

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



GABY ALEJANDRA GONZÁLEZ PARRA
HERNÁN ANDRÉS LÓPEZ MAZORRA

Trabajo de Grado de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Director:
GUSTAVO ADOLFO GÓMEZ AGREDO
MsC. en Electrónica y Telecomunicaciones

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT
Popayán, 2022

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

GABY ALEJANDRA GONZÁLEZ PARRA
HERNÁN ANDRÉS LÓPEZ MAZORRA

Trabajo de Grado presentado a la Facultad de Ingeniería 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, 2022

*Dedico este trabajo a todas las personas que hicieron parte
de este proceso, pero primero que todo a Dios, por darme
la capacidad, la fortaleza y el amor para culminar mi carrera,
A familiares, amigos y maestros, pero en especial
A mi núcleo familiar, quien me ha llevado a ser la persona
que soy hoy en día y a obtener este logro tan importante,
el cual abre un nuevo capítulo en mi vida...*

Gaby Alejandra González Parra

*Dedico este logro a mi familia por haber sido mi apoyo
a lo largo de toda mi carrera universitaria
y a lo largo de mi vida.
A todas las personas especiales que me acompañaron
en esta etapa, aportando a mi formación como
profesional y como ser humano...*

Hernán Andrés López Mazorra

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al MsC. Gustavo Adolfo Gómez Agredo, Director del proyecto, por sus valiosas orientaciones.

Al comité de programa de pregrado en Electrónica y Telecomunicaciones por sus aportes y recomendaciones, al grupo de investigación de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT, por su colaboración y consejos en el desarrollo del presente trabajo y a todos los ingenieros y profesores que hicieron parte de este camino universitario y que serán recordados con alegría.

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

CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABLAS	X
LISTA DE ACRÓNIMOS	XII
INTRODUCCIÓN	XVI
ABSTRACT	XVIII
1. GENERALIDADES SOBRE SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS, VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA MIXTA Y DESEMPEÑO ÓPTICO	1
1.1. SISTEMAS WDM	1
1.1.1. CWDM	3
1.1.2. DWDM	4
1.2. REDES FTTx-PON	5
1.2.1. Red Óptica Pasiva (PON)	6
1.2.2. Tecnología FTTx	11
1.3. VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA ÚNICA (SLR) EN RE- DES WDM-PON	15
1.4. VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA MIXTA (MLR) EN RE- DES WDM-PON	16
1.5. MONITOREO DE DESEMPEÑO ÓPTICO - OPM	20
1.5.1. Fundamentos sobre el Monitoreo de Desempeño Óptico	20
1.5.2. Modelo de Referencia OPM	21
1.5.3. Degradaciones ópticas y parámetros del Monitoreo de Desempeño Óptico	21
1.5.4. Relación y correlación entre degradaciones ópticas y parámetros de monitoreo óptico	23
1.5.5. Técnicas OPM	25
2. MARCO METODOLÓGICO	27
2.1. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN	27
2.1.1. OptiluX	27
2.1.2. OptSim	28
2.1.3. OptiSystem	30
2.1.4. Elección del software de simulación	31

2.2.	METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DEL PROYECTO	32
2.3.	METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN	34
2.4.	MODELO DE SIMULACIÓN	36
2.4.1.	Caracterización del modelo de simulación	36
2.4.2.	Desarrollo del modelo de simulación	42
2.5.	CASOS DE ESTUDIO	52
3.	ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE REDES ÓPTICAS MLR-DWDM IMPLEMENTANDO ARQUITECTURAS FTTx	54
3.1.	RED MLR BASADA EN LOS ESTÁNDARES XG-PON Y XGS-PON	54
3.1.1.	Análisis para última milla basada en FTTB	54
3.1.2.	Análisis para última milla basada en FTTH	78
3.2.	RED MLR BASADA EN LOS ESTÁNDARES XGS-PON Y NG-PON2	84
3.2.1.	Análisis para última milla basada en FTTB	86
3.2.2.	Análisis para última milla basada en FTTH	101
3.3.	RED MLR BASADA EN LOS ESTÁNDARES XG-PON, XGS-PON Y NG-PON2	104
3.3.1.	Análisis para última milla basada en FTTB	104
3.3.2.	Análisis para última milla basada en FTTH	115
4.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTU- ROS	121
4.1.	CONCLUSIONES	121
4.1.1.	Conclusiones sobre los resultados	121
4.1.2.	Conclusiones sobre la investigación	123
4.2.	RECOMENDACIONES	124
4.3.	TRABAJOS FUTUROS	125
	REFERENCIAS	132

