps (b) 10 Gbps y (c) 40 Gbps.	98
3.22. Factor Q vs longitud del segmento de alimentación en un rango de 20 a 120 km para los canales de recepción de (a) 2.5 Gbps (b) 10 Gbps y (c) 40 Gbps.	98
3.23. Tasa de Error de Bit (BER) vs longitud del segmento de alimentación en un rango de 20 a 120 km para los canales de recepción (a) CH 1: 40 Gbps (b) CH 2: 10 Gbps (c) CH 4: 2.5 Gbps y (d) rango de 20 a 80 km para el canal CH 10: 40 Gbps.	99
3.24. Espectro óptico de los 10 canales en recepción de la red MLR-DWDM (a) no amplificada y (b) amplificada con un Raman-EDFA Paralelo en modo Booster.	100
3.25. Diagramas de ojo para la red MLR-DWDM implementando el amplificador Paralelo en modo Booster (a) CH1:40 Gbps (b) CH2: 10 Gbps (c) CH4: 2.5 Gbps (d) CH10: 40 Gbps.	101
3.26. Factor Q vs longitud del tramo de la fibra para la Configuración Óptima del amplificador en modo Booster Paralelo (a) 40 Gbps (b) 10 Gbps y (c) 2.5 Gbps.	102
3.27. Potencia en recepción vs distancia de para la Configuración Óptima del amplificador en modo Booster Paralelo (a) 40 Gbps (b) 10 Gbps y (c) 2.5 Gbps.	103
3.28. BER vs longitud del tramo de fibra de la red de alimentación para la Configuración Óptima del amplificador en modo Booster Serie-Paralelo (a)CH1:40 Gbps (b) CH2: 10 Gbps (c) CH4: 2.5 Gbps (d) CH10: 40 Gbps.	103
3.29. Espectro óptico de los 10 canales dispuesto en (a) la red no amplificada (b) la red amplificada.	105
3.30. Diagramas de ojo para la red MLR-DWDM implementando el amplificador Serie-Paralelo modo Booster (a) CH1:40 Gbps (b) CH2: 10 Gbps (c) CH4: 2.5 Gbps (d) CH10: 40 Gbps.	106
3.31. Factor Q vs longitud del tramo de la fibra para la Configuración Óptima del amplificador en modo Booster Paralelo (a) 40 Gbps (b) 10 Gbps y (c) 2.5 Gbps.	107
3.32. Potencia de recepción vs distancia de para la Configuración Óptima del amplificador en modo Booster Paralelo (a) 40 Gbps (b) 10 Gbps y (c) 2.5 Gbps.	107
3.33. BER vs longitud del tramo de fibra de la red de alimentación para la Configuración Óptima del amplificador en modo Booster Serie-Paralelo (a) CH1:40 Gbps (b) CH2: 10 Gbps (c) CH4: 2.5 Gbps (d) CH10: 40 Gbps.	108

LISTA DE TABLAS

1.1.	Comparativo tecnológico NG-PON1 vs NG-PON2.	16
1.2.	Deficiencias ópticas en sistemas coherentes de 40Gb/s y 100 Gb/s que utilizan formatos de modulación avanzadas.	51
1.3.	Deficiencias ópticas en sistemas de hasta 10Gb/s que utilizan codificación de línea con o sin retorno a cero.	52
1.4.	Lista de correlación entre las deficiencias señaladas y los parámetros de supervisión.	53
2.1.	Diagrama de actividades.	61
2.2.	Modelo General del sistema según las recomendaciones ITU-T.	69
2.3.	Condiciones iniciales de los parámetros de monitoreo.	73
2.4.	Parámetros OPM para compensación de 25 - 100 %.	75
2.5.	Condiciones iniciales de los parámetros de monitoreo con una compensación al 100 %.	77
3.1.	Configuración de los parámetros de simulación para el amplificador híbrido Raman-EDFA en modo Preamplificador y Booster.	80
3.2.	Configuración del amplificador Raman-EDFA en Serie en modo Preamplificado.	81
3.3.	Parámetros OPM para la red MLR-DWDM implementando el Amplificador Óptico Híbrido Raman-EDFA en Serie en modo Preamplificador.	82
3.4.	Parámetros OPM en los rangos de distancias de 20 - 60 km.	84
3.5.	Configuración del amplificador Raman-EDFA en Paralelo en modo Preamplificado.	85
3.6.	Parámetros OPM para la red MLR-DWDM implementando el amplificador híbrido Raman-EDFA Paralelo en modo Preamplificador.	86
3.7.	Parámetros OPM en los rangos de distancias de 20 - 60 km.	88
3.8.	Configuración del amplificador Raman-EDFA en Serie-Paralelo modo Preamplificado.	90
3.9.	OPM de simulación para el amplificador híbrido Raman-EDFA Serie-Paralelo en modo Preamplificador.	90
3.10.	Parámetros OPM en los rangos de distancias de 20 - 60 km.	92
3.11.	Configuración del amplificador Raman-EDFA en Serie en modo Booster.	94
3.12.	Parámetros OPM de la red MLR-DWDM implementando el amplificador Raman-EDFA en modo Booster disposición en Serie.	95
3.13.	Parámetros OPM en los rangos de distancias de 20 - 60 km.	97
3.14.	Configuración del amplificador Raman-EDFA en Paralelo modo Booster.	99
3.15.	Parámetros OPM de la red MLR-DWDM implementando el amplificador Raman-EDFA en modo Booster configurado en Paralelo.	100
3.16.	Parámetros OPM en los rangos de distancias de 20 - 60 km.	102

3.17. Configuración del amplificador Raman-EDFA en Serie-Paralelo en modo Booster.	104
3.18. Parámetros OPM de la red implementando amplificador Raman-EDFA en modo Booster configurado en Serie-Paralelo.	104
3.19. Parámetros OPM en los rangos de distancias de 20 - 60 km.	106
3.20. Análisis comparativo de los casos de estudio.	108

LISTA DE ACRÓNIMOS

ASE	Emisión Espontánea Amplificada (<i>Amplified Spontaneous Emission</i>)
BA	Amplificador de Potencia (<i>Booster Amplifier</i>)
BER	Tasa de Error de Bit (<i>Bit Error Rate</i>)
CD	Dispersión Cromática (<i>Chromatic Dispersion</i>)
CO	Oficina Central (<i>Central Office</i>)
DCF	Fibra Compensadora de Dispersión (<i>Dispersion Compensating Fiber</i>)
DGD	Retardo Diferencial de Grupo (<i>Differential Group Delay</i>)
DPSK	Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase (<i>Differential Phase Shift Keying</i>)
DQPSK	Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura Diferencial (<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i>)
DS	Descendente (<i>Downstream</i>)
DWDM	Multiplexación de División de Longitud de Onda Densa (<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>)
EDFA	Amplificador de Fibra Dopada con Erblio (<i>Erbium-Doped Fiber Amplifier</i>)
FWM	Mezcla de Cuatro Ondas (<i>Four Wave Mixing</i>)
FSAN	Red de Acceso de Servicio Completo (<i>Full Service Access Network</i>)
FTTB	Fibra hasta el Edificio (<i>Fiber to the Building</i>)
FTTC	Fibra Hasta El Gabinete (<i>Fiber To The Cabinet</i>)
FTTH	Fibra Hasta El Hogar (<i>Fiber To The Home</i>)
FTTN	Fibra Hasta El Nodo (<i>Fiber To The Node</i>)
FTTx	Fibra Hasta La x, Fibra Hasta El Lugar (<i>Fiber To The x</i>)

GPON	Red Óptica Pasiva con Capacidad de Gigabit (<i>Gigabit-Capable Passive Optical Network</i>)
HOA	Amplificador Óptico Híbrido (<i>Hybrid Optical Amplifier</i>)
IoT	Internet de las Cosas (<i>Internet of Things</i>)
ITU-T	Sector de Estandarización de Telecomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (<i>International Telecommunication Union - Telecommunications Standardization Sector</i>)
LA	Amplificador de Línea (<i>Line Amplifier</i>)
MAN	Red de Área Metropolitana (<i>Metropolitan Area Network</i>)
MLR	Velocidad de Línea Mixta (<i>Mixed Line-Rate</i>)
NF	Figura de Ruido (<i>Noise Figure</i>)
NG-PON	Red Óptica Pasiva de Nueva Generación (<i>New Generation Passive Optical Networks</i>)
NG-PON1	Redes Ópticas Pasivas de Próxima Generación etapa 1 (<i>Next-Generation Passive Optical Networks stage 1</i>)
NG-PON2	Redes Ópticas Pasivas de Próxima Generación etapa 2 (<i>Next-Generation Passive Networks Stage 2</i>)
NG-PON2	Redes Ópticas Pasivas con Capacidad de 40 Gigabits (<i>40-Gigabit-capable Passive Optical Networks</i>)
NRZ	No Retorno a Cero (<i>Non-Return-to-Zero</i>)
OAN	Red de Acceso Óptico (<i>Optical Access Network</i>)
ODN	Red de Distribución Óptica (<i>Optical Distribution Network</i>)
ODS	Segmento de Distribución Óptica (<i>Optical Distribution Segment</i>)
OLT	Terminal de Línea Óptica (<i>Optical Line Terminal</i>)
ONU	Unidad de Red Óptica (<i>Optical Network Unit</i>)
OOK	Modulación Digital de Amplitud (<i>On-Off Keying</i>)
OPM	Monitoreo del Desempeño Óptico (<i>Optical Performance Monitoring</i>)
OSNR	Relación Señal a Ruido Óptica (<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i>)

OXC	Conectores Ópticos Cruzados (<i>Optical Cross-Connects</i>)
PA	Preamplificador (<i>Pre-Amplifier</i>)
PERT	Técnica de Revisión y Evaluación de Programas (<i>Program Evaluation and Review Technique</i>)
PMD	Dispersión por Modo de Polarización (<i>Polarization Mode Dispersion</i>)
PON	Red Óptica Pasiva (<i>Passive Optical Network</i>)
QPSK	Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>)
RE	Extensores de Alcance (<i>Reach Extenders</i>)
RFA	Amplificador Óptico Raman (<i>Raman Fiber Amplifier</i>)
RZ	Retorno a Cero (<i>Return-to-Zero</i>)
SBS	Difusión/Dispersión Estimulada de Brillouin (<i>Stimulated Brillouin Scattering</i>)
SLA	Acuerdo de Nivel de Servicio (<i>Service Level Agreement</i>)
SLR	Velocidad de Línea Única (<i>Single Line-Rate</i>)
SMF	Fibra Óptica Monomodo (<i>Single-Mode Optical Fiber</i>)
SOA	Amplificador Óptico Semiconductor (<i>Semiconductor Optical Amplifier</i>)
SONET	Red Óptica Síncrona (<i>Synchronous Optical Network</i>)
SPM	Modulación de Auto-Fase (<i>Self-Phase Modulation</i>)
SRS	Dispersión Raman Estimulado (<i>Stimulated Raman Scattering</i>)
TDM	Multiplexación por División de Tiempo (<i>Time Division Multiplex</i>)
TDMA	Acceso Múltiple por División de Tiempo (<i>Time Division Multiple Access</i>)
TWDM	Multiplexación por División de Tiempo y Longitud de Onda (<i>Time and Wavelength Division Multiplexed</i>)
TWDM-PON	Red Óptica Pasiva Multiplexada por División de Longitud de Onda y Tiempo (<i>Time and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Networks</i>)

WAN	Red de Área Amplia (<i>Wide Area Network</i>)
WDM	Multiplexación por División de Longitud de Onda (<i>Wavelength Division Multiplexing</i>)
XG-PON	Red Óptica Pasiva de 10 Gigabits (<i>10-Gigabit-capable Passive Optical Network</i>)
XGS-PON	Redes Ópticas Pasivas simétricas con Capacidad de 10 Gigabit (<i>10-Gigabit-capable Symmetric Passive</i>)
XPM	Modulación de Fase Cruzada (<i>Cross-Phase Modulation</i>)
XT	Diafonía (<i>Crosstalk</i>)

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las telecomunicaciones han experimentado un gran desarrollo y crecimiento. El aumento de la transmisión de información en los sistemas de comunicación ha llevado a la creación de mecanismos capaces de soportar y procesar grandes cantidades de datos. Entre las distintas alternativas que se han utilizado en los sistemas de telecomunicaciones, la red óptica es una de las soluciones más eficientes que puede satisfacer la demanda de alta velocidad de datos y disponibilidad de ancho de banda en comparación con cualquier otro sistema [1].

Las redes ópticas evolucionan constantemente con el objetivo de proporcionar un mayor ancho de banda en el acceso a la red, lo cual se logra mediante la implementación de cables de fibra que permiten la transmisión a altas velocidades y disponen de un gran ancho de banda. En la evolución de la red de fibra óptica se encuentran redes de nueva generación a partir de la Red Óptica Síncrona (SONET, *Synchronous Optical Network*), la Red Óptica Pasiva (PON, *Passive Optical Network*) y actualmente la Red Óptica Pasiva de Nueva Generación (NG-PON, *Next Generation Passive Optical Network*). Muchas redes permiten emplear diferentes técnicas de acceso múltiple, como la Multiplexación por División de Tiempo (TDM, *Time Division Multiplexing*), la Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*) y la Multiplexación por División de Tiempo y Longitud de Onda (TWDM, *Time and Wavelength Division Multiplexed*) [2].

Aunque los sistemas de comunicación óptica cuentan con diversas ventajas, después de recorrer largas distancias, la señal empezará a degradarse debido a la pérdida de potencia e imperfecciones en la fibra óptica, lo que genera fenómenos de birrefringencia ya sea por defectos de fábrica o mala manipulación. En estos casos, la señal requiere un aumento en el nivel de potencia. Sin embargo, esto plantea importantes desafíos en las redes ópticas WDM, como la atenuación, la pérdida de señal, la degradación de la señal debido a la dispersión y los efectos de tipo lineal y no lineal. Estos efectos se pueden minimizar mediante un diseño de red óptica que implemente procesos de amplificación adecuados [3].

Para la compensación de atenuación y degradación de las señales, tradicionalmente eran utilizados regeneradores que requerían la conversión de señales de un dominio a otro, la señal óptica era convertida al dominio eléctrico, amplificada electrónicamente y convertida nuevamente al dominio óptico. Estos regeneradores fueron reemplazados por amplificadores ópticos, los cuales no necesitan pasar la señal al dominio eléctrico. Un amplificador óptico cuenta con la capacidad de mantener el ancho de banda, aumentar la tasa de bits y el espaciado entre nodos de retransmisión. Los amplificadores

ópticos convencionales utilizados para las redes son: i) Amplificador Óptico Semiconductor (SOA, *Semiconductor Optical Amplifier*), el cual cuenta con las ventajas de un manejo de ancho de banda considerable y del control por corriente, sin embargo este tipo de dispositivos, genera inconvenientes debido a su sensibilidad de polarización, diafonía, alto factor de ruido y pequeña potencia de saturación; ii) Amplificador de Fibra Dopada con Erblio (EDFA, *Erbium-Doped Fiber Amplifier*), que en mayor parte son utilizados para comunicaciones a grandes distancias, permitiendo controlar el tipo de régimen de propagación para un entorno cuasi-lineal, el cual se considera una de las mejores opciones para ser implementado en redes ópticas WDM ya que hace posible la amplificación sin crosstalk entre los canales adyacentes; iii) Amplificador de Fibra Raman (RFA, *Raman Fiber Amplifier*), que disminuye las no linealidades del sistema y recupera la Figura de Ruido (NF, *Noise Figure*), además, reduce la emisión de ruido, lo cual es ideal para los sistemas de amplificación híbridos [1].

Para la transmisión de una gran cantidad de canales a larga distancia, se emplean amplificadores convencionales para diseñar un nuevo amplificador óptico de tipo híbrido. El Amplificador Óptico Híbrido (HOA, *Hybrid Optical Amplifier*) es una combinación de dos o más amplificadores conectados en diferentes configuraciones, cascada o paralelo proporcionando una alta ganancia de potencia que es adecuada para la transmisión de ultra largas distancias. [4] proponen diferentes configuraciones de Amplificadores Ópticos Híbridos (SOA-EDFA, EDFA-EDFA, EDFA-Raman), donde se examina el rendimiento a partir del factor de calidad (dB), la potencia de salida máxima (dBm), la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*) y la apertura del diagrama de ojo, variando la distancia de transmisión de 20 a 180 km logrando demostrar que el Amplificador Óptico Híbrido EDFA-Raman proporciona mejores resultados que las otras configuraciones dentro del desempeño del sistema. Este tipo de configuraciones, son las que van a permitir soluciones para las nuevas redes ultra amplias donde se requieren procesos de amplificación complejos que permitan llegar mucho más lejos reduciendo el número de saltos. Teniendo en cuenta que la comunicación de la red óptica futura estará limitada principalmente por el costo y el consumo de energía, sería importante realizar un análisis de costo eficiencia o realizar un análisis basado en la operación y expansión de la red.

A medida que la demanda de alta velocidad de datos aumenta rápidamente, una red óptica que emplea varias velocidades de línea se ha convertido en una necesidad, con la flexibilidad necesaria para hacer frente a la heterogeneidad del tráfico de la red. Las redes ópticas con Velocidad de Transmisión de Línea Mixta (MLR, *Mixed Line-Rate*) brindan versatilidad en el aprovisionamiento de demandas de ancho de banda, ya que incorpora líneas de diferentes velocidades de datos como 10 Gbps, 40 Gbps y 100 Gbps, con diferentes formatos de modulación. Según [5], una red de tipo MLR es más eficiente en comparación con la red óptica de Velocidad de Línea Única (SLR, *Single Line-Rate*). De los estudios existentes sobre las redes MLR, [6] infiere que, “según la configuración del canal, el formato de modulación y la longitud del enlace, una red con eficiencia espectral puede superar a una red con eficiencia energética” (p. 338). Por otra parte, los sistemas basados en WDM, actualmente se transportan velocidades de transmisión

de datos no simétricos a nivel de acceso del orden de 10 Gbps por canal, donde debido al aumento de las diversas demandas de tráfico, ya se han introducido velocidades de hasta 40 Gbps y se están diseñando redes que permitan la implementación de canales de hasta 100 Gbps. Idealmente, estas diferentes velocidades deberían coexistir permitiendo la prestación de servicios heterogéneos [6].

Por otro lado, se destaca la Red Óptica Pasiva Multiplexada por División de Longitud de Onda y Tiempo (TWDM-PON, *Time and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Networks*) para Redes Ópticas Pasivas de Nueva Generación etapa 2 (NG-PON2, *Next-Generation Passive Networks Stage 2*) dado que es compatible con la alta flexibilidad de asignación de recursos, en lugar de limitar el ancho de banda en todo momento a cada cliente, esta opción permite compartir estadísticamente el espectro disponible para la transmisión y brinda flexibilidad para garantizar que los clientes obtengan acceso a una velocidad de 10 Gbps lo que le permite adaptarse de manera eficiente a las variadas demandas de tráfico del usuario final [7].

Sin embargo, no existe ningún estudio en la literatura que investigue el desempeño de una arquitectura de red basada en una línea mixta cuando se implementa amplificación de tipo híbrida. La presente investigación, se realiza con base en los trabajos futuros propuestos por los trabajos de pregrado titulados “*Análisis de Desempeño en un Enlace de Bajada XGS-PON con Amplificación Híbrida HOA*” [8] y “*Análisis a nivel de simulación del desempeño en la migración de una red óptica SLR-DWDM a una red óptica MLR-DWDM implementando diferentes arquitecturas de red de banda ancha FTTx*” [9] desarrollados en la facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca.

Capítulo 1: Conceptos Fundamentales. En este capítulo, se describirán en detalle los amplificadores ópticos pasivos, la arquitectura NG-PON, las redes SLR y MLR, y finalmente el modelo de referencia OPM.

Capítulo 2: Marco Metodológico. En este capítulo se definen la metodología y herramientas de simulación, mediante las cuales se hará el diseño y desarrollo de un modelo de red inicial y que posteriormente permitirán el planteamiento de los casos de estudio y escenarios de simulación para el presente trabajo.

Capítulo 3: Análisis del Desempeño de Redes Ópticas MLR-DWDM implementando amplificadores HOA. En este capítulo se realiza el análisis del desempeño de los modelos de red MLR que implementan diferentes configuraciones de Amplificadores Ópticos Híbridos obtenidos a partir de los casos de estudio y escenarios propuestos previamente, esto con el fin de identificar aquellas características y parámetros que intervienen para lograr que dichas configuraciones HOA trabajen en óptimas condiciones.

Capítulo 4: Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros. En este capítulo se presentan conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros relacionados con los aspectos más importantes de la presente investigación que permitieron diseñar, configurar e implementar amplificadores HOA eficientes y que a su vez aportaron en la realización de los objetivos propuestos.

Palabras clave:

Amplificación Óptico Híbrido (HOA), Monitoreo del Desempeño Óptico (OPM), Multiplexación por División de Longitud de onda Densa (DWDM), Red Óptica Pasiva de Nueva Generación (NG-PON), Velocidad de Transmisión de Línea Mixta (MLR).

INTRODUCTION

In recent years, telecommunications has experienced significant development and growth. The increase in information transmission in communication systems has created mechanisms capable of supporting and processing large amounts of data. Among the various alternatives used in telecommunications systems, the optical network is one of the most efficient solutions that can meet the demand for high-speed data and bandwidth availability compared to any other system [1].

Optical networks are constantly evolving to provide greater bandwidth in network access, which is achieved through the implementation of fiber optic cables that allow high-speed transmission and have a large bandwidth. In the evolution of the fiber optic network, new generation networks have been found, starting from the Synchronous Optical Network (SONET), the Passive Optical Network (PON), and currently, the Next Generation Passive Optical Network (NG-PON). Many networks allow the use of different multiple access techniques, such as time division multiplexing (TDM), wavelength division multiplexing (WDM), and time and wavelength division multiplexed (TWDM) [2].

Although optical communication systems have various advantages, the signal will begin to degrade after traveling long distances because of power loss and imperfections in the optical fiber. These imperfections generate birefringence phenomena due to factory defects or poor handling. In these cases, the signal requires an increase in the power level. However, this poses significant challenges in WDM optical networks, such as attenuation, signal loss, signal degradation due to dispersion, and linear and nonlinear effects. These effects can be minimized by implementing appropriate amplification processes in optical network design [3].

For the compensation of attenuation and signal degradation, regenerators were traditionally used that required the conversion of signals from one domain to another. The optical signal was converted to the electrical domain, electronically amplified, and then back to the optical domain. Optical amplifiers replaced these regenerators, and they do not need to pass the signal to the electrical domain. An optical amplifier can maintain bandwidth and increase the bit rate and spacing between retransmission nodes. Conventional optical amplifiers used for networks are: i) semiconductor optical amplifier (SOA), which has the advantages of considerable bandwidth management and current control. However, this type of device generates problems due to its polarization sensitivity, crosstalk, high noise factor, and small saturation power; ii) erbium-doped fiber amplifier (EDFA), which is mostly used for long-distance communications, allowing

control of the propagation regime type for a quasi-linear environment, which is considered one of the best options to be implemented in WDM optical networks since it makes possible amplification without crosstalk between adjacent channels; iii) Raman fiber amplifier (RFA), which reduces system nonlinearities and recovers noise figure (NF); in addition, it reduces noise emission, which is ideal for hybrid amplification systems [1].

Conventional amplifiers are used to design a new type of hybrid optical amplifier that transmits several channels over long distances. The hybrid optical amplifier combines two or more amplifiers connected in different configurations, cascade or parallel, providing high power gain suitable for ultralong distance transmission. [4] proposed different configurations of hybrid optical amplifiers (SOA-EDFA, EDFA-EDFA, EDFA-Raman), where performance is examined based on quality factor (dB), maximum output power (dBm), minimum bit error rate (BER), and eye diagram opening, varying the transmission distance from 20 to 180 km, demonstrating that the EDFA-Raman hybrid optical amplifier provides better results than the other configurations within the system performance. These types of configurations allow solutions for new ultrawide networks where complex amplification processes are required to reach much further while reducing the number of hops. Considering that future optical network communication will be limited mainly by cost and energy consumption, performing a cost-efficiency analysis or an analysis based on network operation and expansion would be important.

As the demand for high-speed data increases rapidly, an optical network employing various line speeds has become necessary, with the flexibility to deal with network traffic heterogeneity. Optical networks with mixed line rate (MLR) transmission speed provide versatility in bandwidth provisioning because, they incorporate lines of different data speeds, such as 10 Gbps, 40 Gbps, and 100 Gbps, with different modulation formats. According to [5], an MLR network is more efficient than a single line-rate (SLR) optical network. From existing studies on MLR networks, [6] infers that “depending on the channel configuration, modulation format, and link length, a spectral-efficient network can outperform an energy-efficient network” (p. 338). On the other hand, systems based on wavelength division multiplexing (WDM) currently transport nonsymmetric data transmission speeds at the access level of around 10 Gbps per channel, where speeds of up to 40 Gbps have already been introduced due to the increase in various traffic demands. Networks are being designed to allow the implementation of channels up to 100 Gbps. Ideally, these different speeds should coexist, allowing for heterogeneous services [6].

On the other hand, Time and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Networks (TWDM-PON) is highlighted for Next Generation Passive Optical Network 2 (NG-PON2) because it is compatible with high resource allocation flexibility. Instead, of limiting bandwidth to each client at all times, this option allows statistical sharing of the available spectrum for transmission and provides flexibility to ensure that customers have access to a speed of 10 Gbps, which allows it to adapt efficiently to the varied traffic demands of the end user [7].

However, no study has investigated the performance of a network architecture based on a mixed line when hybrid amplification is implemented. This research is based on future work proposed by undergraduate works entitled “*Análisis de Desempeño en un Enlace de Bajada XGS-PON con Amplificación Híbrida HOA*” [8] and “*Análisis a nivel de simulación del desempeño en la migración de una red óptica SLR-DWDM a una red óptica MLR-DWDM implementando diferentes arquitecturas de red de banda ancha FTTx*” [9] developed at the Faculty of Electronic and Telecommunications Engineering at the University of Cauca.

Chapter 1: Fundamental Concepts. In this chapter, passive optical amplifiers, NG-PON architecture, SLR and MLR networks, and finally the OPM reference model will be described in detail.

Chapter 2: Methodological Framework. In this chapter, the methodology and simulation tools will be defined, through which the design and development of an initial network model will be carried out, which will subsequently allow the formulation of study cases and simulation scenarios for this work.

Chapter 3: Performance Analysis of MLR-DWDM Optical Networks Implementing HOA Amplifiers. In this chapter, the performance analysis of MLR network models that implement different configurations of hybrid optical amplifiers obtained from the previously proposed study cases and scenarios is carried out, in order to identify those characteristics and parameters that intervene to achieve optimal working conditions for such HOA configurations.

Chapter 4: Conclusions, Recommendations, and Future Work. In this chapter, conclusions, recommendations, and future work related to the most important aspects of this research that allowed the design, configuration, and implementation of efficient HOA amplifiers that also contributed to the achievement of the proposed objectives are presented.

Keywords:

Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM), Hybrid Optical Amplification (HOA), Mixed-Line-Rate (MLR), Next Generation Passive Optical Network (NG-PON), Optical Performance Monitoring (OPM).

CAPÍTULO 1

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

En las últimas décadas, la creciente demanda de ancho de banda en las redes de telecomunicaciones ha llevado a la implementación de tecnologías ópticas avanzadas para la transmisión de datos. Entre ellas, destacan las Redes de Acceso Óptico (OAN, *Optical Access Networks*), que son la principal forma de conectar los usuarios finales a la red de telecomunicaciones. Entre las OAN, se encuentra la arquitectura de red NG-PON, que se caracteriza por su alta capacidad de transmisión y eficiencia energética. La arquitectura NG-PON se divide en dos tipos de redes: las redes de Velocidad de Línea Única (SLR) y las redes de Velocidad de Línea Mixta (MLR), que se diferencian en la forma en que manejan la demanda del tráfico heterogéneo de datos.

Una de las tecnologías clave para la transmisión óptica de larga distancia es el amplificador óptico, que aumenta la intensidad de la señal óptica sin necesidad de convertirla en señal eléctrica. En particular, los amplificadores ópticos pasivos son ampliamente utilizados en redes de acceso óptico debido a su bajo costo y consumo de energía. Para garantizar la eficiencia y fiabilidad de las redes ópticas, se ha utilizado un modelo de referencia de capas llamado Monitoreo del Desempeño Óptico (OPM, *Optical Performance Monitoring*), que proporciona una manera sistemática de identificar, localizar y solucionar problemas en la capa física de las redes ópticas.

1.1. Arquitecturas de redes PON

El aumento en el número de usuarios en las redes y la demanda de velocidad de transmisión de datos masivos, ha dirigido la atención hacia enlaces innovadores de punto a multipunto, los cuales deben satisfacer las necesidades del tráfico heterogéneo de la red y el tráfico de información sea casi instantáneo. La mejor solución son los cables de fibra óptica que transfieren datos mediante señales de luz láser, representando el método definitivo para transferir datos en todo el mundo instantáneamente.

Es esencial que los sistemas de comunicación óptica se desarrollen para suplir el aumento de la demanda de tráfico de usuarios, para disminuir efectivamente el retraso de la red y mejorar la utilización de los recursos. Por lo tanto, los estándares tienen un papel importante en la definición de dichos sistemas para impulsar volúmenes de componentes comunes y fomentar la diversidad en la cadena de suministro para reducir los costos a través de la competencia.

Hoja de ruta FSAN y estándares PON ITU-T

El grupo de tareas de la ITU, Red de Acceso de Servicio Completo (FSAN, *Full Service Access Network*) [10], creado en 1995, es una asociación a nivel mundial de la industria de compañías de operadores de telecomunicaciones, laboratorios de pruebas independientes y proveedores de equipos, que tienen como objetivo común investigar y desarrollar avances de redes, tecnologías y servicios de las redes de acceso óptico. FSAN trabaja en colaboración con el Sector de Estandarización de Telecomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-T, *International Telecommunication Union - Telecommunications Standardization Sector*) [11] en el desarrollo de nuevos estándares que buscan lograr una transmisión de alta capacidad, servicios múltiples eficientes y operación de red flexible en futuros sistemas de red de acceso óptico. FSAN ha desempeñado un papel fundamental en la formulación de requisitos, trazando la hoja de ruta y coordinando la estandarización de cuatro generaciones consecutivas de los sistemas de red óptica pasiva ITU-T.

Las hojas de ruta tecnológicas son una herramienta útil para enfocar el ecosistema de la red de acceso en objetivos y escalas de tiempo comunes. El grupo de investigación FSAN ha estado utilizando la hoja de ruta (Figura 1.1) para guiar el desarrollo de estándares de Redes Ópticas Pasivas más allá de Gigabit PON (GPON, *Gigabit-Capable Passive Optical Network*). Esto lo han hecho con la intención de alcanzar mayor capacidad, alcance, fiabilidad, flexibilidad y velocidades de transmisión de datos superiores a 10 Gb/s en comparación con sus contrapartes convencionales GPON y G-EPON [12, 13], FSAN hace hincapié en la evolución fluida a partir de sistemas PON previamente estandarizadas y desplegadas mediante la reutilización de la infraestructura de fibra existente.

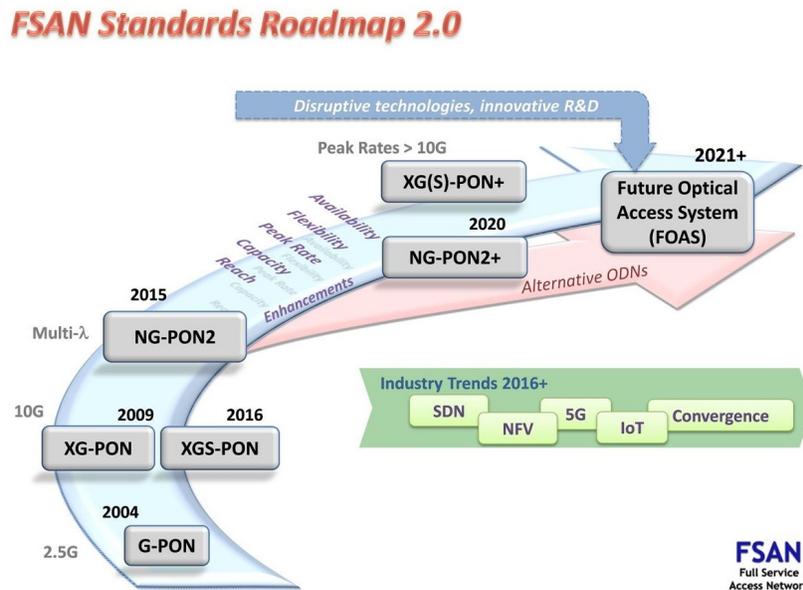


Figura 1.1: Hoja de ruta de evolución de redes PON del grupo FSAN. Tomada de [14].

Las redes PON son tecnologías de telecomunicación para el acceso de banda ancha de punto a multipunto a través de infraestructuras de fibra óptica pasiva, sin la necesidad de utilizar elementos activos a través de su trayecto desde una fuente hasta su destino. En los estándares actuales de ITU-T NG-PON, se define el término PON como un sistema que consiste en una combinación de elementos de red en una red de acceso óptico basada en Red de Distribución Óptica (ODN, *Optical Distribution Network*). Las redes PON constan de una Terminal de Línea Óptica (OLT, *Optical Line Terminal*) y una o varias Unidades de Red Óptica (ONUs, *Optical network Unit*) e implementa un conjunto específico coordinado de capas dependiente del medio físico, capa de convergencia de transmisión y gestión de protocolos. Todas las transmisiones se realizan entre el OLT y las ONUs principalmente a través de un divisor/combinador óptico [12, 15–17]. Desde principios de los años 90, las redes PON se han demostrado y desplegado en todo el mundo para prestar servicios a clientes residenciales (fibra hasta el hogar), empresariales (fibra hasta la oficina) y móviles (fibra hasta el celular) [15]. De este modo, PON se ha establecido como piedra angular de las soluciones de fibra de acceso.

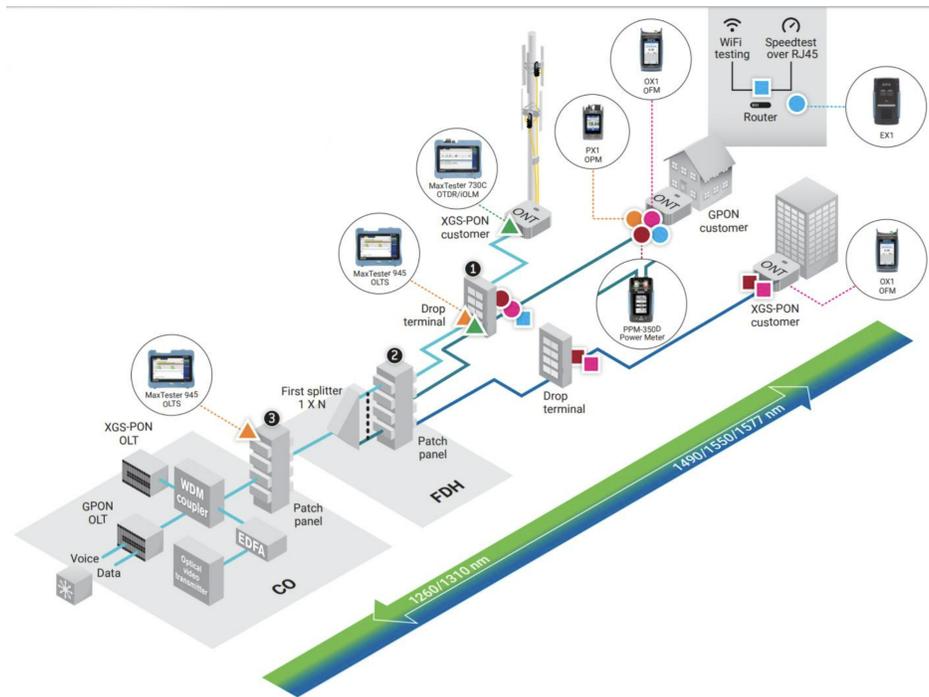


Figura 1.2: Arquitectura de red PON desplegada. Tomada de [18].

Entre sus principales componentes se encuentran (Figura 1.2) [16, 17]:

Terminal de Línea Óptica (OLT): también conocida como cabecera PON, es responsable de controlar el flujo bidireccional de información a través de la ODN. En un enlace descendente, la función de la OLT es recibir el tráfico de voz, datos y vídeo de la red metropolitana y transmitirlo a todos los módulos ONU de la ODN. En un enlace ascendente, la OLT acepta y distribuye múltiples tipos de tráfico de voz y datos de los usuarios de la red.

La OLT se compone de tres elementos claves: transpondedores, multiplexores y demultiplexores de longitud de onda y, opcionalmente, amplificadores ópticos. Los transpondedores adaptan la señal entrante del cliente en una señal adecuada para su transmisión dentro de la red óptica y viceversa. Estos también pueden añadir una sobrecarga adicional a efectos de gestión de la red y Corrección de Errores Hacia Delante (FEC), especialmente para señales a velocidades de 10 Gb/s y superiores. La interfaz entre el cliente y el transpondedor varía en función del cliente, la velocidad binaria y la distancia y/o pérdida entre el cliente y el transpondedor. Por lo general, los transpondedores suelen controlar la BER de la señal en los puntos de entrada y salida de la red. Por esta razón, la adaptación suele realizarse mediante una conversión Óptica-Eléctrica-Óptica (O/E/O) o en el propio equipo cliente que utiliza la red óptica, evitando el uso de transpondedores, lo que reduce el costo y da lugar a una solución más compacta y eficiente desde el punto de vista energético. Los transpondedores suelen representar la mayor parte del costo, espacio ocupado y consumo energético de una OLT [19].

La señal que sale de un transpondedor se multiplexa en una fibra con otras señales a diferentes longitudes de onda mediante un multiplexor de longitud de onda. Se puede utilizar diversas tecnologías de multiplexación (e.g., las rejillas de guía de ondas dispuestas, los filtros dieléctricos de película fina o las rejillas de Bragg de fibra). En la dirección opuesta, la señal se amplifica nuevamente de ser necesario antes de ser enviada a través de un demultiplexor que extrae las longitudes de onda individuales y las envía de nuevo a un transpondedor o directamente al equipo del cliente [19].

Red de Distribución Óptica (ODN): [16, 17] respalda el uso del término ODN para denotar una infraestructura de fibra punto a multipunto, que no necesita ser completamente pasiva. La función principal del ODN es permitir la transmisión bidireccional de señales ópticas entre un punto central y varios puntos distribuidos. Se pueden distinguir dos tipos de ODN: ODN simple, que es completamente pasiva y está representada por un árbol de fibras ópticas punto a multipunto de una sola raíz con divisores, combinadores, filtros y posiblemente otros componentes ópticos pasivos. ODN compuesta, que consta de dos o más segmentos pasivos interconectados por dispositivos activos, siendo cada uno de los segmentos un segmento de línea troncal óptica o un Segmento de Distribución Óptica Pasiva (ODS, *Optical Distribution Segment*). Un ODS pasiva es un ODN simple en sí mismo. La definición permite que dos ODNs con raíces distintas pueden compartir un subárbol común, lo que respalda las nociones de doble conexión y protección dentro del sistema de definición.

El componente más importante en una ODN es el divisor óptico, también conocido como optical splitter, responsable de la distribución de la señal óptica a todos los puntos finales. Cuando se transmite una señal óptica a través de una Fibra Óptica Monomodo (SMF, *Single-Mode Optical Fiber*), la energía de luz no se concentra por completo en el núcleo y se dispersa una pequeña cantidad a través del revestimiento cercano del núcleo. Si los núcleos de dos fibras ópticas están lo

suficientemente cerca, el campo de modo de luz transmitido en una fibra óptica puede ingresar a la otra y la señal se distribuye entre ambas. Este es el modo en que funciona el divisor óptico [20].

Hay dos métodos de división de luz utilizados en la ODN [20]: la división primaria y la división secundaria, o división centralizada y división en cascada, respectivamente. Cada una de ellas tiene sus propios métodos únicos de distribución de señal óptica y se adaptan a diferentes requisitos y situaciones.

División centralizada: La estructura de la división primaria se compone de tres elementos principales OLT – Splitter – ONU. La señal óptica se transmite desde la OLT hasta la ONU a través de un divisor óptico (splitter) que están todos en paralelo. El divisor óptico se encuentra generalmente en la intersección del cableado y solo hay uno en la estructura de la división primaria. Debido a esto, es común encontrar un divisor con un gran número de relación de división como 1:32 o 1:16.

División en cascada: La estructura de la división secundaria se compone de OLT - Splitter 1 – Splitter 2 – ONU. Desde la OLT, la señal óptica se divide en varias ramas utilizando divisores ópticos que están en cascada. El proceso de división se realiza en dos etapas. En la primera etapa, se utiliza un divisor a menudo de 1:8 o 1:16 generalmente se establece en la intersección óptica del cable. En la segunda etapa, se utiliza un divisor de 1:4 o 1:8 se establece en la Caja de Distribución de Fibra (FDB).

Una de las características de los splitters es su capacidad para ser simétricos/balanceados o asimétricos/desbalanceados.

Splitter Balanceado: Es un dispositivo divisor que posee una entrada de potencia óptica y 2 o más salidas que presentan una distribución simétrica en cuanto a la potencia de la señal. Se pueden realizar divisiones de 2^n , siendo las más comunes 1:X (2, 4, 8, 16, 32, 64 o 128) o 2:X (2, 4, 8, 16, 32, 64 o 128). A medida que aumenta el número de divisiones ópticas, también se incrementa la pérdida de la potencia de la señal. Estos splitters son principalmente usados en redes ópticas FTTx/PON, redes HFC (TV por cable) y sistemas ópticos con redundancia no simultánea.

Splitter Desbalanceado: Es un dispositivo utilizado para dividir una señal de entrada en dos o más señales de salida con niveles de potencia diferentes. Este componente puede dividir la señal de manera asimétrica, asignando proporciones distintas de potencia a cada fibra de transmisión. Estos splitters exhiben una modularidad de 1:2 en diversas divisiones de potencia, como 10/90, 1/99, 2/98, 5/95, 15/85, 20/80, 25/75, 30/70, 35/65, 40/60, 45/55 y 50/50, siempre sumando el 100% en ambas ramificaciones. Están principalmente diseñados para su aplicación en redes ópticas con topologías en línea y

en proyectos especiales que requieren distribuciones fraccionadas de potencia a lo largo de la red.

Unidad de Red Óptica (ONU): Es un componente clave en un ODN. Su función es servir como punto de interconexión entre las instalaciones de acceso de usuario final y la red óptica. Independientemente del número y tipo de interfaces de usuario o de la profundidad del despliegue de fibra, se le denomina Unidad de Red Óptica. Una ONU se caracteriza por su distancia de fibra, y para cada par de ONUs en la misma interfaz de OLT en una PON, la diferencia en las distancias de fibra es la diferencia entre las dos distancias de fibra individuales. En la mayoría de los casos, la ONU se encuentra en las instalaciones del usuario final, generalmente se ubica en la acera (FTTC, *Fiber To The Cabinet*) o en la ubicación del usuario final (FTTB, *Fiber to the Building*) y Fibra Hasta el Hogar (FTTH, *Fiber to the Home*), y es responsable de la transmisión y recepción de señales ópticas desde y hacia la red óptica, brindando servicios de voz, datos y vídeo de banda ancha a los suscriptores. La ONU también puede tener múltiples interfaces de usuario, lo que permite conectar varios dispositivos de usuario final a través de una sola conexión de fibra óptica. En general, la ONU es un componente crítico para proporcionar conectividad de alta velocidad y baja latencia a los usuarios finales en una red de acceso óptico.

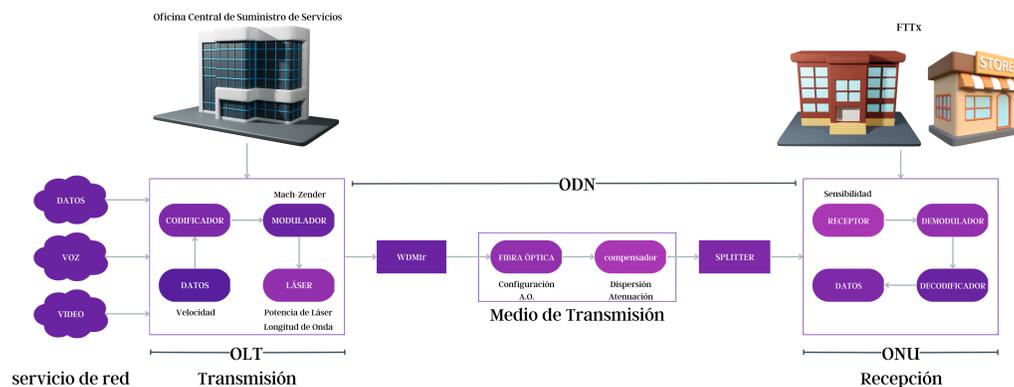


Figura 1.3: Arquitectura básica de una red GPON. Adaptada de [8].

En una red PON (Figura 1.3), el OLT ubicado en la Oficina Central (CO, *Central Office*) de un operador conecta la red de acceso óptico a la Red de Área Metropolitana (MAN, *Metropolitan Area Network*) o Red de Área Ampla (WAN, *Wide Area Network*) y controla el flujo bidireccional a través de la ODN. Una hebra de fibra óptica monomodo va desde la CO hasta un divisor de potencia óptica pasivo (1:N), el cual divide la potencia óptica en N caminos separados hacia los clientes. Cada fibra monomodo individual se conecta a su propia ONU para llegar a cada edificio o al equipo de servicio desde el divisor óptico, donde convierten la señal óptica en una señal eléctrica que se uti-

liza para proporcionar servicios de comunicaciones, como Internet, telefonía y televisión.

Esta arquitectura 1.2 es altamente eficiente en términos de uso de la fibra óptica: se utiliza una única fibra llamada fibra de alimentación, para conectar una Oficina Central al área de servicio local, donde un divisor de potencia distribuye la señal a múltiples ONUs. Esto reduce costos, ahorra suministros de energía, distribución de equipos y optimiza la utilización de la infraestructura de fibra óptica de manera eficiente. La transmisión de datos en una red PON es bidireccional, lo que significa que la ONU también puede enviar señales de vuelta a la OLT a través de la fibra óptica. Esto se logra mediante el uso de diferentes longitudes de onda de luz para la transmisión en ambas direcciones, lo cual se conoce como Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM).

Existen dos tipos generales de sistemas PON: PON TDM/Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*) y, WDM-PON, ambos sistemas ofrecen un alto rendimiento y confiabilidad para la transmisión de datos en una red PON. En una red TDM/TDMA-PON, cada ONU se distingue por intervalos de tiempo, con una duración de 125 μ s por ranura de tiempo. Estos intervalos se multiplexan en el dominio del tiempo y se distinguen por una dirección integrada en la señal. La OLT transmite la señal descendente (DS) a cada ONU en diferentes intervalos de tiempo recurrentes en un único canal de longitud de onda, a la vez que cada ONU transmite sus ráfagas de señales ascendentes (US) en las franjas horarias asignadas en otro canal de longitud de onda. Por otro lado, en una red WDM-PON, a cada ONU se le asigna su propio canal de longitud de onda dedicado, formando un sistema lógico punto a punto [15].

Con el tiempo, los sistemas PON han ido evolucionando hacia el actual NG-PON para poder satisfacer la creciente demanda de ancho de banda. El sistema NG-PON es una tecnología con buena escalabilidad, baja complejidad y de bajo costo de implementación, lo cual permite una gestión flexible de la red [7, 14]. La hoja de ruta de FSAN ha definido dos etapas de evolución llamados PON de próxima generación (NG-PON): NG-PON1 y NG-PON2. Las Redes Ópticas Pasivas de Próxima Generación Etapa 1 (NG-PON1, *Next-Generation Passive Optical Networks stage 1*) se ha centrado en permitir la actualización simétrica de velocidades descendentes y ascendentes de 10 Gb/s a corto plazo, manteniendo la compatibilidad con el despliegue convencional de GPON y basado en la Multiplexación por División de Tiempo [7, 21]. Por otro lado, las Redes Ópticas Pasivas de Próxima Generación Etapa 2 (NG-PON2) se considera la próxima generación a largo plazo y se espera proporcionar no menos de 40 Gb/s mediante el uso de tecnologías avanzadas de capa física, como la TDM de mayor velocidad, la Multiplexación de División de Longitud de Onda Densa (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*) y la Multiplexación de División de Frecuencia Óptica-Ortogonal Coherente (CO-OFDM), así como dispositivos diferentes a los divisor de potencia en el nodo remoto [21]. Actualmente, el grupo FSAN trabaja en el proyecto Higher-Speed PON (HSP) para desarrollar un futuro sistema PON, el objetivo del proyecto es proporcionar

una velocidad de transmisión de datos de hasta 100 Gb/s simétricos, lo que supondría un gran avance en la capacidad y eficiencia de las redes de acceso óptico.

La tecnología PON de alta velocidad HSP [22] es una nueva generación de tecnología de fibra óptica que proporciona velocidades de hasta 50 Gbit/s por longitud de onda, cinco veces más rápido que los 10 Gbit/s de sus predecesores (un solo canal, XG(S)-PON y sistemas multicanal, NG-PON2), lo que permite una mayor capacidad de ancho de banda. Además, HSP es capaz de coexistir en longitud de onda con otras tecnologías de fibra óptica como GPON, XG(S)-PON y 10G-EPON, lo que facilita una transición suave a la nueva tecnología sin necesidad de reemplazar toda la infraestructura existente (Figura 1.4).

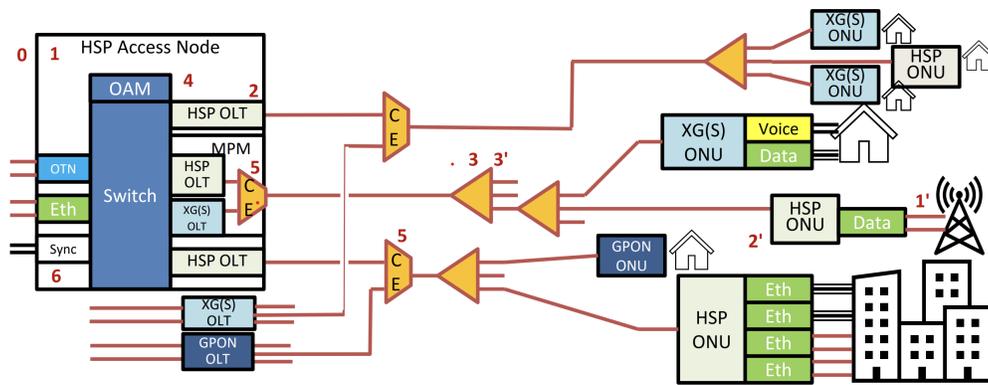


Figura 1.4: Arquitectura HSP. Tomada de [22].

En la hoja de ruta de FSAN (Figura 1.1) se destacan las tendencias clave de la industria que se espera que tengan un impacto en la evolución de la tecnología PON, como Redes Definidas por Software (SDN), Virtualización de Funciones de Red (NFV), sistemas móviles 5G, Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*) y convergencia de redes y servicios. Sin embargo, se requiere un enfoque más audaz y mayor capacidad PON que soporte pérdidas de hasta 35 dB en el ODN. Por lo tanto, existe un camino alternativo en la hoja de ruta que el grupo llama ‘ODN alternativos’ [14]. Se está examinando si tiene sentido para ciertas aplicaciones, reemplazar la arquitectura basada en el divisor de potencia por una ODN de longitud de onda selectiva. A diferencia de los divisores de potencia, los dispositivos selectivos de longitud de onda enrutan longitudes de onda individuales a destinos específicos, además se pueden usar con la misma topología básica de red de árbol y rama [15]. Aunque esto elimina las restricciones presupuestarias de energía, puede requerir componentes ópticos más costosos.

1.1.1. Arquitecturas NG-PON1

Para responder el aumento exponencial de los requisitos de ancho de banda, las tecnologías G-EPON y GPON han sido mejoradas en término de la velocidad de datos, evolucionando como Red Óptica Pasiva Ethernet de 10 Gb/s (10G-EPON, *10 Gbit/s*

Ethernet Passive Optical Network) [23] bajo el estándar IEEE 802.3av y Red Óptica Pasiva de 10 Gigabits (XG-PON, *10-Gigabit-capable Passive Optical Network*) [16] por FSAN bajo el estándar ITU-T G.987, respectivamente. Estas nuevas tecnologías se estandarizaron en 2009, siendo conocidas como Redes Ópticas Pasivas de Próxima Generación etapa 1 (NG-PON1). La estandarización de los sistemas PON de primera generación fue bastante sencilla, con la principal preocupación en aumentar la velocidad de transmisión de datos y en menor medida, aumentar el presupuesto de energía del transceptor para brindar un mayor ancho de banda a más abonados. Esto permitió que las dos tecnologías coexistan en el misma ODN, facilitando la transición gradual entre las nuevas tecnologías y sus predecesoras. De este modo, los clientes pueden migrar a NG-PON1 en la misma ODN y coexistir con los clientes de GPON sin interrumpir los servicios de los demás clientes [24]. Resultando en la existencia de dos versiones de XG-PON, según la hoja de ruta FSAN (Figura 1.1), denominados: i) Redes Ópticas Pasivas con Capacidad de 10 Gigabit (XG-PON). ii) Redes Ópticas Pasivas simétricas con Capacidad de 10 Gigabit (XGS-PON, *10-Gigabit-capable Symmetric Passive Optical Network*).

XG-PON Está regulada por el estándar ITU-T G.987 [16], es un sistema PON de velocidad asimétrica con una velocidad de transmisión descendente de 10 Gb/s y una velocidad de transmisión ascendente de 2,5 Gb/s. La designación “X” en XG-PON indica una velocidad de transmisión de 10 Gbit/s y está estrechamente relacionada con el estándar GPON anterior. XG-PON permite integrar la tecnología PON más antigua sin cambiar la Red de Distribución Óptica (ODN) original, lo que hace que la implementación del estándar sea a un costo aceptable.

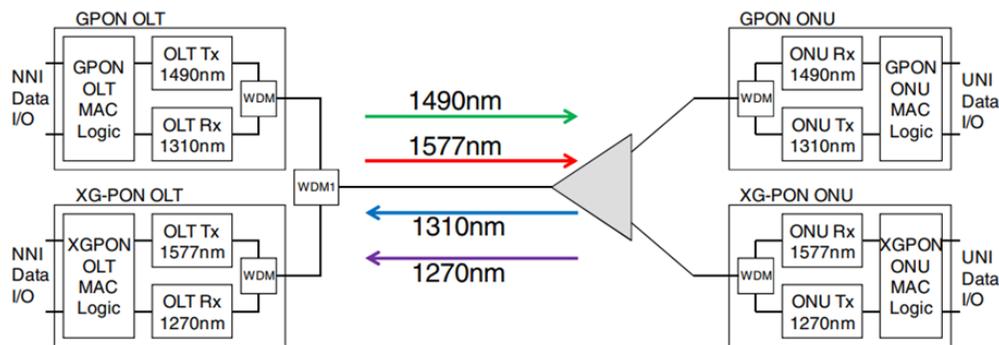


Figura 1.5: Diagrama coexistencia de GPON y XG-PON. Tomada de [25].

