

DESEMPEÑO DE UNA ARQUITECTURA DE RED ÓPTICA DE LINEA MIXTA
ASOCIADA A LA VARIACIÓN DE LA DENSIDAD ESPECTRAL DE
INFORMACIÓN.



Universidad
del Cauca

LYSETTE DANIELA CONTRERAS YACUMAL
LEYDER ADRIAN RUIZ ROMERO

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, 2024

DESEMPEÑO DE UNA ARQUITECTURA DE RED ÓPTICA DE LINEA MIXTA
ASOCIADA A LA VARIACIÓN DE LA DENSIDAD ESPECTRAL DE
INFORMACIÓN.

LYSETTE DANIELA CONTRERAS YACUMAL
LEYDER ADRIAN RUIZ ROMERO

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, 2024

*Agradezco a Dios por haberme otorgado una familia maravillosa,
de quienes he aprendido con su ejemplo sobre unión, constancia,
esfuerzo, humildad y superación, sin duda alguna,
sin su apoyo y cariño nada de esto hubiera sido posible.*

*Agradezco especialmente a mis padres, Jorge y Cecilia,
por estar en cada etapa de mi vida y confiar en mis decisiones,
este logro es por y para ustedes.*

*A mis abuelas, hermanos, tíos, primos y sobrinos
porque de alguna manera siempre han estado presentes
en cada momento de mi vida dándome motivación
para alcanzar mis sueños.*

Lysette Daniela Contreras Yacumal

Dedico este logro a Dios por permitirme gozar esta etapa de la vida.

*A mi madre y mi abuela, quienes son el motor de mi vida,
agradezco su esfuerzo, dedicación y apoyo en todo mi proyecto de vida.*

*A mi padre, que a pesar de las adversidades siempre ha estado
para aconsejarme y apoyarme.*

*A mi familia y amigos, que me han ayudado a cumplir
objetivos tanto personales como académicos.*

Leyder Adrian Ruiz Romero

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al MsC. Gustavo Adolfo Gómez Agredo, director del trabajo de grado, por su valiosa orientación.

Al grupo de investigación de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT y al Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, por sus aportes y contribuciones en el desarrollo de este trabajo de grado.

También expresan un agradecimiento muy especial a sus familiares y amigos por su acompañamiento y apoyo incondicional, y sin los cuales, no se habría podido culminar satisfactoriamente esta etapa de nuestras vidas.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABLAS	X
LISTA DE ACRÓNIMOS	XII
INTRODUCCIÓN	XVII
ABSTRACT	XX
1. GENERALIDADES DE LAS REDES ÓPTICAS PASIVAS.	1
1.1. EVOLUCIÓN DE LAS REDES ÓPTICAS.	1
1.2. ARQUITECTURAS DE RED DE ACCESO AL SERVICIO COMPLETO - FSAN.	3
1.2.1. <i>Next Generation-Passive Optical Network 2</i> (NG-PON2)	5
1.2.2. <i>Coexistence of passive optical network systems</i> (ITU-T G.9805).	6
1.2.3. Redes Óptica Pasivas de Alta Velocidad	8
1.3. ELEMENTOS DE UNA RED PON.	10
1.3.1. Terminal de Línea Óptica (OLT, <i>Optical Line Terminal</i>)	10
1.3.2. Red de Distribución Óptica (<i>Optical Distributed Network</i> , ODN)	10
1.3.3. Terminal de Red Óptica (<i>Optical Network Terminal</i> , ONT)	11
1.3.4. Divisor Óptico (Splitter)	11
1.3.5. Fibra Óptica	12
1.3.5.1. Estandar ITU-T G.657	14
1.3.6. Topologías FTTx	15
1.3.6.1. Arquitecturas FTTx	17
1.4. REDES ÓPTICAS DE LÍNEA ÚNICA (SLR).	19
1.5. REDES ÓPTICAS DE LÍNEA MIXTA (MLR)	20
1.5.1. Componentes esenciales de una red MLR	22
1.6. DENSIDAD ESPECTRAL DE LA INFORMACIÓN (ISD)	24
1.6.1. Teoría de la información	24
1.6.2. Eficiencia espectral	27
1.6.3. Adaptación de la teoría de la información para un régimen de propagación cuasi lineal	27

2. METODOLOGÍAS, HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN, MODELO GENERAL DE RED Y CASOS DE ESTUDIO.	32
2.1. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN Y CONTROL DEL PROYECTO	33
2.1.1. <i>Work Breakdown Structure</i> (WBS)	33
2.1.2. <i>Project Evaluation and Review Technique</i> (PERT)	34
2.1.3. Relación entre WBS y PERT en el proyecto.	35
2.2. METODOLOGÍA DE DISEÑO Y SIMULACIÓN.	36
2.2.1. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN	39
2.3. Esquema general de la red	41
2.3.1. Componentes de la red	44
2.3.1.1. Sección de transmisión	44
2.3.1.2. Sección del medio	46
2.3.1.3. Sección de recepción	47
2.3.1.3.1. Receptor óptico	48
2.3.2. Modelo general de la red (montado sobre Optsim)	49
2.3.2.1. Resultados del escenario general	51
2.4. Casos de estudio	60
3. DESEMPEÑO DE UNA ARQUITECTURA DE RED DE LÍNEA MIXTA ASOCIADA A LA VARIACIÓN DE LA DENSIDAD ESPECTRAL DE INFORMACIÓN.	62
3.1. Ajustes realizados en el sistema a partir de los resultados del escenario general	62
3.1.1. Caso 1: Variación de la grilla espectral entre los canales de 2.5 Gbps para diferentes tipos de arquitecturas FTTx	64
3.1.1.1. Análisis de resultados	66
3.1.2. Caso 2: Variación de la grilla espectral entre los canales de 10 Gbps y 2.5 Gbps para diferentes tipos de arquitecturas FTTx	79
3.1.3. Caso 3: Variación de la grilla espectral entre los canales de 40 Gbps y 10 Gbps para diferentes tipos de arquitecturas FTTx	94
3.1.4. Caso Plus: Optimización del mejor caso de estudio obtenido.	101
4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	107
4.1. CONCLUSIONES	107
4.1.1. Conclusiones sobre los resultados	107
4.1.2. Conclusiones sobre la investigación	108
4.2. RECOMENDACIONES	109
4.3. TRABAJOS FUTUROS	110
REFERENCIAS	118

LISTA DE FIGURAS

1.1.	Hoja de Ruta de estándares FSAN 2.0. Tomado de [5].	5
1.2.	Ventanas de Transmisión.Tomado de [16].	6
1.3.	Coexistencia con dispositivo externo. Tomado y adaptado de [20]. . . .	7
1.4.	Coexistencias mediante MPM. Tomado de [20].	8
1.5.	Coexistencia mediante un divisor M:N. Tomado de [20].	8
1.6.	Terminal de línea Óptico (OLT). Tomado de [28].	10
1.7.	Terminal de Red Óptica (ODN). Tomado de [30][31].	11
1.8.	Splitter modelo 1x128. Tomado de [32].	11
1.9.	Distancia y alcance de los tipos de OF. Información Tomada y adaptada de [34] [35].	13
1.10.	Alcance vs Velocidad, según el tipo de fibra. Tomado y adaptado de [37].	14
1.11.	Radio mínimo de curvatura G.652 vs G.657. Tomado y adaptado de [28] [39].	15
1.12.	Arquitecturas FTTx.Tomado de [42].	16
1.13.	Arquitecturas FTTN, FTTC/K, FTTH, FTTB. Tomado de [42].	17
1.14.	Arquitecturas FTTR, FTTP, FTTS, FTTF, FTTD, FTTA Tomado de [42].	19
1.15.	Esquema SLR-WDM. Tomado y adaptado de [50].	19
1.16.	Esquema de una red MLR-WDM. Tomado y adaptado de [55].	20
1.17.	Velocidad vs alcance en una red MLR. Tomado y adaptado de [55] [56].	21
1.18.	Conector óptico cruzado. Tomado y adaptado de [53].	23
1.19.	Ganancia de un EDFA para diferentes potencias de entrada. Tomado y adaptado de [65].	23
1.20.	Tranceptor óptico. Tomado de [28].	24
1.21.	Diagrama de Canal discreto sin memoria. Tomado y adaptado de [68]. .	25
1.22.	Espaciamiento Óptico vs Ancho de Banda de Canal. Tomado de [68]. .	29
1.23.	Relación de Comportamiento Óptico en términos de la Teoría de la Información. Tomada de [68].	30
2.1.	Diagramas de representación WBS. Tomado y adaptado de [76].	33
2.2.	Grafo de actividades.	35
2.3.	Ciclo de diseño de red e implementación (Top-Dow Network Design). .	37
2.4.	Diagrama de flujo de simulación.	38
2.5.	Logo OptSim.	39
2.6.	Atenuación y dispersión cromática de SMF[15].	42
2.7.	Representación del diseño del plan de canalización.	44
2.8.	Representación y configuración del transmisor en Optsim.	46
2.9.	Representación y configuración del medio en Optsim.	47
2.10.	Representación y configuración del receptor en Optsim.	49
2.11.	Representación del Escenario General en Optsim.	50

2.12. Resultados espectro óptico en configuración Back To Back.	52
2.13. Resultados diagrama de ojo y espectro óptico en el receptor.	53
2.14. Medición OSNR en espectro óptico en Ch_2	55
2.15. Resultados diagrama de ojo al variar la compensación.	56
2.16. Resultados diagrama de ojo en el receptor para una compensación de 96 %. 56	
2.17. Medición de BW dedicado en Ch_6	58
2.18. Medición de BW distribuido en el sistema.	59
2.19. Espectro DWDM del escenario general.	60
2.20. Casos de estudio.	61
3.1. Factor Q Vs. Potencia para elección de potencia del láser.	63
3.2. Diagrama del ojo del Ch_5 con potencia de láser de 4 dBm.	64
3.3. Representación de la variación de Δ_{v1} para el caso 1.	65
3.4. Espectro del <i>Throughput</i> inicial para arquitectura FTTC.	66
3.5. Desempeño del Factor Q ante la variación de Δ_{v1} , Arq. FTTC.	67
3.6. Diagramas de ojo para todos los valores de Δ_{v1} , Arq. FTTC.	68
3.7. Presencia de efecto XPM en canales de 2.5 Gbps, Arq. FTTC.	68
3.8. Presencia de efecto XPM en canales de 40 y 10 Gbps.	69
3.9. BW a nivel de transporte Vs. BW en canales dedicados, Arq. FTTC.	70
3.10. Espectro DWDM para $\Delta_{v1}=100$ GHz y $\Delta_{v1}=50$ GHz, Arq. FTTC.	71
3.11. Espectro DWDM para $\Delta_{v1}=12.5$ GHz, Arq. FTTC.	73
3.12. Resultados de los canales 4, 5 y 6 para un $\Delta_{v1}=12.5$ GHz en Arq. FTTC. 74	
3.13. Desempeño del Factor Q y OSNR ante la variación de Δ_{v1} en Arq. FTTC y FTTF.	75
3.14. Potencia Rx Vs. variación Δ_{v1} en Arq. FTTC y FTTF.	76
3.15. Comparación de $\Delta_{v1}=100$ GHz y $\Delta_{v1}=12.5$ GHz en canales 4, 5 y 6 para una Arq. FTTF.	76
3.16. Medición de BW_{ded} en Arq. FTTC y FTTF.	77
3.17. Representación de la variación de Δ_{v2} para el caso 2.	79
3.18. Resultados iniciales de comparación para el caso 2.	80
3.19. Comparación de espectro DWDM para $\Delta_{v2}=100$ GHz y $\Delta_{v2}=50$ GHz.	82
3.20. Comparación de espectro en Ch_2 Y Ch_5 para $\Delta_{v2}=50$ GHz.	83
3.21. Comparación del diagrama de ojo en Ch_2 , Ch_3 , Ch_4 y Ch_5 para $\Delta_{v2}=50$ GHz.	84
3.22. Representación de la variación de $\Delta_{v2}=25$ GHz para el caso 2.	85
3.23. Resultado espectral en Ch_4 y Ch_5 para $\Delta_{v2}=25$ GHz.	86
3.24. Comparación del diagrama de ojo en para $\Delta_{v2}=50$ GHz y $\Delta_{v2}=25$ GHz. 87	
3.25. Variación de $\Delta_{v2}=12.5$ GHz para Arq. FTTC.	88
3.26. Comparación en Ch_2 , Ch_3 , Ch_4 y Ch_5 para $\Delta_{v2}=12.5$ GHz.	89
3.27. Resultado espectral en <i>Throughput</i> para Arq. FTTF.	90
3.28. Comparación entre $\Delta_{v2}=100$ GHz y $\Delta_{v2}=25$ GHz en Arq. FTTF.	91
3.29. Comparación entre $\Delta_{v2}=100$ GHz y $\Delta_{v2}=25$ GHz en Arq. FTTF.	92
3.30. Resultado espectral en <i>Throughput</i> para Arq. FTTF.	92

3.31. Comparación de espectro para $\Delta_{v2} = 100$ GHz y $\Delta_{v2} = 12.5$ GHz en Arq. FTTF.	93
3.32. Comparación de BW_{ded} y BW_{dis} en arquitecturas FTTC y FTTF.	93
3.33. Representación de la variación de Δ_{v3} para el caso 3.	94
3.34. Resultados iniciales de comparación para Arq. FTTC y FTTF.	95
3.35. Resultados iniciales de comparación para Arq. FTTC y FTTF.	96
3.36. Comparación de espectro a nivel de <i>Throughput</i> al variar Δ_{v3}	98
3.37. Comparación entre $\Delta_{v3}=100$ GHz y $\Delta_{v3}=50$ GHz en Arq. FTTF.	99
3.38. Representación de la variación de Δ_{v2} para el caso plus.	101
3.39. Configuración de filtro y receptor óptico en arquitectura FTTF.	102
3.40. Resultados finales para escenario funcional optimizado en Arq. FTTF.	103
3.41. Comparación de resultados espectrales para $\Delta_{v2} = 25$ GHz en Arq. FTTF.	104

LISTA DE TABLAS

1.1.	Comparación de los sistemas WDM. Tomada y adaptada de [3] y [4].	3
1.2.	Características de las redes PON. Tomado y adaptado de [10], [15], [20], [22] y [24].	9
1.3.	Características comerciales de la OF. Información tomada y adaptada de [28][34] [35] y [36].	12
1.4.	Variables y limitaciones en la medida de la eficiencia espectral. Tomado de [68].	30
2.1.	Características para configuración de escenario general de simulación.	49
2.2.	Valores de referencia de la configuración Back to Back.	52
2.3.	Valores obtenidos en recepción sin compensar (0 %).	54
2.4.	Valores obtenidos en recepción.	57
2.5.	Valores ISD obtenidos en el sistema.	59
3.1.	Valor promedio de OPM para Ch_2 y Ch_5 al variar la potencia del láser.	63
3.2.	Plan de canalización para variaciones entre canales de 2.5 Gbps.	65
3.3.	Valores OPM para canales de 2.5 Gbps variando Δ_{v1} , Arq. FTTC.	67
3.4.	Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v1}=100$ GHz, Arq. FTTC.	70
3.5.	Parámetros OPM para $\Delta_{v1}= 100$ GH, Arq. FTTC.	71
3.6.	Parámetros OPM para $\Delta_{v1}= 50$ GHz, Arq. FTTC.	72
3.7.	Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v1}=50$ GHz, Arq. FTTC.	72
3.8.	Parámetros OPM para $\Delta_{v1}= 25$ GHz, Arq. FTTC.	73
3.9.	Parámetros OPM para $\Delta_{v1}= 12.5$ GHz, Arq. FTTC.	73
3.10.	Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v1}=25$ GHz, Arq. FTTC.	74
3.11.	Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v1}=12.5$ GHz, Arq. FTTC.	75
3.12.	Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v1}=100$ GHz, Arq. FTTF.	78
3.13.	Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v1}=12.5$ GHz, Arq. FTTF.	78
3.14.	Plan de canalización para variaciones entre canales de 10 y 2.5 Gbps.	79
3.15.	Parámetros OPM para $\Delta_{v2}= 100$ GHz, Arq. FTTC.	81
3.16.	Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v2}=100$ GHz, Arq. FTTC.	81
3.17.	Parámetros OPM para $\Delta_{v2}= 50$ GHz, Arq. FTTC.	83
3.18.	Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v2}=50$ GHz, Arq. FTTC.	85
3.19.	Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v2}=25$ GHz, Arq. FTTC.	86
3.20.	Parámetros OPM para $\Delta_{v2}= 25$ GHz, Arq. FTTC.	88
3.21.	Parámetros OPM para $\Delta_{v2}= 12.5$ GHz, Arq. FTTC.	89
3.22.	Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v2}=12.5$ GHz, Arq. FTTC.	90
3.23.	Parámetros OPM para $\Delta_{v2}= 100$ GHz, Arq. FTTF.	91
3.24.	Parámetros OPM para $\Delta_{v2}= 25$ GHz, Arq. FTTF.	91
3.25.	Plan de canalización para variaciones entre canales de 10 y 40 Gbps.	95
3.26.	Parámetros OPM para $\Delta_{v3}= 100$ GHz, Arq. FTTF.	96
3.27.	Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v3}=100$ GHz, Arq. FTTF.	97

3.28. Parámetros OPM para $\Delta_{v3}= 50$ GHz, Arq. FTTF.	100
3.29. Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v3}=50$ GHz, Arq. FTTF. . .	100
3.30. Plan de canalización para caso plus variando Δ_{v2}	101
3.31. Parámetros OPM para $\Delta_{v2}=50$ GHz, Arq. FTTF.	102
3.32. Parámetros OPM para $\Delta_{v2}= 25$ GHz, Arq. FTTF.	102
3.33. Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v2}=50$ GHz, Arq. FTTF. . .	105
3.34. Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v2}=25$ GHz, Arq. FTTF. . .	105
3.35. Caracterización de red MLR de tipo NG-PON2.	106

LISTA DE ACRÓNIMOS

AON	<i>All Optical Networks</i> , Redes Completamente Ópticas.
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i> , Ruido Gaussiano Blanco Aditivo.
BER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit.
BPSK	<i>Binary PSK</i> , PSK binario.
BS	<i>Base Station</i> , Estación Base.
BW	<i>Bandwidth</i> , Ancho de Banda.
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i> , Inversión de Capital.
CD	<i>Chromatic Dispersion</i> , Dispersión Cromática.
CFP	<i>C Form-Factor Pluggable</i> , Conector en Forma de C.
CO	<i>Central Office</i> , Oficina Central.
CW	<i>Continuous Wave</i> , Onda Continua.
CWDM	<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División Aproximada de Longitud de Onda.
DB	<i>Duobinary</i> , Duobinario.
DCF	<i>Dispersion Compensating Fiber</i> , Fibra Compensadora de Dispersión.
DEMUX	<i>Demultiplexer</i> , Demultiplexor.
DFB	<i>Distributed FeedBack</i> , Retroalimentación Distribuida.
DML	<i>Directly Modulated Laser</i> , Láser de Modulación Directa.
DPSK	<i>Differential Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase.
DQPSK	<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura Diferencial.
DWDM	<i>Dense Wavelength División Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa.

EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> , Amplificador de Fibra Dopada con Erblio.
E-O	<i>Electronic - Optical</i> , Eléctrico - Óptico.
EON	<i>Elastic Optical Network</i> , Red Óptica Elástica.
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i> , Rejilla de Bragg de fibra.
FP	<i>Fabry Perot</i> , Fabry Perot.
FSAN	<i>Full Service Access Network</i> , Red de Acceso de Servicio Completo.
FTTA	<i>Fiber To The Antenna/Air</i> , Fibra Hasta La Antena/Aire.
FTTB	<i>Fiber To The Building</i> , Fibra Hasta El Edificio.
FTTC/K	<i>Fiber To The Cabinet/Kerb</i> , Fibra Hasta El Gabinete/Borde.
FTTD	<i>Fiber To The Desk</i> , Fibra Hasta El Escritorio.
FTTF	<i>Fiber To The Floor</i> , Fibra Hasta El Piso.
FTTH	<i>Fiber To The Home</i> , Fibra Hasta La Casa.
FTTN	<i>Fiber To The Node</i> , Fibra Hasta El Nodo.
FTTP	<i>Fiber To The Pole</i> , Fibra Hasta El Poste.
FTTR	<i>Fiber To The Radio/Router/Room</i> , Fibra Hasta La Radio/Router.
FTTS	<i>Fiber To The Street</i> , Fibra Hasta La Calle.
FTTx	<i>Fiber To The x</i> , Fibra Hasta La x.
FWM	<i>Four-Wave Mixing</i> , Mezcla de Cuatro Ondas.
G-PON	<i>Gigabit Passive Optical Networks</i> , Redes Ópticas Pasivas con capacidad Gigabit.
HS	<i>Higher Speed</i> , Mayor Velocidad.
HSP	<i>Higher Speed PON</i> , PON de Mayor Velocidad.
ICI	<i>Intercarrier Interference</i> , Interferencia entre Portadoras.
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> , Comisión Electrotécnica Internacional.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

ISD	<i>Information Spectral Density</i> , Densidad Espectral de Información.
ISI	<i>Intersymbolic Interference</i> , Interferencia Intersimbólica.
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> , Organización Internacional de Normalización.
ISP	<i>Internet Service Provider</i> , Proveedor de Servicios de Internet.
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> , Unión Internacional de Telecomunicaciones.
LAN	<i>Local Area Network</i> , Red de Área Local.
LED	<i>Light-Emitting Diode</i> , Diodo Emisor de Luz.
LOMMF	<i>Laser Optimized MMF</i> , Fibra Multi-Modo Optimizada por Láser.
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i> , Red de Área Metropolitana.
MLR	<i>Mixed Line Rates</i> , Tasa de Línea Mixta.
MMF	<i>Multi-Mode Optical Fiber</i> , Fibra Óptica Multimodo.
MPM	<i>Multi-PON Module</i> , Módulo Óptico Multi PON.
MUX	<i>Multiplexer</i> , Multiplexor.
MW	<i>Multiple Wavelength</i> , Longitud de Onda Múltiple.
MZM	<i>Mach-Zehnder Modulator</i> , Modulador Mach-Zehnder.
NIC	<i>Network Interface Card</i> , Interfaz de Red.
NG-PON1	<i>Next Generation-Passive Optical Network 1</i> , Redes Ópticas Pasivas de Nueva Generación 1.
NG-PON2	<i>Next Generation-Passive Optical Network 2</i> , Redes Ópticas Pasivas de Nueva Generación 2.
NRZ	<i>Non Return to Zero</i> , Sin Retorno a Cero.
ODN	<i>Optical Distributed Network</i> , Red Óptica Distribuida.
O-E	<i>Optical-Electronic</i> , Óptico - Eléctrico.
OF	<i>Optical Fiber</i> , Fibra Óptica.
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal.

OLT	<i>Optical Line Terminal</i> , Terminal de Línea Óptica.
OM	<i>Optical Multi Mode</i> , Multi Modo Óptico.
ONT	<i>Optical Network Termina</i> , Terminal de Red Óptica.
ONU	<i>Optical Network Unit</i> , Unidad de Red Óptica.
OOK	<i>On-Off Keying</i> , Modulación Digital de Amplitud.
OPM	<i>Optical Performance Monitoring</i> , Monitoreo de Desempeño Optico.
OS	<i>Optical Single</i> , Monomodo Óptico.
OSNR	<i>Optical Signal-To-Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido Óptica.
OPEX	<i>Operational Expenditure</i> , Costo Operativo.
OXC	<i>Optical Cross-Connect</i> , Conector Óptico Cruzado.
PERT	<i>Project Evaluation and Review Technique</i> , Técnica de Revisión y Evaluación de Programas.
PLOAM	<i>Physical Level Operation and Maintenance</i> , Protocolo de Operación y Mantenimiento de Capa Física.
PM	<i>Phase Modulation</i> , Modulación de Fase.
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i> , Dispersión por Modo de Polarización.
PMDL	<i>Physical Medium Dependent Layer</i> , Capa dependiente del medio físico.
PON	<i>Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva.
PSK	<i>Phase Shift Keying</i> , Modulación por desplazamiento de fase.
PtP	<i>Point to Point</i> , Punto a Punto.
Q	<i>Quality Factor</i> , Factor de Calidad.
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> , Modulación de Amplitud en Cuadratura.
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> , Modulación por desplazamiento de cuadratura de fase.
RZ	<i>Return to Zero</i> , Con Retorno a Cero.
SFP	<i>Small Form-factor Pluggable</i> , Conector de Forma Pequeña.
SLR	<i>Single Line Rate</i> , Tasa de Transmisión de Línea Única.

SMF	<i>Single-Mode Optical Fiber</i> , Fibra Óptica Monomodo.
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido.
SOA	<i>Semiconductor Optical Amplifier</i> , Amplificador Óptico Semiconductor. e
SPM	<i>Self Phase Modulation</i> , Auto Modulación de Fase.
SPT	<i>Spectral Propagation Technique</i> , Técnica de Propagación Espectral.
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Tiempo.
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Tiempo.
TWDM	<i>Time and Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Tiempo y Longitud de Onda.
UDWDM	<i>Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda Ultra Densa.
VBS	<i>Variable Bandwidth Simulation Technique</i> , Técnica de Ancho de Banda Variable.
VCSEL	<i>Vertical-Cavity Surface-Emitting laser</i> , Láser Emisor de Superficie de Cavidad Vertical.
WAN	<i>Wide Area Network</i> , Red de Área Amplia.
WBS	<i>Work Breakdown Structure</i> , Estructura de Desglose del Trabajo.
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> , .
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i> , Fidelidad Inalámbrica.
WP	<i>Work Package</i> , Paquete de Trabajo.
XG-PON	<i>10 Gigabit - Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva de 10 Gigabit.
XGS-PON	<i>10 Gigabit Symmetrical - Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva a 10 Gigabit Simétricos.
XPM	<i>Cross-Phase Modulation</i> , Modulación de Fase Cruzada.

INTRODUCCIÓN

El incremento exponencial de internet a nivel global y la alta demanda de información debido a la incorporación de nuevos servicios y aplicaciones ponen a prueba diversos aspectos de los actuales despliegues de redes de telecomunicaciones, a causa del aumento de requisitos por parte de los usuarios finales que esperan una respuesta inmediata en los procesos de carga y descarga. De acuerdo con el informe anual de Internet de Cisco se prevé que al finalizar este año se experimente un aumento de los usuarios conectados al 66 % partiendo del 51 % obtenido en el 2018, lo que refleja la constante evolución gracias a las mejoras continuas que se tienen al incorporar la fibra óptica y arquitecturas FTTx.

La demanda por un mayor ancho de banda y una alta capacidad de transmisión se asocia al acceso simultáneo de dichos servicios y aplicaciones, por lo que los sistemas actuales están basados en fibra óptica y específicamente en *Passive Optical Network* (PON) ya que, además de ser energéticamente eficientes y compatibles con DWDM, han demostrado la gran capacidad de ir a la par ante los altos cambios de tráfico de datos y ancho de banda en los últimos años.

Otro de los factores que ha contribuido a la rápida evolución en las redes es la implementación de tasa de línea mixta (MLR), que permite una transición gradual hacia velocidades de transmisión más altas. Esto posibilita que en una misma red coexistan velocidades bajas y altas, introduciendo consigo el concepto de rejilla flexible y, en consecuencia, el de densidad espectral de información (ISD) que se asocia a la granularidad presentada en el transporte de información en una red óptica. La variación de la ISD permite en principio, determinar qué tan óptima resulta representar una cantidad de información en un ancho de banda determinado por la capacidad del sistema a nivel de transporte.

En el artículo titulado “Adaptación de la Teoría de la Información para el Régimen de Propagación Lineal de una Red Óptica DWDM de Próxima Generación”, se ha propuesto una ecuación basada en la teoría de la información de Shannon para medir la ISD, donde el análisis planteado solo se realiza en enlaces homogéneos y difiere con el trabajo de grado titulado “Medida de la eficiencia espectral de una arquitectura de red heterogénea de tipo NG-PON para un régimen de propagación cuasilineal”, también desarrollado en la Universidad del Cauca, en el que se presentan escenarios basados en redes heterogéneas, es decir, redes con diferentes capacidades a nivel de acceso llevado a cabo en un régimen de propagación cuasi lineal. Sin embargo, aunque los cálculos son en base a la misma ecuación y los resultados acordes a su investigación, el *throughput* de la red en ninguno de los casos superó los 80 Gbps y

siendo el futuro aumentar la capacidad de transporte, es oportuno realizar el análisis de ISD y los parámetros OPM en una red heterogénea basada en la red de acceso NG-PON2 en un régimen de propagación cuasi lineal para un *throughput* mayor a 100 Gbps.

Teniendo en cuenta los aspectos abordados anteriormente, en esta investigación se realizará un análisis de ISD a una red óptica MLR-DWDM basada en la red de acceso óptico NG-PON2 que cuente con un *throughput* mayor a 100 Gbps. A continuación, se resumen el contenido de los cuatro capítulos que abordan el total del desarrollo del trabajo de grado.

Capítulo 1: Generalidades de las redes ópticas pasivas.

En este capítulo se registra la documentación pertinente para el desarrollo de la investigación, la cual está basada en estándares, recomendaciones y artículos relacionados con temas de interés entre los cuales se encuentra la evolución de las redes PON, hoja de ruta de FSAN, el estándar de NG-PON2, elementos de una red óptica y sus respectivas recomendaciones de la ITU, arquitecturas FTTx, densidad espectral de la información, conceptos de fibra óptica, SLR y MLR.

Capítulo 2: Metodologías, herramienta de simulación, modelo general de la red y casos de estudio.

Dentro de este capítulo se definen las metodologías tanto de control de tareas como de tiempo y simulación. Adicionalmente, se describen las características y ventajas de trabajar con Optsim como herramienta de simulación. Posteriormente se realiza una caracterización del escenario general, se hace la elección de componentes respecto a las secciones de la red a implementar obteniendo como resultado un escenario general que permitirá el planteamiento de los casos de estudio para el desarrollo del trabajo de grado.

Capítulo 3: Análisis del Desempeño de Redes Ópticas MLR-DWDM implementando arquitecturas FTTx.

En este capítulo inicialmente se realiza el proceso de optimización de falencias detectadas en el escenario general para posteriormente simular los casos de estudio que permitirán evaluar el desempeño de la red a través de la medida de la densidad espectral de información considerando la ecuación adaptada de la teoría de Shannon para una red MLR-DWDM en base a la red de acceso NG-PON2.

Capítulo 4: Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros.

En este capítulo se presentan conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros que surgen de los resultados obtenidos en el desarrollo del presente trabajo de grado.

Palabras clave:

Velocidad de transmisión de Línea Mixta (MLR), Next Generation Passive Optical Network (NG-PON2), Fibra Hasta el Lugar (FTTx), Multiplexación por División de Longitud de onda (WDM), Monitoreo del Desempeño Óptico (OPM) y Densidad Espectral de Información (ISD).

ABSTRACT

The exponential increase of the internet at a global level and the high demand for information caused by the incorporation of new services and applications test various aspects of the current deployments of telecommunications networks, due to increased requirements on the part of the end users who expect an immediate response in the loading and unloading processes. According to the annual Cisco Internet report, it is expected that at the end of this year there will be an increase in connected users to 66% from the 51% obtained in 2018, reflecting the constant evolution attributable to the continuous improvements in networks by incorporating fiber optics and FTTx architectures.

The demand for higher bandwidth and high transmission capacity is associated with simultaneous access to such services and applications, so current networks are based on optical fibre and specifically passive optical networks (PON) since, in addition to being energy efficient and compatible with DWDM, they have demonstrated a great ability to keep up with the high changes in data traffic and bandwidth in recent years.

Another factor that has allowed rapid evolution in networks is the implementation of mixed line rate (MLR), which has facilitated a gradual transition to higher transmission speeds. MLR allows low and high speeds to coexist in the same network, introducing the concept of flexible grid and, consequently, the Information Spectral Density (ISD) associated with the granularity presented in the transport of information in an optical network. The variation of the ISD allows in principle to determine how optimal it is to represent a quantity of information in a bandwidth, which is determined by the capacity of the system in terms of transport.

In the article entitled “Adaptación de la Teoría de la Información para el Régimen de Propagación Lineal de una Red Óptica DWDM de Próxima Generación”, an equation based on Shannon information theory has been proposed for measuring ISD, where the proposed analysis is only performed in homogeneous bonds with linear propagation and differs with the degree work entitled “Medida de la eficiencia espectral de una arquitectura de red heterogénea de tipo NG-PON para un régimen de propagación cuasilineal”, also developed at the University of Cauca, in which scenarios based on heterogeneous networks are presented, that is, networks with different capacities at the level of access carried out in a quasilinear propagation regime. However, although the calculations are based on the same equation and the results according to Shannon’s research, the network throughput in none of the cases exceeded 80 Gbps and being the future the increase in transport capacity, it is appropriate to perform an ISD and OPM parameters analysis on a heterogeneous network based on the NG-PON2 access

network at a quasilinear propagation rate for throughput greater than 100 Gbps.

Taking into account the aspects discussed above, in the development of this research, an ISD analysis will be made to an MLR-DWDM optical network based on the NG-PON2 optical access network with a throughput greater than 100 Gbps. Below is a summary of the content of four chapters that address the overall development of the degree work.

Chapter 1: Generalities of passive optical networks.

This chapter records the relevant documentation for the development of the research, which is based on standards, recommendations and articles related to topics of interest including the evolution of PON networks, FSAN's roadmap, the NG-PON2 standard, optical network elements and their respective ITU recommendations, FTTx architectures, information spectral density, optical fiber concepts, SLR and MLR.

Chapter 2: Methodologies, simulation tool, general scenario and case studies.

Inside this chapter, the methodologies for control of tasks, time and simulation are defined. In addition, the characteristics and advantages of working with Optsim as a simulation tool are described. A characterization of the general scenario is then made, the choice of components is made with respect to the sections of the network to be implemented resulting in a general scenario that will allow the presentation of the case studies for the development of the degree work.

Chapter 3: Performance Analysis of MLR-DWDM optical networks implementing FTTx architectures.

In this chapter, the process of optimizing the failures detected in the general scenario is initially carried out to later simulate the case studies that will allow to evaluate the performance of the network through the measurement of the information spectral density considering the adapted equation of the Shannon theory for a DWDM-MLR network based on the NG-PON2 access network.

Chapter 4: Conclusions, Recommendations and Future Work.

This chapter presents the conclusions, recommendations, and possible future works (investigations) that arise from the results obtained in the development of this degree work.

Keywords:

Mixed Line-Rate (MLR), Fiber To The x (FTTx), Next-Generation Passive Optical Network 2 (NG-PON2), Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM), Optical Performance Monitoring (OPM) and Information Spectral Density (ISD).

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES DE LAS REDES ÓPTICAS PASIVAS.

La fibra óptica (*Optical Fiber*, OF) ha transformado de manera exponencial y satisfactoria el campo de las telecomunicaciones a lo largo del tiempo, llevando consigo un crecimiento notable en el requerimiento de velocidad y ancho de banda (*Bandwidth*, BW) por parte de los usuarios para los actuales y futuros servicios de telecomunicaciones. Las redes ópticas pasivas (*Passive Optical Network*, PON) junto con las arquitecturas de fibra hasta la x (*Fiber To The x*, FTTx) juegan un papel importante en este ámbito como un aliado para la red de acceso, ofreciendo en una de sus últimas versiones, *Next Generation-Passive Optical Network 2* (NG-PON2), un rendimiento de hasta de 40 Gbps en redes heterogéneas, permitiendo adicionalmente analizar el comportamiento de la eficiencia espectral en un régimen de propagación cuasi lineal.

Este capítulo aborda temas relacionados con antecedentes, recomendaciones institucionales, estándares, actualizaciones, componentes, trabajos de investigación y evolución de los conceptos que abarcan el tema de las redes, específicamente de las redes de fibra óptica. Esta recopilación se incluye con el propósito de respaldar y dar soporte al proyecto de investigación en curso.

1.1. EVOLUCIÓN DE LAS REDES ÓPTICAS.

Debido a la creciente demanda de nuevos servicios, el incremento del número de usuarios y la mejora continua de los servicios existentes, fue necesario encontrar soluciones que permitieran incorporar densidades considerables de información, garantizando al mismo tiempo confiabilidad y alta velocidad de datos. Por ende, la inclusión de la fibra óptica (OF), en el despliegue de las redes, se presentó como una solución óptima gracias a las características que proporciona en términos de velocidad, eficiencia energética y distancia, las cuales son mejores en comparación con características de medios de transmisión más antiguos como, el cable coaxial y el cobre. Sin embargo, para lograr una masificación de la OF, fue necesario inicialmente reducir su costo de implementación y lograr una relación costo-eficiencia atractiva para los proveedores de servicios (*Internet Service Provider*, ISP) que permitiera solucionar, no solo tareas de gran complejidad sino también tareas cotidianas y simples que dependen exclusivamente de las telecomunicaciones.

Los ISP han optado por la implementación de PON, ya que desempeñan una

función importante como la tecnología principal en la red de acceso debido a que además de reducir considerablemente los elementos activos y el cableado necesario, se basa también en las redes de acceso óptico (*All Optical Networks*, AON), las cuales se caracteriza por ofrecer una menor atenuación, alta velocidad, fiabilidad, bajo costo de implementación, poco mantenimiento y permitir la multiplexación de varios usuarios en un solo hilo de fibra.

Dicha multiplexación inicialmente se logró mediante el acceso múltiple por división de tiempo (*Time Division Multiplexing*, TDM) que permitía a las primeras generaciones de PON, atender mediante la implementación de un splitter hasta 64 usuarios simultáneos, compartiendo la capacidad de carga y descarga en una distancia máxima de 20 Km. Sin embargo, esta solución no fue suficiente para satisfacer la creciente demanda de usuarios mencionada, ya que a medida que más usuarios compartían la capacidad disponible, era posible que se presentara congestión en la red y en el peor de los casos no se pudiera procesar la solicitud de algún usuario en particular.

En búsqueda de una solución viable que permitiera agregar más usuarios, surgieron los sistemas de multiplexación por división de longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexing*, WDM) como respuesta para las PON de próxima generación. En términos generales, WDM permite utilizar múltiples longitudes de onda en un solo hilo de fibra, logrando de esta manera aumentar no solo el número de usuarios atendidos, sino también mejorar el BW ofrecido. Es decir, cada usuario (*Optical Network Unit*, ONU) en una red PON tiene una longitud de onda reservada para la comunicación, tanto de carga como de descarga, con la terminal de línea óptica (*Optical Line Terminal*, OLT), lo que permite así tener una topología virtual punto a punto (*Point to Point*, PtP).

Las redes WDM-PON se pueden clasificar según la recomendación ITU-T G.694.1 e ITU-T G.694.2 como multiplexación por división de longitud de onda densa (*Dense Wavelength Division Multiplexing*, DWDM) y multiplexación por división aproximada de longitud de onda (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CWDM) respectivamente. Siendo DWDM la adecuada para cubrir mayores distancias (mediante la implementación de amplificadores) y ofrecer mejor BW al usuario. DWDM está definida en la recomendación de la ITU-T G.694.1, documento donde se establecen los planes espectrales de operación para el rango de longitudes de onda aproximadamente entre 1530.0413 nm y 1624.8914 nm para trabajar en las bandas ópticas C y L con 320, 160, 80 y 40 longitudes de onda separadas entre sí respectivamente por 0.1nm (12.5GHz), 0.2nm (25GHz), 0.4 nm (50GHz) y 0.8nm (100 GHz)[1], esta recomendación también permite otras separaciones entre longitudes de onda siempre y cuando sean múltiplos de 100 GHz como el espaciamiento de 1.6nm (200GHz). Cabe resaltar que aunque las longitudes de onda son combinadas para la transmisión, se puede realizar un proceso de recepción individual gracias a la implementación de nodos de conmutación óptica.

Por otro lado, CWDM establece los planes espectrales en la recomendación ITU-T G.694.2, donde se describe un rango de longitudes de onda entre 1271 nm y 1611 nm

con un espaciamiento entre canales de 20 nm (2500 GHz), permitiendo obtener hasta 18 longitudes de onda a una distancia máxima aproximada a 120 Km, ya que no cuenta con ningún tipo de amplificación [2].

En la tabla 1.1 se presenta un cuadro comparativo de características relevantes entre los tipos de sistemas WDM.

Parámetro	CWDM	DWDM (LAN/WAN)	DWDM (Largo alcance)	UDWDM
Ventana de trabajo	O, E, S, C, L	C, L	C, L, S	C, L
Canales por fibra	4 a 16	32 a 80	80 a 160	Hasta 1024
Espaciado entre canales	20nm (2500GHz)	0.8nm (100GHz)	0.4nm (50GHz)	Hasta 0.1nm (12.5 GHz)
Capacidad por canal	2.5 Gbps	10 Gbps	10 a 40 Gbps	Hasta 40 Gbps
Capacidad de la fibra	10 a 40 Gbps	100 a 1000 Gbps	Menor a 1 Tbps	Mayor a 1Tbps
Distancia	Hasta 80 Km	Cientos de Km	Miles de Km	Miles de Km
Amplificación óptica	N/D	EDFA	EDFA, Raman	EDFA
Coste	Bajo	Medio	Alto	Alto

Tabla 1.1: Comparación de los sistemas WDM. Tomada y adaptada de [3] y [4].

Otro factor importante en la mejora significativa del rendimiento general y la capacidad de ancho de banda para los usuarios de las redes PON fue la implementación de la topología FTTx, dando como resultado un aumento exponencial en el número de usuarios FTTx actuales. Esto ha optimizado la calidad y capacidad de las redes ópticas, y PON es ahora la opción más efectiva y rentable para los ISP.

1.2. ARQUITECTURAS DE RED DE ACCESO AL SERVICIO COMPLETO - FSAN.

La asociación industrial mundial de empresas operadoras de red de acceso al servicio completo (*Full Service Access Network*, FSAN) es un grupo conformado por más de 70 organizaciones entre las que se encuentran los principales proveedores de servicios de telecomunicaciones, proveedores de equipos de banda ancha y laboratorios independientes reconocidos a nivel mundial [5] que desempeñan un rol importante en el establecimiento de requisitos, la dirección estratégica y coordinación de normalización

para los sistemas de acceso óptico durante varias generaciones consecutivas de sistemas de red óptica pasiva de la unión internacional de telecomunicaciones (*International Telecommunication Union*, ITU-T) establecidas en la serie G.

El instituto de ingeniería eléctrica y electrónica (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*, IEEE), específicamente el grupo de trabajo 802.3ca, y el grupo ya mencionado FSAN (aliado de la ITU) establecen normas y buscan la compatibilidad con estándares de tecnologías ya desarrolladas, especialmente en la capa física, abordando en cada actualización los requisitos inminentes que se presentan en las redes ópticas actuales. Aunque estos dos grupos de trabajo estandarizan las PON de manera separada tratan de garantizar la mayor convergencia posible entre estándares tanto de una organización como de la otra.

Desde el año 1995 [6] FSAN y su grupo aliado ITU-T Q2/15 han guiado la estandarización ITU-T en sistemas ópticos [7](tomando un camino diferente a la IEEE). Continuaron con el desarrollo de estos sistemas como se puede observar en la hoja de ruta actual de FSAN, figura 1.1. En el año 2003 estandarizaron las redes ópticas Pasivas con capacidad Gigabit (*Gigabit Passive Optical Networks*, G-PON) bajo la recomendación ITU-T G.984 [8] la cual posteriormente fue actualizada en 2008 manejando tasas de bit asimétricas con 1.2 Gbps en Upstream - 2.4 Gbps Downstream y también simétricas con 2.4 Gbps en Upstream - 2.4 Gbps Downstream. No obstante con el desarrollo continuo de estos sistemas surgen los sistemas PON de Nueva Generación, para la primera fase (*Next Generation-Passive Optical Network 1*, NG-PON1), se subdivide en red óptica pasiva de 10 Gigabit (*10 Gigabit - Passive Optical Network*, XG-PON) y red óptica pasiva a 10 Gigabit simétricos (*10 Gigabit Symmetrical - Passive Optical Network*, XGS-PON) logrando estandarizar la primer subfase en el año 2009 bajo la recomendación ITU-T G.987 [9], mientras que la segunda subfase (XGS-PON) no es más que una actualización de XG-PON lograda en el año 2016 dando como resultado tasas de bit asimétrica (XG-PON) con 2.5 Gbps en Upstream - 10 Gbps Downstream y simétrica (XGS-PON) con 10 Gbps en Upstream - 10 Gbps Downstream, adicionalmente, en la actualidad se encuentra una recomendación que describe una red de acceso para aplicaciones residenciales, comerciales, de backhaul móvil, entre otras [10].

FSAN Standards Roadmap 2.0

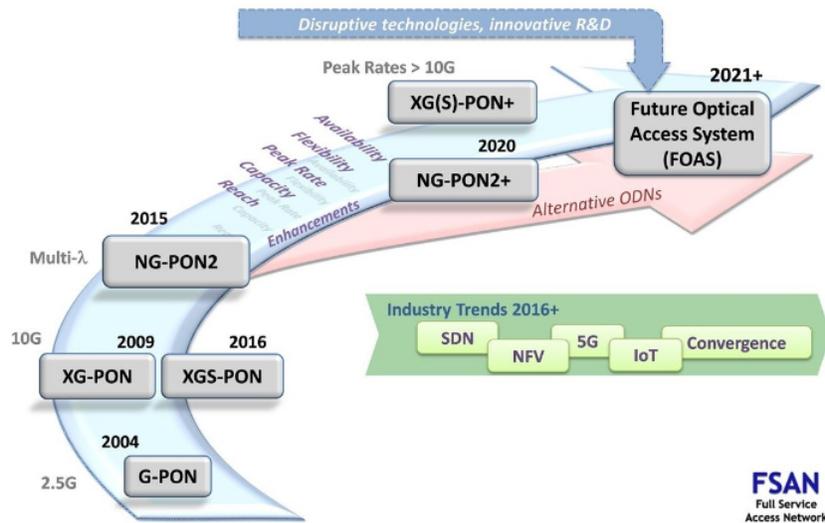


Figura 1.1: Hoja de Ruta de estándares FSAN 2.0. Tomado de [5].

1.2.1. Next Generation-Passive Optical Network 2 (NG-PON2)

La segunda fase de los sistemas PON de nueva generación (NG-PON2) está estipulada en el estándar ITU-T G.989 [11] y es la tecnología en la que el grupo de trabajo NG-PON de FSAN [12] centró sus esfuerzos para hacer esta generación compatible con versiones de sistemas heredados como se especifica en las recomendaciones ITU-T G.989.2 [13] e ITU-T G.989.3 [14]. Con el fin de aprovechar al máximo un solo hilo de OF y sus bondades, se implementan señales con longitud de onda diferente (diferente banda de trabajo. Figura 1.2), lo que permite trabajar con tasas de línea mixta (*Mixed Line Rates*, MLR) tanto en upstream como en downstream y dar una capacidad de al menos 40 Gbps especificadas en el estándar ITU-T G.989.1 [15] que permite conocer las características y requisitos generales.

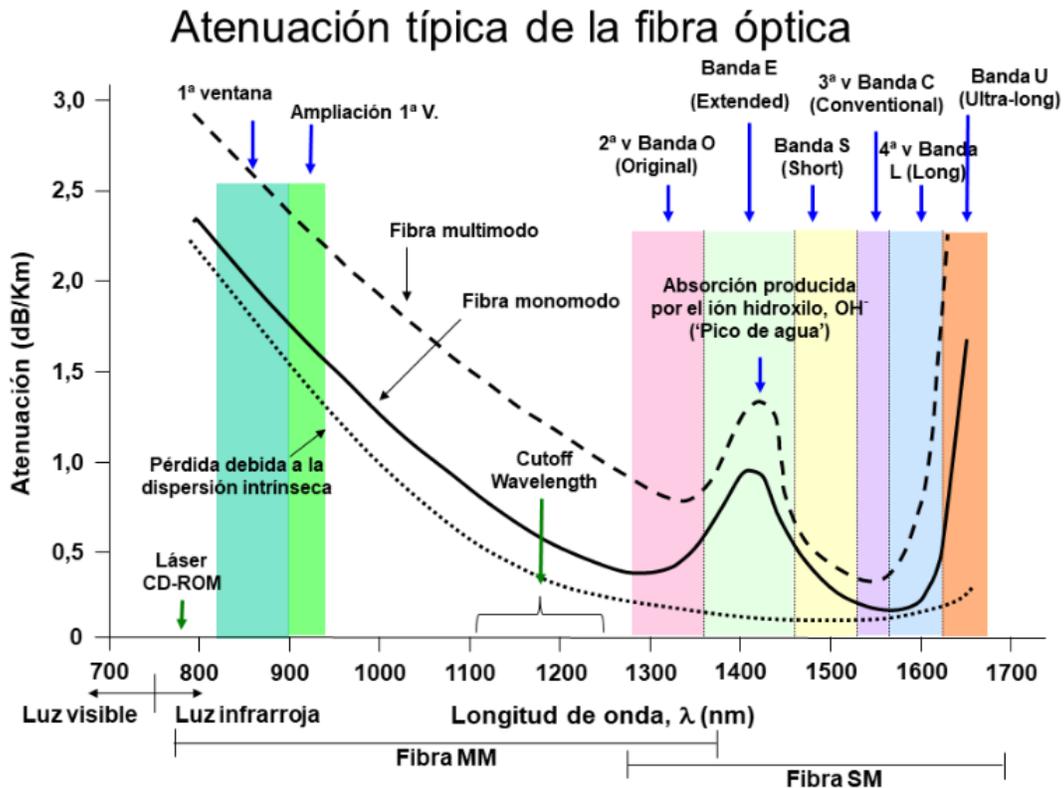


Figura 1.2: Ventanas de Transmisión. Tomado de [16].

NG-PON2 al implementar múltiples lambdas y ser un tipo de PON, está directamente involucrada con estándares como el ITU-T G.9802 [17] e ITU-T G.9802.1 [18] que se denominan “*Multiple Wavelength-Passive Optical Network (MW-PON)* y *Wavelength Division Multiplexing-Passive Optical Network (WDM-PON): General requirements*” respectivamente, los cuales especifican requisitos generales a nivel de arquitectura y de sistema como las velocidades de línea, la capacidad a nivel de *throughput*, la modularidad de los terminales de línea óptica (OLT) y de las unidades de red óptica (ONU), entre otros aspectos que son fundamentales para garantizar la convergencia de redes ópticas pasivas actuales (ITU-T G.9805 [19]).

1.2.2. *Coexistence of passive optical network systems (ITU-T G.9805).*

Esta recomendación, expedida en febrero de 2022, presenta 3 métodos para poder migrar una PON heredada a una NG-PON dentro de una misma red de distribución óptica (*Optical Distributed Network, ODN*) con el fin específico de garantizar la prestación de servicios tanto de los sistemas emergentes como los que se han trabajado hasta el momento.

Esta coexistencia descrita previamente beneficia principalmente a los prestadores

de servicios de internet (ISP) ya que protege la inversión realizada en su momento y le reduce el costo de actualización a una NG-PON. En ese sentido, este estándar además de considerar otros aspectos como filtros para redes de mayor velocidad (*Higher Speed PON* (HSP), estandarizado en el ITU-T G.9804.1 [20]) y cálculo de aislamiento para el elemento de convergencia. Se centra específicamente en los siguientes métodos de coexistencia de redes ópticas pasivas.

- **Coexistencia de longitudes de onda mediante un dispositivo externo CEx.**

Existen diversas combinaciones de OLT que ingresan al elemento de coexistencia y es uno de los principales aspectos a tener en cuenta ya que dependiendo del tipo de sistemas se asigna el aislamiento entre cada OLT, además de eso, permite conocer si el CEx ó CEMx es compatible con la aplicación que se desea realizar. A continuación, en la figura 1.3, se ilustra a manera de bloques un ejemplo de coexistencia implementando CEx.

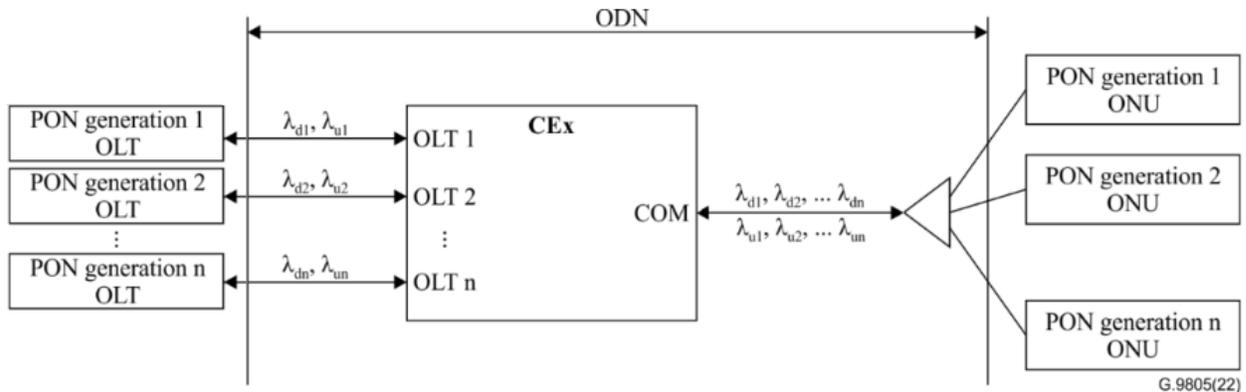


Figura 1.3: Coexistencia con dispositivo externo. Tomado y adaptado de [20].