La tecnología XG-PON está basada en los mismos principios que GPON, es decir, establece una comunicación PtM mediante TDM en sentido descendente y enlaces PtP mediante TDMA en sentidos ascendentes. Sin embargo, XG-PON proporciona mayor ancho de banda que GPON, aumentando cuatro veces la tasa de transferencia en sentido descendente y dos veces en sentido ascendente. También presenta algunas diferencias en cuanto a longitudes de onda de operación y

balances de potencia óptico.

Un cambio significativo fue el uso de WDM para velocidades de transmisión descendentes y ascendentes simultáneamente. También se sustituyen los elementos activos de la red GPON, principalmente OLTs y ONUs, por versiones mejoradas para XG-PON. La implementación de XG-PON requiere la implementación de filtros del lado de los proveedores que puedan dividir o fusionar señales pertenecientes a GPON y XG-PON para aumentar el ancho de banda ofrecido y el número de usuarios que puedan conectarse, esto se logra no solo mediante TDM y WDM, sino también a través del acceso por división de código CDMA o una combinación entre ellos.

La arquitectura de referencia de la red OAN aplicada a XG-PON se presenta en la Figura 1.6, donde se muestra cómo la ODN en XG-PON puede consistir en un único Segmento de Distribución Óptica Pasivo (ODS) o un grupo de ODSs pasivos interconectados entre sí mediante Extensores de Alcance (RE, *Reach Extenders*).

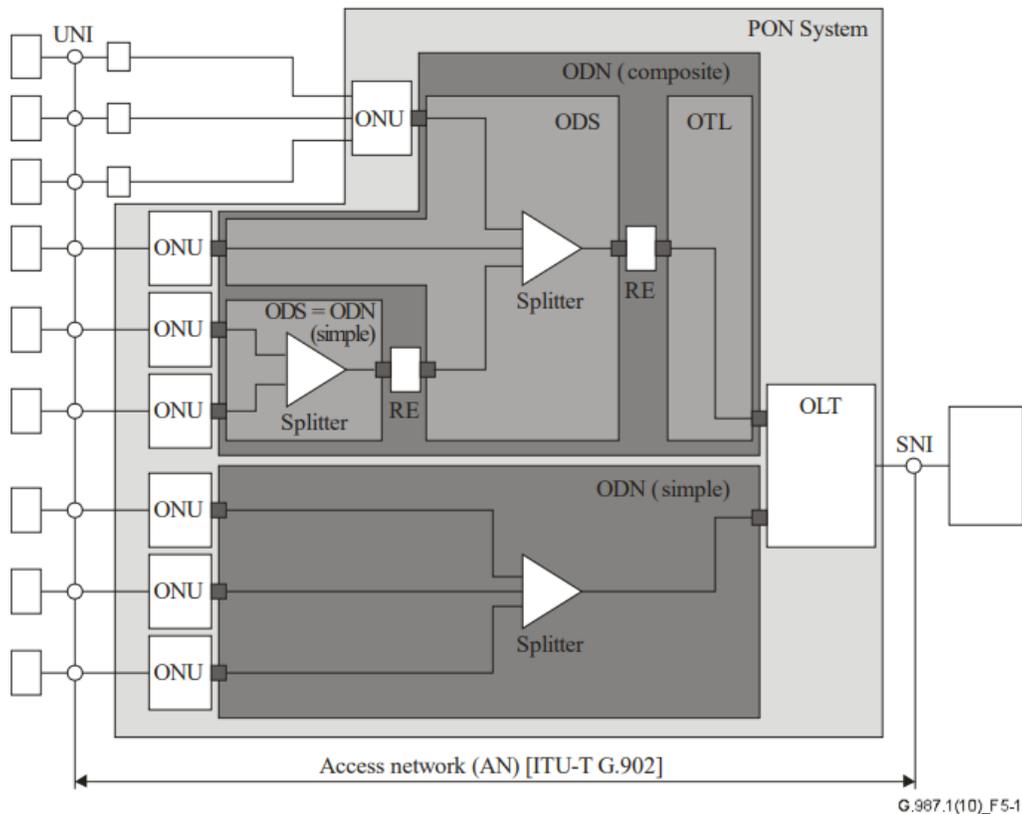


Figura 1.6: Arquitectura de referencia de la red XG-PON. Tomada de [16].

Las longitudes de onda de operación definidas para el sistema XG-PON1 sobre un esquema de fibra única abarcan los rangos 1575-1580 nm (1575-1581 nm para

aplicaciones de exterior) en sentido descendente y 1260-1280 nm en el sentido ascendente. Estos espacios del espectro electromagnético tienen en cuenta la tolerancia necesaria para poder convivir con señales interferentes provenientes de otros servicios PON y estándares como GPON (Figura 1.5).

XGS-PON En diciembre del 2016 se lanzó el nuevo estándar Red Óptica Pasiva simétrica con Capacidad de 10 Gigabit (XGS-PON) designado en la recomendación ITU-T G9807.1, es capaz de enviar velocidades de transmisión simétrica de 10 Gb/s para el flujo de datos descendente y ascendente en una red de acceso con una topología punto a multipunto [26]. La capacidad simétrica de XGS-PON es una solución para satisfacer las necesidades de ancho de banda, especialmente para clientes residenciales, empresariales, la retroalimentación móvil y otras aplicaciones como se aprecia en la Figura 1.7.

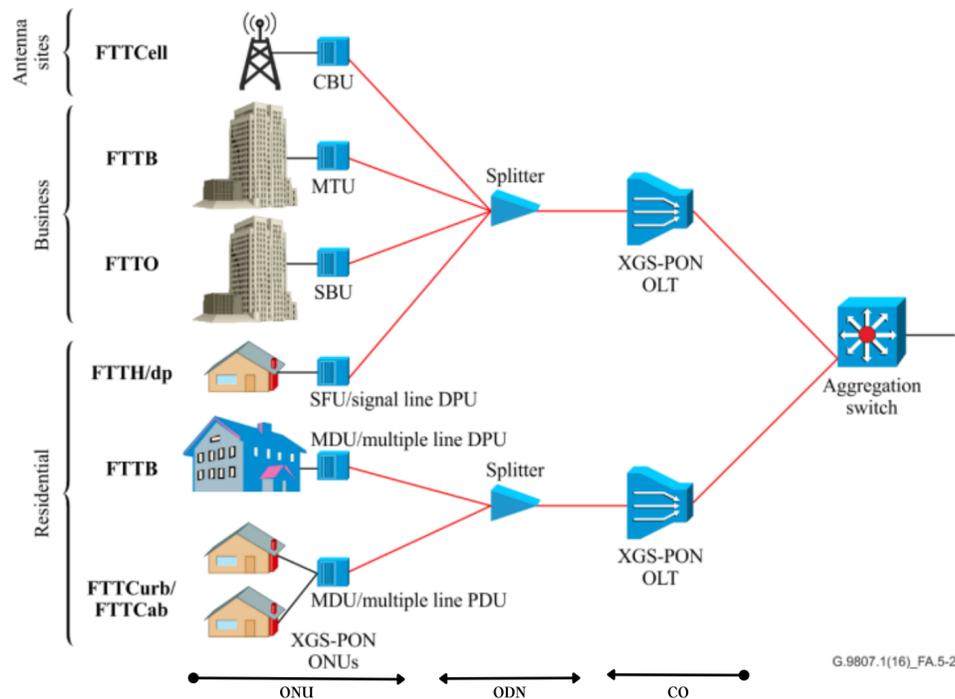


Figura 1.7: Escenario de aplicación de redes FTTx en redes XGS-PON. Adaptada de [26].

Para desarrollar el estándar XGS-PON se utilizaron elementos de la capa física de su predecesor, el estándar XG-PON. Esto implica que se pueden utilizar los mismos componentes de transceptores ópticos, lo que reduce los costos de implementación. Además, se aprovecha de la tecnología óptica de longitud de onda fija

de menor costo en lugar de utilizar transmisores sintonizables, lo que también contribuye a reducir los costos. XGS-PON también se beneficia de los estándares de capa de protocolo del estándar NG-PON2 (ITU-T G.989.3). Esto significa que puede interoperar con otros sistemas que utilizan estos mismos estándares, facilitando su implementación en redes existentes.

La OLT proporciona funciones de gestión y mantenimiento para todo el sistema XGS-PON y están preparados para coexistir de manera flexible con el estándar NG-PON2. La flexibilidad de la relación de división del OLT permite que un solo OLT XGS-PON opere múltiples ODNs. A través del uso de divisores ópticos simples o en cascada, la longitud de onda de bajada del OLT puede dividirse para proporcionar servicio a hasta 128 dispositivos finales (ONU). La ONU tiene la misma función de ubicación-asignación, pero sigue necesitando una terminación de red adicional en el lado del cliente. Se ha integrado más flexibilidad en las ONUs XGS-PON de la generación más reciente, lo que permite que las aplicaciones FTTH, empresariales y 5G puedan compartir elementos de hardware más comunes.

Aunque los convenios de fibra física y formato de datos para la tecnología XGS-PON permanecen sin cambios desde el estándar original GPON, las longitudes de onda difieren de otros estándares. XGS-PON es capaz de operar en las mismas longitudes de onda que un sistema XG-PON existente, utilizando la longitud de onda descendente de 1577 nm y la longitud de onda ascendente de 1270 nm. Esta reutilización de las mismas longitudes de onda tiene como objetivo permitir que múltiples servicios PON coexistan en la misma red de fibra y facilitar una actualización o migración sin problemas de servicios, lo que permite a diferentes proveedores de servicios utilizar la misma infraestructura óptica y equipos de red para ofrecer múltiples servicios de alta velocidad a sus clientes. La ventana de transmisión PON total de 1260 a 1650 nm es capaz de acomodar los estándares GPON, XG(s)-PON y NG-PON2 simultáneamente sobre la misma red de fibra.

1.1.2. Arquitecturas NG-PON2

Para seguir aumentando el ancho de banda más allá de los 10Gb/s en la red de acceso, en 2011 el grupo FSAN comenzó a investigar tecnologías de red de fibra óptica, describiendo así la etapa 2 de NG-PON. NG-PON2 es un estándar para una red de acceso de próxima generación de alta velocidad que permite una mayor capacidad de transmisión de datos y una mejor calidad de servicio en comparación con las tecnologías de fibra óptica existentes. Se basa en la tecnología de transmisión óptica PON y fue estandarizado en octubre del 2015 bajo la serie de recomendaciones ITU-T G.989 para Redes Ópticas Pasivas con Capacidad de 40 Gigabits (NG-PON2, *40-Gigabit-capable Passive Optical Networks*) [17].

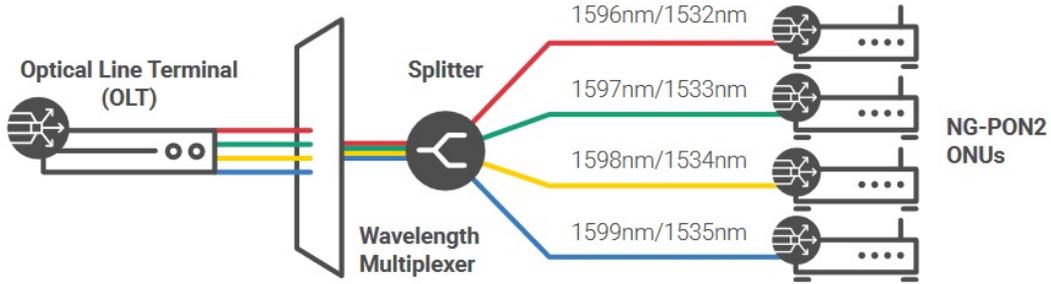


Figura 1.8: Arquitectura básica de NG-PON2. Tomada de [27]

En un principio, NG-PON2 se basó en un método híbrido de Multiplexación por División de Tiempo y Longitud de Onda (TWDM), utilizando 4 longitudes de onda en ambas direcciones, cada longitud de onda asociada al canal permite una tasa de hasta 10 Gb/s, lo que significa un máximo de 40 Gb/s. Más tarde, se incorporó la tecnología de Multiplexación por División de Longitud de Onda de Punto a Punto (PtP WDM) sobre la misma infraestructura PON que TWDM, lo que permite la transmisión simétrica de 40/40 Gb/s (en el futuro se espera, 80/80 Gb/s) o asimétrica de 40/10 Gb/s. La tecnología PtP WDM se diseñó respetando los parámetros y restricciones específicas para los canales TWDM, evitando de esta forma que los enlaces de servicios dedicados provoquen interferencias con el servicio de acceso fijo [17, 28]. La tecnología NG-PON2 es la primera que admite múltiples pares de longitudes de onda por dirección en la red de acceso, lo que aumenta significativamente la capacidad de la generación anterior (Figura 1.8).

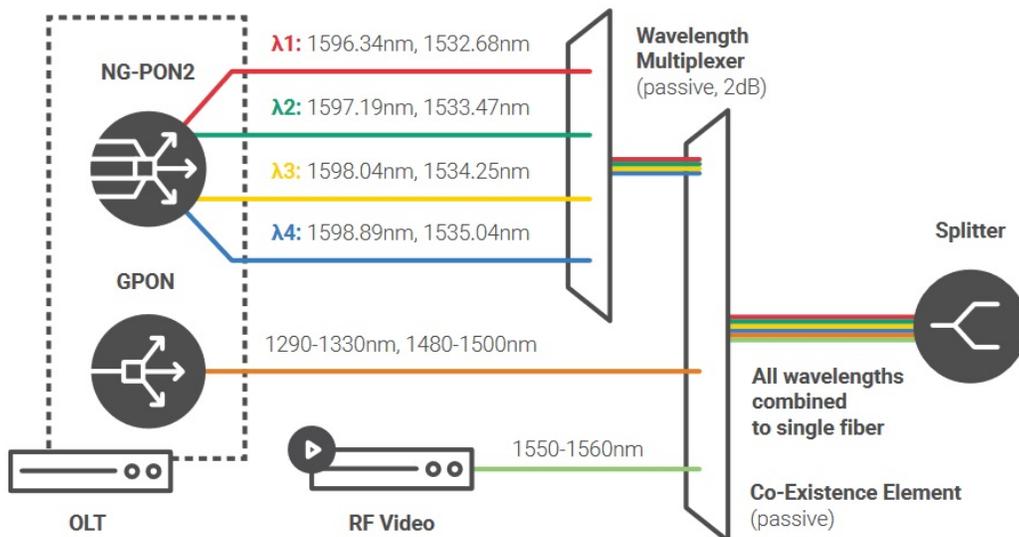


Figura 1.9: Migración de GPON a NG-PON2. Tomada de [27].

NG-PON2 presenta la capacidad de sintonización mediante la adopción de transceptores sintonizables e incoloros en la ONU, lo que reduce el esfuerzo computacional para el hardware digital de la ONU, especialmente en servicios residenciales de gran consumo y muy sensibles a los costos. Los transceptores deben ser capaces de ajustarse a la longitud de onda de operación de los canales TWDM y PtP WDM dentro de las bandas especificadas por el estándar para garantizar la compatibilidad con ODNs basadas en divisores de potencia. Las ONUs pueden operar en más de una longitud de onda simultáneamente gracias a la incorporación de un elemento multiplexor de longitud de onda que complementa al divisor de potencia. En el caso que una ODN está constituida únicamente por un divisor de potencia, es necesario que cada ONU tenga la capacidad de sintonizarse a la longitud de onda que le sea asignada, mientras que si la ODN cuenta con un dispositivo WDM, ésta se encargará de seleccionar/asignar la longitud de onda de operación de cada ONU ubicada en una rama de salida.

Cabe destacar que las OLTs no necesitan la capacidad de sintonización, ya que sólo deben recibir el total de las longitudes de onda transmitidas por las distintas ONUs y ser capaces de diferenciar al receptor destinatario concreto de cada uno de estos mensajes. Además de la capacidad para soportar ODNs de división de potencia, NG-PON2 también soporta ODNs de división de longitud de onda, así como ODNs híbridas compuestas por una combinación de estas dos tipologías. Sin embargo, es importante mencionar que las ONUs no sintonizables queden fuera del ámbito del estándar NG-PON2, ya que una de las implementaciones preferidas en NG-PON2 se basa en redes híbridas a fin de escalar tanto en TDM como en WDM.

Un aspecto importante de los dispositivos sintonizables NG-PON2 es su tiempo de sintonización, que se define como el tiempo transcurrido desde el momento en que el dispositivo sintonizable deja el canal de longitud de onda origen hasta el momento en que alcanza el canal de longitud de onda destino. Estos dispositivos sintonizables pueden basarse en una variedad de tecnologías que tienen costos potencialmente diferentes.

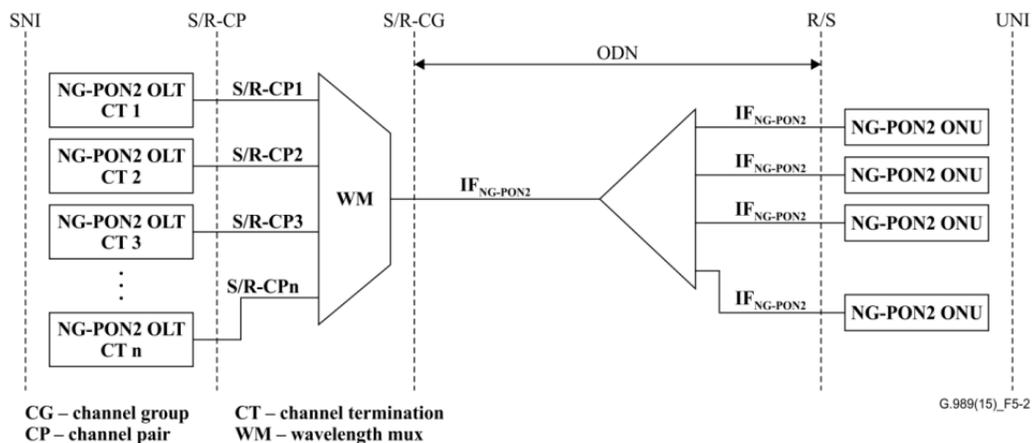


Figura 1.10: Arquitectura lógica de referencia NG-PON2. Tomada de [17].

La estructura de la OLT presentada en la Figura 1.10 consiste en múltiples Terminaciones de Canal (CT) conectadas a través de un Multiplexor de Longitud de Onda (WM) y el punto de referencia S/R-CG indica la localización donde la OLT envía (hacia las ONUs) y recibe (desde las ONUs) un conjunto de pares de longitud de onda en sentido ascendente y descendente de la comunicación, denominados CG. La infraestructura asociada a la ODN abarca desde la salida del WM (punto de referencia S/R-CG), hasta la entrada de la ONU (punto de referencia R/S). Del mismo modo que XG-PON, el ODN en NG-PON2 puede consistir en un único ODS pasivo o estar formada por un grupo de ODSs pasivos interconectados mediante Extensores de Alcance (RE) [17].

La elección del plan de longitud de onda para NG-PON2 fue cuidadosamente evaluada, considerando la necesidad de permitir la coexistencia entre dos requisitos aparentemente divergentes, así como la flexibilidad para adaptarse a diferentes escenarios de implementación y a una expansión futura. Para lograr esto, se seleccionó la opción de espectro expandido PtP WDM PON, que ofrece una gran flexibilidad y puede ser utilizada para permitir la coexistencia con generaciones anteriores de sistemas PON y para admitir nuevos escenarios de implementación.

Para cumplir con estas necesidades, el sistema NG-PON2 debe permitir acceder a múltiples longitudes de onda, grupos de longitudes de onda, o bandas de longitud de onda, que puedan ser separadas física y lógicamente. De esta forma, pueden ser gestionadas de forma independiente, ya sea a través de una única OLT o por múltiples OLTs independientes. Tanto en los canales TWDM como en PtP WDM, cada OLT/ONU opera a una longitud de onda específica, lo cual difiere conceptualmente respecto a GPON/XG-PON, en las que todos los elementos funcionaban a la misma longitud de onda. A nivel tecnológico, ambos canales plantean una arquitectura de sistema de transmisión casi idéntica, donde los transceptores sintonizables operaran en un rango de longitudes de onda muy parecidos.

En TWDM PON, las ONUs tienen asignado un slot temporal y unas longitudes de onda de bajada y subida que son compartidas por otras ONUs pertenecientes al mismo subgrupo del total de ONUs existentes en la ODN, lo que permite un acceso múltiple no solo por división de longitud de onda, sino también por división de tiempo. Es importante destacar que el espectro TWDM descendente fue diseñado con el objetivo de prevenir interferencias con señales de vídeo RF y XG-PON1. En lo que respecta a las tres opciones espectrales TWDM ascendente (banda ancha, banda reducida y banda estrecha) han sido determinadas por las capacidades de gestión de longitud de onda en la transmisión ONU, lo que permite el uso de una banda operativa más estrecha gracias a un mejor control.

En cuanto a los canales PtP WDM, estos han sido diseñados para soportar servicios dedicados en los que se necesita una comunicación sostenida y de alta calidad. Para ello, proporcionan dos modalidades espectrales diferentes: La primera opción de espectro expandido es adecuada para implementaciones green field, o reutilizaciones flexibles

de partes del espectro asignadas a priori a otros sistemas PON que se encuentran en desuso. La segunda opción de espectro compartido se emplea en despliegues brown field de coexistencia total con los sistemas PON heredados.

A diferencia de TWDM, PtP WDM permite que los canales ascendentes y descendentes se encuentren en la misma banda de longitud de onda, lo que proporciona una mayor flexibilidad de implementación. En la configuración PtP WDM, las longitudes de onda de subida y bajada se asignan exclusivamente a cada usuario, estableciendo canales WDM únicos y dedicados por conexión sin recurrir a la multiplexación en el tiempo, lo que lo hace único en comparación con los conceptos de sistemas anteriores que acuden a mecanismos TDM de una u otra forma.

En resumen, la tecnología NG-PON2 representa un avance significativo en la capacidad de las redes mediante la incorporación de múltiples pares de longitudes de onda por dirección y la capacidad de sintonización en las ONUs. Aunque no permite la coexistencia con GPON en el mismo ODN, permitirá una migración suave a una red de acceso más rápida y eficiente garantizando la máxima reutilización de la tecnología existente y la coexistencia con sistemas PON heredados (Figura 1.9).

En la Tabla 1.1, se compararan los diferentes tipos de tecnologías NG-PON expuestos anteriormente para ayudar a comprender las diferencias entre ellas y sus aplicaciones. La tabla incluye detalles sobre los estándares NG-PON más comunes, como XG-PON, XGS-PON, y NG-PON2, así como las características clave, la velocidad de descarga y carga, la distancia de transmisión y la capacidad de red. Con esta tabla se espera ayudar a comprender mejor las opciones disponibles para la red y las necesidades de ancho de banda.

Tabla 1.1: Comparativo tecnológico NG-PON1 vs NG-PON2.

Especificaciones		NG-PON1		NG-PON2
		XG-PON	XGS-PON	
Recomendación ITU-T		G.987.x	G.9807.x	G.989.x
Longitud de onda (nm)	Descendente	1575-1580	1575-1580	1596-1603
	Ascendente	1260-1280	1260-1280	1524-1544 1528-1540 1532-1540
Longitud de onda central (nm)	Descendente	1577	1577	–
	Ascendente	1270	1270	–
Numero de longitud de onda por dirección		1	1	4 a 8
Máxima velocidad de línea (Gbps)	Descendente	9.953	9.953	10/40
	Ascendente	2.488	9.953	2.5/10/40
Distancia máxima de transmisión física (Km)		10/40 ¹	60/40	40
Relación de división máxima		1:128 ²	1:256	1:256

Se recomienda XG-PON para despliegues de fibra óptica en áreas residenciales y pequeñas empresas con necesidades de ancho de banda elevado. Esta tecnología es adecuada para aplicaciones de servicios empresariales y de acceso móvil. Por otro lado, XGS-PON se recomienda para despliegues de fibra óptica en áreas empresariales con necesidades de ancho de banda elevado y aplicaciones de acceso móvil. Es una opción adecuada para empresas que requieren una alta capacidad de ancho de banda y una mayor relación de división en la red. Por último, NG-PON2 se recomienda para despliegues de fibra óptica en áreas empresariales y de infraestructura crítica, como hospitales y aeropuertos, que requieren ancho de banda muy elevado y baja latencia. Esta tecnología es adecuada para aplicaciones de servicios de nube, realidad virtual y aumentada y telemedicina, en las que se requiere una conexión de alta velocidad y confiabilidad.

Además, los sistemas PON han sido fundamentales para que los operadores de banda ancha puedan implementar Fibra Hasta El Lugar (FTTx, *Fiber To The x*) a gran escala y ofrecer una solución avanzada y sostenible para mejorar la calidad y la velocidad de la red de Internet. FTTx es una tecnología de acceso a internet que se refiere al despliegue de la red de la fibra óptica a una localización o área específica, hasta una ubicación cercana al usuario final para entregar un servicio de banda ancha, donde la “x” representa el punto final de la fibra para describir la aplicación o caso de uso del servicio. Hay varios tipos de FTTx, como [29]:

- Fibra Hasta el Hogar (FTTH, Fiber to the Home): Es la implementación más avanzada de FTTx, puede referirse simplemente a la entrega de una línea de internet de fibra a hogares, oficinas, edificios de apartamentos u otras instalaciones. Es una topología de infraestructura de red en la que una línea de internet de fibra llega directamente al hogar del usuario final o al menos alcanza hasta 2 metros de la propiedad del cliente, permitiendo altas velocidades de transmisión de datos y una mayor capacidad de transmisión de datos en comparación con otras implementaciones de FTTx. El cable de fibra óptica de la red FTTH se divide en cable de fibra óptica troncal, cables ópticos de distribución y cable de bajada FTTH. Según la zona de construcción y los tipos de usuarios finales, cada red FTTH es diferente puede referirse a FTTF (Fibra Hasta el Piso), FTTD (Fibra Hasta la Puerta/Escritorio) y se usa comúnmente para referirse a FTTB (Fibra Hasta el Edificio) y FTTP (Fibra Hasta las Instalaciones). Pero siguen teniendo cosas en común, como la estructura de la red y los productos de fibra óptica.
- Fibra Hasta el Edificio/Sótano/Empresa (FTTB, Fiber to the Building/Basement/Business): Es una implementación de FTTx en la que la línea de internet de fibra óptica se extiende hasta el interior del edificio y suele terminar en una caja de terminación de fibra en el sótano del edificio, por esa razón a menudo se denomina fibra hasta el sótano o hasta la empresa cuando el edificio es propiedad de

¹El alcance físico se define por la relación de división, el tamaño del módulo óptico y la calidad de la fibra.

²La relación de división real depende del módulo óptico y la distancia de la fibra.

una corporación. La señal óptica se convierte en una señal eléctrica en el edificio y se distribuye a través de cobre o coaxial.

- **Fibra al Nodo/Vecindario (FTTN, Fiber to the Node/Neighborhood):** Técnica-mente significa fibra hasta el nodo, pero comúnmente se interpreta como fibra hasta el vecindario ya que cada vecindario tendrá un nodo para la distribución de líneas de internet. En este tipo de FTTx, la fibra óptica llega hasta el nodo central cercano a la zona de usuarios finales, y desde allí se utiliza tecnología adicional para llegar hasta los usuarios finales. El nodo es un receptor óptico a gran escala que termina en un cable óptico multifibra de banda ancha, procedente de un ISP, y se distribuye en múltiples líneas de red metálicas que llegan a los hogares u oficinas de los clientes.

Existen otras implementaciones de fibra óptica específicas para diferentes escenarios y necesidades, como Fibra a la oficina (FTTO), Fibra Hasta la Acera (FTTS), Fibra Hasta la Caja de Distribución (FTTC), Fibra Hasta el Gabinete (FTTCab), Fibra hasta el Aire/Antena (FTTA), Fibra al Enrutador/Habitación/Radio (FTTR), entre otras. FTTx facilita la adopción de tecnologías como la nube, el Internet de las Cosas (IoT) y las aplicaciones en tiempo real.

Redes SLR/MLR

Las redes ópticas se dividen en dos categorías principales según su velocidad de línea: redes SLR y redes MLR. SLR utiliza un solo tipo de transpondedor y un solo ancho de banda de línea para todas las conexiones, mientras que MLR emplea más de un tipo de transpondedor con diferentes tasas de línea para adaptarse a las diferentes demandas de tráfico. Los transpondedores pueden ser de diferentes velocidades, como 10 Gbps, 40 Gbps y 100 Gbps.

1.1.3. Redes de Velocidad de Línea Única

La red de Velocidad de Línea Única (SLR) hace referencia a una red en la que todas las conexiones tienen la misma tasa de transmisión de la señal, lo que significa que todos los canales de longitud de onda funcionan a la misma velocidad de bits, independientemente de la ubicación de los dispositivos o la cantidad de tráfico de la red (Figura 1.11). La tasa de transmisión de la señal se mide en bits por segundo (bps) y se refiere a la velocidad máxima física del canal de comunicación, y está determinada por la tecnología utilizada en la red (e.g., Ethernet, Canal de fibra, SONET/SDH). Los factores como la distancia entre dispositivos, la degradación de la señal y la presencia de congestión en la red pueden influir en la tasa de transmisión. Las redes SLR pueden ser ventajosas para aplicaciones que requieren una tasa constante de transmisión de datos, como la transmisión de vídeo en tiempo real o la transmisión de señales de control críticas. Sin embargo, una red SLR también puede limitar la eficiencia total de la red

si hay una gran cantidad de tráfico, ya que todas las señales compiten por el mismo ancho de banda.

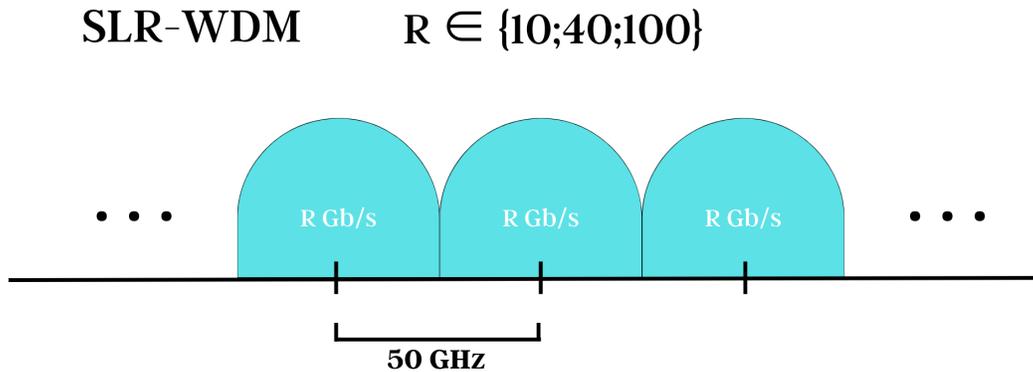


Figura 1.11: Asignación de recursos de una red SLR. Adaptada de [30].

En las redes reconfigurables de una sola línea, los recursos disponibles durante la fase de diseño se limitan a los canales considerados viables según los parámetros de Calidad de Transmisión (QoT), mientras que la velocidad y el formato de modulación son fijos.

La tecnología de Multiplexación por División de Longitud de Onda de Tasa de Línea Única (SLR-WDM), es una tecnología utilizada en las redes de comunicación óptica para aumentar la capacidad de la red. A diferencia del transporte óptico convencional basado en una red de frecuencia fija, que utiliza una velocidad de línea única y una separación típica entre portadores ópticos de 50 GHz, WDM permite que múltiples señales se transmitan en diferentes longitudes de onda de luz a lo largo de una única fibra al mismo tiempo [30].

La tecnología WDM se ha convertido en una solución muy popular en las redes de comunicaciones ópticas debido a su capacidad para aumentar la capacidad de la red y reducir el consumo de energía. Al utilizar SLR-WDM, las redes pueden transmitir más datos al enviar múltiples señales simultáneamente, mientras se mantiene la tasa máxima de transmisión de la señal. Sin embargo, el uso de una red SLR impone un esquema rígido de asignación de espectro para la provisión de nuevas demandas de tráfico, lo que puede conducir a un uso ineficaz de los recursos espectrales. Además, las demandas de baja capacidad deben ser atendidas por un canal WDM completo, lo que no es óptimo en términos del uso eficiente de los recursos [30]. Por lo tanto, es importante considerar opciones como la tecnología de Multiplexación por División de Longitud de Onda de Tasa Mixta (MLR-WDM) para mejorar la eficiencia de la red y hacer un mejor uso de los recursos espectrales.

1.1.4. Redes de Velocidad de Línea Mixta

Aunque la red SLR-WDM ha demostrado ser una tecnología valiosa en las redes de comunicaciones ópticas, su enfoque rígido en la asignación de espectro y la asignación de canales WDM completos plantea desafíos en términos de eficiencia de recursos. En este contexto, la Velocidad de Línea Mixta (MLR) en redes ópticas Multiplexadas por División de Longitud de Onda (WDM) ha llamado la atención tanto de la comunidad investigadora como de la industria y se han revelado como solución económica y eficiente desde el punto de vista del consumo de energía [31].

MLR-WDM es un tipo de tecnología de redes ópticas que permite combinar múltiples longitudes de onda en un solo canal óptico para aumentar la capacidad de transmisión de datos, empleando más de un tipo de transpondedores que pueden operar a diferentes tasas de línea (e.g., 10/40/100 Gb/s), mediante canales de longitud de onda que se organizan en grupos (i.e., sub-bandas). Cada uno de estos grupos consta de longitudes de onda que funcionan a la misma velocidad binaria, lo que brinda mayor flexibilidad y escalabilidad para el tráfico de datos. En otras palabras, se pueden transmitir múltiples velocidades binarias (10 Gb/s, 40 Gb/s y/o 100 Gb/s) en una sola fibra utilizando diferentes longitudes de onda de luz organizadas en sub-bandas, como se observa en la Figura 1.12 [30–32]. A diferencia de la red SLR, las redes MLR permiten desplegar transpondedores con características diferentes según los requisitos de conexión [30]. Resulta especialmente útil en redes con tráfico heterogéneo y de rápido crecimiento, ya que permite a los operadores ofrecer diferentes velocidades de línea a los usuarios sin tener que desplegar redes dedicadas para cada velocidad.

Las redes MLR tienen varias ventajas, como: i) evitar la provisión de conexiones de bajo ancho de banda a través de trayectos luminosos de alta capacidad. ii) soportar protocolos de transporte multivelocidad, evitando complejos esquemas de multiplexación. iii) utilizar la combinación óptica (número/velocidad) de longitudes de onda en cada enlace, lo que resuelve tanto el tráfico como la asimetría de la red [33]. Al mismo tiempo, limitando el aumento del consumo total de energía gracias al despliegue de transpondedores que utilizan formatos de modulación altamente eficientes, con un elevado número de bits por símbolo, lo que resulta en un consumo de energía contenido.

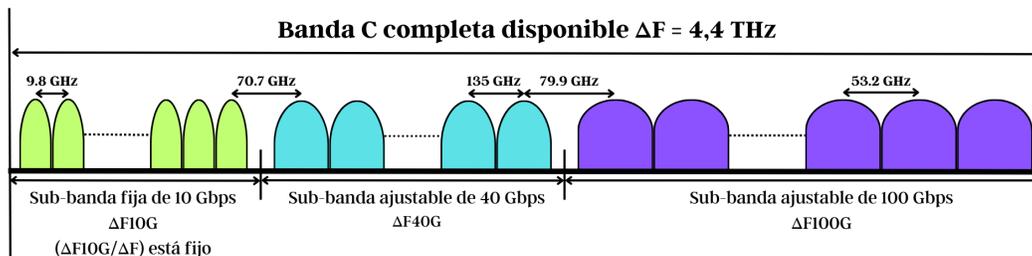
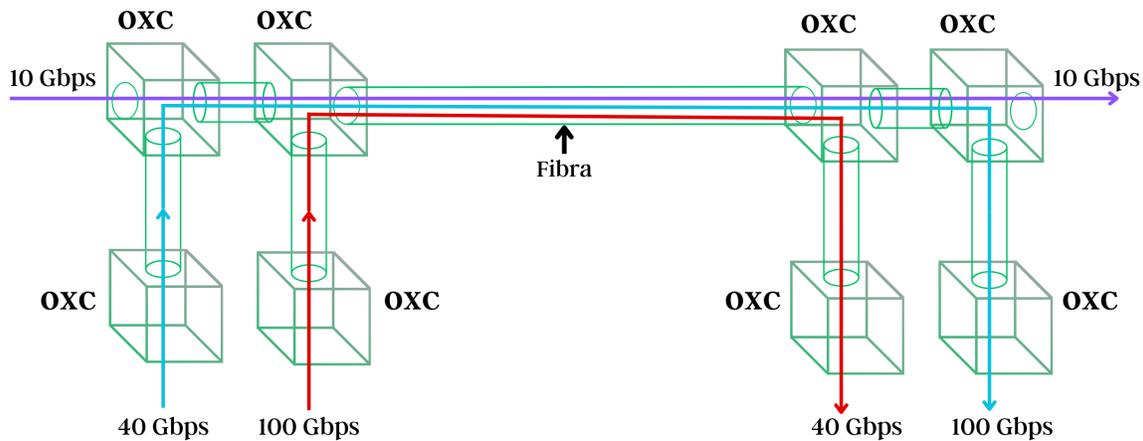


Figura 1.12: Espaciados de sub-banda y canal para sistemas MLR/SLR WDM. Adaptada de [31].

Las arquitecturas MLR se pueden construir sobre redes ópticas transparentes, translúcidas u opacas. En las redes opacas, la transmisión de datos se lleva a cabo a través de enlaces punto a punto, lo que implica que la señal debe ser regenerada en cada nodo intermedio a lo largo del canal de transmisión mediante conversión Óptico-Eléctrico-Óptica (O/E/O). Por otro lado, en la arquitectura translúcida, se colocan regeneradores de manera más espaciada en algunos nodos a lo largo de la ruta, lo que reduce significativamente el proceso eléctrico y permite que la señal permanezca en el dominio óptico el mayor tiempo posible.

Para evitar los costosos costos de la conversión O/E/O, se impulsó el desarrollo de los Multiplexores Ópticos Add-Drop (OADM), que permitieron la implementación de redes transparentes. En este tipo de redes, las señales se propagan de manera completamente óptica desde el origen hasta el destino a lo largo de toda la red, es decir, no se utilizan conversiones O/E/O en los nodos intermedios. El tráfico de extremo a extremo fluye a lo largo de trayectorias de luz completamente ópticas, eliminando así los costos asociados con la regeneración de las redes ópticas, lo que supone un ahorro de hasta el 50 % en comparación con las redes opacas.



OXC- Optical Cross Connect

Figura 1.13: Red óptica de Velocidad de Línea Mixta (MLR). Adaptada de [34].

Además, se han implementado OADM reconfigurables (ROADM) y Conectores Ópticos Cruzados (OXC, *Optical Cross-Connects*) para lograr un mayor grado de flexibilidad y permitir que la red se adapte de forma remota y bajo demanda a los posibles cambios de tráfico, reduciendo así los costos operativos asociados. El OXC en una red MLR es capaz de realizar el enrutamiento y la gestión de la señal óptica en función de la velocidad binaria y la longitud de onda, lo que permite la transmisión de múltiples velocidades de línea en una sola fibra óptica (Figura 1.13).

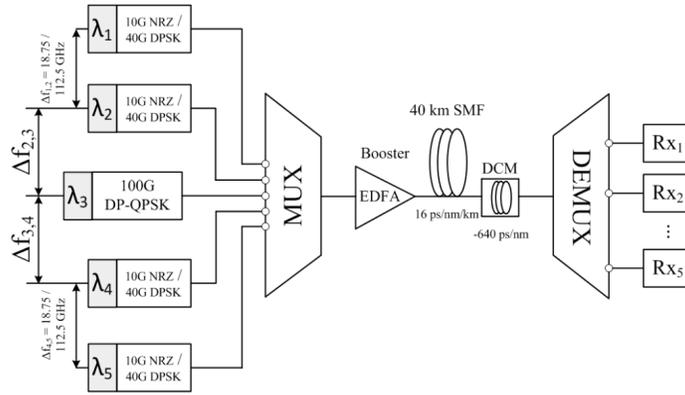


Figura 1.14: Arquitectura de red óptica MLR-WDM. Tomada de [35]

En una red MLR-WDM, se utilizan equipos de multiplexación y demultiplexación de longitud de onda específicos que permiten la transmisión de múltiples señales en diferentes longitudes de onda en una misma fibra, con diferentes velocidades de transmisión según la necesidad del tráfico. Estos equipos pueden ser OADM, OXC, o ROADM, según la topología y la complejidad de la red. La arquitectura de enlace MLR-WDM que se ve en la Figura 1.14 corresponde a un sistema WDM que consta de: cinco transmisores (Tx_i), que dependen del formato de modulación y la tasa de bits (i.e., 10/10/100/10/10 Gbps, 40/40/100/40/40 Gbps o 10/10/100/40/40 Gbps), los transmisores convierten la señal eléctrica en una señal óptica que puede ser transmitida a través de la fibra óptica. Un Multiplexor de Longitud de Onda (MUX) para combinar señales de diferentes velocidades de línea en un canal óptico común. Un amplificador de refuerzo para aumentar la señal óptica y extender el alcance de la señal, el cual se coloca estratégicamente a lo largo de la ruta de la señal óptica en la red para evitar la degradación de la señal debido a la atenuación. Hay varios tipos de amplificadores de refuerzo, como el amplificador EDFA y el amplificador Raman. Una Fibra Óptica Monomodo (SMF), es un componente clave en una red MLR ya que permite la transmisión de señales ópticas a largas distancias con muy pocas pérdidas y permite la implementación de tecnologías como la WDM. Un Módulo de Compensación de Dispersión Cromática (DCM) para compensar la Dispersión Cromática de las diferentes velocidades de línea que se están transmitiendo simultáneamente. Esto es necesario debido a que cada velocidad de línea puede experimentar diferentes niveles de Dispersión Cromática y, por lo tanto, cada una requiere una compensación diferente. El módulo de DCM utiliza diferentes técnicas, como la Fibra Compensadora de Dispersión (DCF, *Dispersion Compensating Fiber*) o la Compensación Electrónica de Dispersión (EDC), para corregir los efectos de la Dispersión Cromática y garantizar una transmisión óptima de la señal en la red. Un Demultiplexor de Longitud de Onda (DEMUX), separa las señales combinadas en diferentes velocidades de línea y las direcciona a los transpondedores correspondientes para su procesamiento y transmisión. Finalmente, cinco receptores (Rx_i) que coinciden exactamente con la secuencia y el orden de los transmisores. En un sistema WDM de largo alcance, también habría varios amplificadores ópticos en línea de ganancia fija (para compensar la atenuación en el SSMF y el DCM) y un Preamplificador (PA, *Pre-*

Amplifier) antes del demultiplexor.

Una de las características principales trabajadas en redes ópticas es el alcance de transmisión, que varía en función de la tasa de transmisión a la cual se trabaje. Sin embargo, la viabilidad de un trayecto luminoso en una red MLR depende de la acumulación de efectos no lineales y otras degradaciones en la capa física de la red, lo que puede afectar la calidad de la señal a medida que viaja a través de los componentes ópticos. La co-propagación de longitudes de onda con diferentes velocidades de línea inducen efectos no lineales entre sí y reducen el alcance de transmisión de las diferentes velocidades de línea en función de un umbral aceptable de BER. Por ejemplo, una longitud de onda que funciona a 10 Gbps normalmente viajará una distancia más larga en comparación con una longitud de onda que funciona a 100 Gbps para el mismo formato de modulación, ya que a mayor tasa de bit suele presentarse mayores degradaciones en distancias más largas. En una red MLR ideal se busca garantizar el alcance máximo de cada señal de velocidad de línea incluso cuando se co-propague con otras señales de velocidad de línea, por lo que se limita el alcance de transmisión de la señal con tal de evitar mayores degradaciones ya que se busca mayor flexibilidad ante variaciones de tráfico. Los efectos no lineales pueden reducirse con la gestión de la dispersión, el plan del canal, los formatos de modulación, la gestión de la potencia de entrada del canal, etc. [33].

En las redes de Velocidad de Línea Mixta (MLR) totalmente ópticas, la viabilidad de un trayecto luminoso viene determinada por la acumulación de Deficiencias en la Capa Física (PLI) presentes en la red y su calidad se degrada a medida que viaja a través de cada componente óptico. Uno de los deterioros importantes es el ruido acumulado, que se debe principalmente a la Emisión Espontánea Amplificada (ASE, *Amplified Spontaneous Emission*) y la Diafonía (XT, *Crosstalk*). Para abordar estos desafíos, es posible utilizar una sola técnica de modulación o diferentes formatos de modulación sobre cada portadora de la señal según sea necesario, lo que brinda cierta versatilidad al sistema. Por ejemplo, es factible emplear técnicas de modulación sencillas como Modulación Digital de Amplitud (OOK, *On-Off Keying*) o No Retorno a Cero de Modulación Digital de Amplitud (**NRZ-OOK!**, *Non-Return-to-Zero On-Off Keying*) en una portadora de máximo de 10 Gb/s y adoptar formatos de modulación avanzados para portadoras de 40 Gb/s o 100 Gb/s como técnicas Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK, *Quadrature Phase Shift Keying*), Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase (DPSK, *Differential Phase Shift Keying*) o Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura Diferencial (DQPSK, *Differential Quadrature Phase Shift Keying*), dado que el alcance de los canales de alta velocidad de bits podrían verse limitados al utilizar formatos de modulación básicos debido al impacto de las deficiencias [31].

1.2. Amplificación óptica

La necesidad de amplificación óptica surge debido a la pérdida de intensidad que experimenta la señal óptica a medida que atraviesa largas distancias de fibra óptica.

Este fenómeno conocido como atenuación, puede debilitar la señal al punto de hacerla ininteligible en el receptor. Para superar este desafío y garantizar una transmisión eficaz de datos a larga distancia, se recurre a la amplificación óptica. Esta técnica permite fortalecer la señal óptica, asegurando que mantenga su intensidad y calidad a lo largo de su recorrido por la fibra óptica.

Los amplificadores ópticos desempeñan un papel esencial en los sistemas de comunicación a larga distancia a través de fibra óptica. Están diseñados para aumentar la potencia de las señales ópticas que han perdido intensidad durante la transmisión, lo que permite que señales atenuadas puedan ser interpretadas correctamente por el receptor óptico. No obstante, es importante tener en cuenta que los amplificadores ópticos tienen limitaciones importantes. Por ejemplo, no pueden compensar la dispersión acumulada en el enlace y añaden ruido a la señal óptica. Esta introducción de ruido implica una restricción en la cantidad de amplificadores que se pueden implementar en una configuración dada. A pesar de estos desafíos, los amplificadores ópticos han tenido un impacto revolucionario en la transmisión de datos a través de fibra óptica al posibilitar velocidades de transmisión de cientos de Tbps y permitir distancias de transmisión que pueden abarcar miles de kilómetros[36, 37].

Los amplificadores ópticos se pueden clasificar según su aplicación y proceso de emisión estimulada. En términos de aplicación, se dividen en tres categorías principales: Amplificador de Potencia (BA, *Booster Amplifier*), Preamplificador (PA) y Amplificador de Línea (LA, *Line Amplifier*). Estos amplificadores desempeñan roles específicos en la transmisión de datos y la compensación de pérdidas de señal en diferentes puntos de una red de fibra óptica.

Amplificador de Potencia: Es un tipo de amplificador óptico que se ubica al principio del enlace de comunicación, después de la fuente de señal óptica (Figura 1.15). Su función principal es aumentar la potencia de la señal óptica para compensar las pérdidas que ocurren a lo largo del enlace, permitiendo aumentar la distancia de transmisión .

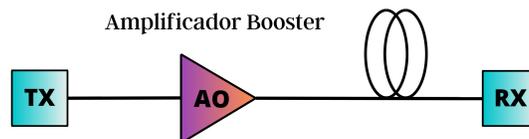


Figura 1.15: Amplificador de Potencia. Adaptada de [38].

Preamplificador: Es un dispositivo de bajo ruido que se ubica al final del enlace de comunicación, antes de que la señal sea recibida por el receptor óptico, con el objetivo de aumentar la sensibilidad del sistema (Figura 1.16). Proporciona una ganancia elevada, generalmente superior a los 30 dB.

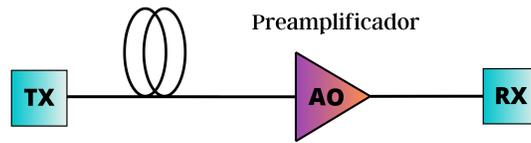


Figura 1.16: Preamplificador. Adaptada de [38].

Amplificador de Línea: Es un dispositivo de bajo ruido que se ubica en puntos intermedios del enlace de comunicación (Figura 1.17). Su función es amplificar la señal óptica en tramos específicos del enlace para compensar las pérdidas y mantener una buena calidad de señal.



Figura 1.17: Amplificador en Línea. Adaptada de [38].

La emisión estimulada es un proceso fundamental en la amplificación de señales ópticas. En este proceso, los fotones incidentes interactúan con átomos o moléculas excitadas, generando nuevos fotones idénticos en términos de frecuencia, fase y dirección. Este fenómeno es la base de varios tipos de amplificadores ópticos, que incluyen los Amplificadores de Fibra Dopada con Erblio (EDFA), los Amplificadores Raman (RFA) y los Amplificadores Ópticos de Semiconductor (SOA). Cada uno de estos amplificadores posee características y especificaciones únicas, lo que resalta la importancia de seleccionar el tipo de amplificador que mejor se adapte a los requisitos específicos del sistema de comunicaciones ópticas. A continuación, se proporciona una descripción detallada de las características y el principio de funcionamiento de cada uno de estos amplificadores.

1.2.1. EDFA

La historia del Amplificador de Fibra Dopada con Erblio (EDFA) tiene sus raíces en la década de 1960, aunque su aplicación práctica comenzó en los años 90. El descubrimiento de esta tecnología marcó un hito significativo en el desarrollo de los sistemas de comunicación óptica. Desde entonces, el EDFA ha encontrado una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo la amplificación óptica de banda ancha, fuentes ópticas y láseres ajustables. [39].

Los EDFA desempeñan un papel importante en la industria de las telecomunicaciones debido a su capacidad para amplificar señales ópticas en una amplia gama de longitudes de onda, siendo particularmente eficaces en las bandas C (1530 nm-1560 nm)

y L (1570 nm-1610 nm). Estos dispositivos presentan una serie de características clave que los distinguen, como su alta ganancia, su eficiente operación con baja potencia de bombeo y un rendimiento superior en comparación con otros dispositivos y amplificadores ópticos similares. También se destacan por su amplio ancho de banda, baja Figura de Ruido y su insensibilidad a la polarización. Además de estas características, los EDFA son dispositivos de bajo costo, confiables y fáciles de integrar en sistemas de comunicación ópticos existentes [40].

En la Figura 1.18 se muestra la configuración básica de un EDFA, el cual cuenta principalmente con: Un tramo de fibra dopada con erbio, una o varias fuentes de bombeo, acopladores selectivos de longitud de onda y aisladores dispuestos a la entrada y la salida para impedir la propagación del ruido ASE y señales reflejadas hacia el EDFA.

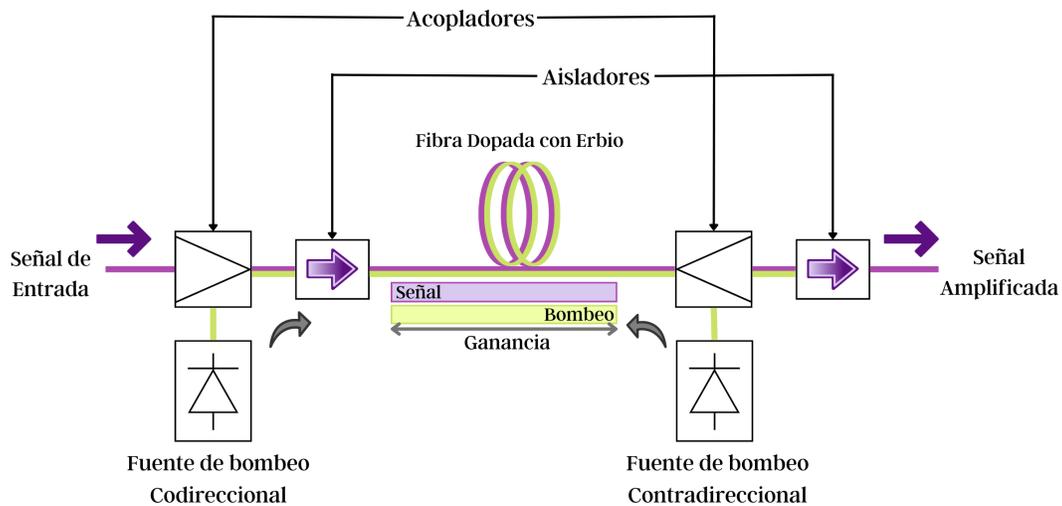


Figura 1.18: Configuración básica de un EDFA. Adaptada de [37].

Un EDFA consta de una sección corta de fibra que contiene en su núcleo una pequeña cantidad controlada de erbio añadido al vidrio en forma de un ion (Er^{3+}). Para el proceso de amplificación se emite una señal de entrada que se combina con la fuente de bombeo mediante el acoplador selectivo de longitud de onda, para posteriormente ser inyectado al EDFA, donde se produce la amplificación en términos de la potencia de bombeo utilizada [37, 41]. Uno de los factores más importantes que influye significativamente en la eficacia del EDFA es la elección de la fuente de bombeo. Generalmente se utilizan diodos emisores de luz de 980 nm o 1480 nm. El bombeo a 980 nm ofrece mejores prestaciones en términos de Figura de Ruido, pero con menores niveles de ganancia y potencias de salida. Por otro lado, el bombeo a 1480 nm proporciona mayores niveles de ganancia y altas potencias de salida, sin embargo, los valores de la Figura de Ruido son significativamente mayores. El erbio ante la presencia de fotones a esas longitudes de onda (980 nm o 1480 nm) emite nuevos fotones desplazados en frecuencia. Normalmente la ubicación en el espectro de estos nuevos fotones está en el entorno de

los 1550 nm, permitiendo amplificar las señales en la tercera ventana de los sistemas de comunicación por fibra óptica, donde la fibra de silicio presenta la mínima atenuación en la señal de información [39, 42].

Como se ilustra en la Figura 1.19, en un EDFA, se pueden dar tres mecanismos de radiación [42, 43]:

La absorción estimulada: se produce cuando un fotón es absorbido, lo que provoca que un electrón suba de nivel. Durante este proceso, el fotón desaparece debido al intercambio energético. En realidad, el objetivo es minimizar la absorción y maximizar la emisión estimulada para favorecer el proceso de amplificación.

La emisión estimulada: ocurre cuando un fotón interactúa con un átomo o molécula excitada, provocando su transición a un estado de menor energía y liberando un nuevo fotón de la misma frecuencia, fase y dirección que el fotón incidente.

La emisión espontánea Es un proceso en el cual un átomo o molécula emite un fotón de luz de forma aleatoria, sin ser estimulado por ningún otro fotón externo. Aunque este tipo de emisión también puede ser amplificada, lo que da lugar al ruido ASE. Este fenómeno no solo introduce ruido en la señal, sino que también reduce la ganancia del amplificador.

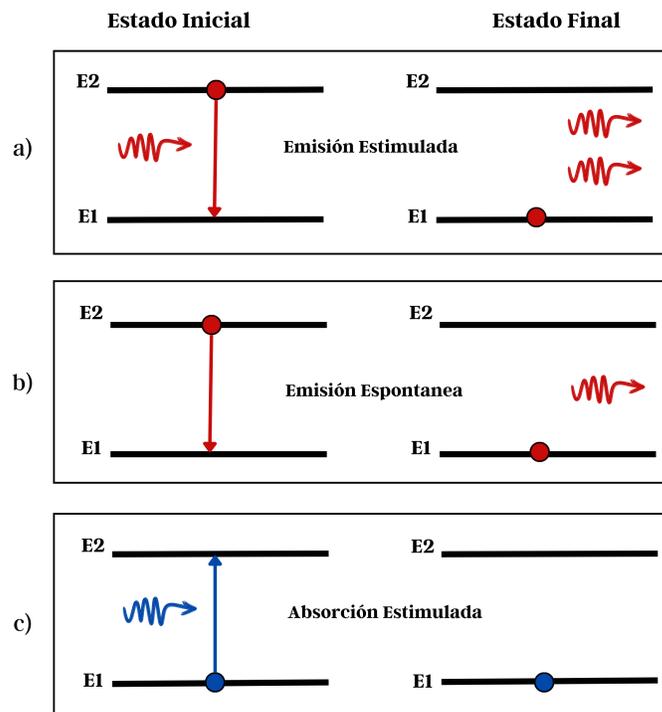


Figura 1.19: Diagrama de transiciones y bandas de EDFA. Adaptada de [42].

La inversión de población es un fenómeno fundamental para la emisión de fotones. Se produce cuando en un medio activo, como una fibra óptica en el caso de un EDFA, hay más electrones en un nivel de energía superior que en el nivel inferior de una manera inducida. Este estado es fundamental para el funcionamiento de dispositivos como láseres y amplificadores ópticos. Se logra mediante el bombeo adecuado de ciertos materiales con niveles de energía electrónicos metaestables, en los cuales los electrones requieren un tiempo relativamente largo para desexcitarse por emisión espontánea. Esto favorece la acumulación de electrones en el estado de energía superior, permitiendo así la emisión estimulada de fotones y, por ende, la amplificación de señales ópticas.

Para explicar el funcionamiento de un EDFA, en la Figura 1.20 se presenta un modelo simplificado de los niveles de energía más bajos del ion erbio en una matriz de sílice. En este modelo, E1 representa el nivel energético básico o banda de referencia, E2 representa el nivel o banda metaestable y E3 el nivel de más energía o banda de bombeo. Para empezar, un bombeo producido por una señal láser excita los iones de erbio desde el estado fundamental E1 hasta el nivel superior E3. El nivel E3 es un nivel de corta duración, y los iones vuelven al nivel E2 por emisión espontánea después de menos de $1 \mu s$. Los iones llevados al nivel E2 permanecen allí durante más tiempo debido a que el tiempo de vida de este nivel es mayor, correspondiente a unos 12 ms. Por lo tanto si el bombeo persiste, la población de iones en el nivel E2 puede hacerse mayor que la población de iones del nivel E1 y lograr así una inversión de población entre los niveles E1 y E2, permitiendo que los electrones del nivel E2 caigan al nivel E1 mediante la emisión estimulada por los fotones de la señal a amplificar, produciéndose entonces la amplificación de señal[42, 44].

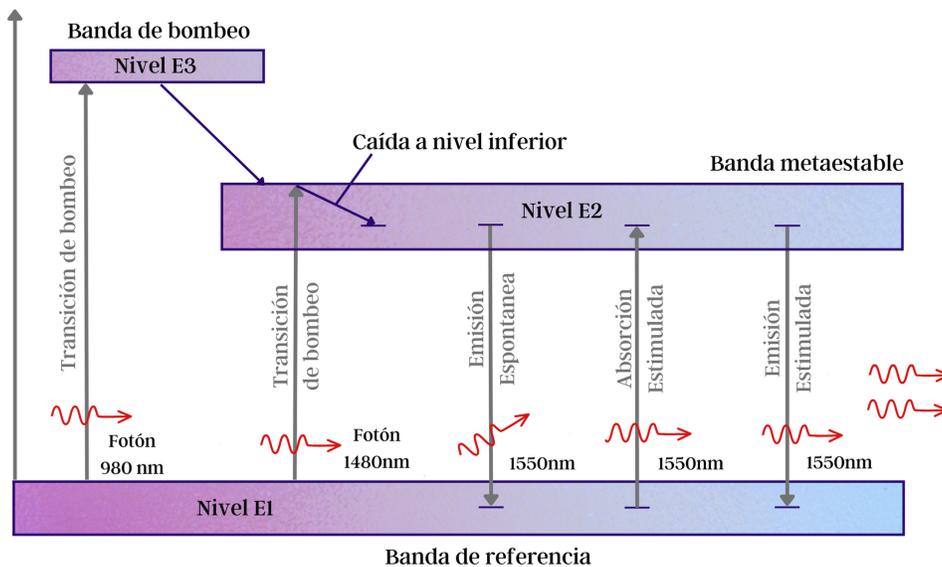


Figura 1.20: Diagrama de transiciones y bandas de EDFA. Adaptada de [42].

1.2.2. RAMAN

El Amplificador de Fibra Raman (RFA) al igual que el EDFA es una tecnología de amplificación óptica ampliamente utilizada en sistemas de comunicación de larga distancia. Cuenta con la capacidad de operar en cualquier banda de comunicación siempre que se le proporcione una potencia de bombeo adecuada en una longitud de onda particular. En comparación con los EDFA no requiere de un dopaje específico en la fibra, además no es necesaria una inversión de población, ya que se basan en el fenómeno físico no lineal de Dispersión Raman Estimulado (SRS, *Stimulated Raman Scattering*) [45–47].

La dispersión Raman, fue descubierta originalmente en 1928 de forma independiente por C.V. Raman y K.S. Krishnan en la India, así como por L. Mandelstam y G. Landsberg en la Unión Soviética, pero fue a principios de los setenta que Stolen e Ippen demostraron la amplificación Raman en fibra óptica. Resaltaron que la disposición geométrica de la fibra posibilita la generación de SRS al mantener una alta densidad de potencia de bombeo confinada a lo largo de largas distancias [48].

La dispersión Raman estimulada es un fenómeno no lineal con la capacidad de convertir las fibras ópticas en amplificadores Raman de amplio espectro y láseres Raman ajustables en frecuencia. Sin embargo, también se puede considerar un efecto no lineal dañino, ya que puede crear diafonía entre canales en sistemas ópticos WDM. En una fibra que transporta múltiples canales de longitud de onda, el efecto SRS puede crear una transferencia de energía desde canales de longitud de onda corta (de mayor frecuencia) a canales de longitud de onda larga (de menor frecuencia) [49].

La SRS es un proceso en el que un fotón de la señal óptica incidente (bomba) estimula la vibración molecular del material y pierde parte de su energía. Debido a la pérdida de energía, el fotón se emite de nuevo en una frecuencia más baja. Esta transferencia de energía genera lo que se conoce como “fonón”, que representa la energía vibracional introducida en las moléculas. En el caso de una fibra óptica, la SRS se origina a partir de la vibración molecular a nivel del material de sílice. En consecuencia, a medida que avanza el proceso SRS, los fotones de bombeo son gradualmente absorbidos por la fibra, y como resultado, surgen nuevos fotones a una frecuencia reducida, llamados fotones de Stokes [50].

El parámetro más importante que caracteriza a los amplificadores Raman es el coeficiente de ganancia Raman (γR), que describe cómo la potencia de Stokes aumenta a medida que se le transfiere potencia de bombeo a través de SRS. La Figura 1.21 representa el coeficiente de ganancia Raman para sílice en función del cambio de frecuencia Ω cuando la bomba y la señal están copolarizadas o polarizadas ortogonalmente. Un aspecto importante del espectro de ganancia Raman en fibras de sílice es su amplio rango de operación en frecuencia, que alcanza hasta 40 THz, con un pico amplio ubicado alrededor de 13,2 THz. Además, se destaca cómo la polarización afecta la ganancia Raman; la ganancia casi desaparece cuando la bomba y la señal están polarizadas or-

togonalmente [47, 50].

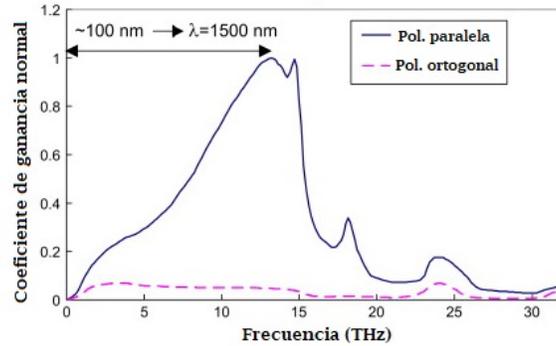


Figura 1.21: Ganancia espectral Raman del silicio. Tomada de [43].

La naturaleza no uniforme del espectro de ganancia Raman es motivo de preocupación para los sistemas WDM debido a que los diferentes canales son amplificados en diferentes proporciones. En la práctica, este problema se soluciona empleando múltiples bombas con ligeras variaciones en sus longitudes de onda. Cada bomba genera un perfil de ganancia que imita el espectro representado en la Figura 1.21. La superposición de varios de estos perfiles puede resultar en una ganancia relativamente uniforme a lo largo de un amplio rango de frecuencias, siempre y cuando se elijan de manera adecuada la longitud de onda y la potencia de la bomba. La Figura 1.22 ilustra un caso práctico con la utilización de cinco láseres de bombeo que operan en longitudes de onda entre 1450 y 1500 nm. Las potencias de bombeo individuales, representadas por las barras verticales, son seleccionadas de manera que generen perfiles de ganancia individuales, representados por las curvas discontinuas. Esto asegura que la ganancia Raman total de 18 dB se mantenga prácticamente constante en un ancho de banda de 100 nm, como se muestra en la línea continua.

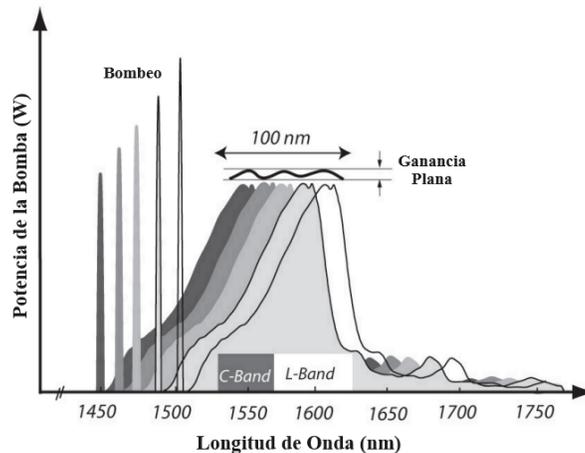


Figura 1.22: Espectros de ganancia de cinco longitudes de onda de bombeo diferentes [51].

La Figura 1.23 muestra la estructura básica de un amplificador Raman que incluye acopladores selectivos de longitud de onda, una o varias fuentes de bombeo y aisladores ópticos para prevenir señales reflejadas hacia el amplificador. En el proceso, cuando se emite una señal de entrada, ésta se combina con la señal de bombeo mediante el acoplador selectivo de longitud de onda, posteriormente es inyectada al amplificador para producir un incremento de potencia. Este aumento se produce cuando la señal de bombeo de alta intensidad atraviesa un medio altamente no lineal, en este caso la fibra óptica [37].

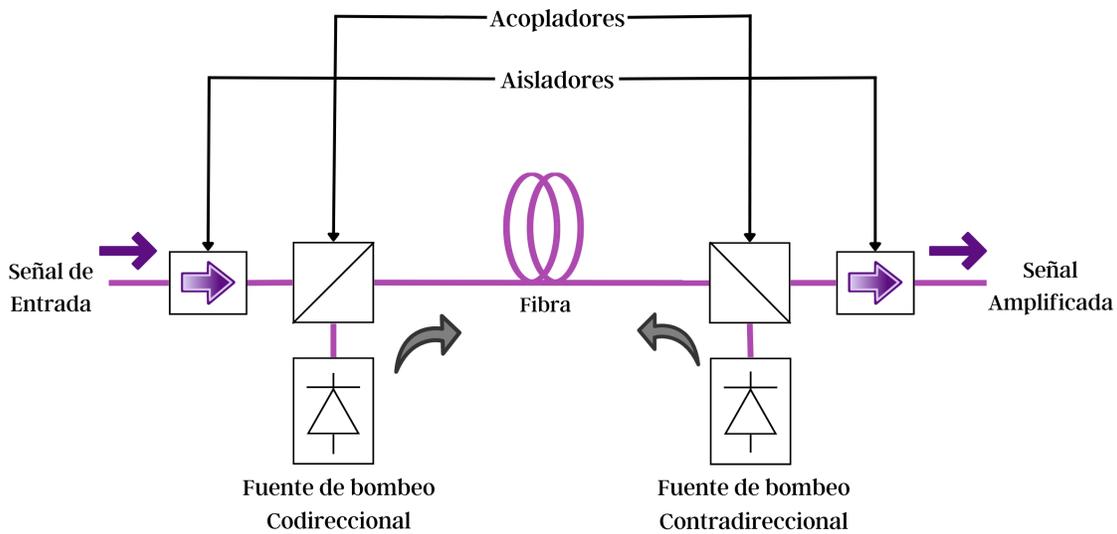


Figura 1.23: Configuración básica de un Raman. Adaptada de [37].

De acuerdo con la ITU-T G.665, que especifica las características generales de los amplificadores Raman y sus subsistemas, los amplificadores se pueden clasificar en dos categorías: los amplificadores Raman distribuidos operan a lo largo de toda la longitud de la fibra óptica en la que están integrados. Utilizan la interacción entre la luz y los fonones para proporcionar una amplificación uniforme a lo largo de la fibra. Este tipo de amplificador es eficaz para aplicaciones en las que se requiere una ganancia constante a lo largo de grandes distancias de transmisión. Por otro lado, los amplificadores Raman discretos están diseñados como componentes independientes y se colocan estratégicamente en puntos específicos de la red de comunicación óptica. Estos amplificadores proporcionan una amplificación selectiva y controlada en puntos específicos de la fibra, lo que permite una mayor flexibilidad en el diseño de la red y una optimización de la eficiencia de la amplificación [48].

1.2.3. SOA

El estudio de los Amplificadores Ópticos Semiconductores (SOA) se llevó a cabo por primera vez en la década de 1960. Sin embargo, las aplicaciones prácticas comenzaron en la década de 1980, cuando surgieron como un componente importante en muchos sistemas de comunicación de fibra óptica. Los estudios iniciales se enfocaron en SOAs contruidos con juntas homogéneas de Arseniuro de Galio (*GaAs*) que operaban en la región de los 820 nm, ya que era la frecuencia predominante en ese momento y no se contaba con láseres ni receptores ópticos que permitieran el desarrollo de sistemas de comunicación en las ventanas de la segunda y tercera región. No obstante, con la introducción de dispositivos de uniones heterogéneas, se despertó un mayor interés en la investigación sobre el uso del SOA y a finales de la década de 1980, se iniciaron investigaciones sobre estos amplificadores diseñados para operar en las frecuencias de 1300 nm y 1550 nm [51, 52].

El SOA es un dispositivo opto-electrónico capaz de amplificar una señal fotónica en condiciones específicas de operación. Su estructura se asemeja a una guía de onda, permitiendo que la señal pase de la fibra óptica al semiconductor y luego regrese amplificada a la fibra óptica, siempre y cuando el SOA esté en su región activa y correctamente polarizado. En la Figura 1.24 se presenta un diagrama esquemático de un SOA básico. La zona activa dentro del dispositivo contribuye a aumentar la intensidad de una señal de entrada. Para que este proceso ocurra se requiere una corriente eléctrica externa como fuente de energía. Se emplea una guía de ondas incorporada para mantener la propagación de la onda de señal dentro de la zona activa. No obstante, el confinamiento óptico es limitado, lo que ocasiona que parte de la señal se escape hacia las regiones circundantes con mayor pérdida. La señal que sale del SOA incluye cierto nivel de ruido aditivo, el cual surge del proceso de amplificación en sí y por lo tanto, no puede evitarse completamente. Las facetas del amplificador reflejan la luz, generando variaciones en el espectro de ganancia [53].

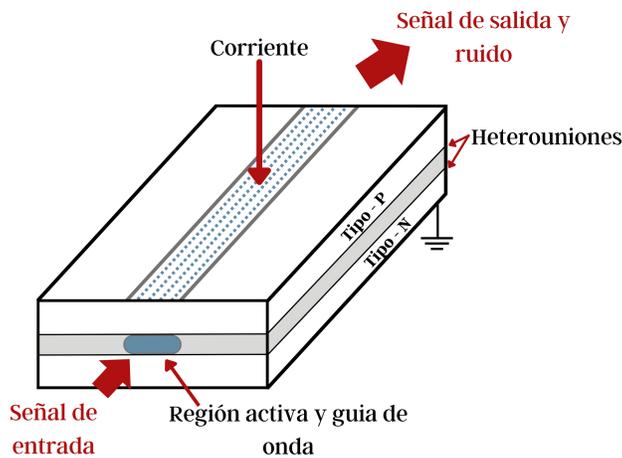


Figura 1.24: Configuración básica de un SOA. Adaptada de [37].

Los SOA son construidos en forma de chip dentro de una caja cerrada capaz de mantener una temperatura constante. Al regular la temperatura, se puede ajustar la longitud de onda adecuada para lograr la máxima ganancia. Los SOA tienen una estructura y funcionalidad similar a la de los láseres pero con una diferencia importante, que los amplificadores SOA incluyen una capa antirreflejo para evitar la creación de resonancias y acumulación de señal en el medio. Al elegir un material semiconductor para su construcción, es crucial seleccionar uno con una buena eficiencia cuántica, que se refiere a la relación entre la cantidad máxima de fotones generados y el número de cargas excitadas del portador. Los elementos comúnmente utilizados para la construcción incluyen Arsénico (As), Galio (Ga), Aluminio (Al), Indio (In) y Fósforo (P), y los materiales utilizados son aleaciones de estos elementos, como GaAs, AlGaAs, InGaAs, InGaAsP, InAlGaAs e InP [52, 54, 55].

Los SOA se dividen en dos categorías principales: los Fabry-Perot SOA (FP-SOA, *Fabry Perot SOA*) y los de Onda Viajera (TW-SOA, *Travelling wave SOA*). Un FP-SOA tiene reflectividad significativa en sus puntos de entrada y salida, lo que resulta en una amplificación resonante entre los espejos de los extremos. De esta manera, se logra una gran ganancia en las longitudes de onda correspondientes a los modos longitudinales de la cavidad. Por otro lado, un TW-SOA tiene reflectividad despreciable en ambos extremos, permitiendo la amplificación de la señal en un solo paso. El espectro de ganancia de un TW-SOA es bastante amplio y coincide con el del medio semiconductor de ganancia. Aunque algunos TW-SOA muestran una ligera variación en el espectro de ganancia debido a las reflectividades residuales de las facetas, son más adecuados para aplicaciones de sistemas. En la Figura 1.25, se expone la estructura de los amplificadores mencionados anteriormente y el comportamiento de la ganancia para cada caso, de acuerdo a la longitud de onda [54].

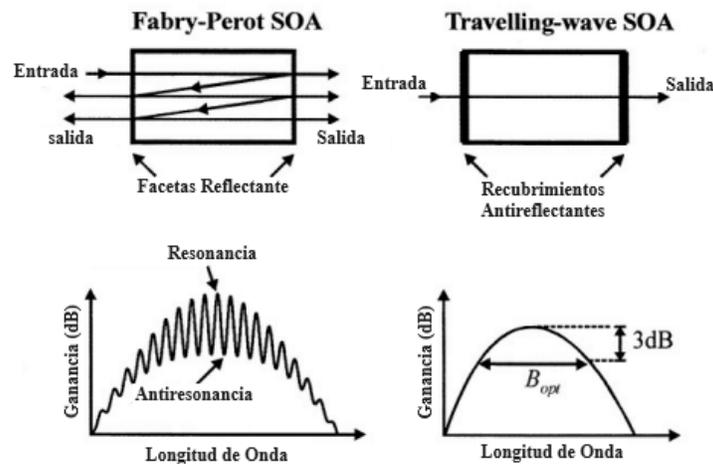


Figura 1.25: Tipos de estructura SOA: a) guías de ondas con perfil en cresta (RW), b) Heteroestructura Enterrada (BH). Tomada de [53].

El principio funcionamiento del SOA radica en generar una inversión en la población de portadores, esencial para amplificar la señal óptica de entrada a través de emisión estimulada. Esta inversión de población se logra al inyectar corriente eléctrica en la SOA. La Figura 1.26 presenta la estructura de bandas simplificada de un semiconductor de brecha directa. La banda de conducción y la banda de valencia están separadas por la energía de la brecha de banda, conocida como E_g . En cuasi-equilibrio, los tiempos de relajación para transiciones dentro de cada banda son considerablemente más cortos que el tiempo de relajación entre ambas. Por tanto, la distribución de portadores en cada banda puede describirse a través de dos niveles cuasi-Fermi denominados E_{fc} y E_{fv} . La posición de estos niveles está determinada por la inyección de corriente. Cuando la inyección de corriente es suficientemente intensa, la diferencia entre los niveles cuasi-Fermi supera la energía de la brecha de banda ($E_{fc} - E_{fv} > E_g$), y el semiconductor se comporta como un amplificador para frecuencias ópticas (ν) con $E_g < h\nu < E_{fc} - E_{fv}$. Si las energías de los fotones son mayores que $4E_f = E_{fc} - E_{fv}$ ($h\nu > 4E_f$), el proceso de absorción predomina sobre la emisión estimulada, lo que lleva al material a actuar como un atenuador [56].

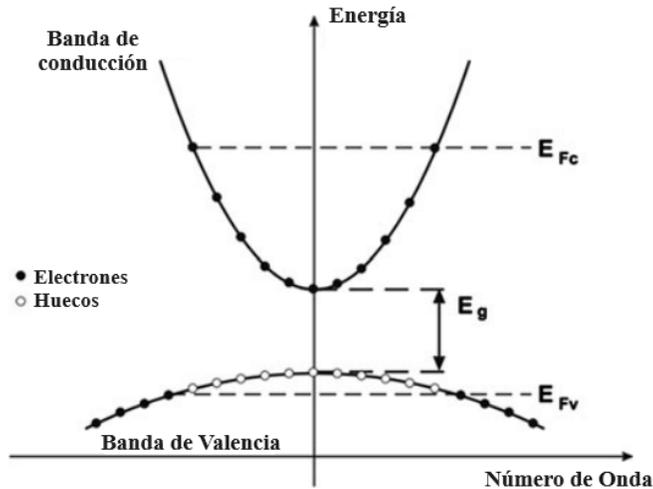


Figura 1.26: Estructura de banda simplificada de un semiconductor en cuasi-equilibrio. Tomada de [56].

La ganancia de un SOA se ve afectada por la potencia de la señal de entrada y el ruido interno que se genera durante el proceso de amplificación. A medida que la potencia de la señal de entrada aumenta, la ganancia disminuye, tal como se representa en la Figura 1.27. Esta reducción en la ganancia, conocida como saturación de ganancia, puede causar una distorsión considerable en la señal. Asimismo, esta saturación puede imponer limitaciones en la ganancia alcanzable cuando los SOA se emplean como amplificadores en sistemas WDM que utilizan múltiples canales.

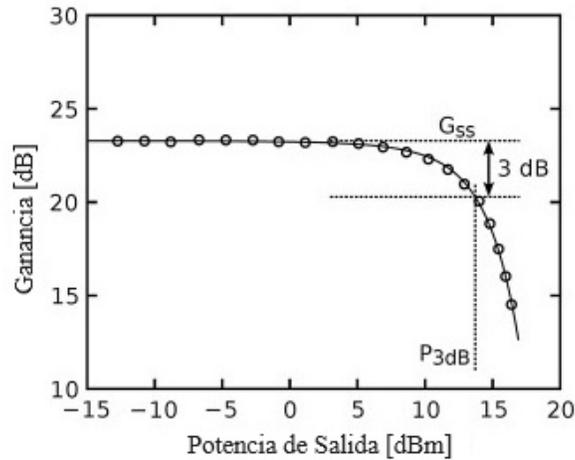


Figura 1.27: Tipos de estructura SOA: a) guías de ondas con perfil en cresta (RW), b) Heteroestructura Enterrada (BH). Tomada de [57].

Entre las características más importantes del SOA se encuentran un ancho de banda muy amplio, lo que les permite amplificar señales de alta velocidad, una ganancia alta que les permite amplificar señales débiles sin introducir ruido significativo, un tiempo de respuesta rápido que les permite amplificar señales de alta velocidad y una no linealidad que les permite procesar señales ópticas complejas. Además, su tamaño compacto y bajo costo los hacen ideales para aplicaciones en sistemas de comunicación óptica de alta velocidad.

1.2.4. Amplificación óptica híbrida

Los Amplificadores Ópticos Híbridos (HOA) son dispositivos que combinan dos o más tipos de amplificadores en una configuración. Estos sistemas aprovechan las ventajas de cada tipo de amplificador para mejorar el rendimiento en aplicaciones específicas. El uso de Amplificadores Ópticos Híbridos en la actualidad se percibe como una tecnología altamente prometedora y versátil para potenciar el rendimiento de sistemas de alta velocidad y largas distancias. Estos amplificadores desempeñan un papel importante en la optimización de la ganancia de ancho de banda, permiten extensiones significativas en la longitud de los tramos, reducen las pérdidas debidas a no linealidades inducidas y evitan los costos elevados asociados con la mejora de una ganancia más plana [58].

Los HOA también ofrecen notables ventajas sobre los regeneradores electrónicos. Por ejemplo, tienen la capacidad de ajustar la velocidad de transmisión de datos según las necesidades, permiten la transmisión de datos en múltiples canales y no requieren la modificación de enlaces o componentes de transmisión en línea para obtener estos beneficios [58]. No obstante, como ocurre con la mayoría de las tecnologías, es esencial considerar ciertos inconvenientes asociados a los HOA. Esto incluye aspectos como la respuesta transitoria, la diafonía inducida y otros ruidos particulares de los amplificadores Raman, tales como la retrodispersión de Rayleigh doble, la transferencia de ruido

de intensidad relativa mediada por bombas y las no linealidades resultantes de la alta potencia promedio en la ruta de fibra.

Un Amplificador Óptico Híbrido se forma al combinar dos o más tipos de amplificadores en una configuración. Según Mohammed N. Islam, la Ganancia Total del Amplificador Híbrido (GHybrid) es la suma de las ganancias individuales, es decir, la ganancia proporcionada por el amplificador EDFA (GEDFA) más la ganancia ofrecida por el amplificador Raman (GRaman). La distribución de esta ganancia en un amplificador híbrido se ilustra en la Figura 1.28.

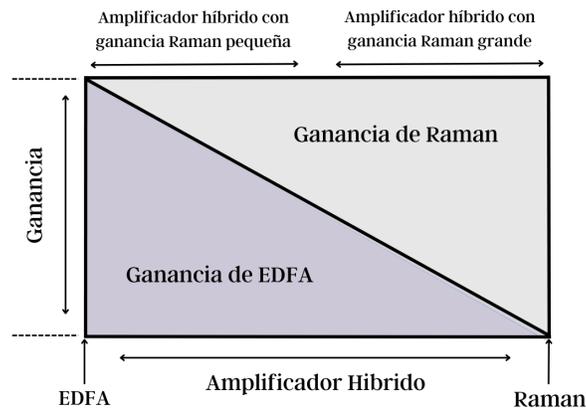


Figura 1.28: Partición de ganancia en un amplificador. Tomada de [59].

Existen dos tipos de Amplificadores Híbridos (HA): el Amplificador Híbrido de Banda Estrecha (NB-HA) y el Amplificador Híbrido de Banda Ancha y sin Interrupciones (SWB-HA). El NB-HA emplea amplificación Raman distribuida en la fibra de transmisión junto con un EDFA, proporcionando una transmisión de baja interferencia en las bandas C o L. El factor de ruido de la línea de transmisión es menor que si solo se utilizara un EDFA. Por otro lado, el SWB-HA emplea amplificación Raman, ya sea distribuida o discreta junto con un EDFA, ofreciendo una línea de transmisión de baja interferencia y ancha banda, o utiliza un amplificador discreto de baja interferencia y amplia banda para las bandas C y L. El ancho de banda de ganancia típico del NB-HA oscila entre 30 y 40 nm, mientras que para el SWB-HA abarca de 70 a 80 nm [59].

El ancho de banda de ganancia en SWB-HA es considerablemente más amplio en comparación con los anchos de banda de ganancia individuales de EDFA y Raman, sin la necesidad de un ecualizador de ganancia, gracias al enfoque de bombeo de longitud de onda única. Esto se debe a que los espectros de ganancia de EDFA y Raman tienen pendientes de ganancia opuestas. Además, si se seleccionan los valores de longitud de onda de bombeo Raman y EDFA óptimos, se puede lograr una uniformidad de ganancia significativamente mejorada mediante el bombeo de dos longitudes de onda, como se muestra en la Figura 1.29.

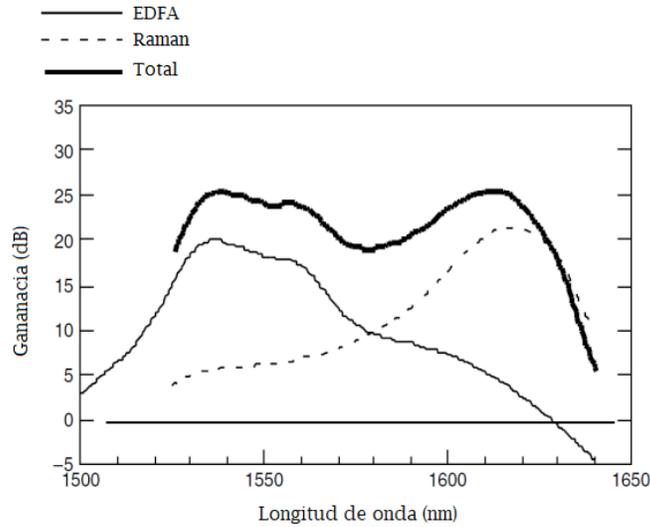


Figura 1.29: Espectros de ganancia de un amplificador híbrido. Tomada de [59].

Se pueden emplear diversas combinaciones de amplificadores ópticos en configuraciones híbridas con el propósito de mejorar el desempeño del enlace óptico y disminuir las restricciones de los amplificadores ya existentes, estas configuraciones pueden ser en Paralelo o en Serie.

En la configuración en Serie de Amplificadores Ópticos Híbridos, no se requieren acopladores ópticos, por lo que tienen una banda de ganancia continua relativamente amplia. La mayoría de la investigación sobre amplificadores híbridos con conexiones en serie se han centrado en la combinación de amplificadores EDFA y Raman [58]. La Figura 1.30 presenta el NB-HA, el cual está compuesto por un Amplificador Raman Distribuido (DRA, *Distributed Raman Amplifier*) que opera en la banda C o L, el cual funciona como una fibra de transmisión, y un EDFA de banda C o L que se ubica después de la fibra de transmisión y actúa como un repetidor.

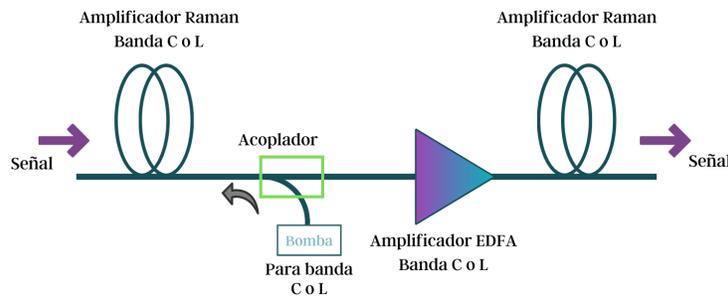


Figura 1.30: HOA Serie. Adaptada de [59].

En la configuración en Paralelo, el proceso comienza con la división de la señal de

información en grupos de longitud de onda distintos por medio de un demultiplexor. Luego cada grupo de longitudes de onda es amplificado por diferentes amplificadores que tienen ganancia en la respectiva banda de longitudes de onda y finalmente se vuelven a unir mediante un acoplador óptico. Esta configuración es simple de implementar y puede ser utilizada con cualquier tipo de amplificador óptico. Además, cabe destacar que este método es escalable, lo que significa que es posible comenzar con un único amplificador y luego añadir más amplificadores a medida que se incremente la demanda de capacidad. Sin embargo, tiene una limitación importante: debido a la presencia de una banda de protección en el acoplador óptico, queda una longitud de onda sin utilizar entre las bandas de ganancia de los amplificadores individuales y la Figura de Ruido del sistema se ve afectada negativamente debido a las pérdidas introducidas en el sistema por los acopladores ópticos utilizados frente a los amplificadores [60].

En la Figura 1.31 Se presenta un amplificador de dos bandas de ganancia EDFA que cuenta con EDFAs de banda de ganancia C y L colocados en Paralelo. El combinador y el divisor conectados a los EDFAs se encargan de multiplexar y demultiplexar los canales de señal en función de sus longitudes de onda. Es importante destacar que el ancho de banda de ganancia del EDFA de dos bandas de ganancia es aproximadamente el doble del que poseen los EDFAs de banda C o L.

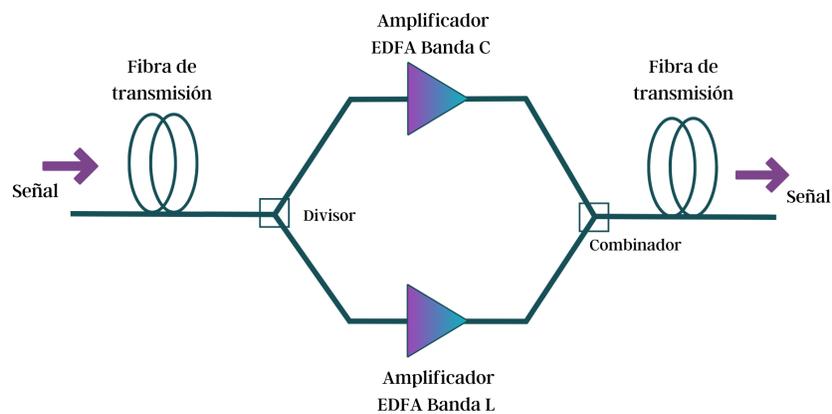


Figura 1.31: HOA Paralelo. Adaptada de [59].

Un amplificador óptico en configuración Serie-Paralelo es un dispositivo que combina las características de los amplificadores ópticos en Serie y en Paralelo. Esto significa que puede proporcionar ganancia a múltiples señales ópticas de manera simultánea (configuración en Paralelo), pero también puede amplificar secuencialmente una señal tras otra (configuración en Serie).

La Figura 1.32 muestra un amplificador híbrido de dos bandas de ganancia C y L, compuesto por un DRA impulsado por dos longitudes de onda (banda C y L) y un amplificador de dos bandas de ganancia EDFA funcionando en Paralelo. Las luces

de bombeo correspondientes a las bandas C y L se combinan mediante un dispositivo combinador y se inyectan en la fibra de transmisión mediante un acoplador [59].

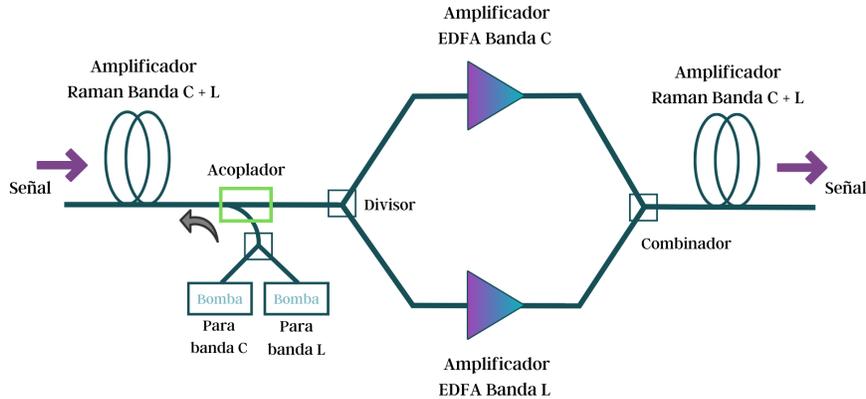


Figura 1.32: HOA Serie-Paralelo. Adaptada de [59].

[HOA] en su trabajo de grado “ANÁLISIS DE DESEMPEÑO EN UN ENLACE DE BAJADA XGS-PON CON AMPLIFICACIÓN HÍBRIDA HOA” realizan un análisis de desempeño para diferentes modos de amplificación híbrida utilizando los amplificadores EDFA y Raman en las configuraciones cascada, Paralelo y mixto sobre un entorno de red XGS-PON, donde los autores concluyeron que la implementación híbrida en Paralelo es la solución que ofrece mayor robustez y un desempeño más alto en la red.

1.3. Monitoreo del Desempeño Óptico

El Monitoreo del Desempeño Óptico (OPM) está compuesto por tres niveles: nivel de monitoreo de transporte, nivel de monitoreo de calidad de la señal y el nivel de protocolo (Figura 1.33).

Nivel de monitoreo de transporte: Hace referencia al monitoreo del canal óptico, donde se eligen las características específicas del dominio óptico necesarias para el transporte y gestión del canal a nivel de la capa WDM. Esto incluye parámetros como el registro de longitud de onda, mediciones en tiempo real de la presencia del canal, niveles de potencia y la Relación Señal a Ruido Óptico (OSNR, *Optical Signal-to-Noise Ratio*).

Nivel de monitoreo de la calidad de la señal: Este monitoreo se realiza sobre una longitud de onda específica a la cual se efectúan medidas sensitivas de transmisión de señal. Se pueden evaluar varios parámetros, incluyendo el factor Q, así como las propiedades del diagrama de ojo y la alteración que sufre la señal debido a la dispersión y a los efectos no lineales.

Nivel de monitoreo del protocolo: Este nivel involucra el monitoreo de la información del protocolo de datos y el monitoreo de desempeño del protocolo.



Figura 1.33: Niveles del Monitoreo del Desempeño Óptico (OPM). Adaptada de [61].

1.3.1. Parámetros de monitoreo

- **Potencia Óptica:** Es uno de los parámetros más importantes a monitorear dentro de una red óptica. La potencia óptica puede experimentar una disminución considerable debido a diversas razones, como pérdidas en conectores, empalmes, acopladores y atenuación en la fibra. En sistemas WDM, es esencial contar con información sobre la potencia de cada canal para realizar ajustes dinámicos que igualen la potencia en todos ellos. Esto se logra mediante un sistema de retroalimentación, lo que garantiza un rendimiento estable del sistema.
- **Factor Q:** El factor de calidad es utilizado para analizar el rendimiento de los sistemas donde la medición de la BER no es práctica. Puede ser utilizado para evaluar los efectos de las degradaciones del canal, por ejemplo el ruido ASE, DC, Dispersión por Modo de Polarización (PMD, *Polarization Mode Dispersion*), degradaciones introducidas por el transmisor y receptor y las no linealidades de la fibra, con lo que se puede lograr una estimación efectiva de la BER. En condiciones ideales, el factor Q está determinado por los niveles lógicos μ_0 y μ_1 , así como por la distribución del ruido Gaussiano alrededor de los niveles de “1” y “0”, que están definidos por las desviaciones típicas σ_0 y σ_1 , como se muestra en la Figura 1.34.

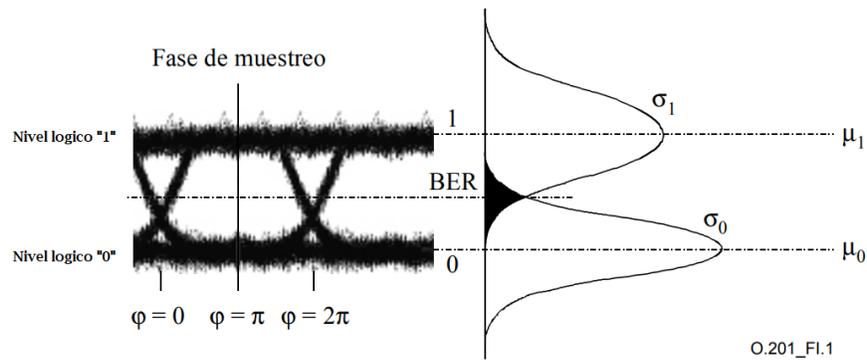


Figura 1.34: Factor de Calidad.

En términos teóricos, la definición del factor de calidad es la siguiente:

$$Q(\text{Lineal}) = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad (1.1)$$

$$Q(\text{dB}) = 20 \log_{10} Q(\text{Lineal}) \quad (1.2)$$

- Tasa de Error de Bit:** La BER es una medida numérica que refleja la cantidad de bits incorrectos en una transmisión de datos digitales en comparación con el total de bits transmitidos. Es un indicador comúnmente utilizado para evaluar la calidad de una comunicación de datos y para determinar el rendimiento de un sistema de comunicaciones. Una BER más baja indica una transmisión más precisa y fiable, mientras que una BER más alta indica una mayor cantidad de errores en la transmisión.

La BER se define como:

$$BER = \frac{k(\Delta t)}{K(\Delta t)} \quad (1.3)$$

Donde:

$k(\Delta t)$ Representa los bits errados en el intervalo de tiempo Δt .

$K(\Delta t)$ Representa el total de bits transmitidos en el intervalo Δt .

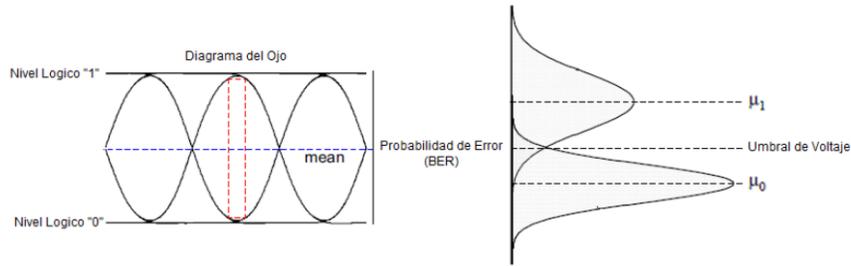


Figura 1.35: Relación Factor Q vs BER.

La Figura 1.35, muestra la relación directa que existe entre la calidad de la señal y la BER. Se puede aproximar el comportamiento de la BER si se asume que las distribuciones de señales correspondientes a los valores lógicos “1” y “0” tienen una forma gaussiana; con μ_1 y μ_0 siendo los niveles medios de tensión de los valores “1” y “0” respectivamente, y σ_1 y σ_0 las desviaciones típicas de la distribución de ruido.

- Relación Señal a Ruido Óptico (OSNR):** Es una métrica que refleja la relación entre la señal óptica y el ruido total presente en la misma. Una alta OSNR indica una señal óptica robusta con menor nivel de ruido. Esto se traduce en una mayor capacidad de transmisión de información y una menor probabilidad de errores durante la transmisión. La OSNR es utilizada para estimar la calidad de la señal directamente en la capa óptica, ya que mediante un enlace ópticamente amplificado la OSNR se correlaciona con la BER. Además, la OSNR al ser transparente para la tasa de bits y para el formato de modulación, se vuelve ideal para ser utilizada en redes ópticas dinámicamente reconfigurables. Por ejemplo, la OSNR puede emplearse para la configuración y optimización de los enlaces, el análisis de la causa raíz de los problemas del sistema, la configuración de una alarma temprana de degradación de la señal, la activación del mecanismo de resiliencia, la verificación del Acuerdo de Nivel de Servicio (SLA, *Service Level Agreement*), entre otras.

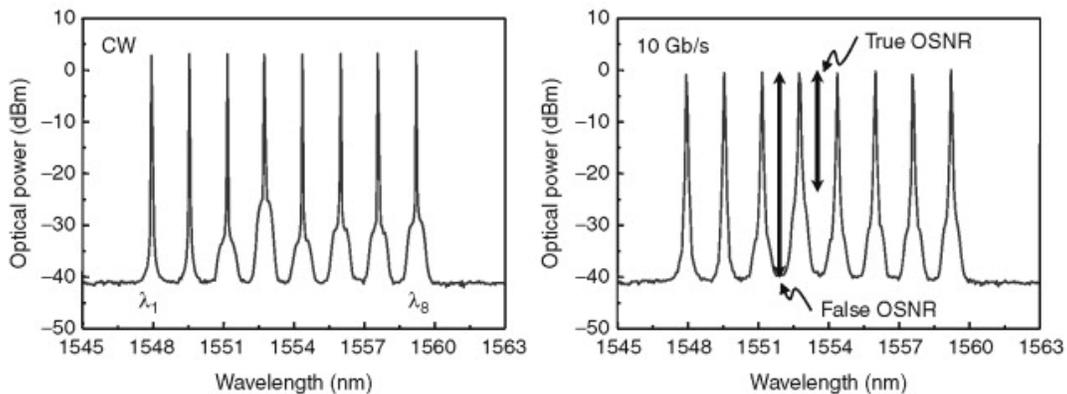


Figura 1.36: Medición de la OSNR para un sistema DWDM.

La Figura 1.36 muestra que para medir adecuadamente la OSNR en un canal DWDM, se deben considerar algunos factores clave para minimizar el error en la medición del parámetro. Uno de los elementos más importantes a tener en cuenta es la sensibilidad del receptor.

- Diagrama del Ojo:** El diagrama del ojo es una representación gráfica que muestra la forma en que la señal óptica se distribuye en el tiempo. Se utiliza para visualizar la deformación temporal de una señal óptica, y representa cómo un receptor óptico recibe la señal (Figura 1.37). Un buen diagrama del ojo indica que la señal es clara y sin distorsión, lo que significa que la BER es baja y la calidad de la transmisión es alta.

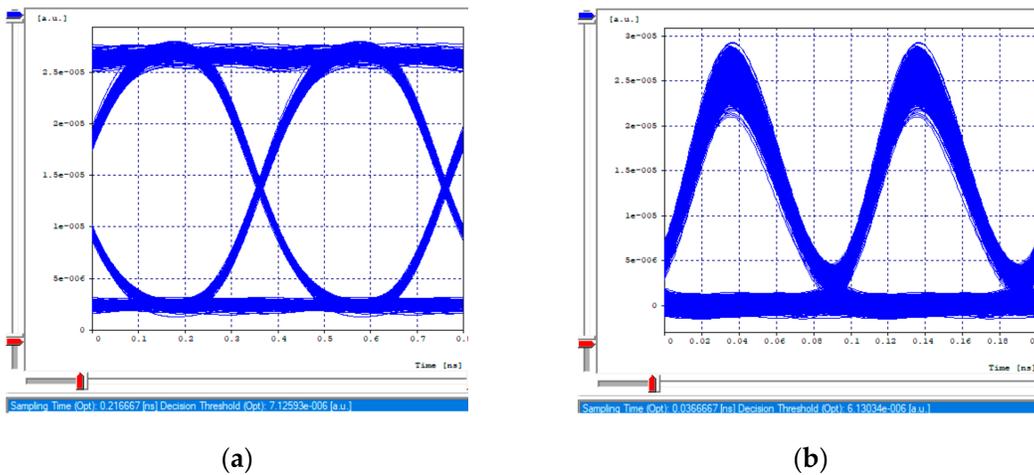


Figura 1.37: Diagrama de Ojo. (a) Canal NRZ-OOK (2.5 Gbps); (b) Canal RZ-OOK (10 Gbps).

1.3.2. Correlación de las degradaciones ópticas

Además de la fibra, en los sistemas de comunicación óptica cada componente puede contribuir a las degradaciones o deficiencias ópticas. Estas degradaciones pueden clasificarse en: i) Problemas catastróficos que incluyen pérdida de potencia óptica, incorrecta instalación y configuración de los equipos, mal desempeño de los componentes y roturas y daños de la fibra. ii) Problemas no catastróficos que cuentan con suficiente potencia de señal óptica pero debido a efectos lineales y no lineales la señal puede ser distorsionada gravemente. Los efectos degradantes esenciales basados en fibra debido a la transmisión incluyen los siguientes:

Efectos lineales

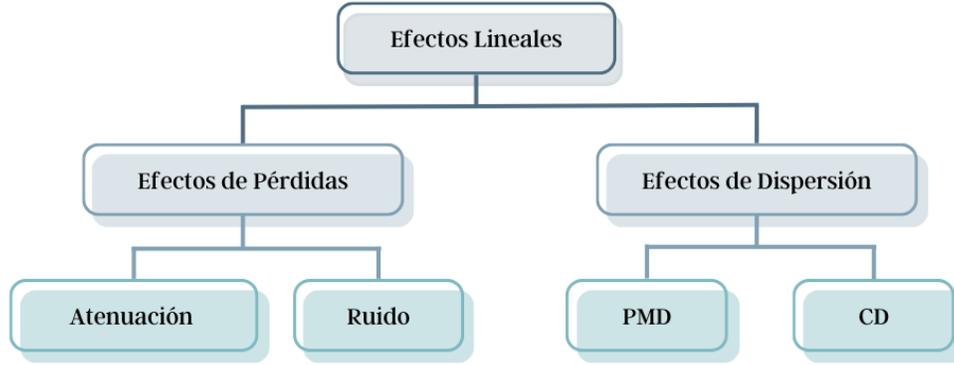


Figura 1.38: Clasificación de los efectos lineales.

- Dispersión por Modo de Polarización (PMD):** En las comunicaciones ópticas modernas de alta velocidad que utilizan fibra monomodo, la PMD se ha convertido en una de las fuentes más notorias de degradación del rendimiento de la transmisión. Como se aprecia en la Figura 1.39, la PMD se produce cuando los dos modos de polarización ortogonal viajan a distinta velocidad de grupo debido a las múltiples birrefringencias generadas en el núcleo de la fibra, lo que resulta en su llegada desfasada, ensanchando y distorsionando los pulsos transmitidos.

Suponiendo que los índices efectivos en el núcleo de una fibra birrefringente son n_x y n_y para los dos modos de polarización, sus correspondientes constantes de propagación serán $\beta_y = \omega n_y/c$ y $\beta_x = \omega n_x/c$, respectivamente. Debido a la birrefringencia, n_x y n_y no son iguales, y su diferencia es:

$$\Delta\beta = \beta_x - \beta_y = \frac{\omega}{c} \Delta n_{eff} \quad (1.4)$$

donde $\Delta n_{eff} = n_{//} - n_{\perp}$ es el índice de refracción diferencial efectivo de los dos modos.

Para una fibra de longitud L , el retardo de grupo relativo entre los dos modos de polarización ortogonal es:

$$\Delta\tau_g = \frac{n_{//} - n_{\perp}}{c} L = \frac{L \Delta n_{eff}}{c} \quad (1.5)$$

Esta diferencia de retardo entre los modos de polarización se conoce como Retardo Diferencial de Grupo (DGD, *Differential Group Delay*) [62].

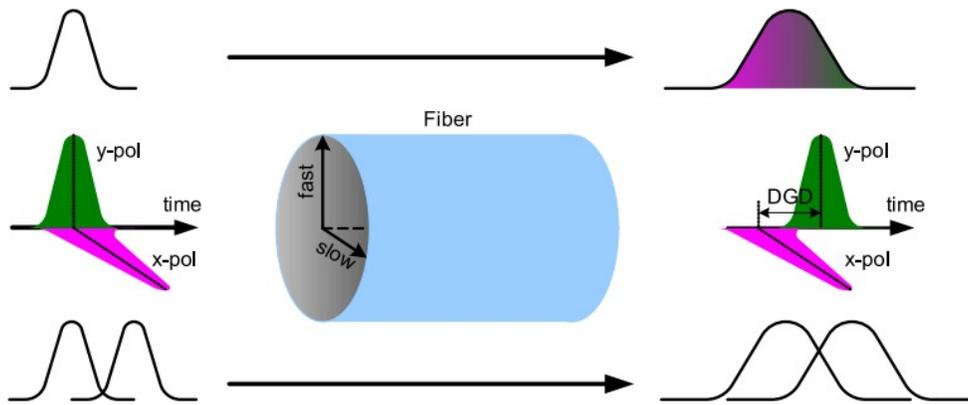


Figura 1.39: Dispersión por modo de polarización [63].

- Dispersión Cromática (CD, Chromatic Dispersion):** La Dispersión Cromática constituye una característica importante de la fibra óptica que influye en el desempeño de la transmisión a través de ella. Esta dispersión resulta de la combinación de los efectos de dispersión del material y dispersión de la guía de ondas. La dispersión del material describe cómo la longitud de onda se ve influenciada por el índice de refracción del material que constituye el núcleo de la fibra. La dispersión en la guía de onda ocurre debido a la dependencia del coeficiente de propagación del modo en los parámetros de la fibra, del radio del núcleo, de la diferencia entre los índices de refracción del núcleo y el revestimiento de la fibra y de la longitud de onda de la señal.

En la fibra óptica convencional, se presenta un coeficiente de dispersión positivo, esto implica que las longitudes de onda más largas experimentan un mayor tiempo de tránsito a través de la fibra, en comparación con las longitudes de onda más cortas. Como se observa en la Figura 1.40, esta diferencia en el retardo provoca deformaciones en el pulso transmitido, ya que las diferentes partes del pulso llegan al destino en momentos ligeramente diferentes [64].

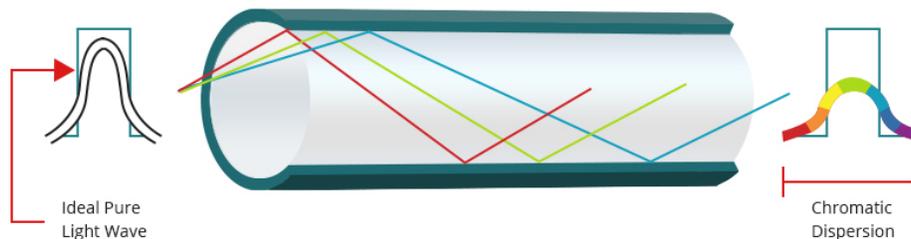


Figura 1.40: Dispersión Cromática.