- **Coexistencia de longitudes de onda mediante *Multi-PON Module* (MPM).**

El módulo óptico multi-PON es un elemento que permite la coexistencia de las NG-PON y las PON heredadas sin necesidad de agregar un dispositivo de coexistencia externo ya que está incluido integralmente en sus funcionalidades, la única especificación para poder usar este módulo se encuentra en la capa dependiente del medio físico (*Physical Medium Dependent Layer*, PMDL), debido a que ahí se definen los detalles de transmisión y recepción de cada tecnología PON. La figura 1.4 representa el esquema general de esta forma de coexistencia.

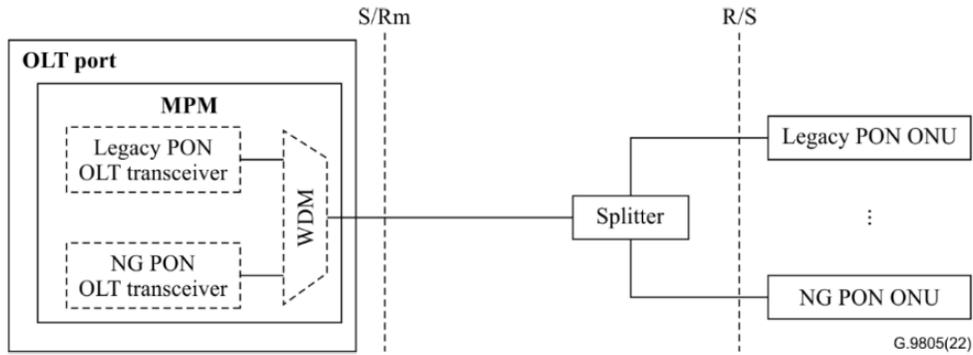


Figura 1.4: Coexistencias mediante MPM. Tomado de [20].

- Coexistencia de longitudes de onda mediante un divisor M:N** En el despliegue de infraestructura PON por parte de operadores de red generalmente se usan divisores de señal ó Splitters en cascada que permite expandir la red a usuarios finales. El divisor M:N es un dispositivo que se propone en el estándar para ubicarse próximo a las OLT de las diferentes generaciones de PON que van a converger por la ODN. La figura 1.5 ilustra el tercer método de coexistencia propuesto dentro de la recomendación.

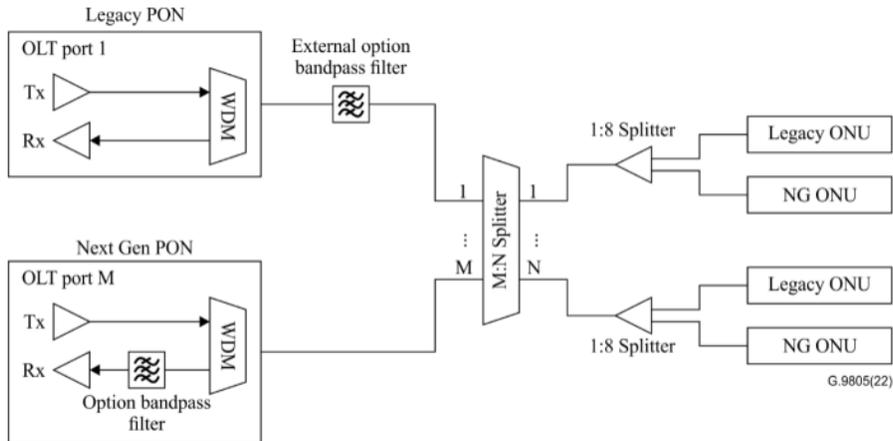


Figura 1.5: Coexistencia mediante un divisor M:N. Tomado de [20].

1.2.3. Redes Óptica Pasivas de Alta Velocidad

Las redes ópticas pasivas de alta velocidad hacen parte de las redes NG-PON y están regidas por el estándar ITU-T G.9804 publicado en el año 2019 y actualizado en 2021, la distancia máxima depende estrictamente de la aplicación, en general tiene un alcance mínimo de 20 km, sin embargo, existen aplicaciones específicas como las redes 5G que deben contar con un nivel de latencia bajo por lo que las consideraciones para esta aplicación en cuanto a distancia es de 10 km. Se caracterizan por alcanzar velocidades simétricas de aproximadamente 50 Gbps con el fin de garantizar una tasa de servicio

máxima de al menos 40 Gbps, también cuenta con configuraciones asimétricas cuyas combinaciones de velocidad de línea pueden ser [20]:

- 50 Gbps en flujo descendente y 25 Gbps en flujo ascendente.
- 50 Gbps en flujo descendente y 12.5 Gbps en flujo ascendente.
- 50 Gbps en flujo descendente y 10 Gbps en flujo ascendente.

Así como las PON heredadas, este tipo de redes debe garantizar la migración fluida con el fin de proteger la inversión realizada por los proveedores de servicios (ISP) en infraestructura [21]. Estas redes pueden ser clasificadas en HSP Básicas, las cuales utilizan acceso múltiple por división de tiempo (*Time Division Multiple Access*, TDMA) y admiten sólo un par de canales con una sola longitud de onda, y HSP multicanal basadas en multiplexación por división de tiempo y longitud de onda (*Time and Wavelength Division Multiplexing*, TWDM), que constan de múltiples pares de canales TDMA. También existen las HSP básicas punto a punto (PtP), que no estaban definidas en el estándar mencionado anteriormente, pero si fueron propuestas como un caso de estudio en el mismo. En el año 2020 se definió este caso bajo el estándar ITU-T G.9806 [22], el cual se basa en la recomendación ITU-T G.985 [23] que describe un “*Sistema de acceso óptico punto a punto de 100 Mbit/s basado en Ethernet*”. De esta manera se estableció una velocidad de transmisión de datos de 10 Gbps, que en ese momento era la velocidad más alta alcanzada en la configuración conocida como “*Sistema de acceso óptico punto a punto (HS-PtP) de fibra única bidireccional de mayor velocidad*”. Posteriormente, en octubre de 2020 y mayo de 2021, este sistema evolucionó para incluir velocidades de 25 Gbps y hasta 50 Gbps respectivamente. Estas actualizaciones fueron publicadas en febrero de 2022, y en ellas se describen los planes de longitudes de onda, la distancia alcanzable, las características del nivel físico y otras características, que se detallan en la siguiente tabla.

	G-PON	XGS-PON	NG-PON2	HSP	HSP-PtP
Estándar	ITU-T G.984	ITU-T G.9807	ITU-T G.989	ITU-T G.9804	ITU-T G.9806
Upstream (Gbps)	1.2	10	10/40	10/ 12.5/ 25/ ~ 50	10/ 25/~ 50
Downstream (Gbps)	2.4	10	40	~ 50	~ 50
Relación de división	1:64 (128)	1:128 (256)		1:256	—
Tipo de Fibra	G.652	G.652/G.657		G.657	G.657
Co-existencia	N/A	YES with G-PON			

Tabla 1.2: Características de las redes PON. Tomado y adaptado de [10], [15], [20], [22] y [24].

1.3. ELEMENTOS DE UNA RED PON.

Las redes ópticas pasivas actuales generalmente se dividen en 3 secciones fundamentales (OLT, ODN y ONU/ONT) para el despliegue de distintos tipos de arquitecturas, donde la OLT y la ONU(según la IEEE) o ONT (según la ITU) presentan diferentes características según la tecnología PON para las que han sido diseñadas y son los únicos elementos activos dentro de las redes PON. En cuanto a la ODN, además de ser la parte con mayor despliegue de infraestructura, es la responsable de llevar el servicio hasta el usuario final [25].

1.3.1. Terminal de Línea Óptica (OLT, *Optical Line Terminal*)

La OLT es un equipo activo centralizado ubicado en la oficina central (*Central Office, CO*) del proveedor de servicios de internet (ISP) que es capaz de agregar, controlar y enrutar tráfico de forma ascendente y descendente. Se considera el dispositivo principal debido a que se encuentra tanto con la red troncal como con todas las fibras de la red de acceso que se derivan hacia la ONU de cada consumidor. Para que la OLT funcione de manera adecuada debe autenticar y sincronizar cada ONU conectada, lo cual lo realiza mediante el protocolo de operación y mantenimiento de capa física (*Physical Level Operation and Maintenance, PLOAM*). [26][27]

Está conformada básicamente por la tarjeta PON, módulo de conmutación, protección de redundancia, módulos de alimentación y refrigeración, entre otros. A continuación se ilustra una OLT para una red PON de nueva generación (Figura 1.6).



Figura 1.6: Terminal de línea Óptico (OLT). Tomado de [28].

1.3.2. Red de Distribución Óptica (*Optical Distributed Network, ODN*)

La ODN es el medio de transmisión que se encarga de distribuir la señal desde la OLT ubicada en la CO hasta cada uno de los hogares, backbone, nodo u otro terminal dependiendo de la topología que se esté utilizando (FTTx), en esta red no existen equipos activos, la cual la hace una red de menor costo y energéticamente eficiente,

logrando alcanzar distancias de hasta 20 km implementando elementos pasivos como son los Splitters, tramos de fibras ópticas, empalmes y conectores [29].

1.3.3. Terminal de Red Óptica (*Optical Network Terminal*, ONT)

La ONT o también conocida como ONU es un dispositivo físico que se instala en el sitio del usuario final o cerca a este (dependiendo de la arquitectura FTTx) el cual puede servir a uno o más usuarios de forma cableada por el puerto de red de área local (*Local Area Network*, LAN) o Inalámbrica en el caso de las ONU que soportan Wi-Fi (*Wireless Fidelity*). Sus funciones principales son realizar la conversión óptica - eléctrica (*Optical-Electronic*, O-E) al recibir información en sentido descendente y eléctrica-óptica (*Electronic - Optical*, E-O) al enviar información en sentido ascendente. Un ejemplo de una ONT/ONU es la que se presenta en la Figura 1.7 [29].



Figura 1.7: Terminal de Red Óptica (ODN). Tomado de [30][31].

1.3.4. Divisor Óptico (Splitter)

Es un dispositivo que se encarga de replicar la señal (energía óptica) entrante (proveniente de la OLT o de un splitter de mayor nivel) a sus demás terminales de salida. Los niveles de atenuación son proporcionales a la cantidad de salidas que éste tenga, la relación de entrada(s) a salidas se expresa como 1:N; donde el primer número corresponde a la cantidad de entradas el cual tiene un valor típico de 1 o 2; N es el número de salidas y usualmente toma valores de 2, 4, 8, 16, 32, 64 y 128.



Figura 1.8: Splitter modelo 1x128. Tomado de [32].

1.3.5. Fibra Óptica

La organización internacional de normalización (*International Organization for Standardization*, ISO) y la comisión electrotécnica internacional (*International Electrotechnical Commission*, IEC) realizaron la norma internacional ISO/IEC 11801, que se encarga de establecer los requisitos de cableado estructurado necesarios para garantizar la funcionalidad de todos los procesos de transmisión en un sistemas de telecomunicaciones, ya sea que se esté desplegando con cable de cobre convencional o OF. La norma define a la OF con la siguiente nomenclatura: “**OM**”-*Optical Multi Mode*, para referirse a la fibra óptica multimodo (*Multi-Mode Optical Fiber*, MMF) y “**OS**”-*Optical Single*, para fibra óptica monomodo (*Single-Mode Optical Fiber*, SMF), estableciendo que los tipos de fibra óptica disponibles actualmente son: OM1, OM2, OM3, OM4, OM5 y OS1, OS2, con las características descritas en la tabla 1.3, donde el identificador numérico (2,3,4,5) en el caso de “OM” y (2) en el caso de “OS” no son más que una mejora consecutiva de su versión anterior [33].

Tipo de OF	Radio del núcleo (μm)	Longitudes de Onda (nm)	Ancho de Banda modal mínimo ($Mhz * Km$)		Atenuación máxima ($\frac{dB}{Km}$)	Distancia máxima.
			Transmisión saturada (LED)	Transmisión efectiva (Láser)		
OM1	62,5	850	200	N/D	3,5	2 Km
		1300	500		1,5	
OM2	50	850	500	N/D	3,5	
		1300	500		1,5	
OM3		850	1500	2000	3	
		1300	500	N/D	1,5	
OM4		850	3500	4700	3	
		1300	500	N/D	1,5	
OM5		850	3500	4700	3	
		1300	500	N/D	1,5	
Monomodo planta interna OS1/OS2	9	1310	N/D	N/D	1	10 Km para tipo OS1 y 200 Km para tipo OS2.
		1550			1	
Monomodo planta externa OS1/OS2		1310	N/D	N/D	0,5	
		1550			0,5	

Tabla 1.3: Características comerciales de la OF. Información tomada y adaptada de [28][34] [35] y [36].

Las fibras “**OM**” no deben exceder una distancia PtP a más de 2 Km para poder brindar velocidades entre 10 y 100 Mbps. Sin embargo, a medida que se aumenta la velocidad de transmisión, la distancia del enlace se reduce considerablemente a tal punto de que a una velocidad de canal de 40 Gbps o 100 Gbps las fibras OM1 y OM2 se quedan fuera de competencia y quienes logran suplir la necesidad son las fibras OM3, OM4 y OM5 con alcance de algunos pocos metros. Es decir, que las fibras OM1 y OM2

actualmente no funcionan para las redes de mayor velocidad, mientras que OM3, OM4, OM5 son fibras multimodo optimizadas por láser (*Laser Optimized MMF*, LOMMF) adecuadas para adaptarse a redes de fibra óptica rápidas (40 y 100 Gbps). Este tipo de fibras son diseñadas específicamente para usarse mediante la implementación de un láser emisor de superficie de cavidad vertical (*Vertical-Cavity Surface-Emitting laser*, VCSEL). Por otra parte, las fibras “OS” brindan un alcance mayor abarcando desde 10 km hasta 200 km. Actualmente en términos comerciales OS1 esta quedando obsoleta.

La figura 1.9 establece algunas características comerciales importantes de las denominadas “nuevas fibras”.

Tipo de fibra OM/OS	Core/Cladding (μm)	Fast Ethernet 10 Mb	Gigabit GbE	10Gigabit 10GbE	40Gigabit 40GbE	100Gigabit 100GbE	40Gigabit SWDM4	100Gigabit SWDM4
 OM1	62.5/125	2 Km	275 m	33 m	-----	-----	-----	-----
 OM2	50/125	2 Km	550 m	82 m	-----	-----	-----	-----
 OM3	50/125	2 Km	800 m	300 m	100 m	100 m	240 m	75 m
 OM4	50/125	2 Km	1.1 Km	400 m	150 m	150 km	350 m	100 km
 OM5	50/125	2 Km	1.1 Km	400 M	150 m	150 km	440 km	150 km
 OS1/OS2	9/125	40 Km	100 Km	40 km	40 km	40 km	-----	-----

Figura 1.9: Distancia y alcance de los tipos de OF. Información Tomada y adaptada de [34] [35].

La SMF realiza un proceso de dopaje, que consiste en agregar impurezas a la fibra de manera controlada para alcanzar el rendimiento adecuado según la aplicación. Como se puede evidenciar en la figura 1.10, el dopaje agregado hace que la fibra de este tipo tenga un mayor alcance en cuanto a distancia y velocidad, mientras que para MMF sucede lo contrario, donde a medida que se requiere mayor velocidad la distancia de alcance será cada vez menor.

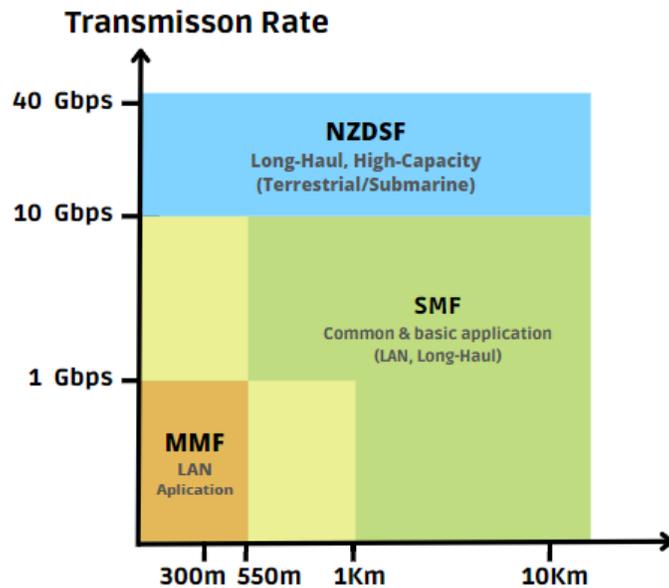


Figura 1.10: Alcance vs Velocidad, según el tipo de fibra. Tomado y adaptado de [37].

Inicialmente la OF fue normalizada por la ITU en el estándar ITU-T G.652 como la fibra óptica convencional, con mayor despliegue actual. Sin embargo, este tipo de fibra se recomienda utilizar en sistemas con requisitos de dispersión modal de polarización (*Polarization Mode Dispersion*, PMD) menos estrictos, ya que sus características son óptimas sólo cuando la fibra no se somete a ningún tipo de estrés mecánico convencional o de curvatura excesiva [38].

PMD genera interferencia intersimbólica (*Intersymbolic Interference*, ISI) a causa del ensanchamiento de los pulsos ópticos que producen a su vez un aumento considerable en la tasa de error de bit (*Bit Error Rate*, BER) degradando así el rendimiento del medio. Es entonces cómo surge la necesidad de realizar mejoras técnicas en cuanto a la manipulación de la fibra ya que actualmente, gracias a las topologías FTTx, es llevada hasta acometidas o lugares próximos al usuario final que no han sido diseñados para soportar este tipo de instalaciones. En respuesta surge el estándar ITU-T G.657 como una solución al problema.

1.3.5.1. Estándar ITU-T G.657

El estándar ITU-T G.657 no es más que una solución, al problema de radio de curvatura excesivo presente en la fibra óptica convencional. Este estándar define nuevas características que abordan la insensibilidad a la pérdida por reflexión introduciendo a las recomendaciones dos categorías la ITU-T G.657.A e ITU-T G.657.B, donde ambas contienen dos subcategorías, ITU-T G.657.A1, ITU-T G.657.A2, ITU-T G.657.B2 e ITU-T G.657.B3 respectivamente, las cuales pueden ser diferenciadas entre sí por la pérdida de macro-reflexión. El radio mínimo permitido para cada tipo de fibra se puede observar en la figura 1.11.

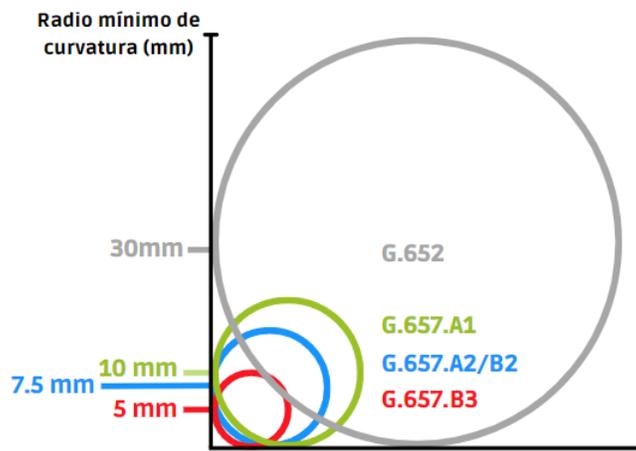


Figura 1.11: Radio mínimo de curvatura G.652 vs G.657. Tomado y adaptado de [28] [39].

El estándar permite realizar dobleces excesivos en la fibra sin ocasionar daños considerables ni generar pérdidas por atenuación adicionales, logrando soportar una curvatura de radio reducido entre 10 a 5 mm según sea el caso, recomendando principalmente su despliegue para entornos donde se debe reducir el riesgo de falla [40].

La categoría A se encarga de reducir considerablemente la pérdida de macro-reflexión, y mantener al mismo tiempo todas las propiedades de transmisión e interconexión establecidas en el estándar anterior, permitiendo utilizar esta categoría en todas las redes donde se especifica el uso de las fibras ITU-T G.652 tanto en entornos externos como internos. Por otra parte, la categoría B reduce aún más las pérdidas por macro-reflexión, y por tanto, permite radios de curvatura aún más pequeños en comparación con la categoría anterior, sin embargo, esta categoría es adecuada, sólo para distancias menores a 1 Km, como red de acceso de última milla de despliegue de FTTx [40].

Así que la fibra estandarizada en la ITU-T G.657 se presenta como una solución que permite afrontar los desafíos de las nuevas y futuras generaciones de las telecomunicaciones, aportando propiedades necesarias para eliminar las pérdidas de reflexión en sistemas DWDM caracterizados con gran ancho de banda y alta velocidad.

1.3.6. Topologías FTTx

FTTx es el término utilizado para agrupar las diferentes arquitecturas de red de banda ancha que utilizan la fibra óptica como medio de acceso en el último tramo de la red. Estas topologías se caracterizan por representar el lugar donde termina el despliegue de la fibra, y comienza el despliegue de cable convencional. La fibra hasta la “x” es un componente básico de próxima generación que describe la posibilidad de evolucionar la infraestructura para mejorar el ancho de banda, la

distancia, la velocidad y calidad del servicio que requiere un determinado cliente [41][42].

El comité europeo de despliegue y operaciones FTTH, en su edición número 9, publicada el 16 de septiembre del año 2021 y posteriormente actualiza en el 2023, confirma una vez más el interés de seguir contribuyendo en el despliegue de redes de acceso óptico FTTx, ya que las características brindadas por la OF siguen siendo esenciales hoy en día para apuntar a una conectividad siempre activa y ultra rápida de baja latencia. Agregando que la pandemia y post pandemia permitió impulsar a los operadores de cada país a realizar un mayor despliegue de OF, ante la deficiencia evidenciada durante este periodo. Sumado a esto, la actualización del 2023 agrega la posibilidad de tener redes aéreas combinadas entre fibra óptica y 5G [43].

La ventaja de implementar FTTx a través de una red PON, es que reduce significativamente el consumo de energía y disminuye la probabilidad de que se presenten cuellos de botella, como usualmente ocurre en las redes convencionales. Asimismo, también permite soportar una mayor cantidad de usuarios y dispositivos simultáneamente mediante un mismo enlace, logrando proporcionar a los usuarios servicios con gran ancho de banda a costos relativamente bajos con la capacidad de coexistir con futuras actualizaciones [41] [44]. La elección de la arquitectura depende netamente del caso a implementar, entre las principales y actuales se encuentran: fibra hasta el nodo o vecindario (*Fiber To The Node*, FTTN), fibra hasta el gabinete (*Fiber To The Cabinet/Kerb*, FTTC/K), fibra hasta el sótano, edificio o negocio (*Fiber To The Building*, FTTB), fibra hasta la casa (*Fiber To The Home*, FTTH), fibra hasta las instalaciones (*Fiber To The Pole*, FTTP), fibra hasta la calle (*Fiber To The Street*, FTTS), fibra hasta el piso (*Fiber To The Floor*, FTTF), fibra hasta el escritorio/puerta (*Fiber To The Desk*, FTTD), fibra hasta el enrutador, la habitación o la radio (*Fiber To The Radio/Router/Room*, FTTR/FTTCell), y fibra hasta la antena/aire (*Fiber To The Antenna/Air*, FTTA) [41][44] [45].

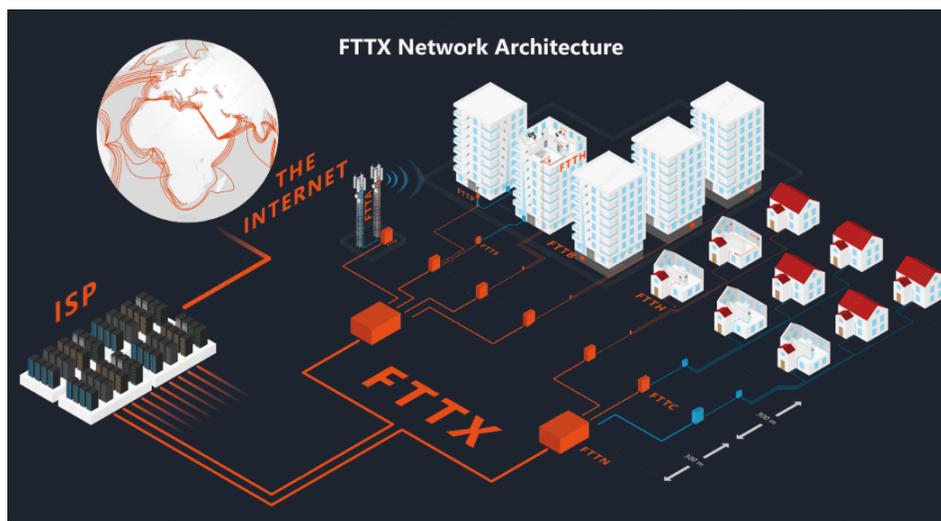


Figura 1.12: Arquitecturas FTTx. Tomado de [42].

1.3.6.1. Arquitecturas FTTx

- **FTTN (*Fiber To The Node or Neighborhood*):** Esta arquitectura realiza un despliegue de fibra óptica desde una central principal (ISP) hasta un receptor óptico (nodo), ubicado a más de 300 metros de distancia de los usuarios finales, a partir de allí es posible llegar hasta los usuarios finales mediante un despliegue de cableado convencional, permitiendo en ocasiones reutilizar la infraestructura existente [42] [41].
- **FTTC/K (*Fiber To The Cabinet/Kerb*):** Esta arquitectura se caracteriza por hacer un despliegue de fibra óptica hasta un gabinete de distribución ubicado a no más de 300 metros de los usuarios finales y a partir de allí se termina el despliegue mediante cable convencional. FTTC/K suele confundirse con FTTN por la similitud[42][41].
- **FTTH (*Fiber To The Home*):** FTTH permite utilizar fibra óptica y adapta sistemas de distribución ópticos (splitters) en un red pasiva para poder llegar hasta los clientes y ser capaz de soportar los servicios de triple Play (voz, datos y video) a grandes velocidades. Este tipo arquitectura permite llegar al menos a 2 metros de distancia desde la propiedad del cliente y actualmente dentro de FTTH puede incluirse nuevas arquitecturas como FTTF, FTTD, FTTP [42][46][42].
- **FTTB (*Fiber To The Building*):** hace referencia al despliegue de fibra óptica sólo hasta una determinada parte del edificio, en donde se ubicará una caja de distribución principal, y a partir de allí la conexión hasta los usuarios finales se hará reutilizando la infraestructura de cable coaxial, par trenzado o inalámbrica. Esta tecnología es muy utilizada en edificios residenciales, edificios empresariales, hospitales, hoteles, etc. Es muy conocido también como fiber to the basement o fiber to the business [42] [41].



Figura 1.13: Arquitecturas FTTN, FTTC/K, FTTH, FTTB. Tomado de [42].

- **FTTR (*Fiber To The Radio/Router/Room*):** FTTR puede referirse a 3 tipos de despliegue, FTTR (Fiber to de Router) es un despliegue de fibra óptica que comienza desde la central principal (ISP) hasta el Router ubicado en el hogar o FTTR (Fiber to the Room) es una arquitectura desplegada desde FTTH que permite múltiples líneas de fibra dentro de una casa “para cada habitación”. Por último está FTTR/FTTCell (Fiber to the Radio) el cual hace referencia a un despliegue de fibra óptica hasta la estación base (*Base Station*, BS) de una red de radio [42].

- **FTTP (*Fiber To The Pole*):** Este tipo de arquitectura se encarga de mejorar la disponibilidad de internet de altas velocidades desplegando la fibra hasta un punto local central estratégico cerca a una empresa o ha un conjunto residencial que les permita atender a los clientes. FTTP es un término bastante amplio que involucra otras topologías como FTTB, FTTH, FTTD, FTTR (Fiber to the Router) [42] [47] [48].

- **FTTS (*Fiber To The Street*):** Este tipo de arquitectura realiza un despliegue de fibra a máximo 200 m después de ubicado el gabinete, es decir que la fibra llega hasta un punto intermedio entre el gabinete y los clientes [42].

- **FTTF (*Fiber To The Floor*):** Hace referencia a un despliegue de fibra que llega hasta el interior de un edificio y posteriormente es dividida para llegar a los clientes mediante un despliegue de cobre convencional. El concepto es muy similar a el de FTTH difiriendo en que FTTF termina el despliegue más arriba de la planta baja [42].

- **FTTD (*Fiber To The Desk*):** Hace referencia a la fibra óptica hasta el escritorio, es utilizada donde las aplicaciones requieren capacidades adicionales a la de la red local. Es desplegada principalmente en redes corporativas, permitiendo atender, la transmisión de voz, datos y vídeo, de acuerdo a la demanda de ancho de banda requerido según la situación. Este tipo de redes permiten la reducción y optimización de los recursos, sin embargo, para hacer uso de este tipo de arquitectura es necesario realizar la instalación de tarjetas de red con entrada de fibra óptica en los equipos, la cual actualmente es de un costo elevado [42] [48].

- **FTTA (*Fiber To The Antenna/Air*):** Permite alcanzar hasta la parte superior de las antenas radio que cuenten con elementos ópticos (transceptores y receptores), dejando a un lado lo que antes se completaba con cable convencional. Las redes móviles 3G, 4G y 5G dependen de este tipo de arquitectura [42][49].



Figura 1.14: Arquitecturas FTTR, FTTP, FTTS, FTTF, FTTD, FTTA Tomado de [42].

1.4. REDES ÓPTICAS DE LÍNEA ÚNICA (SLR).

Como su nombre lo indica, una red óptica de línea única (*Single Line Rate*, SLR) se caracteriza principalmente por trabajar con una sola velocidad de transmisión en todos los canales disponibles en una red, con el fin de satisfacer la variedad de servicios requeridos por parte de los usuarios finales (figura 1.15) [44].

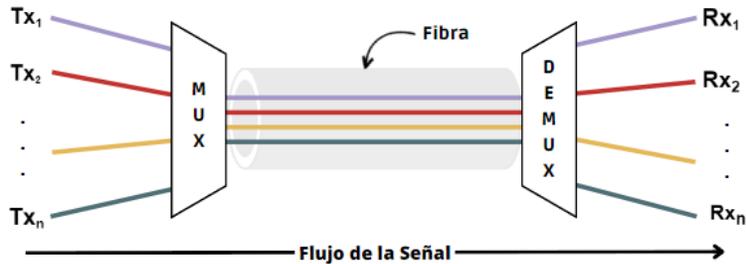


Figura 1.15: Esquema SLR-WDM. Tomado y adaptado de [50].

Este tipo de redes junto con WDM, permiten a la fibra óptica conformar las redes conocidas como SLR-WDM, donde todos los servicios ofrecidos se transmiten a una misma velocidad por un solo hilo de fibra pero con diferente asignación de longitud de onda para cada canal garantizando que las señales no interfieran de ninguna manera entre sí. La combinación de las señales para su transmisión por un solo hilo de fibra se obtiene usando un dispositivo llamado multiplexor (*Multiplexer*, MUX), mientras que para su recepción las señales combinadas llegan a un dispositivo llamado demultiplexor (*Demultiplexer*, DEMUX) que se encarga de separar o descifrar las diferentes longitudes de onda y finalmente llegar a las ONT correspondientes. [50] [51] Este tipo de redes

permite aprovechar mejor el ancho de banda del medio y aumentar la capacidad ya que en lugar de enviar y recibir una sola secuencia de datos, puede enviar y recibir muchas a el tiempo [50]

Este tipo de redes han ido evolucionando conforme las necesidades requeridas por parte del usuario, estimando en un principio valores de velocidad límites y únicos que fueron estandarizados en su momento por la unión internacional de telecomunicaciones (ITU) en aprobación en conjunto con el grupo red de acceso al servicio completo (FSAN). Evolución que se describió anteriormente en este documento [44].

1.5. REDES ÓPTICAS DE LÍNEA MIXTA (MLR)

Las MLR no son más que una consecuencia actual de la evolución constante a la que han sido sometidas las redes a lo largo del tiempo con el fin de satisfacer las necesidades de ancho de banda y eficiencia requeridas por el usuario final ante las nuevas aplicaciones, nuevos servicios y actualizaciones. Por ende, inicialmente se intentó actualizar la velocidad de las redes fijas a 10 Gbps, 40 Gbps o 100 Gbps, aumentando de esta manera considerablemente no solo la inversión de capital (*Capital Expenditure*, CAPEX), si no también el costo de operación (*Operational Expenditure*, OPEX) ya que no todos los servicios requieren de una velocidad constante a 40 Gbps o 100 Gbps para funcionar correctamente, por lo que en dichas situaciones específicas pasar de una velocidad de 2.5 Gbps o 10 Gbps a 40 Gbps o 100 Gbps causan deficiencia en el desempeño de la red y gasto innecesario de energía [52] [53].

La mejor solución costo-eficiente (CAPEX-OPEX) se presenta introduciendo el concepto de multiplexación por división de longitud de onda (WDM), para conformar así las redes MLR-WDM y específicamente para esta investigación MLR-DWDM, logrando de manera gradual migrar de redes heredadas que operan normalmente a una misma velocidad (típicamente de 10 Gbps) a redes heterogéneas compuestas por una mezcla de velocidades a 10 Gbps, 40 Gbps y 100 Gbps en una misma fibra óptica con diferentes longitudes de onda. El diseño de un red MLR consta de conectores cruzados (*Optical Cross-Connect* , OXC) y amplificadores ópticos dopados de Erblio (*Erbium Doped Fiber Amplifier*, EDFA) que admiten en una sola fibra capacidades de 10 Gbps, 40 Gbps y 100 Gbps, como se muestra en la figura 1.16 [53] [54].

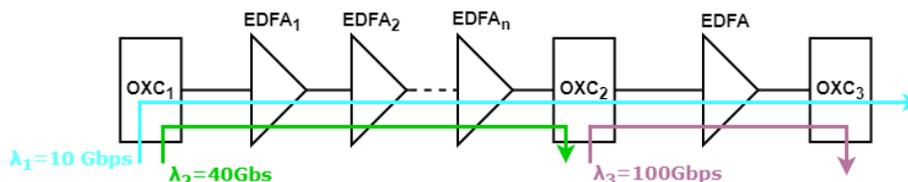


Figura 1.16: Esquema de una red MLR-WDM. Tomado y adaptado de [55].

Además, las redes MLR también admiten diferentes espaciamentos entre canales basándose en el concepto de redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Network*, EON) para permitir la mejora de la eficiencia espectral. Sin embargo, hay que tener en cuenta que ante las degradaciones inherentes de la capa física (PLI) como la modulación de fase (*Self Phase Modulation*, SPM), modulación de fase cruzada (*Cross-Phase Modulation*, XPM), mezcla de 4 ondas (*Four-Wave Mixing*, FWM), dispersión cromática (*Chromatic Dispersion*, CD) y la reducción del espaciamento entre canales el alcance de la transmisión es afectado negativamente, generando una reducción de la distancia en la transmisión con el fin de evitar degradaciones considerables en la señal, y lograr una calidad de la señal aceptable evaluada en términos del parámetro como la BER, la relación señal a ruido óptica (*Optical Signal-To-Noise Ratio*, OSNR) y factor de calidad (*Quality Factor*, Q) [52].

La figura 1.17, es una adaptación del esquema general de red NSFnet que permite visibilizar las distancias alcanzadas para una velocidad de datos determinada sin ningún tipo de regeneración. Por ejemplo, en el caso de tener una comunicación con una densidad de tráfico alta y un largo recorrido como la planteada entre el nodo 2 y el nodo 13 la comunicación estará limitada a velocidades de transmisión de 10 Gbps, ya que de esta manera es posible garantizar la mejor calidad de la señal en recepción. Mientras que a distancias más cortas como las planteadas entre el nodo 2 y el nodo 6 o entre el nodo 2 y el nodo 1 se podrán utilizar velocidades de transmisión mayores como 40 Gbps o 100 Gbps respectivamente. Sin embargo, una red MLR idealmente debería garantizar el alcance máximo de cada señal, incluso cuando es propagada con señales de diferentes velocidades, por lo tanto, para lograrlo es necesario reducir los efectos no lineales mediante la gestión de la dispersión, el plan de canales, los esquemas de modulación, la potencia de entrada, etc. [56] [55].

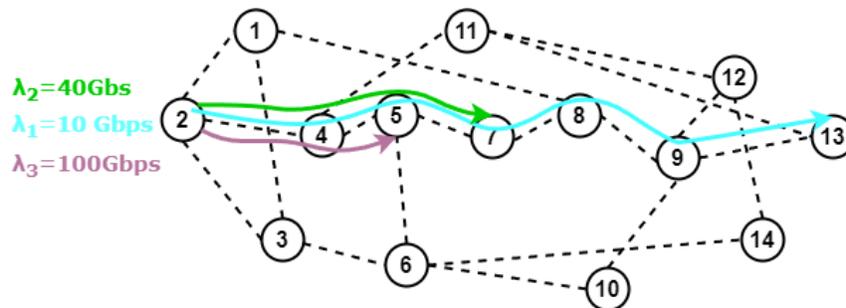


Figura 1.17: Velocidad vs alcance en una red MLR. Tomado y adaptado de [55] [56].

Estudios previos han demostrado que usar tanto técnicas de compensación para las degradaciones sufridas, como esquemas de modulación dependientes netamente de la capacidad del canal mejoran las características brindadas por la red MLR. En [57] comprueban que el efecto que mas incide en la degradación de la señal, cuando el esquema de modulación no es le adecuado, es la CD ya que este efecto incrementa a medida que la longitud de la fibra troncal es mayor. Por otra parte en [58] [59] afirman

que cuando se trata de redes MLR el efecto no lineal que más incide en la calidad de la transmisión es XPM presente cuando los canales modulados con desplazamiento de fase (*x-Phase Shift Keying*, xPSK) están relativamente cerca de los canales modulados en intensidad (*On-Off Keying*, OOK).

Con el fin de mejorar el uso de los recursos de la red cuando la tasa de bits es mayor en [60] y [58] plantean la necesidad de usar esquemas de modulación específicos para trabajar en cada velocidad de datos existente en la red, donde históricamente el esquema de modulación más utilizado es OOK el cual es usado comúnmente en velocidades bajas de 10 Gbps por su fácil implementación y los resultados obtenidos. Sin embargo, a medida que la distancia y la velocidad han ido aumentando los esquemas de modulación necesitan cada vez ser más robustos para mitigar tanto los efectos lineales como los no lineales, facilitando el incremento de velocidad sin perjudicar la integridad de la señal. Algunos de los esquemas de modulación propuestos son modulación por desplazamiento diferencial de fase (*Differential Phase Shift Keying*, DPSK) o modulación por desplazamiento de fase en cuadratura diferencial (DQPSK) usados para tasas de velocidad más altas de 40 Gbps o 100 Gbps con espaciados entre canales inferior a 50 GHz para así, brindar mejoras en la eficiencia espectral, la tolerancia a degradaciones ópticas y mayor versatilidad a la red [44].

Finalmente, es importante destacar que este tipo de red al contar con la ventaja de utilizar diferentes esquemas de modulación dependientes de la velocidad de transmisión, debe tener en cuenta las interferencias en la capa física entre los portadores de la red que viven en el mismo hilo de fibra ya que pueden reducir significativamente el alcance de la red (*Intercarrier Interference*, ICI). Por ende, es de suma importancia a la hora de realizar el proceso de diseño minimizar las degradaciones y evitar la regeneración múltiple no solo para que el costo de la red no aumente, sino para alcanzar un adecuado funcionamiento [61] [44].

1.5.1. Componentes esenciales de una red MLR

- **Conector óptico cruzado (OXC):** se encargan específicamente de conmutar y redirigir el camino de la luz. Este elemento es el responsable de realizar el enrutamiento de la longitud de onda mediante el uso de otros dispositivos ópticos como el MUX y DEMUX. En ocasiones, los OXC cuenta con un conmutador espacial que le permite reconfigurar las longitudes de onda, es decir, permite realizar un cambio de longitud de onda. De no contar con el conmutador espacial, el encaminamiento de la entrada hacia una salida será fijo y dependerá exclusivamente del puerto de ingreso y la longitud. Es importante destacar que la longitud de onda puede tener diferentes esquemas de modulación y diferentes tasas de bit. Esperando que la conexión sea del orden de los segundos, mientras que la liberación este en el orden de los milisegundos [62].

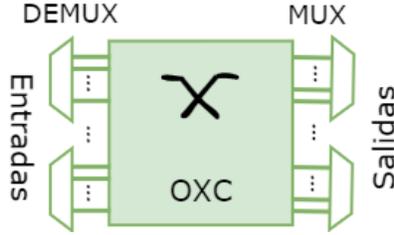


Figura 1.18: Conector óptico cruzado. Tomado y adaptado de [53].

- Amplificador de fibra dopado de Erblio (EDFA):** es uno de los amplificadores convencionales con mayor demanda actual para implementar redes de larga distancia, ya que utiliza el erbio para amplificar la potencia de las longitudes de onda, evitando así la necesidad de regeneración. Opera en la banda C, que corresponde a la tercera ventana de transmisión, abarcando desde 1530 nm hasta 1605 nm. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la ganancia proporcionada no es uniforme en todas las longitudes de onda de la ventana en la que opera, tal como se puede ver en la figura 1.19. Estos amplificadores también son compatibles con los sistemas DWDM debido a que trabajan en la misma ventana, lo cual permite tener un mayor alcance económico [63][53][64].

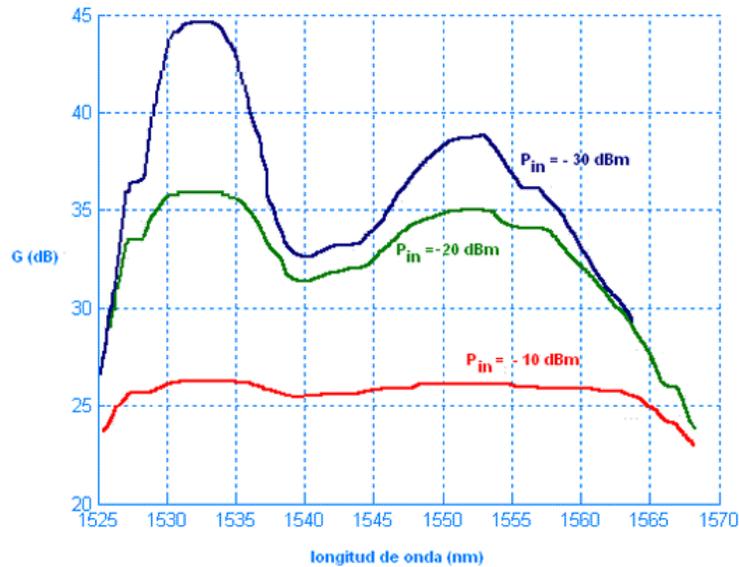


Figura 1.19: Ganancia de un EDFA para diferentes potencias de entrada. Tomado y adaptado de [65].

- Transceptor óptico:** Como su nombre lo indica el transceptor óptico es un dispositivo capaz de funcionar como transmisor o receptor según sea el caso. Estos dispositivos son utilizados principalmente para realizar las conexión o empalmes de red como: switches, tarjeta de interfaz de red (*Network Interface*

Card, NIC), servidores, conversores (necesarios para las conexiones de OF), etc. y están basados en la velocidad de transmisión para poder determinar su clasificación entre conector de forma pequeña (*Small Form-factor Pluggable*, SFP) y conector en forma de C (*C Form-Factor Pluggable*, CFP) [66].

Un transceptor por medio de los componentes electrónicos tienen la capacidad de codificar datos eléctricos como pulsos de luz para transmitir y viceversa para recibir. Los transceptores junto con la fibra óptica forman un canal de datos que introduce los dispositivos de la red a través de largas distancias [42].



Figura 1.20: Transceptor óptico. Tomado de [28].

1.6. DENSIDAD ESPECTRAL DE LA INFORMACIÓN (ISD)

1.6.1. Teoría de la información

Basándose en dos artículos previos escritos por Ralph Vinton Lyon Hartley y Harry Nyquist e introduciendo sus propios criterios, Claude E. Shannon en su artículo “*Mathematical Theory of communication*” publicado en 1948, planteó la teoría de la información, donde establece como prioridad garantizar la integridad de los datos transmitidos en el destino, introduciendo el mínimo error posible en su paso por el canal (medio físico). Según Shannon es de suma importancia considerar el canal de transmisión y las mediciones que se puedan realizar dentro de este mismo, ya que es allí donde se introducen los efectos que degradan considerablemente la señal (efectos lineales, no lineales, ruido, etc.), y por tanto, es necesario cuantificar el proceso para saber desde una perspectiva matemática cuál es la capacidad de un canal, y por consiguiente el límite de información que puede viajar de un transmisor a un receptor de manera correcta. Para ello, también establece un conjunto de conceptos fundamentales como la entropía, la redundancia y capacidad del canal, que han ayudado a evolucionar de redes heredadas a redes de nueva generación considerando que la transmisión se realiza mediante diferentes modelos de canal [67][68][69].

En el artículo, el término “información” es conceptualizado bajo el significado de la entropía, que es una medida (en bits) de la incertidumbre o la información contenida en una fuente de datos (entropía de entrada) y calculada dependiendo del modelo del canal.

En el caso de los canales discretos sin memoria y basándose en el esquema general de un sistema de comunicación de la figura 1.21 la entropía de entrada puede ser calculada como la sumatoria de la probabilidad de cada símbolo multiplicada por \log_2 de la inversa de su probabilidad (ecuación 1.1).

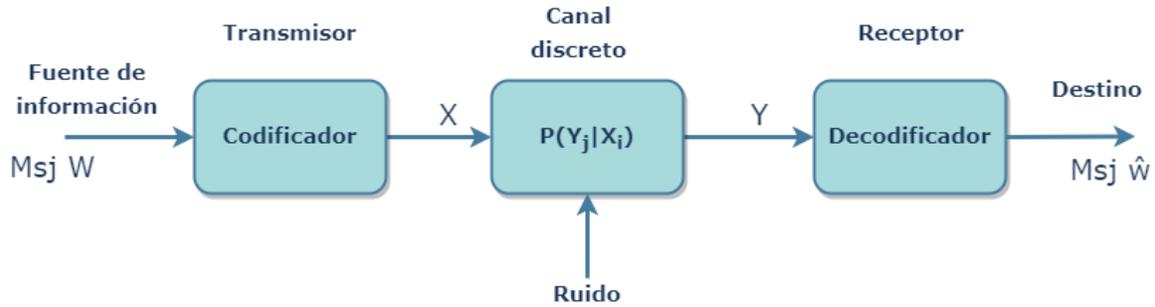


Figura 1.21: Diagrama de Canal discreto sin memoria. Tomado y adaptado de [68].

$$H(X) = \sum_{x_i \in X} P(x_i) \log_2 \left(\frac{1}{P(x_i)} \right) \quad (1.1)$$

De la misma manera para este mismo tipo de canal se obtiene la entropía de salida (ecuación 1.2), mientras que para la entropía condicional es necesario tener en cuenta la relación, en términos del \log_2 , que existe entre los símbolos de entrada $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ y los símbolos de salida $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$ que están definidos por la matriz de probabilidad condicional del canal (ecuación 1.3).

$$H(Y) = \sum_{y_i \in Y} P(y_i) \log_2 \left(\frac{1}{P(y_i)} \right) \quad (1.2)$$

$$H(X|Y) = - \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} p(x, y) \log_2 (p(x|y)) \quad (1.3)$$

De la misma manera y teniendo en cuenta que X y Y representan eventos independientes la información mutua de la entrada y la salida del canal de comunicación se denota como $H(X, Y)$ y está definida por la ecuación 1.4 [70].

$$I(X, Y) = H(Y) - H(Y|X) = H(X) - H(X|Y) \quad (1.4)$$

Donde $H(X, Y)$ es dependiente de la distribución de probabilidad de entrada $p(X_i)$, la cual a su vez depende de las características del canal bajo la probabilidad condicional de la matriz de probabilidad de estados $p(Y_i|X_i)$. Dicha descripción detalla la capacidad del canal y se puede expresar matemáticamente como la ecuación 1.5.

$$C = \max_{p(x_i)} I(X, Y) \quad (1.5)$$

Para el mismo cálculo en canales continuos sin memoria se difiere en que se realiza mediante la integración negativa de la función de probabilidad $p(X)$ multiplicada por

\log_2 de la misma función en instantes de tiempo $X = \{X_1, X_2 \dots X_n\}$ como se expresa en la ecuación 1.6.

$$h(X) = - \int_X p(X) \log_2 p(X) dX \quad (1.6)$$

Si bien los medios de transmisión no son ideales (sin ruido), para la demostración del cálculo de capacidad de los canales continuos Shannon agrega una distribución de probabilidad de tipo Gaussiano para ver la incidencia del ruido (*Additive White Gaussian Noise*, AWGN) en este tipo de canal, dando como resultado la ecuación 1.7 que expresa la capacidad de un canal Gaussiano de comunicación que maximiza la entropía de la fuente debido a dicha distribución [70].

$$C_{bit} = \frac{1}{2} \log_2 (1 + SNR) \quad (1.7)$$

En cuanto al muestreo de este tipo de canal, Nyquist propone uno de los principios clave para la recuperación de información de una señal analógica en forma de bits. Según este principio, la forma de onda debe ser muestreada a una tasa igual a $f = 2B$, donde f representa la frecuencia de muestreo y B representa el ancho de banda del canal.

Adicionalmente, si se consideran canales contiguos específicamente muestreados a dicha tasa, la capacidad del canal para transmitir se expresara como:

$$C_{bps} = 2BC_{bit} \quad (1.8)$$

Ahora, si se toma la ecuación 1.7 y se reemplaza en la ecuación 1.8, se tendrá como resultado la capacidad teórica máxima de un canal de comunicaciones dependiente del ancho de banda con AWGN limitado en términos de ancho de banda (B) y potencia de la relación señal a ruido (*Signal to Noise Ratio*, SNR) para poder garantizar el mínimo error posible (teorema de Shannon-Hartley | ecuación 1.9.)

$$C_{bps} = B \log_2 (1 + SNR) \quad (1.9)$$

Teniendo en cuenta que todos los sistemas de telecomunicaciones se van a ver afectados de una u otra forma por el ruido, haciéndose presente en el rango espectral de frecuencias de luz visible (AWGN) y afectando directamente el valor de SNR y por tanto del sistema, la potencia de la señal transmitida y la potencia del ruido en función del ancho de banda B se puede expresar como P y N_{0B} respectivamente (ecuación 1.10).

$$C_{bps} = B \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_{0B}} \right) \quad (1.10)$$

Donde N_0 representa la densidad espectral de ruido térmico o ruido blanco, calculada en función de la temperatura (T) y la constante de Boltzmann ($1,38 * 10^{-23}$), la cual relaciona la energía térmica con la energía mecánica.

1.6.2. Eficiencia espectral

En [69] y [71] la eficiencia espectral es definida como “la tasa máxima de bits alcanzable por unidad de ancho de banda”; el caso específico de la fibra óptica como medio físico, depende de factores como el esquema de modulación, la técnica de detección, el régimen de propagación, el ancho de banda, el valor de OSNR y las restricciones debido a la potencia. De manera general la eficiencia espectral está definida en términos de la capacidad del canal y el ancho de banda total ocupado (ecuación 1.11) con unidad de medida de [bps/Hz] y en cuanto más aumenta su valor mejor aprovechada estará la banda de frecuencia de transmisión.

$$\eta_{ded(bps/Hz)} = \frac{C_{N[bps]}}{BW_{ded[Hz]}} \quad (1.11)$$

1.6.3. Adaptación de la teoría de la información para un régimen de propagación cuasi lineal

En los sistemas de comunicación ópticos de nueva generación basados en WDM y particularmente para este caso DWDM, el régimen de propagación es una de los parámetros claves a controlar para poder adaptar la teoría de la información a este tipo de sistemas. De esta manera, es necesario tener en cuenta las investigaciones realizadas en la Universidad del Cauca, donde definen la eficiencia espectral en función de la capacidad de transporte de una red, tanto para el caso de redes homogéneas con propagación lineal [68], como para el caso de las redes heterogéneas con propagación cuasi lineal de tipo NG-PON1 (Primera fase) [69]. El presente trabajo de investigación retoma esa misma información con el fin de estudiar la medida de la eficiencia espectral en base a la hoja de ruta actual publicada por la FSAN (figura 1.1), centrándose así de manera específica en las redes heterogéneas con propagación cuasi lineal de tipo NG-PON2 (segunda fase). Con el fin de lograr esto, es necesario retomar la ecuación de la teoría de la información de Shannon (ecuación 1.10) donde se logra evidenciar que para garantizar el mínimo error en la medida de la capacidad en un canal afectado por AWGN, es necesario considerar los valores tanto de BW como de la SNR. Asumiendo, que si se tiene un sistema eficiente con un valor de potencia SNR bajo, este puede proporcionar un rendimiento equivalente al de otro sistema menos eficiente y de manera viceversa [69].

Además del régimen de propagación, en este tipo de sistemas, es necesario controlar otros parámetros en cada canal de transmisión para poder asegurar su óptimo funcionamiento. Entre estos parámetros están:

- El número de canales co-propagantes.
- El espaciamiento entre canales.
- La potencia de la señal de entrada.

$$C_{1[bps]} = B_{ch1} \log_2 \left(1 + \frac{P_{s-ch1}}{N_0 B} \right) \quad (1.12)$$

$$C_{2[bps]} = B_{ch2} \log_2 \left(1 + \frac{P_{s-ch2}}{N_0 B} \right) \quad (1.13)$$

Las ecuaciones 1.12 y 1.13 ejemplifican la adaptación de la teoría de información de C. Shannon para las redes NG-PON, parten de dos canales de transmisión independientes (sin que la correlación lineal y no lineal afecten el medio), modulación simple y efectos lineales generados por caídas de potencia. De esta manera y sin considerar las variaciones de la relación señal a ruido debido al cambio de longitud de onda se expresa la capacidad total del sistema (ecuación 1.14) de la siguiente manera:

$$C_{tot} = B_{ch1} \log_2 \left(1 + \frac{P_{s-ch1}}{N_0 B} \right) + B_{ch2} \log_2 \left(1 + \frac{P_{s-ch2}}{N_0 B} \right) \quad (1.14)$$

Como se ha planteado a lo largo del documento, las redes de nueva generación basadas en fibra óptica permiten multiplexar hasta 256 [15][20] longitudes de onda teóricas en un mismo hilo de fibra, en ese sentido y tomando los mismos dos canales de ejemplo, se puede expresar la capacidad total del sistema como se aprecia en la ecuación 1.15, con la particularidad de que serán múltiples canales ε de tipo i y φ de tipo j .

$$C_{tot} = \left(\sum_{i=1}^{\varepsilon} B_{chi} + \sum_{j=1}^{\varphi} B_{chj} \right) \log_2 \left(1 + \frac{P_{s-ch}}{N_0 B} \right) \quad (1.15)$$

Planteando un caso real en la ecuación 1.15 de un sistema híbrido de ε canales tipo i con 2,5 Gbps de acceso y φ canales tipo j con 10 Gbps de acceso, se puede evidenciar que la ocupación espectral de la señal por bit transmitido de canales tipo j es aproximadamente cuatro veces la ocupada por los tipo i , es decir, la longitud de onda ocupará el canal proporcionalmente al ancho de banda siempre y cuando los parámetros de configuración se mantengan constantes. De manera similar, mantener la misma relación OSNR implica que una señal tipo j necesite 4 veces más que la potencia promedio de la señal tipo i , la cual, solamente representa $\frac{1}{4}$ de energía de bit. Cabe destacar que la ecuación 1.15 Aún no tiene en cuenta el espaciamiento de los canales ópticos, ni la respuesta lineal o no lineal del medio [68].

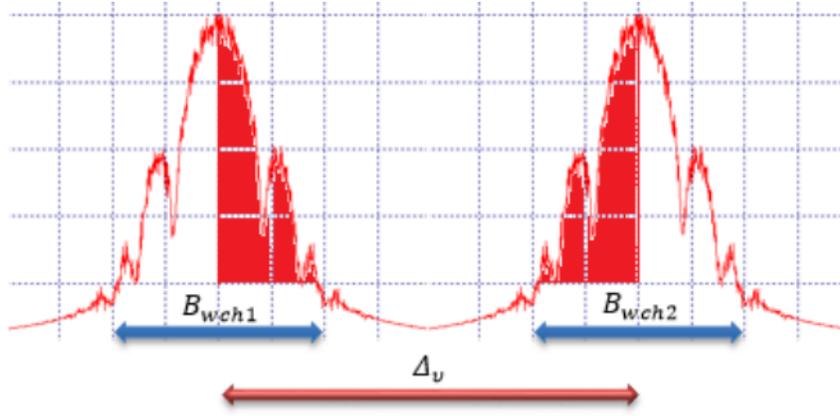


Figura 1.22: Espaciamiento Óptico vs Ancho de Banda de Canal. Tomado de [68].

Con base en la figura 1.22, la cual tiene presente el espaciamiento entre canales (Δ_v), es posible calcular el límite de la eficiencia espectral, de tal manera que si el espaciamiento entre canales adyacentes supera el ancho de banda de canales ocupados, la eficiencia espectral estaría dada como se ilustra en la ecuación 1.16.

$$\eta_{[bps/Hz]} = \frac{(C_{0Ch1[bps]} + C_{0Ch2[bps]})}{\left(\frac{B_{0Ch1[Hz]}}{2} + \frac{B_{0Ch2[Hz]}}{2}\right) + \Delta_v[Hz]} \quad (1.16)$$

Dado el caso de implementación del presente proyecto, es necesario verificar el espaciamiento implementado en un sistema DWDM de cada uno de los espectros propagantes con el objetivo de realizar el cálculo de la eficiencia espectral con valores de implementación contenidos en dicho sistema.

Si se desea sacar el máximo provecho de la capacidad de la fibra óptica, es posible controlar el espaciamiento óptico entre canales adyacentes a tal punto de disminuirlo a un límite donde la ICI no afecte la comunicación, sin embargo, el esquema de modulación y el régimen de propagación también son variables de las que depende la afectación o no de dicha interferencia. Con estas consideraciones hechas, se define la eficiencia máxima total de un sistema que implementa múltiples canales mediante la ecuación 1.17 [68].

$$\eta_{(bps/Hz)} = \frac{\sum_{i=1}^{\epsilon} B_{chi} \log_2 \left(1 + \frac{P_{s-chi}}{N_0 B}\right) + \sum_{j=1}^{\varphi} B_{chj} \log_2 \left(1 + \frac{P_{s-chj}}{N_0 B}\right)}{\frac{B_{ch1[Hz]}}{2} + \frac{B_{chj[Hz]}}{2} + (N - 1) \Delta_v[Hz]} \quad (1.17)$$

La ecuación anterior, “Adaptación de la teoría de la información para el régimen de propagación lineal en arquitecturas de red de tipo NG-PON” [68] evidencia que la eficiencia máxima total será el resultado de la capacidad total del sistema sobre la suma de la mitad de la frecuencia relativa más baja del primer canal, la mitad de la frecuencia relativa más alta del último canal óptico de la grilla espectral, más el espaciamiento por canal representado como $(N - 1)\Delta_v$, donde N representa los corrimientos en frecuencia.

En ese sentido, es posible incrementar la eficiencia espectral manipulando factores como los que se describen en la tabla 1.4.

Eficiencia espectral adaptada a los sistemas NG-PON				
C_{ch} Tasa de acceso nominal por canal.	Canales Número máximo de canales copropagantes en el medio.	Δ_v Espaciamientos por canal adyacente.	B_{ch} Ancho de banda ocupado por canal propagado.	P_s Potencia promedio por canal.
limitación				
Máximo Teórico 40 Gbps.	256 canales teóricos.	25 GHz teóricos.	Depende del formato de modulación.	Máxima penalidad en potencia.

Tabla 1.4: Variables y limitaciones en la medida de la eficiencia espectral. Tomado de [68].

Los elementos previamente mencionados se relacionan directamente en función del comportamiento de múltiples señales que se propagan conjuntamente en un medio óptico, estos ratifican la posibilidad de mejorar la eficiencia espectral, se ilustran en la figura 1.23 y están expresados en la ecuación 1.17 que será utilizada en el presente trabajo de grado con el fin de definir el comportamiento de una red heterogénea de tipo NG-PON2 para un régimen de propagación cuasi lineal en términos de la eficiencia espectral.

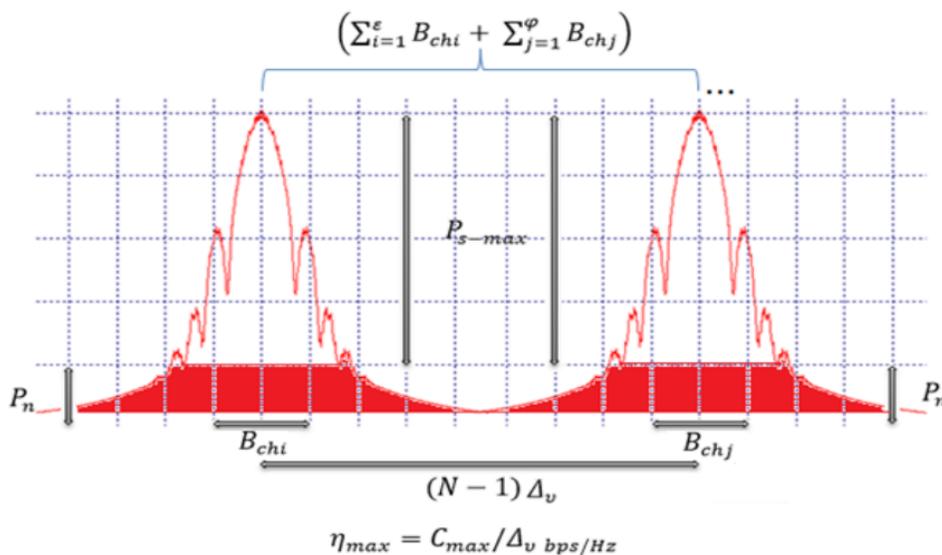


Figura 1.23: Relación de Comportamiento Óptico en términos de la Teoría de la Información. Tomada de [68].

Nota de autor:

En este capítulo se abordan los aspectos generales de las redes ópticas que más adelante permitirán elegir de manera adecuada las decisiones para el diseño de la red a analizar. Inicialmente se documenta sobre la evolución de este tipo de redes a lo largo de los últimos años, las cuales, gracias a la incorporación de la fibra óptica y las denominadas arquitecturas hasta la x (FTTx), han permitido no solo satisfacer las necesidades del usuario final si no también lograr una red energéticamente eficiente a través de las redes PON, y específicamente NG-PON2, en base a la hoja de ruta emitida por FSAN, para el desarrollo del presente trabajo de grado. Adicionalmente, se traen a colación algunas recomendación realizada por la ITU y otros entes de regulación que permiten tomar decisiones respecto a los componentes que conforman la red, no solo para que sea eficiente sino también fiable. Finalmente, se abordó el concepto de eficiencia espectral y su importancia al permitir a través de su adaptación mediante ciertas variables de control y medición, conocer el comportamiento de la ISD a través de la capacidad total de un sistema.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍAS, HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN, MODELO GENERAL DE RED Y CASOS DE ESTUDIO.

Este capítulo se enfoca principalmente en describir las metodologías implementadas para el desarrollo del proyecto de investigación, ya que la organización es de suma importancia para garantizar el cumplimiento de los objetivos propuestos. En este caso se describe, tanto la metodología “Estructura de desglose del trabajo (*Work Breakdown Structure*, WBS)” como la metodología “Técnica de Revisión y Evaluación de Programas (*Project Evaluation and Review Technique*, PERT)” para la planificación, gestión y control del proyecto. El acoplamiento de estas dos metodologías permite que WBS realice un desglose total del proyecto en paquetes de trabajo o actividades específicas, con el fin de lograr el cumplimiento de los objetivos específicos y por consiguiente, el objetivo general. Al mismo tiempo, la metodología PERT permite un control en el tiempo de ejecución de dichas actividades, facilitando la estimación del tiempo necesario para desarrollar el proyecto de inicio a fin.

En cuanto a la simulación, se va a definir el diseño general de la red mediante la adaptación de la metodología TOP-DOWN de cisco [72] y el enfoque práctico de simulación expuesto en [73]. Complementar estas dos metodologías permitirá abordar de manera real el diseño de la red. Aunque TOP-DOWN está orientada al despliegue de redes de telecomunicaciones, en virtud del alcance del proyecto, solo se implementarán las 4 primeras fases; donde las 3 primeras fases se dedican a la documentación del requerimiento para realizar inicialmente un diseño rápido del funcionamiento (transmisor, medio y receptor), y posteriormente, seleccionar los componentes de la red. En la cuarta fase “pruebas, optimización y documentación” se vincula con la metodología propuesta en “Ingeniería del software. Un enfoque práctico” para orientar el trabajo hacia la simulación de la red.

Posteriormente se realizará una descripción de la herramienta a utilizar, comparando con las herramientas más populares en el mercado abarcando información que permite aclarar el porqué de su elección. A partir de allí se concreta la información necesaria para plantear el escenario general y los casos de estudio para el análisis posterior respecto a la densidad espectral de la información, en una red óptica con arquitectura heterogénea de tipo NG-PON2 en un régimen de propagación cuasilineal.

2.1. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN Y CONTROL DEL PROYECTO

2.1.1. *Work Breakdown Structure* (WBS)

Es una metodología que, tal y como su nombre lo indica, permite desglosar de manera jerárquica un proyecto en “Paquete de Trabajo (*Work Package*, WP)”. Es decir, la metodología permite dividir y subdividir hasta donde sea necesario la totalidad del proyecto en entregables simples, detallados, entendibles y manejables para el grupo de trabajo, facilitando de manera visual el progreso, la comunicación en el grupo y la modificación en caso de que sea necesario. La importancia de esta metodología y su aporte más relevante es priorizar los paquetes de información con el propósito de evitar redundancia en aspectos secundarios del proyecto, y así poder alcanzar de manera satisfactoria los objetivos propuestos [74] [75].

WBS se encarga de ofrecer la mayor información posible de manera visual, presentando el panorama general del total del trabajo mediante la elección de uno de los dos formatos disponibles para su ejecución, Diagrama jerárquico (figura 2.1a) o Diagrama tabular (figura 2.1b), donde independientemente de la elección para dicha representación se converge a un mismo resultado orientado al éxito del proyecto. Como es un diagrama visual es posible que en un momento determinado no se recuerde el significado de algún bloque o ítem, lo cual hace necesario más adelante detallar cada bloque de información, evitando caer así en la ambigüedad.

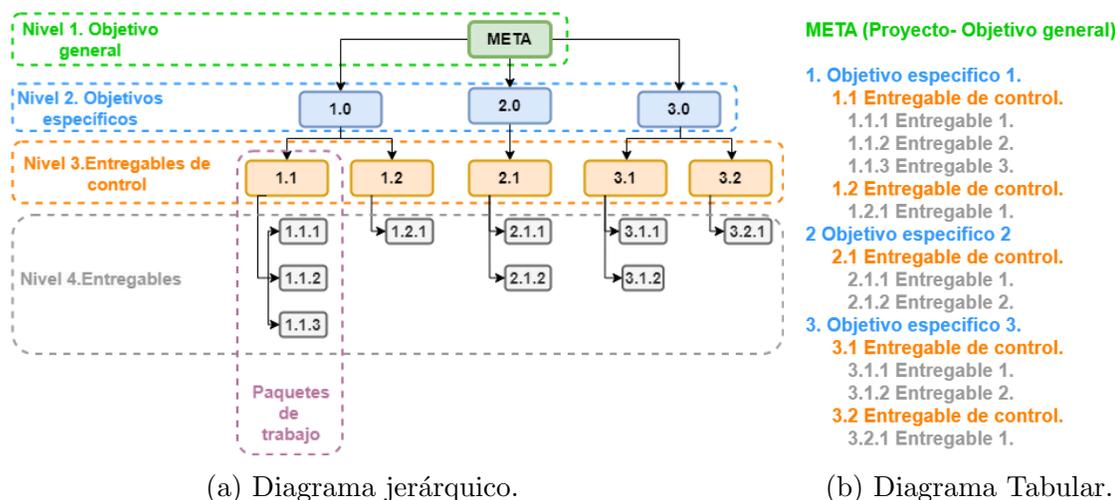


Figura 2.1: Diagramas de representación WBS. Tomado y adaptado de [76].

La jerarquización de los WP en ambos tipos de diagrama se realiza mediante niveles de prioridad, que tienen más adelante un impacto directo y positivo en aspectos relacio-

nados con otros enfoques como la estimación de recursos, tiempos y costos. Los niveles superiores de la jerarquía hacen referencia a los entregables principales del proyecto y cuentan con un alto grado de incertidumbre debido a que describen de manera muy general una gran parte de la totalidad del proyecto, mientras que los niveles inferiores hacen referencia a entregables con cierto grado de detalle, que permiten concluir y alcanzar con éxito los entregables principales o niveles superiores, y así finalizar el proyecto de manera satisfactoria [74][76][77].

2.1.2. *Project Evaluation and Review Technique (PERT)*

Los desafíos presentes en la gestión de proyectos han impulsado la adopción de metodologías como lo es PERT, su propósito es simplificar la administración, coordinación y supervisión de las distintas actividades involucradas en un proyecto con el fin de lograr exitosamente su culminación [78]. Define un modelo de seguimiento donde deben ser consideradas operaciones interdependientes e interrelacionadas para planificar proyectos e identificar flujos de trabajo optimizados, se basa en la representación gráfica de actividades en forma de diagrama de red y utiliza tres estimaciones de tiempo para cada actividad: tiempo optimista, tiempo normal o más probable y tiempo pesimista. Con esta información, el método PERT tendrá en cuenta la ponderación de dichas estimaciones para el cálculo del tiempo esperado como se ilustra en la ecuación 2.1, de la misma manera, mediante la ecuación 2.2 permite realizar el cálculo de la varianza, la cual nos indica la variabilidad esperada en la duración de una actividad.

$$T_e = \frac{T_o + 4T_n + T_p}{6} \quad (2.1)$$

$$\sigma^2 = \left(\frac{T_p - T_o}{6} \right)^2 \quad (2.2)$$

Esta metodología presenta ventajas significativas dadas las facilidades para su aprendizaje, planteamiento exacto de los procesos de realización del proyecto y manejo total sobre el tiempo del proyecto [79]. El método PERT tiene en cuenta las siguientes definiciones [80][81]:

- **Nodos:** Representan el instante de inicio y terminación de una o varias actividades.
- **Holgura:** Tiempo que se pueden retrasar las actividades sin afectar la duración total del proyecto. Se calcula como se ilustra en la ecuación 2.3

$$Holgura = FTL - FTP \quad (2.3)$$

Donde:

- *FTL*: Representa la fecha de terminación más lejana de una actividad.
 - *FTP*: Representa la fecha de terminación más próxima de una actividad.
- **Ruta crítica:** Determina la duración total del proyecto, además, las actividades que lo conforman deben realizarse necesariamente en el tiempo establecido. Una vez calculados los tiempos esperados para cada actividad, se procede a realizar el diagrama de nodos:

FIP	ACTIVIDAD	FTP
FIL	[T_e]	FTL

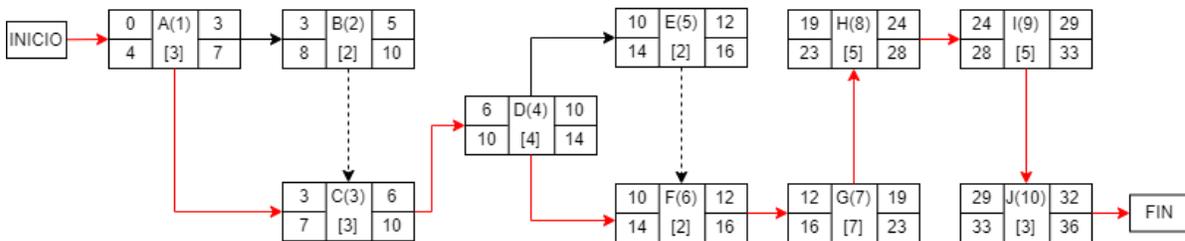


Figura 2.2: Grafo de actividades.

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.

2.1.3. Relación entre WBS y PERT en el proyecto.

La organización en cualquier tipo de proyecto, independientemente del ámbito donde se desarrolle, es vital para garantizar el cumplimiento de los objetivos establecidos. Para el caso de este proyecto en específico se opta por implementar en conjunto las metodologías WBS y PERT debido a que sus características individuales prometen complementarse satisfactoriamente con el único fin de obtener una planificación, ejecución y control del proyecto con resultados realmente eficientes.

Como se mencionó anteriormente en este documento, WBS es una metodología que en términos generales permite desglosar de manera jerárquica la totalidad del proyecto en WP, los cuales son nombrados por medio de sustantivos que aluden a procesos específicos necesarios para el desarrollo progresivo del proyecto. Sin embargo, la metodología por sí sola tiende a generar confusión en algún momento

determinado, ya que, si bien cada división y subdivisión generada para el cumplimiento de un entregable principal facilita una secuencia lógica a seguir, no precisa la información suficiente que permita controlar otros aspectos tales como las tareas y actividades necesarias para culminar un paquete de información, el tiempo estimado para la duración de un entregable, ni el cálculo de la duración total del proyecto, por lo que WBS entonces suele complementarse con metodologías orientadas a el enfoque de estimación, cálculo y control de tiempos tal como la metodología PERT.

Por otra parte, la implementación de la metodología PERT, por sí sola, para el desarrollo de un proyecto también arroja falencias y desaciertos en los resultados obtenidos debido a factores como retrasos de tiempo, asignación de tareas y sobre costos, debido a la falta de una previa descomposición de la estructura de los proyectos. Sin embargo, estos mismos aspectos son fundamentales para poder concretar actividades, tareas y tiempos en un proyecto, es por esto por lo que se elige implementar las metodologías WBS y PERT en conjunto logrando complementarse entre sí para la obtener resultados efectivos en el desarrollo de proyectos complejos.

En resumen, en la relación WBS con PERT; WBS se encarga de realizar un desglose en Paquetes de trabajo generando una ruta lógica con el fin de alcanzar los entregables principales (objetivos específicos) y posteriormente alcanzar la meta (Objetivo general), mientras que PERT se encarga de identificar las tareas y actividades correspondientes a los paquetes de trabajo para proporcionarles un tiempo de desarrollo y poder calcular el tiempo estimado que tomará realizar el proyecto de inicio a fin.

2.2. METODOLOGÍA DE DISEÑO Y SIMULACIÓN.

Con el fin de realizar la simulación en un escenario lo más cercano a la realidad, que permita satisfacer la demanda actual y la tendencia del mercado, se decide adaptar algunas de las fases de la metodología Top-Down Network Design de Cisco ilustradas en la figura 2.3 con la metodología de enfoque práctico expuesto en [73].

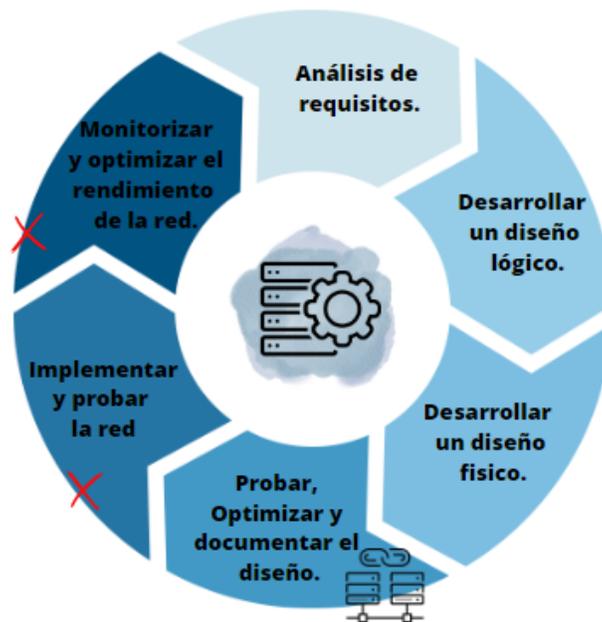


Figura 2.3: Ciclo de diseño de red e implementación (Top-Dow Network Design).

Las fases que aportan significativamente al desarrollo del proyecto son: Análisis de requerimientos, Desarrollo del diseño lógico y Desarrollo del diseño físico. La etapa de pruebas, optimización y documentación se orienta a la simulación a realizar en Optsim mediante el enfoque práctico. En ese sentido, las actividades de cada fase estarían definidas de la siguiente forma [72][73]:

- **Análisis de requerimientos:** Identificar, documentar y analizar los objetivos, necesidades, ventajas, desventajas, entre otros aspectos clave que ayudan a la planeación, organización y definen el alcance del proyecto.
- **Desarrollo del diseño lógico:** Con la información recogida se procede a definir el modelo donde se diseña la topología de la red, se seleccionan los protocolos y estrategias de mantenimiento y seguridad.
- **Desarrollo del diseño físico:** En esta fase se determinan las tecnologías a trabajar así como los dispositivos y características físicas de la red a simular.
- **Pruebas, optimización y documentación:** En esta fase se integran etapas de validación, experimentación y análisis en las cuales se evalúa el comportamiento de la red implementada comparando con resultados de simulaciones previamente realizadas para tener un punto de partida e iniciar con la experimentación que permite saber si los resultados obtenidos son los esperados o en caso de no serlo realizar más iteraciones hasta optimizar su funcionamiento, posteriormente

mediante el análisis se estudian los resultados obtenidos con el fin de sugerir posibles cambios al modelo. Finalmente se busca garantizar una guía del producto para los usuarios, por lo que se sugiere documentar permanentemente aspectos técnicos del modelo propuesto, su modo de operación y actualizaciones en cuanto a funcionamiento.

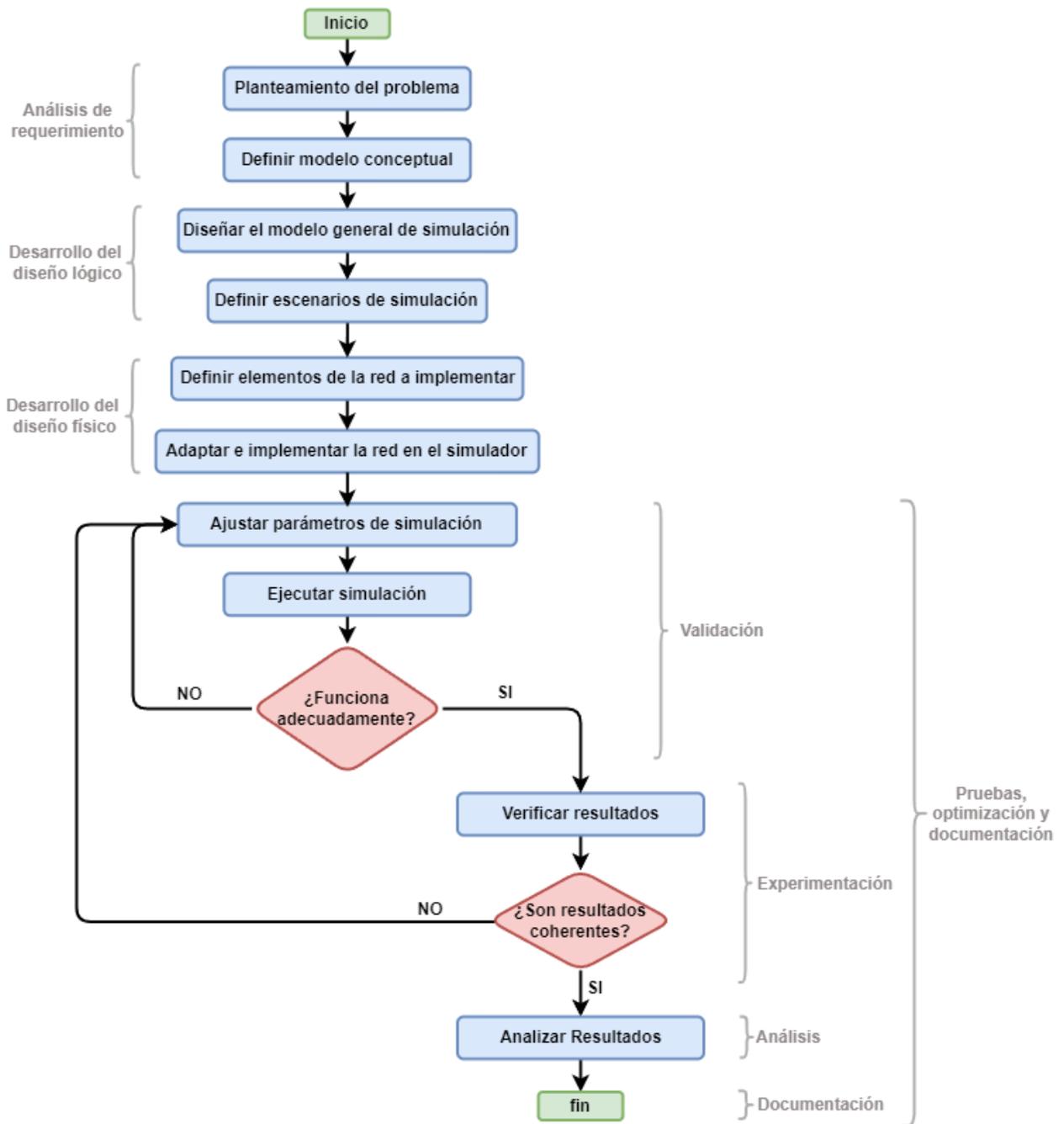


Figura 2.4: Diagrama de flujo de simulación.

2.2.1. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

Para llevar a cabo la simulación y el diseño de redes ópticas, existen en el mercado diversas herramientas de software, algunas con licencia y otras de uso libre, que permiten la implementación y evaluación del rendimiento de una red óptica. No obstante, al considerar los análisis comparativos realizados en trabajos de grado anteriores, como se evidencia en [44][69][82], donde se destacan las características y ventajas de utilizar OptSim, se parte de la premisa de que la Universidad del Cauca cuenta con la licencia necesaria para su uso. Esta herramienta está disponible tanto para sistemas Windows como para sistemas Linux, Mac Os o UNIX [83].



Figura 2.5: Logo OptSim.

OptSim es una herramienta software de fácil uso desarrollada por *RSoft Design Group* que hace parte de *Synopsys*, la cual permite la simulación y modelado de redes ópticas con diferentes características. Esta herramienta permite simular sistemas ópticos coherentes como PM-QPSK, PM-BPSK, PM-QAM, OFDM. También es capaz de simular sistemas DWDM/CWDM con amplificación óptica RAMAN, EDFA y SOA, así como formatos de modulación avanzados (PSK, *Duobinary* (DB), DPSK, etc) y sistemas FTTx/PON con una gran fiabilidad en los resultado, incluso en escenarios WDM-PON [69].

OptSim ofrece la posibilidad de diseñar y configurar redes ópticas de manera sencilla, aportando documentación (manual de usuario [84], modelos de referencia [85][86] y ejemplos [87]) que a su vez facilita el análisis de su rendimiento en transmisión al evaluar parámetros específicos del enlace. Esta herramienta es óptima especialmente para realizar pruebas y ajustes profesionales antes de la implementación física, logrando reducir costos de comercialización, ya que además de permitir un diseño cercano a la realidad, cuenta con una interfaz gráfica intuitiva que facilita la interconexión de los componentes de la red por los cuales va a fluir la información. Estos componentes son simulados de forma independiente, utilizando tanto los parámetros definidos por el usuario como la información propia de cada uno de ellos después de procesar los datos. Aunque cada componente se representa mediante un icono, internamente están definidos por algoritmos complejos que el usuario no logra percibir [88].

Una de las características fundamentales que contribuyen en el rendimiento óptimo

de OptSim es el contar con extensas y actualizadas librerías, ya que de esta manera se puede encontrar todos los componentes ópticos, optoelectrónicos y electrónicos necesarios para la construcción de una red. Estos componentes no solo están disponibles, sino que también cuentan con características específicas e iguales a las de los componentes que se encuentran en el mercado. Estas librerías también cuentan con una actualización constantemente que logra mantener al simulador en vanguardia incorporando nuevas características y nuevos componentes para mejorar la experiencia del usuario a la hora de diseñar y simular.

El simulador también cuenta con herramienta destinada exclusivamente al análisis de los resultados ya sea en dominio del tiempo, de la frecuencia u óptico, logrando obtener gráficas que representan las señales, diagramas del ojo, espectro de la señal, análisis de ruido, de jitter, de BER, de Q, analisis de perdidas, medidas correctivas (PMD,SPM, XPM, FWM), espaciamiento entre canales, formatos de modulación, entre otras muchas opciones. Incluso permite superponer gráficos para brindar una lectura más clara de los resultados, y poder hacer comparaciones y mediciones de manera interactiva mediante el uso del mouse.

OptSim cuenta con dos modos de simulación:

- **Modo bloque (block mode):** Este modo de simulación tradicional se caracteriza por procesar la secuencia de entrada en cada componente de la red como un solo bloque de datos, hasta llegar a la salida. Facilitando así el manejo de la señal tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia, según convenga en un momento determinado. Es decir, que la información que llega a cada componente de la red representa el tiempo total de la simulación, y permite al algoritmo de simulación realizar los cambios entre el tiempo y la frecuencia de manera más sencilla [88].
- **Modo Muestra (Sample mode):** A diferencia del modo bloque, el modo muestra permite transmitir la información representando una sola muestra o paso de tiempo a la vez, es decir que las simulaciones se pueden realizar en un tiempo de simulación ilimitado, abarcando así una cantidad infinita de secuencias de transmisión. Por eso este modo permite realizar variaciones en el diseño de la red y mejora el uso de la memoria de la secuencia en cada componente. Este modo solo trabaja en el dominio del tiempo y cuenta con 2 tipos de simulación, técnica de propagación espectral (*Spectral Propagation Technique*, SPT), la cual compila el espectro de potencia incluyendo los amplificadores y filtros utilizados sin tener en cuenta las no linealidades y técnica de ancho de banda variable (*Variable Bandwidth Simulation Technique*, VBS), la cual se encarga de realizar simulaciones en el dominio del tiempo, donde las señales se propagan como muestras y tienen en cuenta los efectos no lineales y lineales [88].

2.3. Esquema general de la red

Para el desarrollo de este proyecto de investigación, se plantea el escenario general mediante una red óptica DWDM-MLR basada en la red de acceso óptico NG-PON2, en representación de un enlace de bajada, donde dicha red de acceso, desarrollada por el grupo FSAN y estandarizada bajo la recomendación ITU-T G.989.1, tiene como finalidad dar a conocer los requisitos de implementación de la segunda fase de los sistemas PON de nueva generación, los cuales además de permitir capacidades de hasta 40 Gbps deben garantizar la convergencia con las redes heredadas, conservando la confiabilidad y la fiabilidad ofrecida a los usuarios a pesar de la presencia de nuevos servicios y aplicaciones. Es por ello por lo que las características establecidas para el diseño de la red de simulación se basan completamente en las recomendaciones, los estándares y estudios previos descritos en el capítulo 1.

Dentro de la recomendación ITU-T G.989.1, como ya se mencionó, se abordan los requisitos generales de la red de acceso para capacidades de 40 Gbps y los requisitos tanto operativos como de servicio que permitan garantizar la flexibilidad y robustez para todas las aplicaciones de acceso. Además, también propone la implementación de SMF caracterizadas en la recomendación ITU-T G.652 con un coeficiente de dispersión aproximado a $16 \text{ ps/nm} * \text{Km}$ y un valor de atenuación para redes alrededor de 1550 nm (banda C) de 0.275 dB/Km [38]. Sin embargo, actualmente ese tipo de fibras están pasando por un proceso de transición en camino hacia las denominadas “nuevas” fibras ópticas estandarizadas en la recomendación ITU-T G.657 y específicamente en la categoría ITU-T G.657.A donde se describen características similares para un óptimo despliegue en el SPAN de la ODN. Otra categoría como la ITU-T G.657.B es sugerida en el despliegue del tramo de última milla debido a la reducción de pérdidas por macrocurvatura. Adicionalmente, se debe considerar la implementación de la fibra compensadora de dispersión (*Dispersion Compensating Fiber*, DCF) la cual se caracteriza por tener un coeficiente altamente negativo que permite compensar como su nombre lo indica la dispersión y retardo que se puede presentar en el enlace.

Por otra parte, la recomendación ITU-T G.694.1 aporta como referencia los datos típicos propuestos para las redes PON en un sistema DWDM MAN *con enfoque en enlace de bajada o Downlink* de este tipo, por ejemplo, hacer uso de las bandas C y L en las cuales la fibra cuenta con menor atenuación y se encuentran ubicadas en la grilla espectral de 1530 a 1565 nm y 1565 a 1625 nm respectivamente (figura 2.6).

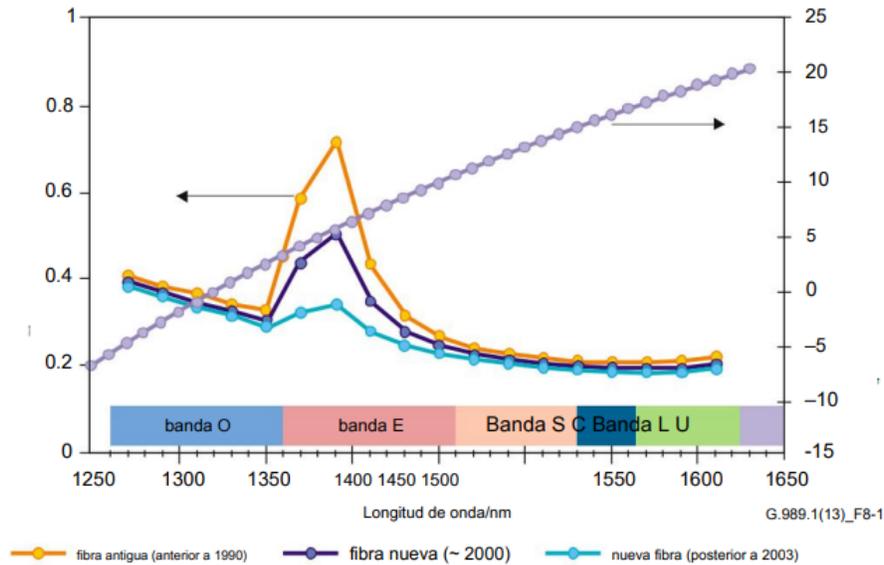


Figura 2.6: Atenuación y dispersión cromática de SMF[15].

En cuanto a la incorporación de la red MLR es lo que permite la configuración de diferentes capacidades y espaciamiento entre los canales que la conforman. En este caso, la flexibilidad espectral o grilla espectral flexible se asocia netamente a las pautas establecidas en la recomendación ITU-T G.694.1, donde se establece que para trabajar en las longitudes de onda en el rango de 1530.0413 nm hasta 1624.8914 nm se puede utilizar separación de canales de 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz o 100 GHz y así aumentar el ancho de banda efectivo de la fibra, la capacidad de los canales (2.5, 10, 40 Gbps) y por lo tanto realizar una optimización del espectro.

Otro aspecto a destacar en una red de este tipo es la importancia que tiene la ubicación de los canales dentro del diseño dependiendo de la capacidad, ya que los canales de mayor capacidad generan réplicas infinitas en el dominio de la frecuencia requiriendo mayor nivel de potencia, lo que a su vez puede ocasionar la presencia de ICI significativa. Por lo tanto, es necesario que estos canales sean ubicados en los extremos de la red, mientras que a medida que la capacidad de los canales sea menor se podrán ubicar más cerca de la frecuencia central establecida para el sistema ya que la presencia de estos fenómenos disminuye también [68].

En simulación se eligen dos configuraciones de arquitecturas FTTx para analizar el rendimiento del sistema. En primer lugar, se opta por FTTF, que comparte similitudes con FTTH difiriendo por su capacidad de llegar con OF más allá que FTTB, lo que ayuda a mitigar posibles cuellos de botella. La segunda arquitectura elegida es FTTC/K, principalmente por sus diferencias de última milla con respecto a FTTF.

En cuanto a la elección de los formatos de modulación, se eligen teniendo en cuenta investigaciones previas que se han dedicado exclusivamente a evaluar y analizar

cada tipo de formato. En la mayoría de estos estudios, se infiere que los formatos de modulación basados en OOK, tales como RZ-OOK y NRZ-OOK, no presentan inconvenientes significativos frente a las degradaciones no lineales en capacidades de canal de hasta 10 Gbps sumándose así a las ventajas de facilidad y bajo costo de implementación. En cuanto a canales de alta capacidad, como 40 Gbps se logra un mejor rendimiento usando modulaciones más robustas frente a las degradaciones ópticas, penalidades de potencia y espaciamiento entre canales, como el caso de DPSK, el cual es un formato de modulación elegido en [44] debido a los óptimos resultados obtenidos.

Retomando las pautas brindadas por la recomendación ITU-T G.694.1 se determina el espaciamiento fijo inicialmente de manera típica (0.8 nm ó 100 GHz) entre todos los canales de capacidad y modulación mixta para así definir las frecuencias de trabajo dentro del rango espectral permitido.

Para la elección de las frecuencias del sistema se toma como base la tabla 1 de la recomendación ITU-T G.694.1 que muestra ejemplos de frecuencias centrales de la red DWDM para diferentes espaciamientos. Una vez elegida la frecuencia central (f_c) como 194.0 THz, y con el fin de garantizar la simetría en el enlace de bajada se calcula la frecuencia de operación de cada canal teniendo en cuenta la elección de un número par de canales, los cuales, para este caso específicamente son 6 que van desde el canal 1 (Ch_1) hasta el canal 6 (Ch_6). Para los canales Ch_3 y Ch_4 que son los más cercanos (de menor capacidad) a la f_c del sistema general, se calcula su frecuencia de operación mediante la ecuación 2.4 y 2.5 respectivamente.

$$f_{ch_3} = f_c - \frac{\Delta_v}{2} \quad (2.4)$$

$$f_{ch_4} = f_c + \frac{\Delta_v}{2} \quad (2.5)$$

Con base a las frecuencia obtenidas para el Ch_3 y Ch_4 se realiza el cálculo de frecuencias de los demás canales de la siguiente manera.

$$f_{ch_2} = f_{ch_3} - \Delta_v \quad (2.6)$$

$$f_{ch_5} = f_{ch_4} + \Delta_v \quad (2.7)$$

$$f_{ch_1} = f_{ch_2} - \Delta_v = 2 * \Delta_v \quad (2.8)$$

$$f_{ch_6} = f_{ch_5} + \Delta_v = 2 * \Delta_v \quad (2.9)$$

Teniendo en cuenta la información anterior, en la figura 2.7 se ilustra el plan de canalización diseñado para el escenario general.

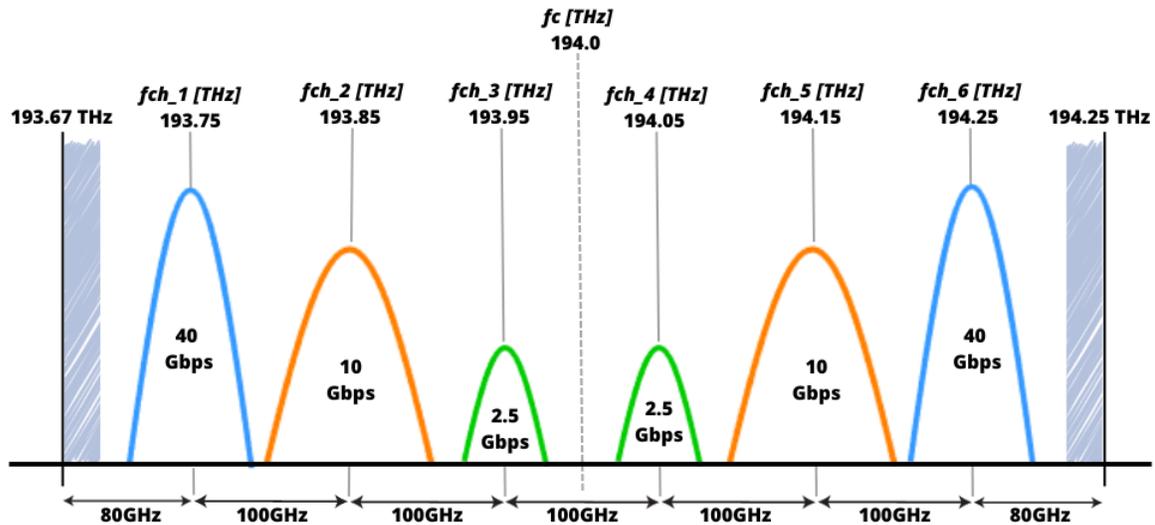


Figura 2.7: Representación del diseño del plan de canalización.

2.3.1. Componentes de la red

Una vez establecidas las características generales de la red, se realiza la selección de los componentes físicos en cada sección (transmisor, medio, receptor) que permitan garantizar un rendimiento óptimo, en base a lo expuesto en el ítem anterior y considerando tanto las opciones disponibles actualmente en el mercado como las proporcionadas por el simulador OptSim.

2.3.1.1. Sección de transmisión

Las capacidades proporcionadas por esta sección en cada caso específico dependen exclusivamente de la elección de los componentes y del diseño, es por ello que se hace necesario conocer cada elemento que conforma esta sección, entre los cuales se encuentran los codificadores, filtros, láseres e interferómetros que trabajan juntos en pro de preparar la información antes de ser enviada al medio.

Los LED se caracterizan por emitir luz incoherente con un gran ancho espectral, el cual en la mayoría de las ocasiones es desperdiciado y aumenta la ineficiencia de su uso. Al transmitir por fibra óptica son susceptibles a la dispersión, sin embargo, su costo es mínimo y su uso es recomendado en redes de baja velocidad y distancias cortas como el caso de redes LAN con un alcance de apenas unos pocos kilómetros con una tasa de bit de 10 a 100 Mbps. En consecuencia, surge en el mercado un tipo de láser conocido comúnmente como VCSEL el cual permitió mejorar las características brindadas por el LED con la ventaja de un costo similar, es un láser semiconductor capaz de emitir luz coherente que permite su uso en redes de fibra óptica de alta velocidad en entornos LAN con una alta eficiencia garantizando una operación de modo

longitudinal único, en otras palabras este tipo de láser opera como láser monomodo [89].

Otro tipo de láser es el *Fabry Perot* (FP), diseñado específicamente para funcionar en fibras SMF y MMF con un alcance máximo de hasta 20 Km, característica que en ocasiones es modificada para alcanzar una distancia de 40 Km a una tasa de bit de 1.25 Gbps y reducir así el costo de la red, sin embargo, esta acción reduce la vida útil del láser. FP trabaja en la ventana de 850, 1310 y 1550 nm [69] [90].

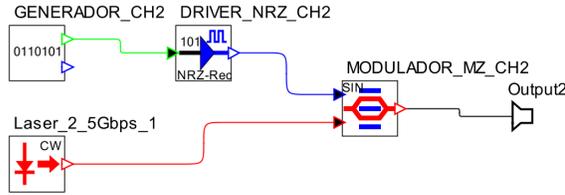
En otras ocasiones es necesario que las características del láser sean más robustas. Un tipo de láser que cumple con esto es el láser de retroalimentación distribuida (*Distributed FeedBack*, DFB), el cual emite luz coherente con un ancho espectral reducido y un buen desempeño de acoplamiento a la fibra y cuenta con un grado de dispersión reducido que permite su uso para mayores velocidades y distancias de mediano y corto alcance, sin embargo la potencia de transmisión es muy elevada y presenta sensibilidad a variaciones de temperatura. DFB Trabaja en la venta de 1550 nm para fibra SMF [90].

En el caso de la transmisión de información, es necesario poder controlar la salida de la luz, y aunque este control se puede realizar mediante la aplicación directa de corriente al dispositivo esto puede ocasionar mayor ruido u otros fenómenos que terminan degradando la señal sobre todo si la distancia para el enlace es bastante larga. Es entonces cuando surge una variante de los láser DFB llamada láser de modulación directa (*Directly Modulated Laser*, DML), adecuados para enlaces aproximadamente entre 2 y 10 Km con una tasa de bit de hasta 25 Gbps [90].

No obstante, en este caso, tanto la distancia del enlace como la potencia de trabajo del láser están determinadas de acuerdo a la recomendación ITU-T G.691. Esta recomendación establece que el rango de distancia para una red DWDM está entre 60 y 120 Km sin necesidad de amplificación, y la variación de potencia en el láser debe mantenerse entre 0 y 6 dBm. Es decir, la red propuesta para este trabajo de investigación no solo se caracteriza por contar con velocidades de bit de 2.5, 10 y 40 Gbps, sino también por tener una distancia de enlace mayor a las mencionadas previamente al describir los diferentes tipos de láser. Lo cual hace necesario incluir los láser de onda continua (*Continuous Wave*, CW) que se caracterizan por necesitar de una modulación externa de amplitud para proveer una mejor calidad de la señal y llegar a velocidades de transmisión y distancias donde la modulación directa no alcanza por la presencia de chirp no controlado. CW trabaja en una longitud de onda de hasta 1565 nm para fibra SMF y una potencia de transmisión de hasta 1W [90].

A continuación, en la figura 2.8a se muestra el sistema inicial que utiliza el formato de modulación NRZ-OOK. Una de las características notables de esta implementación de modulación es su sencilla configuración debido a la cantidad limitada de componentes necesarios para generar una señal NRZ. Para llevar a cabo la transmisión, solo se necesita un driver NRZ rectangular y un generador de bits externo. Cabe resaltar que el formato de modulación varía y por tanto se debe configurar acorde al canal de

transmisión.



Parameter	Value	Units	Range
Center Emission Frequency	=193.95	THz	[192.72, 195.28]
Center Emission wavelength	1545.72033	nm	[1535.19284, 1555....
Source Status	1		[0,1]
CW Power	0	dBm	[-3000, 3000]
CW Power	1.0	mW	(0, Inf]
FWHM Linewidth	1	MHz	[0, Inf]
-20 dBm Linewidth	9.94987	MHz	[0, Inf]
Initial Phase	"Deterministic"		

(a) Representación de Transmisor en Optsim. (b) Configuración del Transmisor en Optsim.

Figura 2.8: Representación y configuración del transmisor en Optsim.

Por otro lado, el modulador externo de amplitud para entornos de despliegue de fibra óptica que sobresale es el modulador o interferómetro Mach-Zehnder (*Mach-Zehnder Modulator*, MZM). Su función principal es dividir la señal en dos caminos diferentes por un tipo de "Y". Donde uno de los caminos se encargará de controlar el desfase, de tal manera que se pueda controlar la interferencia generada en la salida de la unión "Y". Obteniendo así una señal cuya amplitud y fase dependerá del desfase introducido en ambos caminos del modulador, es decir, que se obtiene a la salida una señal modulada tanto en fase como en amplitud [91].

2.3.1.2. Sección del medio

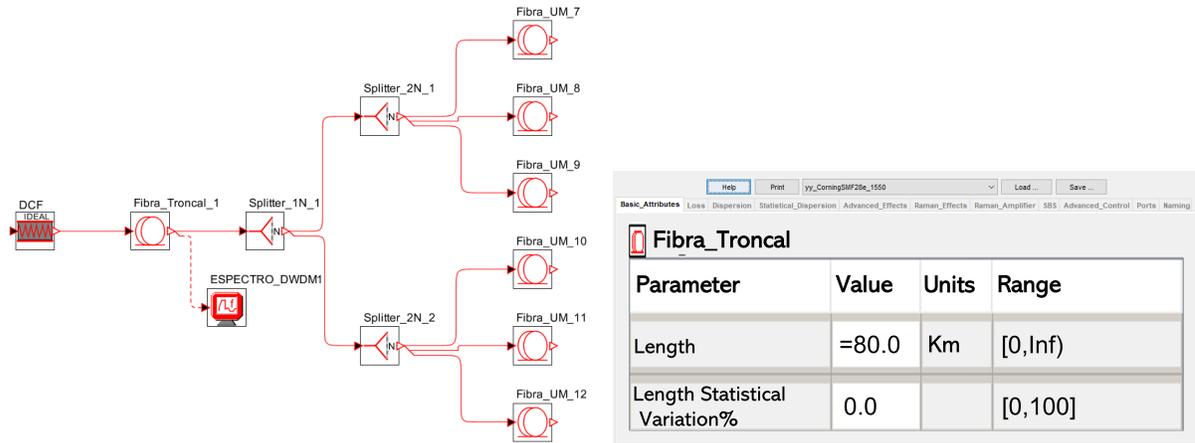
Como ya se ha mencionado en repetidas ocasiones, se hará uso de la fibra óptica estandarizada en la ITU-T G.657. En el simulador esta fibra óptica equivale a la fibra *yy_CorningSMF28e_1550* la cual satisface las características mencionadas. Así mismo, es importante considerar las distorsiones del sistema, en especial las provocadas por la CD. por este motivo, se implementa una compensación que permita reducir estas degradaciones. Aunque existen diferentes métodos de compensación como la pre-compensación, la post-compensación y la compensación simétrica, en este caso se opta por la pre-compensación debido a su capacidad para minimizar el ensanchamiento de los pulsos y por tanto reducir el impacto de los efectos no lineales.