La Dispersión Cromática se mide en $(\text{ps}/\text{nm})/\text{km}$ y esto significa que en presencia

de pulsos de tiempo más cortos, la frecuencia experimenta una dispersión mayor debido a la modulación de datos, y cuando se emplean longitudes de fibra más extensas, la dispersión temporal se acentúa. Por otro lado, la capacidad de tolerancia a la Dispersión Cromática es inversamente proporcional al cuadrado de la tasa de bits. Esto implica que las señales de 40 Gb/s son 16 veces más sensibles a ella que las señales de 10 Gb/s. Dado que las señales de alta velocidad de datos tienen una tolerancia reducida a la Dispersión Cromática, la precisión en el monitoreo se vuelve cada vez más crucial.

Desde un punto de vista matemático, los efectos de la dispersión se suelen analizar mediante la expansión de la constante de propagación β del modo en una serie de Taylor alrededor de la frecuencia central del espectro del pulso.

$$\beta(\omega) = n(\omega)\frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (1.6)$$

donde

$$\beta_m = \left(\frac{d^m \beta}{d\omega^m} \right)_{\omega=\omega_0} \quad (1.7)$$

Con $m=0,1,2,\dots$, los parámetros β_1 y β_2 se relacionan con el índice de refracción efectivo $n(\omega)$ y sus derivadas mediante las siguientes expresiones.

$$\beta_1 = \frac{1}{v_g} = \frac{n_g}{c} = \frac{1}{c} \left(n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right) \quad (1.8)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left(2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2 n}{d\omega^2} \right) \quad (1.9)$$

Donde n_g representa el índice de grupo y v_g la velocidad de grupo. El coeficiente β_2 se conoce como el parámetro de Dispersión de la Velocidad de Grupo (GVD, Group Velocity Dispersion) y es responsable del ensanchamiento del pulso en una aproximación de primer orden[65].

- Atenuación:** La atenuación en fibra óptica es la disminución de la intensidad de la señal óptica debido a la absorción, dispersión y reflexión de la luz a lo largo de la fibra. Esta pérdida o atenuación de potencia óptica es un factor crítico en el diseño y planificación de redes de fibra óptica, permite determinar el valor final de potencia que será entregada al receptor y se mide en decibelios por kilómetro (dB/km). La atenuación afecta la calidad de la señal y limita la distancia máxima a la que se puede transmitir la información a través de la fibra sin necesidad de repetidores y está asociada a varios tipos de pérdidas.

- **Curvatura de la fibra:** La curvatura de la fibra puede causar que la luz se escape del núcleo de la fibra y se pierda a través de la envoltura. Además, la curvatura puede causar la reflexión de la luz en la superficie curva de la fibra, que a su vez puede provocar una pérdida de señal óptica. Estas curvaturas pueden ser causadas por varios factores, como la instalación, la manipulación, la vibración y la tensión en la fibra.
 - **Microcurvatura:** Es un tipo de pérdida de señal óptica que ocurre cuando la fibra óptica se dobla o se curva en pequeñas secciones a lo largo de su longitud. Puede ser minimizada mediante el uso de técnicas adecuadas de instalación y manipulación de la fibra óptica. También se pueden utilizar guías de onda para mantener la fibra en su lugar y reducir la tensión en la fibra.
 - **Macrocurvatura:** La atenuación por macrocurvatura es un tipo de pérdida de señal óptica que ocurre cuando la fibra óptica tiene un radio de curvatura mayor en grandes secciones a lo largo de su longitud. Puede ser minimizada mediante el uso de técnicas adecuadas de instalación y manipulación de la fibra óptica. Además, se pueden utilizar soportes para mantener la fibra en su lugar y reducir la tensión en la fibra.

Existen dos tipos de pérdidas en la fibra debido a los materiales de construcción:

- **Pérdida intrínseca:** Está compuesta por la absorción ultravioleta y absorción infrarroja, pérdidas por absorción de radiación de potencia óptica al paso de la luz a través del núcleo de la fibra.

La absorción ultravioleta ocurre debido a las transiciones electrónicas entre la banda de valencia y la banda de conducción del material que compone la fibra. En la región infrarroja, los fotones del haz de luz son absorbidos por los átomos en el núcleo de vidrio de la fibra óptica. Esta absorción genera vibraciones mecánicas aleatorias en los enlaces atómicos, lo que ocasiona la producción de calor y por ende las pérdidas. Esta absorción se hace significativa cuando se alcanza la región del infrarrojo.

- **Pérdida extrínseca:** Se originan debido a la presencia de algunas impurezas en los materiales de fabricación de las fibras, por lo general son iones de metales como hierro, cromo, cobalto y cobre, adicionalmente, las impurezas asociadas a los iones de agua OH.

En la Figura 1.41 se muestra que para la longitud de onda de 810 nm hay altos niveles de atenuación, entre 0.5 y 0.7 dB/Km, mientras que para las ventanas cerca de 1310 nm y 1550 nm se encuentra un rango típico de atenuación entre los 0.15 y 0.3 dB/Km, mejorando las distancia de transmisión con los mismos requerimientos de potencia.

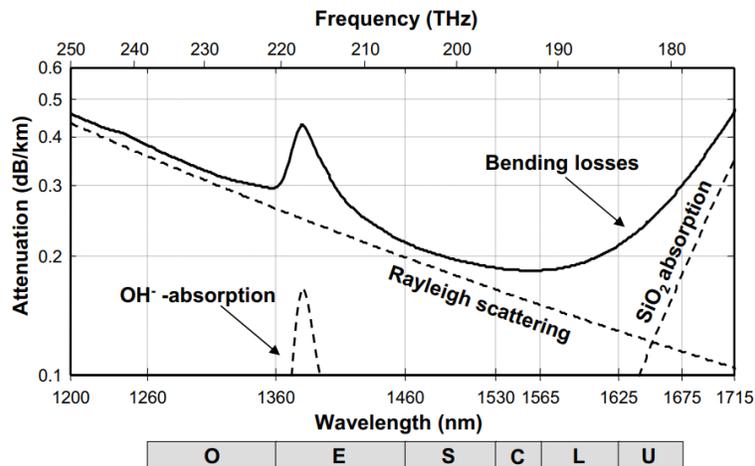


Figura 1.41: Pérdida de fibra en función de la longitud de onda y la frecuencia.

Existe un fenómeno óptico conocido como la dispersión de Rayleigh y el cual sobresale por ser el mecanismo predominante entre las dos colas de los picos de absorción ultravioleta e infrarroja. La dispersión de Rayleigh es causada por las irregularidades microscópicas locales en el material de la fibra. Estas irregularidades generan fluctuaciones aleatorias en el índice de refracción a lo largo de la fibra, lo que puede afectar la calidad y la integridad de la señal transmitida.

El fenómeno de dispersión de Rayleigh provoca un ensanchamiento del pulso óptico a medida que se propaga a lo largo de la fibra. Además es más pronunciada en fibras monomodo, donde la luz se propaga en un solo modo. Para contrarrestar los efectos de la dispersión de Rayleigh, se utilizan técnicas como la dispersión compensada, que ayuda a minimizar la degradación de la señal.

Efectos no lineales

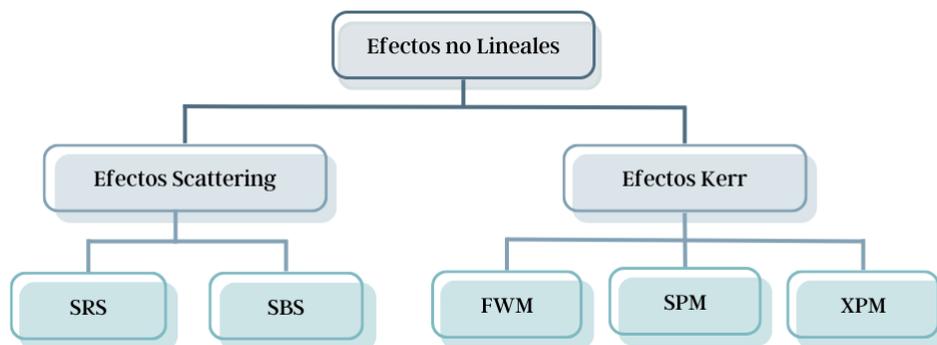


Figura 1.42: Clasificación de los efectos no lineales.

- **Modulación de Auto-Fase (SPM, *Self-Phase Modulation*):** SPM es un fenómeno óptico no lineal que ocurre cuando un pulso de luz viaja a través de un medio no lineal, como una fibra óptica y experimenta una modulación de fase debido a su interacción con sí mismo. Este proceso se debe a la dependencia de la velocidad de fase de la frecuencia de la luz en el medio no lineal.

La Modulación de Auto-Fase puede causar un ensanchamiento espectral del pulso de luz, conocido como fenómeno de chirp. El chirp es una variación en la frecuencia instantánea de un pulso de luz a lo largo de su duración temporal. Esto puede ocurrir cuando los componentes de frecuencia del pulso se desplazan hacia frecuencias más bajas (rojo) o más altas (azul) en diferentes puntos a lo largo del pulso.

El chirp resultante puede ser positivo o negativo, dependiendo de la velocidad de propagación de los diferentes componentes de frecuencia del pulso a través del medio no lineal. Un chirp positivo ocurre cuando los componentes de alta frecuencia se mueven más rápido que los de baja frecuencia, lo que resulta en una compresión temporal del pulso. El chirp negativo se produce cuando los componentes de baja frecuencia se propagan más rápido que los de alta frecuencia, lo que resulta en una expansión temporal del pulso, como se muestra en la Figura 1.43.

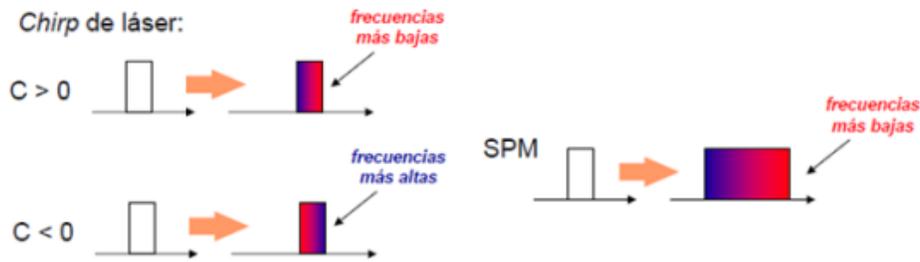


Figura 1.43: Efecto de la SPM sobre un pulso que se propaga.

- **Modulación de Fase Cruzada (CPM/XPM, *Cross-Phase Modulation*):** CPM es un fenómeno en el que la presencia de una señal de luz en un canal óptico afecta la fase de otras señales en el mismo canal, causando una interacción no lineal entre las señales. Este efecto puede limitar la capacidad de transmisión de información en redes ópticas y es un problema importante en la transmisión de señales ópticas a alta velocidad. La CPM es uno de los efectos no lineales en la fibra óptica que afecta la calidad de la transmisión óptica.

La fórmula 1.10 describe el cambio de fase que sufre el canal ϕ_n^i , la cual depende del coeficiente de no linealidad γ , la longitud efectiva de la fibra óptica L_{eff} , y la potencia del canal P_i .

$$\phi_n^i = \gamma L_{eff} (P_i + 2 \sum_{n \neq i} P_n) \quad (1.10)$$

- Mezcla de Cuatro Ondas (FWM, *Four Wave Mixing*):** Es una no linealidad de tercer orden causada por el índice de refracción no lineal de la fibra. Es un proceso que se produce en fibra óptica cuando cuatro ondas de luz se mezclan en un solo canal. En este proceso, dos ondas coherentes se combinan para producir dos nuevas ondas con diferentes longitudes de onda. Estas nuevas ondas pueden causar interferencia y distorsión en las señales de transmisión, aumentando la tasa de errores y disminuyendo la calidad de la señal. La FWM es una forma de interferencia crosstalk y se considera uno de los principales problemas en redes de fibra óptica de alta capacidad.

La Figura 1.44 muestra el efecto de FWM para tres canales de comunicación. A medida que se incrementa el número de canales en un sistema WDM, las componentes ópticas generadas por FWM se incrementan de forma casi exponencial. El espaciamiento de canales influye fuertemente en la magnitud de los productos FWM, cuanto más separados, mejor. La eficiencia de mezcla es inversamente proporcional a la dispersión de la fibra, más dispersión significa menos FWM.

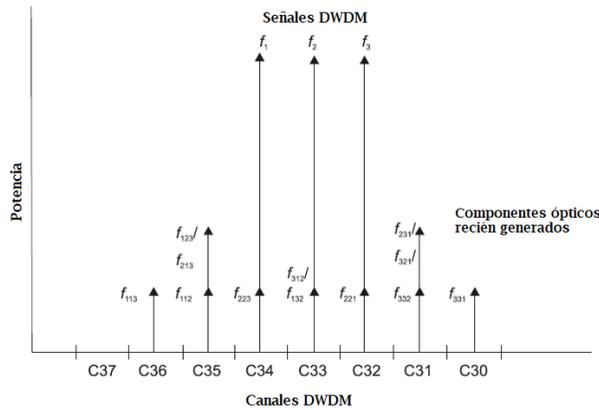


Figura 1.44: Principios de la mezcla de cuatro ondas.

A partir de la ilustración 1.45, se evidencia el impacto de la Mezcla de Cuatro Ondas (FWM) en un sistema DWDM que opera a una velocidad de transmisión de 2.5Gbps. En este caso, cuando se utilizan cuatro canales propagantes con una separación de 100GHz entre cada canal y sin dispersión, se generan dos ondas fantasma adicionales debido a la FWM, las cuales tienen una potencia lo suficientemente alta como para ser detectadas por el receptor. Estas ondas fantasma pueden generar interferencias y afectar la calidad de las señales de información transmitidas.

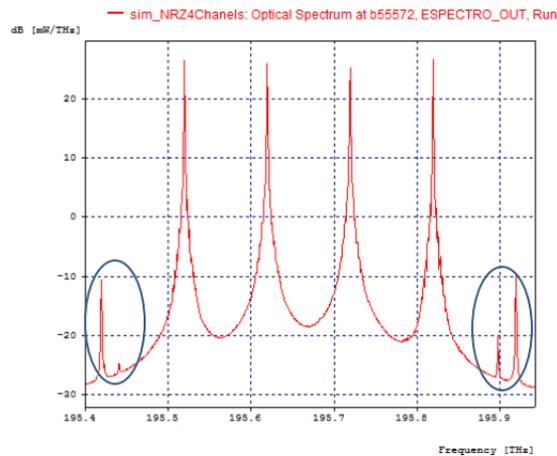


Figura 1.45: Efecto de la FWM en un sistema GPON.

Todas estas degradaciones tienen impacto en la degradación de la señal óptica, pero no en la misma medida, las deficiencias pueden ser lo suficientemente graves como para causar una degradación severa de la señal óptica hasta un nivel en el que el receptor no sea capaz de detectar los datos con una relación de error razonable. En la Tabla 1.2 y 1.3 se muestra cual es su nivel de ocurrencia según la recomendación ITU-T G.697:

Tabla 1.2: Deficiencias ópticas en sistemas coherentes de 40Gb/s y 100 Gb/s que utilizan formatos de modulación avanzadas.

Variación de la degradación	Frecuencia de ocurrencia relativa	Descripción
Atenuación	Elevada ³	
Variaciones de la potencia del canal óptico debido a variaciones de ganancia	Elevada	
Desviación de la frecuencia (o longitud de onda) respecto a la nominal	Elevada	[ITU-T G.692]
Dispersión por Modo de Polarización (PMD) (primer orden y órdenes superiores)	Baja ⁴	Apéndice II de [ITU-T G.663]
Mezcla de Cuatro Ondas (FWM)	Media ⁵	Apéndice II de [ITU-T G.663]
Ruido de Emisión Espontánea Amplificada (ASE) en Amplificación Óptica (OA)	Media	Apéndice II de [ITU-T G.663]

Dispersión Cromática	Baja	Apéndice II de [ITU-T G.663]
Pendiente de Dispersión Cromática	Baja	[ITU-T G.652], [ITU-T G.653], [ITU-T G.655]
Reflexiones	Media	Apéndice III de [ITU-T G.663]
Ruido de láser	Media	
Diafonía entre canales	Media	[b-ITU-T G-Sup.39]
Diafonía interferométrica	Media	[b-ITU-T G-Sup.39]
Modulación de Fase Cruzada (XPM)	Baja	Apéndice II de [ITU-T G.663]
Modulación de Auto-Fase (SPM)	Baja	Apéndice II de [ITU-T G.663]
Modulación de Polarización Cruzada (XPoM)	Baja	Apéndice II de [ITU-T G.663]
Dispersión de Brillouin Estimulada (SBS)	Baja	Apéndice II de [ITU-T G.650.2], Apéndice II de [ITU-T G.663]
Dispersión Raman Estimulado (SRS)	Baja	Apéndice II de [ITU-T G.663]

Tabla 1.3: Deficiencias ópticas en sistemas de hasta 10Gb/s que utilizan codificación de línea con o sin retorno a cero.

Variación de la degradación	Frecuencia de ocurrencia relativa	Descripción
Dispersión por Modo de Polarización (PMD) (primer orden y órdenes superiores)	Media	Apéndice II de [ITU-T G.663]
Dispersión Cromática	Media	Apéndice II de [ITU-T G.663]
Pendiente de Dispersión Cromática	Media	[ITU-T G.652], [ITU-T G.653], [ITU-T G.655]

Existe una relación estrecha entre las degradaciones ópticas y los parámetros de

³Elevado: Cuando la probabilidad de que el efecto sea lo suficientemente grave como para causar una penalización de x dB es de 10 eventos al año.

⁴Bajo: Cuando la probabilidad de que el efecto sea lo suficientemente grave como para causar una penalización de x dB es de 1 evento cada 10 años.

⁵Medio: Cuando la probabilidad de que el efecto sea lo suficientemente grave como para causar una penalización de x dB es de 1 evento por año.

monitoreo óptico con lo cual se puede inferir que cada degradación óptica generada en el sistema tiene un impacto directo de un parámetro de monitoreo. En la Tabla 1.4 se observa cómo la potencia de canal, OSNR y el factor Q son de especial importancia para un buen desempeño de la red.

Tabla 1.4: Lista de correlación entre las deficiencias señaladas y los parámetros de supervisión.

Parámetros	Potencia total	Potencia del canal	Longitud de onda del canal	OSNR⁶	Factor Q
Variación de atenuación	X	X		X	X
Desviación de frecuencia (o longitud de onda) del valor nominal		X	X	X	X
Variaciones de la potencia del canal óptico debido a variaciones de ganancia		X		X	X

1.3.3. Técnicas de OPM

Durante la última década se han propuesto numerosas técnicas OPM para redes ópticas. Las técnicas OPM existentes se pueden clasificar en digitales y analógicas. Las técnicas OPM digitales explotan el contenido de información digital de la forma de onda de la señal en el dominio eléctrico para inferir características de la señal óptica. Estas técnicas tienen la correlación más fuerte con la BER, pero generalmente son menos efectivas para aislar los efectos individuales de la degradación. Por otro lado, las técnicas OPM analógicas analizan características específicas de la forma de onda de la señal analógica para extraer información sobre las deficiencias del canal. Estas mediciones son típicamente independientes del protocolo y se pueden subdividir en técnicas del dominio del tiempo, dominio de la frecuencia y dominio de la polarización, dependiendo de si la información de monitorización se extrae de la forma de onda de la señal, del espectro de la señal o de la polarización de la señal (Figura 1.46).

⁶se pueden medir mediante la tecnología actual en sistemas de transmisión óptico cuando no está presente una conformación de ruido significativo.

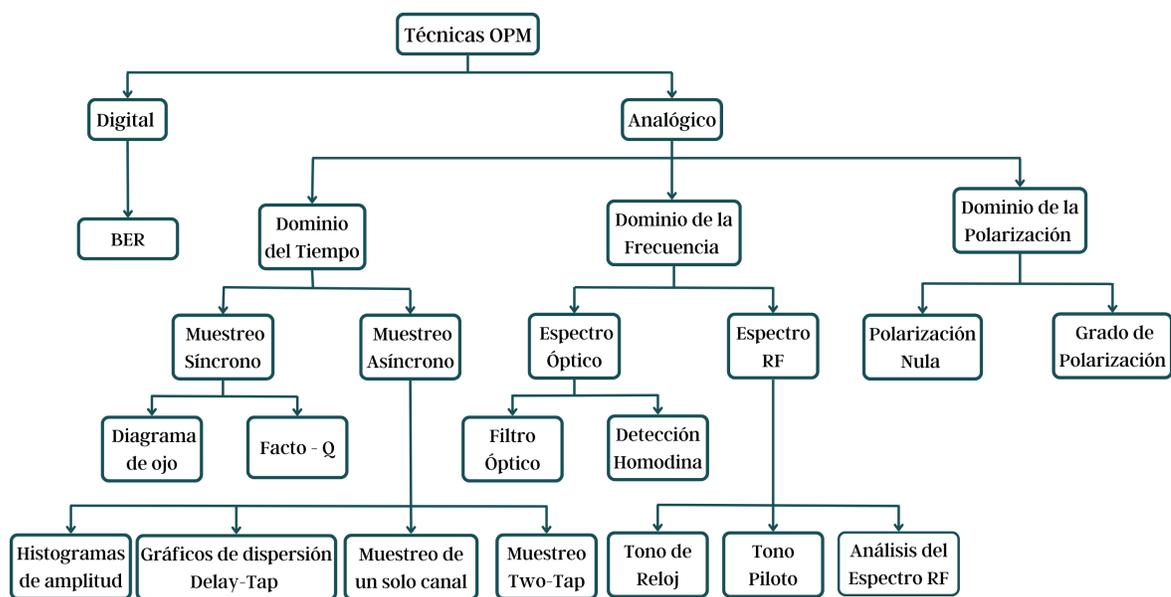


Figura 1.46: Técnicas OPM.

Técnicas de monitoreo en el dominio del tiempo: Se pueden clasificar en síncronas y asíncronas, dependiendo de la sincronización entre la tasa de muestreo y la tasa de símbolos. En técnicas síncronas es crucial asegurar la sincronización precisa entre el reloj de medición y la señal en análisis, especialmente en redes con múltiples velocidades de datos. Entre las técnicas de muestreo síncronas están, el diagrama del ojo que refleja cualitativamente los efectos de las deficiencias individuales y la monitorización del factor Q utilizada en la práctica debido a su fuerte correlación con la BER. Por otro lado, las técnicas de muestreo asíncronas no requieren información de reloj y son capaces de monitorizar múltiples deficiencias simultáneamente. Entre estas técnicas se tienen los histogramas de amplitud asíncronos, los Gráficos Asíncronos de Retardo y Toma (ADTPs), los Gráficos Asíncronos de dos Tomas (ATTPs), y el Muestreo Asíncrono de Canal Único (ASCS).

Técnicas de monitoreo en el dominio de la frecuencia: Estos métodos se caracterizan por analizar las características espectrales de la señal óptica y emplear técnicas basadas en promedios para monitorear los cambios en la potencia del pulso de radiofrecuencia o del canal espectral, haciéndolos insensibles a la distorsión. Se subdividen en técnicas basadas en el espectro óptico y en el Espectro de Radiofrecuencia (RFS). Las técnicas basadas en espectro óptico pueden monitorear OSNR fuera de banda, potencia óptica total y la deriva de longitud de onda [wavelength drift], pero no pueden monitorear la DC y PMD. Utilizan un filtro óptico que se sintoniza sobre el ancho de banda del canal y registra la potencia óptica, con la resolución espectral determinada por el ancho de banda del filtro óptico. También se puede analizar el espectro óptico mediante una detección homodina, donde una señal de láser de Oscilador Local (LO, local oscillator) sintonizable

se mezcla con la señal monitoreada. El láser LO se barre a través del ancho de banda del canal y luego se analiza la señal de interferencia para el análisis espectral, con la resolución espectral determinada por el ancho de línea del láser LO, el cual es mayor en varias órdenes de magnitud que el del filtro óptico sintonizable.

Las técnicas basadas en el espectro de radiofrecuencia pueden proporcionar una mejor estimación de la calidad de la señal que las técnicas basadas en el espectro óptico, ya que analizan el espectro de la señal codificada en la portadora óptica. Utilizan los tonos de reloj presentes de forma inherente en el espectro de varios formatos de modulación ó insertan tonos piloto de diferentes frecuencias en cada canal del transmisor. Las técnicas de monitoreo basadas en tonos de reloj pueden medir la DC y la PMD y dependen de la velocidad de transmisión de datos y del formato de modulación. Por otro lado, los esquemas basados en tonos piloto pueden medir varios parámetros como la longitud de onda, la OSNR, la DC, la PMD y los caminos ópticos de las señales WDM asignando una frecuencia de tono única a cada señal WDM y siguiendo su camino, ya que los tonos están obligados a seguir los mismos caminos ópticos que sus correspondientes señales WDM. Estas técnicas son independientes de la velocidad de transmisión de datos y del formato de modulación. Sin embargo, el efecto adverso del uso de tonos piloto es que pueden interferir con la señal de datos, con el consiguiente deterioro de la BER. Además de supervisar los tonos específicos (es decir, los tonos de reloj y piloto) en el espectro de RF, también pueden analizarse los cambios en la distribución espectral del espectro de RF general, debidos a diversas degradaciones de la red, para la supervisión de estas degradaciones.

Técnicas de monitoreo en el dominio de la polarización: Las degradaciones del canal causan distintas alteraciones en las características de polarización de las señales ópticas, las cuales son aprovechadas por estas técnicas para un monitoreo eficaz. Estas técnicas pueden controlar las potencias de señal y ruido por medio de la anulación de polarización y monitorizar la PMD del enlace de fibra midiendo el Grado de Polarización (DOP) de la señal recibida. Cuentan con la ventaja de ser transparentes a las velocidades de datos y a los formatos de modulación, sin embargo, su uso se limita en sistemas de transmisión coherentes debido a que no son aplicables a señales Multiplexadas por Polarización (PM).

***Nota de autor:** En este capítulo, se inicia con una exploración de las redes ópticas, centrándose en la evolución más allá de GPON, con un enfoque particular en NG-PON1 y NG-PON2. Posteriormente, se aborda la velocidad de transmisión en las redes PON que utilizan DWDM, comenzando con la descripción de la Velocidad de Transmisión de Línea Única (SLR) y su evolución. A continuación, se introduce el concepto de Velocidad de Transmisión de Línea Mixta (MLR) y se exploran las características asociadas a esta perspectiva. Además, se presentan los diferentes tipos de amplificación óptica, incluyendo los Amplificadores Ópticos Híbridos, que pueden utilizarse en estas*

arquitecturas. Por último, se describe el Monitoreo del Desempeño Óptico (OPM), que considera los tipos de degradaciones ópticas para definir los parámetros y técnicas de OPM adecuados.

CAPÍTULO 2

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo, se establece la metodología y se presentan las herramientas de simulación que serán utilizadas para llevar a cabo el diseño y desarrollo de un modelo de red inicial. Estas mismas herramientas serán fundamentales para la formulación de los casos de estudio y escenarios de simulación que se abordarán en el contexto de este trabajo.

2.1. Estructura del proyecto

El Project Management Institute (PMI) es la asociación profesional líder en el ámbito de la gestión de proyectos y la principal referencia para una creciente comunidad global de millones de profesionales de proyectos e individuos que utilizan las habilidades de gestión de proyecto [66]. Fundada en 1969, con sede en Pensilvania y una presencia global en más de 200 países. En la actualidad, existen 302 capítulos del PMI y 7 capítulos potenciales [67].

Su publicación insignia, la Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (PMBOK Guide, Guide to the Project Management Body of Knowledge), es un recurso fundamental para la dirección de proyectos efectiva en cualquier industria [68]. La Guía PMBOK no es un manual paso a paso para gestionar proyectos, sino una fuente de herramientas y métodos que se pueden aplicar para alcanzar el éxito en proyectos. Para desarrollar el trabajo de grado, se ha tomado como base el proceso de planificación descrito en la Guía PMBOK, que consta de fases clave [69]:

1. Recopilación de requisitos: determinación, documentación y gestión de las necesidades de los interesados para definir el alcance del proyecto.
2. Definición del alcance del proyecto: identificación de objetivos, entregables y requisitos para el éxito del proyecto, así como límites y exclusiones.
3. Creación de la Estructura de Desglose del Trabajo (EDT o WBS): subdivisión de entregables y trabajo del proyecto en componentes manejables.
4. Definición de actividades: identificación de acciones específicas para elaborar los entregables del proyecto.
5. Secuenciación de actividades: establecimiento de relaciones entre las actividades para determinar la secuencia lógica de trabajo.

6. Estimación de la duración de actividades: cálculo del tiempo necesario para completar cada actividad.
7. Desarrollo del cronograma: creación de un modelo de programación con fechas planificadas para completar las actividades.
8. Estimación de costos: desarrollo de una aproximación de los recursos monetarios necesarios para el proyecto.

La Estructura de Desglose del Trabajo (WBS, Work Breakdown Structure) es una herramienta esencial para descomponer el alcance del proyecto en paquetes de trabajo jerárquicos. Se puede representar de varias formas, incluyendo una vista de esquema, vista tabular y un diagrama de árbol.

El elemento de trabajo más alto en la jerarquía es el proyecto completo, que se desglosa en elementos más pequeños y manejables, donde las tareas se descomponen en sub-tareas y se organizan en niveles. Cada nivel representa un nivel de detalle mayor y cada tarea se identifica mediante un código o número único. Una EDT/WBS consta de [69, 70]:

Paquetes de trabajo: estos son los elementos de nivel más bajo de cada rama de la EDT/WBS. Los paquetes de trabajo incluyen detalles sobre el propietario del entregable, las duraciones, los hitos, los recursos, los riesgos, etc.

Paquetes de planificación: un paquete de planificación es una forma diferente de un paquete de trabajo. Una vez aprobado el plan de gestión del proyecto, se define su alcance y los Paquetes de planificación proporcionan el alcance completo. Con estos detalles, los paquetes de planificación se convierten en paquetes de trabajo.

Cuentas de control: las cuentas de control permiten recopilar, analizar e informar datos de elementos dentro de la estructura de desglose del trabajo para ayudar en la elaboración de informes y seguimiento. Son puntos de referencia que ayudan a medir el progreso del alcance, el cronograma y/o los costos.

La WBS es una herramienta versátil que se adapta a diferentes tipos de proyectos, incluyendo construcción y desarrollo de software. Permite una descomposición eficiente del trabajo, facilita la planificación y el seguimiento, y establece hitos importantes. Los tipos comunes de WBS incluyen basados en entregables, fases, procesos y recursos, y se pueden combinar según las necesidades específicas del proyecto. La representación visual de la WBS en forma de diagrama de árbol es especialmente efectiva para comunicar la jerarquía de tareas y responsabilidades en el proyecto.

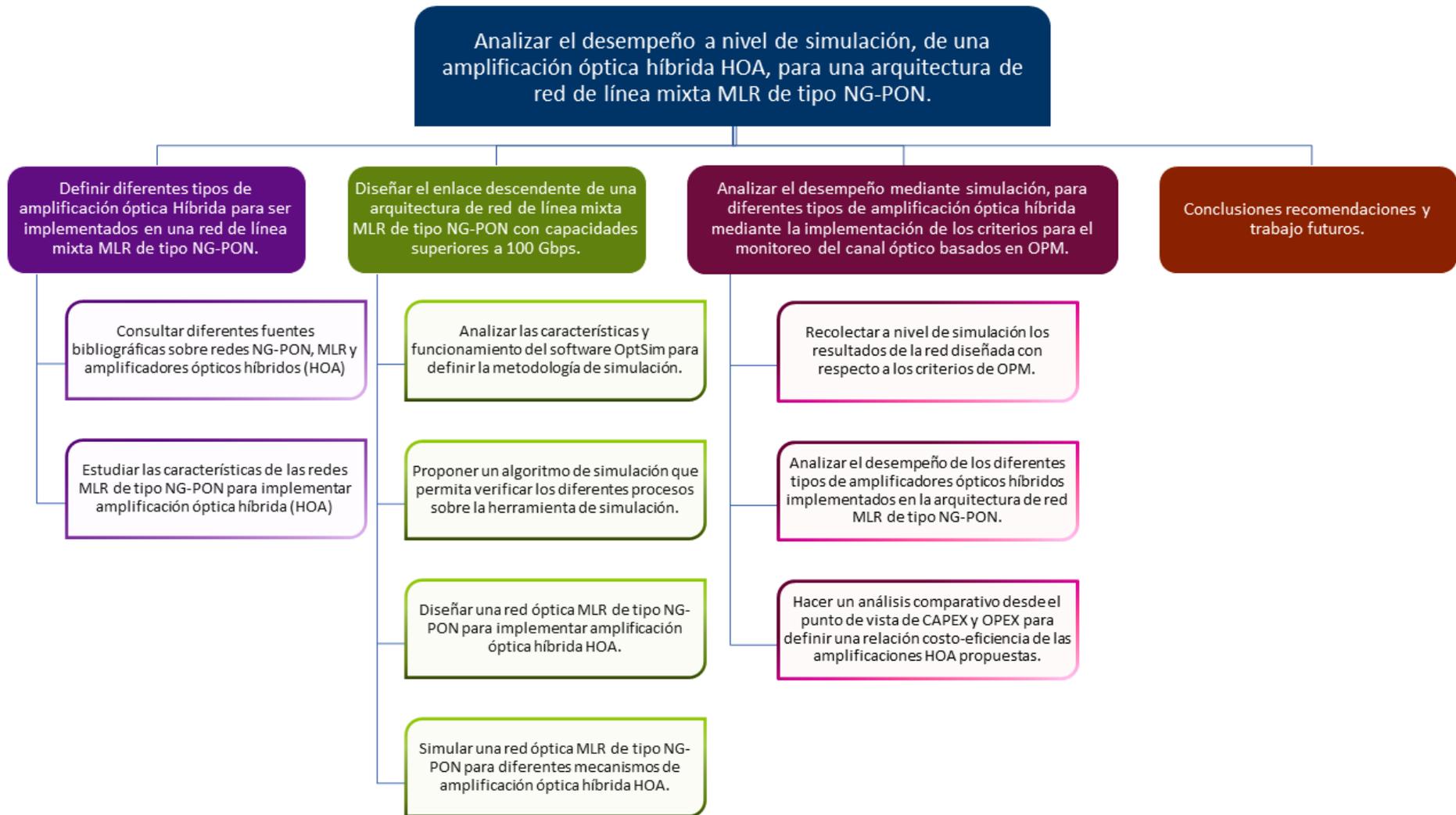


Figura 2.1: Actividades trabajo de grado.

2.1.1. Metodología para el control del proyecto

Después de definir las actividades, se utiliza el modelo de Técnica de Revisión y Evaluación de Programas (PERT, *Program Evaluation and Review Technique*) para secuenciar las actividades, estimar la duración de las mismas y desarrollar el cronograma del proyecto. Esta metodología se originó en la década de 1950 en la Oficina de Proyectos Especiales de la Marina de los Estados Unidos para gestionar proyectos militares de alta tecnología. PERT se concentra en la planificación, programación y control de proyectos complejos, siendo especialmente útil en el ámbito de las tecnologías donde se deben considerar operaciones interdependientes y flujos de trabajo optimizados. Presenta ventajas significativas en términos de facilidad de aprendizaje, precisión en el planteamiento de los procesos, capacidad de control y flexibilidad para introducir modificaciones [71]. El método PERT tiene en cuenta las siguientes definiciones [72] [73]:

Nodos: Representan los instantes en el tiempo que marcan el inicio y finalización de actividades. Estos nodos están interconectados por flechas que indican las dependencias entre actividades.

Holgura: Se refiere al tiempo que una actividad puede retrasarse sin afectar la duración total del proyecto ni el inicio de la siguiente actividad. La holgura se calcula como la diferencia entre la Fecha de Terminación más Lejana (FTL) y la Fecha de Terminación más Próxima (FTP).

$$Holgura = FTL - FTP \quad (2.1)$$

Ruta crítica: Es la secuencia de actividades que determina la duración total del proyecto. La ruta crítica es la más larga en términos de tiempo de duración y no tiene holgura, lo que significa que las actividades que la componen deben completarse en el tiempo establecido.

Para la elaboración del método PERT, se tendrá en cuenta la ponderación del tiempo en semanas más probable o normal para cada una de las actividades, así como la valoración más optimista y pesimista de las mismas para poder obtener el tiempo estimado de realización. Para ello se hace uso de la ecuación 2.2 de valor esperado:

$$T_e = \frac{T_o + 4T_n + T_p}{6} \quad (2.2)$$

Donde,

T_e : Representa el tiempo esperado para realizar una actividad.

T_o : Representa el tiempo optimista.

T_n : Representa el tiempo normal o probable de realización de una actividad.

T_p : Representa el tiempo pesimista o mayor tiempo para realizar una actividad.

Tabla 2.1: Diagrama de actividades.

INICIO	ACTIVIDADES	PREDECESORES			TIEMPO EN SEMANAS				σ^2
					To	Tn	Tp	Te	
A	Consultar diferentes fuentes bibliográficas sobre redes NG-PON, MLR y Amplificadores Ópticos Híbridos (HOA)	-	-	-	1	2	4	2	0.25
B	Estudiar las características de las redes MLR de tipo NG-PON para implementar Amplificación Óptica Híbrida (HOA)	A	-	-	2	3	4	3	0.1111
C	Analizar las características y funcionamiento de diferentes software para definir la metodología de simulación y la herramienta mediante la cual se llevarán a cabo el desarrollo del trabajo de grado	B	-	-	2	3	4	3	0.1111
D	Proponer un algoritmo de simulación que permita verificar los diferentes procesos sobre la herramienta seleccionada	B	C	-	2	3	4	3	0.1111
E	Diseñar una red óptica MLR de tipo NG-PON para implementar amplificación óptica híbrida (HOA)	D	-	-	1	2	4	2	0.25
F	Simular una red óptica MLR de tipo NG-PON para diferentes mecanismos de amplificación óptica híbrida (HOA)	D	E	-	5	6	7	6	0.1111
G	Recolectar a nivel de simulación los resultados de la red diseñada con respecto a los criterios de OPM	F	-	-	3	5	6	5	0.1111
H	Analizar el desempeño de los diferentes tipos de Amplificadores Ópticos Híbridos implementados en la arquitectura de red MLR de tipo NG-PON	G	-	-	3	5	6	5	0.1111
I	Hacer un análisis comparativo desde el punto de vista de CAPEX y OPEX para definir una relación costo-eficiencia de las amplificaciones HOA propuestas	G	H	-	3	4	5	4	0.1111
J	Conclusiones sobre los resultados obtenidos durante el desarrollo del trabajo de grado	G	H	I	2	3	4	3	0.1111
TIEMPO TOTAL					36 SEMANAS				

La Tabla 2.1 describe las actividades definidas a partir la metodología utilizada para el control del proyecto basada en la Técnica de Revisión y Evaluación de Programas (PERT), donde en la ecuación 2.3, se calcula la varianza de tiempo respecto a la dispersión entre el tiempo más optimista y el más pesimista:

$$\sigma^2 = \left(\frac{T_p - T_o}{6}\right)^2 \quad (2.3)$$

Una vez definidos y calculados los tiempos esperados para cada actividad, en la Figura 2.2 se procede a realizar el diagrama de nodos del desarrollo del trabajo de grado:

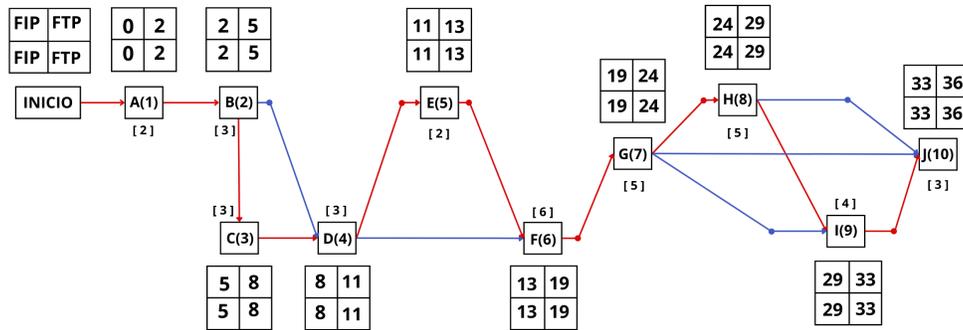


Figura 2.2: Grafo de red de actividades.

Donde,

FIP: Representa la fecha de inicio más próxima de una actividad.

FTP: Representa la fecha de terminación más próxima de una actividad.

FIL: Representa la fecha de inicio más lejana de una actividad.

FTL: Representa la fecha de terminación más lejana de una actividad.

2.2. Herramienta de simulación

La selección de la herramienta de simulación más apropiada para el proyecto se basa en la revisión de la literatura y los objetivos de la investigación. En este contexto, se ha optado por utilizar OptSim, una de las herramientas más reconocidas y utilizadas en la simulación de sistemas de comunicaciones ópticas.

2.2.1. OptSim

OptSim es una herramienta avanzada de simulación óptica desarrollada por RSoft Design Group, la cual forma parte de Synopsys. Este software fue diseñado para la investigación avanzada de transmisión en WDM, DWDM, TDM, CATV, LAN óptica, bus óptico Paralelo y otros sistemas ópticos emergentes en el campo de las telecomunicaciones. Su principal función es permitir el diseño y la simulación de sistemas de comunicaciones ópticas, evaluando su rendimiento en función de los diferentes parámetros de los componentes. OptSim destaca por su alta precisión y potencia de modelado, cuenta con técnicas de simulación avanzadas y una interfaz gráfica de usuario intuitiva, ofreciendo una precisión y facilidad de uso, siendo soportado por plataformas Windows

y UNIX. OptSim ha estado disponible desde 1998, y desde entonces ha evolucionado y mejorado significativamente.

Entorno de simulación OptSim

OptSim es una herramienta de simulación de sistemas ópticos diseñada para funcionar dentro de un entorno de software específico. Este entorno conocido como ambiente OptSim, incluye diversas ventanas y herramientas que permiten al usuario configurar y simular sistemas ópticos de alta complejidad. La ventana principal de OptSim es el área de diseño, en el que el usuario puede arrastrar y soltar componentes ópticos desde una biblioteca de dispositivos para construir el modelo del sistema óptico que se va a simular. En este mismo espacio, el usuario tiene la capacidad de definir las propiedades y atributos de cada componente, así como establecer las conexiones entre ellos (Figura 2.3).

Además del área de diseño, OptSim ofrece otras ventanas y utilidades que facilitan al usuario la configuración y ejecución de la simulación. Estas comprenden:

- **Editor de parámetros:** Donde se definen los parámetros específicos del modelo de sistema óptico, como la longitud de la fibra óptica o la frecuencia de la señal de luz.
- **Editor de eventos:** Donde se definen los eventos que ocurren durante la simulación, como la inserción de una señal de luz en un componente óptico.
- **Analizador de resultados:** Donde se muestran los resultados de la simulación, como la intensidad de la señal de luz a lo largo del tiempo.
- **Visualizador 3D:** Donde se puede ver una representación gráfica en 3D del modelo del sistema óptico.

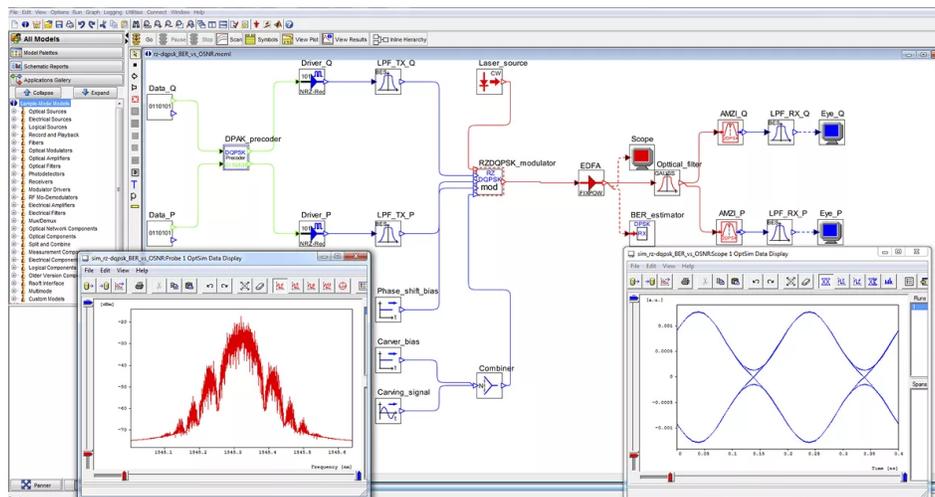


Figura 2.3: Entorno de simulación OptSim.

Una característica destacada de OptSim es su capacidad para operar en dos modos de simulación: el modo bloque y el modo muestra. En el modo bloque, la señal de datos fluye entre componentes a lo largo de toda la duración de la simulación, representando un bloque de datos en un periodo de tiempo completo. En cambio en el modo muestra, un componente transmitirá una nueva muestra de datos a otro en cada paso de tiempo de la simulación, de manera que la señal de datos se desplaza entre componentes y representa una muestra única en cada instante de tiempo.

El modo muestra emplea dos métodos de simulación diferentes: la Técnica de Propagación Espectral (SPT) y la Técnica de Simulación de Ancho de Banda Variable (VBS), las cuales están representadas en la Figura 2.4.

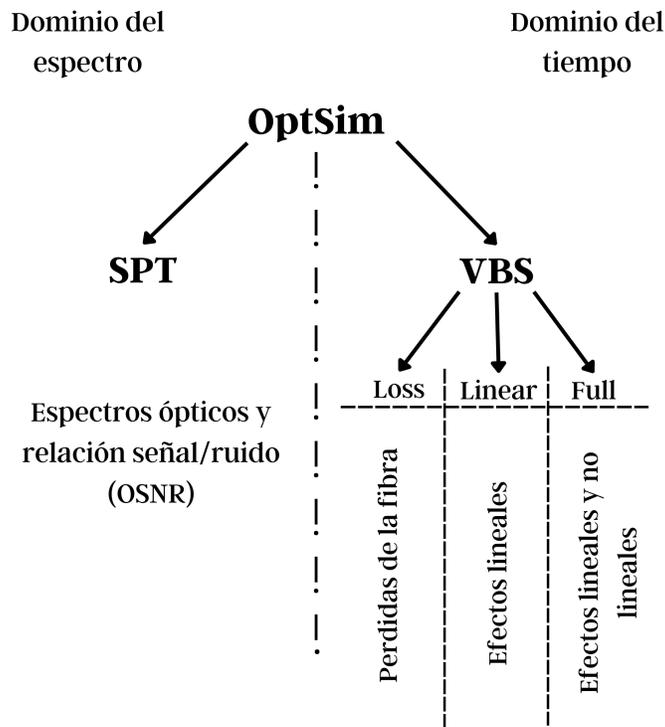


Figura 2.4: Técnicas de simulación de la Herramienta OptSim.

■ Técnica de Propagación Espectral (SPT)

La SPT es una técnica de simulación que se basa en el análisis espectral de las señales ópticas a medida que se propagan a través de un sistema como espectros de potencia. SPT puede proporcionar resultados precisos y similares a los obtenidos experimentalmente mediante el uso de analizadores de espectro óptico. Esto permite evaluar los espectros de potencia, los niveles de potencia y la OSNR en cualquier punto de la red. La ventaja de utilizar SPT es que se puede utilizar en la fase inicial del diseño de la red para realizar simulaciones rápidas y económicas y evaluar el comportamiento de los componentes ópticos.

▪ Técnica de Simulación de Ancho de Banda Variable (VBS)

La VBS es una técnica de simulación en el dominio del tiempo que utiliza el método Time Domain Split-Step para simular el comportamiento lineal y no lineal de los componentes ópticos y eléctricos. Esta técnica es el núcleo del entorno de simulación OptSim y su característica distintiva es la capacidad de ajustar el ancho de banda del sistema para incluir el espectro total del sistema o solo una parte de él.

El objetivo principal del VBS es hacer más fácil la optimización de sistemas ópticos y permitir un enfoque incremental para lograr una configuración óptima. Con el propósito de tener una herramienta muy adaptable para respaldar el enfoque incremental de optimización, se ha dividido la técnica VBS en tres categorías, cada una con distintos niveles de precisión de la simulación.

- **Fibra con pérdidas VBS:** La técnica VBS se enfoca en las pérdidas de la fibra óptica. En este nivel de simulación, se considera que el sistema óptico está compuesto únicamente por una Serie de elementos que producen pérdidas, como pueden ser las fibras ópticas, conectores y empalmes. Al centrarse únicamente en la pérdida de fibra, se pueden hacer cálculos rápidos y simplificados para determinar los requisitos de potencia, la distancia máxima de transmisión y otros parámetros básicos de diseño.
- **Fibra lineal VBS:** La técnica de fibra lineal VBS tiene en cuenta los efectos de propagación lineal, como la pérdida, la dispersión y la PMD, mientras que las no linealidades de la fibra se desprecian. Esta técnica analiza la distorsión de la señal debida a la dispersión lineal de la fibra para todos los canales presentes y permite el desarrollo de estrategias de compensación de la dispersión.
- **VBS completo:** La técnica VBS completa es una técnica de simulación que incluye todos los efectos de propagación de la fibra óptica y permite realizar una optimización final del sistema.

2.3. Metodología de Simulación

La simulación permite analizar el comportamiento de sistemas complejos, riesgos y procesos, incluyendo las incertidumbres asociadas; ofrece información valiosa sobre los diseños de procesos y proyectos de desarrollo, lo que permite ahorrar en tiempo y costos significativos. Además, la simulación puede ser una herramienta valiosa para la capacitación y el aprendizaje. Para definir la metodología de simulación, se tienen en cuenta los documentos “Guide to advanced empirical software engineering” y el documento “SIMULATION METHODOLOGY – A PRACTITIONER’S PERSPECTIVE”.

Según “Guide to advanced empirical software engineering” cualquier proceso de modelado de simulación de procesos consta de al menos cinco pasos:

1. **Formulación del planteamiento del problema (objetivo de modelización):** Se refiere a identificar y clarificar el objetivo y alcance de la simulación. Esto implica establecer los objetivos específicos que se espera alcanzar mediante la simulación, determinar los aspectos del sistema o proceso que se deben modelar, especificar los parámetros relevantes, definir las condiciones iniciales y de contorno, y establecer los criterios de éxito de la simulación.
2. **Definición del modelo conceptual:** En este paso se investigan con más detalle algunos pasos de la fase anterior y se da más importancia a los aspectos técnicos del problema. Durante esta fase se recopila información y se determinan los detalles específicos de cómo se llevará a cabo la simulación, tales como la elección del software de simulación, la selección de los datos de entrada y la definición de las variables de salida, la especificación de las medidas de desempeño y los criterios de éxito, la determinación del tamaño y la duración de la simulación, y la selección de las técnicas de análisis de datos.
3. **Identificación de los conceptos del modelo (procesos físicos, flujos de información, reglas de decisión):** En este paso, se describe en detalle la lógica de funcionamiento del sistema y se llevan a cabo tareas de recolección y análisis de datos. El objetivo principal es determinar los elementos clave que deben ser incorporados al modelo de simulación. Los datos recopilados en esta etapa proporcionan todos los antecedentes necesarios para construir el modelo de simulación. Basándose en el paso anterior donde se identificó el diseño del modelo conceptual, esta fase recopila la información adecuada para dicho modelo conceptual.
4. **Formular entradas, hipótesis y definición del proceso:** En este paso se emplean técnicas de programación bien establecidas para la construcción, validación y verificación del modelo. Este paso representa entre el 30 % y el 40 % del proceso de simulación y debe ser repetido para cada modelo alternativo significativo que se considere en el estudio. Durante esta etapa, el equipo del proyecto puede optar por recopilar más datos y agregar más detalles al modelo para cumplir con los requisitos de calibración del modelo.
5. **Modelo de experimentación:** En este paso, se tiene la opción de explorar modelos alternativos y regresar a fases anteriores del proceso para implementar cambios importantes en el modelo. Esta etapa se enfoca en identificar las variables principales y eliminar las variables insignificantes de manera gradual. Una vez que se han identificado las variables principales, se puede llevar a cabo un estudio de diseño de análisis más detallado, especialmente si el estudio tiene un ciclo de vida largo.

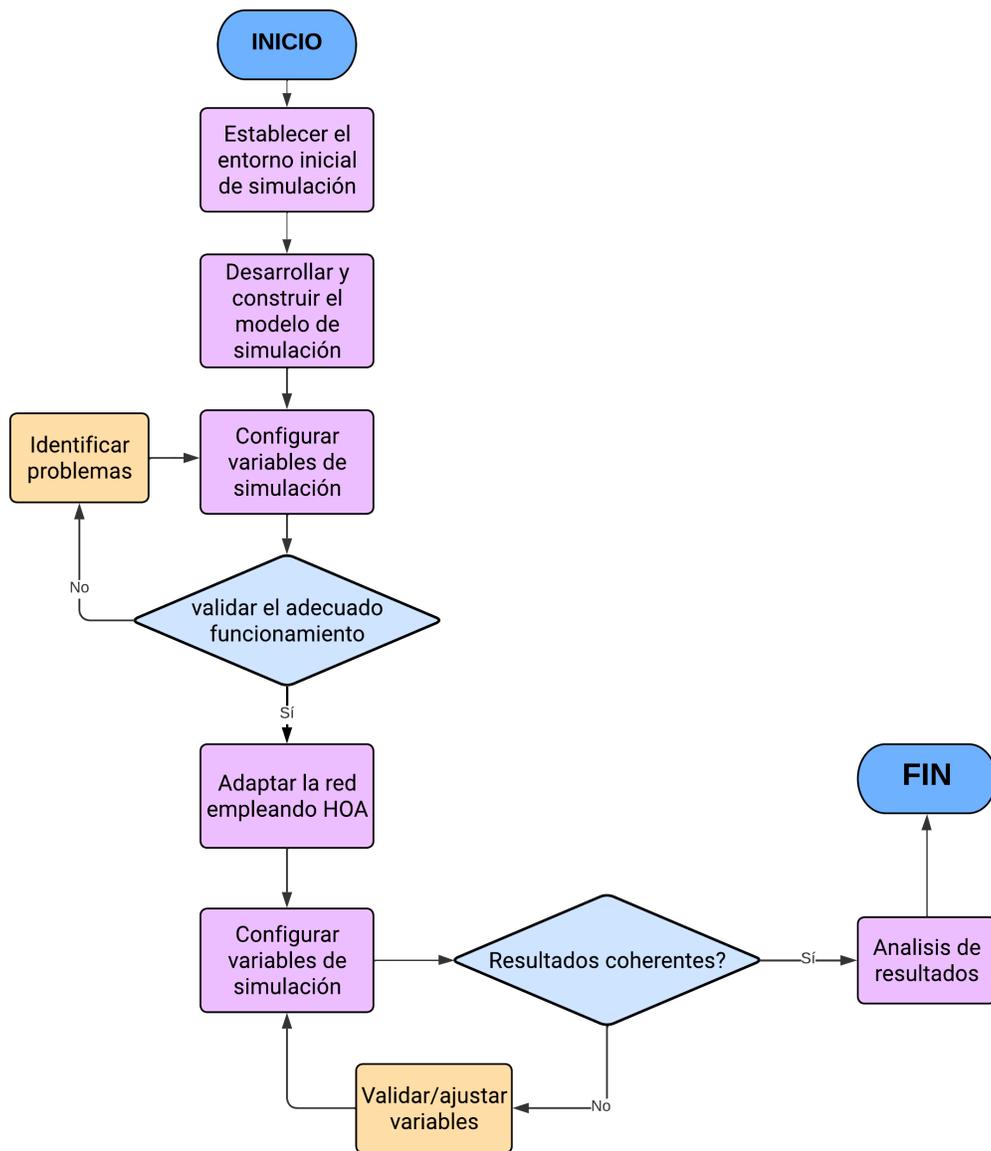


Figura 2.5: Diagrama de flujo para el entorno de simulación.

También es importante destacar que en “SIMULATION METHODOLOGY – A PRACTITIONER’S PERSPECTIVE” presenta otras etapas adicionales para este proceso:

Documentar y presentar los resultados: La documentación de los resultados de la simulación implica registrar todos los datos y resultados de la simulación, así como las decisiones tomadas y las conclusiones alcanzadas. Por otro lado, la presentación de los resultados implica comunicar los resultados de la simulación a las partes interesadas, explicar el significado y la importancia de los resultados, y hacer recomendaciones

basadas en los resultados. Es importante destacar que una buena documentación y presentación son fundamentales para el éxito del estudio de simulación y deben ser realizadas simultáneamente con las tareas de otras fases del proceso. De esta manera, se asegura una adecuada comprensión y aceptación de los resultados.

Definir el ciclo de vida del modelo: El ciclo de vida del modelo se refiere a las diferentes etapas por las que pasa un modelo de simulación desde su creación hasta su eventual eliminación. Definir el ciclo de vida del modelo implica establecer cómo se gestionará el modelo a lo largo del tiempo, cómo se actualizará y mejorará, y cómo se retirará cuando ya no sea necesario.

2.4. Modelo de simulación

Para realizar el diseño del modelo de simulación se consideraron los requerimientos, las variables y configuraciones de red detalladas en los estándares definidos por el grupo de tareas Full Service Access Network de la Unión Internacional de Telecomunicaciones. Para este trabajo de investigación entiéndase la palabra "diseño" como un modelo emulado de la realidad que ha sido configurado sobre una plataforma de simulación.

2.4.1. Desarrollo del modelo de simulación

Con el objetivo de cumplir las condiciones de la OPM objetivo, se procede a caracterizar el escenario de simulación. Para ello, se toma como punto de partida el modelo de simulación MLR tipo 3 del trabajo de grado titulado "Análisis a nivel de simulación del desempeño en la migración de una red óptica SLR-WDM a una red óptica MLR-WDM implementando diferentes arquitecturas de red de banda ancha FTTx", realizado en la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca [9]. Este modelo considera las especificaciones de la ITU-T para redes DWDM basadas en los estándares XG-PON, XGS-PON y NG-PON2, así como los parámetros de equipos comerciales utilizados por los proveedores de servicios de comunicación óptica en el despliegue de estas redes.

Se evalúa la estructura de la red y se configuran los elementos necesarios para cumplir con los objetivos establecidos. Esta evaluación abarca tanto las bases teóricas como las características de una implementación real de las redes. Permitiendo la transición de la red ideal, como se expone en [9], a una red práctica. En condiciones de diseño, se consideran varias degradaciones y pérdidas que pueden afectar el desempeño del sistema, como la atenuación del Modulador Óptico Externo Mach-Zehnder, pérdida de multiplexores, atenuación de splitters y ruidos eléctricos, incluyendo los generados por el láser de onda continua externo. Además, se estableció el receptor con una sensibilidad máxima de -28 dBm.

En la Tabla 2.2, se resumen los parámetros iniciales del sistema siguiendo las reco-

mendaciones de la ITU-T. Estos parámetros incluyen la codificación, capacidad, modulación, frecuencia central, potencia láser, FWHM del láser, splitter, multiplexores, grilla espectral, red de distribución, segmento de enlace descendente, tipo de fibra y la calidad de la señal. La calidad de la señal se mide mediante BER, Factor Q, sensibilidad del receptor y distancias máximas.

Tabla 2.2: Modelo General del sistema según las recomendaciones ITU-T.

Elementos de Configuración			
Parámetros	XG-PON	XGS-PON	NG-PON2
Codificación	NRZ	RZ	RZ
Capacidad	2.5 Gbps	10 Gbps	40 Gbps
Modulación con 3 dB	OOK	OOK	DPSK
Frecuencia Central	194.08 THz		
Potencia Láser	5 dBm		
FWHM Láser	1 MHz		
Splitter	1:4 (Max. 6.6 dB) 1:16 (Max. 12.9 dB)		
Multiplexores	0.3 dB		
Grilla Espectral	Asimétrica		
Red de Distribución	5 km		
Segmento de enlace descendente	300 m		
Tipo de fibra	Corning STM-28e		
Factor de Calidad			
BER	$< 10^{-15}$		
Factor Q	$> 7,03$ dB	$> 7,78$ dB	$> 8,3$ dB
Sensibilidad del Receptor	-28 dBm	-28 dBm	-31 dBm
Distancia Máxima Lógica	60 km		
Distancia Máxima Física	20 km	20 km	40 km

La Figura 2.6 muestra el modelo propuesto para la red óptica MLR-DWDM NG-PON inicial del sistema. Este modelo consta de 10 canales de transmisión, donde los canales 1 y 10 operan a una velocidad de 40 Gbps, los canales 2, 3, 8 y 9 funcionan a 10 Gbps, y los canales 4 a 7 transmiten a velocidades de 2.5 Gbps. Los canales de 2.5 Gbps tienen una separación de 25 GHz entre ellos, mientras que los canales de 10 Gbps requieren al menos 50 GHz de separación, y los canales de 40 Gbps necesitan 100 GHz de separación. Se utiliza una asignación asimétrica para optimizar el ancho de banda y mejorar la densidad espectral del sistema.

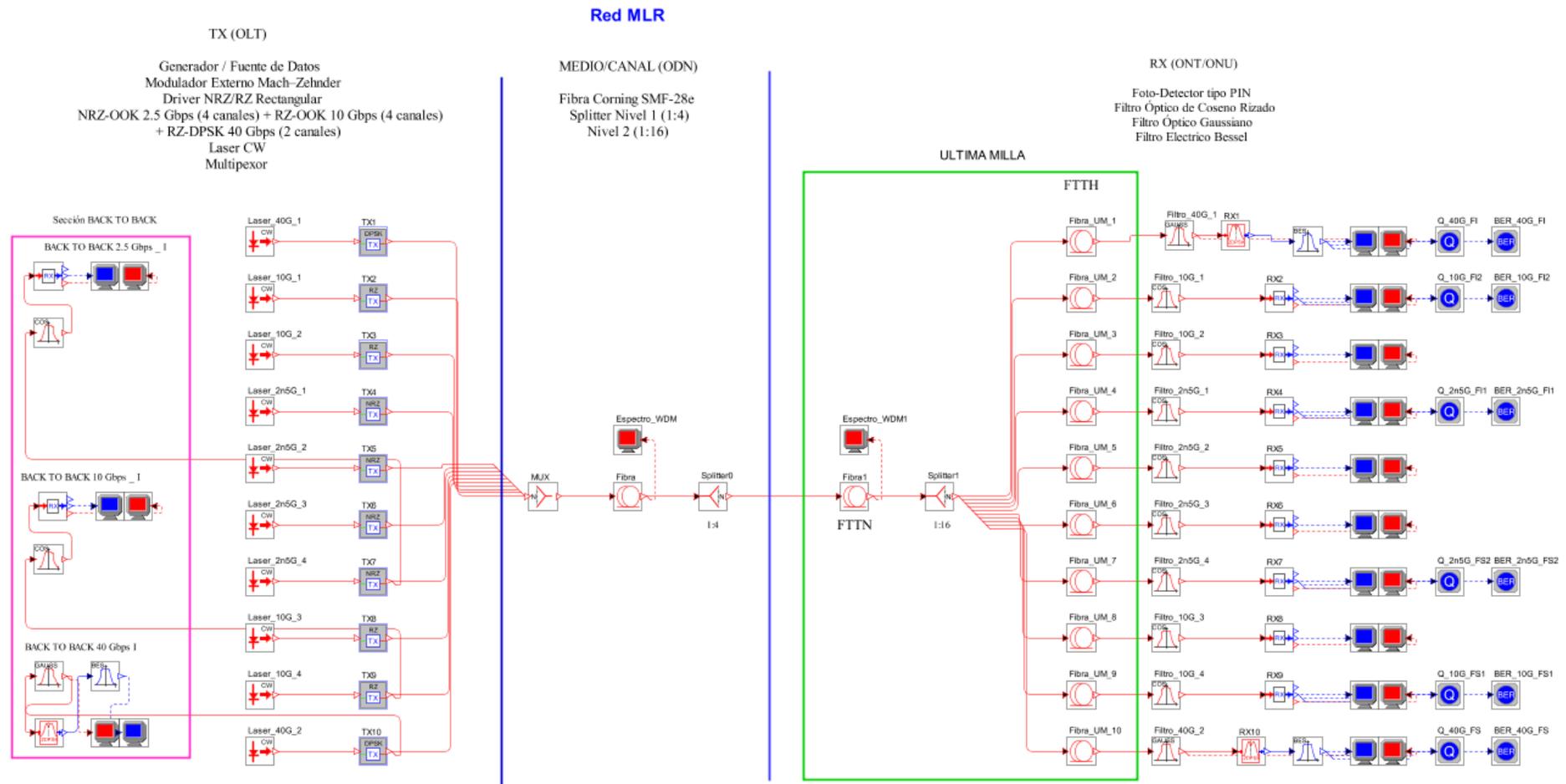


Figura 2.6: Escenario general de simulación de la red MLR-DWDM NG-PON inicial.

Resultados del modelo inicial

En primera instancia, se obtienen algunos datos de la configuración Back-to-Back para conocer cómo se comporta el sistema en condiciones ideales. Al realizar este tipo de prueba se puede obtener información clave sobre el desempeño y la calidad de la señal en los diferentes esquemas de modulación implementados. Se obtiene el diagrama del ojo correspondiente (Figura 2.7), con una apertura de ojo óptima lo que indica una excelente calidad de la señal y una alta probabilidad de una detección clara y precisa de los bits transmitidos. Esto sugiere que la señal está bien formada y no sufre de distorsiones ni degradaciones significativas. Además una apertura perfecta significa que los niveles lógicos alto y bajo son fácilmente distinguibles, lo que garantiza una mínima interferencia entre los símbolos adyacentes y una menor probabilidad de errores en la transmisión de datos. Así una BER tan baja y un diagrama de ojo perfecto en todos los esquemas de modulación indica una transmisión óptima y una alta calidad de señal en el sistema óptico.

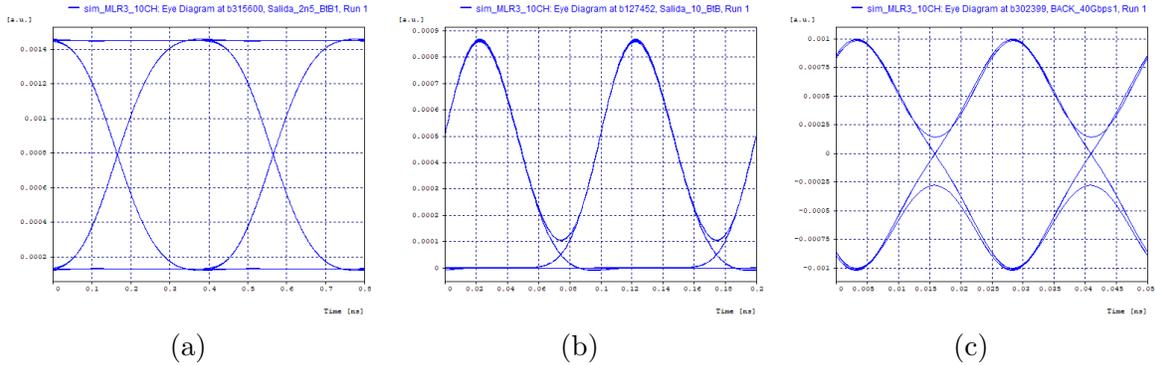
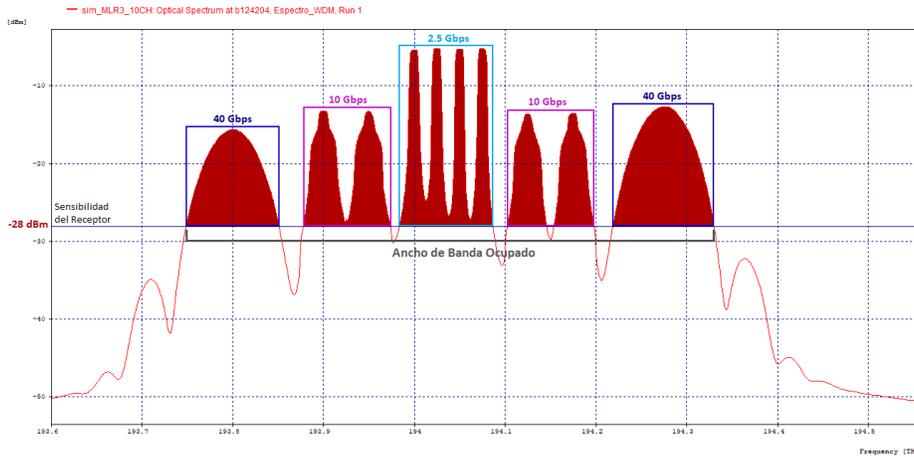


Figura 2.7: Diagrama de ojo Back-to-Back para (a) OOK-NRZ a 2.5 (b) OOK-RZ a 10 y (c) DPSK-RZ a 40 Gbps.

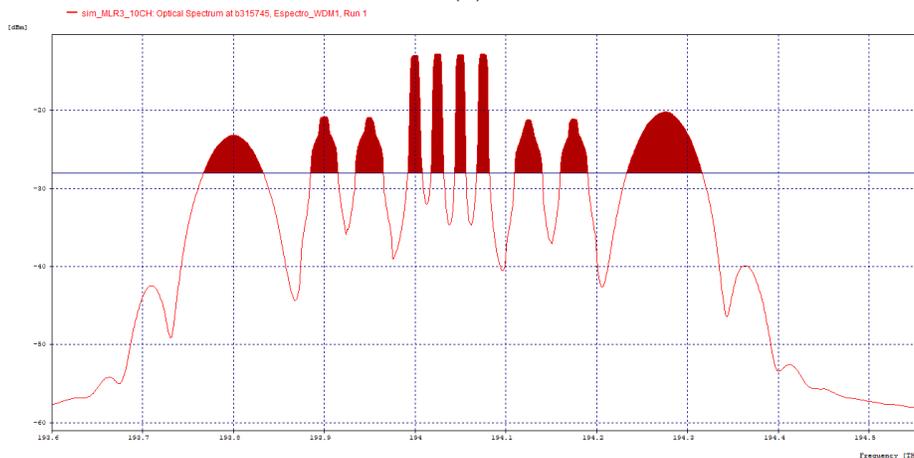
Para un primer análisis comparativo, se presentan las condiciones iniciales de la red no amplificada. Antes de la multietapa de splitters (Figura 2.8a), se puede observar que se recibe una intensidad de señal adecuada en relación al piso de recepción establecido, lo que indica que los 20 km se están cubriendo. Posteriormente la señal atraviesa el multietapa de los splitters, y en la primera división se evidencia una disminución significativa de la intensidad de la señal (Figura 2.8) y en la Figura 2.10 se aprecian los efectos producidos al llegar la señal a los usuarios finales y el espectro óptico en recepción (Figura 2.9). Por lo tanto, el problema no radica en el ODN ni en el proveedor de servicios, sino en la multietapa de splitters, la cual genera una pérdida total en los usuarios. En un ODN, es común que la potencia de la señal disminuya a medida que se va dividiendo a través de una multietapa de splitters. Esta disminución de potencia se debe a la pérdida inherente en los componentes de la red, como los splitters y la fibra óptica.

Cuando una señal óptica se divide en múltiples caminos utilizando splitters, la po-

tencia se distribuye entre los diferentes caminos. En cada división, una fracción de la potencia se desvía hacia cada rama. Esto puede llevar a una disminución significativa de la potencia a medida que se atraviesa una multietapa de splitters. Con cada etapa adicional de división, la potencia se dividirá aún más entre las ramas, lo que resultará en una disminución acumulativa de la potencia.



(a)



(b)

Figura 2.8: Espectro óptico de los 10 canales (a) propagado y (b) después del Splitter de nivel 1.

En las Figuras 2.9 y 2.10, se aprecian las condiciones iniciales de funcionamiento de la red no amplificada, con respecto al diagrama de ojo y el espectro óptico recibido alrededor de los canales seleccionados de velocidades de 2.5, 10 y 40 Gbps. Además, en la Tabla 2.3 se encuentran detallados los parámetros OPM obtenidos para los canales en cuestión.

Tabla 2.3: Condiciones iniciales de los parámetros de monitoreo.

Canal	Velocidad Tx (Gbps)	Potencia Rx (dBm)	OSNR (dB)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)
4	2.5	-25,837881	2,162119	1,08277E-23	20,070272	0,0791959
7		-25,69473	2,30527	1,71280E-25	20,356935	0,0797213
2	10	-33,67812	-5,67812	9,83125E-04	9,838652	0,00552766
9		-33,972096	-5,972096	3,36008E-03	8,668356	0,00578011
1	40	-36,130558	-8,130558	2,27501E-02	6,0206	0,00601539
10		-33,115329	-5,115329	2,27501E-02	6,0206	0,00595748

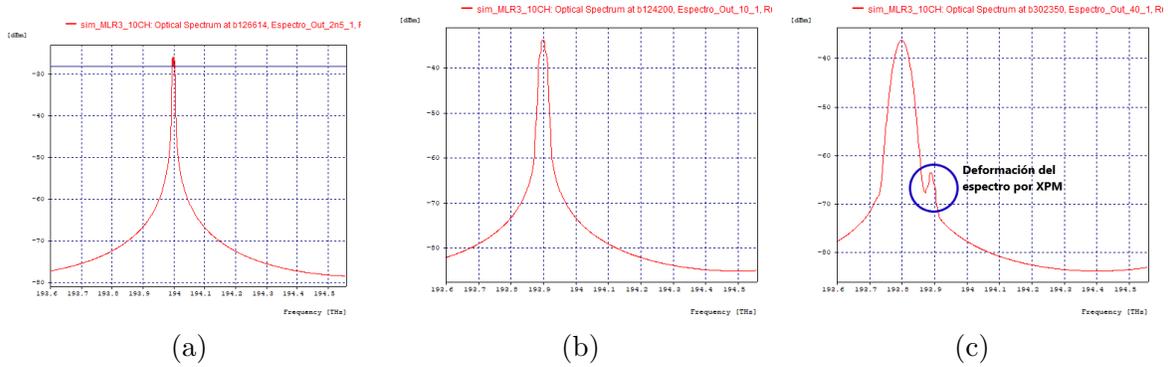


Figura 2.9: Espectro óptico en Rx de canal superior para (a) OOK-NRZ a 2.5 (b) OOK-RZ a 10 y (c) DPSK-RZ a 40 Gbps.

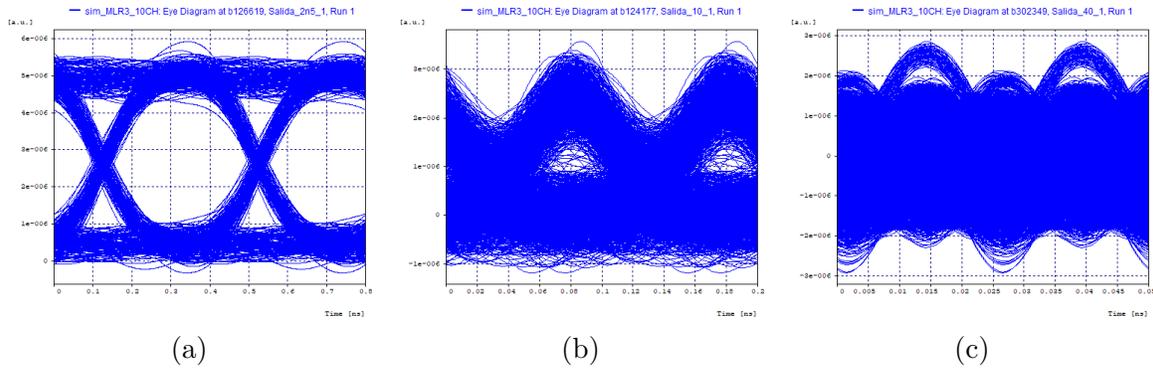


Figura 2.10: Diagrama de ojo en Rx de canal superior para (a) OOK-NRZ a 2.5 (b) OOK-RZ a 10 y (c) DPSK-RZ a 40 Gbps.

En la transmisión de señales de información a través de cualquier medio, es común experimentar pérdida de potencia de señal y distorsiones en la fidelidad de la señal. En el caso del canal DPSK-RZ a 40 Gbps, se observa una distorsión en el espectro causada por la Modulación de Fase Cruzada (XPM) entre señales ópticas cercanas (Figura 2.9c).

Esta distorsión introduce una frecuencia adicional que originalmente no estaba presente en la señal, lo que puede ser atribuido a la transmisión de pulsos ópticos cercanos en el dominio de frecuencia con intensidades similares, o la amplificación de residuos del filtrado produciendo el efecto XPM.

Al analizar la Tabla 2.5, se evidencia una potencia de recepción menor que el umbral de sensibilidad del receptor que corresponde a -28 dB, cuando la potencia recibida está por debajo del umbral de sensibilidad, el receptor no podrá demodular adecuadamente la señal y, en consecuencia, el diagrama de ojo se cerrará. Con una separación reducida entre los niveles de voltaje, el receptor tendrá dificultades para discernir claramente si un bit es un uno o un cero. Como resultado, la BER será alta en esta situación y el diagrama de ojo se verá afectado negativamente y se deteriora significativamente.

La OSNR se refiere a la relación entre la potencia de la señal óptica y la potencia del ruido óptico presente en el enlace. Una OSNR de 2 dB indica que la potencia de la señal óptica es solo 2 dB más alta que la potencia del ruido óptico en el enlace. Con una OSNR tan baja, la señal puede estar demasiado cerca del nivel de ruido, lo que aumenta la probabilidad de errores de bits y dificulta la correcta recepción de la información en el extremo receptor. Una OSNR alta indica una señal fuerte en comparación con el ruido, lo que resulta en una transmisión confiable y una BER baja. Por otro lado, una OSNR baja indica una señal débil en comparación con el ruido, lo que puede conducir a una transmisión inestable y una mayor probabilidad de errores.

El Jitter también representa una importante limitación en altas velocidades de transmisión. Un Jitter excesivo puede resultar en la superposición de bits, lo que lleva a errores de lectura en el receptor, lo que, a su vez, puede afectar la calidad de la transmisión y aumentar el BER. En sistemas de fibra óptica, el Jitter puede ser especialmente relevante en aplicaciones de alta velocidad, donde las fluctuaciones temporales pueden ser más pronunciadas y afectar la sincronización y la interpretación precisa de los datos transmitidos. Al momento de diseñar el sistema se debe controlar y minimizar el Jitter para garantizar una transmisión confiable y una recepción precisa de los datos.

En sistemas de fibra óptica, el factor Q puede ser relevante en ciertos componentes, como filtros ópticos utilizados para la separación de longitudes de onda en sistemas WDM. El factor Q es una medida de la eficiencia y la selectividad de un sistema resonante, se utiliza para describir la relación entre la energía almacenada y la energía disipada en dicho sistema. Cuanto mayor sea el factor Q, más selectivo y menos dispersivo será el sistema resonante.

Los resultados no permiten estar seguros de si el efecto XPM actual puede aislarse de la Dispersión Cromática (DC), ya que, a medida que se aumenta la capacidad de la red, este fenómeno se vuelve más complejo. Dado que las tasas de bits más altas, como 40 Gbps, son más susceptibles a la dispersión, es probable que el problema actual se deba a un exceso de dispersión. Para abordar esto, se utiliza de un módulo DCM para

igualar las velocidades de propagación y corregir la deformación en la señal.

Tabla 2.4: Parámetros OPM para compensación de 25 - 100 %.

Velocidad Tx (Gbps)	Canal	Compensación (%)	Potencia Rx (dBm)	BER	Jitter (ns)	Factor Q (dB)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
2.5	4	25	-25,804228	4,80E-23	7,56E-02	19,928598	51,312837	2,19577
		50	-25,839971	3,94E-25	7,92E-02	20,340001	51,799702	2,16003
		75	-25,810302	2,79E-23	7,90E-02	20,055293	51,457697	2,1897
		100	-25,842237	1,12E-23	8,70E-02	20,004301	51,60476	2,15776
	7	25	-25,72254	3,96E-25	8,07E-02	20,466196	55,762786	2,27775
		50	-25,695865	1,48E-26	8,11E-02	20,631048	55,565453	2,30413
		75	-25,736141	5,18E-24	7,83E-02	20,033358	55,632969	2,26386
		100	-25,692131	5,33E-24	7,92E-02	20,230769	55,677283	2,30787
10	2	25	-33,702324	3,08E-04	3,69E-03	10,807018	50,365144	-5,702324
		50	-33,729936	6,01E-05	2,85E-03	11,622892	49,485842	-5,729936
		75	-33,751851	3,37E-05	2,51E-03	12,011849	49,400423	-5,751851
		100	-33,717856	2,47E-05	2,47E-03	12,228758	49,031664	-5,717856
	9	25	-33,967879	1,16E-03	4,28E-03	9,697976	51,377509	-5,967879
		50	-33,98472	5,49E-04	3,32E-03	10,470694	50,811846	-5,98472
		75	-33,987733	3,95E-04	2,87E-03	10,592461	50,629901	-5,987733
		100	-33,980906	2,69E-04	2,89E-03	10,850354	51,615747	-5,980906
40	1	25	-36,140846	2,28E-02	5,91E-03	6,0206	44,03696	-8,140846
		50	-36,139071	2,28E-02	6,55E-03	6,0206	44,094138	-8,139071
		75	-36,100555	2,30E-04	4,32E-04	10,890934	44,536759	-8,100555
		100	-36,165887	1,00E-40	3,59E-04	40	44,613467	-8,165887
	10	25	-33,115326	2,28E-02	6,09E-03	6,0206	47,046069	-5,115326
		50	-33,171186	2,28E-02	6,65E-03	6,0206	46,471447	-5,171186
		75	-33,106735	7,07E-05	0	11,512677	46,973601	-5,106735
		100	-33,189057	1,00E-40	6,74E-05	40	47,377224	-5,189057

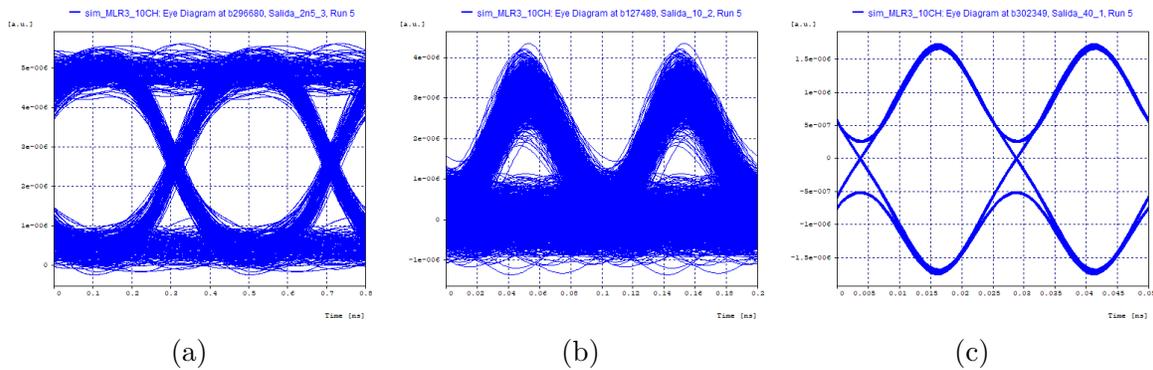


Figura 2.11: Diagrama del ojo Rx en canal superior (a) 2.5 (b) 10 y (c) 40 Gbps con compensación al 100 %.

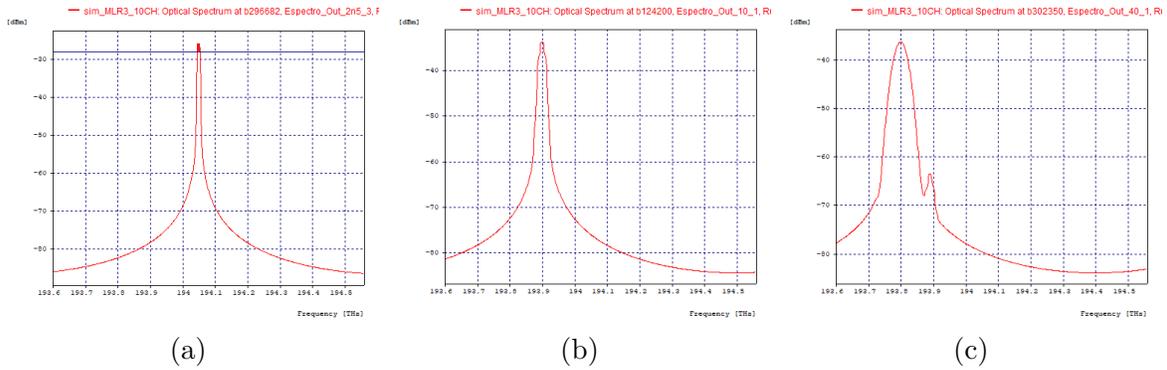


Figura 2.12: Espectro óptico en Rx de canal superior para (a) 2.5 (b)10 y (c) 40 Gbps con compensación al 100 %.

Los resultados presentados en la Figura 2.11 y la Tabla 2.4 muestran mejoras evidentes en la calidad de la señal mediante diversas compensaciones en el medio. Particularmente se destaca la notable mejora en el diagrama de ojo de los canales de 40 Gbps, que solo se logra al aplicar una compensación del 100 %. Esto indica una mayor susceptibilidad a la dispersión en estos canales, a pesar del uso de un esquema de modulación más robusto (Figura 2.11c). Además se observa una mejora significativa en los diagramas de ojo para las tasas de transmisión de 10 Gbps y 2.5 Gbps con la aplicación de la compensación (Figuras 2.11a y 2.11b), lo que sugiere una reducción en la tasa de errores y un aumento en el factor de calidad.

Sin embargo al analizar tanto la figura 2.12 como la Tabla 2.4, se corrobora que los valores asociados a la potencia de la señal recibida no tiene cambios significativos tras la aplicación de las compensaciones. Esto indica la presencia de deficiencias en el sistema óptico actual y se requieren procesos adicionales para lograr una transmisión adecuada de datos. Para lograrlo en un entorno que involucra múltiples etapas de splitters, resulta crucial considerar las pérdidas de potencia y garantizar que la señal mantenga niveles óptimos de potencia en cada punto de la red. En este caso, se sugiere la implementación de módulos de amplificación para compensar la pérdida de potencia y asegurar niveles adecuados de señal en todos los tramos de la red óptica.

En sistemas WDM, es común que los canales superiores e inferiores muestren comportamientos diferentes. Por lo tanto, se han recopilado datos de un canal superior y un canal inferior de las diferentes velocidades de transmisión. Sin embargo, al analizar los resultados no se han observado diferencias significativas entre los canales superiores e inferiores para cada velocidad. Por consiguiente, en el resto del estudio, no se considera necesario tomar muestras de ambos canales para cada velocidad, excepto en el caso específico de los canales de 40 Gbps, donde las diferencias en la potencia de recepción son notables y requieren un análisis más detallado. En los demás casos, se asume que los canales superiores e inferiores se comportan de manera similar para cada velocidad de transmisión.

Tabla 2.5: Condiciones iniciales de los parámetros de monitoreo con una compensación al 100 %.

Velocidad (Gbps)	Canal	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Jitter (ns)	Factor Q (dB)
2.5	4	2,15776	-25,842237	1,12E-23	8,70E-02	20,004301
10	2	-5,717856	-33,717856	2,47E-05	2,47E-03	12,228758
40	1	-8,165887	-36,165887	1,00E-40	3,59E-04	40
	10	-5,189057	-33,189057	1,00E-40	6,74E-05	40

2.5. Casos de estudio

Las actividades a desarrollar se dirigen a la evaluación de Amplificadores Ópticos Híbridos (HOA) en una red MLR-DWDM de tipo NG-PON, en la cual se analiza el desempeño con respecto a los efectos no lineales (penalizaciones de potencia).

El amplificador de fibra híbrido se simula sobre la Red de Distribución Óptica (ODN) en diferentes configuraciones: i) Híbrida en Serie ii) Híbrida en Paralelo iii) Híbrida Serie-Paralelo. La estructura del amplificador se configura para operar en los modos de amplificación Booster y Preamplificación. En este caso no será implementado el modo en línea debido a que en los sistemas de transmisión óptica de alta velocidad, los amplificadores de línea suelen distribuirse de manera periódica a lo largo del enlace de fibra, ubicando uno aproximadamente cada 80 km de distancia de transmisión y la red inicialmente implementada cuenta con una distancia de 20 km.

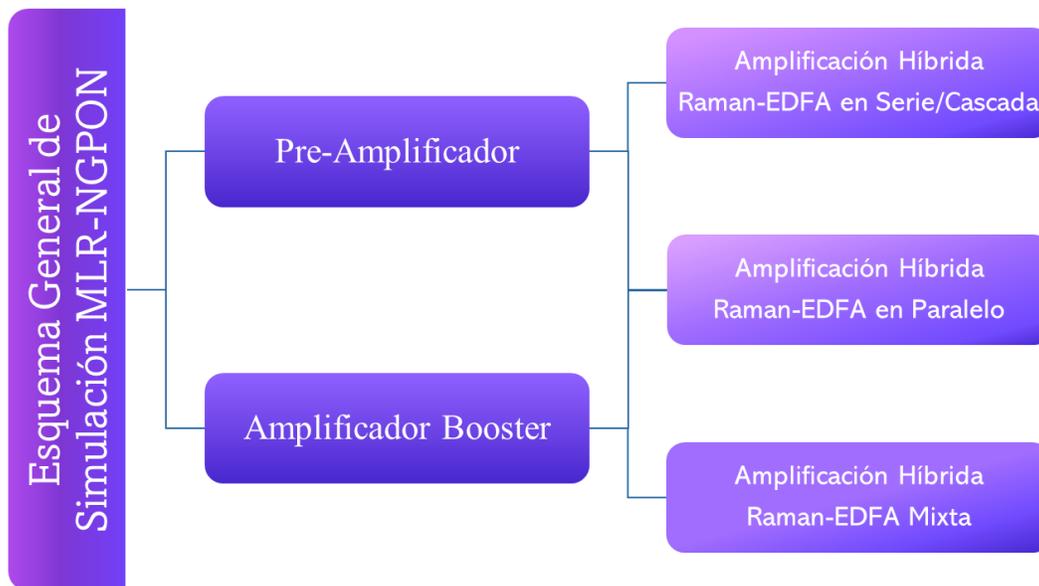


Figura 2.13: Casos de estudio.

En cada caso de estudio se define el comportamiento del sistema dependiendo del modo de amplificación, teniendo en cuenta las condiciones de monitoreo de desempeño óptico ideales.

Nota de autor:

En este capítulo, se abordan las metodologías y procedimientos empleados en la ejecución del trabajo de grado. Se introduce la herramienta de software OptSim, diseñada específicamente para el diseño y simulación de redes ópticas. Además, se presenta el modelo inicial propuesto para la red óptica MLR-DWDM de tipo NG-PON, detallando sus características y especificaciones. Se lleva a cabo una evaluación de su desempeño y se exponen los resultados iniciales obtenidos. Por último, se establecen los casos de estudio que serán abordados a lo largo del trabajo de grado para alcanzar los objetivos planteados de manera efectiva.

CAPÍTULO 3

Análisis del desempeño de una red óptica MLR-DWDM de tipo NG-PON implementando HOA

En este capítulo se desarrolla el proceso de simulación que permite realizar el análisis del desempeño de una red óptica MLR-DWDM tipo NG-PON al implementar diferentes configuraciones de amplificación óptica híbrida. Para llevar a cabo este proceso, se ajusta cada componente del sistema según las métricas del fabricante y las características técnicas del escenario de simulación seleccionadas para la red en secciones anteriores. En cada caso de estudio se analiza el comportamiento del sistema dependiendo del modo de amplificación realizando diferentes variaciones en los parámetros de los amplificadores como longitud de onda de bombeo, longitud del tramo de la fibra y potencia de bombeo con el fin de determinar la configuración ideal según las penalidades de potencia y resultados recomendados para las OPM objetivo.

3.1. AMPLIFICACIÓN ÓPTICA HÍBRIDA EN MODO BOOSTER y PREAMPLIFICADOR

Para el desarrollo de este estudio, se evaluó el desempeño de tres disposiciones distintas de Amplificadores Ópticos Híbridos Raman-EDFA: en Serie, Paralelo y Serie-Paralelo. La disposición en Serie consistió en un amplificador Raman seguido de un amplificador EDFA (Figura 3.1a), mientras que en la disposición en Paralelo, el amplificador Raman se ubicó en Paralelo con el EDFA (Figura 3.1b). Finalmente, en la disposición en Serie-Paralelo, se combinó la disposición en Serie de Raman-EDFA con otro amplificador Raman en Paralelo (Figura 3.1c).

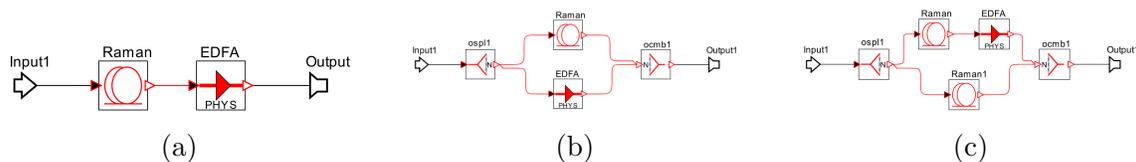


Figura 3.1: Configuraciones de Amplificador Óptico Híbrido para (a) Raman-EDFA configurado en Serie, (b) Raman-EDFA configurado en Paralelo y (c) Raman-EDFA configurado en Serie-Paralelo.

La Tabla 3.1 presenta los parámetros de configuración específicos para el amplificador híbrido Raman-EDFA, los cuales se caracterizaron utilizando modelos comerciales,

como se detalla en los Anexos A y B. Estos parámetros incluyen la longitud de la fibra, la potencia de bombeo y la longitud de onda de bombeo, y se variaron según el caso de estudio. Para el amplificador EDFA, se empleó el modo de propagación co-propagado, mientras que para el amplificador Raman se utilizó el modo de propagación contra-propagado.

Tabla 3.1: Configuración de los parámetros de simulación para el amplificador híbrido Raman-EDFA en modo Preamplificador y Booster.

Parámetros de simulación	Preamplificador		Booster	
	EDFA	Raman	EDFA	Raman
Longitud del amplificador	4 - 13 m	7 - 13 km	4 - 13 m	13 - 15 km
Longitud de onda de bombeo	980/1480 nm	1440/1450/1460 nm	980/1480 nm	1440/1450/1460 nm
Potencia de bombeo	200 mW	200 - 800 mW	200 mW	200 - 800 mW

En este contexto, se emplearon dos modos de propagación: el modo Preamplificado y el modo Booster. El Preamplificador óptico proporciona un factor de ganancia mayor y un ancho de banda más amplio; una señal óptica débil se amplifica antes de la fotodetección. Esto permite suprimir la degradación de la relación señal a ruido causada por el ruido térmico en la electrónica del receptor [74]. Se evaluaron las diferentes configuraciones de Amplificadores Ópticos Híbridos Raman-EDFA en modo Preamplificador, obteniendo 756 combinaciones de Amplificadores Ópticos Híbridos en este modo de propagación.

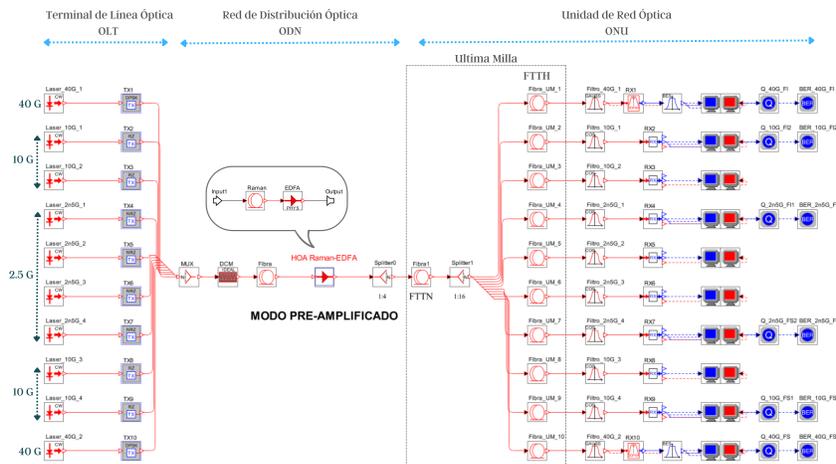


Figura 3.2: Escenario de simulación del Preamplificador Óptico Híbrido Serie.

Por otro lado, el amplificador Booster se utiliza para aumentar la distancia de transmisión entre 10 - 100 km, según su ganancia específica y las pérdidas de la fibra. Además, puede emplearse en una red de área local para compensar la pérdida de inserción del acoplador y la pérdida de división de potencia [74]. Por esa razón, se emplea el Booster

como refuerzo de la señal óptica frente al acoplador para garantizar que llegue suficiente potencia a cada receptor. En este caso, se generaron 1008 combinaciones de Amplificadores Ópticos Híbridos en modo Booster.

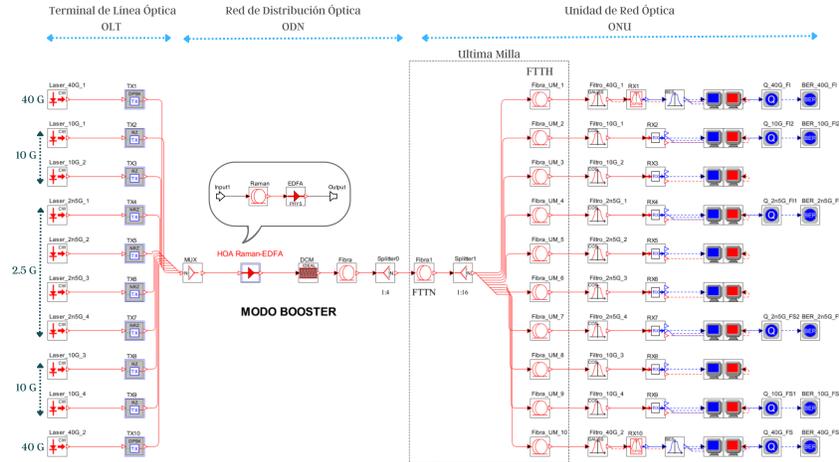


Figura 3.3: Escenario de simulación del Amplificador Óptico Híbrido modo Booster.

Esta caracterización integral permitió analizar los efectos del posicionamiento del amplificador híbrido Raman-EDFA y mejorar el desempeño de la red mediante el uso de estos. De esta manera, se presentarán los seis casos de estudio que abarcan las diferentes asignaciones del amplificador Raman-EDFA en Serie, Paralelo y Serie-Paralelo en los modos Preamplificado y Booster.

3.1.1. Caso 1: Amplificador Raman-EDFA en Serie modo Preamplificador

En este escenario de simulación, se evaluó el desempeño de 252 combinaciones de Amplificadores Ópticos Híbridos en modo Preamplificador, al conectar el amplificador Raman y EDFA en Serie. Se analizaron los diferentes parámetros OPM para determinar qué combinación de amplificador híbrido cumplía con los criterios establecidos en la Tabla 2.2, así como con los parámetros de OSNR y Jitter. De las 252 combinaciones, solo 21 resultaron satisfactorias. La configuración del amplificador HOA Serie en modo Preamplificado, para lograr el mejor funcionamiento respecto a los parámetros OPM objetivos en el escenario simulado, fue la siguiente:

Tabla 3.2: Configuración del amplificador Raman-EDFA en Serie en modo Preamplificado.

	Amp. EDFA	Amp. Raman
Longitud de onda de bombeo	980 nm	1460 nm
Longitud de tramo de fibra	4 m	7 km
Potencia de bombeo	200 mW	500 mW

En la Tabla 3.3 se presentan las mediciones de la BER, la OSNR, el factor Q, Jitter y la potencia óptica. El uso del amplificador HOA en Serie Preamplificado mejora significativamente el rendimiento de la red óptica, especialmente para los canales de 10 y 40 Gbps. Esta mejora es evidente al comparar los parámetros OPM de recepción obtenidos en la red no amplificada y la red que implementa el amplificador. Según se muestra en la Tabla 3.3 y la Tabla 2.5, respectivamente. Se observa un aumento en la potencia de recepción de 16,395 dB para el canal 1, 14,516 dB para el canal 2, 12,551 dB para el canal 4 y 12,697 dB para el canal 10.

Tabla 3.3: Parámetros OPM para la red MLR-DWDM implementando el Amplificador Óptico Híbrido Raman-EDFA en Serie en modo Preamplificador.

Características	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	Potencia Rx (dBm)	OSNR (dB)
CH 1: DPSK-RZ 40 Gbps	1.00e-40	39.631	5.51e-05	-19.769	8.23
CH 2: OOK-RZ 10 Gbps	1.00e-40	27.047	5.11e-04	-19.201	8.799
CH 4: OOK-NRZ 2.5 Gbps	1.00e-40	32.465	5.31e-02	-13.292	14.708
CH 10: DPSK-RZ 40 Gbps	1.00e-40	37.045	1.60e-4	-20.492	7.508

Esta mejora también se refleja en el espectro óptico de los canales de recepción con el amplificador, que superan el umbral de recepción. Estos resultados son visibles en la Figura 3.4, donde se compara el espectro óptico de los canales en recepción en la red no amplificada (Figura 3.4a) y los canales en recepción en la red amplificada con el amplificador HOA en Serie Preamplificado (Figura 3.4b).

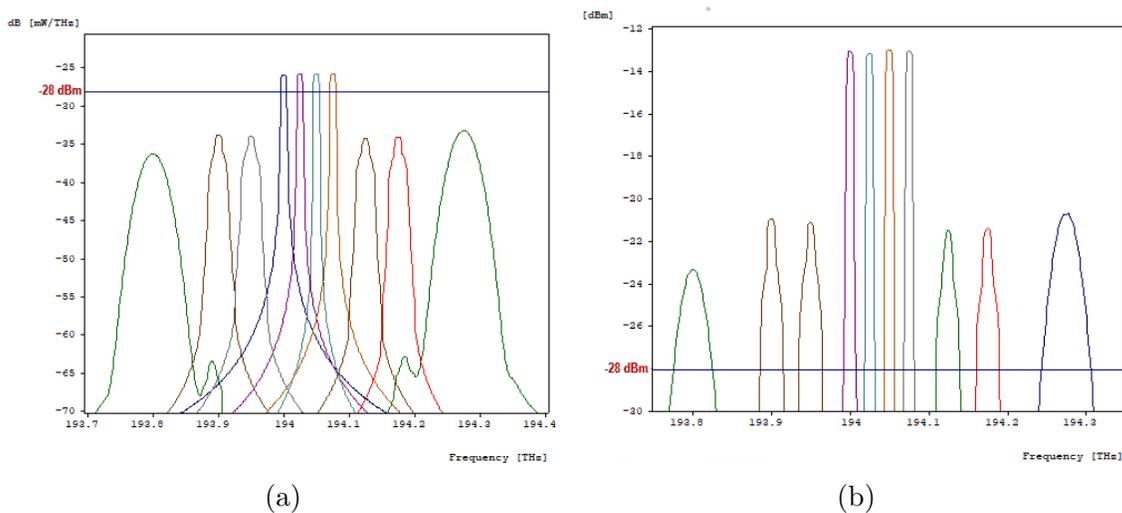


Figura 3.4: Espectro óptico de los 10 canales dispuesto en recepción (a) no amplificados (b) implementando Preamplificador Raman-EDFA en Serie.

Del mismo modo, se logra un diagrama de ojo más claro y bien definido, lo cual indica una señal de alta calidad, es decir, que los bits transmitidos se pueden distinguir claramente en el receptor, reduciendo así la probabilidad de errores de lectura. Un diagrama de ojo más claro después de la amplificación significa que los valores de BER son más bajos, el factor Q es más alto y el Jitter es menor en comparación con la señal no amplificada, como se reflejan en la Tabla 3.3 y la Figura 3.5.

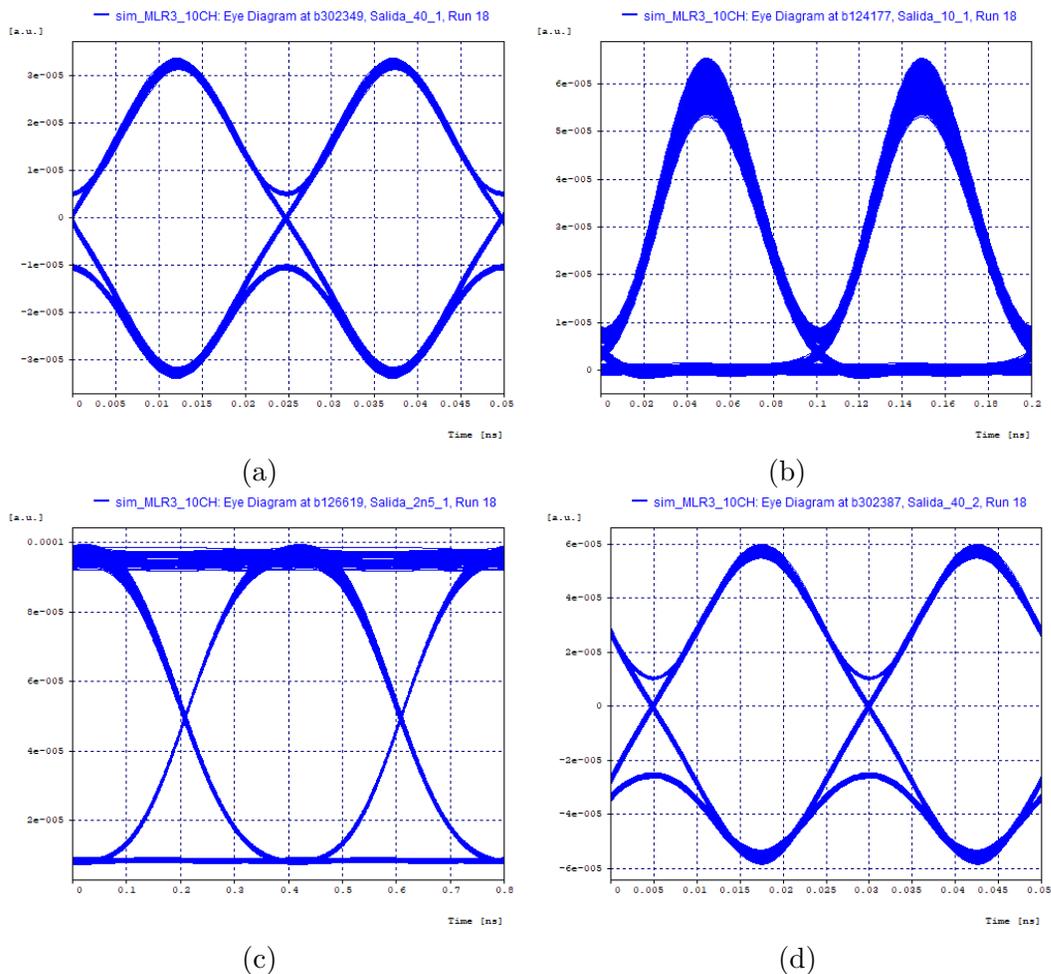


Figura 3.5: Diagrama de ojo de la red MLR-DWDM implementando Preamplificador Raman-EDFA Serie para el canal (a) CH 1: DPSK-RZ 40 Gbps (b) CH 2: OOK-RZ 10 Gbps (c) CH 4: OOK-NRZ 2.5 Gbps y (d) CH 10: DPSK-RZ 40 Gbps.

Finalmente, se evaluó la red amplificada variando la distancia del segmento de alimentación desde 20 hasta 60 km en incrementos de 20 km. La distancia máxima recomendada para una red amplificada siguiendo las recomendaciones ITU-T NG-PON [16, 17, 26] es de 60 km. La Tabla 3.4 muestra los valores de los parámetros OPM obtenidos para cada distancia. Se observa que el Preamplificador en Serie ofrece un buen rendimiento a medida que aumenta la distancia. Se logró extender la distancia del segmento de alimentación hasta 80 km, como se puede apreciar en las Figuras 3.6,

3.7 y 3.8, que muestran la relación entre BER, Factor Q y Potencia de Recepción en función de la distancia.

Tabla 3.4: Parámetros OPM en los rangos de distancias de 20 - 60 km.