La DCF se caracteriza por tener un coeficiente altamente negativo que permite compensar las degradaciones en la fibra, sin embargo, simultáneamente cuenta con un coeficiente de atenuación alto, alrededor de 0.5 dB/Km, por lo cual no es óptimo su uso en este escenario ya que cuenta con canales de alta velocidad donde sus pulsos de transmisión tienden a ensancharse elevando aún más las degradaciones. Así que para este escenario, se hará uso de la técnica de las rejillas de bragg (*Fiber Bragg Grating*, FBG), el cual es un componente interno en la fibra óptica encargado de generar cambios periódicos en la distancia entre los índices de refracción. Es decir, la FBG simula el comportamiento de un filtro al bloquear la banda de transmisión para que una determinada onda recorra el total de la distancia del enlace con el fin de que

las longitudes de onda de menor velocidad alcance a las más rápidas [69].

Otros componentes que sobresalen son los combinadores de señales y Splitter los cuales se encargan de mezclar y dividir respectivamente las longitudes de onda antes de entrar y salir de la sección del medio.

En la figura 2.9a se representa a nivel de simulación los componentes que conforman esta sección.



(a) Representación del Medio en Optisim. (b) Configuración de la fibra troncal en Optisim.

Figura 2.9: Representación y configuración del medio en Optisim.

2.3.1.3. Sección de recepción

En la búsqueda de dar un manejo eficiente del ancho de banda de los canales de comunicación que convergen en las redes ópticas e incrementan el volumen de información, se incorporan receptores más precisos para la detección coherente de la información, manteniendo un nivel de calidad de la señal aceptable determinada por el comportamiento del monitoreo de desempeño óptico (*Optical Performance Monitoring*, OPM), tal y como lo establecen las recomendaciones ITU-T G.698.1 [92] e ITU-T G.Sup 39 [93], definiendo límites teóricos para $BER \leq 10^{-12}$, factor $Q \geq 7$ y sensibilidad del receptor ≥ -28 dBm para canales con 2,5 Gbps de acceso y ≥ -24 dBm para canales con 10 Gbps de acceso [94]. De los filtros que tienen los canales de acceso se encuentran:

- **Filtro Gaussiano:** Es un filtro basado en una función gaussiana o también llamada campana de Gauss debido a su forma de distribución, es un tipo de filtro comúnmente implementado en el procesamiento de señales e imágenes para suavizar o atenuar el ruido presente. En su configuración Pasabanda atenúa altas y bajas frecuencias por lo cual se le configura un ancho de banda a 60 GHz que es suficiente para no suprimir parte de la señal óptica de mayor capacidad [95].
- **Filtro Bessel:** Es un tipo de filtro implementado esporádicamente en aplicaciones en las que el retardo de grupo es fundamental como lo es el procesamiento de

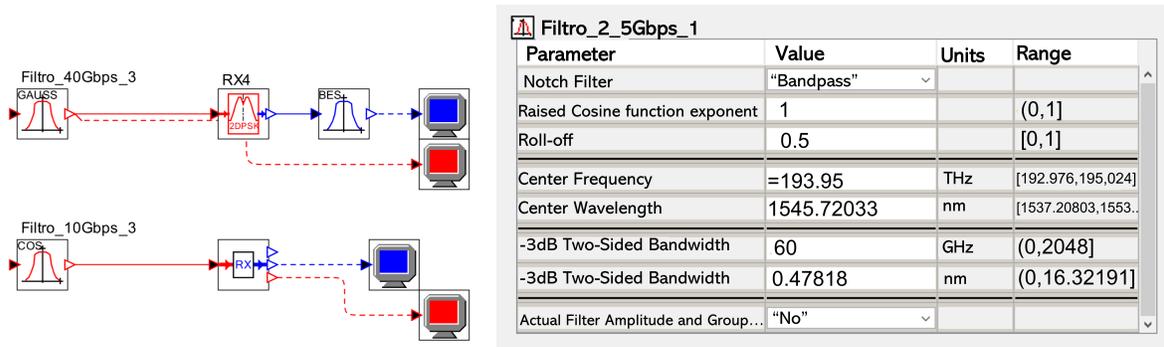
señales de vídeo analógicas. El filtro Bessel o filtro Thomson (Como también es llamado) define el ancho de banda por el rango de frecuencias donde la función de transferencia cae por debajo de los 3 dB [96]. Para el presente trabajo de grado cumple el papel de filtro eléctrico y se configura a un ancho de banda a 60 GHz tanto en transmisión como en recepción para el caso de los canales de mayor capacidad y para los canales con 10 y 2.5 Gbps se configura en el receptor óptico.

- **Filtro Coseno Alzado:** Un filtro de coseno alzado, que también se denomina filtro de forma de pulso de coseno alzado, se emplea con el propósito de gestionar el ancho de banda de una señal y reducir al mínimo la interferencia con señales circundantes en el dominio óptico de los canales con capacidad de acceso de 10 y 2.5 Gbps. En lugar de tener una respuesta en frecuencia rectangular, este filtro presenta una respuesta que se asemeja a una forma de onda de coseno. Esta característica en el dominio de la frecuencia le confiere la capacidad de mitigar la interferencia entre símbolos en sistemas de comunicación digital [97].

2.3.1.3.1. Receptor óptico

Los receptores ópticos desempeñan un papel fundamental en sistemas de comunicación de alta velocidad, su función principal es convertir las señales ópticas en eléctricas, dicha conversión se realiza en base al nivel de sensibilidad la cual refiere a la potencia óptica mínima que debe llegar al receptor con el fin de diferenciar el ruido óptico de la señal transmitida. Este dispositivo debe estar sintonizado con la frecuencia del canal en el que transmite la OLT, adicionalmente para el caso específico del presente trabajo de grado se le configura el tipo de modulación que trabaja cada canal, la sensibilidad mínima, el umbral de referencia para probabilidad de error, entre otros parámetros que se establecen en las recomendaciones previamente mencionadas [92] [93].

En la figura 2.10a se presenta la configuración de dos de los tres tipos de receptores implementados en el simulador, el primero corresponde al receptor para canales de 40 Gbps de capacidad y el segundo corresponde al receptor de canales de 10 Gbps. Cabe resaltar que la configuración a nivel de diagrama es igual para canales de 10 y 2.5 Gbps, la diferencia radica en la configuración que se realice en los elementos como se ilustra en la figura 2.10b donde se configura el filtro óptico del canal 3 de 2.5 Gbps de capacidad a nivel de acceso.



(a) Representación de Receptor en Optisim.

(b) Configuración del Receptor en Optisim.

Figura 2.10: Representación y configuración del receptor en Optisim.

2.3.2. Modelo general de la red (montado sobre Optisim)

La tabla 2.1 resume los parámetros iniciales tenidos en cuenta para el escenario general, mientras que la figura 2.11 es la representación de este mismo en el entorno de simulación. Acorde a la recomendación ITU-T G.989.1, se sugiere un alcance de enlace entre 60 y 100 km para los sistemas NG-PON2 con el fin de coexistir con otros sistemas PON. De acuerdo a esto se elige un valor intermedio de 80 Km para ajustarse al rango dado, teniendo así mayor probabilidad de convergencia y escalabilidad en las arquitecturas de red DWDM y se considera 1 Km en la última milla para efectos prácticos.

CARACTERÍSTICAS DEL ESCENARIO GENERAL PARA SIMULACIÓN DE LA RED			
PARÁMETRO		DETALLE	
Tipo de Red		Red óptica DWDM-MLR basada en la red de acceso óptico NG-PON2	
Distancia total del enlace [Km]		81 (80 de la ODN + 1 de última milla)	
Topología de la red		Punto a multi-punto, P2P virtual	
Tecnología de la red		DWDM unidireccional	
Tasas de transmisión [Gbps]		2.5 / 10 / 40	
Banda de operación [nm]		Banda C (1530.0413-1624.8914)	
Ventana de operación [nm]		Alrededor de 1550	
Número de canales		6	
Espaciamiento entre canales [GHz]		100	
Frecuencia central del sistema (f_c) [THz]		194.0	
Formatos de modulación		NRZ-OOK, RZ-OOK, NRZ-DPSK	
CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO			
Tipo de fibra		ITU-T G.657 (Monomodo-Corning SMF 28e)	
Dispersión de la fibra [ps/nm/Km]		16	
Coeficiente de dispersión [dB/Km]		0.19	
Combinador		6:1	
Splitter		Primer Nivel	1:2
		Segundo Nivel	1:3
CARACTERÍSTICAS DEL Tx		CARACTERÍSTICAS DEL Rx	
Tipo de modulación	Modulación externa (Mach-Zender)	Filtros ópticos	Filtro Gaussiano y de Coseno alzado.
Tipo de láser	Láser de onda continua (Láser CW)	Filtro eléctrico	Filtro Bessel.
Potencia de Tx [dBm]	0	Sensibilidad (SRx) [dBm]	-30
Filtro eléctrico	Filtro Bessel	Probabilidad de error de bit (BER)	1×10^{-15}

Tabla 2.1: Características para configuración de escenario general de simulación.

Red MLR basada en la convergencia de redes NG-PON1 Y NG-PON2

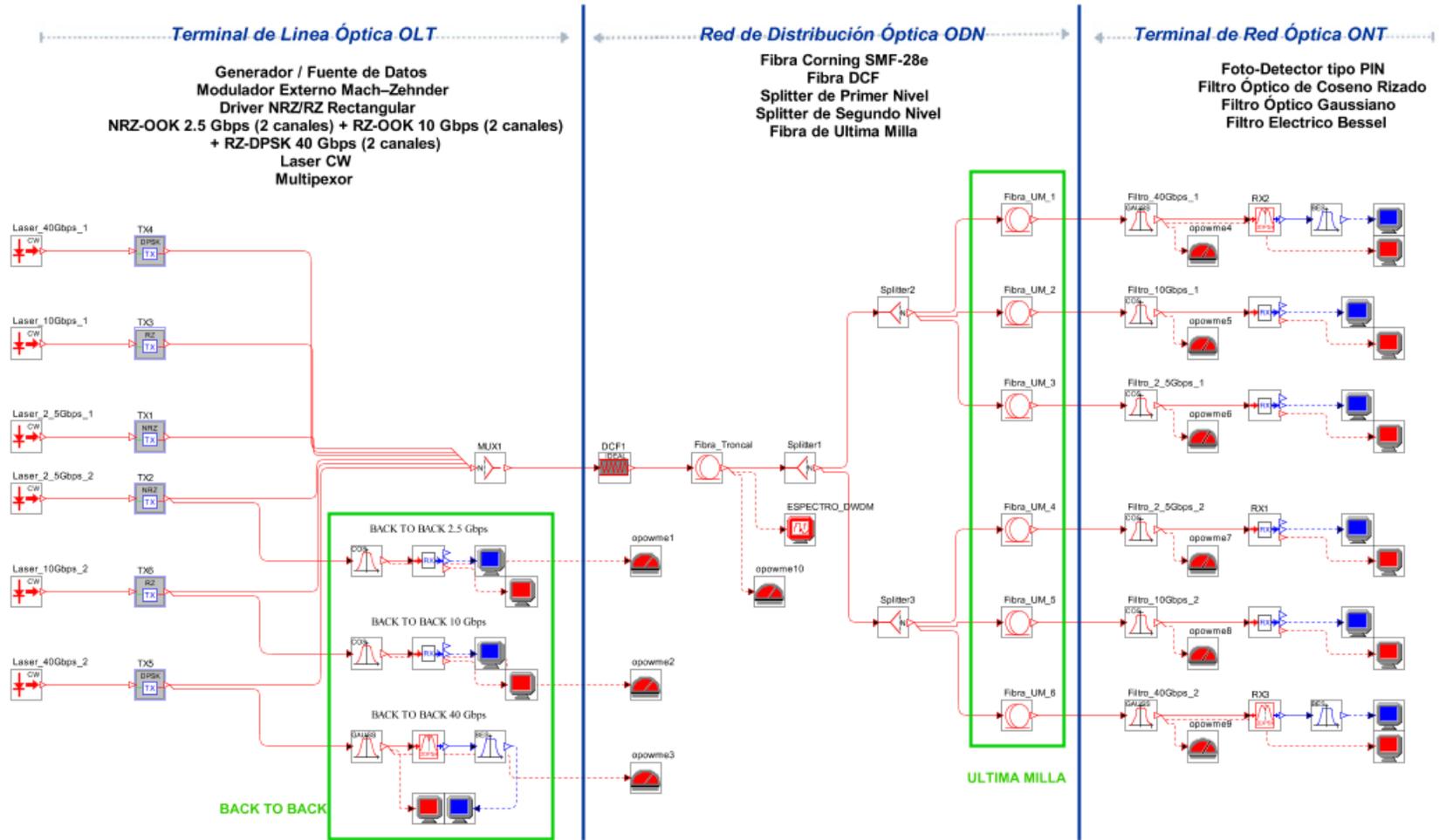
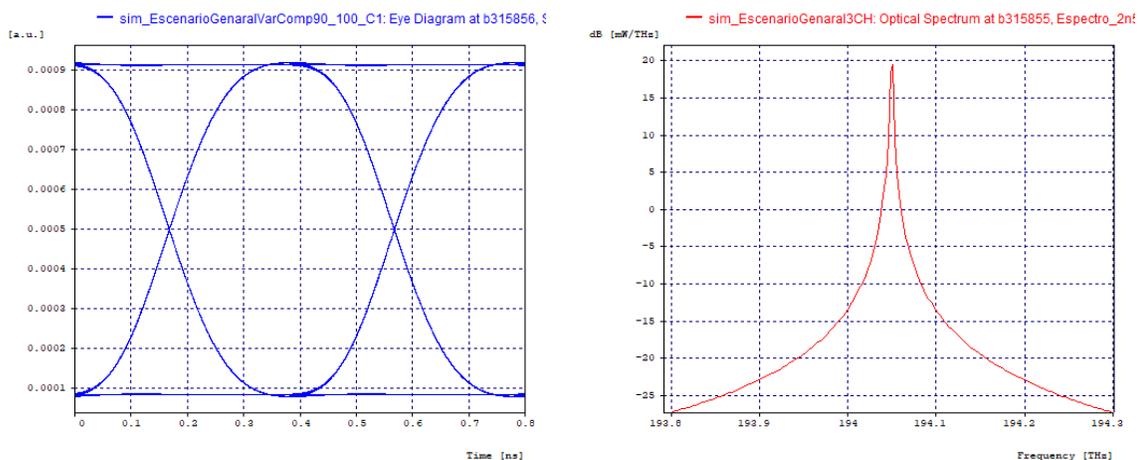


Figura 2.11: Representación del Escenario General en Optsim.

2.3.2.1. Resultados del escenario general

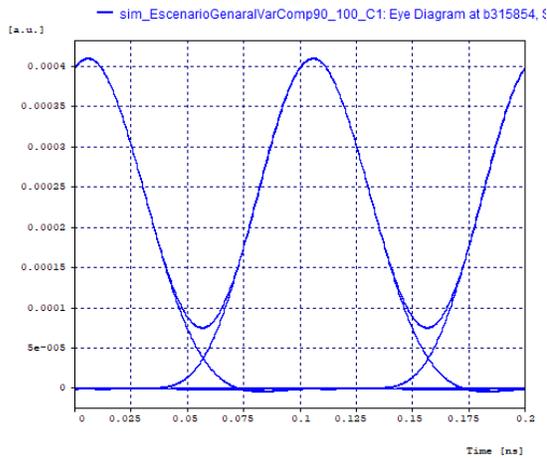
En esta sección se presentan los resultados obtenidos en relación a los parámetros OPM y la densidad espectral de información (*Information Spectral Density*, ISD). En este contexto, los parámetros OPM se utilizan exclusivamente como una herramienta de comparación para evaluar el desempeño del sistema según cuatro elementos fundamentales: la tasa de error de bit (BER), factor de calidad (Q), relación señal a ruido óptico (OSNR) y diagrama de Ojo. Por otra parte, la medida de la eficiencia espectral basada en la adaptación de la teoría de la información, conocida como ISD y descrita en el capítulo 1, suministrará datos iniciales del escenario general que permitirá al igual que los parámetros OPM, establecer un punto de partida y una base de comparación y análisis a medida que se realicen diferentes variaciones en el sistema, con el fin de lograr una optimización del espectro, garantizando al mismo tiempo la fiabilidad, escalabilidad y flexibilidad necesaria para satisfacer las altas capacidades de transmisión estandarizadas en las redes de nueva generación.

Inicialmente se presentan los resultados obtenidos al evaluar el sistema en condiciones ideales mediante una configuración “back to back”, con el fin de realizar posteriormente una comparación con los resultados obtenidos en la recepción. Las figuras 2.12a a 2.12f representan los diagramas de ojo y espectro óptico respectivamente para los canales 4, 5 y 6 que son los de mayor frecuencia en la red MLR, operando a capacidades de 2.5, 10 y 40 Gbps respectivamente, mientras que la tabla 2.2 resume los valores obtenidos en los parámetros OPM para este mismo caso.

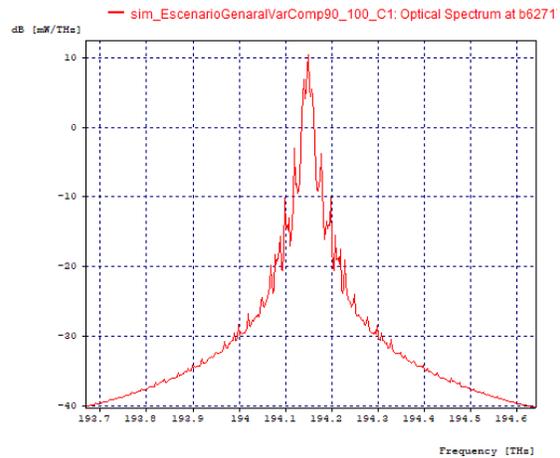


(a) Canal 4 NRZ-OOK.

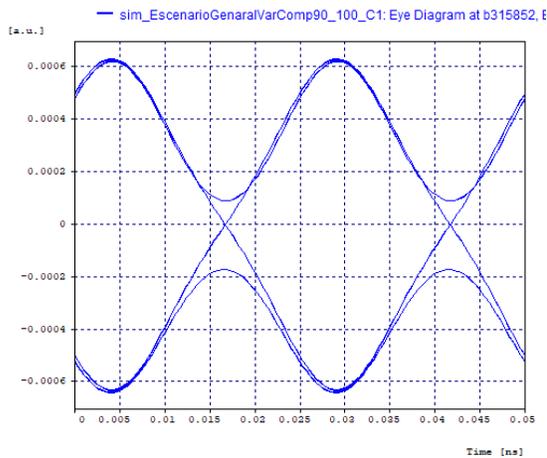
(b) Canal 4 NRZ-OOK.



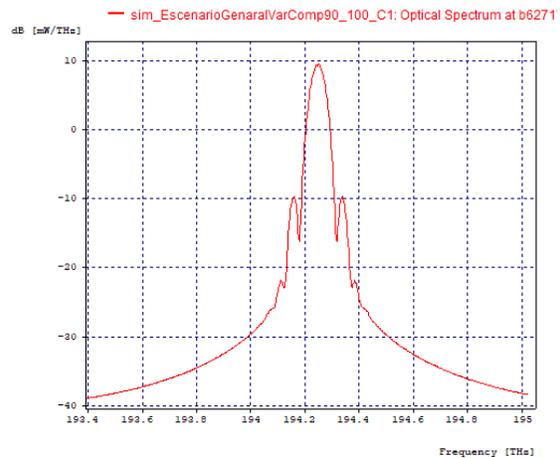
(c) Canal 5 RZ-OOK.



(d) Canal 5 RZ-OOK.



(e) Canal 6 NRZ-OOK.



(f) Canal 6 NRZ-DPSK.

Figura 2.12: Resultados espectro óptico en configuración Back To Back.

Capacidad de canal	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q		Jitter [ns]	OSNR [dB]	OSNR Real [dB]
			[lin]	[dBm]			
40 Gbps	-4.24	1×10^{-40}	100	40	0	49.362244	19.4375
10 Gbps	-9.167	1×10^{-40}	100	40	0.000164991	53.04262	18.0085
2.5 Gbps	-3.088	1×10^{-40}	100	40	0.069531	53.956531	26.4900

Tabla 2.2: Valores de referencia de la configuración Back to Back.

El comportamiento tanto de los diagramas de ojo y espectro óptico de cada canal para el caso ideal permiten evidenciar gráficamente lo que se esperaría como resultado en recepción. Por otra parte, la tabla 2.2 presenta valores de BER y Jitter coherentes en todos los casos, con un factor Q y OSNR (real y teoría) alto, mientras que la potencia percibida se encuentra de manera ideal superando el nivel de sensibilidad elegido para el receptor (-30dBm), concordando así con los diagramas de ojo. Estos

datos permitirán posteriormente mediante la lectura de los mismos y en base a las recomendaciones, definir hasta donde es óptimo el comportamiento de la red.

A partir de los resultados anteriores se realiza el mismo análisis en la recepción, donde el sistema se caracteriza principalmente por no contar con ningún tipo de compensación en el medio, ni amplificación. Las figura 2.13a a 2.13f son los diagramas de ojo y espectro óptico obtenidos.

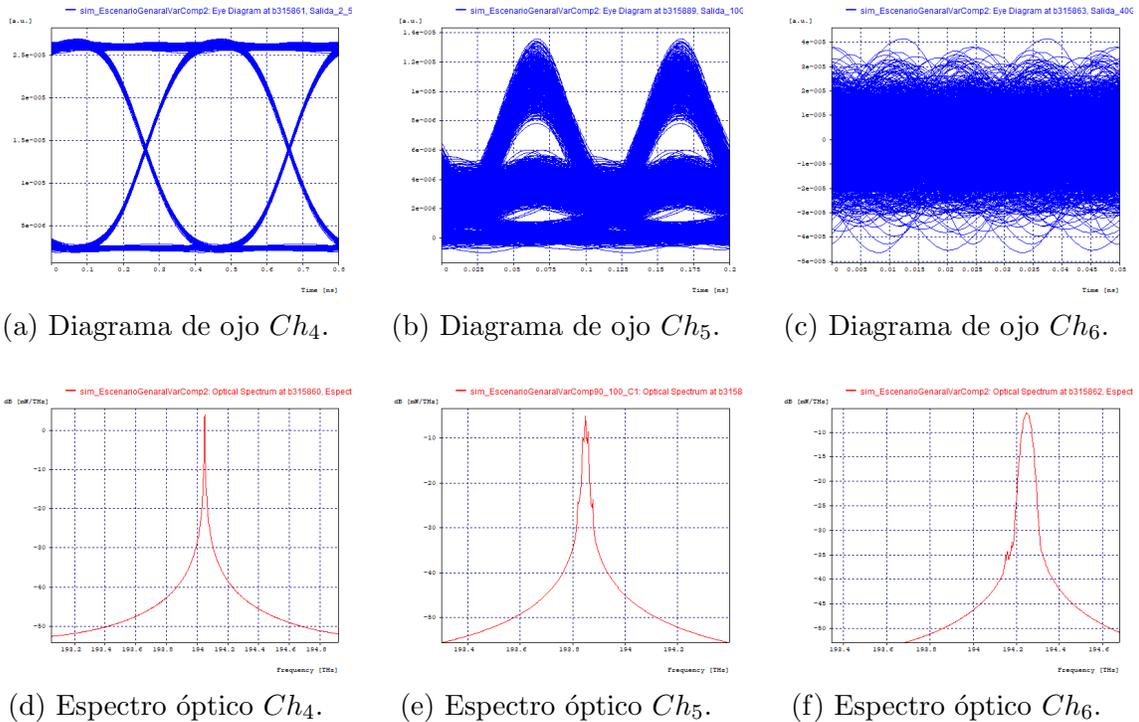


Figura 2.13: Resultados diagrama de ojo y espectro óptico en el receptor.

A diferencia del escenario ideal, los datos arrojados por el simulador permite evidenciar que el desempeño de los canales de mayor capacidad (10 y 40 Gbps) del sistema se reducen considerablemente por la aparición de factores que degradan la señal alejándose significativamente de lo estipulado en la recomendación ITU.T G.698.1 e ITU-T G.Sup 39. Esta información se puede corroborar en los diagrama de ojo de las figuras 2.13b y 2.13c, las cuales no presentan claridad en cuanto a la apertura del ojo, ni en el cruce de tiempo, ni en el cruce de amplitud y por ende no cuenta con ningún tipo de proximidad ante los resultados obtenidos en la configuración back to back a excepción del canal de 2.5 Gbps.

En la figura 2.13f, que representa el espectro óptico del canal de 40 Gbps, se logra evidenciar una deformación lateral la cual se produce en el límite con el canal adyacente. Esta característica es típica cuando se produce el efecto no lineal de modulación de fase cruzada (XPM), el cual surge debido a la interacción entre el

índice de refracción del medio (OF) y la intensidad de la señal óptica que provoca la alteración de la forma mencionada como resultado de la influencia del canal 2 de 10Gbps.

En la tabla 2.3, se presentan los valores de OPM medidos en los receptores en el mismo escenario, donde los datos representan un promedio de los valores obtenidos entre los canales de igual capacidad, pero diferente frecuencia. Esto con el fin de poder obtener mejoras en el sistema de manera general en el caso de que sea necesario realizar algún tipo de ajuste posterior. Los datos proporcionan un panorama más claro y se puede evidenciar las afecciones en los canales de mayor capacidad, los cuales, en base a los parámetros OPM no cumplen con los valores mínimos establecidos a excepción de los resultados obtenidos para los canales de 2.5 Gbps que permiten afirmar su buen desempeño, ya que mantiene un diagrama de ojo (figura 2.13a) y valores en los parámetros OPM de manera ideal, lo cual, también permite afirmar que en estos canales no existe una interferencia significativa en comparación con los problemas que se evidencian en los canales adyacentes de mayor capacidad como lo evidencian las figuras 2.13b y 2.13c de diagrama de ojo y la tabla mencionada inicialmente.

	Capacidad de canal	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q		Jitter [ns]	OSNR [dB]	OSNR Real [dB]
				[lin]	[dBm]			
<i>Ch₁, Ch₂ y Ch₃</i> (Frecuencias menores)	40 Gbps	-19.681	0.0227501	2	6.0206	0.00533017	49.897166	3.96516
	10 Gbps	-24.536	0.0227501	2	6.0206	0.0166005	52.292842	2.61436
	2.5 Gbps	-21.495	1x10 ⁻⁴⁰	38.8504	31.787899	0.0590115	54.474525	7.99418
<i>Ch₄, Ch₅ y Ch₆</i> (Frecuencias mayores)	2.5 Gbps	-18.457	1x10 ⁻⁴⁰	59.8452	35.540484	0.068762	53.935051	11.0361
	10 Gbps	-24.654	0.0227501	2	6.0206	0.0257192	52.890284	2.55817
	40 Gbps	-19.715	0.0227501	2	6.0206	0.00528678	50.476087	3.93831
Valor Promedio	40 Gbps	-19.698	0.0227501	2	6.0206	0.005308475	50.1866265	3.951735
	10 Gbps	-24.595	0.0227501	2	6.0206	0.02115985	52.591563	2.586265
	2.5 Gbps	-19.976	1x10 ⁻⁴⁰	49.3478	33.6642415	0.06388675	54.204788	9.51514

Tabla 2.3: Valores obtenidos en recepción sin compensar (0%).

Se puede destacar que los canales de 40 Gbps a pesar de esto mantienen un nivel de potencia en recepción bueno a comparación de los canales de 10 Gbps donde el valor de la OSNR se acerca a 1 dB, indicando que la potencia de la señal está tendiendo a igualar la potencia del ruido óptico. La figura 2.14 representa la relación OSNR real del canal 2 de 10 Gbps, dicha relación se mide ubicando uno de los marcadores horizontales de la herramienta sobre el valor de sensibilidad del receptor (-30 dBm) y el otro marcador en la intersección con el punto más alto de la señal, el cual para este caso en específico está sobre el nivel de -27.3843 dBm. Finalmente la OSNR real se calcula como la diferencia entre el valor del marcador superior con el valor del marcador inferior.

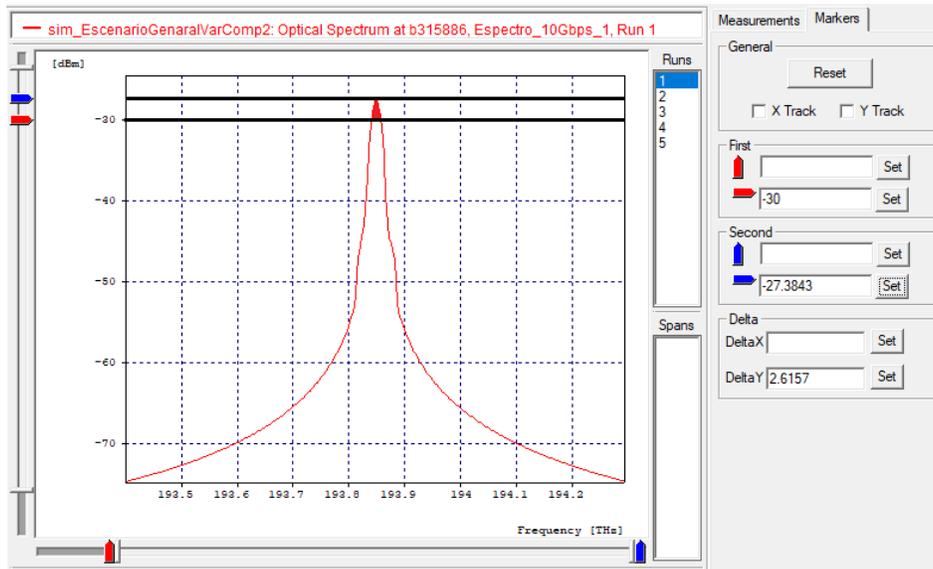
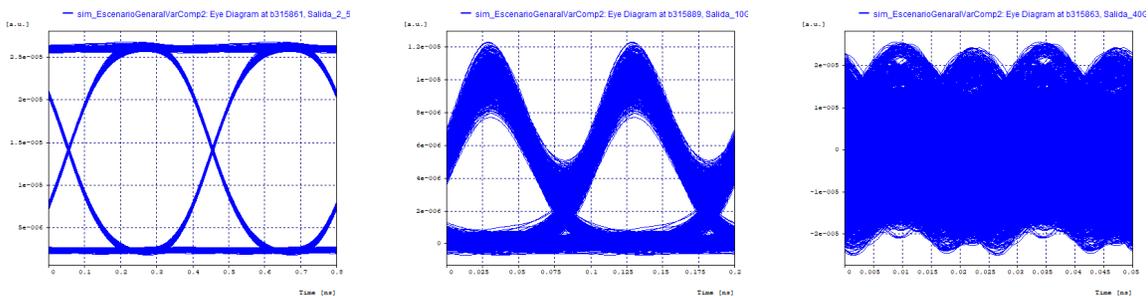


Figura 2.14: Medición OSNR en espectro óptico en Ch_2 .

Cabe resaltar que el sistema hasta el momento no cuenta con ningún tipo de compensación y al ser un enlace de 80 Km en el SPAN de la ODN más 1 Km de última milla puede estar presentando CD, para corroborar esta hipótesis se realiza una simulación agregando diferentes niveles de compensación. De esta manera entonces se introduce una compensación al sistema iniciando con un 70 % y posteriormente en incrementos de 10 % hasta llegar al 100 %, donde se obtiene una mejora significativa para los canales de 10 Gbps a partir de la compensación inicial, sin embargo en los canales de 40 Gbps no sucede lo mismo, teniendo una mejora solo si la compensación se realiza al 100 %.

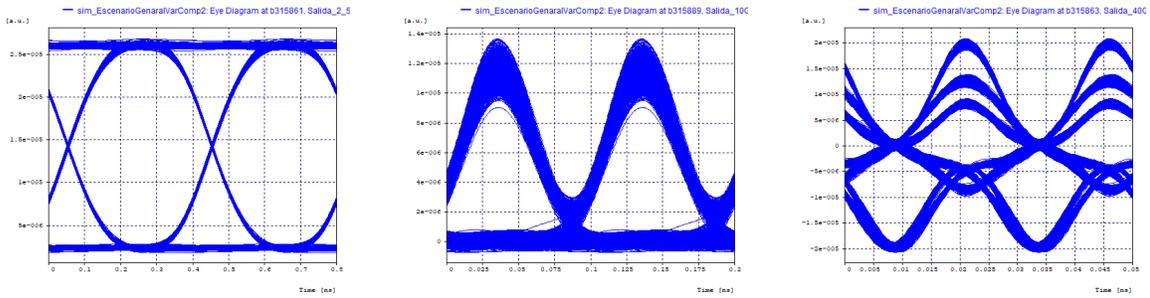
Con base en la tabla 2.3 se realiza el análisis de los canales 4, 5 y 6 debido a que arrojaron valores inferiores respecto a los otros canales de igual capacidad. En ese sentido, se garantiza un nivel de compensación que favorezca a canales de igual capacidad pero con un nivel relativo en frecuencia diferente. A continuación se presentan los diagramas de ojo obtenidos en los canales 4, 5 y 6 al variar la compensación al 70 %, 90 % y 100 %.



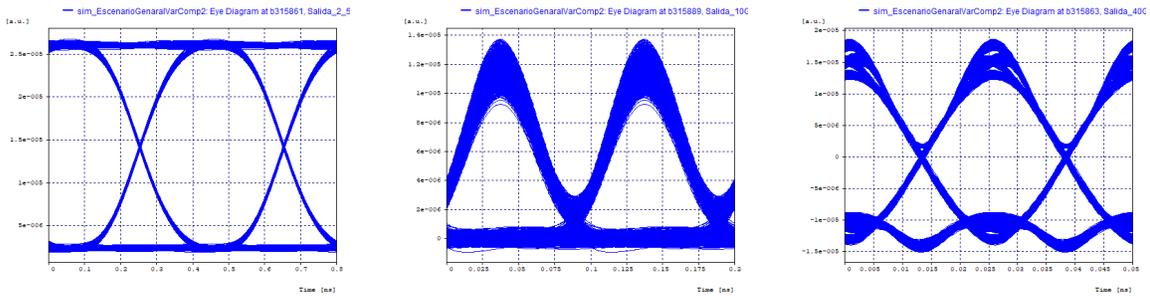
(a) Ch_4 con compensación al 70 %.

(b) Ch_5 con compensación al 70 %.

(c) Ch_6 con compensación al 70 %.



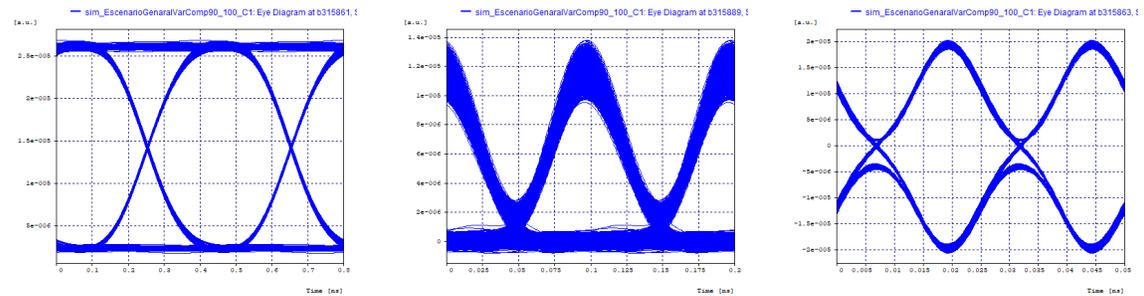
(d) Ch_4 con compensación al 90 %. (e) Ch_5 con compensación al 90 %. (f) Ch_6 con compensación al 90 %.



(g) Ch_4 con compensación al 100 %. (h) Ch_5 con compensación al 100 %. (i) Ch_6 con compensación al 100 %.

Figura 2.15: Resultados diagrama de ojo al variar la compensación.

En un escenario real, no es posible tener una compensación del 100 %, por tal motivo se opta por compensar el sistema en incrementos del 2 % pero esta vez con valores entre 90 % y 100 % ya que es el rango donde se obtuvieron los mejores resultados. Encontrando que a una compensación del 96 % el sistema optimiza el funcionamiento de los dos canales 1 y 6 incluso con mejor valor promedio del factor de calidad que cuando se realiza una compensación de manera ideal. A continuación se presentan los diagramas de ojo del sistema compensando al valor mencionado (figuras 2.16a a 2.16c) y el resumen de los resultados obtenidos (Tabla 2.4).



(a) Diagrama de ojo Ch_4 . (b) Diagrama de ojo Ch_5 . (c) Diagrama de ojo Ch_6 .

Figura 2.16: Resultados diagrama de ojo en el receptor para una compensación de 96 %.

	Capacidad de canal	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q		Jitter [ns]	OSNR [dB]	OSNR Real [dB]
				[lin]	[dBm]			
<i>Ch</i> ₁ , <i>Ch</i> ₂ y <i>Ch</i> ₃ (Frecuencias menores)	40 Gbps	-19.68	$1x10^{-40}$	27.43	28.764604	0.000488003	49.710453	3.90406
	10 Gbps	-24.542	$7.50x10^{-24}$	10.2622	20.224825	0.0011946	52.515489	2.60379
	2.5 Gbps	-21.492	$1x10^{-40}$	46.2923	33.310183	0.078648	54.489519	7.99078
<i>Ch</i> ₄ , <i>Ch</i> ₅ y <i>Ch</i> ₆ (Frecuencias mayores)	2.5 Gbps	-18.464	$1x10^{-40}$	62.5077	35.918667	0.0799858	53.957041	11.034
	10 Gbps	-24.66	$2.27x10^{-27}$	10.9438	20.783385	0.00105522	53.0661	2.55388
	40 Gbps	-19.716	$1x10^{-40}$	86.1793	38.708062	0.000145349	50.77276	3.94156
Valor Promedio	40 Gbps	-19.698	$1x10^{-40}$	56.80465	33.736333	0.000316676	50.2416065	3.92281
	10 Gbps	-24.601	$3.75x10^{-24}$	10.603	20.504105	0.00112491	52.7907945	2.578835
	2.5 Gbps	-19.978	$1x10^{-40}$	54.4	34.614425	0.0793169	54.22328	9.51239

Tabla 2.4: Valores obtenidos en recepción.

A pesar de que ante una compensación del 96 % el sistema mejora su rendimiento en los canales de mayor capacidad, el desempeño de los canales 2 y 5 no es ideal como sucede con los demás. Sumándose a esto que, la potencia en recepción está cerca al nivel de sensibilidad teórico configurado por lo que sería susceptible a caer por debajo de la condición de diseño $P_{Rx} \geq S_{Rx}$ al realizar cambios en el sistema. Un parámetro que respalda lo mencionado es la OSNR Real, la cual, se comporta igual que en la configuración inicial a causa de las penalidades de potencia experimentadas. Lo anterior, permite afirmar con certeza que el desempeño obtenido inicialmente se debe a la presencia de efectos lineales y no lineales en el trayecto y afecta especialmente los canales de 10 Gbps de capacidad, por lo cual hay que compensar estas penalidades incrementando la potencia del láser a un valor entre 0 y 6 dBm como se establece en la recomendación. En cuanto a la presencia de las no linealidades se puede afirmar, en base a los valores de los parámetros OPM, que aunque sigan presentes, estas no producen degradaciones significativas en el desempeño del sistema.

Ahora bien, considerando que el sistema coexiste con múltiples canales en un único hilo de fibra, es importante traer a colación la ecuación 1.17, la cual permite conocer la ISD máxima en sistemas DWDM, controlando parámetros tales como: capacidad del canal (C_{ch}), cantidad de canales propagados (N), potencia del canal (P_s), espaciamiento (Δ_v) y ancho de banda (B_w). Asimismo, a nivel de simulación, es posible relacionar todas las variables descritas en la misma ecuación en términos de mediciones realizadas en el comportamiento espectral DWDM del sistema óptico, permitiendo conocer gráficamente los valores de las variables y observar su comportamiento con el fin de mejorar la ISD (enfoque central de este proyecto de grado). Dichas variables se definen de la siguiente manera:

- C_N (Capacidad nominal por longitud de onda): se presenta como la capacidad neta binaria propagada a nivel de acceso.
- C_{TOT} (Capacidad total del sistema co-propagante): se presenta como la sumatoria de las capacidades individuales de los canales propagados.
- C_{PRO} (Capacidad de propagación de información por kilómetro): se presenta como la relación entre la cantidad de información y la distancia propagada.

- η_{ded} (Eficiencia espectral dedicada por longitud de onda): se presenta como una relación neta entre la capacidad nominal y el ancho de banda ocupado.
- $(N - 1)\Delta_v$ (Espaciamiento Óptimo de los canales adyacentes).
- η_{dis} (Eficiencia espectral Distribuida del sistema): se presenta como una relación entre la capacidad total vs el espectro real ocupado y la relación SNR máxima permisible.

Una vez clara la información anterior, se inicia la medición de datos desconocidos, tales como el ancho de banda de cada canal y el ancho de banda del sistema DWDM. Para determinar el ancho de banda de canal dedicado, se posiciona un marcador horizontal de la herramienta de simulación en el nivel de sensibilidad configurado, es decir, en -30 dBm. Luego, se posicionan los marcadores verticales en las intersecciones de la señal con el marcador horizontal como se ilustra en la figura 2.17.

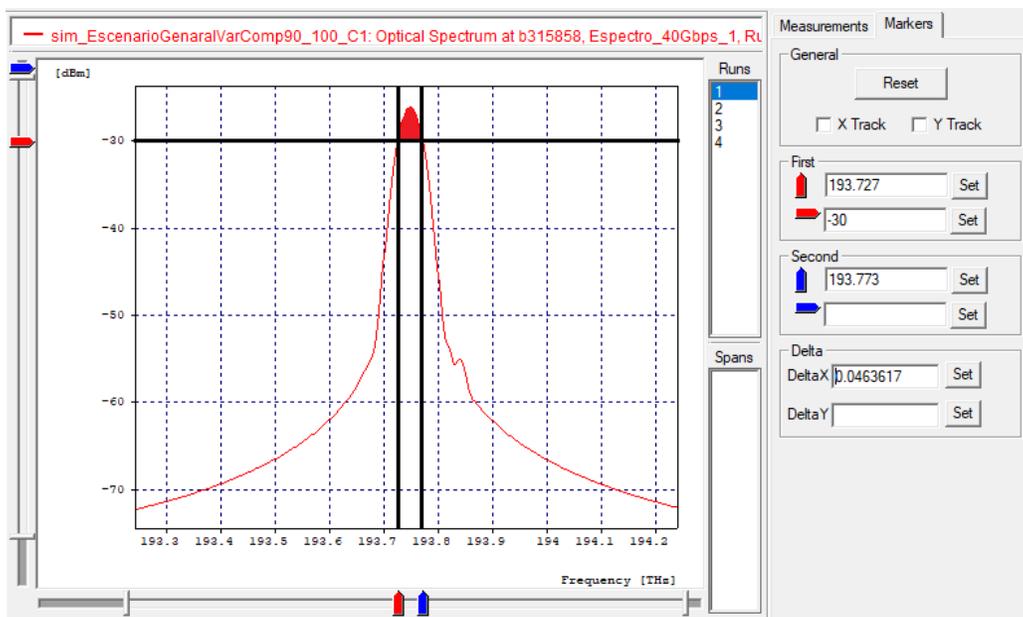


Figura 2.17: Medición de BW dedicado en Ch_6 .

Para determinar el ancho de banda útil (distribuido) del espectro total ocupado, se posiciona un marcador horizontal en el nivel de sensibilidad configurado, seguido a esto, se ubican los marcadores verticales en la intersección tanto superior como inferior del espectro a nivel de transporte como se ilustra en la figura 2.18.

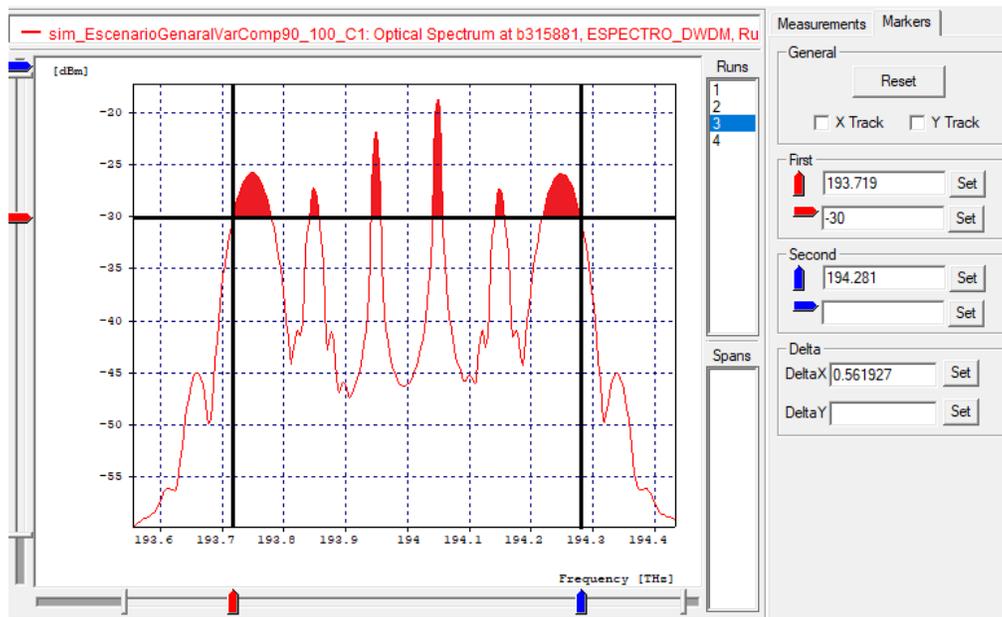


Figura 2.18: Medición de BW distribuido en el sistema.

Teniendo en cuenta que se desea realizar el análisis de todo el espectro ocupado por los canales del sistema DWDM, se resume a continuación las variables medidas, manipuladas y obtenidas que permiten realizar un análisis más detallado en cuanto al uso eficiente del espectro óptico.

Canal	Δ_v [GHz]	C_N [Gbps]	C_{TOT} [Gbps]	$C_{PRO}(81Km)$ [Gbps * Km]	BW_{ded} [GHz]	BW_{dis} [GHz]	η_{ded} [bps/Hz]	η_{dis} [bps/Hz]
Ch_1	100	40	105	8505	46.3602	561.927	86.28 %	18.69 %
Ch_2		10			15.0646		66.38 %	
Ch_3		2.5			14.703		17.00 %	
Ch_4		2.5			16.8516		14.84 %	
Ch_5		10			15.0112		66.62 %	
Ch_6		40			45.7021		87.52 %	

Tabla 2.5: Valores ISD obtenidos en el sistema.

De los parámetros OPM obtenidos en recepción (tabla 2.4) se puede notar en los canales de 10 Gbps de capacidad que al sufrir penalidades de potencia la señal reduce su ancho de banda, sin embargo tanto el factor Q como la BER son valores aceptables ya que el receptor es capaz de captar la señal. Por lo tanto, a pesar de que la eficiencia espectral dedicada por longitud de onda en los canales de 10 Gbps es buena, dando como resultado un aproximado de 66,5 %, el sistema es más susceptible a caer en tasas de error de bit mayores ante futuros cambios que buscan la mejora del uso del espectro.

Adicionalmente no solo los cambios realizados en las variables de control de la densidad espectral de información impactan el sistema, también se ve afectado por efectos

lineales y no lineales. Por parte de los efectos lineales la señal sufre penalidades de potencia, ruido y dispersión cromática (CD), la cual se ve reflejada fielmente en los diagramas de ojo de los canales de mayor capacidad. En cuanto a los efectos no lineales tales como XPM, SPM y FWM, en el escenario general solamente se ven reflejados gráficamente XPM y SPM, mientras que la generación del efecto FWM depende de si el espaciamiento entre los canales es igual o diferente; ya que al existir una separación de 100 GHz entre todos los canales del sistema, las frecuencias generadas a causa de FWM se aglomeran sobre las otras señales de comunicación afectando directamente el valor de la OSNR. La figura 2.19 ilustra los efectos presentes en el espectro DWDM del escenario general.

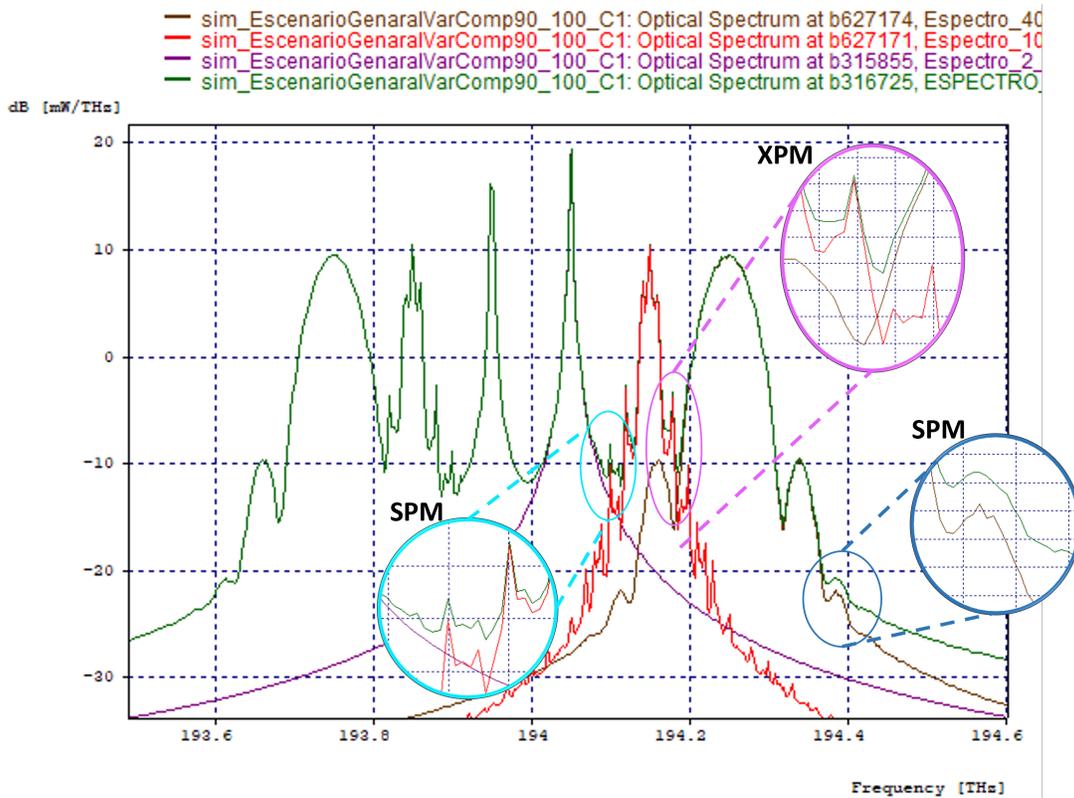


Figura 2.19: Espectro DWDM del escenario general.

2.4. Casos de estudio

En base al escenario planteado inicialmente se procede a definir los casos de estudio que permitirán analizar el desempeño de una arquitectura de Red Óptica de tipo NG-PON2 que implementa una tasa de Línea Mixta frente a los efectos de degradación asociados a la variación de la Densidad Espectral de Información. De esta manera, se plantea la realización del estudio en dos arquitecturas de red FTTx lo cual se asocia a una variación de distancia en la última milla. A continuación se presenta un diagrama general de los casos de estudio a realizar (figura 2.20).

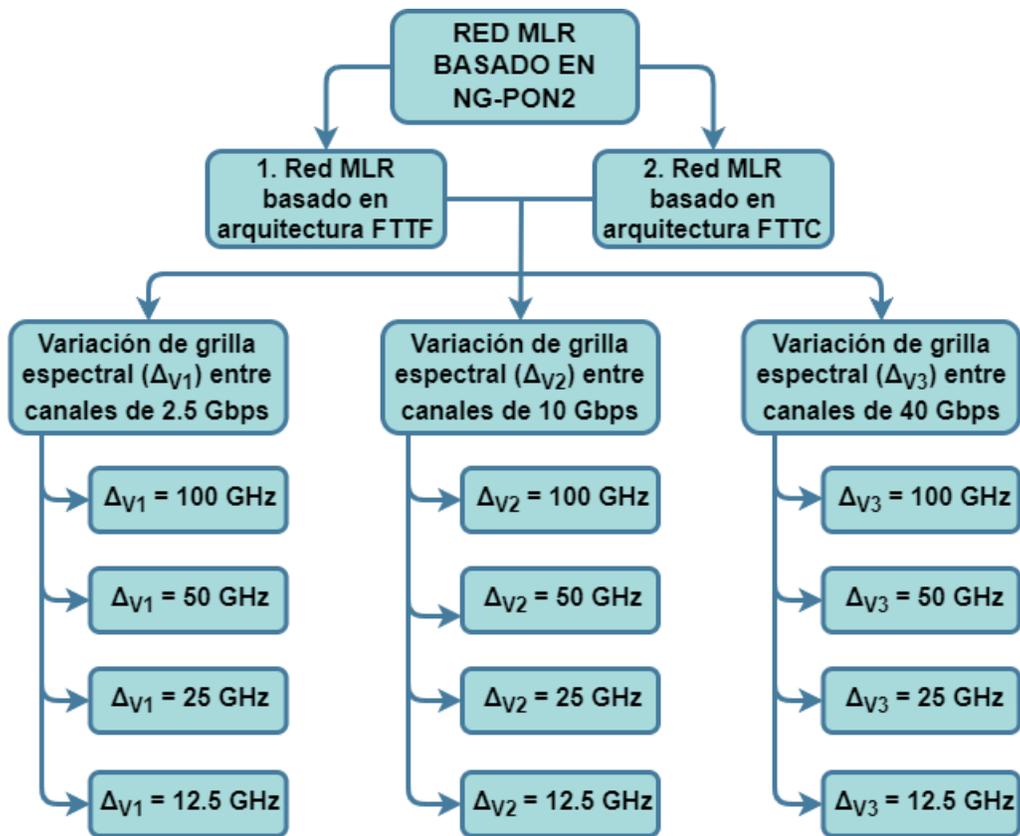


Figura 2.20: Casos de estudio.

Nota de autor:

En este capítulo se consideraron las herramientas de simulación apropiadas para el desarrollo del trabajo de grado, destacándose OptSim, debido a su capacidad para permitir el diseño de redes ópticas y la evaluación del desempeño de las mismas. Se define la metodología de simulación y el respectivo algoritmo o diagrama de flujo empleado para llevar a cabo el modelo de simulación. Luego, se caracteriza un modelo de red simplificado de un sistema de comunicaciones ópticas DWDM según requerimientos que incluyen equipos comerciales, recomendaciones de la ITU-T y parámetros de desempeño. Se implementa el modelo de simulación inicial SLR y se evalúa su desempeño con tal de garantizar que este se encuentre en condiciones óptimas para su posterior migración a un modelo del tipo MLR. Finalmente, se definen los casos de estudio que se abordaran durante el trabajo de grado con tal de poder cumplir con los objetivos planteados para el mismo.

CAPÍTULO 3

DESEMPEÑO DE UNA ARQUITECTURA DE RED DE LÍNEA MIXTA ASOCIADA A LA VARIACIÓN DE LA DENSIDAD ESPECTRAL DE INFORMACIÓN.

Este capítulo se enfoca en desarrollar los casos de estudio propuestos para analizar la medida de la densidad espectral de información, para ello se hace uso de la ecuación adaptada de la Teoría de Shannon en una red MLR-DWDM, que se basa en la red de acceso óptico NG-PON2 con una propagación cuasilineal y un *throughput* mayor a 100 Gbps en dos arquitecturas de red diferentes. Posteriormente, a partir del mejor caso de estudio identificado, se realizan unas mejoras en la configuración de los filtros con el objetivo de optimizar el uso del espectro óptico y así aprovecharlo al máximo garantizando el rendimiento de la red.

3.1. Ajustes realizados en el sistema a partir de los resultados del escenario general

A partir de los resultados obtenidos en el escenario general, se implementan algunos ajustes en el sistema con el fin de mejorar su rendimiento. Estos cambios abarcan diversas modificaciones. En primer lugar, para mantener una simetría en el análisis, se iguala la configuración del módulo transmisor de los canales 3 y 4; adicionalmente se incrementa la potencia del láser de los canales de 10 Gbps a tal punto que permita mejorar su relación señal/ruido óptico (OSNR) y, por ende, los resultados de los parámetros OPM. También se ajustan los filtros ópticos de recepción, especialmente en los canales de menor capacidad (Ch_3 y Ch_4).

Garantizar la simetría de los canales en el espectro permitirá identificar posibles efectos causados por no lineales de orden superior en el sistema. Por otra parte, considerando que los canales 2 y 5 son los más afectados por las penalidades de potencia ó atenuación, se decide incrementar la potencia en los láser, realizando una variación de la misma entre 0 y 6 dBm, obteniendo como resultado para los parámetros OPM los valores registrados en la tabla 3.1.

Capacidad del canal	Potencia del láser [dBm]	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q		Jitter [ns]	OSNR [dB]	OSNR Real [dB]
				[lin]	[dBm]			
10 Gbps	0	-24.5895	2.02×10^{-21}	10.1042	20.074061	0.0011708650	52.8022470	2.59015
	1	-23.6045	6.07×10^{-35}	12.3632	21.842448	0.0010207765	52.7541385	3.59740
	2	-22.6170	1×10^{-40}	14.1027	22.983629	0.0008888545	52.8180450	4.58332
	3	-21.6410	1×10^{-40}	16.3531	24.270864	0.0008092025	52.8478845	5.56912
	4	-20.6450	1×10^{-40}	17.0227	24.620444	0.0007372465	52.7935250	6.56783
	5	-19.6505	1×10^{-40}	21.1909	26.519412	0.0006565805	52.8304815	7.56340
	6	-18.6625	1×10^{-40}	23.6240	27.461410	0.0006019165	52.8253710	8.56140

Tabla 3.1: Valor promedio de OPM para Ch_2 y Ch_5 al variar la potencia del láser.

Los datos de la tabla 3.1 son una representación del promedio de los resultados obtenidos al variar la potencia del láser en los canales 2 y 5. Eligiendo el valor de 4 dBm como la mejor opción para estos canales; debido a que los parámetros OPM y específicamente la BER tienen un comportamiento ideal. Adicionalmente a esto, se elige porque la diferencia entre los valores de Factor Q de los canales analizados con el valor promedio es mínima en este caso, como se ve en la figura 3.1, manteniendo una BER de 1×10^{-40} .

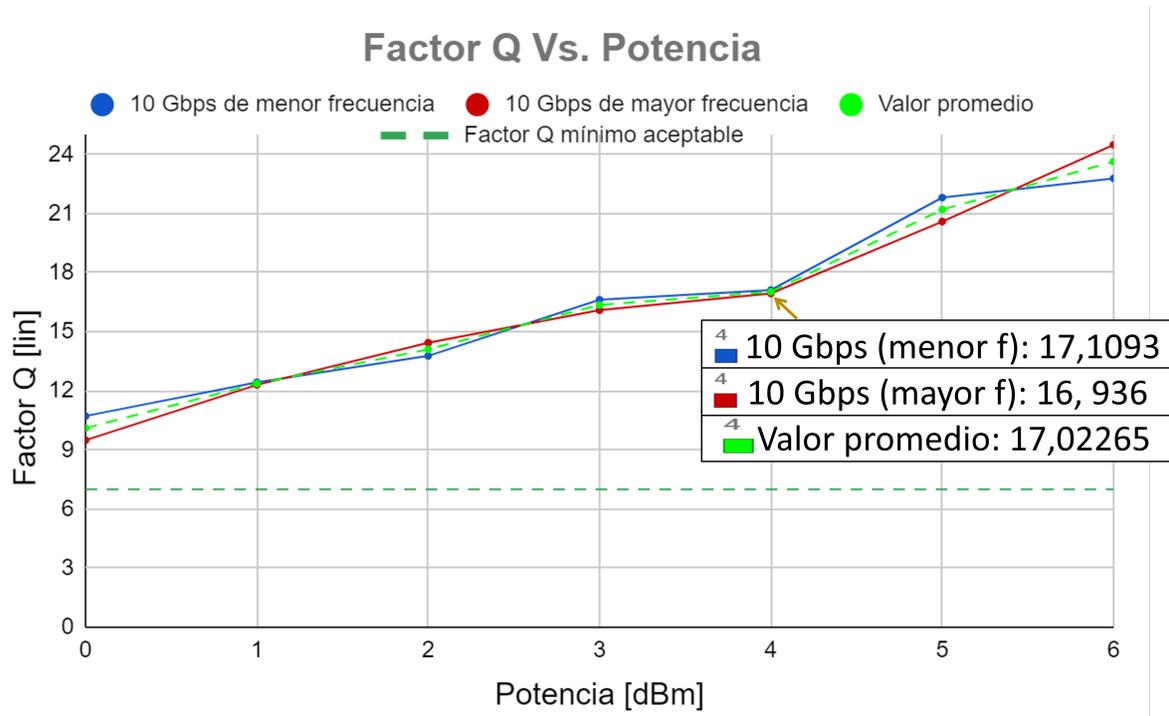


Figura 3.1: Factor Q Vs. Potencia para elección de potencia del láser.

También se considera la elección de este valor, aunque sus otros parámetros OPM sean mejores a una potencia mayor, para no estimular no linealidades inmersas en los sistemas ópticos, destacándose entre ellas la mezcla de 4 ondas (FWM) y a su vez generar beneficios desde una perspectiva de costo. La figura 3.2 permiten visualizar la mejora obtenida respecto a la figura 2.16b al realizar este ajuste específicamente.

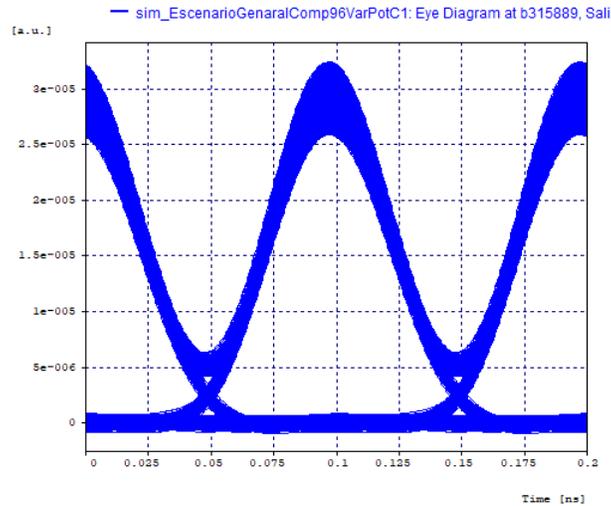


Figura 3.2: Diagrama del ojo del Ch_5 con potencia de láser de 4 dBm.

Una vez realizados los ajustes mencionados anteriormente, se inicia el planteamiento y análisis de cada uno de los casos de estudio propuestos. Es importante aclarar que en todos los casos, tanto el número de canales (2 canales de 40 Gbps + 2 canales de 10 + 2 canales de 2,5); como el *throughput* de la red (105 Gbps) se mantendrán fijos, al igual que la mayoría de los parámetros, mientras que la mejora en cuanto al uso eficiente del espectro implica variar la grilla espectral a 100, 50, 25 y 12,5 GHz según cada caso de estudio, y no en todo el sistema en general, como lo especifica la recomendación ITU T G.694.1 mencionada en capítulos anteriores.

Es necesario adicionalmente mencionar que la red montada en OptSim visualmente no experimenta ningún cambio, ya que los ajustes de espaciamento entre los canales se realiza mediante la implementación de una rejilla flexible, que implica la configuración de diferentes planes de canalización, eliminando la necesidad de hacer referencias recurrentes a la red construida en OptSim. En su lugar se elige utilizar una representación gráfica para visualizar los casos de estudio.

3.1.1. Caso 1: Variación de la grilla espectral entre los canales de 2.5 Gbps para diferentes tipos de arquitecturas FTTx

Para este primer caso de estudio se plantea la variación de la grilla espectral entre los canales de 2.5 Gbps únicamente, es decir, sin afectar el espaciamento (Δ_{vn}) entre los otros canales del sistema, para esto se parte de la red optimizada a través de los ajustes realizados en el capítulo anterior y al inicio de este.

La figura 3.3 es una representación gráfica del proceso de variación de la grilla espectral para este caso.

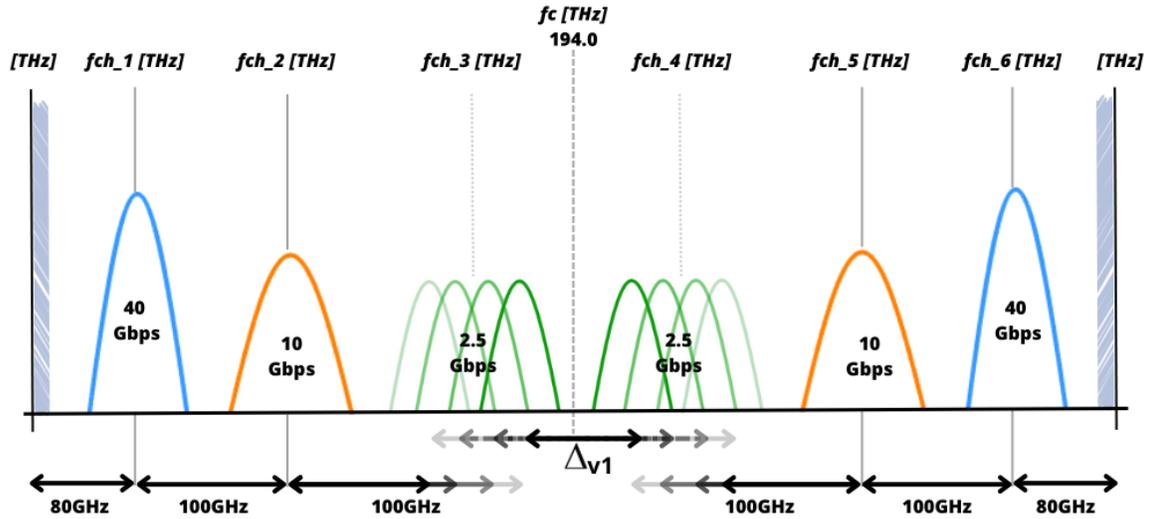


Figura 3.3: Representación de la variación de Δ_{v1} para el caso 1.

Siguiendo el plan de canalización establecido para el escenario general y asegurando previamente su operatividad en todos los canales a la máxima distancia propuesta en este trabajo de grado, se configura la red de manera que las diversas frecuencias centrales de los canales se ajusten conforme varíe el espaciamento. La determinación de estas frecuencias se lleva a cabo de forma simétrica con respecto a la frecuencia central del sistema, es decir, en relación a 194.0 THz. Inicialmente, se calculan con un espaciamento uniforme de 100 GHz, el cual actúa como punto de partida para el cálculo de las frecuencias a medida que se realizan las variaciones.

En la tabla 3.2 se especifica el plan de canalización establecido según el valor de (Δ_{v1}).

Δ_{v1} [GHz]	f_{ch_1} [THz]	f_{ch_2} [THz]	f_{ch_3} [THz]	f_{ch_4} [THz]	f_{ch_5} [THz]	f_{ch_6} [THz]
100	193.75	193.85	193.95	194.05	194.15	194.25
50	193.775	193.875	193.975	194.025	194.125	194.225
25	193.7875	193.8875	193.9875	194.0125	194.1125	194.2125
12.5	193.79375	193.89375	193.99375	194.00625	194.10625	194.20625

Tabla 3.2: Plan de canalización para variaciones entre canales de 2.5 Gbps.

Con las características de la red claras y con el objetivo de analizar el desempeño en términos de eficiencia de una arquitectura de red de línea mixta se expresa la ecuación 1.17 del capítulo 1 para los 3 tipos de capacidad de acceso nominal presentes en el trabajo de grado. Esta adaptación consiste en agregar al sistema híbrido γ canales tipo k que corresponden a los canales con 40 Gbps de acceso nominal como se expresa en la ecuación 3.1.

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{\sum_{i=1}^{\epsilon} B_{chi} \log_2 \left(1 + \frac{P_{s-chi}}{N_0 B} \right) + \sum_{j=1}^{\varphi} B_{chj} \log_2 \left(1 + \frac{P_{s-chj}}{N_0 B} \right) + \sum_{k=1}^{\gamma} B_{chk} \log_2 \left(1 + \frac{P_{s-chk}}{N_0 B} \right)}{\frac{B_{chi}[Hz]}{2} + \frac{B_{chj}[Hz]}{2} + \frac{B_{chk}[Hz]}{2} + (N-1)\Delta_v[Hz]} \quad (3.1)$$

3.1.1.1. Análisis de resultados

Tomando inicialmente la arquitectura FTTC como un despliegue de fibra de 80 Km más 500 m de última milla, se obtiene el espectro óptico a nivel de transporte ilustrado en la figura 3.4, donde en principio todos los canales están separados simétricamente a 100 GHz, logrando apreciar como los canales de 2.5 Gbps tienen un comportamiento muy similar al visualizado en el back to back.

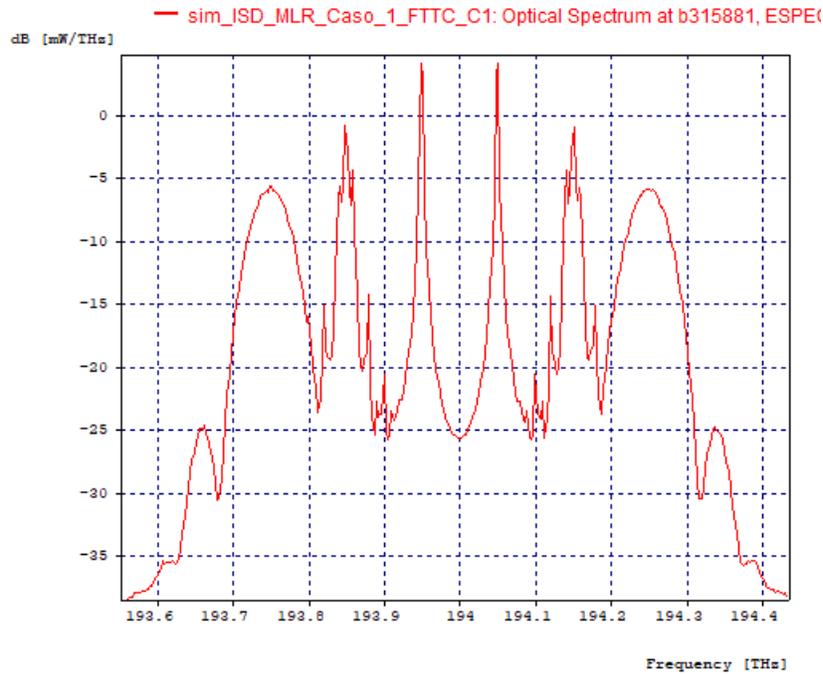


Figura 3.4: Espectro del *Throughput* inicial para arquitectura FTTC.

Se inicia la aproximación de los canales de 2.5Gbps, objeto del presente caso de estudio, migrando a rejilla flexible que permita analizar la separación de estos canales a 100, 50, 25 y 12.5 GHz con el fin de identificar una utilización efectiva del espectro sin comprometer el rendimiento del sistema.

Para tener un panorama más claro del comportamiento de los canales ante estas variaciones, se recopilan los valores de los parámetros OPM y se presentan de manera resumida en la tabla 3.3, donde se destaca que la variación del espaciamiento lo que más afecta es el valor del factor Q, sin embargo, no son cambios críticos y permiten garantizar el adecuado funcionamiento del sistema.

Δ_{v1} [GHz]	Canal	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q		Jitter [ns]	OSNR [dB]	OSNR Real [dB]
				[lin]	[dBm]			
100	Ch_3	-18.416	$1x10^{-40}$	70.789	36.99932	0.0703448	53.779392	11.0905
	Ch_4	-18.419	$1x10^{-40}$	72.8974	37.254241	0.0802418	53.935397	11.0856
50	Ch_3	-18.386	$1x10^{-40}$	73.8059	37.361821	0.0726331	56.968418	11.3706
	Ch_4	-18.388	$1x10^{-40}$	71.023	37.027975	0.0708422	57.034415	11.3675
25	Ch_3	-18.351	$1x10^{-40}$	72.3084	37.183772	0.0773321	60.646934	11.5332
	Ch_4	-18.416	$1x10^{-40}$	72.8328	37.246544	0.0770056	60.665035	11.4672
12.5	Ch_3	-18.269	$1x10^{-40}$	60.3575	35.614629	0.0639459	53.814382	11.1419
	Ch_4	-18.268	$1x10^{-40}$	58.5403	35.3491	0.0748183	53.853615	11.1463

Tabla 3.3: Valores OPM para canales de 2.5 Gbps variando Δ_{v1} , Arq. FTTC.

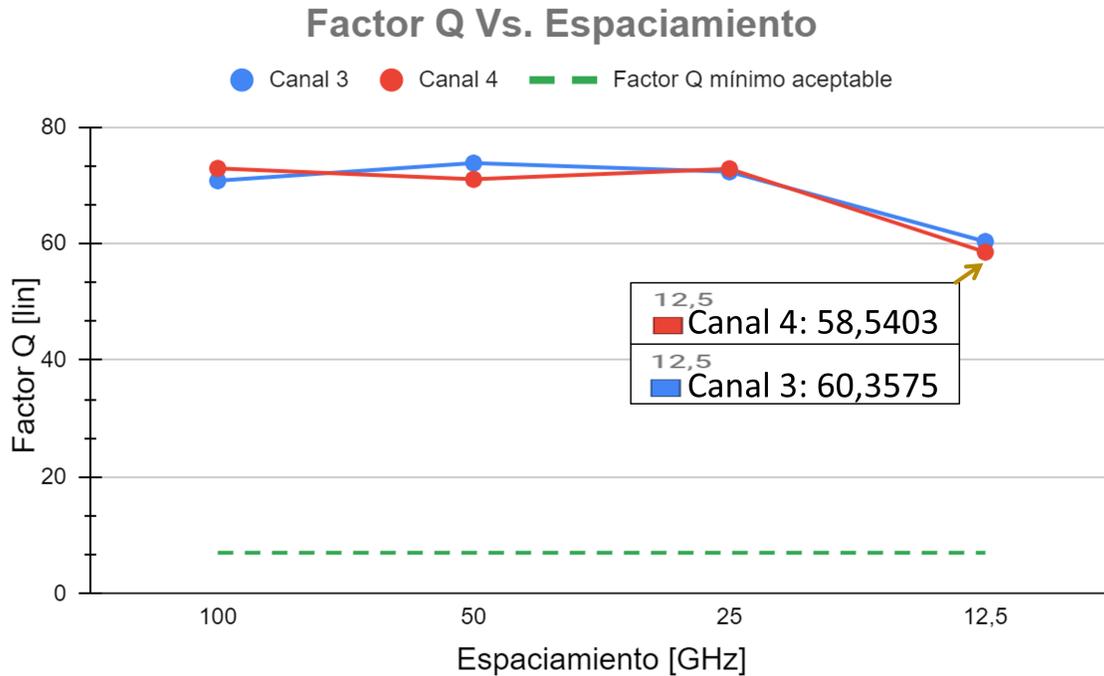


Figura 3.5: Desempeño del Factor Q ante la variación de Δ_{v1} , Arq. FTTC.

En relación al gráfico de la figura 3.5, El eje X se organiza de forma decreciente para alinearse con el desarrollo de las simulaciones. En este, se puede notar que el factor Q mantiene valores con fluctuaciones moderadas hasta los 25 GHz, cuando los canales 3 y 4 se encuentran espaciados al valor mínimo sugerido por la ITU (12.5 GHz), se evidencia un descenso, sin llegar a caer por debajo de las 7 unidades lineales (7 [lin]) sugeridas en la recomendación como el mínimo valor aceptable necesario para que el receptor pueda detectar la señal.

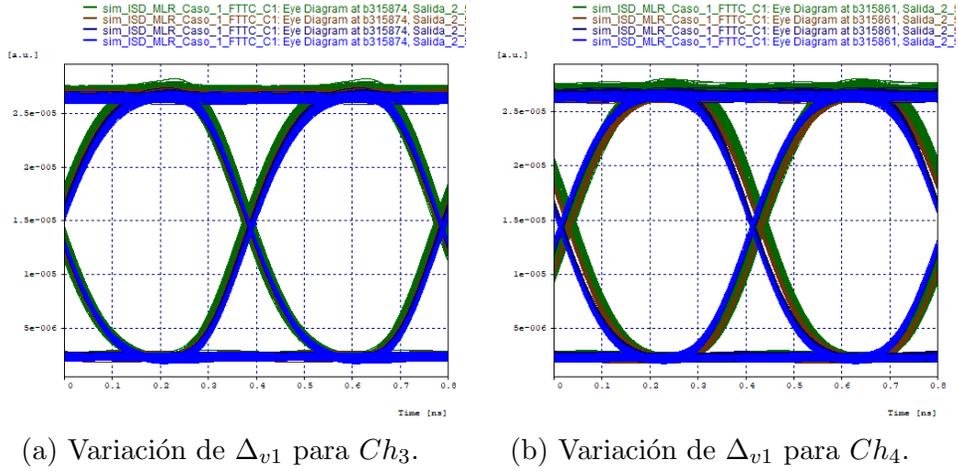


Figura 3.6: Diagramas de ojo para todos los valores de Δ_{v1} , Arq. FTTC.

Las figuras 3.6a y 3.6b son simulaciones superpuestas del diagrama de ojo en recepción para todos los valores de Δ_{v1} de los canales 3 y 4 respectivamente. Estas simulaciones permiten reiterar los cambios mínimos, a medida que el espaciamiento entre ellos se reduce. Dichos cambios también se pueden ver reflejados en el espectro óptico, como la presencia del efecto no lineal XPM, tal como se registra en la figura 3.7a. Por otra parte, la figura 3.7b representa la posición en frecuencia de los canales 3 y 4 en recepción a un Δ_{v1} de 100 GHz (señales de color azul y verde) y 12.5GHz (señales de color morada y roja) donde es posible evidenciar la interferencia interportadora causante del efecto XPM en la recepción de los canales de 2.5 Gbps individualmente. Sin embargo, como se dijo inicialmente en base a los valores de los parámetros OPM se reitera que aunque en recepción este presente XPM esta no es lo suficientemente fuerte para afectar drásticamente el desempeño de los canales y por ende, tampoco del sistema en general ya que este efecto es muy común en los sistemas MLR-DWDM.

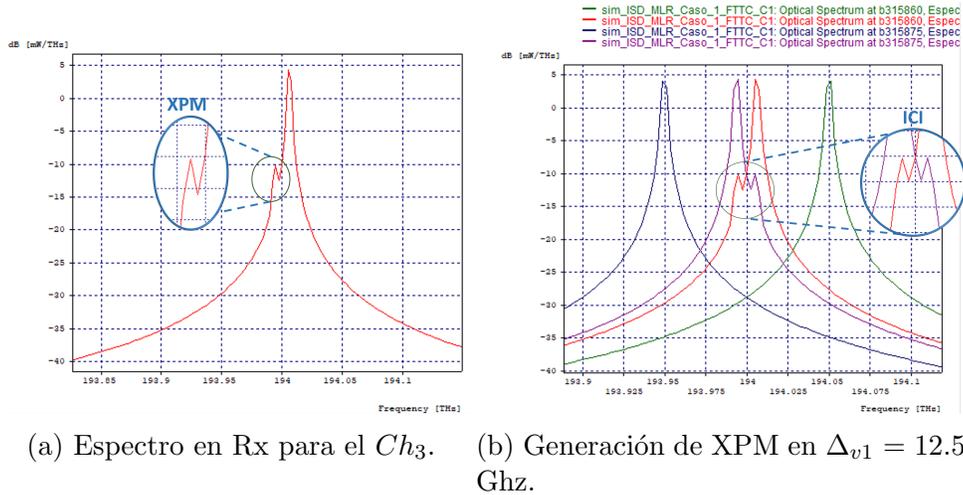


Figura 3.7: Presencia de efecto XPM en canales de 2.5 Gbps, Arq. FTTC.

El efecto no lineal XPM, también se presenta en el límite entre los canales con capacidad de 40 y 10 Gbps, en los cuales se nota desde el inicio de las variaciones como los canales 1 y 6 correspondientes a la capacidad de 40 Gbps ocupan un ancho espectral proporcional a su capacidad afectando a los canales 2 y 5 adyacentes de 10 Gbps como se muestra en la figura 3.8 pero al igual que la afección anterior no impide la recuperación satisfactoria de la señal en recepción.

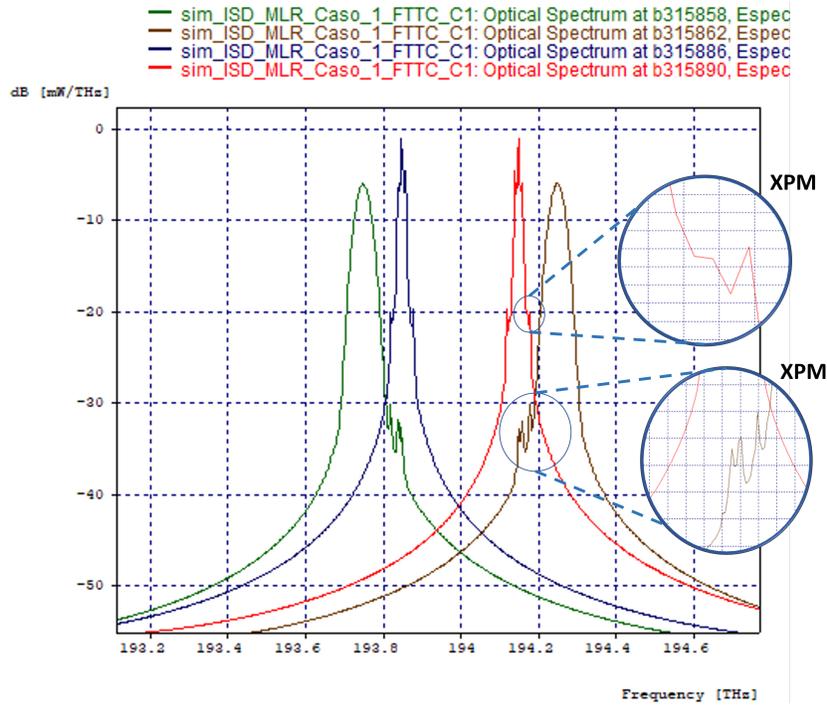


Figura 3.8: Presencia de efecto XPM en canales de 40 y 10 Gbps.

La no degradación de las señales al realizar las variaciones, es un resultado benéfico para el sistema en desarrollo, ya que esto le permite tener un ahorro espectral a nivel de transporte, es decir, se optimiza espectro óptico y en consecuencia se obtiene un sistema más eficiente. Ahora bien, como se tienen diferentes variaciones de espaciamiento entre los canales 3 y 4, se realiza el cálculo de la eficiencia espectral distribuida del sistema haciendo uso de la ecuación 3.1, para saber qué tanto porcentaje mejora el sistema y mediante los parámetros de medición de la densidad espectral de información, identificar si el sistema presenta o no efectos difícilmente perceptibles de manera visual.

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{\sum_{i=1}^2 2,5[Gbps] + \sum_{j=1}^2 10[Gbps] + \sum_{k=1}^2 40[Gbps]}{\frac{16,8618[GHz]}{2} + \frac{27,6865[GHz]}{2} + \frac{46,6538[GHz]}{2} + (5 * 100[GHz])}$$

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{(2 * 2,5) + (2 * 10) + (2 * 40)}{545,6011} \left[\frac{Gbps}{GHz} \right]$$

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{105}{545,6011} = 0,1924 \left[\frac{bps}{Hz} \right]$$

En cuanto al análisis espectral, es importante resaltar que al comparar la eficiencia espectral distribuida calculada por medición, varía de la calculada con la ecuación anteriormente presentada, debido a que, en primera instancia la medición del ancho de banda del espectro a nivel de transporte (figura 3.9, señal color verde) se realiza con el espectro sin procesar y por tanto las señales tendrán un mayor ancho de banda de canal dedicado en comparación a cuando se mide en cada receptor, el cual se encarga de filtrar las señales para mitigar el ruido, especialmente en los canales de mayor capacidad, como se observa en la figura 3.9 (señales color roja y azul).

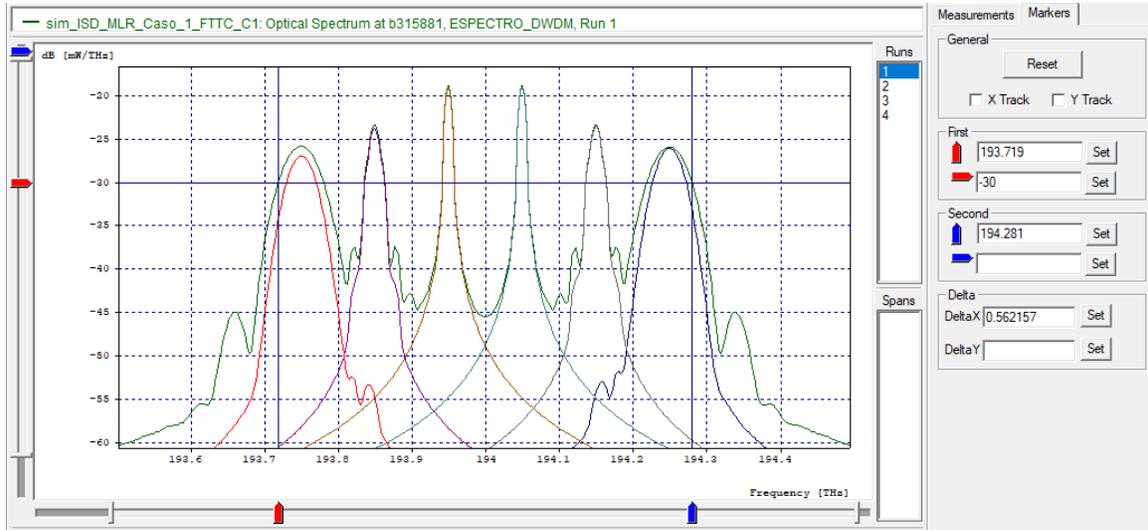


Figura 3.9: BW a nivel de transporte Vs. BW en canales dedicados, Arq. FTTC.

Para esta investigación, se considera la eficiencia espectral distribuida (ISD) calculada mediante la ecuación 3.1, la cual, aunque muestra algunas variaciones al compararse con el cálculo realizado mediante el ancho de banda distribuido, es la que finalmente se refleja en cada receptor. A continuación, se presenta la tabla 3.4, que resume los resultados de la ISD obtenida a una separación simétrica de 100 GHz entre todos los canales. Estos resultados corresponden a la primera variación y sirven como punto de referencia para las otras variaciones.

Canal	Δ_{v1} [GHz]	C_N [Gbps]	C_{TOT} [Gbps]	$C_{PRO}(80,5Km)$ [Gbps * Km]	BW_{ded} [GHz]	BW_{dis} [GHz]	η_{ded} [bps/Hz]	η_{dis} [bps/Hz]
Ch_1	100	40	105	8452.5	46.7446	545.6011	85.57 %	19.24 %
Ch_2		10			27.6861		36.12 %	
Ch_3		2.5			16.8635		14.82 %	
Ch_4		2.5			16.8601		14.83 %	
Ch_5		10			27.6870		36.12 %	
Ch_6		40			46.5630		85.91 %	

Tabla 3.4: Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v1}=100$ GHz, Arq. FTTC.

Posteriormente, se cambia la grilla espectral para un espaciamiento entre canales de

2.5 Gbps a 50 GHz teniendo en cuenta el plan de canalización de la tabla 3.2. En este caso se nota una mejora a primera vista en el comportamiento de los canales de 10 Gbps, dando como resultado un espectro coherente con la modulación RZ implementada en el canal como se puede evidenciar en la figura 3.10.

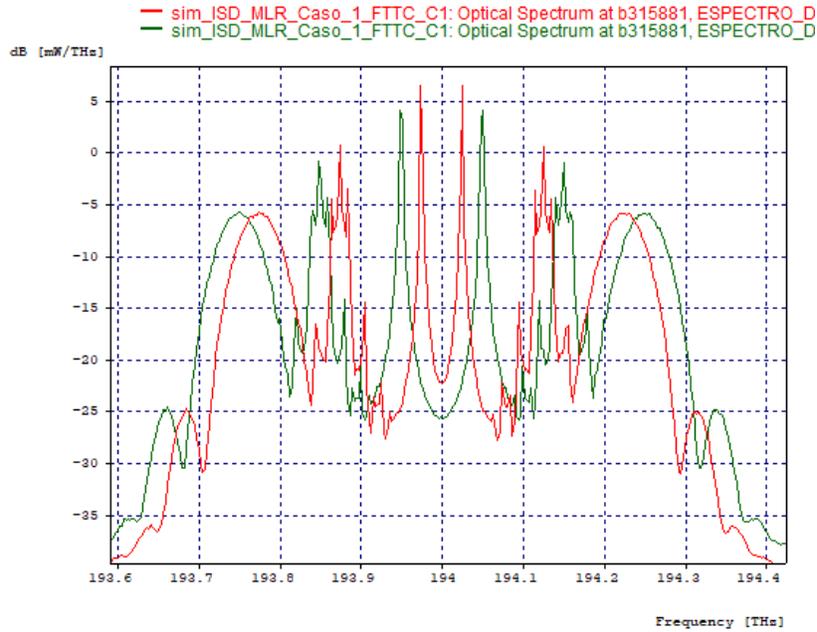


Figura 3.10: Espectro DWDM para $\Delta_{v1} = 100$ GHz y $\Delta_{v1} = 50$ GHz, Arq. FTTC.

La mejora podría atribuirse a la implementación de la grilla flexible, la cual cambia la posición relativa en frecuencia de todos los canales, de tal manera que, se observa una mejora significativa, especialmente en los canales de 10 Gbps respecto a los parámetros OPM. La diferencia entre la implementación de una grilla flexible y una grilla fija radica en que esta última tiene mayores probabilidades de dar lugar al efecto no lineal FWM de una manera imperceptible visualmente en la gráfica. Esto se debe a que, al existir un espaciamiento igual entre canales, las frecuencias generadas por FWM se aglomeran sobre las señales de los canales de comunicación, disminuyendo el nivel de la relación señal a ruido óptico del sistema (OSNR). Por esta razón, se observa en la tabla 3.6 que el comportamiento de la OSNR para los canales de 10 Gbps mejora cuando el valor de Δ_{v1} es igual a 50 GHz en comparación con el valor obtenido en la OSNR a una separación de 100 GHz (tabla 3.5).

Δ_{v1} [GHz]	Canal	Capacidad de canal	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q		Jitter [ns]	OSNR [dB]	OSNR Real [dB]
					[lin]	[dBm]			
100	Ch_1	40 Gbps	-19.58	1×10^{-40}	24.0206	27.611677	0.000500676	49.823145	4.06119
	Ch_2	10 Gbps	-20.488	1×10^{-40}	17.0544	24.636706	0.000751113	52.232365	6.65053
	Ch_3	2.5 Gbps	-18.416	1×10^{-40}	70.789	36.99932	0.0703448	53.779392	11.0905
	Ch_4	2.5 Gbps	-18.419	1×10^{-40}	72.8974	37.254241	0.0802418	53.935397	11.0856
	Ch_5	10 Gbps	-20.515	1×10^{-40}	18.5491	25.366451	0.000749217	52.177762	6.6125
	Ch_6	40 Gbps	-19.613	1×10^{-40}	58.5336	35.348108	0.000151883	50.550014	4.04506

Tabla 3.5: Parámetros OPM para $\Delta_{v1} = 100$ GHz, Arq. FTTC.

Δ_{v1} [GHz]	Canal	Capacidad de canal	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q		Jitter [ns]	OSNR [dB]	OSNR Real [dB]
					[lin]	[dBm]			
50	Ch_1	40 Gbps	-19.583	1×10^{-40}	26.4106	28.435574	0.000493835	50.084052	4.08816
	Ch_2	10 Gbps	-20.482	1×10^{-40}	17.0051	24.61156	0.000784304	54.678973	6.82092
	Ch_3	2.5 Gbps	-18.386	1×10^{-40}	73.8059	37.361821	0.0726331	56.968418	11.3706
	Ch_4	2.5 Gbps	-18.388	1×10^{-40}	71.023	37.027975	0.0708422	57.034415	11.3675
	Ch_5	10 Gbps	-20.504	1×10^{-40}	17.0457	24.632287	0.000808729	55.124723	6.7821
	Ch_6	40 Gbps	-19.612	1×10^{-40}	60.1676	35.587254	0.000180384	50.5944444	4.05812

Tabla 3.6: Parámetros OPM para $\Delta_{v1}=50$ GHz, Arq. FTTC.

Para determinar el grado de mejora del sistema con respecto a esta variación, se procede a calcular nuevamente la ISD, utilizando las variables de medición y control resumidas en la tabla 3.7.

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{\sum_{i=1}^2 2,5[Gbps] + \sum_{j=1}^2 10[Gbps] + \sum_{k=1}^2 40[Gbps]}{\frac{14,9184[GHz]}{2} + \frac{28,0696[GHz]}{2} + \frac{46,6450[GHz]}{2} + ((4 * 100[GHz]) + 50[GHz])}$$

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{(2 * 2,5) + (2 * 10) + (2 * 40)}{494,8165} \left[\frac{Gbps}{GHz} \right]$$

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{105}{494,8165} = 0,2122 \left[\frac{bps}{Hz} \right]$$

Canal	Δ_{v1} [GHz]	C_N [Gbps]	C_{TOT} [Gbps]	$C_{PRO}(80,5Km)$ [Gbps * Km]	BW_{ded} [GHz]	BW_{dis} [GHz]	η_{ded} [bps/Hz]	η_{dis} [bps/Hz]
Ch_1	100	40	105	8452.5	46.7329	494.8165	85.59 %	21.22 %
Ch_2		10			28.0661		35.63 %	
Ch_3		2.5			14.9169		16.76 %	
Ch_4	50	2.5			14.9199		16.76 %	
Ch_5	100	10			28.0730		35.62 %	
Ch_6	100	40			46.5570		85.92 %	

Tabla 3.7: Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v1}=50$ GHz, Arq. FTTC.

Logrando una mejora de 1.98 % en eficiencia en comparación a cuando se trabajó a un espaciamento fijo de 100 GHz. En otras palabras se obtiene un ahorro de 50.7846 GHz en el espectro del sistema.

Para los otros casos donde Δ_{v1} toma los valores de 25 y 12.5 GHz se evidencia cómo a pesar de que los canales 3 y 4 estén cada vez más cerca, sus parámetros OPM resumidos en las tablas 3.8 y 3.9 respectivamente no cambian abruptamente, por lo que permiten, incluso en 12.5 GHz de separación entre estos canales, obtener un buen desempeño en recepción.

Δ_{v1} [GHz]	Canal	Capacidad de canal	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q		Jitter [ns]	OSNR [dB]	OSNR Real [dB]
					[lin]	[dBm]			
25	Ch_1	40 Gbps	-19.584	1×10^{-40}	26.4483	28.447955	0.000452088	50.11332	4.08578
	Ch_2	10 Gbps	-20.5	1×10^{-40}	17.7861	25.001617	0.000772216	56.388625	6.86216
	Ch_3	2.5 Gbps	-18.351	1×10^{-40}	72.3084	37.183772	0.0773321	60.646934	11.5332
	Ch_4	2.5 Gbps	-18.416	1×10^{-40}	72.8328	37.246544	0.0770056	60.665035	11.4672
	Ch_5	10 Gbps	-20.51	1×10^{-40}	16.5908	24.397365	0.000822492	56.970199	6.84605
	Ch_6	40 Gbps	-19.611	1×10^{-40}	56.7806	35.083993	0.000152252	50.643872	4.06542

Tabla 3.8: Parámetros OPM para $\Delta_{v1} = 25$ GHz, Arq. FTTC.

Δ_{v1} [GHz]	Canal	Capacidad de canal	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q		Jitter [ns]	OSNR [dB]	OSNR Real [dB]
					[lin]	[dBm]			
12.5	Ch_1	40 Gbps	-19.583	1×10^{-40}	25.8847	28.260879	0.000478746	49.936679	4.03793
	Ch_2	10 Gbps	-20.508	1×10^{-40}	18.169	25.186634	0.000759695	51.594934	6.58872
	Ch_3	2.5 Gbps	-18.269	1×10^{-40}	60.3575	35.614629	0.0639459	53.814382	11.1419
	Ch_4	2.5 Gbps	-18.268	1×10^{-40}	58.5403	35.3491	0.0748183	53.8533615	11.1463
	Ch_5	10 Gbps	-20.519	1×10^{-40}	17.3795	24.800754	0.000790498	51.795192	6.57695
	Ch_6	40 Gbps	-19.609	1×10^{-40}	56.9176	35.104935	0.000197423	50.542904	4.04006

Tabla 3.9: Parámetros OPM para $\Delta_{v1} = 12.5$ GHz, Arq. FTTC.

Al lograr la aproximación de los canales a la mínima separación sugerida por la ITU, es decir, a un $\Delta_{v1} = 12,5$ GHz, se obtiene el espectro óptico del *throughput* de la figura 3.11. en la cual nuevamente se ve las afecciones sufridas por los efectos presentes con un mayor grado de impacto para esta variación.

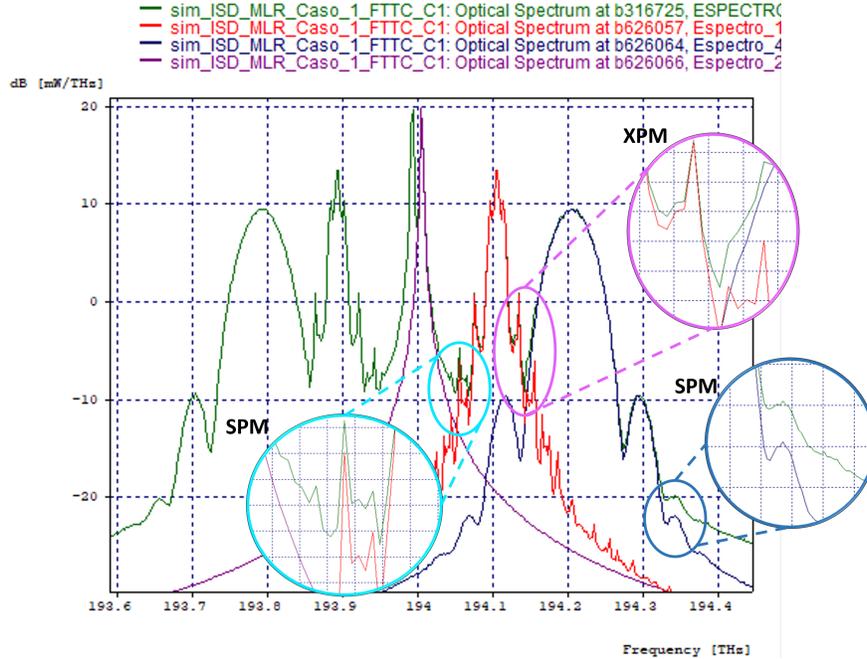
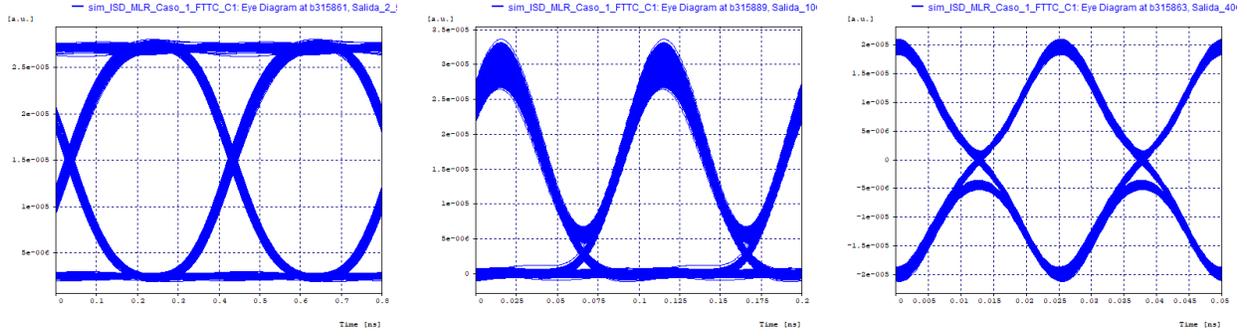


Figura 3.11: Espectro DWDM para $\Delta_{v1} = 12.5$ GHz, Arq. FTTC.

Mientras que, en las figuras 3.12a, 3.12b y 3.12c se observan los diagramas de ojo en recepción de los canales 4, 5 y 6 para este mismo caso.

(a) Diagrama de ojo Ch_4 .(b) Diagrama de ojo Ch_5 .(c) Diagrama de ojo Ch_6 .Figura 3.12: Resultados de los canales 4, 5 y 6 para un $\Delta_{v1} = 12.5$ GHz en Arq. FTTC.

No obstante, es importante realizar el cálculo de la eficiencia espectral mediante la ecuación 3.1 tanto para $\Delta_{v1} = 25$ GHz como para $\Delta_{v1} = 12.5$ GHz, obteniendo para esta última variación la máxima eficiencia del presente caso de estudio.

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{\sum_{i=1}^2 2,5[Gbps] + \sum_{j=1}^2 10[Gbps] + \sum_{k=1}^2 40[Gbps]}{\frac{13,6015[GHz]}{2} + \frac{28,1197[GHz]}{2} + \frac{46,6599[GHz]}{2} + ((4 * 100[GHz]) + 25[GHz])}$$

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{(2 * 2,5) + (2 * 10) + (2 * 40)}{469,1905} \left[\frac{Gbps}{GHz} \right]$$

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{105}{469,1905} = 0,2238 \left[\frac{bps}{Hz} \right]$$

Canal	Δ_{v1} [GHz]	C_N [Gbps]	C_{TOT} [Gbps]	$C_{PRO}(80,5Km)$ [Gbps * Km]	BW_{ded} [GHz]	BW_{dis} [GHz]	η_{ded} [bps/Hz]	η_{dis} [bps/Hz]
Ch_1	100	40	105	8452.5	46.7742	469.1905	85.52 %	22.38 %
Ch_2	100	10			28.1051		35.58 %	
Ch_3	25	2.5			13.5097		18.51 %	
Ch_4	100	2.5			13.6933		18.26 %	
Ch_5	100	10			28.1343		35.54 %	
Ch_6	100	40			46.5455		85.94 %	

Tabla 3.10: Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v1} = 25$ GHz, Arq. FTTC.

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{\sum_{i=1}^2 2,5[Gbps] + \sum_{j=1}^2 10[Gbps] + \sum_{k=1}^2 40[Gbps]}{\frac{17,3916[GHz]}{2} + \frac{27,6672[GHz]}{2} + \frac{46,5388[GHz]}{2} + ((4 * 100[GHz]) + 12,5[GHz])}$$

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{(2 * 2,5) + (2 * 10) + (2 * 40)}{458,2988} \left[\frac{Gbps}{GHz} \right]$$

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{105}{458,2988} = 0,2291 \left[\frac{bps}{Hz} \right]$$

Canal	Δ_{v1} [GHz]	C_N [Gbps]	C_{TOT} [Gbps]	$C_{PRO}(80,5Km)$ [Gbps * Km]	BW_{ded} [GHz]	BW_{dis} [GHz]	η_{ded} [bps/Hz]	η_{dis} [bps/Hz]
Ch_1	100	40	105	8452.5	46.5327	458.2988	85.96 %	22.91 %
Ch_2	100	10			27.7051		36.09 %	
Ch_3	12.5	2.5			17.4042		14.36 %	
Ch_4	100	2.5			17.3789		14.39 %	
Ch_5	100	10			27.6293		36.19 %	
Ch_6	100	40			46.5448		85.94 %	

Tabla 3.11: Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v1}=12.5$ GHz, Arq. FTTC.

Los datos de la tabla 3.11 evidencian una disminución en el ancho de banda utilizado por el sistema, aproximadamente de 87.3023 GHz, lo que a su vez refleja una mejora de alrededor del 3.67 % en la eficiencia espectral en comparación con los resultados obtenidos en la tabla 3.4. Por otro lado, los diagramas de ojo de la figura 3.12, demuestran la adecuada configuración del sistema inicial reduciendo los efectos degradantes generados por fenómenos lineales y no lineales inherentes al sistema.

Bajo las mismas condiciones iniciales, se realiza el análisis para una arquitectura de red FTTF. Esta arquitectura, al igual que FTTC, tiene un despliegue en el SPAN de la ODN igual a 80 Km. La diferencia entre las arquitecturas radica en la longitud de la última milla, que varía de 500 m a 1 Km para FTTF. Las gráficas comparativas de los parámetros OPM, representadas en las figuras 3.13 y 3.14 destacan la similitud en el comportamiento entre ambas configuraciones de arquitectura de red.