	Distancia	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)
Canal 1: 40 Gbps	20 Km	4,715351	-23,284649	1,00E-40	39,931752	2,92817E-04
	40 Km	3,594731	-24,405269	1,00E-40	36,857784	0,000415409
	60 Km	2,211429	-25,788571	1,00E-40	32,586296	0,000239096
Canal 2: 10 Gbps	20 Km	7,078758	-20,921242	1,00E-40	26,814313	5,1238E-04
	40 Km	5,995126	-22,004874	1,00E-40	23,453452	0,000610384
	60 Km	4,667513	-23,332487	1,00E-40	23,005066	0,000656814
Canal 4: 2.5 Gbps	20 Km	14,980785	-13,019215	1,00E-40	34,296543	5,62001E-02
	40 Km	13,859391	-14,140609	1,00E-40	34,45244	0,068034
	60 Km	12,610252	-15,389748	1,00E-40	36,818208	0,0623142
Canal 10: 40 Gbps	20 Km	7,324536	-20,675464	1,00E-40	38,052919	3,90365E-05
	40 Km	6,429818	-21,570182	1,00E-40	30,317207	0,000416542
	60 Km	5,329733	-22,670267	1,00E-40	23,716994	0,000575293

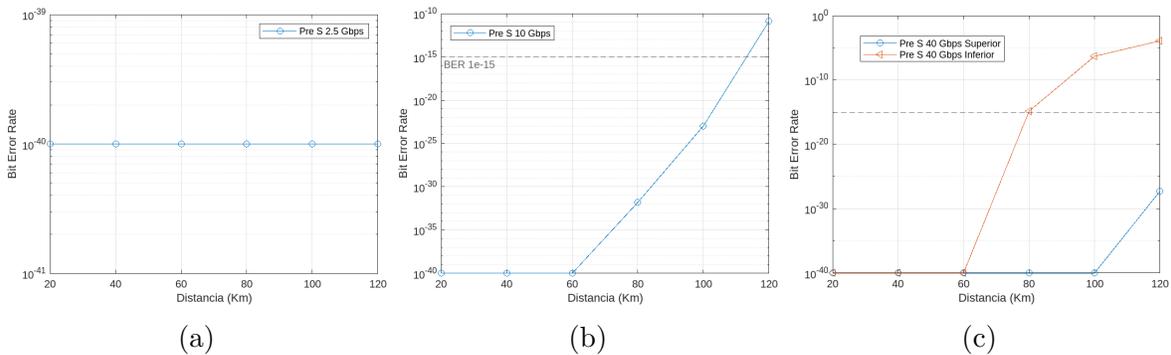


Figura 3.6: BER vs longitud del segmento de alimentación para los canales (a) CH1: 40 Gbps (b) CH2: 10 Gbps (c) CH4: 2.5 Gbps (d) CH10: 40 Gbps.

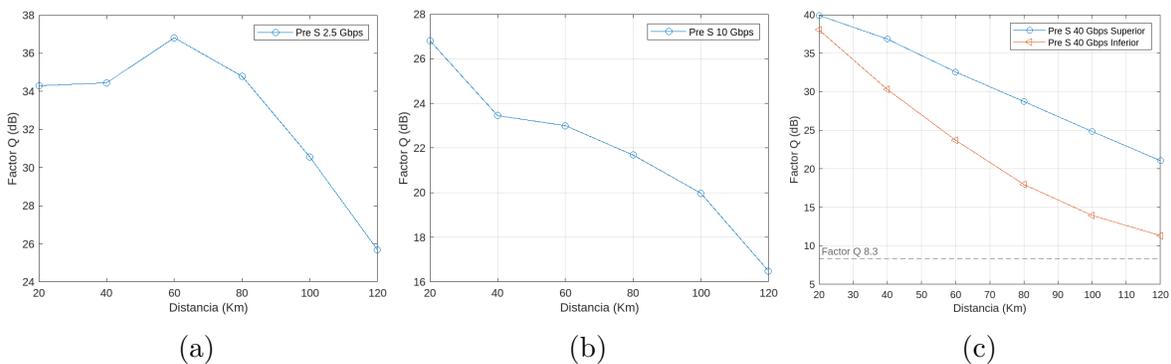


Figura 3.7: Factor Q vs longitud del segmento de alimentación para los canales (a) CH1: 40 Gbps (b) CH2: 10 Gbps (c) CH4: 2.5 Gbps (d) CH10: 40 Gbps.

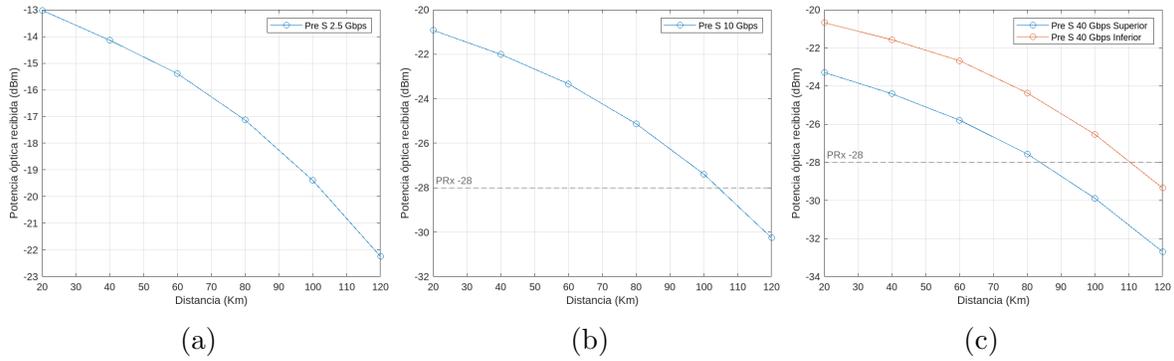


Figura 3.8: Potencia Recepción vs longitud del segmento de alimentación para los canales (a) CH1: 40 Gbps (b) CH2: 10 Gbps (c) CH4: 2.5 Gbps (d) CH10: 40 Gbps.

Este caso proporcionó evidencia sólida de que la configuración de amplificación en Serie Raman-EDFA, en modo Preamplificado, mejora significativamente el desempeño de la red y extiende la distancia de transmisión respecto a los parámetros de OPM objetivo.

3.1.2. Caso 2: Amplificador Raman-EDFA en Paralelo modo Preamplificador

Se llevó a cabo un análisis de diversas combinaciones de los parámetros de configuración del amplificador Raman-EDFA en modo Preamplificado. Esta exploración abarcó un total de 252 combinaciones posibles. Sin embargo, únicamente seis configuraciones lograron cumplir con los criterios establecidos en la Tabla 2.2, que incluye la OSNR y el Jitter. Se identificó la configuración del amplificador Raman-EDFA en Paralelo, que logra el mejor desempeño de la red en términos del OPM objetivo. La configuración es la siguiente:

Tabla 3.5: Configuración del amplificador Raman-EDFA en Paralelo en modo Preamplificado.

	Amp. EDFA	Amp. Raman
Longitud de onda de bombeo	980 nm	1460 nm
Longitud de tramo de fibra	13 m	13 km
Potencia de bombeo	200 mW	500 mW

La Tabla 3.6 presenta los datos de OPM obtenidos mediante la configuración del amplificador Raman-EDFA Paralelo en modo Preamplificado. Al comparar estos resultados con la red no amplificada (Tabla 2.5), se observa una mejora en el desempeño de los canales de 10 y 2.5 Gbps, los cuales alcanzan un desempeño superior en todos los parámetros OPM. Asimismo, se registra un aumento en la potencia de recepción, con un incremento de 16.864 dB en el canal 1, 15.802 dB con el canal 2, 12.5 dB con el

canal 4 y 14.235 dB por encima de la potencia en recepción de la red no amplificada, como se ilustra en la Figura 3.9.

Tabla 3.6: Parámetros OPM para la red MLR-DWDM implementando el amplificador híbrido Raman-EDFA Paralelo en modo Preamplificador.

Características	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	Potencia Rx	OSNR (dB)
CH 1: NRZ-OOK 40 Gbps	1.00e-40	25.43	4.7e-04	-19.301 dBm	8.699
CH 2: RZ-OOK 10 Gbps	1.00e-40	26.22	6.91e-04	-17.915 dBm	10.085
CH 4: RZ-DPSK 2.5 Gbps	1.00e-40	29.511	6.52e-02	-13.343 dBm	14.657
CH 10: NRZ-OOK 40 Gbps	4.89e-30	21.112	1.57e-03	-18.954 dBm	9.046

La dispersión representa un fenómeno que impacta las señales ópticas transmitidas a través de una fibra óptica, generando un ensanchamiento y superposición de los pulsos de luz. Estos efectos pueden degradar la calidad de la señal y complicar su detección en el receptor. La dispersión acumulada a lo largo de la fibra depende de factores como la longitud, el ancho de banda y la modulación de la señal.

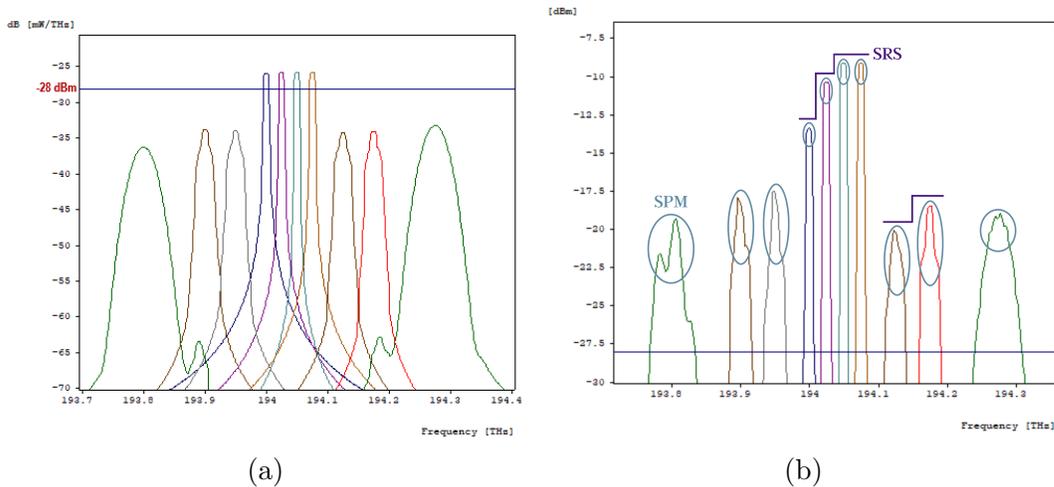


Figura 3.9: Espectro óptico de los 10 canales dispuesto en recepción (a) no amplificados (b) implementando Preamplificador Raman-EDFA Paralelo.

En este caso de estudio, se hace evidente la presencia de efectos no lineales, como la Dispersión Raman Estimulado (SRS), un efecto no lineal de orden superior en el que se genera luz dispersa a una longitud de onda más larga que la de la luz incidente. Si existe otra señal presente en esa longitud de onda más larga, la luz SRS amplifica esa señal mientras agota la energía de las demás señales, lo que origina un ruido con fases aleatorias asociadas a todos los fotones generados espontáneamente. Esto provoca el

efecto de señales escalonadas y, por consiguiente, diafonía entre los canales de longitud de onda, lo que puede ocasionar ganancias o pérdidas en la intensidad de una señal en un canal determinado.

Para contrarrestar estos impactos negativos, se emplean diversas técnicas en el transmisor, receptor o la propia fibra, como la compensación de dispersión, la ecualización adaptativa y la aplicación de modulaciones avanzadas. En este caso específico, el desplazamiento en el diagrama de ojo 3.10 se atribuye parcialmente a la frecuencia relativa del dispositivo de compensación, la cual estaba considerablemente alejada de la frecuencia central de los canales en los extremos de la red. Esto resultó en un ensanchamiento excesivo de los pulsos de luz en los canales incorrectamente compensados, particularmente los de 40 Gbps, ya que son especialmente susceptibles a los efectos de dispersión debido a su alta velocidad.

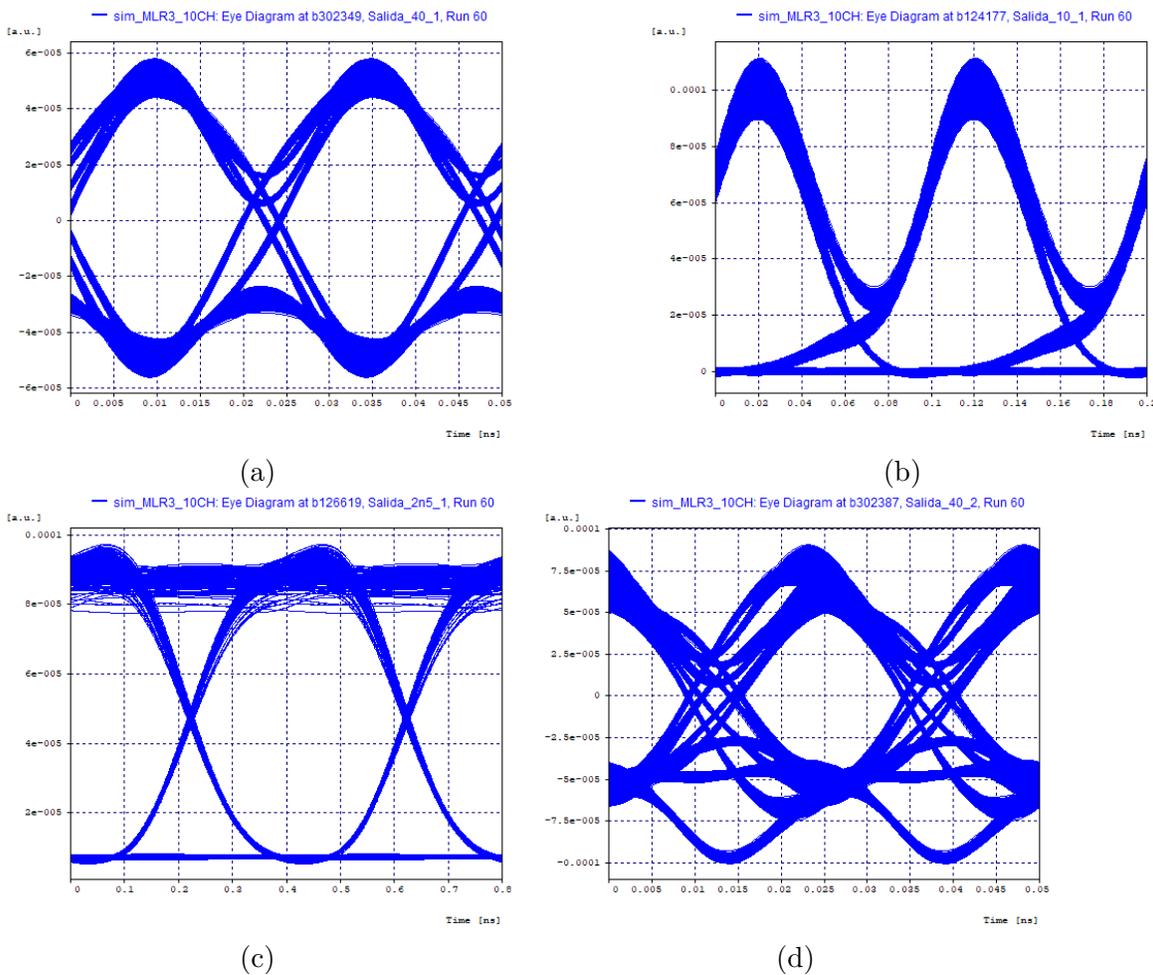


Figura 3.10: Diagrama de ojo de la red MLR-DWDM implementando el Preamplificador Raman-EDFA Paralelo (a) CH1: 40 Gbps (b) CH2: 10 Gbps (c) CH4: 2.5 Gbps (d) CH10: 40 Gbps.

Adicionalmente, se identifican distorsiones en el diagrama de ojo 3.10 debido a los efectos no lineales de Kerr, tales como SPM y en menor medida XPM. Estos efectos surgen a partir de las variaciones dependientes de la intensidad en el índice de refracción, lo que induce cambios en la fase de las señales provocando chirridos en los pulsos digitales. Esto puede empeorar el ensanchamiento temporal de los pulsos debido a la Dispersión Cromática, particularmente en sistemas de muy alta velocidad, como 40 Gbps o más.

Finalmente, se llevó a cabo la evaluación de la red amplificada mediante la implementación del amplificador Raman-EDFA Paralelo en modo Preamplificado, considerando la máxima distancia lógica permitida según las recomendaciones ITU-T NG-PON. Este proceso implicó extender la longitud del segmento de alimentación desde 20 km hasta 60 km, en incrementos de 20 km, conforme a las recomendaciones ITU-T [16, 17, 26]. Los datos recopilados sobre la OPM se detallan en la Tabla 3.16.

Tabla 3.7: Parámetros OPM en los rangos de distancias de 20 - 60 km.

	Distancia	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)
Canal 1: 40 Gbps	20 Km	8,698614	-19,301386	1,00E-40	25,429607	0,000469823
	40 Km	7,874641	-20,125359	5,12E-29	20,964895	0,00054914
	60 Km	7,662497	-20,337503	1,00E-40	23,747442	0,000980871
Canal 2: 10 Gbps	20 Km	10,085284	-17,914716	1,00E-40	26,220288	0,000691421
	40 Km	10,164811	-17,835189	1,00E-40	27,130461	0,000612857
	60 Km	8,548488	-19,451512	1,00E-40	27,12119	0,000527986
Canal 4: 2.5 Gbps	20 Km	14,656502	-13,343498	1,00E-40	29,510683	0,0652045
	40 Km	18,444463	-9,555537	1,00E-40	33,792226	0,068651
	60 Km	16,631518	-11,368482	1,00E-40	34,361475	0,0563137
Canal 10: 40 Gbps	20 Km	9,045842	-18,954158	4,89443E-30	21,111576	0,00156801
	40 Km	8,73564	-19,26436	2,52E-15	18,116444	0,00124901
	60 Km	8,749216	-19,250784	2,31E-05	12,219208	0,000839897

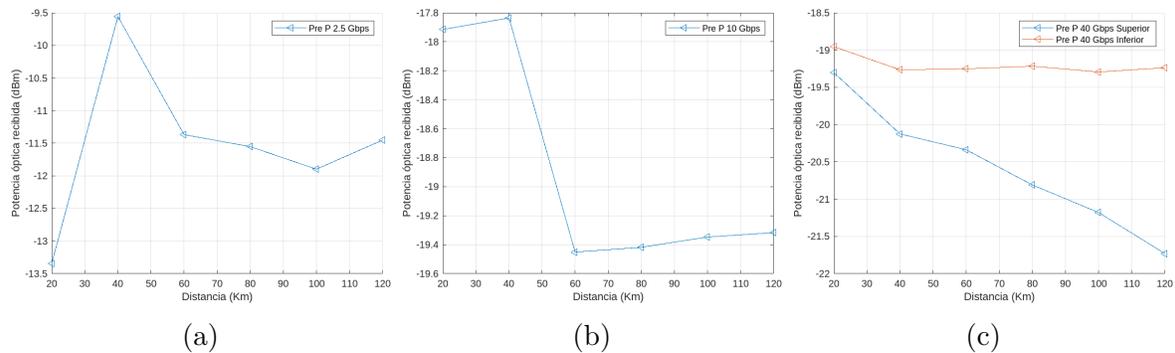


Figura 3.11: Potencia de recepción vs longitud del segmento de alimentación en un rango de 20 a 120 km para los canales de recepción de (a) 2.5 Gbps (b) 10 Gbps y (c) 40 Gbps.

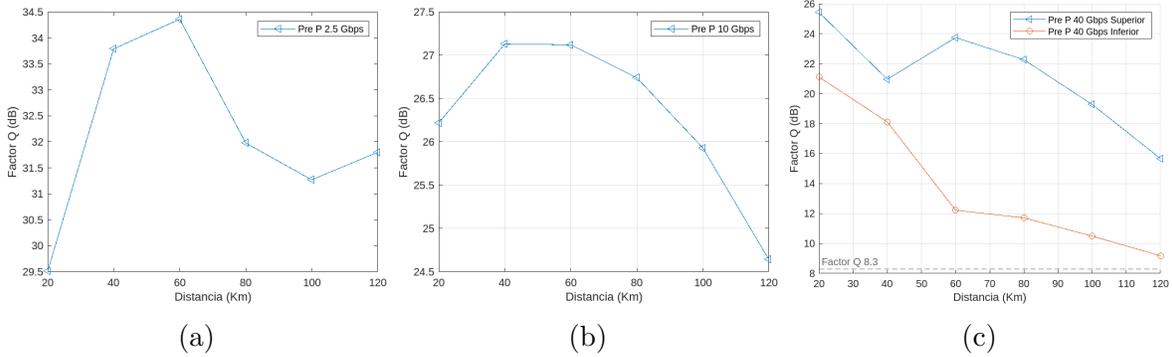


Figura 3.12: Factor Q vs longitud del segmento de alimentación en un rango de 20 a 120 km para los canales de recepción de (a) 2.5 Gbps (b) 10 Gbps y (c) 40 Gbps.

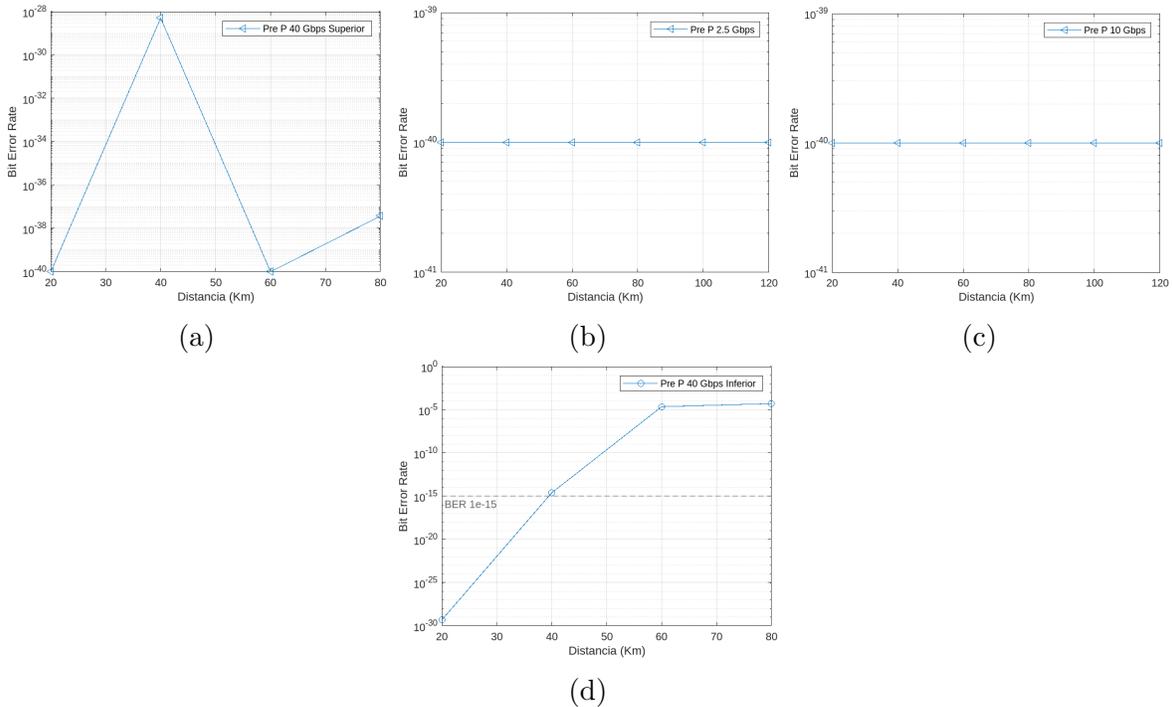


Figura 3.13: Tasa de Error de Bit (BER) vs longitud del segmento de alimentación en un rango de 20 a 60 km para los canales de recepción (a) CH 1: 40 Gbps (b) CH 2: 10 Gbps (c) CH 4: 2.5 Gbps y (d) CH 10: 40 Gbps.

En términos generales, los resultados fueron positivos, con la excepción de la BER en el canal 10 de 40 Gbps. A los 40 km, la BER superó ligeramente el límite aceptable, y con una longitud del segmento de alimentación de 60 km se registró un valor de BER inaceptable, indicando una degradación del sistema en estas condiciones. Las Figuras 3.11, 3.12 y 3.13 proporcionan información adicional sobre la potencia de recepción, el Factor Q y la BER en diferentes distancias de alimentación para los canales de 2.5 Gbps, 10 Gbps y 40 Gbps.

3.1.3. Caso 3: Amplificador Raman-EDFA en Serie-Paralelo modo Preamplificador

En este caso de estudio, se llevó a cabo una Serie de simulaciones con el objetivo de determinar la mejor configuración del amplificador Raman-EDFA en Serie-Paralelo en modo Preamplificado. Se exploraron 252 combinaciones posibles de los parámetros del amplificador, y se seleccionaron las 81 configuraciones que cumplieran con los criterios establecidos en la Tabla 3.1, así como con los valores para OSNR y Jitter. El análisis permitió identificar la configuración que demostró el mejor desempeño respecto a los OPM objetivos en el escenario de simulado:

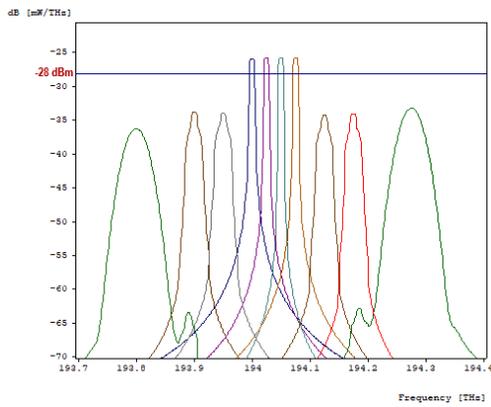
Tabla 3.8: Configuración del amplificador Raman-EDFA en Serie-Paralelo modo Preamplificado.

	Amp. EDFA	Amp. Raman
Longitud de onda de bombeo	980 nm	1450 nm
Longitud de tramo de fibra	13 m	7 km
Potencia de bombeo	200 mW	600 mW

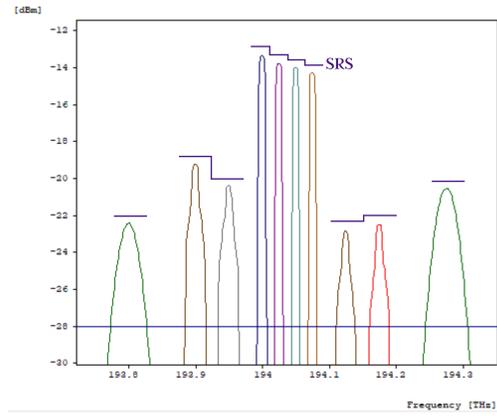
En la Tabla 3.9, se presentan los parámetros OPM asociados a la configuración del amplificador Raman-EDFA bajo estudio. Esta configuración ha demostrado un desempeño superior en comparación con la red no amplificada, como se aprecia en la Figura 3.14b. Se ha obtenido un incremento en la potencia de recepción, siendo de 16.395 dB en el canal 1, 14.515 dB en el canal 2, 12.551 dB en el canal 4 y 12.697 dB en el canal 10. Además, se ha identificado la presencia de SRS, un efecto no lineal de orden superior que puede tener un impacto negativo en la calidad de las señales al provocar alteraciones en el espectro óptico de la señal, provocando una característica escalonada en el espectro óptico. El origen físico de este fenómeno proviene justamente de los movimientos de vibración de las moléculas, inducidos por la variación en la polarizabilidad de las mismas a la frecuencia del fotón óptico y provocada por el haz intenso de bombeo.

Tabla 3.9: OPM de simulación para el amplificador híbrido Raman-EDFA Serie-Paralelo en modo Preamplificador.

Características del canal	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	Potencia Rx (dBm)	OSNR (dB)
CH 1: NRZ-OOK 40 Gbps	1.00e-40	39.631023	5.51E-05	-19.769319	8.230681
CH 2: RZ-OOK 10 Gbps	1.00e-40	27.046597	5.10661e-04	-19.201195	8.798805
CH 4: RZ-DPSK 2.5 Gbps	1.00e-40	32.464624	5.31299e-02	-13.291526	14.708474
CH 10: NRZ-OOK 40 Gbps	1.00e-40	37.044626	1.59993e-04	-20.491542	7.508458

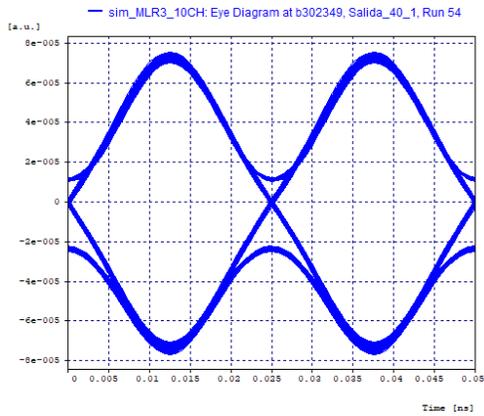


(a)

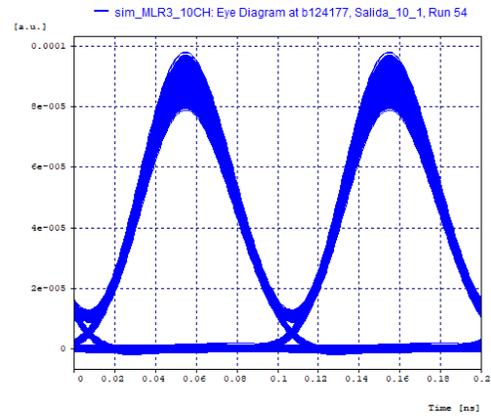


(b)

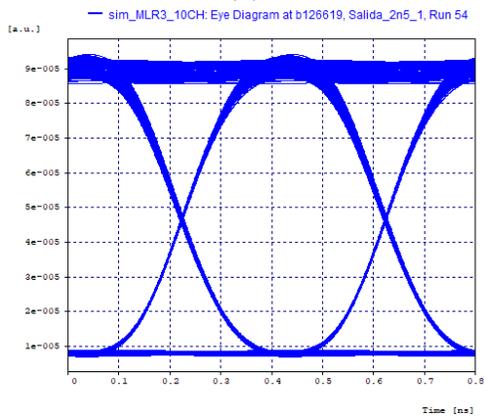
Figura 3.14: Espectro óptico de los 10 canales dispuesto en recepción (a) no amplificados (b) con Preamplificador Raman-EDFA Serie-Paralelo.



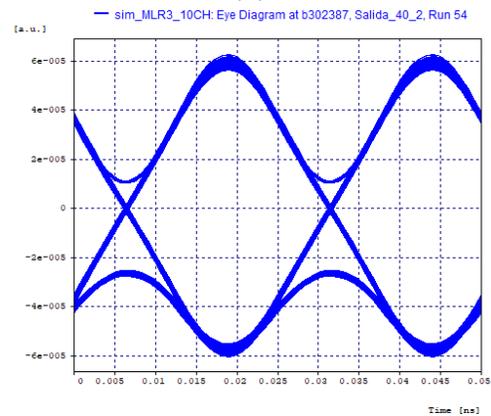
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.15: Diagramas de Ojo para la Configuración Óptima del Preamplificador Serie-Paralelo (a) CH1: 40 Gbps (b) CH2: 10 Gbps (c) CH4: 2.5 Gbps (d) CH10: 40 Gbps.

En relación a los diagramas de ojo 3.15, se ha detectado la presencia de ISI, causando un ensanchamiento en la franja de Unos en el diagrama de ojo. No obstante, se considera despreciable, ya que no está afectando los parámetros OPM de los canales MLR-DWDM. Además, es importante señalar que los ojos presentan una apertura clara, indicando una buena calidad de la señal.

Se evaluó el desempeño de la red utilizando el amplificador Raman-EDFA en modo Preamplificado en una configuración Serie-Paralelo para asegurarse de que garantice que la señal conserve su calidad y cantidad sin deterioro a lo largo de una distancia máxima de 60 km, según lo establecido por las recomendaciones de la ITU-T NG-PON [16, 17, 26] para redes amplificadas óptimamente. Se logró cumplir efectivamente para los tres tipos de canales con velocidades de 2.5 Gbps, 10 Gbps y 40 Gbps, tanto para los canales superiores como para los inferiores dentro del conjunto de canales de 40 Gbps. Además, los valores OPM superaron los requerimientos establecidos, como se muestra en la Tabla 3.10, logrando alcanzar los 80 km.

Tabla 3.10: Parámetros OPM en los rangos de distancias de 20 - 60 km.

	Distancia	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)
Canal 1: 40 Gbps	20 Km	8,230681	-19,769319	1,00E-40	39,631023	5,51E-05
	40 Km	7,159988	-20,840012	1,00E-40	36,522155	0,000371229
	60 Km	6,6442	-21,3558	1,00E-40	32,719932	0,000320447
Canal 2: 10 Gbps	20 Km	8,798805	-19,201195	1,00E-40	27,046597	0,000510661
	40 Km	8,472843	-19,527157	1,00E-40	27,07299	0,000520975
	60 Km	8,468223	-19,531777	1,00E-40	27,059606	0,000529619
Canal 4: 2.5 Gbps	20 Km	14,708474	-13,291526	1,00E-40	32,464624	0,0531299
	40 Km	15,351273	-12,648727	1,00E-40	36,082687	0,0629583
	60 Km	15,837789	-12,162211	1,00E-40	36,361484	0,0602165
Canal 10: 40 Gbps	20 Km	7,508458	-20,491542	1,00E-40	37,044626	0,000159993
	40 Km	7,298787	-20,701213	1,00E-40	29,909846	0,000400178
	60 Km	7,851887	-20,148113	1,00E-40	23,346357	0,000527218

Las Figuras 3.18, 3.16 y 3.17 ofrecen una visión detallada del desempeño de la red en términos de BER, Factor Q y potencia de recepción. Es importante señalar que el incremento notable en la potencia de recepción en 3.17 conforme se extiende la longitud del segmento de alimentación podría atribuirse a una posible amplificación adicional generada por la configuración del amplificador.

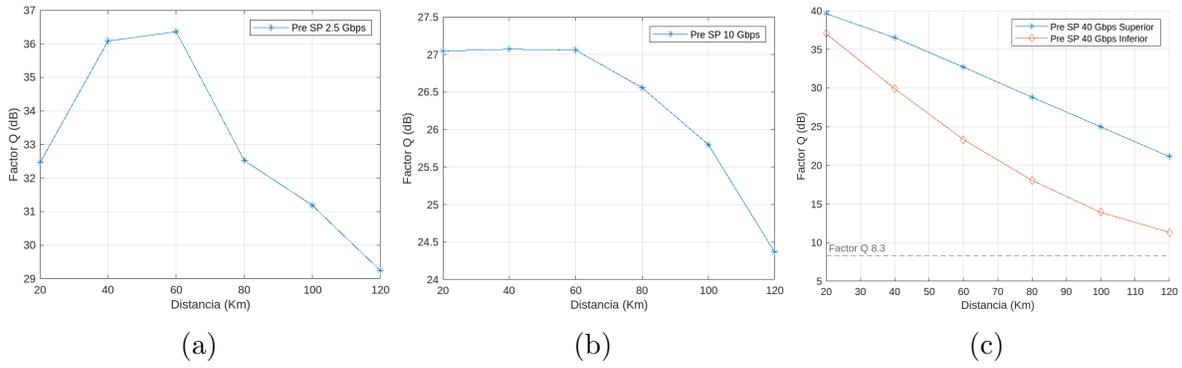


Figura 3.16: Factor Q vs longitud del segmento de alimentación en un rango de 20 a 120 km para los canales de recepción de (a) 2.5 Gbps (b) 10 Gbps y (c) 40 Gbps.

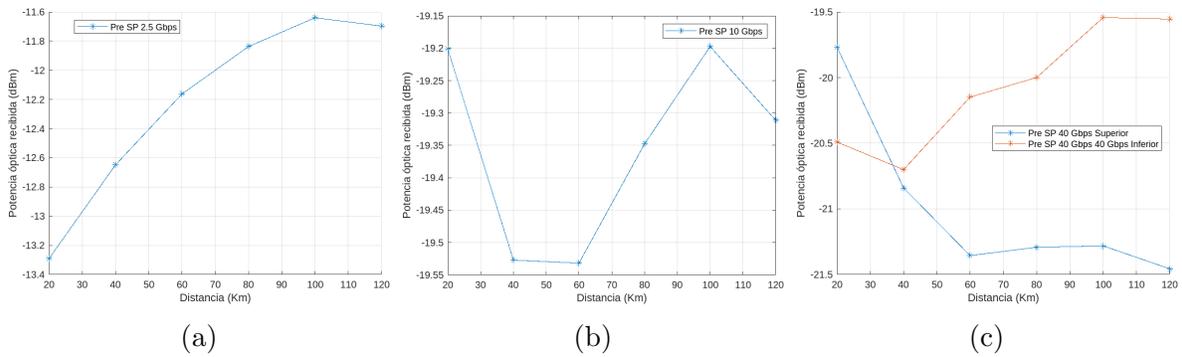
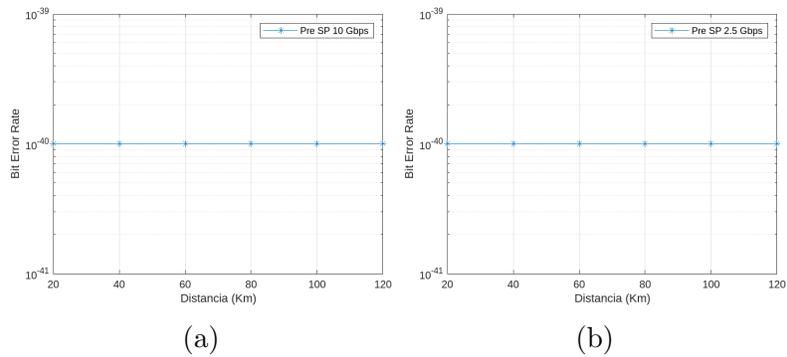


Figura 3.17: Potencia de recepción vs longitud del segmento de alimentación en un rango de 20 a 120 km para los canales de recepción de (a) 2.5 Gbps (b) 10 Gbps y (c) 40 Gbps.



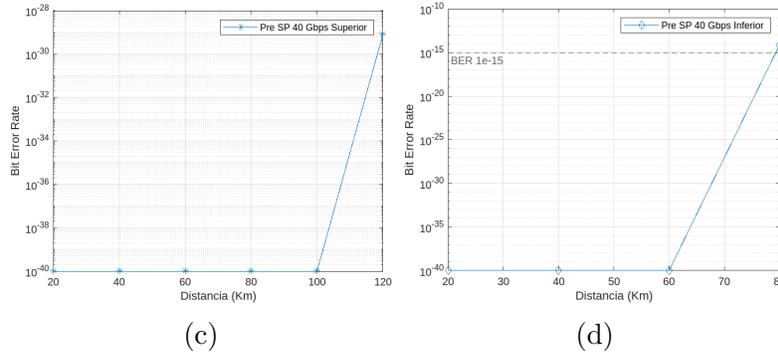


Figura 3.18: Tasa de Error de Bit (BER) vs longitud del segmento de alimentación en un rango de 20 a 120 km para los canales de recepción (a) CH 1: 40 Gbps (b) CH 2: 10 Gbps (c) CH 4: 2.5 Gbps y (d) rango de 20 a 80 km para el canal CH 10: 40 Gbps.

3.1.4. Caso 4: Amplificador Raman-EDFA en Serie modo Booster

En este caso, se exploraron 336 combinaciones posibles de amplificadores Raman-EDFA en la disposición Serie en modo Booster. Sin embargo, únicamente 39 de estas combinaciones cumplieron con los requisitos de OPM que se detallan en la Tabla 3.1. También se consideraron los valores de OSNR y Jitter. La mejor configuración para la red propuesta se describe a continuación:

Tabla 3.11: Configuración del amplificador Raman-EDFA en Serie en modo Booster.

	Amp. EDFA	Amp. Raman
Longitud de onda de bombeo	1480 nm	1440 nm
Longitud de tramo de fibra	13 m	13 km
Potencia de bombeo	200 mW	200 mW

El OPM implica la medición y análisis de los factores que impactan la calidad de la señal óptica. Esto implica la verificación del nivel de potencia óptica y la relación señal-ruido óptica (OSNR) en cada canal MLR-DWDM para la supervisión de la capa de transporte. Además, se evalúan aspectos como el factor Q, las variaciones estadísticas del diagrama del ojo, como la apertura, y las distorsiones resultantes de la dispersión o efectos no lineales. También se lleva a cabo la supervisión del rendimiento del protocolo a través de la Tasa de Error de Bits (BER).

En la Tabla 3.12, se presentan los datos correspondientes a los parámetros OPM de la red amplificada, permitiendo comparar con la información obtenida de la red no amplificada. Se destaca el notable desempeño de la red amplificada en todos los canales, superando los valores de la potencia en recepción en el canal 1 por 13.199 dB, en el canal 2 por 12.373 dB, en el canal 4 por 12.067 dB y en el canal 10 por 10.939 dB

con respecto a la red no amplificada. No obstante, se observan ciertas anomalías en los espectros ópticos y en el diagrama de ojos de los canales MLR-DWDM bajo análisis.

Tabla 3.12: Parámetros OPM de la red MLR-DWDM implementando el amplificador Raman-EDFA en modo Booster disposición en Serie.

Característica	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)
CH 1: NRZ-OOK 40 Gbps	5,034813	-22,965187	1,00E-40	27,862943	1,0609 e-03
CH 2: RZ-OOK 10 Gbps	6,656942	-21,343058	1,00E-40	25,15776	1,48371e-03
CH 4: RZ-DPSK 2.5 Gbps	14,224396	-13,775604	1,69E-19	19,157714	7,88046e-02
CH 10: NRZ-OOK 40 Gbps	5,750394	-22,249606	1,00E-40	25,32558	1,06985e-03

La Figura 3.19b muestra que el espectro óptico se ve influenciado por la presencia de un proceso de dispersión analítica no lineal conocido como Dispersión Raman Estimulada (SRS). Este fenómeno no lineal de orden superior genera ganancias o pérdidas de potencia de señal en los canales de longitud de onda, dando lugar a diafonía entre los canales. Las fluctuaciones en la potencia están directamente relacionadas con la intensidad de la señal óptica.

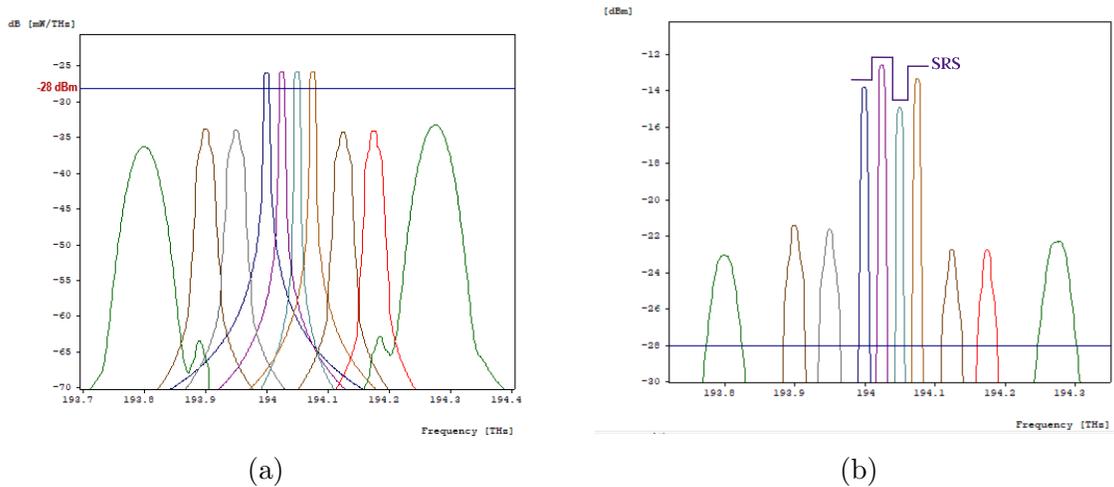


Figura 3.19: Espectro óptico de los 10 canales de recepción dispuesto en la red MLR-DWDM (a) no amplificada y (b) amplificada.

Los diagramas de ojo, representados en la Figura 3.20, revelan la presencia de no linealidades en el canal, manifestadas como asimetrías en el patrón de ojo. Estas asimetrías se atribuyen a los efectos no lineales SPM y XPM, que surgen de variaciones

dependientes de la intensidad en el índice de refracción de una fibra de sílice. Este fenómeno se denomina efecto Kerr.

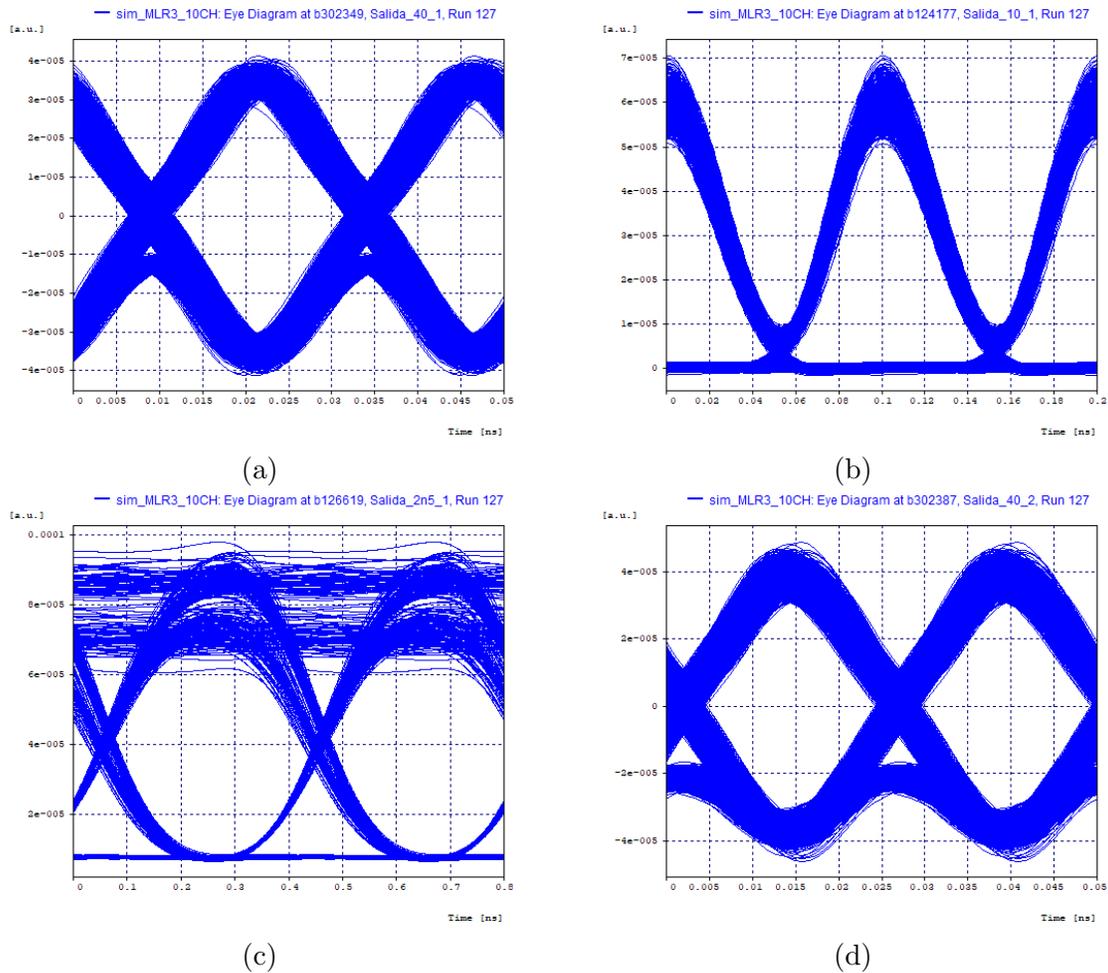


Figura 3.20: Diagramas de ojo para la red MLR-DWDM implementando el amplificador Serie en modo Booster (a) CH1: 40 Gbps (b) CH2: 10 Gbps (c) CH4: 2.5 Gbps (d) CH10: 40 Gbps.

El efecto no lineal XPM ocurre cuando hay fluctuaciones de intensidad de otros canales presentes en un sistema DWDM. Si dos pulsos con estas fluctuaciones se superponen, se introduce distorsión entre ellos, como se aprecia en el patrón de ojo 3.20c. Por otro lado, el SPM ocurre cuando el índice de refracción de la fibra tiene una componente dependiente de la intensidad. Este índice de refracción no lineal induce un desplazamiento de fase que es proporcional a la intensidad del pulso. Como resultado, las diferentes partes del pulso sufren diferentes desplazamientos de fase lo que provoca que el pulso adquiera un cierto chirp, que a su vez, modifica los efectos de la dispersión sobre el pulso.

El efecto SPM está presente en todos los diagramas de ojo 3.20. Tanto el SPM como

el XPM afectan únicamente la fase de las señales, lo que provoca chirridos en los pulsos digitales. Esto puede empeorar el ensanchamiento del pulso debido a la dispersión, particularmente en sistemas de frecuencia muy alta.

Para analizar el desempeño de la red que incorpora el Amplificador Óptico Híbrido Raman-EDFA en Serie en modo Booster, se han seguido las recomendadas ITU-T [16, 17, 26]. Estas recomendaciones establecen que la distancia máxima sin amplificación debe ser de 20 km, y al implementar amplificación óptica se puede extender hasta 60 km. Estas distancias se han determinado considerando incrementos de 20 km en cada tramo de la Red de Distribución Óptica (ODN).

En la Tabla 3.13 se muestran los resultados obtenidos en cada variación de distancia en la red. Se observa que la red amplificada no alcanza el requerimiento mínimo de potencia en recepción en ningún canal cuando la distancia es de 60 km, a pesar de que otros parámetros de monitoreo OPM son aceptables. Esto indica la necesidad de mejorar las configuraciones del Amplificador Óptico Híbrido para lograr mayores distancias.

Tabla 3.13: Parámetros OPM en los rangos de distancias de 20 - 60 km.

	Distancia	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)
Canal 1: 40 Gbps	20 Km	5,034813	-22,965187	1,00E-40	27,862943	0,0010609
	40 Km	1,164843	-26,835157	1,45E-39	22,381942	0,00150603
	60 Km	-2,561915	-30,561915	8,03E-26	20,586549	0,00162183
Canal 2: 10 Gbps	20 Km	6,656942	-21,343058	1,00E-40	25,15776	0,00148371
	40 Km	3,109592	-24,890408	1,37E-30	21,429073	0,00239116
	60 Km	-0,471284	-28,471284	4,06E-18	18,863611	0,00289048
Canal 4: 2.5 Gbps	20 Km	14,224396	-13,775604	1,69E-19	19,157714	0,0788046
	40 Km	10,231343	-17,768657	1,68E-17	18,604894	0,102435
	60 Km	6,902393	-21,097607	3,27E-24	20,14257	0,0722964
Canal 10: 40 Gbps	20 Km	5,750394	-22,249606	1,00E-40	25,32558	0,00106985
	40 Km	1,948774	-26,051226	3,73E-18	18,751005	0,00161829
	60 Km	-1,857645	-29,857645	4,63E-09	15,422666	0,00186208

En las Figuras 3.21, 3.22 y 3.23 se muestran los resultados obtenidos para la potencia, el factor Q y la BER en función de la distancia. Estos parámetros permiten evaluar el desempeño de la red y la calidad de la señal transmitida. Se observa que la potencia disminuye a medida que aumenta la distancia, debido a las pérdidas por atenuación y dispersión.

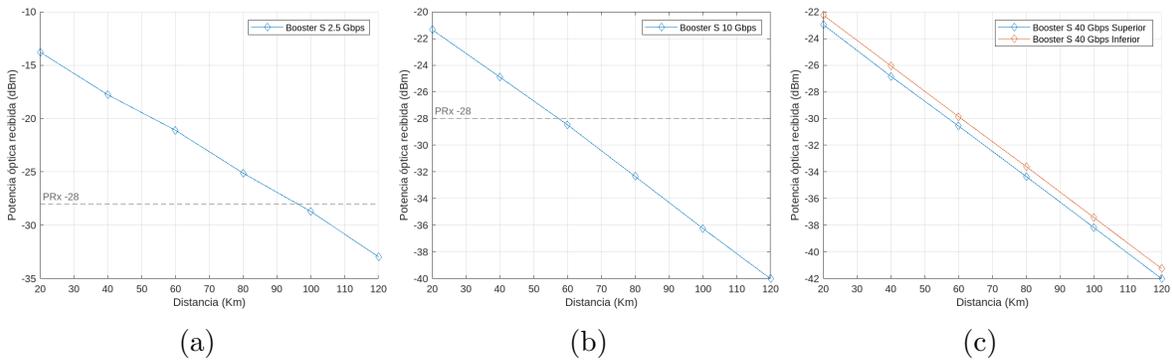


Figura 3.21: Potencia de recepción vs longitud del segmento de alimentación en un rango de 20 a 120 km para los canales de recepción de (a) 2.5 Gbps (b) 10 Gbps y (c) 40 Gbps.

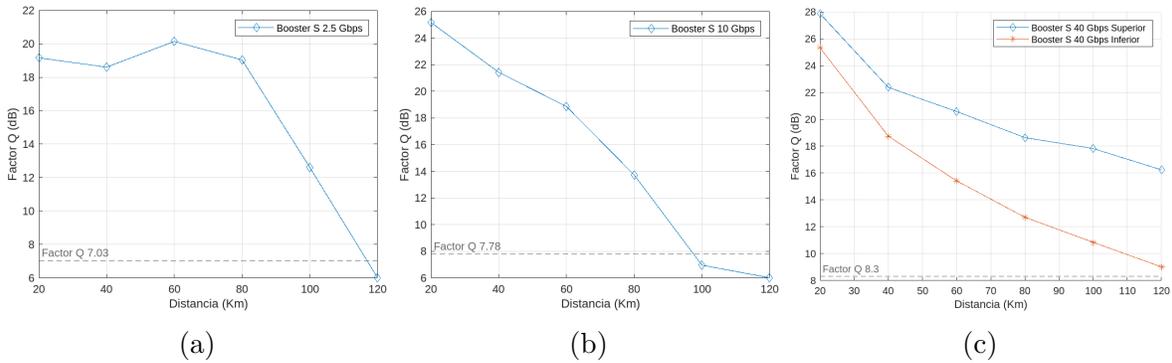
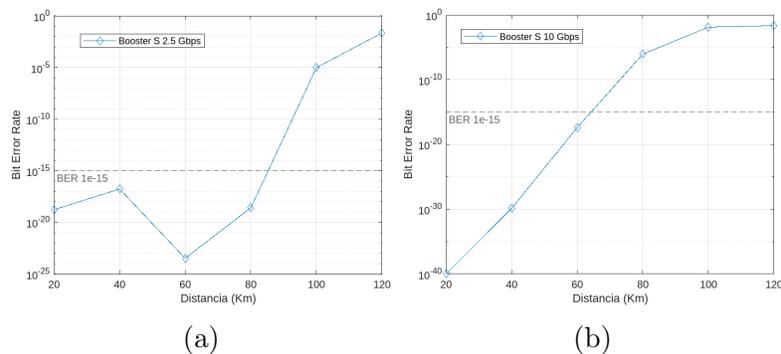


Figura 3.22: Factor Q vs longitud del segmento de alimentación en un rango de 20 a 120 km para los canales de recepción de (a) 2.5 Gbps (b) 10 Gbps y (c) 40 Gbps.