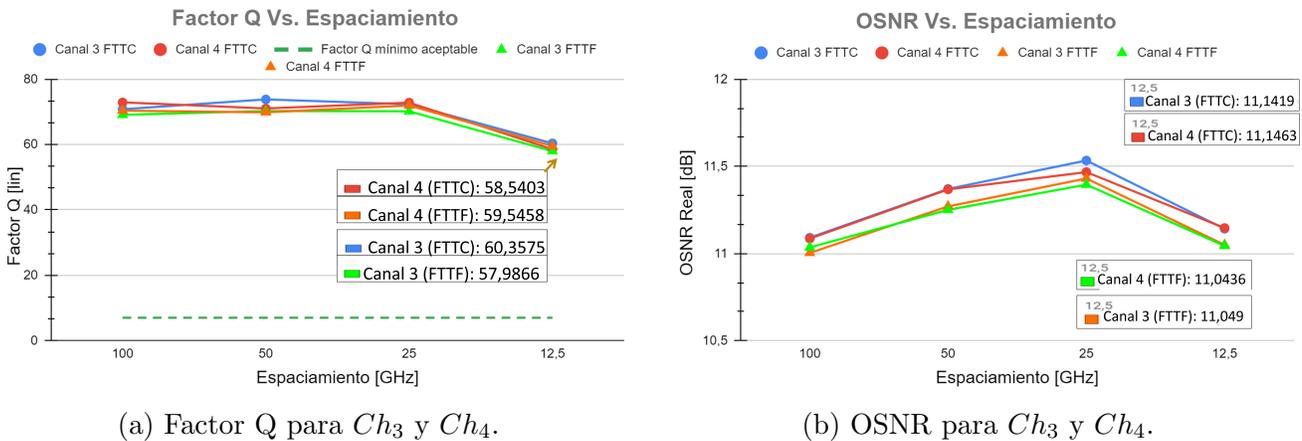
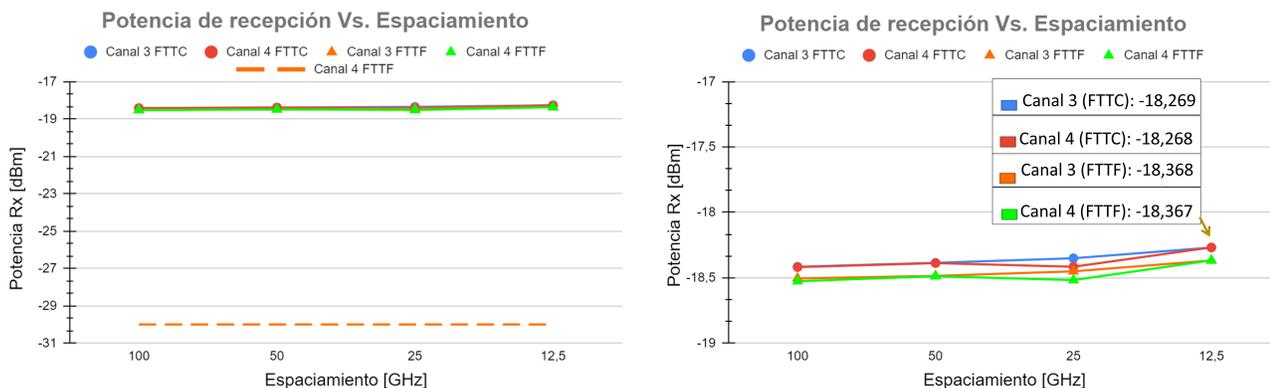


Figura 3.13: Desempeño del Factor Q y OSNR ante la variación de Δ_{v1} en Arq. FTTC y FTTF.

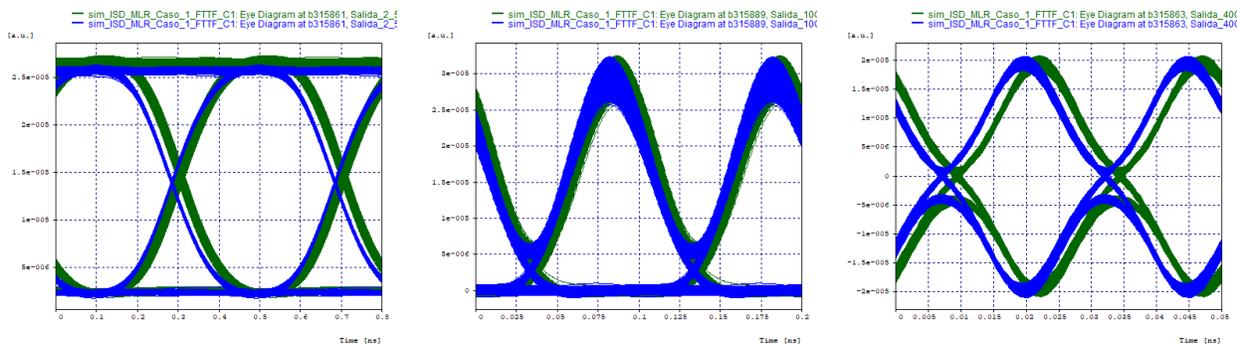


(a) Potencia de Rx para Ch_3 y Ch_4 .

(b) Potencia de Rx para Ch_3 y Ch_4 escalado.

Figura 3.14: Potencia Rx Vs. variación Δ_{v1} en Arq. FTTC y FTTF.

Las figuras 3.13 y 3.14 evidencian que la diferencia entre las arquitecturas radica en el decremento de algunos parámetros OPM debido a la variación de la longitud de la última Milla, destacando que es el resultado esperado ya que a nivel general de las telecomunicaciones la distancia es un factor determinante para establecer satisfactoriamente la comunicación, la transmisión de datos, etc. Las figuras 3.15a, 3.15b y 3.15c representan el diagrama de ojo obtenido en recepción de los canales 4, 5 y 6 de una arquitectura FTTF y reflejan las diferencias mencionadas.



(a) Diagrama de ojo Ch_4 .

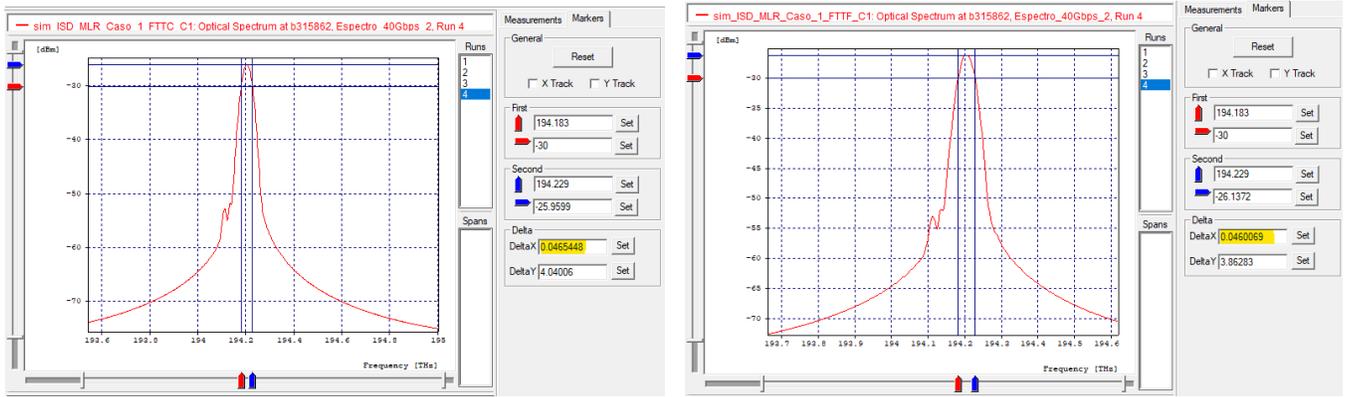
(b) Diagrama de ojo Ch_5 .

(c) Diagrama de ojo Ch_6 .

Figura 3.15: Comparación de $\Delta_{v1} = 100$ GHz y $\Delta_{v1} = 12.5$ GHz en canales 4, 5 y 6 para una Arq. FTTF.

En la figura 3.15a, se evidencia que la región correspondiente a la marca de unos (parte superior del diagrama) experimenta un ligero ensanchamiento cuando hay un Δ_{v1} igual a 12.5GHz (diagrama verde en la figura) entre los canales 3 y 4, indicando la presencia de interferencia entre símbolos (*Intersymbolic Interference*, ISI), es decir, los símbolos transmitidos están comenzando a dispersarse y por tanto generar retardos que ocasionan la superposición entre ellos en recepción e influyen en la correcta recuperación de información.

En cuanto a los demás canales, las figuras 3.15b y 3.15c muestran que no experimentan modificaciones significativas. Adicionalmente, se ratifica que la configuración es acertada para este tipo de arquitectura y el desempeño es similar. A nivel de transporte la señal mantiene el *throughput* y los efectos al igual que en FTTC; el único parámetro de medición afectado es el ancho de banda de canal dedicado (BW_{ded}), ya que la señal llega ligeramente más atenuada que en la arquitectura FTTC, lo que altera los niveles de potencia y, por ende, el nivel de sensibilidad al que se mide el BW_{ded} .



(a) Espectro Ch_6 en Arq. FTTC.

(b) Espectro Ch_6 en Arq. FTTF.

Figura 3.16: Medición de BW_{ded} en Arq. FTTC y FTTF.

Un ejemplo claro de lo dicho anteriormente se presenta en las figuras 3.16a y 3.16b del canal 6, en el cual se evidencia el cambio de BW_{ded} y por tanto el cambio de la eficiencia espectral distribuida. Sin embargo, este cambio no afecta significativamente al sistema, ya que es del orden de los MHz, en ese sentido, se presenta la tabla 3.12 que registra los datos iniciales de la eficiencia espectral distribuida y la tabla 3.13 que registra los datos de la densidad espectral de información finales.

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{\sum_{i=1}^2 2,5[Gbps] + \sum_{j=1}^2 10[Gbps] + \sum_{k=1}^2 40[Gbps]}{\frac{16,8181[GHz]}{2} + \frac{27,5267[GHz]}{2} + \frac{46,1120[GHz]}{2} + (5 * 100[GHz])}$$

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{(2 * 2,5) + (2 * 10) + (2 * 40)}{545,2284} \left[\frac{Gbps}{GHz} \right]$$

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{105}{545,2284} = 0,1926 \left[\frac{bps}{Hz} \right]$$

Canal	Δ_{v1} [GHz]	C_N [Gbps]	C_{TOT} [Gbps]	$C_{PRO}(81Km)$ [Gbps * Km]	BW_{ded} [GHz]	BW_{dis} [GHz]	η_{ded} [bps/Hz]	η_{dis} [bps/Hz]
Ch_1	100	40	105	8505	46.2144	545.2284	86.55 %	19.26 %
Ch_2		10			27.5258		36.33 %	
Ch_3		2.5			16.7867		14.89 %	
Ch_4		2.5			16.8495		14.84 %	
Ch_5		10			27.5276		36.33 %	
Ch_6		40			46.0096		86.94 %	

Tabla 3.12: Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v1}=100$ GHz, Arq. FTTF.

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{\sum_{i=1}^2 2,5[Gbps] + \sum_{j=1}^2 10[Gbps] + \sum_{k=1}^2 40[Gbps]}{\frac{17,3135[GHz]}{2} + \frac{27,3893[GHz]}{2} + \frac{46,2306[GHz]}{2} + (4 * 100[GHz] + 12,5[GHz])}$$

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{(2 * 2,5) + (2 * 10) + (2 * 40)}{457,96665} \left[\frac{Gbps}{GHz} \right]$$

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{105}{457,96665} = 0,2293 \left[\frac{bps}{Hz} \right]$$

Canal	Δ_{v1} [GHz]	C_N [Gbps]	C_{TOT} [Gbps]	$C_{PRO}(81Km)$ [Gbps * Km]	BW_{ded} [GHz]	BW_{dis} [GHz]	η_{ded} [bps/Hz]	η_{dis} [bps/Hz]
Ch_1	100	40	105	8505	46.4543	457.96665	86.11 %	22.93 %
Ch_2		10			27.3676		36.54 %	
Ch_3		2.5			17.2855		14.46 %	
Ch_4		2.5			17.3414		14.42 %	
Ch_5		10			27.4109		36.48 %	
Ch_6		40			46.0069		86.94 %	

Tabla 3.13: Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v1}=12.5$ GHz, Arq. FTTF.

Finalmente, de la tabla 3.13 se observa una disminución del espectro de aproximadamente 3.67 % con respecto a los datos obtenidos en la tabla 3.12. Este ahorro, que equivale a 87.26175 GHz de espectro óptico, se logra gracias a la disposición continua de los canales de menor capacidad. A pesar de que estos canales permiten un ahorro considerable en el espectro, su contribución al *throughput* de la red y a la eficiencia espectral distribuida es limitada. La ausencia de estos canales en el cálculo de la ISD en este caso en particular solo se reduce aproximadamente un 0.04 %, lo que sugiere que el sistema podría beneficiarse más al emplear canales de mayor capacidad.

3.1.2. Caso 2: Variación de la grilla espectral entre los canales de 10 Gbps y 2.5 Gbps para diferentes tipos de arquitecturas FTTx

Partiendo de los resultados obtenidos para la ISD en el caso anterior se tiene que la separación entre los canales de 2.5 Gbps se fijan a un $\Delta_{v1} = 12.5\text{GHz}$ y se procede a realizar el mismo proceso de variación, pero en este caso para un Δ_{v2} entre los canales de 10 y 2.5 Gbps, manteniendo la grilla fija en 100 GHz entre los canales de 40 y 10 Gbps como se representa gráficamente en la figura 3.17.

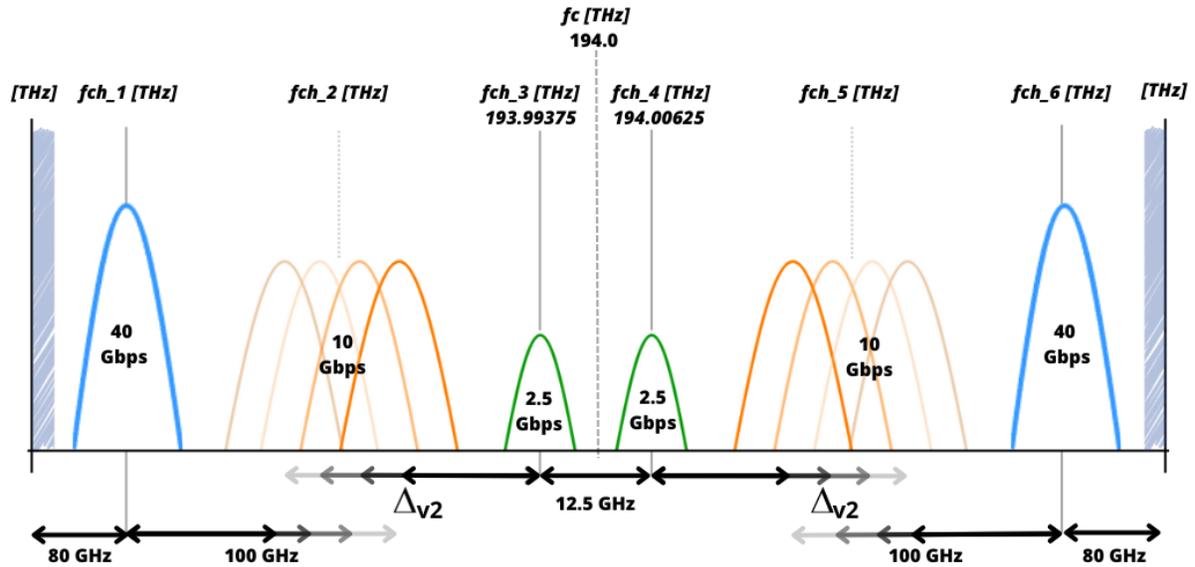


Figura 3.17: Representación de la variación de Δ_{v2} para el caso 2.

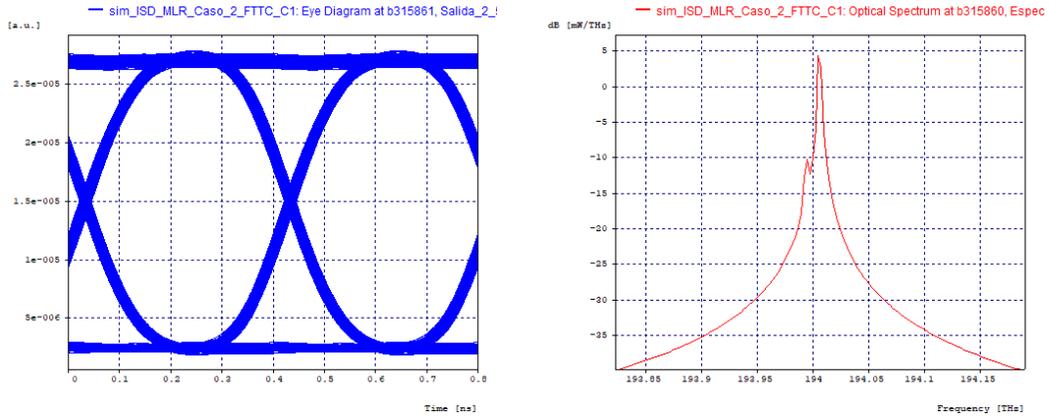
Siguiendo el plan de canalización de la última variación establecida para el caso de estudio número 1 y asegurando previamente su operatividad en todos los canales, se ajustan nuevamente el resto de las frecuencias igualmente a como se realizó en la sección 3.1.1. Esta nueva posición relativa en frecuencia es el punto de comparación para el análisis de las próximas variaciones.

En la tabla 3.14 se especifica el plan de canalización establecido según valor de Δ_{v2} .

Δ_{v2} [GHz]	f_{ch_1} [THz]	f_{ch_2} [THz]	f_{ch_3} [THz]	f_{ch_4} [THz]	f_{ch_5} [THz]	f_{ch_6} [THz]
100	193.79375	193.89375	193.99375	194.00625	194.10625	194.20625
50	193.84375	193.94375	193.99375	194.00625	194.05625	194.15625
25	193.86875	193.96875	193.99375	194.00625	194.03125	194.13125
12.5	193.88125	193.98125	193.99375	194.00625	194.01875	194.11875

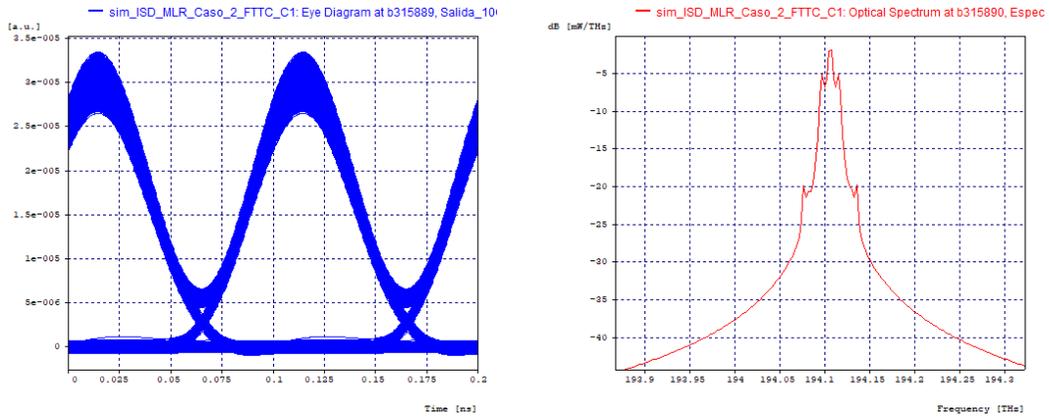
Tabla 3.14: Plan de canalización para variaciones entre canales de 10 y 2.5 Gbps.

En base a la tabla 3.14, se inicia presentando los resultados gráficos del Diagrama del ojo y espectro óptico para un $\Delta_{v2}=100$ GHz en las figuras 3.18a a 3.18f que se obtuvieron a la salida del receptor óptico para los canales 4, 5 y 6, donde el efecto presentado en la figura 3.18b hace referencia a lo analizado en el caso 1 para $\Delta_{v1}=12.5$ GHz.



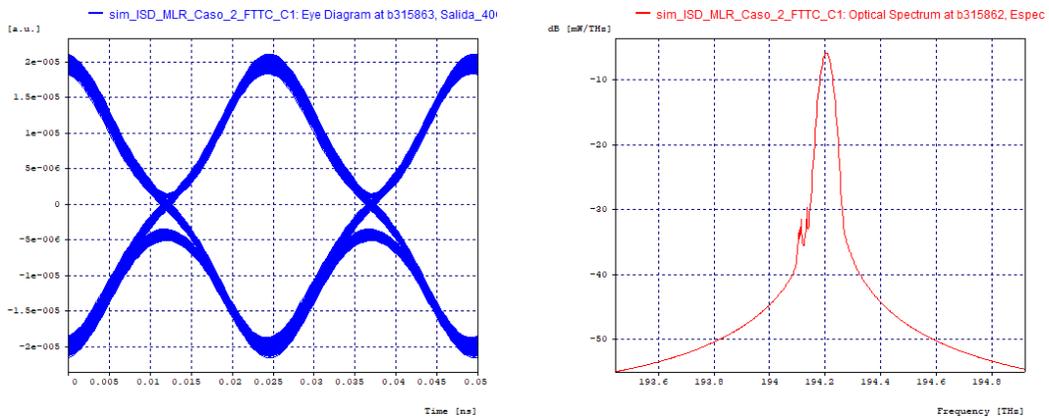
(a) Diagrama de ojo Ch_4 .

(b) Espectro óptico Ch_4 .



(c) Diagrama de ojo Ch_5 .

(d) Espectro óptico Ch_5 .



(e) Diagrama de ojo Ch_6 .

(f) Espectro óptico Ch_6 .

Figura 3.18: Resultados iniciales de comparación para el caso 2.

En las figuras 3.18b, 3.18d y 3.18f que representan los espectros ópticos en la salida, se evidencia la presencia de la interferencia interportadora que causa el efecto no lineal más habitual en los sistemas WDM (XPM). Sin embargo, al observar los cruces temporales en las figuras 3.18a, 3.18c y 3.18e, se infiere que la dispersión cromática no está afectando notablemente el sistema y se aprecia un buen rendimiento independiente de los canales.

La tabla 3.15 representa el resumen de los parámetros de monitoreo óptico del sistema inicial, mientras que la tabla 3.16, resume los datos obtenidos para el cálculo de la ISD teniendo en cuenta el resultado de η_{dist} mediante el uso de la ecuación de eficiencia.

Δ_{v2} [GHz]	Canal	Capacidad de canal	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q		Jitter [ns]	OSNR [dB]	OSNR Real [dB]
					[lin]	[dBm]			
100	Ch_1	40 Gbps	-19.585	1×10^{-40}	25.0347	27.970849	0.000475139	50.212461	4.02087
	Ch_2	10 Gbps	-20.499	1×10^{-40}	19.5307	25.814378	0.000713325	51.474834	6.5854
	Ch_3	2.5 Gbps	-18.261	1×10^{-40}	61.3454	35.755638	0.0672453	53.85335	11.1497
	Ch_4	2.5 Gbps	-18.277	1×10^{-40}	60.2823	35.603791	0.0628489	53.893558	11.1375
	Ch_5	10 Gbps	-20.512	1×10^{-40}	17.6647	24.942108	0.000784117	51.83559	6.57403
	Ch_6	40 Gbps	-19.611	1×10^{-40}	59.8177	35.536595	0.000161065	50.623007	4.03338

Tabla 3.15: Parámetros OPM para $\Delta_{v2}= 100$ GHz, Arq. FTTC.

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{\sum_{i=1}^2 2,5[Gbps] + \sum_{j=1}^2 10[Gbps] + \sum_{k=1}^2 40[Gbps]}{\frac{17,50505[GHz]}{2} + \frac{27,7145[GHz]}{2} + \frac{46,8513[GHz]}{2} + (4 * 100[GHz] + 12,5[GHz])}$$

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{(2 * 2,5) + (2 * 10) + (2 * 40)}{458,535425} \left[\frac{Gbps}{GHz} \right]$$

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{105}{458,535425} = 0,2290 \left[\frac{bps}{Hz} \right]$$

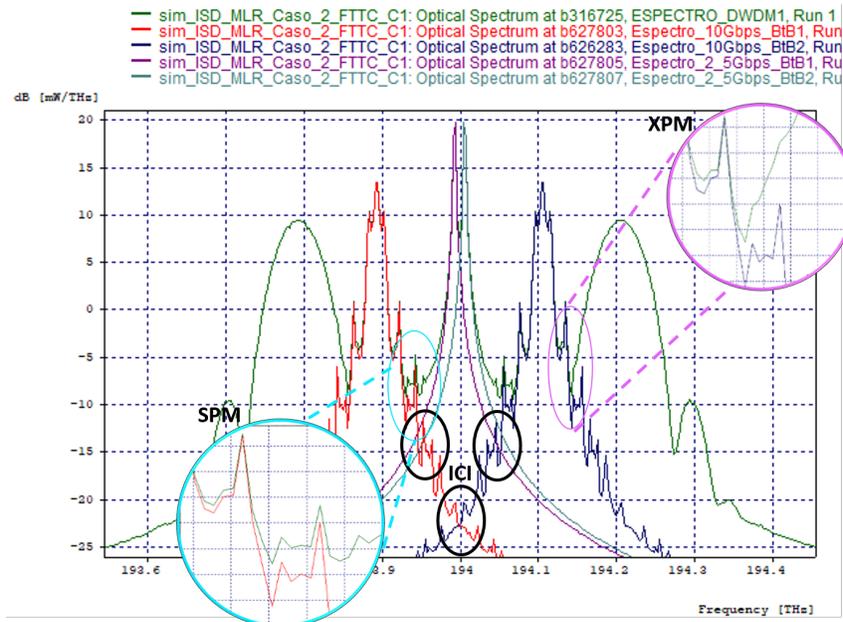
Canal	Δ_{v2} [GHz]	C_N [Gbps]	C_{TOT} [Gbps]	$C_{PRO}(80,5Km)$ [Gbps * Km]	BW_{ded} [GHz]	BW_{dis} [GHz]	η_{ded} [bps/Hz]	η_{dis} [bps/Hz]
Ch_1	100	40	105	8452.5	47.0203	458.535425	85.07 %	22.90 %
Ch_2		10			27.7274		36.07 %	
Ch_3		2.5			17.5367		14.26 %	
Ch_4	2.5	17.4734			14.31 %			
Ch_5	100	10			27.7016		36,10 %	
Ch_6	100	40			46.6823		85.69 %	

Tabla 3.16: Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v2}=100$ GHz, Arq. FTTC.

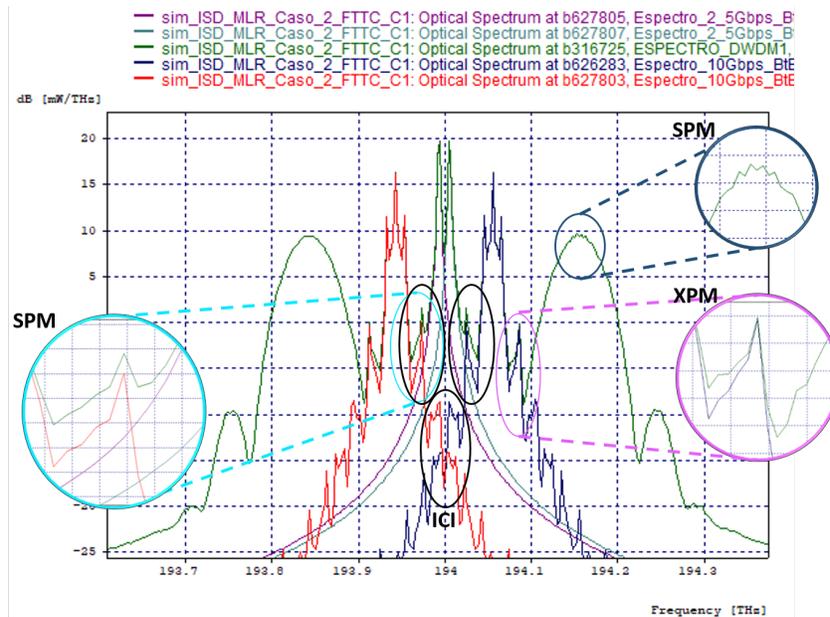
Para iniciar con la aproximación de los canales de 10 Gbps a los canales de 2.5 Gbps, objeto del presente caso de estudio, se varía simultáneamente el espaciado (Δ_{v2}) entre los canales 2 y 5, así como entre los canales 3 y 4. Esta nueva variación, de ser

posible, le permitirá al sistema ahorrar otro porcentaje de espectro para la transmisión de la misma capacidad a nivel de transporte (*throughput*).

Mediante la comparación de las figuras 3.19a y 3.19b se analiza el sistema ajustando a un espaciamiento $\Delta_{v2} = 50$ GHz, con el fin de detallar de manera visual su comportamiento y la posible intensificación de los efectos no lineales en el sistema.



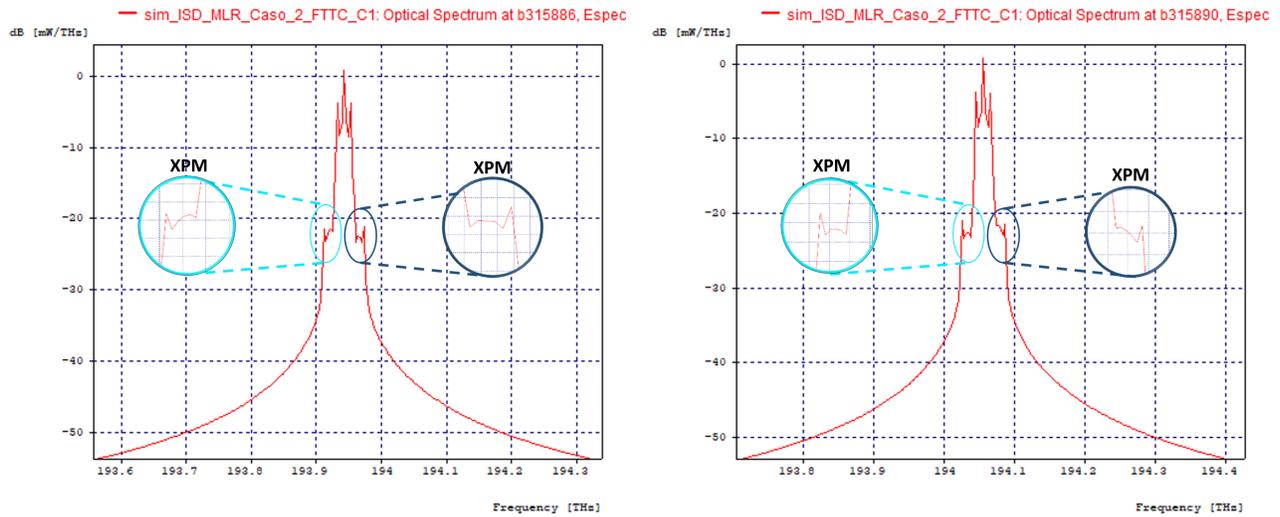
(a) *Throughput* para $\Delta_{v2}=100$ GHz.



(b) *Throughput* para $\Delta_{v2}=50$ GHz.

Figura 3.19: Comparación de espectro DWDM para $\Delta_{v2}=100$ GHz y $\Delta_{v2}=50$ GHz.

Como se ilustra en las figuras 3.19a y 3.19b se nota un mejor comportamiento de los espectros de los canales 2 y 5 a un $\Delta_{v2}= 50$ GHz que posiblemente se atribuya a que el efecto de mezcla de cuatro ondas (FWM) estuviera aglomerando señales parásitas muy cerca de su señal de comunicación entrando en coincidencia de fase y generando pérdida de información o distorsión a pequeña escala. Adicionalmente, se resalta la incidencia del efecto SPM para este valor de Δ_{v2} , y se nota el impacto de los canales de 10 Gbps sobre los canales de 2.5 Gbps. Con un espaciamiento menor, se esperaría una distorsión más grande generada por el efecto XPM, lo cual se comprueba mediante las figuras 3.20a y 3.20b.



(a) Espectro Ch_2 en Arq. FTTC.

(b) Espectro Ch_5 en Arq. FTTC.

Figura 3.20: Comparación de espectro en Ch_2 Y Ch_5 para $\Delta_{v2}=50$ GHz.

Respecto a los valores obtenidos en OPM, se confirma que los canales 2 y 5 afectan considerablemente los canales 3 y 4, disminuyendo sustancialmente su factor de calidad (tabla 3.17).

Δ_{v2} [GHz]	Canal	Capacidad de canal	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q		Jitter [ns]	OSNR [dB]	OSNR Real [dB]
					[lin]	[dBm]			
50	Ch_1	40 Gbps	-19.59	1×10^{-40}	32.4103	30.213671	0.00037905	49.99899	3.99466
	Ch_2	10 Gbps	-20.507	1×10^{-40}	16.8821	24.548549	0.000876123	57.080146	6.87427
	Ch_3	2.5 Gbps	-18.279	1×10^{-40}	18.7471	25.45866	0,0625092	53,848704	11,127
	Ch_4	2.5 Gbps	-18.237	1×10^{-40}	17.2202	24.720742	0.0943232	53.893	11.1736
	Ch_5	10 Gbps	-20.513	1×10^{-40}	17.5649	24.892904	0.000817097	57.242783	6.85749
	Ch_6	40 Gbps	-19.607	1×10^{-40}	60.7073	35.664824	0.000205115	50.672886	4.04522

Tabla 3.17: Parámetros OPM para $\Delta_{v2}= 50$ GHz, Arq. FTTC.

A continuación se presentan los diagramas de ojo de los canales de 2, 3, 4 y 5 que son los principalmente afectados ante esta variación según la tabla 3.17 presentada.

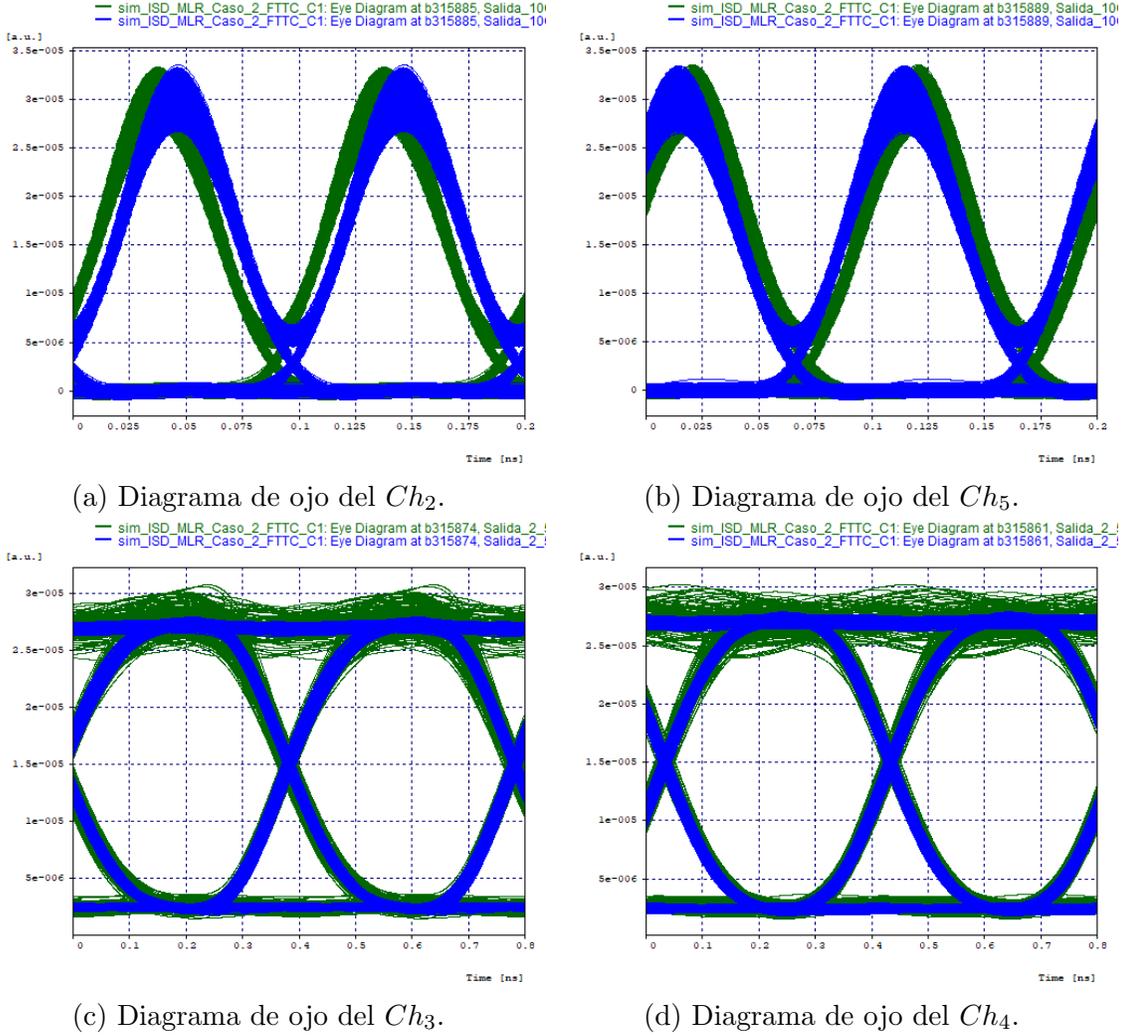


Figura 3.21: Comparación del diagrama de ojo en Ch_2 , Ch_3 , Ch_4 y Ch_5 para $\Delta_{v2}=50$ GHz.

La comparación de los diagramas de ojo antes y después que se diera el cambio de la posición relativa en frecuencia de los canales 1, 2, 5 y 6 permite ver de manera clara que al optimizar el uso de 100 GHz de espectro, incrementan factores degradantes del sistema como la ISI (ensanchamiento de la región de la marca de unos) y la CD (pérdida de simetría del ojo), tal como se puede ver en las figuras 3.24a y 3.24b haciendo referencia a una recuperación cada vez más herrada de la información.

En relación con el análisis espectral, los datos presentados en la tabla 3.18. revelan una mejora del uso del espectro del 6.39%, resaltando además el fenómeno de ensanchamiento del pulso experimentado por los canales de 10 Gbps debido al efecto SPM.

$$\eta_{dis}[bps/Hz] = \frac{\sum_{i=1}^2 2,5[Gbps] + \sum_{j=1}^2 10[Gbps] + \sum_{k=1}^2 40[Gbps]}{\frac{17,55105[GHz]}{2} + \frac{28,08465[GHz]}{2} + \frac{46,3431[GHz]}{2} + (2*100[GHz] + 2*50[GHz] + 12,5[GHz])}$$

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{(2 * 2,5) + (2 * 10) + (2 * 40)}{358,4894} \left[\frac{bps}{Hz} \right]$$

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{105}{358,4894} = 0,2929 \left[\frac{bps}{Hz} \right]$$

Canal	Δ_{v2} [GHz]	C_N [Gbps]	C_{TOT} [Gbps]	$C_{PRO}(80,5Km)$ [Gbps * Km]	BW_{ded} [GHz]	BW_{dis} [GHz]	η_{ded} [bps/Hz]	η_{dis} [bps/Hz]
Ch_1	100	40	105	8452.5	46.2849	358.4894	86.42 %	29.29 %
Ch_2	50	10			28.0809		35.61 %	
Ch_3	12.5	2.5			17.5404		14.25 %	
Ch_4	50	2.5			17.5617		14.24 %	
Ch_5	100	10			28.0884		35.60 %	
Ch_6	100	40			46.4013		86.20 %	

Tabla 3.18: Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v2}=50$ GHz, Arq. FTTC.

Los anchos de banda dedicados de los canales 2 y 5 mostrados en la tabla anterior, respaldan lo dicho, de manera que sufren un ligero incremento de aproximadamente 370,2 MHz en ancho de banda.

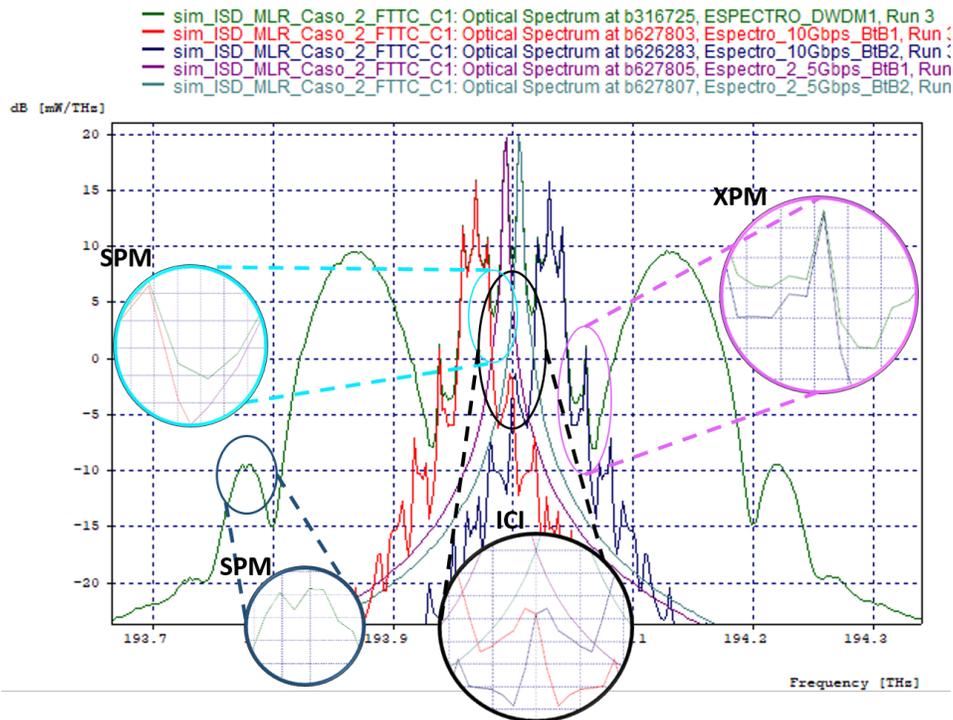
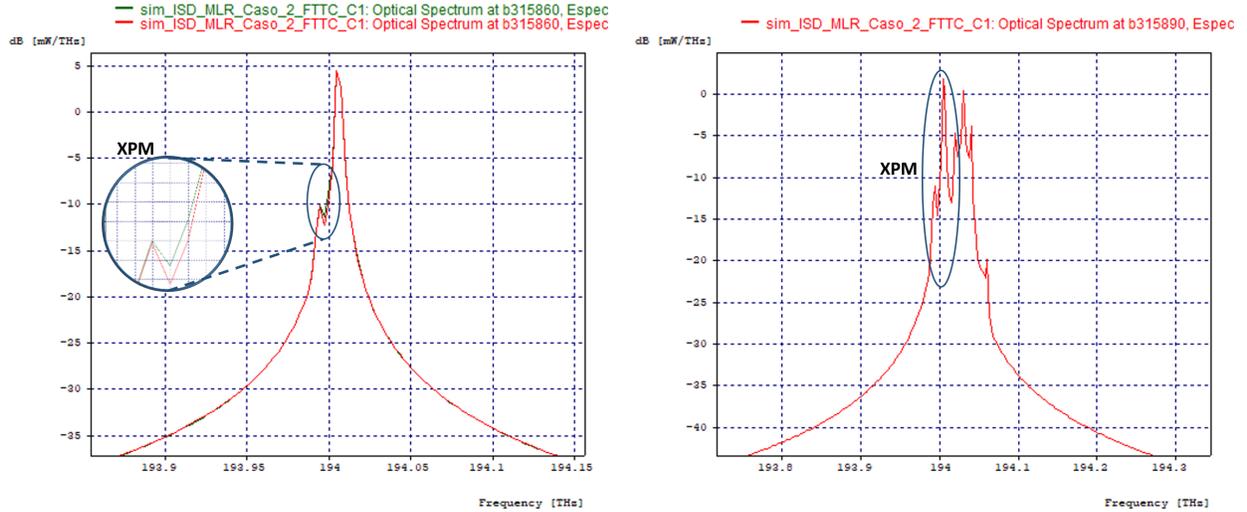


Figura 3.22: Representación de la variación de $\Delta_{v2}=25$ GHz para el caso 2.

Ante la variación del Δ_{v2} a 25 GHz el sistema empieza a tener mayores degradaciones, como la ICI estimulando más el efecto XPM de los canales de 10 Gbps sobre los de 2.5 Gbps como se observa en las figuras 3.22 3.23b, sin embargo, la figura 3.23a correspondiente al canal 4 posee un filtro más selectivo (al igual que el canal 3) que los canales de mayor capacidad y es por esta razón que aparentemente el espectro no cambia, pero comparando con las mediciones realizadas en la tabla 3.19 se obtiene que los canales de 2.5 se ensanchan aproximadamente 1,0311 GHz presentando a su vez SPM.



(a) Espectro Ch_4 en Arq. FTTC.

(b) Espectro Ch_5 en Arq. FTTC.

Figura 3.23: Resultado espectral en Ch_4 y Ch_5 para $\Delta_{v2}=25$ GHz.

$$\eta_{dis}[bps/Hz] = \frac{\sum_{i=1}^2 2,5[Gbps] + \sum_{j=1}^2 10[Gbps] + \sum_{k=1}^2 40[Gbps]}{\frac{18,58215[GHz]}{2} + \frac{46,8816[GHz]}{2} + \frac{46,6284[GHz]}{2} + (2*100[GHz] + 2*25[GHz] + 12,5[GHz])}$$

$$\eta_{dis}[bps/Hz] = \frac{(2 * 2,5) + (2 * 10) + (2 * 40)}{318,546075} \left[\frac{bps}{GHz} \right]$$

$$\eta_{dis}[bps/Hz] = \frac{105}{318,546075} = 0,3296 \left[\frac{bps}{Hz} \right]$$

Canal	Δ_{v2} [GHz]	C_N [Gbps]	C_{TOT} [Gbps]	$C_{PRO}(80,5Km)$ [Gbps * Km]	BW_{ded} [GHz]	BW_{dis} [GHz]	η_{ded} [bps/Hz]	η_{dis} [bps/Hz]
Ch_1	100	40	105	8452.5	46.7655	318.546075	85.53 %	32.96 %
Ch_2	25	10			46.8977		21.32 %	
Ch_3	12.5	2.5			18.3848		13.60 %	
Ch_4	25	2.5			18.7795		13.31 %	
Ch_5	100	10			46.8655		21.34 %	
Ch_6		40			46.4913		86.04 %	

Tabla 3.19: Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v2}=25$ GHz, Arq. FTTC.

Aunque los canales 3 y 4 sufren este ensanchamiento mayor que en la variación anterior, sigue siendo posible recuperar la señal satisfactoriamente, eso si, con mayor presencia de CD, XPM, SPM e ISI (figuras 3.24a y 3.24b) quedando propenso a degradarse por completo ante una aproximación menor o un incremento de la longitud de la fibra. En cuanto a los canales 2 y 5 de 10 Gbps, estos se degradan completamente ante esta variación como se ilustra en las figuras 3.24c y 3.24d, donde en el Diagrama de Ojo se incrementa la ISI y el efecto XPM, implicando un muestreo con mayor error, causando una superposición de señales de manera no sincronizada.

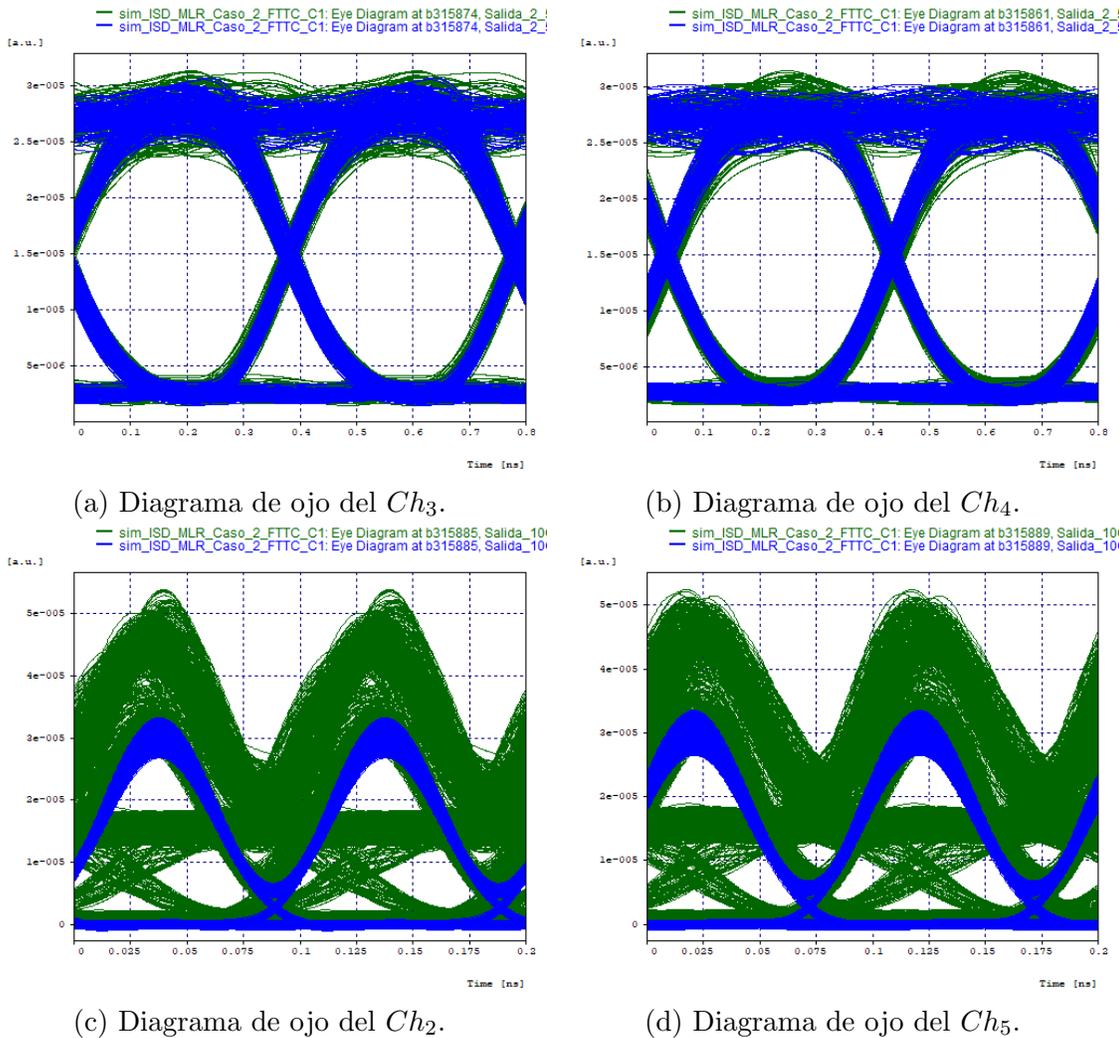


Figura 3.24: Comparación del diagrama de ojo en para $\Delta_{v_2}=50$ GHz y $\Delta_{v_2}=25$ GHz.

Como se evidencia en la tabla 3.20 el desempeño de los canales mencionados no es el ideal, sin embargo, en base a la figura 3.22 se nota que aun es posible diferenciar los canales de manera independiente, adicionalmente, el ensanchamiento asimétrico del espectro (XPM) en el receptor se incrementa exageradamente como se presentó

en la tabla (3.19) por lo que se sugiere realizar un filtrado más selectivo tomando la condición de filtrado para canales de baja capacidad ($BW_{filtro} = 4 * C_n$) y no hacerlo bajo la premisa de $BW_{filtro} = 60$ GHz para canales de alta capacidad con el fin de mitigar el impacto de la ICI y por tanto el efecto XPM.

Δ_{v2} [GHz]	Canal	Capacidad de canal	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q		Jitter [ns]	OSNR [dB]	OSNR Real [dB]
					[lin]	[dBm]			
25	Ch_1	40 Gbps	-19.591	1×10^{-40}	29.0306	29.257128	0.00041403	50.008300	4.00984
	Ch_2	10 Gbps	-17.575	$5,82 \times 10^{-3}$	2.52269	8.037276	0.0306507	51.981379	6.80216
	Ch_3	2.5 Gbps	-18.185	$1,89 \times 10^{-39}$	13.1037	22.347872	0.0856645	53.81544	11.1915
	Ch_4	2.5 Gbps	-18.169	$2,93 \times 10^{-36}$	12.769	22.123109	0.0914873	53.88892	11.2131
	Ch_5	10 Gbps	-17.569	$4,82 \times 10^{-3}$	2.59111	8.269704	0.0305791	51.939036	6.82279
	Ch_6	40 Gbps	-19.605	1×10^{-40}	63.6208	36.071983	0.000206295	50.643178	4.04718

Tabla 3.20: Parámetros OPM para $\Delta_{v2} = 25$ GHz, Arq. FTTC.

En cuanto a la variación del espaciamento a un $\Delta_{v2} = 12.5$ GHz la degradación de los canales es total, al punto de no diferenciar la presencia independiente de los canales 2, 3, 4 y 5 (figura 3.25), ya que los canales con capacidad de 10 Gbps poseen un ancho de canal grande y de esta manera los canales 2 y 5 invaden en su gran mayoría los canales de 2.5 Gbps como se muestra en la siguiente figura.

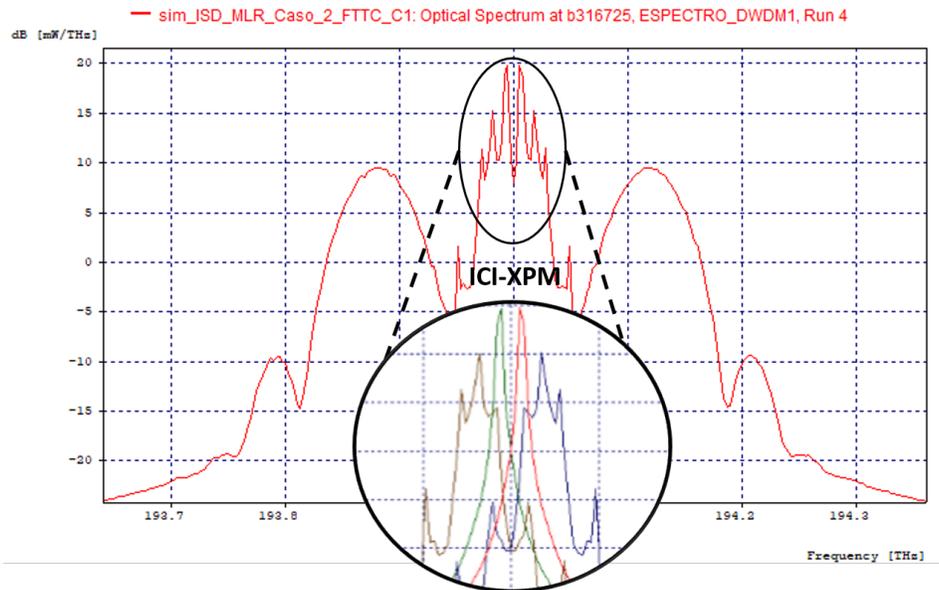


Figura 3.25: Variación de $\Delta_{v2} = 12.5$ GHz para Arq. FTTC.

Espectralmente, se nota de manera clara la ICI que causa el efecto XPM más grande hasta el momento. En cuanto a las figuras 3.26a a 3.26d se comprueba mediante los diagramas de ojo el gran nivel de degradación presente ante esta variación.

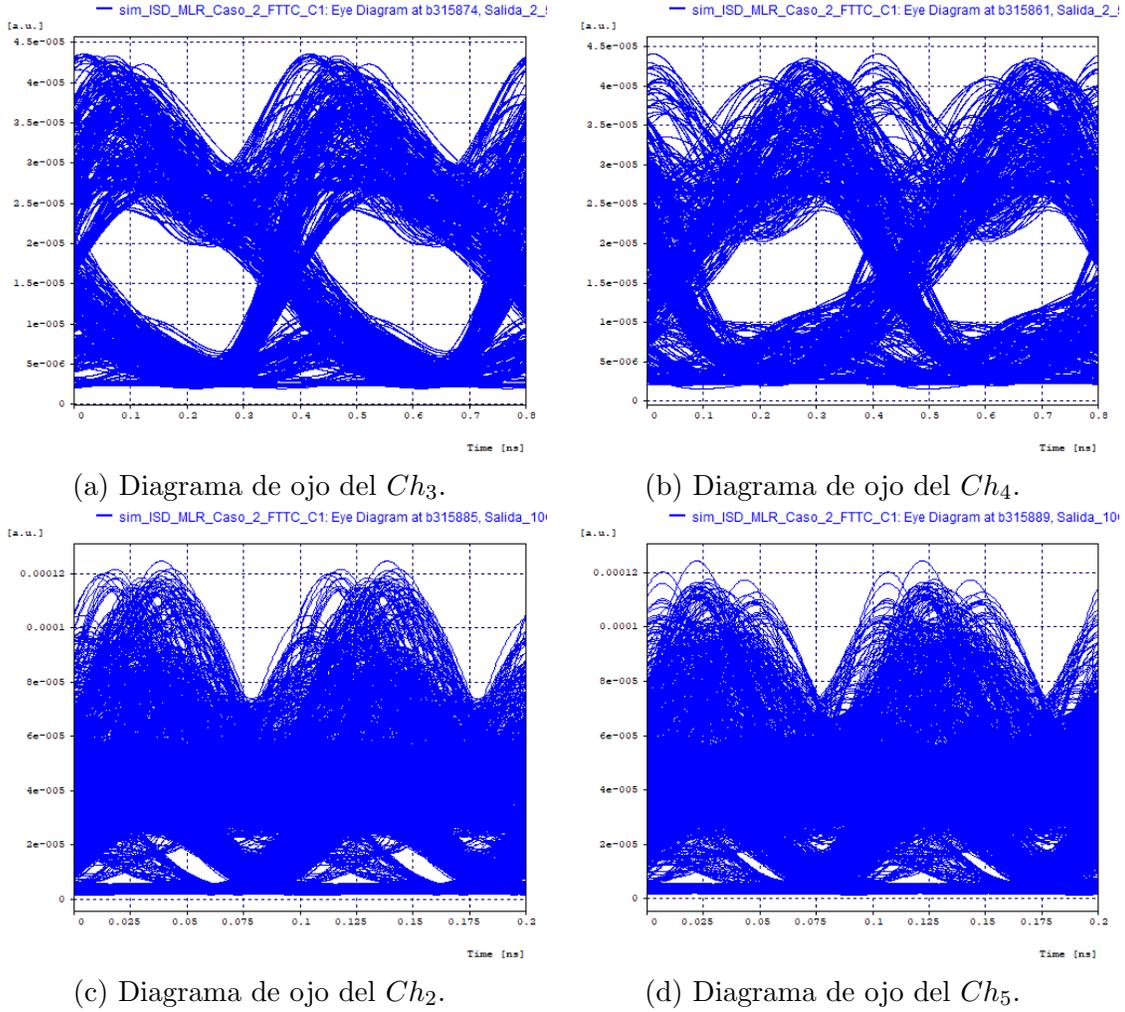


Figura 3.26: Comparación en Ch_2 , Ch_3 , Ch_4 y Ch_5 para $\Delta_{v2}=12.5$ GHz.

Por estos resultados se considera una aproximación excesiva, la cual no resulta beneficiosa para sistemas ópticos en general que cuenten con canales con capacidad igual o mayor a 10 Gbps, ya que si se ve afectado tan drásticamente aproximándose al canal de 2.5 Gbps de capacidad, el resultado será más caótico con uno de mayor capacidad. En las tablas 3.21 y 3.22 presentadas a continuación se sintetizan los resultados de los parámetros OPM e ISD respectivamente, para un $\Delta_{v2}=12.5$ GHz.

Δ_{v2} [GHz]	Canal	Capacidad de canal	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q		Jitter [ns]	OSNR [dB]	OSNR Real [dB]
					[lin]	[dBm]			
12.5	Ch_1	40 Gbps	-19.592	$1x10^{-40}$	26.7582	28.549151	0.000428684	50.059386	4.01883
	Ch_2	10 Gbps	-14.856	$9,76x10^{-3}$	2.47308	7.864747	0.0257708	51.113669	11.7397
	Ch_3	2.5 Gbps	-17.600	$3,19x10^{-11}$	6.70797	16.53182	0.110559	53.743226	11.6497
	Ch_4	2.5 Gbps	-17.617	$2,42x10^{-10}$	6.37674	16.091974	0.120911	53.90042	11.6492
	Ch_5	10 Gbps	-14.852	$1,03x10^{-2}$	2.42324	7.6879934	0.026732	51.297212	11.726
	Ch_6	40 Gbps	-19.602	$1x10^{-40}$	56.7937	35.085998	0.000187153	50.503742	4.04341

Tabla 3.21: Parámetros OPM para $\Delta_{v2}=12.5$ GHz, Arq. FTTC.

$$\eta_{dis}[bps/Hz] = \frac{\sum_{i=1}^2 2,5[Gbps] + \sum_{j=1}^2 10[Gbps] + \sum_{k=1}^2 40[Gbps]}{\frac{20,7625[GHz]}{2} + \frac{47,62485[GHz]}{2} + \frac{46,8134[GHz]}{2} + (2*100[GHz] + 3*12,5[GHz])}$$

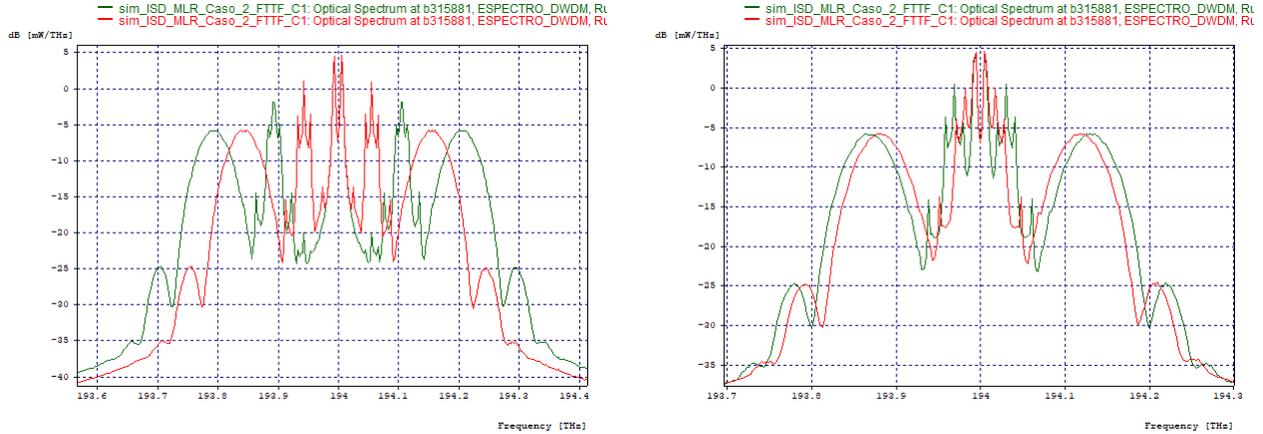
$$\eta_{dis}[bps/Hz] = \frac{(2 * 2,5) + (2 * 10) + (2 * 40)}{283,4894} \left[\frac{Gbps}{GHz} \right]$$

$$\eta_{dis}[bps/Hz] = \frac{105}{283,4894} = 0,3704 \left[\frac{bps}{Hz} \right]$$

Canal	Δ_{v2} [GHz]	C_N [Gbps]	C_{TOT} [Gbps]	$C_{PRO}(80,5Km)$ [Gbps * Km]	BW_{ded} [GHz]	BW_{dis} [GHz]	η_{ded} [bps/Hz]	η_{dis} [bps/Hz]
Ch_1	100	40	105	8452.5	46.9515	283.4894	85.19 %	37.04 %
Ch_2	12.5	10			47.6199		21.00 %	
Ch_3	12.5	2.5			20.8514		11.99 %	
Ch_4	12.5	2.5			20.6736		12.09 %	
Ch_5	100	10			47.6298		21.00 %	
Ch_6	100	40			46.6753		85.70 %	

Tabla 3.22: Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v2}=12.5$ GHz, Arq. FTTC.

Al igual que el caso 1, el comportamiento para una arquitectura FTTF es muy similar que para una FTTC por lo que se presentan los efectos lineales y no lineales de igual manera. Para esta arquitectura se siguen manejando los 80 km de SPAN de fibra pero con 1 km de fibra en última milla. A continuación se presentan los resultados de las variaciones realizadas para la arquitectura FTTF mediante las figuras 3.27a y 3.27b



(a) Comparación de ISD para $\Delta_{v2}=100$ GHz y $\Delta_{v2}=50$ GHz. (b) Comparación de ISD para $\Delta_{v2}=25$ GHz y $\Delta_{v2}=12.5$ GHz.

Figura 3.27: Resultado espectral en *Throughput* para Arq. FTTF.

Aunque se pueden diferenciar los 6 canales hasta un espaciamento $\Delta_{v2} = 25$ GHz los parámetros OPM de estas dos arquitecturas no satisfacen los valores de BER y Factor

Q mínimos establecidos por los estándares mencionados anteriormente. A continuación se presentan la tabla 3.23 de parámetros OPM recogidos para el Δ_{v2} de FTTF inicial, mientras que la tabla 3.24 registra los datos de los parámetros OPM obtenidos a un $\Delta_{v2}=25$ GHz, donde se tiene el primer fallo bajo la configuración manejada hasta el momento.

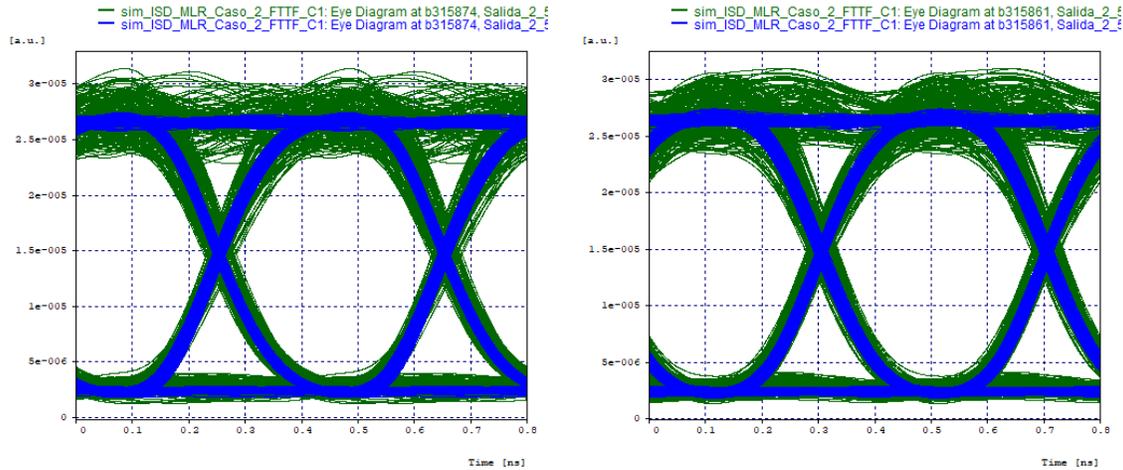
Δ_{v2} [GHz]	Canal	Capacidad de canal	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q		Jitter [ns]	OSNR [dB]	OSNR Real [dB]
					[lin]	[dBm]			
100	Ch_1	40 Gbps	-19.68	$1x10^{-40}$	25.0863	27.988746	0.000481	49.867182	3.94898
	Ch_2	10 Gbps	-20.592	$1x10^{-40}$	19.7994	25.933027	0.000721	52.557955	6.55332
	Ch_3	2.5 Gbps	-18.368	$1x10^{-40}$	59.9145	35.550637	0.0699175	53.840093	11.0492
	Ch_4	2.5 Gbps	-18.377	$1x10^{-40}$	59.3255	35.464834	0.061648	53.891035	11.0367
	Ch_5	10 Gbps	-20.605	$1x10^{-40}$	17.8458	25.030732	0.000780704	52.727686	6.53303
	Ch_6	40 Gbps	-19.707	$1x10^{-40}$	60.3774	35.617487	0.000197258	50.653672	3.92114

Tabla 3.23: Parámetros OPM para $\Delta_{v2}= 100$ GHz, Arq. FTTF.

Δ_{v2} [GHz]	Canal	Capacidad de canal	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q		Jitter [ns]	OSNR [dB]	OSNR Real [dB]
					[lin]	[dBm]			
25	Ch_1	40 Gbps	-19.686	$1x10^{-40}$	29.0319	29.257521	0.00040407	50.139496	3.93754
	Ch_2	10 Gbps	-17.671	$5.87x10^{-3}$	2.51388	8.006896	0.0306621	52.086787	6.73036
	Ch_3	2.5 Gbps	-18.285	$1.77x10^{-40}$	13.2631	22.452909	0.0851686	53.810761	11.0889
	Ch_4	2.5 Gbps	-18.269	$2.71x10^{-37}$	12.9831	22.267539	0.0911248	53.899708	11.1175
	Ch_5	10 Gbps	-17.664	$5.27x10^{-3}$	2.57951	8.230748	0.0305682	52.194025	6.72958
	Ch_6	40 Gbps	-19.7	$1x10^{-40}$	63.3181	36.030562	0.000224781	50.622561	3.95265

Tabla 3.24: Parámetros OPM para $\Delta_{v2}= 25$ GHz, Arq. FTTF.

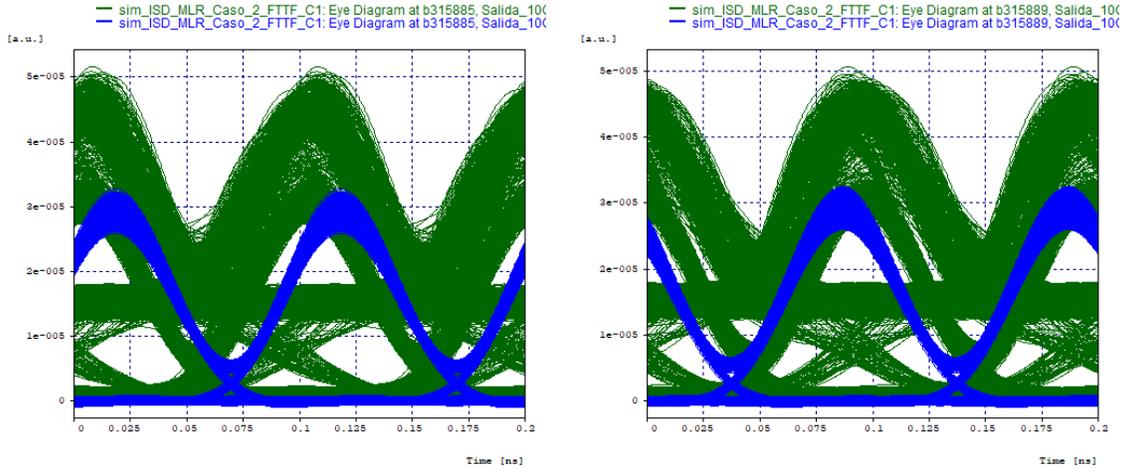
Dado que los canales 1 y 6 mantienen su buen desempeño ante las variaciones presentadas en este caso, se omite la presentación de sus resultados. En las figuras 3.28a a 3.29b Se presentan los resultados de los canales del 2 al 5 en donde se puede apreciar el mismo comportamiento de la ISI, CD y efectos presentados anteriormente.



(a) Diagrama de ojo del Ch_3 .

(b) Diagrama de ojo del Ch_4 .

Figura 3.28: Comparación entre $\Delta_{v2}=100$ GHz y $\Delta_{v2}=25$ GHz en Arq. FTTF.

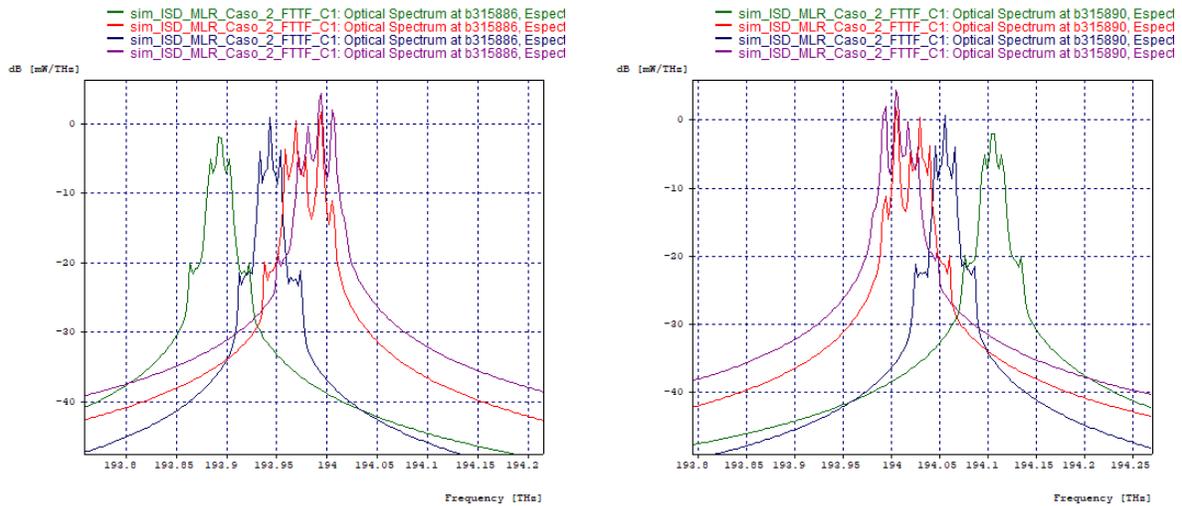


(a) Diagrama de ojo del Ch_2 .

(b) Diagrama de ojo del Ch_5 .

Figura 3.29: Comparación entre $\Delta_{v2}=100$ GHz y $\Delta_{v2}=25$ GHz en Arq. FTTF.

Espectralmente se ratifica la necesidad de implementar en simulación filtros más selectivos para los canales 2 y 5, ya que son los únicos canales que se afectan considerablemente a una separación de 25 GHz al punto de no poder recuperar la información, es decir, sin satisfacer los valores mínimos aceptables de los parámetros OPM. Como se puede ver en las figura 3.30a y 3.30b la variación de 25 GHz (espectros rojos) impacta negativamente los canales mencionados, debido a que el ancho de banda del filtro detecta hasta los canales de 2.5 Gbps adyacentes.



(a) Comparación de ISD para $\Delta_{v2}=100$ GHz y $\Delta_{v2}=50$ GHz.

(b) Comparación de ISD para $\Delta_{v2}=25$ GHz y $\Delta_{v2}=12.5$ GHz.

Figura 3.30: Resultado espectral en *Throughput* para Arq. FTTF.

La detección de estos canales adyacentes ya mencionados hace que el efecto XPM

se presente en gran magnitud, por otro lado, los canales 3 y 4 sufren cambios tanto en amplitud como ensanchamiento asimétrico debido a XPM, de la misma manera, ensanchamiento simétrico debido a SPM (figura 3.31) al igual que en FTTC, no obstante, sus valores obtenidos en recepción satisfacen los mínimos aceptables (tabla 3.24).

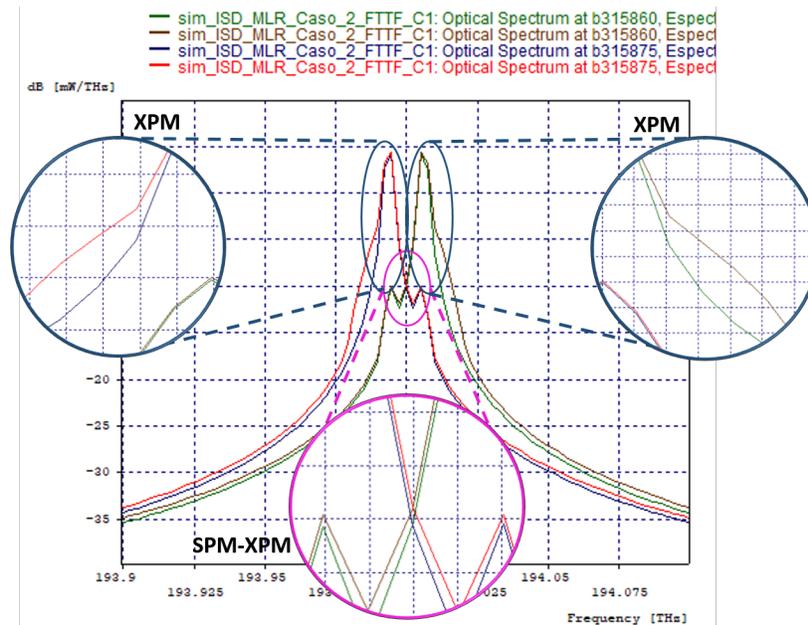
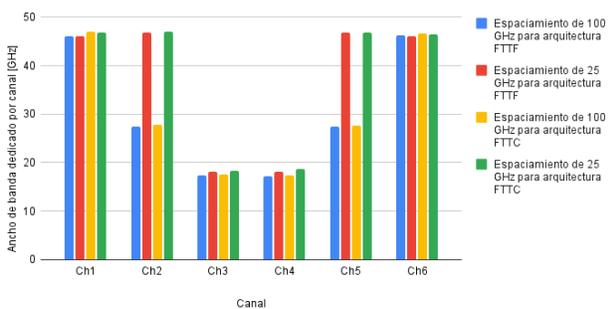


Figura 3.31: Comparación de espectro para $\Delta_{v2} = 100$ GHz y $\Delta_{v2} = 12.5$ GHz en Arq. FTTF.

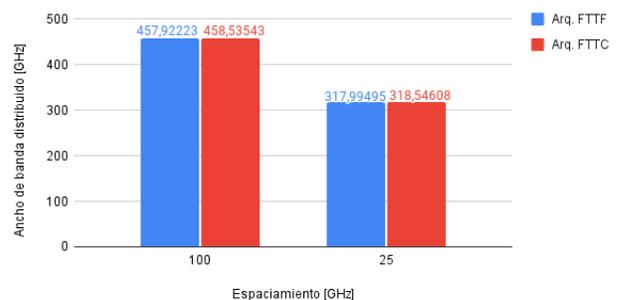
Finalmente se muestran las figuras 3.32a y 3.32b de las que se analiza el comportamiento de ancho de banda dedicado por canal y el ancho de banda distribuido para valores de Δ_{v2} igual a 100 y 25 GHz que es donde se presenta la primera anomalía como se ha mencionado a lo largo del análisis.

Comparación de ancho de banda al variar espaciamento entre canales para arquitecturas FTTC y FTTF.



(a) BW_{ded} para $\Delta_{v2} = 100$ y 25 GHz.

Comparación de ancho de banda distribuido según la arquitectura.



(b) BW_{dis} para $\Delta_{v2} = 100$ y 25 GHz.

Figura 3.32: Comparación de BW_{ded} y BW_{dis} en arquitecturas FTTC y FTTF.

De la gráfica mostrada en la figura 3.32a se logra apreciar el ensanchamiento asimétrico considerable que presentan los canales de 10 Gbps a causa del efecto XPM para ambas arquitecturas, a su vez se nota que la arquitectura FTTF ocupa un ancho de banda ligeramente menor, lo que quiere decir que esta arquitectura es más eficiente que la FTTC por un pequeño porcentaje, esta ventaja se ve en los resultados de la comparación del ancho de banda distribuido presentados en la figura 3.32b.

Para el presente caso de estudio se considera que la variación de $\Delta_{v2} = 50$ GHz es la que presenta mejor rendimiento, logrando un ahorro de aproximadamente 6.39% respecto a la base de comparación ($\Delta_{v2} = 100$ GHz), sin embargo, la mejora del filtrado en recepción es fundamental si se quiere tener una mayor Densidad Espectral de Información (ISD ó η_{dis}).

3.1.3. Caso 3: Variación de la grilla espectral entre los canales de 40 Gbps y 10 Gbps para diferentes tipos de arquitecturas FTTx

Partiendo del escenario con mejores resultados en cuanto a funcionamiento y optimización de espectro ($\Delta_{v2} = 50$ GHz), se plantea el caso de estudio número tres que se caracteriza por mantener una grilla flexible con separaciones de $\Delta_{v1} = 12.5$ GHz entre los canales de 2.5 Gbps, $\Delta_{v2} = 50$ GHz entre los de 10 Gbps con sus adyacentes internos y se parte en este caso con un $\Delta_{v3} = 100$ GHz entre canales de 40 Gbps y 10 Gbps, para posteriormente variar esta parte de la grilla espectral de forma similar a como se hizo en los casos anteriores (figura 3.33).

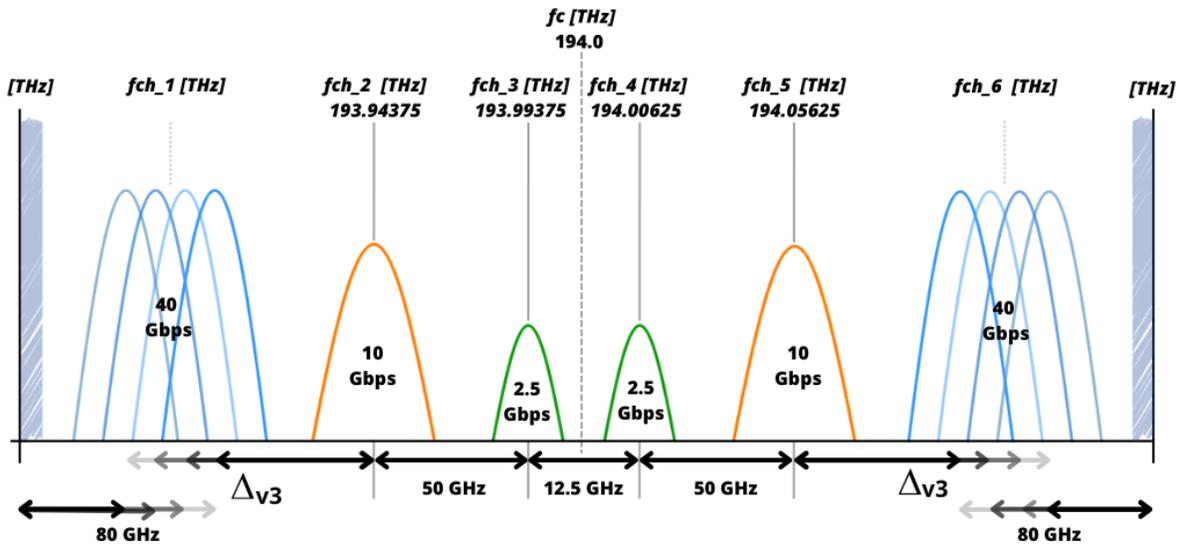


Figura 3.33: Representación de la variación de Δ_{v3} para el caso 3.

En la tabla 3.25 se especifica el plan de canalización establecido según valor de Δ_{v3} .

Δ_{v3} [GHz]	f_{ch-1} [THz]	f_{ch-2} [THz]	f_{ch-3} [THz]	f_{ch-4} [THz]	f_{ch-5} [THz]	f_{ch-6} [THz]
100	193.84375	193.94375	193.99375	194.00625	194.05625	194.15625
50	193.89375	193.94375	193.99375	194.00625	194.05625	194.10625
25	193.91875	193.94375	193.99375	194.00625	194.05625	194.08125
12.5	193.93125	193.94375	193.99375	194.00625	194.05625	194.06875

Tabla 3.25: Plan de canalización para variaciones entre canales de 10 y 40 Gbps.

Dado el plan de canalización, se presentan los resultados de los canales de mayor posición relativa en frecuencia para arquitecturas FTTC y FTTF, donde las figuras 3.34a a 3.34f representan los diagramas de Ojo de los canales mencionados de los que se destaca la afección a los mismos canales pero en una menor magnitud para FTTC.

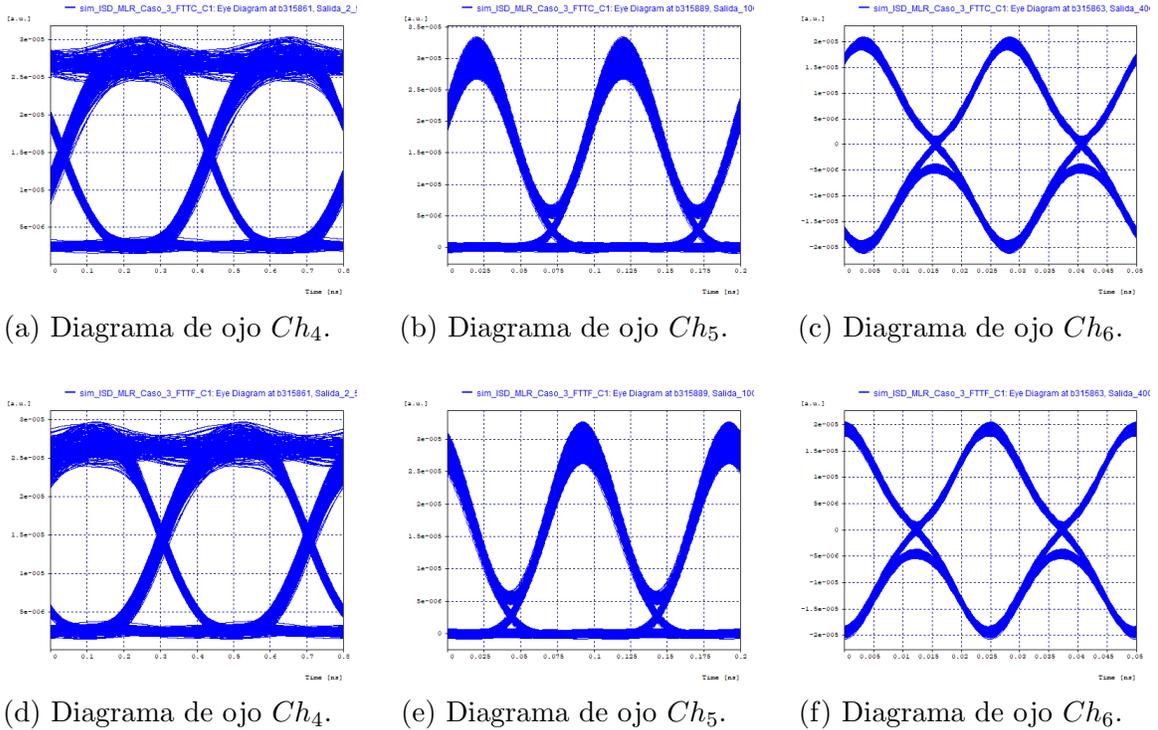


Figura 3.34: Resultados iniciales de comparación para Arq. FTTC y FTTF.

Mediante las figuras 3.35a a 3.35f se exhiben los espectros ópticos recibidos correspondientes a los canales y arquitecturas mencionadas anteriormente.

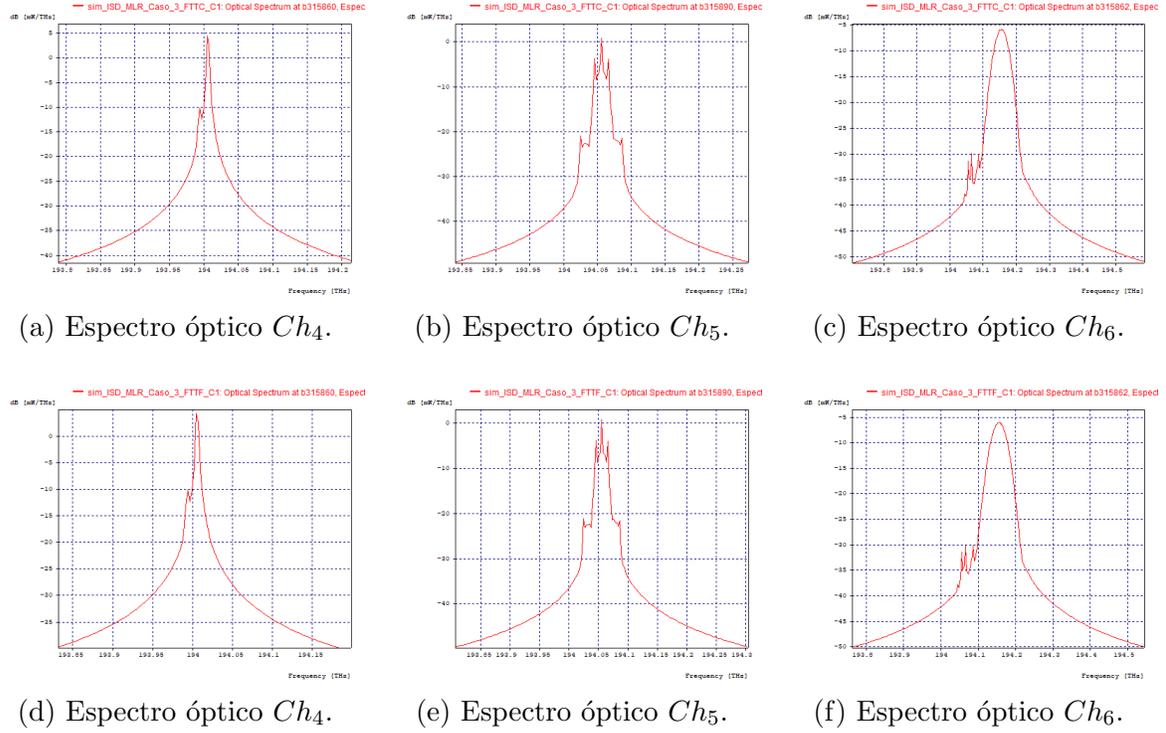


Figura 3.35: Resultados iniciales de comparación para Arq. FTTC y FTTF.

Se considera que el sistema está experimentando tanto Interferencia entre portadoras (ICI) como Interferencia entre símbolos adyacentes (ISI), lo cual constituye la principal razón por la que se presenta predominantemente el fenómeno del Efecto de intercambio de fase (XPM) en el sistema. A pesar de esto, hasta este punto, el sistema logra recuperar la información de manera satisfactoria, tal como lo indican los parámetros OPM e ISD que se muestran en las tablas 3.26 y 3.27 respectivamente.

Δ_{v3} [GHz]	Canal	Capacidad de canal	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q		Jitter [ns]	OSNR [dB]	OSNR Real [dB]
					[lin]	[dBm]			
100	Ch_1	40 Gbps	-19.68	1×10^{-40}	27.5432	28.800293	0.000433336	50.136555	3.97017
	Ch_2	10 Gbps	-20.594	1×10^{-40}	18.896	25.527416	0.000770019	56.658439	6.76929
	Ch_3	2.5 Gbps	-18.316	1×10^{-40}	17.1374	24.678877	0.061527000	53.96548	11.1005
	Ch_4	2.5 Gbps	-18.356	1×10^{-40}	15.3259	23.708508	0.074748700	54.003244	11.0617
	Ch_5	10 Gbps	-20.599	1×10^{-40}	18.1881	25.195767	0.000787799	56.573752	6.75246
	Ch_6	40 Gbps	-19.703	1×10^{-40}	61.1811	35.732341	0.000197941	50.66579	3.95996

Tabla 3.26: Parámetros OPM para $\Delta_{v3} = 100$ GHz, Arq. FTTF.

$$\eta_{dis}[bps/Hz] = \frac{\sum_{i=1}^2 2,5[Mbps] + \sum_{j=1}^2 10[Mbps] + \sum_{k=1}^2 40[Mbps]}{\frac{17,3579[GHz]}{2} + \frac{27,92695[GHz]}{2} + \frac{45,17335[GHz]}{2} + (2*100[GHz] + 2*50[GHz] + 12,5[GHz])}$$

$$\eta_{dis}[bps/Hz] = \frac{(2 * 2,5) + (2 * 10) + (2 * 40)}{358,2291} \left[\frac{\text{Mbps}}{\text{GHz}} \right]$$

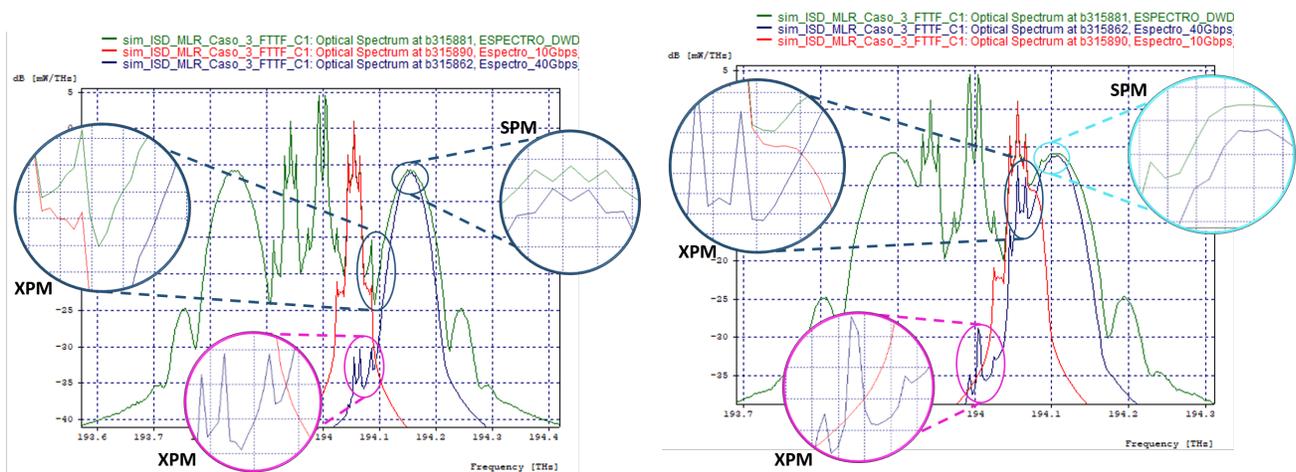
$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{105}{358,2291} = 0,2931 \left[\frac{bps}{Hz} \right]$$

Canal	Δ_{v3} [GHz]	C_N [Gbps]	C_{TOT} [Gbps]	$C_{PRO}(81Km)$ [Gbps * Km]	BW_{ded} [GHz]	BW_{dis} [GHz]	η_{ded} [bps/Hz]	η_{dis} [bps/Hz]
Ch_1	100	40	105	8505	46.2359	358.2291	86.51 %	29.31 %
Ch_2	50	10			27.9077		35.83 %	
Ch_3	12.5	2.5			17.3990		14.37 %	
Ch_4	50	2.5			17.3168		14.44 %	
Ch_5	50	10			27.9462		35.78 %	
Ch_6	100	40			46.1108		86.75 %	

Tabla 3.27: Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v3}=100$ GHz, Arq. FTTF.

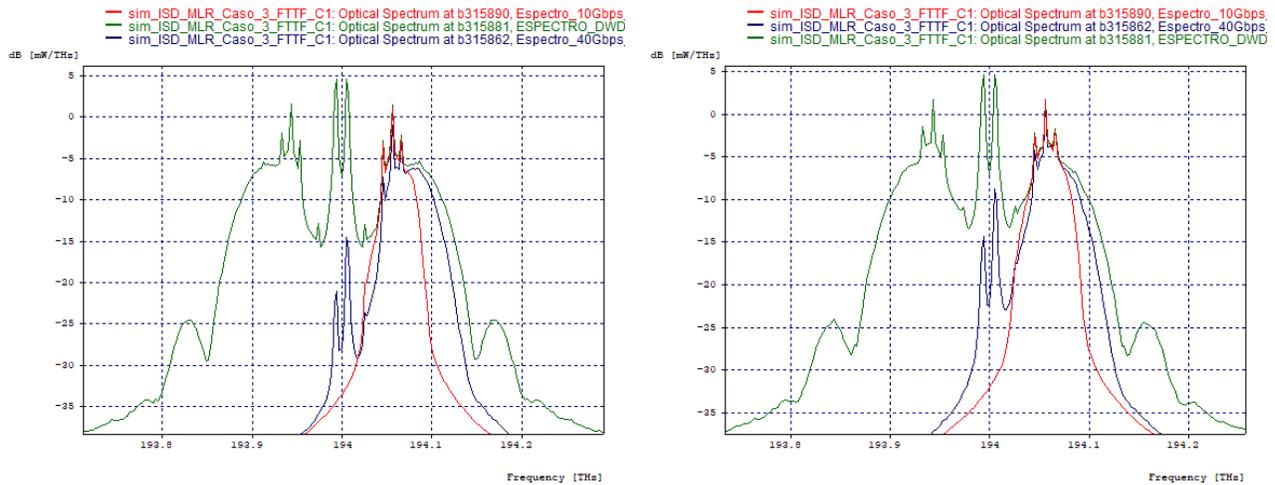
La tabla 3.26 resume los parámetros de monitoreo óptico obtenidos del sistema inicial, mientras que la tabla 3.27 resume los datos obtenidos para el cálculo de la ISD en el mismo caso. La tabla 3.26 permite diferenciar el comportamiento de los canales con capacidad de 40 Gbps, por un lado se tiene un canal por debajo de los 194 THz (frecuencia central) el cual presenta un desempeño notablemente inferior en cuanto a factor de calidad en comparación al que se encuentra por encima del mismo límite (194 THz). Aunque sus condiciones son las mismas, a excepción de su posición relativa en frecuencia, se puede afirmar que los canales de mayor capacidad funcionan mejor a frecuencias altas, lo cual es coherente ya que la relación frecuencia-velocidad es proporcional. A su vez esta información se corrobora analizando el comportamiento del Jitter, donde a mayor frecuencia mejor sincronización de los canales de mayor capacidad.

Aunque se esperaría un ahorro espectral adicional para este caso de estudio al disminuir el espaciamiento (Δ_{v3}) los resultados no respaldan esta consideración independientemente de la arquitectura, ya que inicialmente los canales 1 y 6 se ven afectados levemente por XPM como se mencionó en el caso 1 y al variar Δ_{v3} este efecto impacta considerablemente los canales del presente caso de estudio (Ch_1 y Ch_6) debido a la alta susceptibilidad que presentan ante el cambio de amplitud generada por la ICI. Las figuras 3.36a a 3.36d ilustran la ICI que se presenta entre los canales 5 y 6, la cual, a medida que va disminuyendo Δ_{v3} se hace más crítica al punto de no identificar la presencia de los canal 5 y 2 tanto para FTTC como para FTTF a un $\Delta_{v3} = 25$ y 12.5 GHz.



(a) $\Delta_{v3} = 100$ GHz.

(b) $\Delta_{v3} = 50$ GHz.

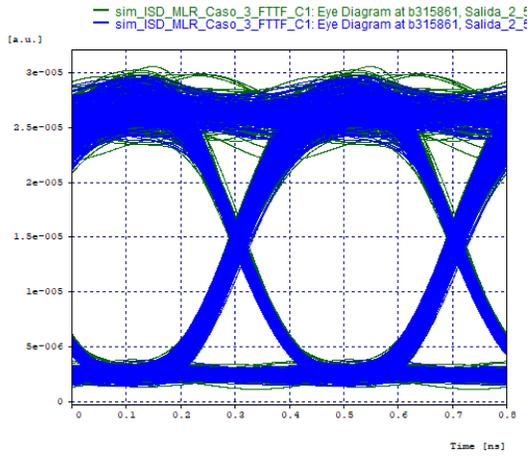


(c) $\Delta_{v3} = 25$ GHz.

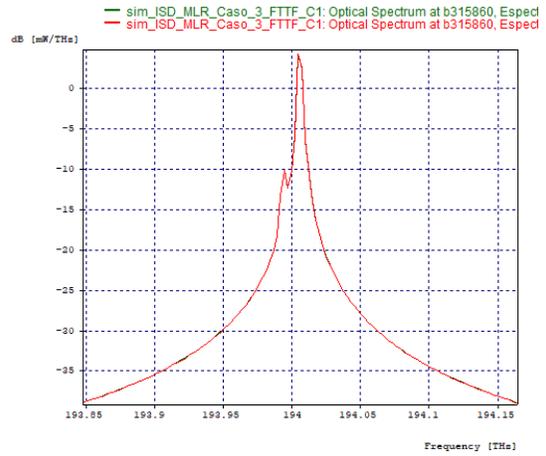
(d) $\Delta_{v3} = 12.5$ GHz.

Figura 3.36: Comparación de espectro a nivel de *Throughput* al variar Δ_{v3} .

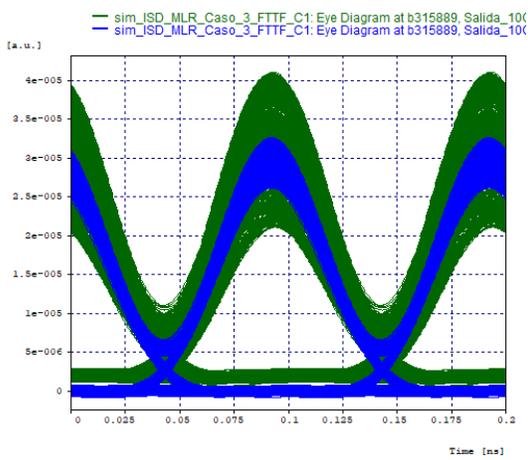
El gran ancho de banda de los canales 1 y 6 con capacidad de 40 Gbps, hace que las anomalías se presenten de manera temprana en este caso, incluso a un espaciamento de 100 GHz. A continuación se presentan los resultados de los canales 4, 5 y 6 a un espaciamento $\Delta_{v3}=50$ GHz que es donde en primera instancia se afecta gravemente el sistema (figuras 3.37a a 3.37f).



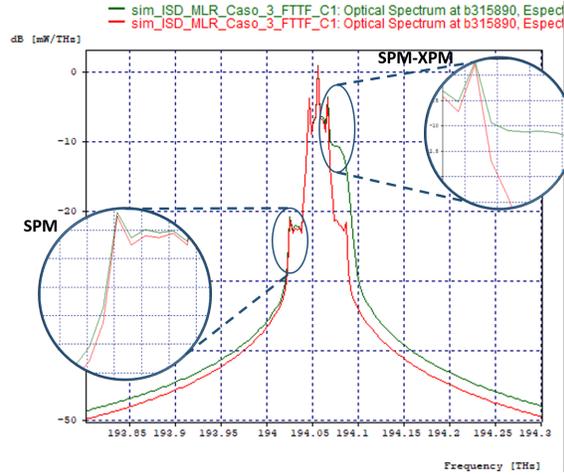
(a) Diagrama de ojo del Ch_4 .



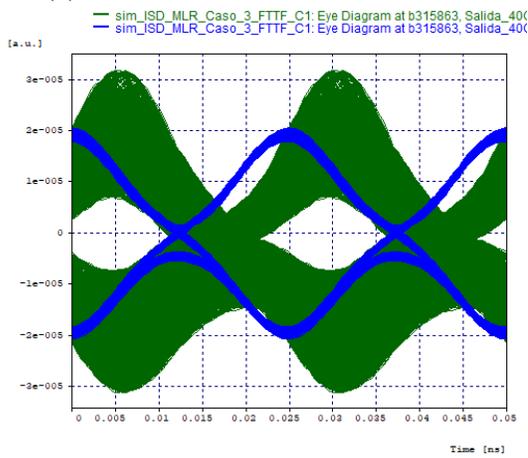
(b) Espectro óptico Ch_4 .



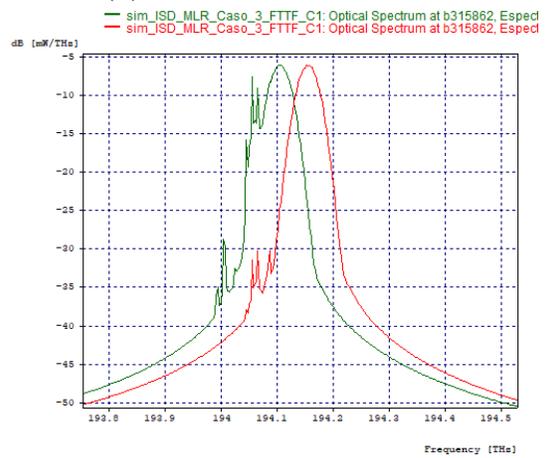
(c) Diagrama de ojo del Ch_5 .



(d) Espectro óptico Ch_5 .



(e) Diagrama de ojo del Ch_6 .



(f) Espectro óptico Ch_6 .

Figura 3.37: Comparación entre $\Delta_{v3}=100$ GHz y $\Delta_{v3}=50$ GHz en Arq. FTTF.

Δ_{v3} [GHz]	Canal	Capacidad de canal	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q		Jitter [ns]	OSNR [dB]	OSNR Real [dB]
					[lin]	[dBm]			
50	Ch_1	40 Gbps	-19.107	$3,70 \times 10^{-5}$	4.00199	12.04552	0.00200523	49.877789	3.99793
	Ch_2	10 Gbps	-19.742	$1,87 \times 10^{-11}$	6.54425	16.317201	0.00350788	55.181351	6.91946
	Ch_3	2.5 Gbps	-18.308	1×10^{-40}	15.1453	23.605581	0.0665869	53.969947	11.1052
	Ch_4	2.5 Gbps	-18.349	1×10^{-40}	13.5173	22.617806	0.0798654	53.993152	11.0622
	Ch_5	10 Gbps	-19.746	$3,25 \times 10^{-8}$	5.36777	14.595881	0.00306604	55.388804	6.9133
	Ch_6	40 Gbps	-19.129	$1,60 \times 10^{-6}$	4.67442	13.394549	0.00160827	50.350751	3.9711

Tabla 3.28: Parámetros OPM para $\Delta_{v3}= 50$ GHz, Arq. FTTF.