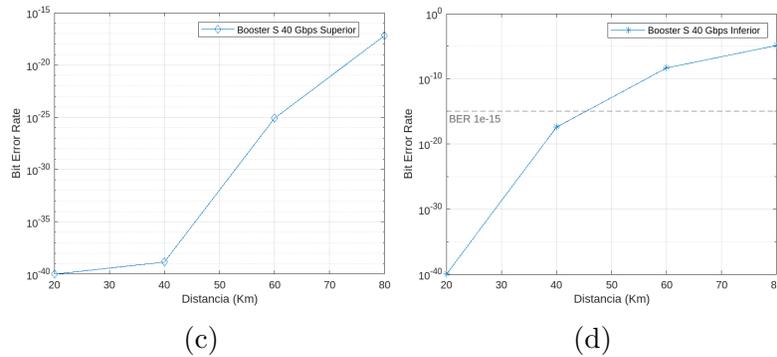


Figura 3.23: Tasa de Error de Bit (BER) vs longitud del segmento de alimentación en un rango de 20 a 120 km para los canales de recepción (a) CH 1: 40 Gbps (b) CH 2: 10 Gbps (c) CH 4: 2.5 Gbps y (d) rango de 20 a 80 km para el canal CH 10: 40 Gbps.

3.1.5. Caso 5: Amplificador Raman-EDFA en Paralelo modo Booster

En este caso de estudio, se exploraron 336 configuraciones posibles para el amplificador EDFA-Raman Paralelo en modo Booster, considerando los parámetros de OPM presentados en la Tabla 2.5, así como los rangos de OSNR y Jitter. Entre todas las opciones evaluadas, únicamente cuatro cumplen con las especificaciones requeridas. La mejor configuración, de acuerdo con los criterios de evaluación, se detalla a continuación:

Tabla 3.14: Configuración del amplificador Raman-EDFA en Paralelo modo Booster.

	Amp. EDFA	Amp. Raman
Longitud de onda de bombeo	980 nm	1440 nm
Longitud de tramo de fibra	10 m	13 km
Potencia de bombeo	200 mW	200 mW

La Tabla 3.15 presenta los valores de los parámetros OPM. Los resultados indican que la implementación del amplificador mejora el desempeño de la red en términos de BER, factor Q y jitter, en comparación con la red no amplificada. Con respecto a la potencia óptica en R_x se aumento 12.696 dB en el canal 1, 11.947 dB en el canal 2, 8.237 dB en el canal 4 y 10.577 dB en el canal 10, respecto a la red no amplificada.

En la Figura 3.24b, se aprecia la presencia de varios fenómenos no lineales que están deformando el espectro óptico resultante. Uno de ellos es el SRS, que ocurre cuando la energía de la señal óptica se transfiere a los modos inelásticos (Raman) del medio de transmisión, lo que puede provocar un cambio en la longitud de onda de la señal y causar un efecto visual de escalonado.

Tabla 3.15: Parámetros OPM de la red MLR-DWDM implementando el amplificador Raman-EDFA en modo Booster configurado en Paralelo.

Característica	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)
Canal 1: NRZ-OOK 40 Gbps	4,531121	-23,468879	1,00E-40	23,679939	1,39449e-03
Canal 2: RZ-OOK 10 Gbps	6,230165	-21,769835	1,00E-40	25,038678	1,58327e-03
Canal 4: RZ-DPSK 2.5 Gbps	10,394481	-17,605519	1,86E-20	19,421602	6,70477e-02
Canal 10: NRZ-OOK 40 Gbps	5,388168	-22,611832	5,91E-16	18,087093	1,76862e-03

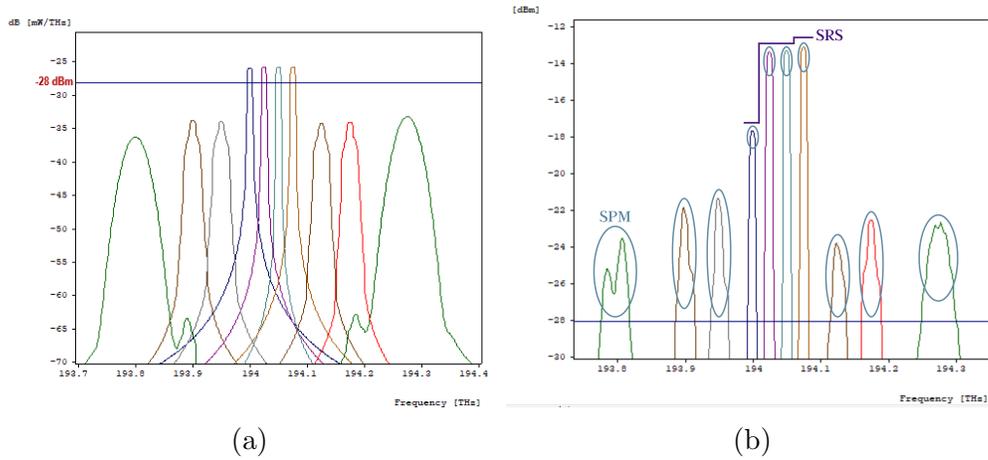


Figura 3.24: Espectro óptico de los 10 canales en recepción de la red MLR-DWDM (a) no amplificada y (b) amplificada con un Raman-EDFA Paralelo en modo Booster.

Además del SRS, se observan otros efectos no lineales, la Dispersión por Modulación de Auto-Fase (SPM) y la Dispersión por Modulación de Fase Cruzada (XPM). Estos fenómenos generan componentes espectrales adicionales alrededor de los canales originales. El SPM provoca una ampliación del ancho espectral de la señal. Conforme la señal se modula de manera no lineal, se generan componentes espectrales adicionales en los lados de la portadora original, lo que resulta en un espectro más ancho en comparación con una señal puramente lineal.

Además de ensanchar el espectro, el SPM puede generar nuevas componentes espectrales a frecuencias diferentes, conocido como generación de nuevos tonos o supresión de tonos, lo que puede afectar la calidad de la señal. Por otro lado, el XPM también puede influir en el espectro óptico. Cuando dos señales ópticas interactúan a través del XPM, la energía de una señal puede transferirse a la otra. Esto puede resultar en una redistribución de la potencia espectral entre las dos señales, lo que afecta sus perfiles

espectrales y puede generar componentes espectrales adicionales a frecuencias distintas.

Los efectos no lineales XPM y SPM también se manifiestan en los diagramas de ojo 3.25. El SPM ocurre cuando la fase de la señal óptica se modula debido a la no linealidad del índice de refracción del medio de transmisión, lo que provoca cambios en la forma del diagrama de ojo, ensanchando el diagrama y distorsionando los niveles de señal. El XPM ocurre cuando dos o más señales ópticas viajan juntas y la intensidad de una afecta la fase de la otra, lo que puede causar cambios en la fase de la señal y afectar la forma del diagrama de ojo al desplazar o distorsionar los niveles de señal.

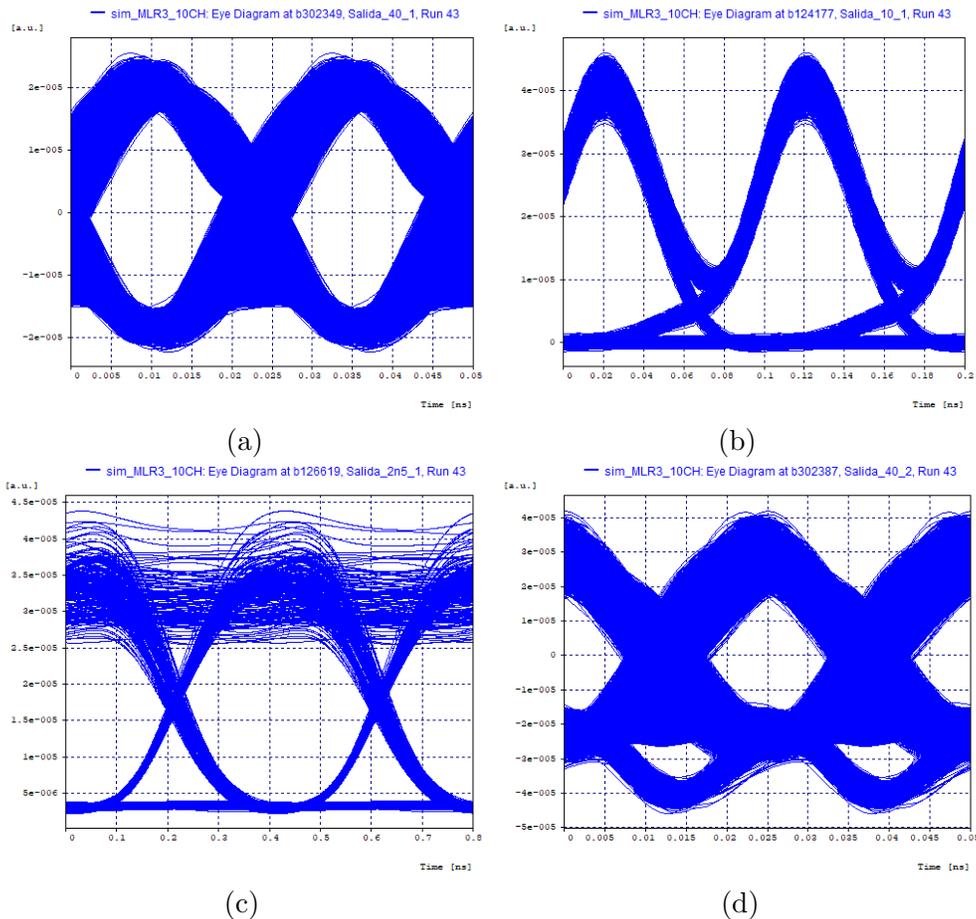


Figura 3.25: Diagramas de ojo para la red MLR-DWDM implementando el amplificador Paralelo en modo Booster (a) CH1:40 Gbps (b) CH2: 10 Gbps (c) CH4: 2.5 Gbps (d) CH10: 40 Gbps.

La Tabla 3.16 detalla los resultados de los parámetros OPM en un intervalo de distancia de 20 a 60 km, con el propósito de evaluar el rendimiento del amplificador implementado en relación con la distancia máxima recomendada. Este análisis sigue las directrices establecidas por ITU-T NG-PON [16, 17, 26] para redes con amplificadores ópticos.

Se logró alcanzar una distancia de 40 km con valores de parámetros OPM dentro de los límites mínimos aceptables, a excepción del índice de error de bit (BER) en el canal inferior de 40 Gbps. Este último no alcanzó el valor deseado, aunque permanece dentro del rango tolerable para un sistema de transmisión.

Tabla 3.16: Parámetros OPM en los rangos de distancias de 20 - 60 km.

	Distancia	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)
Canal 1: 40 Gbps	20 Km	4,531121	-23,468879	1,00E-40	23,679939	0,00139449
	40 Km	0,823992	-27,176008	1,25E-21	19,786433	0,00171134
	60 Km	-3,005784	-31,005784	3,61E-13	17,174559	0,00207732
Canal 2: 10 Gbps	20 Km	6,230165	-21,769835	1,00E-40	25,038678	0,00158327
	40 Km	2,665415	-25,334585	1,00E-40	22,652612	0,0024709
	60 Km	-1,222123	-29,222123	1,84E-15	17,948096	0,00308502
Canal 4: 2.5 Gbps	20 Km	10,394481	-17,605519	1,86E-20	19,421602	0,0670477
	40 Km	7,080847	-20,919153	3,46E-22	19,886383	0,101484
	60 Km	3,558285	-24,441715	1,69E-08	14,919804	0,0768307
Canal 10: 40 Gbps	20 Km	5,388168	-22,611832	5,91E-16	18,087093	0,00176862
	40 Km	1,465892	-26,534108	4,28E-07	14,105522	0,0025326
	60 Km	-2,279417	-30,279417	0,000342788	11,021977	0,00280381

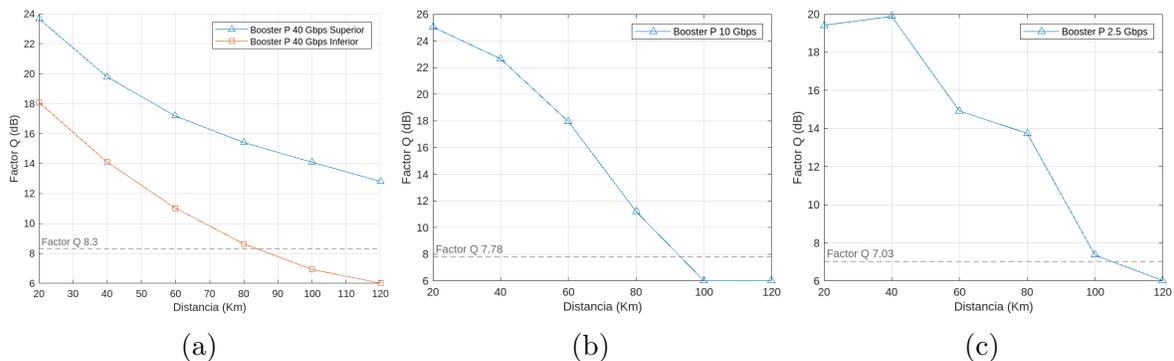


Figura 3.26: Factor Q vs longitud del tramo de la fibra para la Configuración Óptima del amplificador en modo Booster Paralelo (a) 40 Gbps (b) 10 Gbps y (c) 2.5 Gbps.

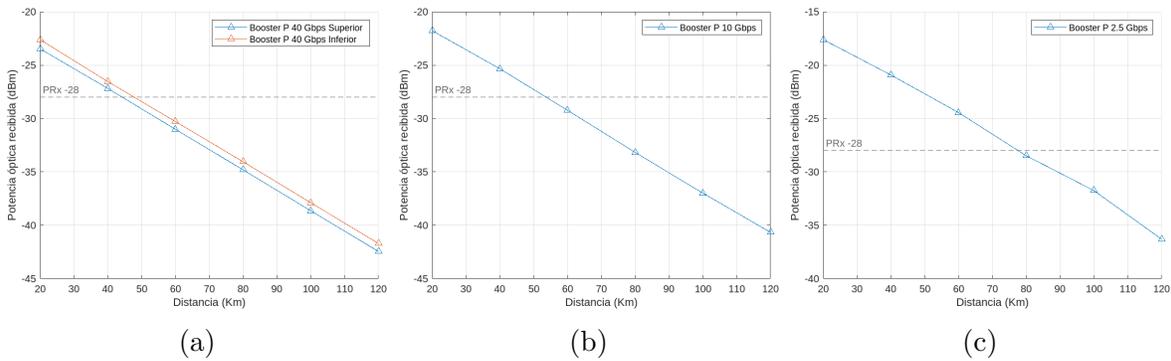


Figura 3.27: Potencia en recepción vs distancia de para la Configuración Óptima del amplificador en modo Booster Paralelo (a) 40 Gbps (b) 10 Gbps y (c) 2.5 Gbps.

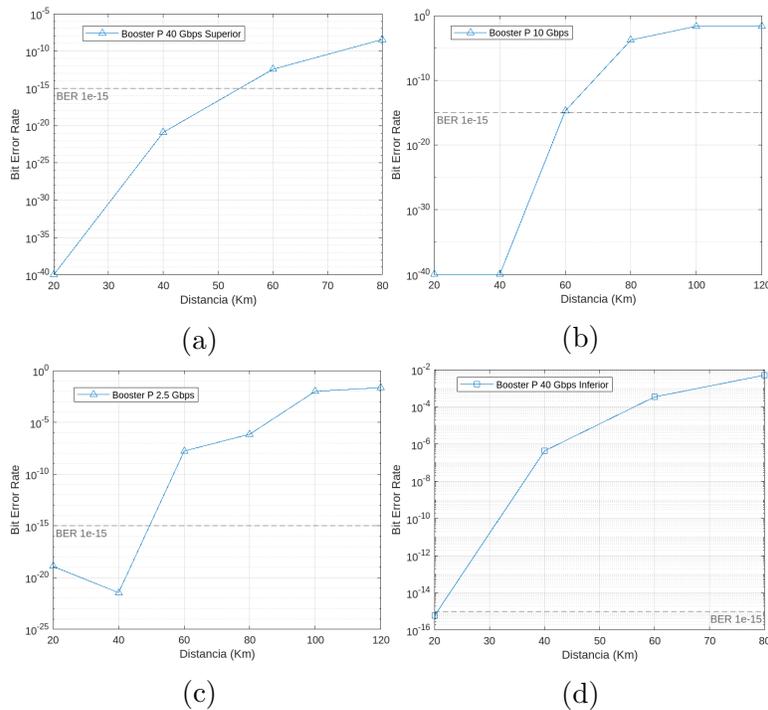


Figura 3.28: BER vs longitud del tramo de fibra de la red de alimentación para la Configuración Óptima del amplificador en modo Booster Serie-Paralelo (a)CH1:40 Gbps (b) CH2: 10 Gbps (c) CH4: 2.5 Gbps (d) CH10: 40 Gbps.

3.1.6. Caso 6: Amplificador Raman-EDFA en Serie-Paralelo modo Booster

Se evaluaron un total de 336 combinaciones posibles del amplificador Raman-EDFA en Serie-Paralelo en modo Booster. Sin embargo, ninguna de ellas logró alcanzar el nivel requerido de OSNR, aunque sí cumplieron con los requisitos de la Tabla 2.5. En las redes DWDM multispan amplificadas, el desempeño del sistema está limitado por el

OSNR en lugar de la potencia de la señal óptica recibida. No obstante, se examinó en detalle la mejor configuración respecto a los demás parámetros de OPM, que consiste en la siguiente:

Tabla 3.17: Configuración del amplificador Raman-EDFA en Serie-Paralelo en modo Booster.

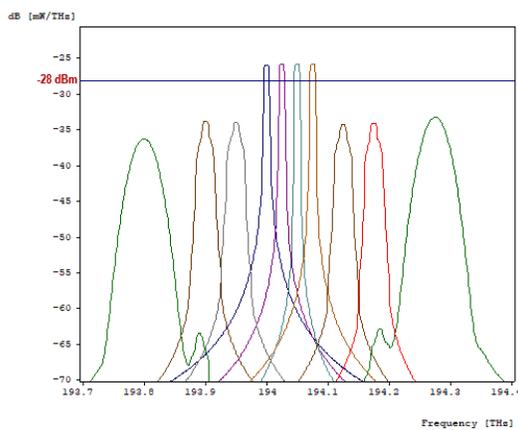
	Amp. EDFA	Amp. Raman
Longitud de onda de bombeo	1480 nm	1450 nm
Longitud de tramo de fibra	13 m	7 km
Potencia de bombeo	200 mW	600 mW

En la Tabla 3.18 se presentan los datos de OPM obtenidos mediante la implementación de este amplificador. Se puede apreciar un incremento en la potencia de recepción en comparación con la red no amplificada, siendo de 11.48 dB en el canal 1, 10.523 dB en el canal 2, 9.903 dB en el canal 4 y 8.567 dB en el canal 10.

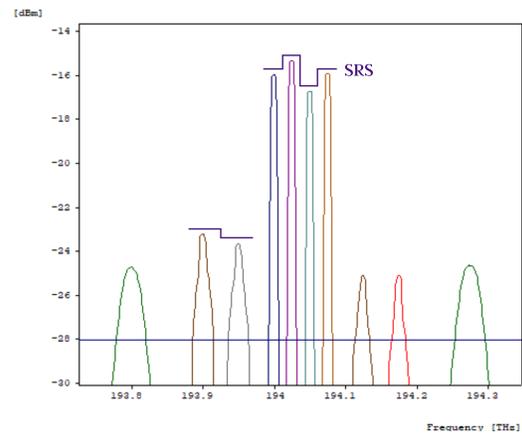
Tabla 3.18: Parámetros OPM de la red implementando amplificador Raman-EDFA en modo Booster configurado en Serie-Paralelo.

Característica	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)
Canal 1: NRZ-OOK 40 Gbps	3,315452	-24,684548	1,00E-40	31,83994	6,48682 e-04
Canal 2: RZ-OOK 10 Gbps	4,806527	-23,193473	1,00E-40	24,865039	9,73451e-04
Canal 4: RZ-DPSK 2.5 Gbps	12,060053	-15,939947	4,92E-40	22,517882	7,32637e-02
Canal 10: NRZ-OOK 40 Gbps	3,378165	-24,621835	1,00E-40	29,056284	6,28495e-04

Como se puede apreciar en la Figura 3.29b, el espectro óptico en los 10 canales en recepción presenta una forma irregular debido a la influencia de efectos no lineales. Entre ellos, el más notable es la SRS, que consiste en la transferencia de energía entre los canales adyacentes, provocando un aumento de la potencia en unos y una disminución en otros. Este efecto se manifiesta como una especie de escalones en el espectro.



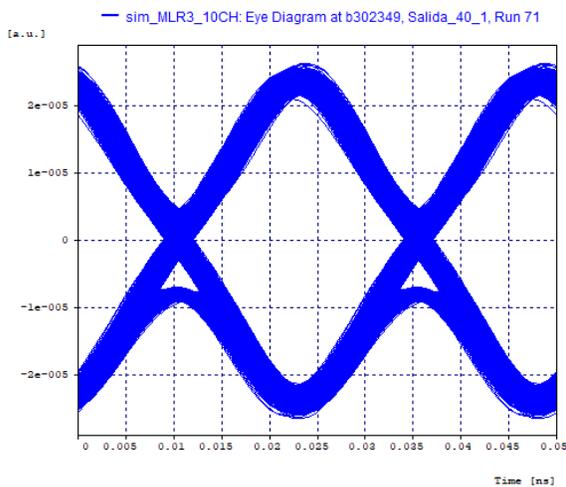
(a)



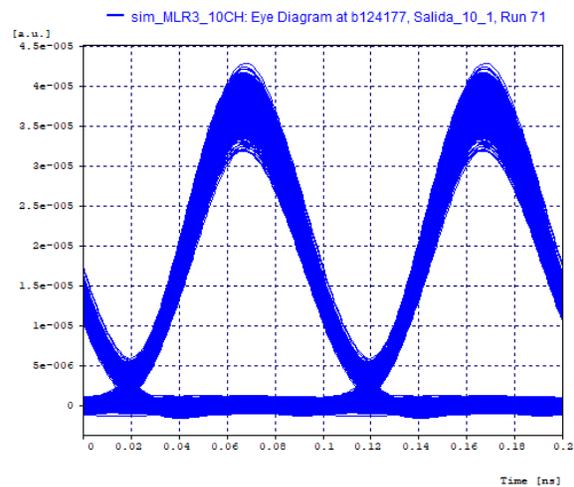
(b)

Figura 3.29: Espectro óptico de los 10 canales dispuesto en (a) la red no amplificada (b) la red amplificada.

En la Figura 3.30, se muestran los diagramas de ojos de las señales ópticas afectadas por SPM y XPM. El SPM puede causar un ensanchamiento del diagrama de ojo y, en algunos casos, un desplazamiento de la posición de los niveles de señal en el diagrama de ojo. El XPM puede causar distorsiones en la forma del ojo, reduciendo la apertura del mismo y afectando la separación entre los niveles de señal. Estas distorsiones pueden generar errores en la detección de los bits y, por consiguiente, afectar la calidad de la señal. Estos efectos no lineales son más relevantes en sistemas de alta velocidad y alta densidad de datos, donde la calidad de la señal es crítica.



(a)



(b)

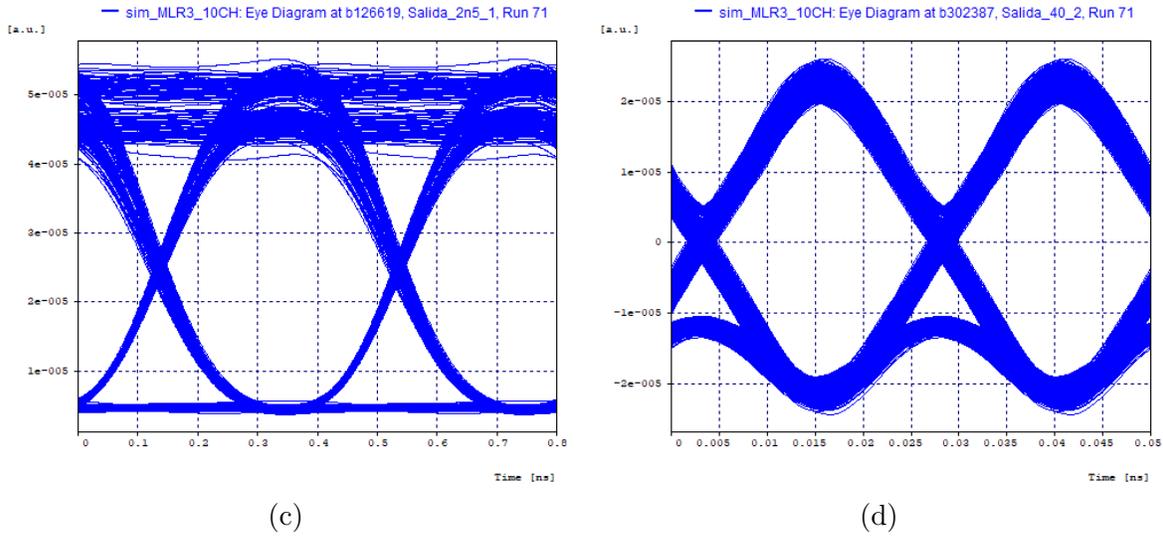


Figura 3.30: Diagramas de ojo para la red MLR-DWDM implementando el amplificador Serie-Paralelo modo Booster (a) CH1:40 Gbps (b) CH2: 10 Gbps (c) CH4: 2.5 Gbps (d) CH10: 40 Gbps.

En el rango de distancias de 20 a 60 km, se presentan los resultados de los parámetros OPM en la Tabla 3.19. Se implementó el amplificador Raman-EDFA Serie-Paralelo en modo Booster con el objetivo de determinar su capacidad para alcanzar la distancia máxima de 60 km recomendada para redes con amplificadores ópticos, según las directrices de la ITU-T NG-PON [16, 17, 26].

No se logró alcanzar la distancia de 60 km pero si a los 40 km, excepto en los canales de 40 Gbps, donde la potencia de recepción resultó ser inferior al umbral establecido. No obstante, los resultados fueron satisfactorios en términos de BER, Factor Q y Jitter.

Tabla 3.19: Parámetros OPM en los rangos de distancias de 20 - 60 km.

	Distancia	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)
Canal 1: 40 Gbps	20 Km	3,315452	-24,684548	1,00E-40	31,83994	0,000648682
	40 Km	-0,874167	-28,874167	1,00E-40	27,332977	0,000883753
	60 Km	-4,670749	-32,670749	1,00E-40	24,966888	0,000979285
Canal 2: 10 Gbps	20 Km	4,806527	-23,193473	1,00E-40	24,865039	0,000973451
	40 Km	0,955718	-27,044282	1,72E-39	22,588018	0,00152815
	60 Km	-2,633253	-30,633253	1,45E-13	17,264941	0,0020872
Canal 4: 2.5 Gbps	20 Km	12,060053	-15,939947	4,92E-40	22,517882	0,0732637
	40 Km	8,472016	-19,527984	2,47E-34	21,804665	0,0856208
	60 Km	4,434879	-23,565121	1,28E-35	21,926191	0,0815039
Canal 10: 40 Gbps	20 Km	3,378165	-24,621835	1,00E-40	29,056284	0,000628495
	40 Km	-0,659108	-28,659108	1,56E-35	22,10962	0,000982349
	60 Km	-4,485425	-32,485425	1,73E-15	17,997005	0,00118031

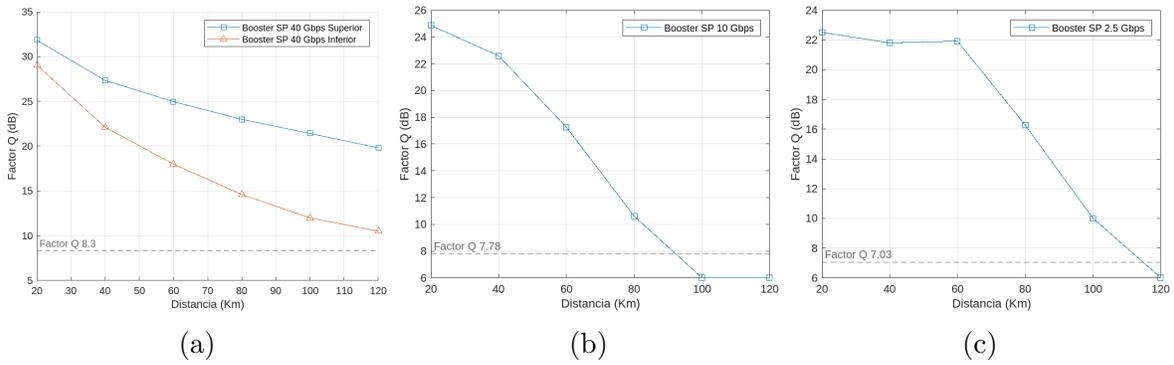


Figura 3.31: Factor Q vs longitud del tramo de la fibra para la Configuración Óptima del amplificador en modo Booster Paralelo (a) 40 Gbps (b) 10 Gbps y (c) 2.5 Gbps.

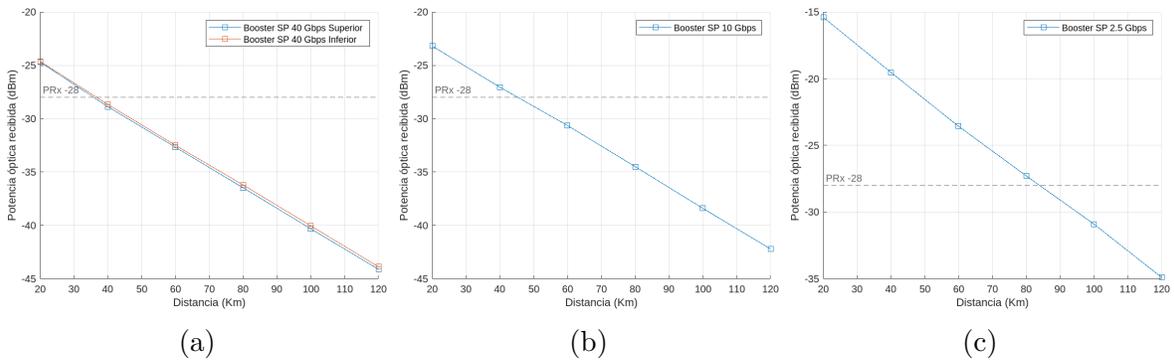
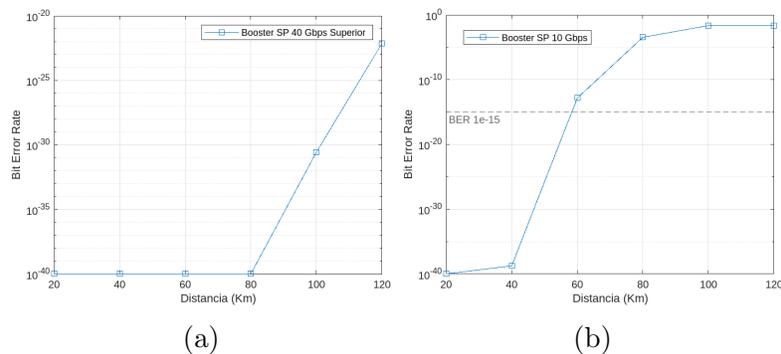


Figura 3.32: Potencia de recepción vs distancia de para la Configuración Óptima del amplificador en modo Booster Paralelo (a) 40 Gbps (b) 10 Gbps y (c) 2.5 Gbps.



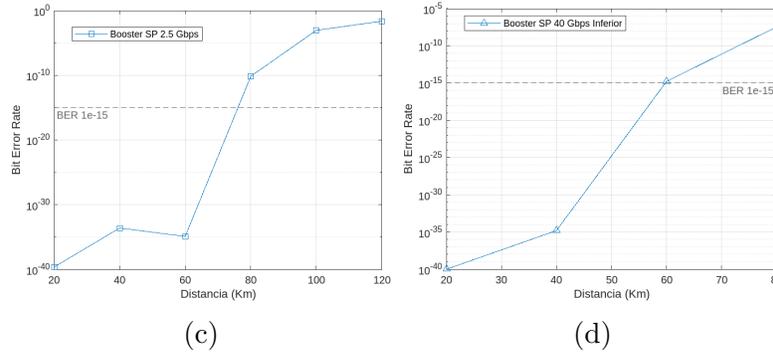


Figura 3.33: BER vs longitud del tramo de fibra de la red de alimentación para la Configuración Óptima del amplificador en modo Booster Serie-Paralelo (a) CH1:40 Gbps (b) CH2: 10 Gbps (c) CH4: 2.5 Gbps (d) CH10: 40 Gbps.

Análisis comparativo

La tabla 3.20 proporciona una visión integral de diferentes aspectos de los amplificadores híbridos Raman-EDFA estudiados, como el rendimiento del sistema, las degradaciones ópticas, las distancias de transmisión, la complejidad de configuración y la robustez. Esta información facilita la comparación y la toma de decisiones, permitiendo abordar las necesidades y prioridades específicas en el diseño de la red óptica.

Tabla 3.20: Análisis comparativo de los casos de estudio.

		PS	PP	PSP	BS	BP	BSP
Desempeño del sistema		Muy alto	Alto	Muy alto	Medio-Alto	Medio-Alto	Medio
Ganancia de amplificación respecto a la sensibilidad en recepción (OSNR real)	CH 1	8.23 dB	8.699 dB	8.23 dB	5.034 dB	4.531 dB	3.315 dB
	CH 2	8.799 dB	10.085 dB	8.798 dB	6.656 dB	6.23 dB	4.806 dB
	CH 4	14.708 dB	14.657 dB	14.708 dB	14.224 dB	10.394 dB	12.06 dB
	CH 10	7.508 dB	9.046 dB	7.508 dB	5.75 dB	5.388 dB	3.378 dB
Degradaciones ópticas		No visibles	SRS SPM	SRS	SRS SPM XPM	SRS SPM XPM	SRS SPM XPM
Distancia de transmisión garantizada		60 km	40 km	60 km	40 km	20 km	20 km
Máxima distancia alcanzada		80 km	40 km	80 km	40 km	20 km	20 km
Complejidad de configuración		Medio-Bajo	Alto	Muy alta	Alta	Alta	Muy alta
Robustez		Muy robusto	Robusto	Muy robusto	Poco robusto	Poco robusto	Poco robusto

Desde un enfoque teórico, el amplificador Raman-EDFA Serie-Paralelo en modo Preamplificado se destaca como la opción superior en términos de OPM obtenidos. No obstante, en un entorno práctico, se considera más efectivo utilizar el amplificador Raman-EDFA Serie Preamplificado.

En ninguno de los casos de estudio se detectó la presencia de FWM, debido a la configuración principal del sistema al implementar un espaciamiento entre canales

dinámicos. Esta estrategia ha demostrado ser efectiva en varios estudios, ya que previene que los productos de FWM interfieran con cualquier canal existente.

Nota de autor:

En este capítulo, se presentaron los resultados obtenidos al aplicar los modelos de Amplificadores Ópticos Híbridos Raman-EDFA propuestos en el capítulo 2 como los seis casos de estudio, los cuales se basan en el ajuste de parámetros como la potencia y la longitud de onda de bombeo, así como la longitud de la fibra óptica para los amplificadores EDFA y Raman individuales. Se consideraron tres configuraciones diferentes para los HOA: Serie, Paralelo y Serie-Paralelo, y se evaluó su desempeño en una red MLR-DWDM de tipo NG-PON con velocidades de transmisión de 2.5, 10 y 40 Gbps, empleando distintos formatos de modulación para cada una de ellas. De esta manera, se dio respuesta al primer objetivo específico planteado para el presente trabajo de grado. A continuación, se caracterizaron los requisitos necesarios para implementar de forma adecuada estos amplificadores en el modelo de red MLR-DWDM de tipo NG-PON, lo que permitió analizar el desempeño de los diferentes Amplificadores Ópticos Híbridos Raman-EDFA en el contexto de la red MLR-DWDM de tipo NG-PON. Con los ajustes apropiados, se lograron obtener HOA Raman-EDFA que operan en la red MLR-DWDM bajo condiciones óptimas y cumplen con los criterios mínimos predefinidos, alcanzando así el segundo y tercer objetivo específico del presente trabajo de grado.

CAPÍTULO 4

Conclusiones, Recomendaciones Y Trabajos Futuros

En el presente trabajo de investigación, se ha analizado la arquitectura de red óptica de siguiente generación MLR bajo el programa de simulación OptSim, implementando Amplificadores Ópticos Híbridos (HOA), utilizando amplificadores convencionales Raman y EDFA, explorando diferentes configuraciones de Amplificadores Ópticos Híbridos, incluyendo híbrido en Serie, híbrido Paralelo y la combinación de Serie-Paralelo, en los modos de amplificación Preamplificado y Booster. Con el objetivo de analizar el desempeño en una arquitectura de red de MLR-DWDM; donde todos los objetivos planteados en la investigación fueron cumplidos satisfactoriamente.

4.1. CONCLUSIONES

El estudio revela que las configuraciones de Amplificadores Ópticos Híbridos Preamplificados arrojaron resultados más favorables en comparación con las configuraciones en modo Booster.

Los amplificadores ópticos híbridos en modo Booster mostraron una notable susceptibilidad a los efectos no lineales: A pesar de mostrar un buen desempeño en términos de los parámetros OPM, se observa una excitación en las penalidades de potencia al analizar los diagramas de ojo y los espectros en recepción.

Los efectos no lineales, SRS, SPM y XPM afectaron significativamente el rendimiento del sistema: Estos efectos causaron ensanchamiento del espectro y distorsión de los diagramas de ojo, lo que afectó la calidad de la señal.

Se destaca la configuración del Preamplificador Serie-Paralelo, como el amplificador con mejor desempeño: Esto se refleja en los parámetros de desempeño OPM (Factor Q, BER, OSNR, potencia total de la señal recibida y Jitter), además de presentar una apertura ocular más amplia y clara.

A 40 Gbps con formato de modulación RZ-DPSK, a pesar de su robustez, se necesitó una compensación del 100 % debido a su mayor susceptibilidad a la dispersión. En canales de 2.5 y 10 Gbps con formatos NRZ-OOK y RZ-OOK, respectivamente, se observa una necesidad de compensación menor, que podría situarse entre el 50 % y el 75 %.

A medida que la distancia de transmisión aumenta, los amplificadores en modo Pre-amplificado, ya sea en configuración Serie o Serie-Paralelo, mantienen un desempeño estable. Contrariamente, el desempeño de otros Amplificadores Ópticos Híbridos decae con el incremento de la distancia, atribuido al aumento continuo de la Emisión Estimulada Amplificada (ASE).

se identificó que el amplificador Booster en configuración Serie-Paralelo muestra el desempeño más bajo, siendo particularmente vulnerable a efectos no lineales: Estos resultados se atribuyen, en parte, a la complejidad asociada con la implementación de este tipo de amplificadores en entornos de redes reales.

Estos hallazgos sugieren que los Amplificadores Ópticos Híbridos, modelables para diferentes sistemas de transmisión, son ideales para futuras investigaciones con diversas combinaciones de amplificadores y parámetros de simulación.

La implementación de distintas configuraciones de Amplificadores Ópticos Híbridos en una red de Velocidad de Línea Mixta impacta significativamente el desempeño de la red, influyendo en parámetros clave como la calidad de la señal. Sin embargo, abordando las limitaciones inherentes de los diferentes amplificadores HOA, se logra optimizar la red y realizar ajustes para minimizar degradaciones ópticas tanto individualmente como por la influencia mutua.

4.2. RECOMENDACIONES

Para llevar a cabo el estudio del rendimiento de los Amplificadores Ópticos Híbridos en una arquitectura de red de línea mixta MLR de tipo NG-PON, es importante considerar una Serie de recomendaciones que faciliten la obtención y análisis de los resultados. A continuación se presentan estas recomendaciones.

- Es fundamental definir las configuraciones de los Amplificadores Ópticos Híbridos que serán analizados, ya que estos amplificadores, al ser una combinación de dos o más amplificadores convencionales, pueden ofrecer una amplia variedad de posibilidades.
- Es importante llevar a cabo una investigación detallada que abarque tanto los aspectos teóricos como prácticos de los sistemas de comunicación ópticos. Esto incluye una comprensión detallada de las características y el funcionamiento del software de simulación utilizado para la implementación de la arquitectura de red. Además, es importante revisar investigaciones previas relacionadas con el tema para contar con una base sólida para iniciar y ejecutar el trabajo de manera efectiva.
- Establecer una metodología que facilite el desarrollo del proyecto. Esto implica la creación de un plan de trabajo detallado que actúe como una guía para todos los

participantes durante todo el proceso. No todas las metodologías son apropiadas para todos los proyectos, por lo tanto, es fundamental buscar una metodología que se adapte a la naturaleza del proyecto y a las necesidades de las personas involucradas. Esta metodología debe ofrecer un conjunto de procedimientos, pasos y enfoques organizados de manera sistemática, lo que contribuirá a la eficiencia y efectividad en la ejecución del proyecto.

- Determinar los elementos a usar en el montaje de la red, con sus respectivos parámetros. Una red puede ser tan compleja como uno decida diseñarla, dependiendo de factores como el entorno, el propósito de uso y los parámetros requeridos. Es esencial considerar estos aspectos antes de proceder con la selección de los elementos necesarios para garantizar un diseño adecuado y funcional.
- Ejecutar una simulación individual para cada canal, cada uno con velocidades distintas, con el propósito de analizar el comportamiento individual de cada uno.
- Considerar que es posible realizar modificaciones en los parámetros de la red con el objetivo de identificar la configuración óptima que garantice un óptimo desempeño.

4.3. TRABAJOS FUTUROS

- Explorar diferentes combinaciones de amplificadores ópticos, longitud de onda de bombeo, potencia de bombeo y longitud de fibra para lograr un mejor rendimiento en términos de calidad de señal y distancia de transmisión.
- Llevar a cabo experimentos en condiciones reales de una Red de Línea Mixta (MLR) de tipo NG-PON implementando Amplificación Óptica Híbrida (HOA) para validar los resultados obtenidos en un entorno de laboratorio.
- Investigar los efectos de la implementación de Amplificadores Ópticos Híbridos Raman-EDFA en contextos más actuales, como redes de mayor velocidad y capacidad.
- Implementar Amplificadores Ópticos Híbridos en redes de Fibra Óptica Inteligentes utilizando la inteligencia artificial.
- Diseñar y evaluar una Configuración de Amplificación Óptica Híbrida (HOA) para Sistemas Súper Densos en una Arquitectura de Red de Línea Mixta (MLR) de tipo NG-PON.
- Analizar el efecto de los amplificadores Raman de banda ancha bombeados por múltiples fuentes de bombeo dentro de una configuración de Amplificadores Ópticos Híbridos EDFA-Raman en una arquitectura de red de línea mixta MLR de tipo NG-PON.

- Realizar un análisis comparativo del desempeño de Amplificadores Ópticos Híbridos EDFA/Raman y SOA/Raman en una Arquitectura de Red de Línea Mixta MLR para NG-PON.

REFERENCIAS

- [1] S. Moreno, D. Torres, and G. P. Leguizamón, “Análisis y comparativo de los amplificadores ópticos soa, edfa y raman,” *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+ D*, vol. 18, no. 2, pp. 22–28, 2018. <https://doi.org/10.19053/1900771X.v18.n2.2018.11874>.
- [2] S. Rajalakshmi and T. Shankar, “Optimization of optical amplifier saturation power in ngpon2 using 2048 way splitter,” *Pakistan Journal of Biotechnology*, vol. 14, pp. 28–32, 2017. ISSN: 18121837.
- [3] D. Malik and A. Wason, “Performance analysis of hybrid optical amplifiers for multichannel wavelength division multiplexed (wdm) optical networks,” *Journal of Optical Communications*, vol. 0, 7 2020. <https://doi.org/10.1515/joc-2020-0053>.
- [4] A. Wason and D. Malik, “Performance investigation of hybrid optical amplifiers for high-speed optical networks,” *Journal of Optics*, vol. 49, pp. 298–304, 9 2020. <https://doi.org/10.1007/s12596-020-00627-1>.
- [5] R. Agarwal and R. Bhatia, “Review of mixed line rate and elastic optical network — iee conference publication — iee explore,” *2019 6th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, pp. 577–580, 3 2019. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8991247>.
- [6] R. Bajpai, S. Iyer, S. P. Singh, and S. Sengar, “Energy-efficient and spectral-efficient mixed line rate optical wdm networks: a comparison,” *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*, vol. 24, p. 339, 2020. <https://doi.org/10.1504/IJCND.2020.107459>.
- [7] S. Bindhaiq, A. S. M. Supa’At, N. Zulkifli, A. B. Mohammad, R. Q. Shaddad, M. A. Elmagzoub, and A. Faisal, “Recent development on time and wavelength-division multiplexed passive optical network (twdm-pon) for next-generation passive optical network stage 2 (ng-pon2),” *Optical Switching and Networking*, vol. 15, pp. 53–66, 9 2015. <https://doi.org/10.1016/J.OSN.2014.06.007>.
- [8] A. Burbano and M. Figueroa, “Análisis de desempeño en un enlace de bajada xgs-pon con amplificación híbrida hoa,” tesis pregrado, Popayán, Cauca, 2021.
- [9] G. Gaby and L. Hernán, “Análisis a nivel de simulación del desempeño en la migración de una red óptica slr-dwdm a una red óptica mlr-dwdm implementando diferentes arquitecturas de red de banda ancha fttx,” tesis pregrado, Popayán, Cauca, 2022.
- [10] “Fsan — full service access network.” <https://www.fsan.org/>.
- [11] “Itu telecommunication standardization sector.” <https://www.itu.int/en/ITU-T/Pages/default.aspx>.

- [12] P. Rigby, “Here be dragons — fibre systems,” 2 2017. <https://www.fibre-systems.com/feature/here-be-dragons>.
- [13] D. Zhang, D. Liu, X. Wu, and D. Nasset, “Progress of itu-t higher speed passive optical network (50g-pon) standardization,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 12, p. D99, 10 2020. <https://doi.org/10.1364/JOCN.391830>.
- [14] “Hoja de ruta de fsan — fsan.” FSAN. <https://www.fsan.org/roadmap/>.
- [15] J. S. Wey, “The outlook for pon standardization: A tutorial,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, pp. 31–42, 1 2020. <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2950889>.
- [16] I.-T. Recommendation, “G.987: Sistema de red óptica pasiva con capacidad de 10 gigabit (xg-pon): Definiciones, abreviaturas y siglas.” G series: Transmission systems and media, digital systems and networks, 6 2012. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987-201206-I/es>.
- [17] I.-T. Recommendation, “G.989: Redes ópticas pasivas con capacidad de 40 gigabits (ng-pon2): Definiciones, abreviaturas y acrónimos.” SERIES G: Optical line systems for local and access networks, 10 2015. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989/es>.
- [18] “Neden fiber optik teknolojiler - fotech.” <https://www.fotech.com.tr/tr/blog/neden-fiber-optik-teknolojiler>.
- [19] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, and G. H. Sasaki, *WDM Network Elements*, pp. 433–468. Elsevier, 3 ed., 1 2010. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374092-2.50015-1>.
- [20] T. Lau, “— de red de distribución óptica odn ¿qué es? ¿cómo funciona?.” *Hone Optical Communications*, 8 2021. <https://www.honecable.com/es/odn-que-es-como-funciona/>.
- [21] L. Peng and P.-H. Ho, “A novel framework of distributed datacenter networks to support intelligent services: Architecture, operation, and solutions,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 77485–77493, 2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2883252>.
- [22] I.-T. Recommendation, “G.9804: Higher speed passive optical networks.” ITU-T SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS, 11 2019.
- [23] “Ieee sa - ieee 802.3av-2009.” IEEE SA. <https://standards.ieee.org/ieee/802.3av/4060/>.
- [24] L. R. R. D. Santos, F. R. Durand, A. Goedel, and T. Abrão, “Auto-tuning pid distributed power control for next-generation passive optical networks,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, p. D110, 10 2018. <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.00D110>.

- [25] F. Effenberger, “Xg-pon1 versus ng-pon2: Which one will win?,” in *2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications*, pp. 1–3, 2012. <https://doi.org/10.1364/ECEOC.2012.Tu.4.B.1>.
- [26] I.-T. Recommendation, “G.9807.1: Redes ópticas pasivas simétricas con capacidad de 10 gigabit (xgs-pon).” Serie G: Sistemas y Medios de Transmisión, Sistemas y Redes Digitales, 2016. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9807.1/es>.
- [27] Calix, “Next-generation pon: Eliminating physical constraints from the access network.” Calix, 2020. <https://telecompetitor.com/clients/calix/2020/whitepaper/gpon/lp/index2.html>.
- [28] J. S. Wey, D. Nasset, M. Valvo, K. Grobe, H. Roberts, Y. Luo, and J. Smith, “Physical layer aspects of ng-pon2 standards—part 1: Optical link design [invited],” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, p. 33, 1 2016. <https://doi.org/10.1364/JOCN.8.000033>.
- [29] “What does ftth and fttx mean, and what is the internet?.” <https://telecom.samm.com/what-does-ftth-fttx-mean-and-what-is-the-internet>.
- [30] J. Lopez, Y. Ye, V. Lopez, F. Jimenez, R. Duque, P. M. Krummrich, F. Musumeci, M. Tornatore, and A. Pattavina, “Traffic and power-aware protection scheme in elastic optical networks,” pp. 1–6, IEEE, 10 2012. <https://doi.org/10.1109/NETWKS.2012.6381659>.
- [31] S. Iyer and S. P. Singh, “Spectral and power efficiency investigation in single- and multi-line-rate optical wavelength division multiplexed (wdm) networks,” *Photonic Network Communications*, vol. 33, pp. 39–51, 2 2017. <https://doi.org/10.1007/s11107-016-0618-3>.
- [32] A. Udalcovs, P. Monti, V. Bobrovs, R. Schatz, L. Wosinska, and G. Ivanovs, “Spectral and energy efficiency considerations in mixed-line rate wdm networks with signal quality guarantee,” pp. 1–7, IEEE, 6 2013. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2013.6602845>.
- [33] P. Chowdhury, M. Tornatore, A. Nag, E. Ip, T. Wang, and B. Mukherjee, “On the design of energy-efficient mixed-line-rate (mlr) optical networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, pp. 130–139, 1 2012. <https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2177441>.
- [34] S. Iyer, “A survey on next-generation mixed line rate (mlr) and energy-driven wavelength-division multiplexed (wdm) optical networks,” *Journal of Optical Communications*, vol. 36, 1 2015. <https://doi.org/10.1515/joc-2014-0061>.
- [35] A. Udalcovs, P. Monti, V. Bobrovs, R. Schatz, and L. Wosinska, “Power efficiency of wdm networks using various modulation formats with spectral efficiency limited by linear crosstalk,” *Optics Communications*, vol. 318, pp. 31–36, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2013.12.033>.

- [36] D. I. Telecomunicación and J. O. González, “Estudio de la inserción de regeneradores 1r en un enlace óptico wdm punto a punto mediante herramientas cad,” *Universidad Politécnica de Madrid*, 2012.
- [37] Y. V. P. Tituaña and A. C. P. Avila, “Análisis comparativo entre los amplificadores ópticos edfa, raman y soa mediante simulación,” 7 2018. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19621>.
- [38] J. D. H. Varona, J. T. T. Noguera, and A. T. Tovar, “Análisis comparativo del desempeño de los formatos de modulación rz-dqpsk y rz-pdpsk frente a técnicas de compensación Ópticas de la dispersión cromática en redes dwdm a 10 gbps,” *Entre ciencia e ingeniería*, vol. 12, pp. 9–15, 3 2018. <https://doi.org/10.31908/19098367.3697>.
- [39] T. Ivaniga, P. Ivaniga, J. Turán, and L. Ovsenik, “Analysis of possibilities of increasing the spanned distance using edfa and dra in dwdm system,” *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, vol. 19, pp. 88–95, 09 2017. <https://doi.org/10.26552/com.C.2017.3.88-95>.
- [40] Z. G. Khaki and H. S. Bedi, “Transient correction using edfa: In-line optical fiber with feedback,” in *2012 International Conference on Computing Sciences*, pp. 233–238, 2012. <https://doi.org/10.1109/ICCS.2012.76>.
- [41] A. W. Naji, B. A. Hamida, X. S. Cheng, M. A. Mahdi, S. Harun, S. Khan, W. F. AL-Khateeb, A. A. Zaidan, B. B. Zaidan, and H. Ahmad, “Review of erbium-doped fiber amplifier,” *International Journal of Physical Sciences*, vol. 6, pp. 4674–4689, 9 2011. <https://doi.org/10.5897/IJPS11.782>.
- [42] P. F. Santos, “Diseño e implementación de un controlador para un amplificador óptico edfa con fines didácticos,” 2020. <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/43677>.
- [43] J. Zyskind and M. Bolshtyansky, “Chapter 4 - edfas, raman amplifiers and hybrid raman/edfas,” 2011. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374965-9.10004-4>.
- [44] K. Thyagarajan, “Chapter 8 - erbium-doped fiber amplifiers,” 2006. <https://doi.org/10.1016/B978-012088481-0/50009-7>.
- [45] D. Malik, G. Kaushik, and A. Wason, “Performance optimization of hybrid optical amplifier for dense wavelength division multiplexed system,” *Journal of Optics (India)*, vol. 47, pp. 235–242, 6 2018. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12596-017-0439-5>
10.1007/S12596-017-0439-5/FIGURES/6.
- [46] K. Singh, P. Kaur, S. Devra, and G. Kaur, “Evaluation of gain spectrum of dual/triple pumped fiber raman amplifier (fra) by optimizing its pumping parameters in the scenario of dense wavelength division multiplexed (dwdm) systems,” *Optik*, vol. 176, pp. 246–253, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.09.067>.