Comparando los resultados sintetizados en la tabla 3.28 con las figuras 3.37a a 3.37f se nota que los canales más afectados son los canales de mayor capacidad, de los cuales se resalta que la modulación configurada (RZ-DPSK) resulta robusta ante cambios de fase, pero ante cambios de amplitud causados por el efecto XPM es bastante susceptible y se afecta más que la modulación (RZ-OOK) de los canales 2 y 5 que responden de manera contraria (robustos ante cambios de amplitud pero susceptibles ante cambios de fase). Adicionalmente, se presenta ensanchamiento simétrico (SPM), especialmente en los canales 2 y 5 (figura 3.37d).

$$\eta_{dis}[bps/Hz] = \frac{\sum_{i=1}^2 2,5[Gbps] + \sum_{j=1}^2 10[Gbps] + \sum_{k=1}^2 40[Gbps]}{\frac{17,4282[GHz]}{2} + \frac{31,4909[GHz]}{2} + \frac{47,1211[GHz]}{2} + (4*50[GHz] + 12,5[GHz])}$$

$$\eta_{dis}[bps/Hz] = \frac{(2 * 2,5) + (2 * 10) + (2 * 40)}{260,5201} \left[\frac{Gbps}{GHz} \right]$$

$$\eta_{dis}[bps/Hz] = \frac{105}{260,5201} = 0,4030 \left[\frac{bps}{Hz} \right]$$

Canal	Δ_{v3} [GHz]	C_N [Gbps]	C_{TOT} [Gbps]	$C_{PRO}(81Km)$ [Gbps * Km]	BW_{ded} [GHz]	BW_{dis} [GHz]	η_{ded} [bps/Hz]	η_{dis} [bps/Hz]
Ch_1	50	40	105	8505	47.0049	260.5201	85.10 %	40.30 %
Ch_2		10			31.6923		31.55 %	
Ch_3		2.5			17.4506		14.33 %	
Ch_4	12.5	2.5			17.4058		14.36 %	
Ch_5	50	10			31.2895		31.96 %	
Ch_6	50	40			47.2373		84.68 %	

Tabla 3.29: Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v3}=50$ GHz, Arq. FTTF.

Finalmente la tabla 3.29 registra los resultados de ISD asociados a esta última variación, al igual que se incrementa el ancho de banda en arquitectura FTTF lo hace en FTTC.

Dados los resultados presentados hasta el momento, se omite la presentación de las demás variaciones a nivel de parámetros de monitoreo óptico e ISD ya que no resultan óptimos en cuanto a desempeño pero se adjuntan como anexos. Adicionalmente se pudo

notar que el uso de espectro en redes heterogéneas es posible optimizarlo más cuando se tienen canales de menor capacidad pero resulta menos eficiente que implementar el mismo *Throughput* o más con canales de mayor capacidad.

3.1.4. Caso Plus: Optimización del mejor caso de estudio obtenido.

A partir de los casos de estudio presentados, se plantea el caso de estudio número cuatro que consiste en plantear una solución para el mejor caso de estudio obtenido hasta el momento con el fin de lograr el máximo ahorro espectral con los parámetros objetivo mínimos para el correcto funcionamiento del sistema en general. El escenario inicial cuenta con una grilla flexible distribuida por $\Delta_{v1}=12.5$ GHz, $\Delta_{v2}=50$ GHz y $\Delta_{v3}=100$ GHz como se muestra en la figura 3.38 . La solución permitirá ahorrar aproximadamente 50 GHz de espectro, variando Δ_{v2} a 25 GHz.

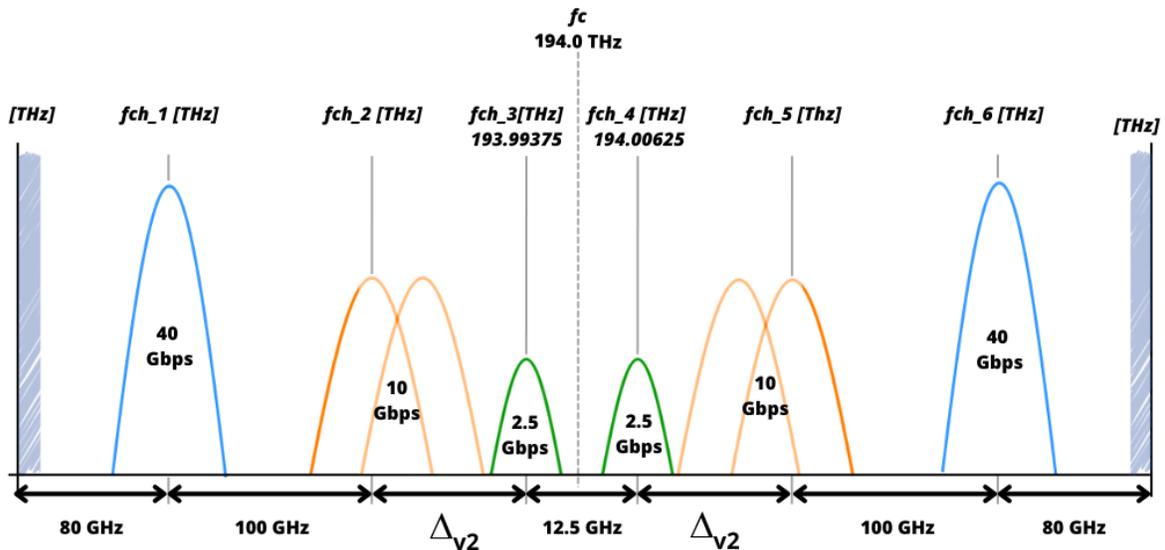


Figura 3.38: Representación de la variación de Δ_{v2} para el caso plus.

Con lo dicho anteriormente se presenta en la tabla 3.30 el plan de frecuencias para este caso especial.

Δ_{v2} [GHz]	f_{ch_1} [THz]	f_{ch_2} [THz]	f_{ch_3} [THz]	f_{ch_4} [THz]	f_{ch_5} [THz]	f_{ch_6} [THz]
50	193.84375	193.94375	193.99375	194.00625	194.05625	194.15625
25	193.86875	193.96875	193.99375	194.00625	194.03125	194.13125

Tabla 3.30: Plan de canalización para caso plus variando Δ_{v2} .

Para que sea posible realizar lo planteado es necesario cambiar la condición de diseño que se tuvo en cuenta para configurar los filtros de los canales con capacidad

de 10 Gbps con un ancho de banda más selectivo como se mencionó en el caso de estudio número 2. Adicionalmente se considera incrementar el orden de los filtros Bessel dentro del receptor óptico. A continuación se muestra en las figuras 3.39a y 3.39b las configuraciones adicionales para cumplir con lo planteado.

Parameter	Value	Units	Range
Notch Filter	"Bandpass"		
Raised Cosine function exponent	1		(0,1]
Roll-off	0.5		[0,1]
Center Frequency	=193.96875	THz	
Center Wavelength	1545.57091	nm	
-3dB Two-Sided Bandwidth	40	GHz	(0,2048]
-3dB Two-Sided Bandwidth	0.31881	nm	(0,16.32191]
Actual Filter Amplitude and Group...	"No"		

(a) Filtro de Ch_2 (10 Gbps).

Parameter	Value	Units	Range
-3dB Two-Sided Bandwidth	=1024.0	GHz	(0, 1280)
-3dB Two-Sided Bandwidth	0.40076	nm	(0, Inf)
Raised Cosine Roll-Off	0.5		[0,1]
Test post-detection Electrical Filter	"Bessel"		
Bessel filter order	8		[1, 8]
Normalized -3dB frequency	0.75	fraction of	[0.25, Inf]
First Pole Frequency	0.75	fraction of	[0.25, 51.2]
Second Pole Frequency	2	fraction of	[0.25, 51.2]

(b) Receptor óptico de Ch_2 (10 Gbps).

Figura 3.39: Configuración de filtro y receptor óptico en arquitectura FTTF.

Con esta configuración se obtiene una mejora en el sistema y es posible optimizar un poco más el espectro cumpliendo con los parámetros OPM objetivo. Los resultados para esta variación de configuración y espaciamento (Δ_{v2}) se resumen en las tablas 3.31 y 3.32.

Δ_{v2} [GHz]	Canal	Capacidad de canal	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q		Jitter [ns]	OSNR [dB]	OSNR Real [dB]
					[lin]	[dBm]			
50	Ch_1	40 Gbps	-19.687	1×10^{-40}	23.6203	27.465704	0.000437433	50.103616	3.95952
	Ch_2	10 Gbps	-20.703	1×10^{-40}	17.8759	25.045379	0.000737716	56.514722	6.72468
	Ch_3	2.5 Gbps	-18.363	1×10^{-40}	21.5499	26.668891	0.075625400	54.089012	11.0498
	Ch_4	2.5 Gbps	-18.285	1×10^{-40}	15.9725	24.06745	0.079388900	53.916340	11.1129
	Ch_5	10 Gbps	-20.682	1×10^{-40}	16.9309	24.573615	0.000730158	56.792473	6.76639
	Ch_6	40 Gbps	-19.703	1×10^{-40}	56.4253	35.029477	0.000199235	50.565658	3.95581

Tabla 3.31: Parámetros OPM para $\Delta_{v2}=50$ GHz, Arq. FTTF.

Δ_{v2} [GHz]	Canal	Capacidad de canal	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q		Jitter [ns]	OSNR [dB]	OSNR Real [dB]
					[lin]	[dBm]			
25	Ch_1	40 Gbps	-19.687	1×10^{-40}	24.1819	27.669805	0.0004301	50.119484	3.9433
	Ch_2	10 Gbps	-20.490	1×10^{-40}	13.4492	22.573961	0.0014332	54.836856	6.6995
	Ch_3	2.5 Gbps	-18.298	5.83×10^{-36}	12.5848	21.99691	0.0849225	54.130150	11.0962
	Ch_4	2.5 Gbps	-18.268	1.59×10^{-31}	11.9056	21.515003	0.0868697	53.820877	11.0963
	Ch_5	10 Gbps	-20.496	1×10^{-40}	14.5932	23.282994	0.0013179	54.500046	6.7046
	Ch_6	40 Gbps	-19.700	1×10^{-40}	54.3317	34.701071	0.0001972	50.599814	3.9477

Tabla 3.32: Parámetros OPM para $\Delta_{v2}=25$ GHz, Arq. FTTF.

En cuanto a desempeño óptico se presentan las figuras de la 3.40a a 3.40f en los cuales se observa que tiene algunas perturbaciones como ISI, CD, XPM y SPM. A pesar de ello, es posible recuperar la información de manera satisfactoria y validar la

tesis en configuración propuesta anteriormente.

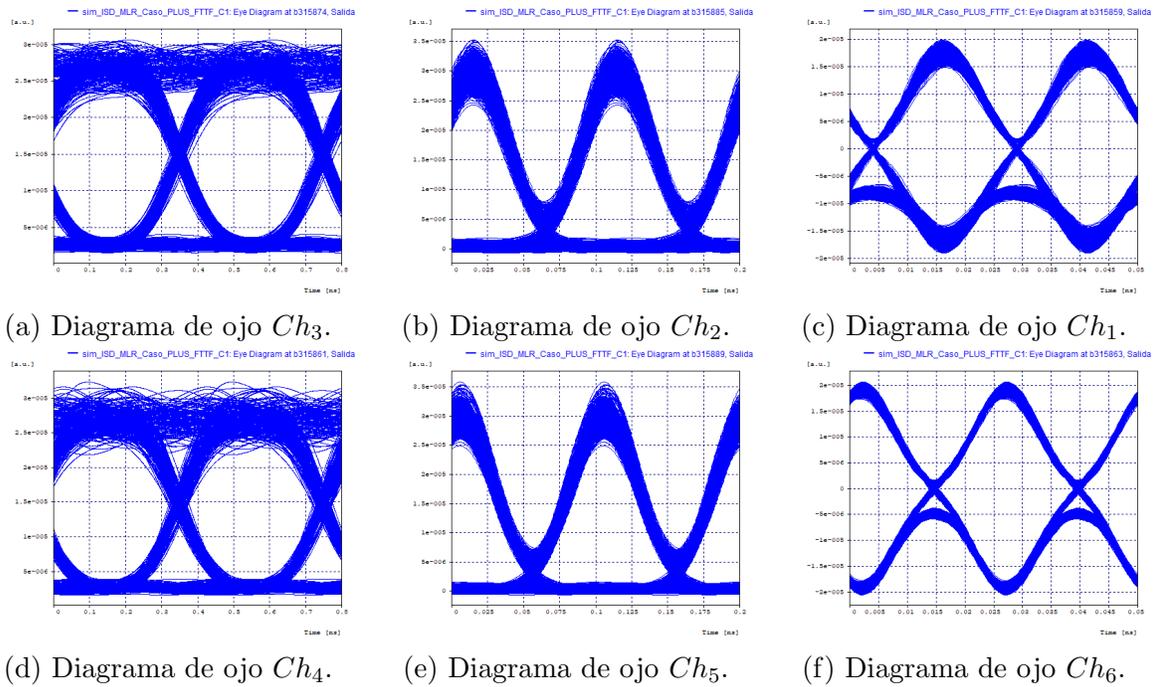
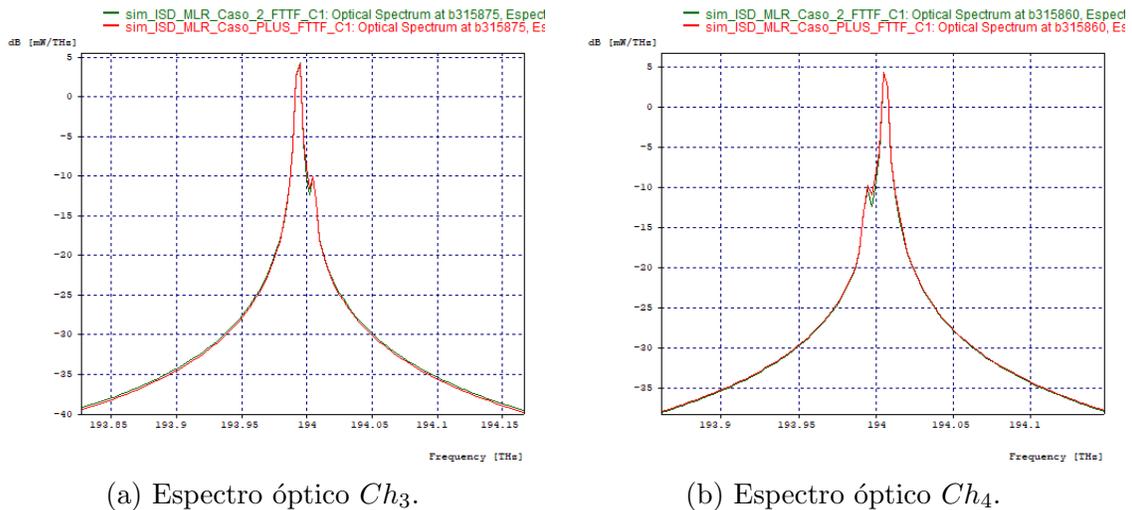
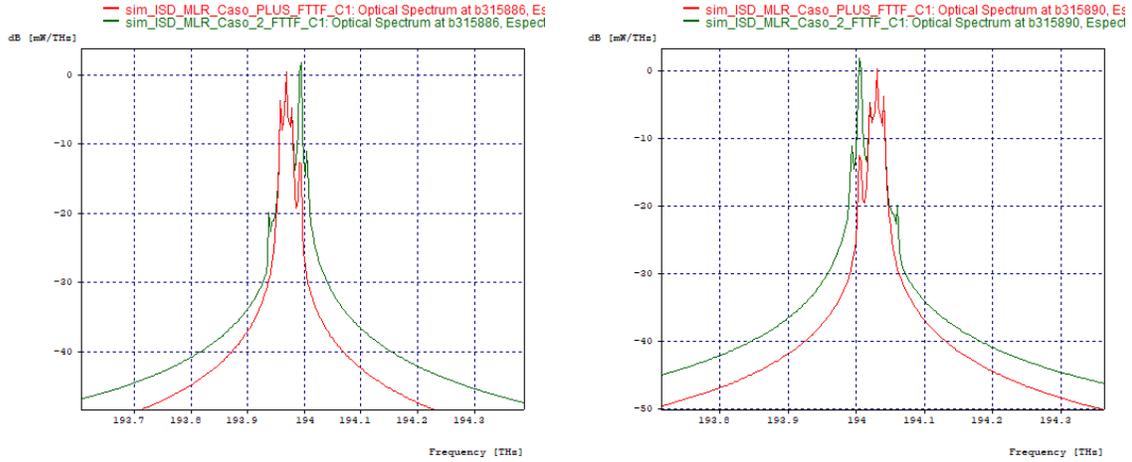


Figura 3.40: Resultados finales para escenario funcional optimizado en Arq. FTTF.

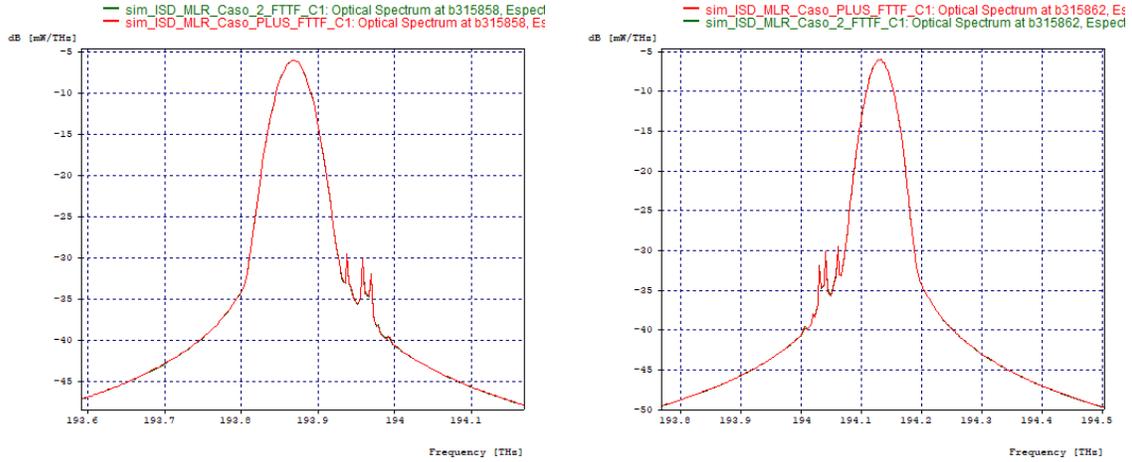
Espectralmente se obtienen mejoras en cuanto a reducción del efecto XPM causado por la ICI, especialmente en los canales 2 y 5 de 10 Gbps. En las figuras 3.41a a 3.41f se presenta la comparación del comportamiento de dichos canales antes y después de realizar la configuración presentada en las figuras 3.39a y 3.39b.





(c) Espectro óptico Ch_2 .

(d) Espectro óptico Ch_5 .



(e) Espectro óptico Ch_1 .

(f) Espectro óptico Ch_6 .

Figura 3.41: Comparación de resultados espectrales para $\Delta_{v2} = 25$ GHz en Arq. FTTF.

Esta propuesta de configuración para mejorar la eficiencia espectral distribuida del sistema se realiza para la arquitectura FTTF únicamente ya que al garantizar el funcionamiento a 500 m más que FTTC se garantiza el buen desempeño para arquitecturas con una distancia de última milla más corta. Por último, en las tablas 3.33 y 3.34 se sintetizan los resultados de las variables de medición y control para el cálculo de la ISD ante esta mejora.

$$\eta_{dis}[bps/Hz] = \frac{\sum_{i=1}^2 2,5[Gbps] + \sum_{j=1}^2 10[Gbps] + \sum_{k=1}^2 40[Gbps]}{\frac{17,6579[GHz]}{2} + \frac{27,711[GHz]}{2} + \frac{46,1444[GHz]}{2} + (2*100[GHz] + 2*50[GHz] + 12,5[GHz])}$$

$$\eta_{dis}[bps/Hz] = \frac{(2 * 2,5) + (2 * 10) + (2 * 40)}{358,25665} \left[\frac{Gbps}{GHz} \right]$$

$$\eta_{dis}[bps/Hz] = \frac{105}{358,25665} = 0,2931 \left[\frac{bps}{Hz} \right]$$

Canal	Δ_{v2} [GHz]	C_N [Gbps]	C_{TOT} [Gbps]	$C_{PRO}(81Km)$ [Gbps * Km]	BW_{ded} [GHz]	BW_{dis} [GHz]	η_{ded} [bps/Hz]	η_{dis} [bps/Hz]
Ch_1	100	40	105	8505	46.1588	358.25665	86.66 %	29.31 %
Ch_2	50	10			27.6904		36.11 %	
Ch_3	12.5	2.5			17.5159		14.27 %	
Ch_4	50	2.5			17.7999		14.05 %	
Ch_5	100	10			27.7316		36.06 %	
Ch_6	40	40			46.1300		86.71 %	

Tabla 3.33: Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v2}=50$ GHz, Arq. FTTF.

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{\sum_{i=1}^2 2,5[Gbps] + \sum_{j=1}^2 10[Gbps] + \sum_{k=1}^2 40[Gbps]}{\frac{18,29295[GHz]}{2} + \frac{27,79[GHz]}{2} + \frac{46,02365[GHz]}{2} + (2*100[GHz] + 2*50[GHz] + 12,5[GHz])}$$

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{(2 * 2,5) + (2 * 10) + (2 * 40)}{308,5533} \left[\frac{Gbps}{GHz} \right]$$

$$\eta_{dis[bps/Hz]} = \frac{105}{308,5533} = 0,3403 \left[\frac{bps}{Hz} \right]$$

Canal	Δ_{v2} [GHz]	C_N [Gbps]	C_{TOT} [Gbps]	$C_{PRO}(81Km)$ [Gbps * Km]	BW_{ded} [GHz]	BW_{dis} [GHz]	η_{ded} [bps/Hz]	η_{dis} [bps/Hz]
Ch_1	100	40	105	8505	46.0238	308.5533	86.91 %	34.03 %
Ch_2	25	10			27.8023		35.97 %	
Ch_3	12.5	2.5			18.1133		13.80 %	
Ch_4	25	2.5			18.4726		13.53 %	
Ch_5	100	10			27.7777		36.00 %	
Ch_6	40	40			46.0235		86.91 %	

Tabla 3.34: Valores ISD obtenidos en el sistema para $\Delta_{v2}=25$ GHz, Arq. FTTF.

Finalmente, aunque las degradaciones causadas por los efectos no lineales (XPM-SPM) incrementan en este último caso, especialmente para los canales 3 y 4, se logra configurar un sistema con una grilla flexible reducida hasta el límite satisfaciendo los valores mínimos aceptables estandarizados por la ITU. Adicionalmente las tablas 3.12 y 3.34 permiten evidenciar que respecto al sistema inicial planteado en el caso 1, se logra incrementar la eficiencia espectral distribuida de la red en un 14.77%, lo cual corresponde aproximadamente a 236.6751 GHz de espectro que se puede utilizar para más canales de transmisión. Es importante resaltar que al querer desarrollar una red MLR con una grilla espectral reducida al máximo los costos de la red van a incrementar en gran medida, ya que comercialmente la precisión de los equipos (Tx y Rx) es un factor predominante para definir su valor monetario.

Después de presentar las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos en esta investigación, los cuales facilitaron el análisis del desempeño de una arquitectura de Red de Línea Mixta asociada a la variación de la Densidad Espectral de Información,

se adjunta la tabla 3.35 que muestra el rendimiento del sistema para diferentes valores de Δ_{v1} , Δ_{v2} y Δ_{v3} , considerando parámetros como la asignación del espectro, la potencia del láser de transmisión por canal, la distancia del enlace y la compensación.

Características asociadas a una distancia de 80 Km + 1 Km de ultima milla.	Caso 1 6 canales $\Delta_{v1} = 100$ GHz hasta $\Delta_{v1} = 12.5$ GHz	Caso 2 6 canales $\Delta_{v2} = 100$ GHz hasta $\Delta_{v2} = 50$ GHz	Caso 3 6 canales $\Delta_{v3} = 100$ GHz	Caso Plus 6 canales $\Delta_{v2} = 50$ GHz hasta $\Delta_{v2} = 25$ GHz
Velocidades de Tx	2.5/10/40 Gbps	2.5/10/40 Gbps	2.5/10/40 Gbps	2.5/10/40 Gbps
Efectos Incidencia	XPM-SPM-FWM Baja-Baja-Media	XPM-SPM-FWM Media-Baja-Muy baja	XPM-SPM-FWM Alta-Media-Muy baja	XPM-SPM-FWM Media-Baja-Muy baja
Densidad Espectral de Información máxima	19.26 %	29.32 %	29.31 %	34.03 %
Complejidad de configuración	Media	Media	Baja	Alta
Tolerancia a degradaciones	Alta	Media	Baja	Baja

Tabla 3.35: Caracterización de red MLR de tipo NG-PON2.

Nota de autor:

En este capítulo se abordaron los 3 casos de estudio ya mencionados en el capítulo 2, en los cuales se define la obtención de modelos de red óptica MLR-DWDM mediante la combinación de velocidades de transmisión de 2.5, 10 y 40 Gbps y sus respectivos formatos de modulación, dando cumplimiento al primer objetivo específico definido para el presente trabajo de grado. A partir de ello, se realizó la caracterización de requerimientos para poder implementar adecuadamente las arquitecturas FTTx elegidas (FTTC y FTTF) en los modelos de red MLR-DWDM de cada caso de estudio con lo que fue posible realizar la evaluación sobre el desempeño de dichos modelos de red en diferentes arquitecturas FTTx y con los debidos ajustes se obtienen redes MLR que trabajen en óptimas condiciones sobre los requisitos mínimos predefinidos, cumpliendo así con el segundo y tercer objetivo específico definidos para el presente trabajo de grado.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el presente trabajo, se analizó el desempeño de una arquitectura de Red de Línea Mixta asociada a la variación de la Densidad Espectral de Información, que permitió comparar las ventajas y desventajas de mejorar la eficiencia espectral distribuida haciendo uso de parámetros de monitoreo óptico y la ecuación adaptada de la teoría de la información de Shannon-Hartley en una red MLR-DWDM de tipo NG-PON2.

En este capítulo, se exponen las conclusiones, recomendaciones y posibles líneas de investigación futura vinculadas a los aspectos más relevantes que contribuyeron al logro de los objetivos establecidos.

4.1. CONCLUSIONES

Tras la definición de los modelos de red óptica MLR de tipo NG-PON2 y la realización de su análisis correspondiente, se concluye:

4.1.1. Conclusiones sobre los resultados

- El nivel de compensación de los sistemas ópticos es proporcional a las velocidades de transmisión, por lo que al tener una red MLR se debe garantizar el funcionamiento de los canales con mayor velocidad y de esta manera se garantiza el de todo el sistema.
- Equipotenciar los canales de igual capacidad ayuda a mitigar el impacto negativo en el sistema, ya que la cantidad de potencia es uno de los parámetros de transmisión más significativos en la generación de efectos no lineales en sistemas WDM. A medida que la potencia de transmisión disminuye, el impacto de los efectos no lineales también se reduce.
- La posición relativa en frecuencia de cada canal afecta su desempeño, considerando que entre mayor sea la velocidad (capacidad) del canal se comporta mejor a una mayor frecuencia.
- La adopción de formatos avanzados de modulación más robustos como RZ-DPSK permiten minimizar el impacto de efectos no lineales en canales de mayor capacidad (40 Gbps), pero independientemente del formato de modulación, estos canales son muy susceptibles ante cambios mínimos en el sistema.

- Si se desea aprovechar al máximo una red MLR, se recomienda utilizar filtros más selectivos en recepción, ya que al tener espaciamentos reducidos se tendrán interferencias de canal adyacente o entre símbolos que darán paso a efectos no lineales como XPM y SPM.
- El uso de grilla espectral flexible contribuye a la disminución del efecto no lineal FWM, además de realizar este aporte permite ahorrar espectro óptico en la convergencia de redes heterogéneas de próxima generación.
- La disposición continua de canales de menor capacidad cerca a la frecuencia central del sistema permite que en una convergencia de redes de tipo NG-PON1 y NG-PON2 se ahorre espectro sustancialmente. Aunque estos canales permiten dicho ahorro en el ancho de banda, su aporte al rendimiento total de la red y a la eficiencia espectral distribuida es restringido. La exclusión de estos canales en el cálculo de la ISD solo representa una disminución aproximada del 0.04 %, lo que indica que el sistema podría obtener mayores beneficios al utilizar canales de mayor capacidad.

4.1.2. Conclusiones sobre la investigación

- De los aportes iniciales que deja la investigación para proveedores de servicios, es conocer el desempeño de sistemas MLR de tipo NG-PON2 a valores de pre compensación detallados entre 90 y 100 %, en el cual, los canales de mayor capacidad empiezan a tener un mejor desempeño. Considerando una relación costo-beneficio, este estudio adicional les da un panorama más claro para la elección de la DCF ya que un 1 % de compensación representa aproximadamente 1km y a su vez se traduce en costes monetarios o de calidad del servicio.
- La búsqueda del equilibrio entre los diferentes parámetros para obtener un enlace óptico con un buen desempeño, permite a los proveedores de servicios implementar arquitecturas de red heterogéneas con capacidad adaptable de tal forma que se pueda ofrecer una gran variedad de servicios a sus clientes manteniendo la calidad del servicio.
- Otro aporte del caso de estudio especial se basa en la mejora de la calidad del servicio incrementando la densidad espectral de información a su máximo valor, que al lograrlo en redes ópticas pasivas, se consiguen beneficios para el sistema como la eficiencia energética, menores latencias y mayor fiabilidad de las comunicaciones.
- Se consiguió implementar a nivel de simulación un modelo de red MLR de tipo NG-PON2 altamente eficiente para 3 velocidades de transmisión diferentes (2.5/10/40 Gbps), lo cual estuvo supeditado directamente por la configuración de parámetros de control como: Potencia del láser, porcentaje de compensación, Espaciamiento entre canales y ancho de banda de filtros receptores.

- La adopción de metodologías híbridas en investigación (WBS-PERT) permitió una gestión óptima de tiempos e investigación más minuciosa, ya que su holgura y tareas desglosadas permitieron gestionar inconvenientes y dar un panorama más claro de la ruta de investigación a seguir.
- La combinación de metodologías de simulación (TOP DOWN NETWORK DESIGN - Ingeniería del software. Un enfoque práctico) permitió aterrizar de manera clara el requerimiento para lograr resultados valiosos para la investigación.
- La afección del efecto no lineal XPM en los sistemas DWDM siempre está presente, aunque en algunos casos no afecta considerablemente. Al variar la grilla espectral reduciendo el espaciamiento entre canales adyacentes, este efecto se agudiza y empieza a impactar negativamente el sistema en un mayor grado, por lo que se considera que su grado de afección es inversamente proporcional al valor de espaciamiento entre canales.

Como conclusión final y respondiendo a la pregunta de investigación y al objetivo general, se determina que es viable mejorar la Densidad Espectral de Información (ISD) en redes MLR de tipo NG-PON2, a pesar de enfrentar una mayor complejidad debido a los efectos no lineales que surgen al reducir el espaciado entre canales. Esto permite alcanzar una red heterogénea altamente eficiente, siempre y cuando se consideren las limitaciones asociadas con la implementación de diversas tasas de bits en un mismo hilo de fibra óptica.

4.2. RECOMENDACIONES

- Debido a la versatilidad de la herramienta de simulación Optsim, es de vital importancia definir el alcance del trabajo de grado para configurar de manera acertada el sistema y poder dar cumplimiento estrictamente a lo propuesto sin obtener resultados irrelevantes para el análisis.
- Definir acertadamente las metodologías de investigación y simulación permite establecer un plan de acción concreto que simplifica el progreso del proyecto de grado y garantiza la obtención de resultados pertinentes dentro del contexto abordado.
- Es de vital importancia basarse en estándares vigentes al momento de caracterizar la red a simular.
- Determinar características de configuración con el cálculo del valor promedio en parámetros OPM e ISD entre canales de igual capacidad, permite garantizar parámetros de configuración beneficiosos para dichos canales con posiciones relativas en frecuencia diferentes.

- Es necesario asegurarse inicialmente de que los resultados de los canales de mayor velocidad se ajusten a los estándares establecidos, y luego proceder a ajustar los canales de menor velocidad.

4.3. TRABAJOS FUTUROS

- Analizar la eficiencia espectral en una red heterogénea basada en la convergencia de XGS-PON y NG-PON2 con un *throughput* mayor 100 Gbps.
- Realizar el análisis del desempeño de una red altamente eficiente en presencia de efectos no lineales de orden superior.
- Analizar la eficiencia espectral en redes heterogéneas convergentes con redes HSP en diferentes arquitecturas FTTx.
- Evaluar el desempeño de una red MLR-DWDM altamente eficiente con diferentes tipos de fibras.
- Analizar el desempeño de una red MLR-DWDM con más de dos canales de 40 Gbps modulados con el formato RZ-DQPSK.

REFERENCIAS

- [1] International Telecommunication Union (ITU), *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid* (Recomendación G.694.1). ITU Telecommunication Standardization Sector, ene. de 2021.
- [2] International Telecommunication Union (ITU), *Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid* (Recomendación G.694.2). ITU Telecommunication Standardization Sector, feb. de 2004.
- [3] A. J. Ordóñez Mendieta, “Diseño y simulación de los efectos de FWDM en una red UDWDM PON,” Tesis de mtría., Pontifica Universidad Católica del Ecuador, Quito-Ecuador, 2015, pág. 64.
- [4] S. Castilla Ibeas, “Planificación y diseño de redes ópticas WDM,” Tesis de mtría., Universidad Politécnica de Madrid, Madrid-España, sep. de 2017, pág. 32.
- [5] Full Service Access Network (FSAN), *About FSAN*, Available on: <https://www.fsan.org>, 2022.
- [6] Full Service Access Network (FSAN) Association, *Charter 2022*, Available on: <https://www.fsan.org/wp-content/uploads/2022/10/FSAN-2022-Charter-20221006.pdf>, 2022.
- [7] J. S. Wey, “The Outlook for PON Standardization: A Tutorial,” *Journal of Light-wave Technology*, vol. 38, n.º 31 - 42, 2019, ISSN: 1558-2213. DOI: 10.1109/JLT.2019.2950889.
- [8] International Telecommunication Union (ITU), *Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics* (Rec. G.984.1). ITU Telecommunication Standardization Sector, mar. de 2008.
- [9] International Telecommunication Union (ITU), *10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements* (Rec. G.987.1 Cor. 1). ITU Telecommunication Standardization Sector, mar. de 2020.
- [10] International Telecommunication Union (ITU), *10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON)* (Rec. G.9807.1). ITU Telecommunication Standardization Sector, feb. de 2023.
- [11] International Telecommunication Union (ITU), *40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Definitions, abbreviations and acronyms* (Rec. G.989). ITU Telecommunication Standardization Sector, oct. de 2015.
- [12] Full Service Access Network (FSAN) Association, *Next Generation PON Task Group*, Available on: <https://www.fsan.org/documents/ngpon/>, 2023.
- [13] International Telecommunication Union (ITU), *40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification* (Rec. G.989.2). ITU Telecommunication Standardization Sector, feb. de 2019.

- [14] International Telecommunication Union (ITU), *40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Transmission convergence layer specification* (Rec. G.989.3). ITU Telecommunication Standardization Sector, mayo de 2021.
- [15] International Telecommunication Union (ITU), *40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements* (Rec. G.989.1). ITU Telecommunication Standardization Sector, mar. de 2013.
- [16] Rogelio Montañana, *Atenuación típica de la fibra óptica*. Available on: https://www.aulaclinic.es/redes/secuencias/diapo/Diapositiva2_138.PNG, jun. de 2018.
- [17] International Telecommunication Union (ITU), *Multiple-wavelength passive optical networks (MW-PONs)* (Rec. G.9802). ITU Telecommunication Standardization Sector, abr. de 2015.
- [18] International Telecommunication Union (ITU), *Wavelength division multiplexed passive optical networks (WDM PON): General requirements* (Rec. G.9802.1). ITU Telecommunication Standardization Sector, ago. de 2021.
- [19] International Telecommunication Union (ITU), *Coexistence of passive optical network systems* (Rec. G.9805). ITU Telecommunication Standardization Sector, feb. de 2022.
- [20] International Telecommunication Union (ITU), *Higher speed passive optical networks – Requirements* (Rec. G.9804.1). ITU Telecommunication Standardization Sector, nov. de 2019.
- [21] D. Zhang, D. Liu, X. Wu y D. Neset, “Progress of ITU-T higher speed passive optical network (50G-PON) standardization,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 12, n.º 10, 2020, ISSN: 1943-0639. DOI: 10.1364/JOCN.391830.
- [22] International Telecommunication Union (ITU), *Higher-speed bidirectional, single fibre, point-to-point optical access system (HS-PtP)* (Rec. G.9806). ITU Telecommunication Standardization Sector, jun. de 2020.
- [23] International Telecommunication Union (ITU), *100 Mbit/s point-to-point Ethernet based optical access system* (Rec. G.985). ITU Telecommunication Standardization Sector, mar. de 2003.
- [24] Viavi Solution Inc, *La Evolución en las tecnologías PON*, Available on: <https://www.viavisolutions.com/es-es/webinars/2020/la-evolucion-en-las-tecnologias-pon>, jul. de 2020.
- [25] S. Ghoniemy, “Enhanced Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Triple-Play Broadband Service Delivery in FTTx Networks,” en *2018 International Conference on Computer and Applications (ICCA)*, 2018, págs. 419-426. DOI: 10.1109/COMAPP.2018.8460423.

- [26] Y. Marchukov, “Desarrollo de una aplicación gráfica para el diseño de infraestructuras FTTH,” Universidad Politecnica de Valencia-Escuela Politecnica Superior de Gandia, Available on: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13413/memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, 2011.
- [27] R. D. Agila García, “Diseño de una red GPON para el barrio “El paraíso de Jipiro” del cantón Loja, Provincia de Loja, usando un armario F01S300,” Tesis de mtría., Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Available on: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/13206/1/T-UCSG-POS-MTEL-142.pdf>, ago. de 2019.
- [28] Optronix, *Catálogo digital*, págs. 52-56, 231, 582 y 605, Available on: <https://fibremex.com/fibra-optica/views/Biblioteca/catalogo-telecomunicaciones-fibra-optica.php>.
- [29] F. A. Rodríguez Yaguache, “Diseño de una red de distribución óptica (ODN) multiservicio con tecnología GPON en el sector occidental de la ciudad de Loja para la Corporación Nacional de Telecomunicaciones E.P.,” Universidad Nacional de Loja, 2015.
- [30] FS, *ONU1910-1GF-W, 1-puerto FTTH/O ONU, adaptativo de doble modo XPON, 1 puerto GE y 1 puerto FE, 1 puerto USB, doble antena externa (300M Wi-Fi)*, Available on: <https://www.fs.com/mx/products/154795.html>.
- [31] FS, *ONU2110-8GP, 1-puerto XPON MDU ONU con 8 × puertos PoE+@130W*, Available on: <https://www.fs.com/mx/products/143752.html?attribute=56541&id=1225774>.
- [32] FS, *Divisor/Splitter PLC 1 x 128, módulo de ABS con empalme/pigtail, 2,0 mm, SC/UPC, monomodo*, Available on: <https://www.fs.com/es/products/149183.html?attribute=29249&id=557744>.
- [33] International Organization for Standardization (ISO), International Electrotechnical Commission(IEC), *Information technology-Generic cabling systems for customer premises* (Part 9908: Guidance for the support of higher speed applications over optical fibre channels). International Organization for Standardization, ene. de 2020.
- [34] Fluke Networks, *Fibra OM1, OM2, OM3, OM4, OM5y OS1, OS2*, Available on: <https://es.flukenetworks.com/knowledge-base/copper-testing/om1-om2-om3-om4-om5-and-os1-os2-fiber>.
- [35] John, *Definición, tipos y características de la fibra multimodo: OM1 vs OM2 vs OM3 vs OM4 vs OM5*, Available on: <https://community.fs.com/es/blog/advantages-and-disadvantages-of-multimode-fiber.html>, ago. de 2021.
- [36] Tecnical, *Fibra Óptica. Monomodo o Multimodo*, Available on: <https://www.tecnical.cat/apunts-tecnics/cas-fibra-optica-monomodo-multimodo-apuntes-tecnicos-tecnical-manresa-igualada.pdf>.
- [37] FibreMex - Optronix, *Tipos de fibra óptica, más allá de monomodo y multimodo*. Available on: <https://www.youtube.com/watch?v=vYMmqp7Of1Y>, sep. de 2021.

- [38] International Telecommunication Union (ITU), *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable* (Recomendación G.652). ITU Telecommunication Standardization Sector, mayo de 2017.
- [39] Optronics, *¿Qué es G.657 en la fibra óptica?* Available on: <https://fibremex.com/fibra-optica/views/Blog/detalle.php?id=167&nom=fibra-optica-G.657>, ene. de 2023.
- [40] International Telecommunication Union (ITU), *Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable* (Recomendación G.657). ITU Telecommunication Standardization Sector, mayo de 2017.
- [41] Viavi Solution Inc, *¿Qué es la FTTx?* Available on: <https://www.viavisolutions.com/es-es/que-es-la-fttx>.
- [42] Samm Teknoloji, *What Does FTTH and FTTX Mean, and What is the Internet?* Available on: <https://telecom.samm.com/what-does-ftth-fttx-mean-and-what-is-the-internet>, mar. de 2022.
- [43] Deployment and Operations Committee FTTH, *FTTH Handbook*, Available on: <https://www.ftthcouncil.eu/knowledge-centre/all-publications-and-assets/215/ftth-handbook>, 2023.
- [44] H. A. L. Mazorra y G. A. G. Parra, “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,” Universidad del Cauca, 2022.
- [45] J. Granjero, B. Carril, K. Bourg y W. Wang, “FTTx Networks: Technology Implementation and Operation,” en 1.^a ed. morgan kaufmann, ene. de 2017, cap. 2, págs. 13-23. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420137-8.00002-0>.
- [46] A. Cortés, “Planificación de las topologías de las redes de acceso fiber to the home con tecnologías gigabit passive optical network: un caso de estudio,” *Revista Académica UTP*, vol. 10, n.º 1, págs. 11-18, 2019, ISSN: 2076-8133. DOI: <https://doi.org/10.33412/pri.v10.1.2165>.
- [47] J. Tery, “Strong Leadership and Effective Partnerships for Successful Municipal FTTP Projects,” *German Marshall Fund of the United States*, n.º 27, pág. 3, 2019.
- [48] FibreMex, *5 variantes de FTTx que quizá no conocía*, Available on: <https://fibremex.com/fibra-optica/views/Blog/detalle.php?id=58&nom=6-variantes-fttx>, ene. de 2022.
- [49] Optronics, *FTTx y su papel en nuestro futuro*, Available on: <https://optronics.com.mx/conectividad/views/blog/detalle/137-fttx-en-fibra-optica>, nov. de 2021.
- [50] CommScope, *Fiber to the X Fundamentals*, Available on: <https://www.commscope.com/resources/eBooks/FTTX-Fundamentals-eBook/>.

- [51] A. Udalcovs, V. Bobrovs y G. Ivanovs, “Comparison between power efficiencies of mixed-line rate over Single-Line Rate in spectral efficient WDM networks with signal quality guarantee,” en *2013 IEEE Latin-America Conference on Communications*, 2013, págs. 1-6. DOI: 10.1109/LatinCom.2013.6759811.
- [52] I. Sridhar y S. P. Shree, “Spectral and Power-Efficiency Investigation in Single and Multi-Line-Rate Optical Wavelength Division Multiplexed (WDM) Networks,” *Photonic Network Communications*, vol. 33, págs. 39-51, feb. de 2017. DOI: 10.1007/s11107-016-0618-3.
- [53] J. G. López Perafán, “Diseño de métodos cross layer cognitivos para redes de comunicación óptica de ráfagas (OBS),” Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad del Cauca, 2014.
- [54] S. Iyer y S. P. Singh, “Physical layer impairment-aware Routing and Wavelength Assignment (PLI-RWA) strategy for mixed line rate (MLR) wavelength division multiplexed (WDM) optical networks,” en *2015 Twelfth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*, 2015, págs. 1-5. DOI: 10.1109/WOCN.2015.8064489.
- [55] M. M. Ferès, “Estudo de redes ópticas heterogêneas associado à investigação de técnicas avançadas de monitoração de desempenho (OPM),” Telecomunicações, Universidad de São Paulo. DOI: 10.11606/T.18.2014.tde-11122014-160401.
- [56] P. Chowdhury, M. Tornatore, A. Nag, E. Ip, T. Wang y B. Mukherjee, “On the Design of Energy-Efficient Mixed-Line-Rate (MLR) Optical Networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, n.º 1, págs. 130-139, 2012. DOI: 10.1109/JLT.2011.2177441.
- [57] J. T. T. Noguera, J. D. H. Varona y 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 ingenieria*, vol. 12, n.º 23, págs. 9-15, 2018, ISSN: 2539-4169.
- [58] J. Zhao, B. Bao, H. Yang, E. Oki y B. C. Chatterjee, “Holding-time- and impairment-aware shared spectrum allocation in mixed-line-rate elastic optical networks,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 11, n.º 6, págs. 322-332, 2019. DOI: 10.1364/JOCN.11.000322.
- [59] N. Sambo, M. Secondini, F. Cugini et al., “Modeling and Distributed Provisioning in 10–40–100-Gb/s Multirate Wavelength Switched Optical Networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, n.º 9, págs. 1248-1257, 2011. DOI: 10.1109/JLT.2011.2122245.
- [60] V. Kumar, S. Sahu y S. K. Das, “Performance Analysis for Mixed Line Rates (MLR) WDM/DWDM Networks Under Various Modulation Techniques,” en *2018 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 2018, págs. 1-5. DOI: 10.1109/WiSPNET.2018.8538684.

- [61] K. Christodoulopoulos, K. Manousakis y E. Varvarigos, “Adapting the transmission reach in mixed line rates WDM transport networks,” en *15th International Conference on Optical Network Design and Modeling - ONDM 2011*, 2011, págs. 1-6.
- [62] M. Džanko, B. Mikac, N. A. Gonzalez, G. S. Zervas y D. Simeonidou, “Availability analysis of optical cross-connect implemented by architecture on demand,” en *2012 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2012, págs. 1-4. DOI: 10.1109/ICTON.2012.6253742.
- [63] S. Moreno, D. Torres y G. Puerto, “Análisis y comparativo de los amplificadores ópticos soa, edfa y raman,” vol. 18, n.º 2, págs. 22-28, 2018. DOI: 10.19053/1900771X.v18.n2.2018.11874.
- [64] D. Malik y A. Wason, “Performance analysis of hybrid optical amplifiers for multichannel wavelength division multiplexed (WDM) optical networks,” *Journal of Optical Communications*, págs. 1-6, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1515/joc-2020-0053>.
- [65] V. de Miguel Soto, “Desarrollo de láser random de fibra óptica multi-longitud de onda conmutable y reconfigurable en tiempo real para interrogación remota de sensores.” Universidad Pública de Navarra, 2014.
- [66] Carlos Vargas, *Módulos Transceiver De Fibra Óptica*, Available on: <https://sisutelco.com/principios-de-los-otdr/>.
- [67] C. E. Shannon, “A mathematical theory of communication,” *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, n.º 3, págs. 379-423, 1948. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.
- [68] G. A. Gómez Agredo, “Mejora de la Eficiencia Espectral en redes DWDM a 40Gbps a través de los Formatos de Modulación Avanzados DPSK y DQPSK,” Tesis de mtría., Universidad Del Cauca, Popayán-Colombia, 2019.
- [69] E. M. Rivera Castaño y A. N. Girón Zuñiga, “Medida de la eficiencia espectral de una arquitectura de red heterogenea de tipo NG-PON para un régimen de propagación cuasilineal,” Universidad del Cauca, 2022.
- [70] Emmanuel Desurvire, *Classical and Quantum Information Theory*. New York, United States of America: Cambridge University Press, 2009, ISBN: 978-0-521-88171-5.
- [71] G. A. G. Agredo y J. G. LópezPerafán, “Eficiencia espectral de formatos de modulación avanzados en redes XGS-PON,” págs. 30-39, 2019. DOI: <https://doi.org/10.14483/issn.2248-4728>.
- [72] Priscilla Oppenheimer, *Top-Down Network Desing - Third Edition*. Cisco Press, 2010, ISBN: 978-1-58720-283-4.
- [73] Pressman, Roger S., *Ingeniería del software. Un enfoque práctico - Séptima edición*. The McGraw-Hill Companies, 2010, ISBN: 978-607-15-0314-5.

- [74] S. M. Restrepo Oñate, “Guía de buenas prácticas para la implementación del EVM como método de control y monitoreo de proyectos de construcción,” Universidad de los Andes, 2023.
- [75] M. Burghate, “Work Breakdown Structure: Simplifying Project Management,” *International Journal of Commerce and Management Studies*, vol. 3, n.º 2, jun. de 218.
- [76] J. F. A. C. Vargas, “Aplicación de EARNED VALUED adaptado a la etapa de construcción,” Universidad de Chile, 2022.
- [77] E. Siami-Irdemoosa, S. R. Dindarloo y M. Sharifzadeh, “Work breakdown structure (WBS) development for underground construction,” *Automation in Construction*, vol. 58, págs. 85-94, 2015, ISSN: 0926-5805. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.07.016>.
- [78] E. D. Hahn, “Mixture densities for project management activity times: A robust approach to PERT,” *European Journal of Operational Research*, vol. 188, n.º 2, págs. 450-459, 2008, ISSN: 0377-2217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.04.032>.
- [79] P. Poggioli, *Aplicación práctica del método PERT*. Editions d’Organisation, jun. de 1970, ISBN: 978-2-70810-290-3.
- [80] B. López, *PERT - Técnica de evaluación y revisión de proyectos » Ingeniería*, Available on: <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/investigacion-de-operaciones/pert-tecnica-de-evaluacion-y-revision-de-proyectos/>, jun. de 2019.
- [81] R. A. L. Alberto, *Investigación de operaciones para ingenierías y administración de empresas*, Available on: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/51956>, 2001-06.
- [82] J. A. Gutiérrez Chito y A. T. Gomez Córdoba, “Análisis del desempeño de formatos de modulación avanzados en presencia del efecto FWM en una arquitecturas de red MLR de tipo NG-PON2,” Universidad del Cauca, 2023.
- [83] A. V. T. Imbachí y A. D. Z. Trujillo, “Diseño de un módulo compensador de dispersión cromática en un entorno de co-simulación MATLAB/OPTSIM para una red DWDM a 10 Gbps,” Universidad del Cauca, 2019.
- [84] RSoft Desing Group, Inc., *OptSim User Guide*, www.rsoftdesign.com, 2010.
- [85] RSoft Desing Group, Inc., *OptSim Models Reference Volume I Sample Mode*, www.rsoftdesign.com, 2010.
- [86] RSoft Desing Group, Inc., *OptSim Models Reference Volume II Block Mode*, www.rsoftdesign.com, 2010.
- [87] RSoft Desing Group, Inc., *OptSim Application Notes and Examples*, www.rsoftdesign.com, 2010.

- [88] D. G. S. Andrade y O. L. S. Batallas, “Simulación de un anillo de red de transporte de fibra óptica comparando los métodos de multiplexación WDM y UDWDM a través del software OPTSIM,” Escuela Politécnica Nacional, 2018.
- [89] S. G. Morales y A. A. M. Ceron, “Propuesta de un prototipo de sistema de comunicación en el espacio abierto en base de tecnología láser con $L=1550\text{nm}$,” Instituto Politécnico Nacional, 2017.
- [90] ZooStock Global it Solutions, *Tipos de tecnología láser en los transceptores de fibra óptica*, Available on: <https://www.zoostock.com/redes-y-sistemas/tipos-de-tecnologia-laser-en-los-transceptores-de-fibra-optica>.
- [91] G. R. Bernal, “Sistema de control de un modulador Mach-Zehnder basado en Arduino,” Universidad Politécnica de Cataluña, 2016.
- [92] International Telecommunication Union (ITU), *Multichannel DWDM applications with single-channel optical interfaces* (Recomendación G.698.1). ITU Telecommunication Standardization Sector, jun. de 2023.
- [93] International Telecommunication Union (ITU), *Optical system design and engineering considerations* (Rec. G.Sup39). ITU Telecommunication Standardization Sector, feb. de 2016.
- [94] J. C. V. Montaña y O. J. C. Pardo, “Estudio Comparativo de Esquemas de Filtrado Óptico para Redes de Acceso Convergentes,” Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016.
- [95] R. Borja González, “Diseño de redes de acceso ópticas para comunicaciones 5G basadas en la generación fotónica de las señales de onda milimétrica,” Universidad Politécnica de Valencia, 2021.
- [96] K. P. Kaur, R. Randhawa y R. Kaler, “Performance analysis of WDM-PON architecture using different receiver filters,” *Optik*, vol. 125, págs. 4742-4744, sep. de 2014. DOI: doi:10.1016/j.ijleo.2014.04.070.
- [97] S. Devra y G. Kaur, “Dispersion Compensation Using Raised Cosine Filter in Optical Fibers,” *International Journal of Information and Electronics Engineering*, vol. 1, jul. de 2011. DOI: 10.7763/IJIEE.2011.V1.17.

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.