- [47] G. P. Agrawal, “Chapter 9 - fiber optic raman amplifiers,” in *Guided Wave Optical Components and Devices* (B. P. Pal, ed.), pp. 131–153, Burlington: Academic Press, 2006. <https://doi.org/10.1016/B978-012088481-0/50010-3>.
- [48] L. Sirleto and M. A. Ferrara, “Fiber amplifiers and fiber lasers based on stimulated raman scattering: A review,” *Micromachines*, vol. 11, no. 3, 2020. <https://doi.org/10.5897/IJPS11.782>.
- [49] G. P. Agrawal, “Chapter 8 - stimulated raman scattering,” in *Nonlinear Fiber Optics (Sixth Edition)* (G. P. Agrawal, ed.), pp. 297–354, Academic Press, sixth edition ed., 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817042-7.00015-4>.
- [50] R. Hui, “Chapter 2 - optical fibers,” in *Introduction to Fiber-Optic Communications* (R. Hui, ed.), pp. 19–76, Academic Press, 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805345-4.00002-0>.
- [51] M. Gonzalez-Herraez and T. Sylvestre, *Nonlinear Effects in Optical Fibers*, pp. 145–170. 04 2011. <https://doi.org/10.1201/b16404-6>.
- [52] V. H. P. Martinez, “Análisis del amplificador Óptico de semiconductor y su aplicación a sistemas de regeneración de onda 2r - hdl:11349/3410.” <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/3410>.
- [53] M. J. Connelly, *Semiconductor optical amplifiers*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [54] N. Dutta, “Chapter 8 - semiconductor optical amplifiers (soa),” in *WDM Technologies* (A. K. Dutta, N. K. Dutta, and M. Fujiwara, eds.), pp. 287–320, Burlington: Academic Press, 2003. <https://doi.org/10.1016/B978-012225262-4/50010-6>.
- [55] A.-R. J. C., M.-B. F. G., G.-C. N. D., and S.-I. C. M., “Análisis de la transmisión de tramas stm-n sobre un enlace de fibra óptica dwdm,” 2010-12-15. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=344234320006>.
- [56] A. Rostami and R. Maram, *Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifiers, Basic Principles, Design Methods, and Optical Characterizations*, pp. 1–52. 11 2011. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14925-2>.
- [57] L. Spiekman and D. Piehler, “Chapter 14 - semiconductor optical amplifiers for metro and access networks,” in *Optically Amplified WDM Networks* (J. Zyskind and A. Srivastava, eds.), pp. 387–416, Oxford: Academic Press, 2011. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374965-9.10014-7>.
- [58] A. Hambali and B. Pamukti, “Performance analysis of hybrid optical amplifier in long-haul ultra-dense wavelength division multiplexing system,” *IC-CREC 2017 - 2017 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy, and Communications, Proceedings*, vol. 2017-January, pp. 80–83, 12 2017. <https://doi.org/10.1109/ICCEREC.2017.8226683>.

- [59] R. Kaur, *Performance Analysis of Hybrid Optical Amplifiers for multichannel WDM systems*. PhD thesis, Thapar University, 2011.
- [60] M. Singh, “A review on hybrid optical amplifiers,” *Journal of Optical Communications*, vol. 39, no. 3, pp. 267–272, 2018. <https://doi.org/10.1515/joc-2016-0137>.
- [61] C. C. K. Chan, *Optical Performance Monitoring : Advanced Techniques for Next-Generation Photonic Networks*. Elsevier, 3 ed., 2010. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-20194-2>.
- [62] R. Hui and M. O’sullivan, “Chapter 1 - fundamentals of optical devices,” in *Fiber-Optic Measurement Techniques (Second Edition)* (R. Hui and M. O’sullivan, eds.), pp. 1–135, Academic Press, second edition ed., 2023. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90957-0.00002-3>.
- [63] J. xing Cai, K. Golovchenko, and G. Mohs, “Chapter 25 - modern undersea transmission technology,” in *Optical Fiber Telecommunications (Sixth Edition)* (I. P. Kaminow, T. Li, and A. E. Willner, eds.), Optics and Photonics, pp. 1041–1080, Boston: Academic Press, sixth edition ed., 2013. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396960-6.00030-4>.
- [64] A. Willner, X. Wu, and J.-Y. Yang, “1 - optical performance monitoring: Perspectives and challenges,” in *Optical Performance Monitoring* (C. C. Chan, ed.), pp. 1–19, Oxford: Academic Press, 2010. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374950-5.00001-8>.
- [65] S. M. M. Gómez, “Control de la dispersión cromática en guías ranuradas nanofotónicas,” Master’s thesis, Universitat Politècnica de València, 2 2013. <https://riunet.upv.es/handle/10251/27145>.
- [66] P. M. Institute, “About us.” <https://www.pmi.org/about>.
- [67] P. M. Institute, “Projectmanagement.com - february 2023 pmi fact file stats.” <https://www.projectmanagement.com/blog-post/74089/february-2023-pmi-fact-file-stats>.
- [68] P. M. Institute, “Pmbok guide — project management institute.” <https://www.pmi.org/pmbok-guide-standards/foundational/pmbok>.
- [69] P. M. Institute, *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PM-BOK® Guide) – Seventh Edition and The Standard for Project Management*. Project Management Institute, seventh edition ed., 7 2021. ISBN: 9781628256642.
- [70] P. M. Institute, *Practice Standard for Work Breakdown Structures - Third Edition*. Project Management Institute, third edition ed., 6 2019. ISBN: 978-1628256192.
- [71] P. Poggioli, *Aplicación práctica del método PERT*. Editions d’Organisation, 6 1970. ISBN: 9782708102903.

- [72] B. López, “Pert - técnica de evaluación y revisión de proyectos » ingeniería,” 6 2019. <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/investigacion-de-operaciones/pert-tecnica-de-evaluacion-y-revision-de-proyectos/>.
- [73] A. Rincón and L. Alberto, *Investigación de operaciones para ingenierías y administración de empresas*. Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira, editorial un ed., 6 2001. ISBN: 9588095093.
- [74] G. Keiser, *Basics of Optical Amplifiers*, pp. 437–475. Singapore: Springer Singapore, 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4665-9_11.

LICENCIA



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.



Universidad
del Cauca

Esta obra está publicada bajo una Licencia
Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional.

Análisis del desempeño a nivel de simulación de una
amplificación óptica híbrida HOA, para una arquitectura de red
de línea mixta MLR de tipo NG-PON

ANEXOS



Universidad
del Cauca

María José Bravo Reyes
Gisselle Adriana Mercado Legarda

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT
Popayán, 2023

ANEXO A

Caracterización de un Amplificador de Fibra Dopada con Erblio (EDFA) a partir de parámetros experimentales

La ganancia promedio de un amplificador EDFA depende de múltiples parámetros, como la concentración de iones de erbio, la longitud de la fibra, la longitud del amplificador, el radio del núcleo, la potencia de la señal de entrada y la potencia de bombeo. Generalmente, la ganancia se encuentra en el rango de 15 a 45 dB. Los EDFAs se utilizan principalmente para amplificar señales en la banda de transmisión C (1530 a 1560 nm), el medio activo en un amplificador óptico consiste en una longitud nominal de 5 a 30 m de fibra óptica ligeramente dopada [1]. Para amplificar señales en la banda L (1565 a 1620 nm), la longitud de la fibra dopada suele estar en el rango de 30 a 100 m.

Para lograr un bombeo eficiente, se utilizan láseres semiconductores que operan cerca de las longitudes de onda de 980 y 1480 nm. La mayoría de los EDFAs utilizan láseres de bombeo de 980 nm, debido a que se utilizan en situaciones que requieran baja interferencia de ruido. Aunque estos láseres presentan menores niveles de ganancia y potencia de salida. por otro lado, el bombeo a 1480 nm requiere fibras más largas y mayores niveles de potencias, debido a que utiliza la cola de la banda de absorción. Este tipo de bombeo se utiliza para amplificadores de mayor potencia y altas potencias de salida pero con valores de figura de ruido más altos. Los valores típicos de la figura de ruido (NF) de los EDFA comerciales son de 5 - 6 dB para EDFAs bombeados a 980 nm y de 6 - 7 dB para EDFAs bombeados a 1480 nm [2].

En la Figura A.1 se puede observar un EDFA comercial, usualmente utilizado dentro de los sistemas ópticos como Amplificador Booster, Amplificador de Línea o como Preamplificador. En la Tabla A.1 se presentan los parámetros principales de diferentes tipos de amplificadores.



Figura A.1: EDFA Pre-Amplifier.

Tabla A.1: Parámetros de tres tipos de Amplificadores EDFA.

	FMT20PA-EDFA	FMT17BA-EDFA	FMT26PA-EDFA
Tipo de amplificador	Preamplificador	Amplificador de refuerzo	Preamplificador
Ganancia óptica	20dB	17dB	26dB
Potencia de entrada	-30 dbm ~ +5 dbm	-23dBm ~ +12dBm	-30dBm ~ +5 dBm
Potencia salida saturada	≤ 13 dBm	≤ 17 dBm	≤ 16 dBm
Canales	40CH	40CH	40CH
Tipo de conector	LC, UPC polaco	LC, UPC polaco	LC, UPC polaco
Figura de ruido	4.5dB (típico)	4.5dB (típico)	4.5dB (típico)

Considerando las especificaciones técnicas del amplificador EDFA comercial OPTI-LAB [3], se determinan los parámetros de simulación para el análisis del amplificador EDFA (tabla A.2). El EDFA tiene tres posibles configuraciones de bombeo: codireccional, contradireccional y bombeo bidireccional. Siendo el bombeo codireccional el que proporciona un mejor rendimiento de ruido.

Tabla A.2: Parámetros de simulación para el amplificador EDFA.

Parámetros simulación	Preamplificador	Booster
Longitud de onda de operación	1542 - 1547 nm	
Configuración bombeo	Co-propagado	
Longitud de onda de bombeo	980 - 1480 nm	
Longitud fibra dopada	1 a 28 m	
Potencia bombeo	100 - 500 mW	10 - 500 mW

La elección de la longitud óptima de la fibra dopada depende de la potencia de bombeo de entrada y las longitudes de onda de la señal y la bomba. A medida que la longitud de la fibra aumenta, la ganancia crece con el aumento de la potencia de bombeo, pero luego disminuye después de cierto punto, ya que la bomba no tiene suficiente energía para crear una inversión de población completa en la porción de salida del amplificador, lo que resulta en una pérdida de señal en lugar de ganancia, y mas allá de este punto la ganancia se satura [1]. La figura de ruido varía con la longitud de la fibra dopada, siendo más baja cuando se usa el bombeo de 980 nm.

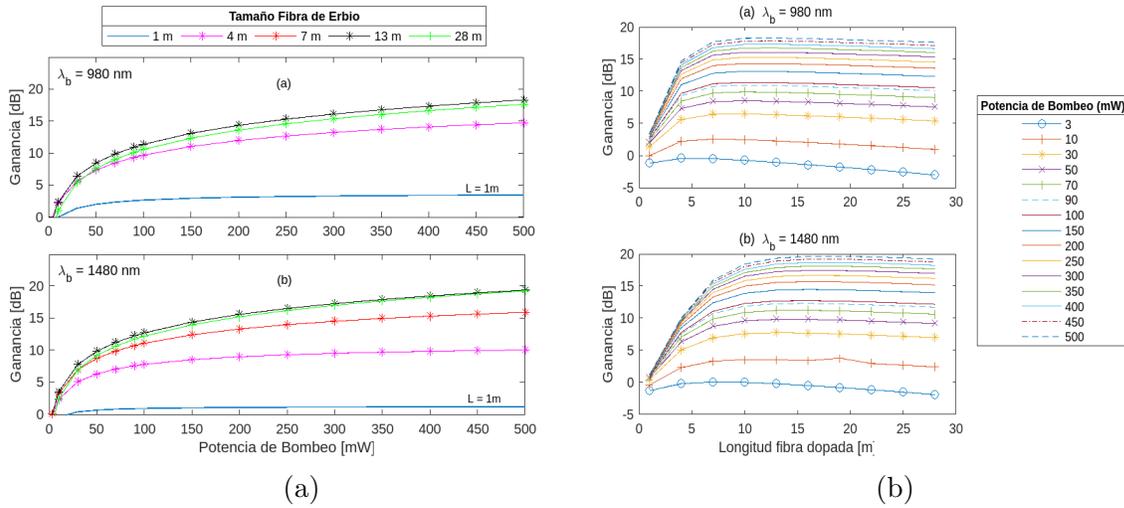


Figura A.2: Ganancia vs (a) potencia de bombeo en EDFA (b) Longitud del amplificador.

En la tabla A.3 y A.4 se muestran los resultados obtenidos frente a la variación de la longitud de la fibra dopada en banda C. Como se puede notar el bombeo de 980 nm produce una inversión de población completa (ganancia máxima) en longitudes de amplificador más cortas que el bombeo de 1480 nm. Esto da como resultado una cifra de ruido del amplificador más baja cuando se utiliza el bombeo de 980 nm, reflejándose en los resultados de los parámetros OPM.

Si se elige una longitud de amplificador específica, entonces el EDFA amplificará cada longitud de onda de manera diferente, nuevamente porque la energía del fotón depende de la longitud de onda. Esto conduce a un sesgo de ganancia entre diferentes longitudes de onda a medida que emergen del amplificador. La longitud del amplificador que produce una ganancia máxima se hace más larga con el aumento de la longitud de onda de la señal, porque los fotones en longitudes de onda más largas tienen menos energía y, por lo tanto, necesitan menos potencia para tener la misma ganancia que los fotones en longitudes de onda más cortas.

Cabe señalar, que los resultados previamente expuestos constituyen una selección representativa de los datos adquiridos en diversas instancias de la simulación del amplificador EDFA, los cuales se encuentran en un documento de respaldo en el Anexo D.

Tabla A.3: Parámetros OPM implementando amplificador EDFA en modo preamplificador.

Longitud Fibra	bombeo		Canal 1					Canal 2				
	Longitud de onda	Potencia de Rx	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)
10 m	980 nm	300 mW	8,544	-19,455	1e-140	39,851	3,187e-05	10,833	-17,166	1e-40	27,435	5,091e-04
13 m	980 nm	350 mW	9,626	-18,373	1e-40	39,744	6,36e-05	11,797	-16,203	1e-40	27,484	5,02e-04
7 m	980 nm	400 mW	8,788	-19,215	1e-40	39,804	2,602e-05	11,225	-16,774	1e-40	27,431	4,987e-04
16 m	980 nm	200 mW	7,652	-20,347	1e-40	39,989	3,442e-05	9,649	-18,35	1e-40	27,243	4,772e-04
10 m	1480 nm	350 mW	9,527	-18,473	1e-40	39,364	7,778e-05	11,833	-16,166	1e-40	27,405	4,828e-05

Longitud Fibra	bombeo		Canal 4				
	Longitud de onda	Potencia de Rx	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)
10 m	980 nm	300 mW	18,665	-9,334	1e-40	31,382	5,644e-02
13 m	980 nm	350 mW	19,52	-8,479	1e-40	30,082	5,945e-02
7 m	980 nm	400 mW	19,221	-8,778	1e-40	30,119	5,826e-02
16 m	980 nm	200 mW	17,123	-10,876	1e-40	34,347	5,7e-02
10 m	1480 nm	350 mW	19,714	-8,285	1e-40	29,32	5,661e-02

Tabla A.4: Parámetros OPM implementando amplificador EDFA en modo Booster.

Longitud Fibra	bombeo					Canal 1					Canal 2						
	Longitud de onda	Potencia de Rx	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)
10 m	980 nm	200 mW	3,261	-24,738	1e-40	31,492	8,116e-04	5,237	-22,762	1e-40	31,492	1,144e-03	5,237	-22,762	1e-40	31,492	1,144e-03
10 m	1480 nm	100 mW	1,606	-26,393	1e-40	35,189	5,634e-04	3,647	-24,352	1e-40	35,189	8,759e-04	3,647	-24,352	1e-40	35,189	8,759e-04
7 m	980 nm	200 mW	2,622	-25,377	1e-40	33,046	7,358e-04	4,764	-23,235	1e-40	33,046	1,087e-03	4,764	-23,235	1e-40	33,046	1,087e-03
4 m	980 nm	400 mW	3,059	-24,94	1e-40	31,691	8,787e-04	5,301	-22,698	1e-40	31,691	1,25e-03	5,301	-22,698	1e-40	31,691	1,25e-03
13 m	980 nm	100 mW	0,957	-27,042	1e-40	36,083	4,704e-04	2,881	-25,187	1e-40	36,083	7,85e-04	2,881	-25,187	1e-40	36,083	7,85e-04

Longitud Fibra	bombeo					Canal 4					Canal 10						
	Longitud de onda	Potencia de Rx	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)
10 m	980 nm	200 mW	12,955	-15,044	1e-40	27,372	6,906e-02	4,83	-23,169	1e-40	27,372	7,792e-04	4,83	-23,169	1e-40	27,372	7,792e-04
10 m	1480 nm	100 mW	11,305	-16,694	1e-40	30,406	6,769e-02	3,051	-24,949	1e-40	30,406	5,635e-04	3,051	-24,949	1e-40	30,406	5,635e-04
7 m	980 nm	200 mW	12,592	-15,407	1e-40	28,021	6,933e-02	4,871	-23,129	1e-40	28,021	7,566e-04	4,871	-23,129	1e-40	28,021	7,566e-04
4 m	980 nm	400 mW	13,289	-14,71	1e-40	26,455	6,846e-02	6,062	-21,938	1e-40	26,455	8,738e-04	6,062	-21,938	1e-40	26,455	8,738e-04
13 m	980 nm	100 mW	10,367	-17,632	1e-40	31,04	6,449e-02	1,619	-26,381	1e-40	31,04	4,816e-04	1,619	-26,381	1e-40	31,04	4,816e-04

Bibliografía

- [1] G. Keiser, *Basics of Optical Amplifiers*. Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 437–475. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-981-33-4665-9_11
- [2] I.-T. Recommendation. (2007, 7) G.661 : Definitions and test methods for the relevant generic parameters of optical amplifier devices and subsystems. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.661/en>
- [3] OPTILAB. Single mode c band edfa amplifier – optilab. [Online]. Available: <https://www.optilab.com/collections/single-mode-c-band-edfa-amplifier>

ANEXO B

Caracterización de un amplificador Raman a partir de parámetros experimentales

Los amplificadores de fibra Raman (RFA) son dispositivos que aprovechan el efecto Raman para amplificar señales ópticas en una fibra óptica. Estos amplificadores tienen la ventaja de poder operar en cualquier longitud de onda, lo que los hace adecuados para sistemas de comunicación óptica de alta capacidad y largo alcance. Los RFA comerciales se diseñan para reducir las distorsiones no lineales que afectan a la calidad de la señal, como la dispersión, el ruido y la interferencia. De esta manera, se logra transmitir señales a distancias mayores que las que se pueden alcanzar con los amplificadores ópticos convencionales EDFA. Además, los RFA permiten aumentar la velocidad de transmisión y disminuir el espaciamiento entre canales, lo que incrementa la eficiencia espectral del sistema. Existen dos tipos principales de RFA según su configuración: los amplificadores Raman discretos o agrupados (LRA), que usan una o varias fibras ópticas como medio de amplificación, y los amplificadores Raman distribuidos (DRA), que usan la propia fibra de transmisión como medio de amplificación.

Los dispositivos RFA aprovechan un fenómeno no lineal conocido como dispersión Raman estimulada (SRS), que ocurre cuando la luz de alta potencia interactúa con la fibra óptica. En la configuración de amplificador Raman agrupado, un carrete de aproximadamente 80 m de fibra de núcleo pequeño junto con láseres de bomba apropiados, que se colocan en el camino de la señal óptica como un módulo independiente. En el caso de los amplificadores Raman distribuidos, se emplean uno o más láseres de bomba Raman para convertir los últimos 20-40 km de la fibra de transmisión en un preamplificador. Debido a que la ganancia Raman en un rango espectral particular se deriva de la transferencia de potencia óptica inducida por SRS desde longitudes de onda de bomba más cortas a longitudes de onda de señal más largas, estos amplificadores pueden diseñarse para su uso en cualquier banda de longitud de onda (1260-1650 nm) [1].

La Figura B.1 muestra un amplificador Raman utilizado para ampliar la capacidad y el alcance de las redes ópticas de larga distancia y ultra larga distancia en la región de la banda C del espectro óptico. Tanto los amplificadores Raman de contrapropagación como los de copropagación de alta potencia utilizan tecnología avanzada, incluyendo atenuadores ópticos variables, fotodiodos y software para automatizar las operaciones. Estos amplificadores utilizan bombas Raman de última generación que entregan hasta 1000 mW de potencia óptica y se pueden combinar para lograr una alta eficiencia y un bajo consumo de energía, lo que permite amplificar las señales ópticas a largas distancias. En la Tabla B.1 se presentan las especificaciones del amplificador óptico.



Figura B.1: Amplificador Raman CISCO, para contra y Co-Propagación tipo DRA (15454-M-RAMAN-CTP and 15454-M-RAMAN-COP).

Tabla B.1: Especificaciones del Amplificador Óptico Raman.

Especificación	Unidad de contrapropagación	Unidad de co-propagación
Longitud de onda de la bomba	1428 nm (bombas 1 y 2) 1457 nm (bombas 3 y 4)	1428 nm (bombas 1 y 2) 1457 nm (bombas 3 y 4)
Rango de funcionamiento Potencia de la bomba Raman	100 a 1000 mW	200 a 1000 mW
Potencia máxima de salida: bomba láser 1+2 (1428 nm, 1457 nm)	500 mW	550 mW
Precisión de potencia de bombeo	+ o - 2%	+ o - 2%
Máxima potencia de salida óptica: puerto LINE Rx	1200 mW (máximo)	1200 mW (máximo)
Rango de longitud de onda de señal de banda C	1500 a 1567 nm (96 canales)	Las longitudes de onda de la banda C no se propagan a través de esta tarjeta.

El fenómeno de la transferencia de potencia ocurre cuando la luz se desplaza de una longitud de onda más corta a una más larga dentro de un intervalo espectral determinado. Este fenómeno se denomina desplazamiento de Stokes y depende del tipo de material por el que se propaga la luz. En el caso de la fibra óptica de sílice, que se utiliza para las telecomunicaciones, el desplazamiento de Stokes es de unos 13.2 THz, lo que corresponde a un cambio de 100 nm dentro de la ventana de las telecomunicaciones.

La diferencia de frecuencia entre la señal y la bomba determina el desplazamiento Raman, que es una propiedad del material de la fibra. Para amplificar una señal de 1550 nm, se necesita una onda de bombeo con una frecuencia ligeramente menor, es decir, una longitud de onda ligeramente mayor, alrededor de 1450 nm. Este proceso se puede aplicar a señales en las bandas C y L del espectro óptico, que abarcan longitudes de onda desde 1530 hasta 1625 nm. Sin embargo, se requieren láseres de bombeo potentes y estables, que operen en el rango de 1400 a 1500 nm, para lograr una amplificación Raman eficiente y uniforme.

La Tabla B.2 especifica las variables que posee el amplificador Raman implementado en la herramienta de simulación OptSim.

Tabla B.2: Características generales del amplificador Raman.

Parámetros	Valores
Longitud de operación	1542 - 1547 nm
Pérdida Raman	0.25 dB/Km
Atenuación de bombeo	0.21 dB/km
Configuración de bombeo	Contra-propagado
Dispersión en la frecuencia de referencia	1.99 ps/nm/km
Frecuencia de referencia para la dispersión	1.550 nm
Temperatura de funcionamiento	285 K

La ganancia Raman no es constante a lo largo de la fibra, sino que depende de la longitud de la misma. A mayor longitud de fibra, mayor es la interacción entre la señal y el bombeo, y por lo tanto mayor es la ganancia. No obstante, existe un límite a partir del cual la ganancia empieza a disminuir debido a que el bombeo se agota y no puede transferir más energía a la señal. Por este motivo, se recomienda utilizar fibras no lineales con longitudes inferiores a 50 km para aprovechar al máximo la ganancia Raman. Los valores típicos de ganancia Raman se encuentran entre 5 y 40 dB, mientras que la figura de ruido (NF) asociada suele estar entre 3 y 6 dB.

Se establecen los parámetros de simulación del amplificador Raman en la Tabla B.3, para el posterior análisis del desempeño del amplificador al ser implementado en la red

óptica mediante la herramienta OptSim.

Tabla B.3: Parámetros de simulación para el amplificador Raman.

Parámetros de simulación	Preamplificado	Booster
Longitud de fibra Raman	3 - 19 km	5 - 19 km
Longitud de onda de bombeo ¹	1.420 - 1.490 nm	
Potencia de bombeo	100 - 800 mW	

Para analizar el rendimiento de la red MLR-DWDM de tipo NG-PON, se examina el amplificador Raman en modo preamplificado y booster. Estos amplificadores permiten compensar las pérdidas ópticas de la fibra y aumentar la potencia de salida de los transmisores ópticos. Se obtienen los resultados de los parámetros OPM óptimos para la red MLR-DWDM con amplificadores Raman, tales como el factor Q, el BER, el OSNR y la potencia óptica. Cabe señalar, que los resultados mostrados a continuación constituyen una selección representativa de los datos adquiridos en diversas instancias de la simulación del amplificador Raman, los cuales se encuentran en un documento de respaldo en el Anexo D.

¹100 nm por debajo de la longitud de onda de operación

Tabla B.4: Parámetros OPM implementando amplificador Raman en modo Preamplificador.

Longitud Fibra	bombeo					Canal 1					Canal 2				
	Longitud de onda	Potencia de Rx	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)
13 m	1450 nm	800 mW	2,46	-25,539	3,19e-04	10,512	5,47e-04	4,666	-23,333	1e-40	22,627	-23,333	1e-40	22,627	7,39e-04
13 m	1440 nm	800 mW	2,388	-25,611	3,22e-04	10,547	5,42e-04	4,5	-23,499	1e-40	22,782	-23,499	1e-40	22,782	7,32e-04
15 m	1460 nm	800 mW	2,525	-25,474	3,38e-04	10,444	5,54e-0,4	4,587	-23,412	1e-40	22,717	-23,412	1e-40	22,717	7,66e-04
15 m	1440 nm	800 mW	3,099	-24,9	3,56e-04	10,408	5,69e-04	5,18	-22,819	1,11e-36	22,223	-22,819	1,11e-36	22,223	7,57e-04
17 m	1460 nm	800 mW	3,056	-24,943	3,76e-4	10,371	5,79e-4	5,139	-22,86	4,57e-40	23,139	-22,86	4,57e-40	23,139	7,63e-04

Longitud Fibra	bombeo					Canal 4						
	Longitud de onda	Potencia de Rx	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)
13 m	1450 nm	800 mW	12,64	-15,357	2,27e-32	21,415	6,89e-02	12,64	-15,357	2,27e-32	21,415	6,89e-02
13 m	1440 nm	800 mW	12,297	-15,702	2,14e-34	21,86	7,07e-02	12,297	-15,702	2,14e-34	21,86	7,07e-02
15 m	1460 nm	800 mW	12,389	-15,61	4,821e-27	20,604	6,85e-02	12,389	-15,61	4,821e-27	20,604	6,85e-02
15 m	1440 nm	800 mW	12,926	-15,073	7,94e-24	20,056	7,1e-02	12,926	-15,073	7,94e-24	20,056	7,1e-02
17 m	1460 nm	800 mW	12,857	-15,142	6,68e-20	19,207	7,11e-02	12,857	-15,142	6,68e-20	19,207	7,11e-02

Tabla B.5: Parámetros OPM implementando amplificador Raman en modo Booster.

Longitud Fibra	bombeo		Canal 1					Canal 2				
	Longitud de onda	Potencia de Rx	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)
13 m	1450 nm	800 mW	2.44	-25.559	1e-40	34,725	2,46e-04	4,782	-23,217	1e-40	25,366	6e-04
13 m	1440 nm	800 mW	2.369	-25,63	1e-40	34,982	4,14e-04	4,621	-23,378	1e-40	25,378	5,89e-04
15 m	1460 nm	800 mW	2,554	-25,445	1e-40	35,03	3,34e-04	4,681	-23,318	1e-40	25,365	6,07e-04

Longitud Fibra	bombeo		Canal 4				
	Longitud de onda	Potencia de Rx	OSNR (dB)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)
13 m	1450 nm	800 mW	12,707	-15,292	4,75e-18	18,891	6,69e-02
13 m	1440 nm	800 mW	12,349	-15,65	2,20e-20	19,402	6,95e-02
15 m	1460 nm	800 mW	12,412	-15,587	3,11e-16	18,322	6,9e-02

Bibliografía

- [1] G. Keiser, *Basics of Optical Amplifiers*. Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 437–475. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-981-33-4665-9_11

ANEXO C

Caracterización de los componentes para el modelo de simulación

En este anexo se explorarán los equipos comerciales más comunes que suelen formar parte de una red óptica MLR-DWDM de tipo NG-PON. Es importante destacar que la configuración específica de estos equipos puede variar según el diseño particular de la red.

Transmisor

Los dispositivos OptiX OSN de Huawei han sido diseñados con el propósito de proporcionar capacidades avanzadas para la transmisión y gestión de señales ópticas en infraestructuras de telecomunicaciones. Estos equipos son ampliamente reconocidos por su versatilidad, al ser capaces de soportar diversas aplicaciones de red, como voz, datos y vídeo, además de ofrecer altas velocidades de transmisión. La familia de productos OptiX OSN de Huawei abarca una variedad de series de equipos, detalladas en la Tabla C.1, cada una de ellas diseñada específicamente para cubrir diversas necesidades y requisitos de infraestructuras de red.

Tabla C.1: Transmisores comerciales.

	OptiX OSN 1800	OptiX OSN 6800	OptiX OSN 8800 UPS	OptiX OSN 9800 U32
Máximo número de Longitudes de Onda DWDM	80	80	96 canales	Red fija: 96 longitudes de onda a 50 GHz de red Rejilla flexible: El número máximo de longitudes de onda está relacionado con el ancho de la flexión canal
Tasa máxima por canal	2 Gbit/s	100 Gbit/s (OTU4)	400 Gbit/s (OTUC4)	400 Gbit/s (OTUC4)
Tipo de Acceso	SDH/SONET, PDH, OTN, Ethernet, CPRI, OBSAI, SAN, vídeo y otros	SDH, SONET, Ethernet, SAN, OTN, Vídeo	SDH, SONET, Ethernet, SAN, OTN, Vídeo	Jerarquía digital síncrona (SDH)/red óptica síncrona (SONET), Ethernet, red de área de almacenamiento (SAN), red de transporte óptico (OTN) y video
Número de ranuras para tarjetas de servicio	Chasis CC: 15 Chasis CA: 12	17	Chasis CC: 16 Chasis CA: 15	32

Rango de Longitud de Onda	DWDM: 1529,16 nm a 1560,61 nm (Banda-C, ITU-T G.694.1)	DWDM: 1529, 16 nm a 1560, 61 nm (Banda-C, ITU-T G.694.1)	DWDM: 1529,16 nm a 1567,13 nm (banda C extendida, ITU-T G.694.1)	DWDM: 1529,16 nm a 1567,13 nm (banda C extendida, ITU-T G.694.1)
Velocidad de línea		2,5 Gbit/s, 10 Gbit/s, 40 Gbit/s, 100 Gbit/s	2,5 Gbit/s, 10 Gbit/s, 40 Gbit/s, 100 Gbit/s, 200 Gbit/s, 400 Gbit/s	10 Gbit/s, 100 Gbit/s, 200 Gbit/s y 400 Gbit/s
Topología		Punto a punto, enlaces concatenados, estrella, anillo, anillo con cadena, anillo tangente, anillo de intersección, malla	Punto a punto, cadena, estrella, anillo, anillo con cadena, anillo tangente, anillo de intersección, malla	Punto a punto, cadena, estrella, anillo, anillo con cadena, anillo tangente, anillo de intersección y malla

Transceiver

Los Transceiver de fibra óptica se emplean en la conversión fotoeléctrica, transformando las señales ópticas en señales eléctricas en recepción y las señales eléctricas en señales ópticas en transmisión. El transceptor SFP (Small Form-Factor Pluggable), es una unidad modular de tamaño reducido que se utiliza en equipos de redes como conmutadores y enrutadores. Se presentan en múltiples variantes diseñadas para admitir diversas tasas de datos y tipos de fibra, entre ellas 1G SFP, 10G SFP+, 25 SFP28, 40 QSFP+, 100G QSFP28, 200G, etc. Su uso se adapta a distintos tipos de cables, permitiendo la transmisión a distancias cortas o largas en la red. Los Transceiver de fibra óptica BiDi, permiten una transmisión bidireccional al permitir que los módulos transmitan y reciban datos a través de una única fibra óptica, simplificando la infraestructura de cableado al incrementar la capacidad de la red y reducir los costos. Mientras, los Transceiver CWDM/DWDM, utilizados en redes de fibra óptica de larga distancia multiplexan diferentes longitudes de onda en una única fibra, son adecuadas para la transmisión de larga distancia en redes WDM/OTN.

Tabla C.2: Transceiver comerciales

	ESFP-43-20	XSG-SFP-B+L-I	GSFP-43-20B	XSG-SFP-C+L-I	XG-SFP-25-20N2
Tipo	EPON OLT	XGS-PON	G-PON	XGS-PON	XG-PON
Clase	-	B+	-	C+	N2
Velocidad (US/DS)	1.25 G-Tx	9.953 Gbps-Tx/ 9.953 Gbps(2.5 G)-Rx	2.5488 G-Tx/ 1.244 Gbps-Rx	1.25 Gbps-Tx/ 9.953 Gbps-Tx	2,488 Gbps-Tx/ 9.953 Gbps-Tx
Factor de forma	GEPON SFP ONU/OLT	SFP-DD	GPON SFP	SFP+	SFP+
Longitud de onda (Tx/Rx)	1490 nm/1310 nm	1577 nm/1270 nm	1490 nm/1310 nm	1577 nm/1270 nm	1270 nm/1577 nm
Distancia máxima	20 km				
Tipo de fibra	SMF				

Sensibilidad en el receptor	<-28 dBm	9.953G \geq -25 dBm 2.488G \geq -26.5 dBm 1.244G \geq -28 dBm	<-28 dBm	-29 \sim 0 dBm (9.953G) -30.5 \sim 0 dBm (2.488G) -32 \sim 0 dBm (1.244G)	<-28 dBm
Sobrecarga del receptor	6 dBm	-	-	-	-8 dBm
Ratio de extinción	>9 dB	>8.2 dB	>10 dB	>8.2 dB	>8.2 dB
Potencia Tx	2 \sim 7 dBm	1 \sim 4 dBm (9.953 G) 1.5 \sim 5 dBm (2.488 G)	1.5 \sim 5 dBm	0 \sim 4 dBm	2 \sim 7 dBm

Fuente de luz óptica

La fuente óptica se encarga de emitir luz que permite la transmisión de información a través de la fibra óptica. Existen dos tipos de fuentes: el diodo emisor de luz (LED, *Light-Emitting Diode*) y el diodo de inyección láser (ILD, *Injection Laser Diode*). Ambos son dispositivos semiconductores cuya potencia de luz emitida depende de la corriente de excitación. Los diodos láser son la opción más común para la mayoría de los sistemas de transmisión de fibra óptica debido a su alta potencia y estrecha anchura de banda.

- Los diodos láser son comúnmente conocidos como diodos láser emisores de borde debido a que la luz láser se emite desde el borde del sustrato. Estos diodos emiten una luz intensa infrarroja, generalmente en el rango de 1310 nm a 1625 nm, y se utiliza principalmente en fibras monomodo. La potencia de salida y la calidad del haz de un diodo láser dependen del tamaño del emisor y la cantidad de emisores presentes en el dispositivo.
- Láser emisor de superficie de cavidad vertical (VCSEL, *Vertical Cavity Surface Emitting Laser*), son un tipo especial de diodo láser que, a diferencia de los diodos estándar, emiten la luz perpendicularmente al plano de la región activa y no paralelamente. Los VCSEL ofrecen una iluminación espacial uniforme en un patrón de iluminación circular con poco moteado. Algunas de sus ventajas son el menor consumo y la capacidad de emitir un modo longitudinal único (SLM).
- Los LED, son dispositivos de bajo costo que operan en longitudes de onda infrarroja, generalmente en las frecuencias de 850 nm y 1310 nm. Estos LED suelen ser empleados en sistemas de transmisión de fibra óptica que utilizan fibras multimodo. Comparados con los láseres de diodo, los LED tienen una frecuencia de modulación más baja y un tiempo de respuesta más lento. Aunque los LED tienen un ancho de banda más amplio que los láseres, lo que les permite transmitir un rango más amplio de frecuencias, su potencia de salida es más baja. Por esta razón, los LED son más adecuados para aplicaciones donde no se requiere una alta potencia de señal, como en distancias cortas o comunicaciones locales.

Los láseres funcionan en dos modos: Onda continua (CW) y pulsos. En el modo CW, la radiación emitida de la cavidad o resonador del láser fluye de manera continua a través de un espejo parcialmente reflectante formando una onda ininterrumpida. En modo de pulsos, la radiación se emite durante un corto periodo de tiempo a una velocidad de

repetición, lo que da como resultado una ráfaga de pulsos cortos espaciados entre sí. En este último modo, el láser no es monocromático y su anchura espectral puede ser muy grande.

Multiplexación por División Longitud de Onda

Para la selección de los canales se hace uso de la Multiplexación por Longitud de Onda (WDM), es una tecnología que no solo mejora la capacidad del enlace sino que también mejora la eficiencia espectral, permitiendo aumentar de forma económica la capacidad de transporte de las redes existentes. Permite transmitir varias longitudes de onda sobre una misma fibra sin interferencia mutua; cada longitud de onda representa un canal óptico dentro de la fibra. En el lado del transmisor, el sistema WDM contiene un multiplexor que combina una serie de señales que tienen diferentes longitud de onda de funcionamiento, y en el lado del receptor hay un demultiplexor para separar las señales y así decodificar los datos del usuario. Según el grado de multiplexación, los sistemas WDM se clasifican además como Multiplexación por División Aproximada de Longitud de Onda (CWDM) y Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa (DWDM).

La DWDM se caracteriza por una separación entre canales más estrecha que la CWDM. La recomendación ITU-T G.964.1 [1] define una estructura flexible que permite la elección de diferentes espaciamientos de canales para satisfacer las necesidades específicas de cada sistema DWDM. La rejilla de frecuencias admite una variedad de separaciones de canal fijas que van de 12,5 GHz hasta 100 GHz y múltiplos enteros de 100 GHz, así como una rejilla flexible. Es importante tener en cuenta que, cuanto menor sea el espaciamiento, mayor será la diafonía. Además, dependiendo de los equipos utilizados, a medida que se reduce el espaciamiento, también se limita la máxima velocidad de datos por longitud de onda que se puede transmitir.

Separación de canales (GHz)	Frecuencias de canal permitidas (THz)
12,5 (0.1 nm)	$193,1 + n * 0,0125$
25 (0.2 nm)	$193,1 + n * 0,025$
50 (0.4 nm)	$193,1 + n * 0,05$
100 (0.8 nm)	$193,1 + n * 0,1$

Donde n es un número entero positivo o negativo que incluye 0.

La tecnología DWDM concentra los canales a transmitir en la banda seleccionada. Las bandas de transmisión más utilizadas para redes DWDM son la banda C y la banda L. La banda C es la más convencional y usa longitudes de onda más cortas (de 1530 a 1560 nm), mientras que la banda L usa longitudes de onda más largas (de 1565

a 1625 nm). Cuando se trabaja con DWDM, los canales se referencian en unidades de frecuencia. La banda C ocupa las frecuencias comprendidas entre 191.325 THz - 196.125 THz, lo que nos da una franja de trabajo de 4.8 THz para insertar los canales a transmitir.

Espaciado de canales	Capacidad n° canales
100 GHz	40 canales
50 GHz	96 canales
37.5 GHz	128 canales

CDM

La tecnología DWDM surge como una solución para mejorar la capacidad de transmisión a largas distancias. No obstante, estas infraestructuras a menudo se enfrentan a desafíos de distorsión durante la transmisión, lo que resalta la importancia de las estrategias de compensación óptica. Estas técnicas se basan en el uso de módulos de compensación de dispersión, los cuales poseen características que contrarrestan las distorsiones inducidas por la dispersión cromática.

La implementación de un módulo DCM es esencial en redes de largo alcance para garantizar una transmisión de alta calidad y una distancia de transmisión suficiente sin degradación de la señal. El módulo DCM tiene la capacidad de compensar tanto la CD como la dispersión de polarización que puede ocurrir durante la transmisión óptica y reducir la calidad de la señal. Además, la utilización del módulo DCM permite una mayor flexibilidad en el diseño de la red, ya que puede adaptarse a diferentes longitudes de onda y formatos de señal. En la Tabla ?? se detallan las especificaciones de varios módulos DCM.

Tabla C.3: DCM comerciales.

	FMT40-DCM	M6200-DCM40	FMT80-DCM	M6200-DCM80
Longitud de compensación	40 Km	40 Km	80 Km	80 Km
Rango de onda	banda C (1528 -1568 nm)	banda C (1525 -1565 nm)	banda C (1528 -1568 nm)	banda C (1525 -1565 nm)
Pérdida de inserción	4,2 dB máx	≤ 4.0 dB	5,8 dB máx	≤ 7.2 dB
Dispersión del modo de polarización	0,8 ps máx	≤ 0.3 ps	1,2 ps máx	≤ 0.5 ps

Consumo de energía	≤ 1 w	≤ 3 w	≤ 1 w	
Perdida de dependencia de polarización	0,1 dB máx	≤ 0.1 dB	0,1 dB máx	≤ 0.1 dB
Figura de ruido	4.5 dB (típico)	4.5 dB (típico)	4.5 dB (típico)	

Existen tres técnicas para implementar los módulos de compensación de dispersión utilizados en sistemas de comunicaciones ópticas:

- Pre-compensación:** Implica la introducción de una cantidad controlada de dispersión cromática en la señal óptica antes de que se transmita a través de la fibra óptica. Su finalidad es contrarrestar la dispersión cromática que se produce de manera natural en dicho medio. Esta técnica ajusta tanto la fase como la amplitud de la señal óptica antes de su transmisión, permitiendo que los diferentes componentes de longitud de onda avancen a la misma velocidad y alcancen el receptor simultáneamente. Este procedimiento minimiza la distorsión de la señal ocasionada por la dispersión cromática.

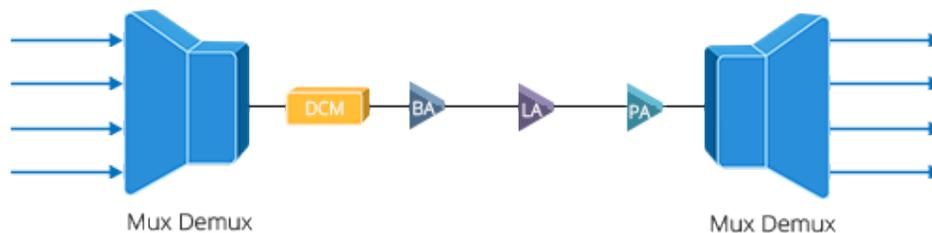


Figura C.1: Pre-compensación. Tomada de [2].

- Post-compensación:** Implica la introducción de una cantidad controlada de dispersión cromática en la señal óptica después de que se ha transmitido a través de la fibra óptica. Al ajustar tanto la fase como la amplitud de la señal óptica después de su transmisión, se logra que los diferentes componentes de longitud de onda lleguen al receptor al mismo tiempo. De este modo, se remedia la distorsión de la señal causada por la dispersión cromática.

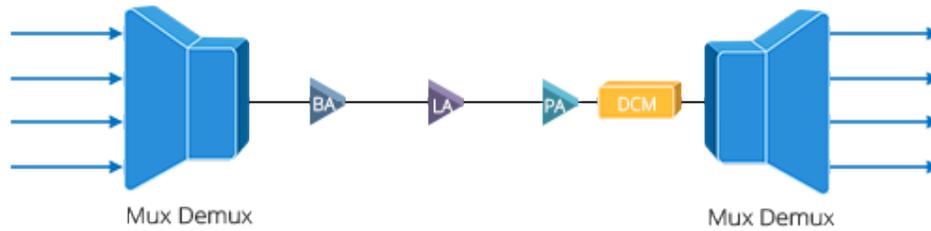


Figura C.2: Post-compensación. Tomada de [2].

- Compensación simétrica:** Busca equilibrar la compensación tanto antes como después de la transmisión a través de la fibra óptica. Se aplica corrección tanto en el extremo transmisor como en el extremo receptor del enlace de comunicación. Esto proporciona una estrategia más completa para mitigar los efectos de la distorsión.

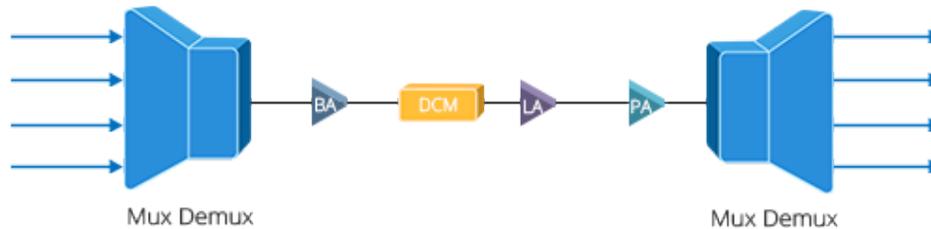


Figura C.3: Compensación simétrica. Tomada de [2].

Armario de distribución de fibra óptica

Es un panel o bastidor empleado para la gestión y distribución de conexiones de fibra óptica en una red de comunicaciones, principalmente para interconectar los diferentes componentes de la red de fibra óptica como la OLT, las cajas NAP, las muflas y los dispositivos de usuario final, permitiendo la conexión de múltiples fibras ópticas en un solo punto centralizado.

Existen tres tipos principales de ODF según su estructura: ODF de montaje en pared, ODF de montaje en suelo y ODF de montaje en rack. El primero resulta ideal para distribuciones de fibra con recuentos pequeños y generalmente utiliza un diseño de caja compacta que se pueda instalar en la pared. El segundo ODF adopta una estructura cerrada y está diseñado con una capacidad de fibra relativamente fija y una apariencia agradable. El ODF de montaje en rack, por su parte, suele tener un diseño modular

con una estructura firme y se puede instalar con más flexibilidad de acuerdo con las especificaciones y el número de cables de fibra óptica. Además, los ODF de montaje de bastidores suelen ser de 19”, lo que garantiza que se puedan instalar perfectamente en el rack de transmisión estándar de uso común. Sin embargo, OptSim no tiene un elemento que permita simular un ODF dentro de su entorno.

Splitter

Un splitter debe tener baja pérdida de inserción para minimizar la atenuación de la señal, alta uniformidad para dividir la señal de manera uniforme entre las múltiples salidas y un amplio rango de frecuencias de operación para garantizar una transmisión de señal estable y confiable.

Tabla C.4: Splitter comerciales.

		FOOC		CULTOM		Intelbras	
Tipo de configuración		1x4	1x16	1x4	1x16	1x4	1x16
Tipo de fibra		SMF -28e		-		G.657.A1-SMF	
Pérdida de inserción		7.3 / 7.0	13.7 / 13.5	7.0 / 7.1	13.5 / 13.7	7.3	13.7
Pérdida de retorno		50 / 55	50 / 55	-	50	50	-
Pérdida de retorno (RL)	Categoría C (UPC)	-	-	≥ 55	≥ 50	≥ 50	-
	Categoría D (APC)	-	-	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 55
Pérdida dependiente de la polarización (PDL)		0.2	0.3	0.2	0.4	0.2	0.25
Pérdida de uniformidad		0.6	1.2	0.8	1.4	0.7	1.2

Multiplexor/Demultiplexor

Un multiplexor y demultiplexor de longitud de onda son componentes importantes en sistemas de comunicación que operan con múltiples longitudes de onda simultáneamente. Estos dispositivos facilitan la combinación de señales ópticas de diferentes longitudes de onda en el transmisor y su correspondiente separación en el receptor. Esta capacidad de manipular diversas longitudes de onda de manera eficiente es fundamental para maximizar la capacidad y eficiencia de las redes de fibra óptica, permitiendo una transmisión de datos rápida y confiable a través de canales independientes.

Tabla C.5: Multiplexor/Demultiplexor comerciales.

	FMU-D162136EM3 (fs)	HTF	DM32-1U01-C2160-RB (FIBERWDM)	FW-DWMD16 (fiber mall)	FIBERWDM
Número de canales	16 (C21-C36)	16 (C21-C36)	16 (C21-C36/C45-C60)	16 (C21-C36)	16 (C41-C56)
Pérdida de inserción	≤4.9 dB, 4.4 dB típica	≤3.5 dB	≤3.5 dB	≤ 4.8 dB	≤ 3.5 dB
Espaciado entre canales	100 GHz (0.8 nm)	100 GHz (0.8 nm)	100 GHz, (0.8 nm)	100 GHz (0.8 nm)	100 GHz (0.8 nm)
Tecnología	TFF (Thin Film Filter)	AAWG (Gaussian)	TFF	AAWG	TFF

ONU

En el bloque de recepción se incluyen componentes ópticos y no ópticos. Tenemos a las ONUs, dispositivos esenciales en las redes FTTx que permiten a los clientes conectarse a la red PON y recibir servicio de alta velocidad. Existen varios tipos de ONUs, cada uno diseñado para una aplicación específica en una red FTTx. La ONU convierte las señales ópticas transmitidas a través de la fibra en señales eléctricas, y aunque puede conectarse mediante par trenzado de cobre, el cable coaxial o Wi-Fi, la mayoría de las ONUs utilizan una conexión de fibra óptica para recibir señales ópticas.

Tabla C.6: ONU comerciales.

	ONU1910-1GF-W	ONU2110-8GP	OXG-680HG	OXG-99C
Potencia Tx	0.5 ~ 5 dBm	0.5 ~ 5 dBm	4 ~ 9 dBm	4 ~ 9 dBm
Sensibilidad Rx	<-28 dBm	<-28 dBm	<-28 dBm	<-28 dBm
sobrecarga Rx	--	--	-9 dBm	-9 dBm

Fibra óptica

Puede ser clasificada según varios criterios, uno de los más importantes es según el modo de propagación de la luz a través de ella, en general hay dos tipos de fibra: Fibra óptica Monomodo (SMF) y Fibra Óptica Multimodo (MMF).

En la fibra SMF la luz viaja en una sola dirección y través de un único modo de propagación, lo que significa que se produce una única trayectoria de luz en el núcleo de la fibra. Debido a su diseño de núcleo estrecho y revestimiento de baja dispersión, las señales pueden viajar a través de la fibra a velocidades extremadamente altas sin degradación de la señal. Este tipo de fibra es más adecuado para sistemas de telecomunicaciones de larga distancia y altas velocidades de transmisión, pero se requieren componentes más costosos y precisos para el acoplamiento de la luz. La Fibra Monomodo se divide en dos tipos: OS1 y OS2.

Tabla C.7: Fibra óptica monomodo comerciales.

OS2		Corning SMF-28e	Corning SMF-28e+	CF08208 Silex FIBER	FLYPRO Fiber	FTTA fs
Diámetro del núcleo/revestimiento		9/125 μm				
Recomendación		ITU-T G.652.D	ITU-T G.652.D	G.652.D/G.652.B	-	Corning G.657.A1
Atenuación max. (dB/km)	1310 nm	0.33 ~ 0.35	≤ 0.35	≤ 0.35	0.36	0.36
	1550 nm	0.19 ~ 0.20	≤ 0.20	≤ 0.24	0.22	0.22
Dispersión cromática (ps/nm*km)	1310 nm	-	-	≤ 3	-	-
	1550 nm	≤ 16	≤ 18	≤ 18	-	-
Pérdida (dB)	inserción	-	-	-	≤ 50	$\leq 50\text{B}$
	retorno	-	-	-	≥ 50	≥ 50

Amplificadores Ópticos

Los amplificadores ópticos desempeñan un papel crucial en la transmisión de señales a través de sistemas de fibra óptica. Principalmente, existen tres tipos predominantes de amplificadores utilizados en este contexto: el amplificador óptico de semiconductor (SOA), el amplificador óptico de fibra dopada con erbio (EDFA) y el amplificador de fibra Raman (RFA), siendo los EDFAs y Raman especificados en los anexos A y B, respectivamente. Los SOAs, por su parte, destacan por su respuesta rápida y capacidad de amplificación en una amplia gama de longitudes de onda, haciéndolos adecuados para aplicaciones de alta velocidad. Estos amplificadores desempeñan un papel integral en la optimización y mejora de la transmisión de datos en sistemas de comunicación óptica de alta velocidad. Además, su capacidad para operar en distintas longitudes de onda facilita la implementación de sistemas de multiplexación por división de longitud de onda (WDM), permitiendo la transmisión simultánea de múltiples señales a través de una única fibra óptica.

En la Figura C.4 se presenta el amplificador SOA diseñado específicamente para la amplificación de señales con una longitud de onda de 1310 nanómetros. Este amplificador ofrece un ancho de banda significativo, baja Figura de Ruido y la capacidad de funcionar en modo único con Control Automático de Ganancia (AGC) o Control Automático de Potencia (APC), lo que garantiza una alta estabilidad y fiabilidad en la potencia de salida. En la Tabla C.8 se presentan las especificaciones del amplificador óptico.



Figura C.4: Amplificador Óptico Semicondutor (SOA).

Tabla C.8: Características de SOA comercial.

	1310nm Semiconductor Optical Amplifier
Longitud de onda operativa	1290-1330 nm
Potencia de entrada	-15~+6dBm
Pérdida de retorno	< -45dB
Fuente de alimentación	Potencia simple/doble
Administración de redes	SNMPv1, monitor en línea
Temperatura	En funcionamiento -5 a 60 °C (23 a 140 °F) Almacenamiento -40 a 80 °C (-40 a 176 °F)
Potencia de salida saturada	8 dBm
Figura de bajo ruido	6~8 dB
Alta estabilidad y confiabilidad	MTBF >150000 horas
Interfaz de administración de red	ethernet
Tipo de chasis	1U, 2U, 4U
Alojamiento	Módulo enchufable/montaje en rack 1U 19"

Bibliografía

- [1] I.-T. Recommendation, “G.964.1: Spectral grids for wdm applications: Dwdm frequency grid,” ITU-T SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS, 10 2020.

- [2] “Dcm, 20km-120km dcf-based passive dispersion compensation module – adop,” <https://iadop.com/products/dcm-20km-120km-dcf-based-passive-dispersion-compensation-module?variant=43532897911002>.
[Online]. Available: <https://iadop.com/products/dcm-20km-120km-dcf-based-passive-dispersion-compensation-module?variant=43532897911002>

ANEXO D

Recursos en Línea

El Anexo C presenta el enlace de redireccionamiento a la carpeta en Google Drive, en el cual están los respectivos resultados de los casos de estudio y su análisis.

- Excel
<https://bit.ly/40vpDfU>
- Clasificación de Configuraciones de HOA con Mejor Desempeño
<http://bit.ly/49qC8NY>
- Análisis de Parámetros en Función de la Distancia de la Fibra Óptica
<https://bit.ly/47k9c8k>
- EDFA Booster
<https://bit.ly/46eD85a>
- EDFA Preamplificador
<https://bit.ly/3FPcqV0>
- Raman Booster
<https://bit.ly/3Sy8JeQ>
- Raman Preamplificador
<https://bit.ly/47mKJ2k>

ANEXO E

Publicación

El Anexo D presenta el artículo enviado a la comunidad científica con el propósito de que sea publicado.

- **Maria jose Bravo Reyes, Gisselle Adriana Mercado Legarda, Gustavo adolfo Gomez. Simulation-level performance analysis of a hybrid optical amplifier (HOA) for a mixed line rate next-generation network architecture.** IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
 - Estado: Escrito y enviado.