LISTA DE FIGURAS

1.1. Ejemplo de técnica WDM. Tomado de [2].	2
1.2. CWDM y DWDM. Tomado de [4].	2
1.3. Ejemplo de CWDM. Tomado de [6].	3
1.4. Ejemplo de DWDM. Tomado de [6].	4
1.5. Esquema general de redes FTTX. Tomado de [14].	5
1.6. Terminal de línea óptico. Tomado de [17]	6
1.7. Unidad de red óptica. Tomado de [17]	7
1.8. Esquema de red PON. Tomado de [17]	8
1.9. Esquema punto a punto. Tomado de [22].	8
1.10. Esquema punto a punto. Tomado de [22].	9
1.11. Topología de Bus. Tomado de [20].	9
1.12. Topología de Estrella. Tomado de [20].	10
1.13. (a) Topología de Anillo. (b) Topología de Doble Anillo. Tomado de [20].	10
1.14. Topología de Árbol. Tomado de [20].	11
1.15. Fibra Hasta el Hogar. Tomado de [27].	12
1.16. Fibra Hasta el Edificio. Tomado de [27].	13
1.17. Fibra Hasta el Gabinete. Tomado de [27].	13
1.18. Fibra Hasta el Nodo. Tomado de [27].	14
1.19. Esquema SLR-WDM. Adaptado de [30]	15
1.20. Evolución de PON. Tomado de [31].	16
1.21. Esquema básico de una red MLR. Tomado de [34].	17
1.22. Disponibilidad de velocidad de transmisión según distancia de enlace (en kilómetros). Adaptado de [34].	19
1.23. Capas del Modelo de Referencia OPM. Tomado de [46].	21
2.1. Herramienta de simulación Optilux. Tomado de [47].	28
2.2. Entorno gráfico del software de simulación OptSim. Tomado de [49]. . .	29
2.3. Entorno gráfico del software de simulación OptiSystem. Tomado de [50].	31
2.4. Grafo de red de actividades.	34
2.5. Diagrama de flujo / Algoritmo de simulación.	36
2.6. Resumen de arquitecturas FTTx. Adaptado de [68].	40
2.7. Escenario de simulación.	43
2.8. Propiedades del láser para un canal.	44
2.9. Transmisor para Canal 1.	45
2.10. Espectro óptico de los 4 Canales.	45
2.11. Recepción para Canal 1.	46
2.12. Propiedades del receptor.	46
2.13. (a) Diagrama del ojo en Back-to-Back. (b) Espectro Back-to-Back. . . .	47
2.14. (a) Diagrama del ojo en Rx1. (b) Espectro en Rx1.	48
2.15. Medición de OSNR real.	49

2.16. Gráficos para distancias de enlace de 60-120 Km.	50
2.17. (a) Diagrama del ojo en Rx2. (b) Espectro en Rx2.	52
2.18. Casos de estudio.	53
3.1. Arquitecturas FTTx. Tomado de [71].	55
3.2. Red MLR inicial.	57
3.3. Bloque de transmisión para canales de 2.5 Gbps.	58
3.4. Bloque de transmisión para canales de 10 Gbps.	58
3.5. Espectro óptico de 8 canales.	59
3.6. Diagramas del ojo Back-to-Back para (a) 10 y (b) 2.5 Gbps.	60
3.7. Diagramas del ojo Back-to-Back para (a) 10 y (b) 2.5 Gbps.	60
3.8. Diagramas del ojo en recepción para (a) 10 y (b) 2.5 Gbps, sistema con solo pérdidas.	62
3.9. DCF en modo de pre-compensación.	63
3.10. Diagramas de ojo de canal de 10 Gbps para compensación de dispersión de 25-100%.	63
3.11. Diagramas del ojo para $P_{tx} = 5$ dBm en canales de 10 Gbps.	64
3.12. Diferencia de potencia en canales de red MLR.	65
3.13. Separación de canales (a) 50 GHz y (b) 25 GHz	67
3.14. Espectro para separación de 25 GHz, (a) canal 2 y (c) canal 3.	67
3.15. Diagramas del ojo de canales de (a) 10 y (b) 2.5 Gbps. Separación de 50 GHz	68
3.16. Diagramas del ojo de canales de (a) 10 y (b) 2.5 Gbps. Separación de 25 GHz	69
3.17. Separación asimétrica de canales.	70
3.18. Ancho de banda útil para ISD.	72
3.19. Espectro WDM, rango de 90-120 Km.	73
3.20. Diagramas del ojo en canal de 10 Gbps, rango de 90-120 Km	74
3.21. Diagramas del ojo en canal de 2.5 Gbps, rango de 90-120 Km.	75
3.22. Diagramas del ojo para última milla (800-500 m).	76
3.23. Diagrama de red para el aumento del número de usuarios.	77
3.24. Ejemplo de arquitectura NG-PON2. Tomado de [82].	85
3.25. Diagrama de bloques de un modulador DPSK. Tomado de [84].	86
3.26. Diagrama de Constelación OOK vs DPSK. Tomado de [85].	87
3.27. Red MLR tipo 2.	88
3.28. Bloque de transmisión para canales de 40 Gbps.	89
3.29. Espectro WDM de red MLR tipo 2.	90
3.30. Diagramas del ojo Back-to-Back (a) 10 y (b) 40 Gbps.	91
3.31. Diagramas del ojo en recepción (a) 10 y (b) 40 Gbps.	91
3.32. Diagramas del ojo de canal de 40 Gbps para 0.96 THz de ancho de banda.	92
3.33. Diagramas del ojo de canal 1 de 40 Gbps para (a) 75 y (b) 100% de compensación	93
3.34. Diagramas del ojo de canal 6 de 40 Gbps para (a) 75 y (b) 100% de compensación	93

3.35. Diagramas del ojo de canal de 10 Gbps para (a) 75 y (b) 100% de compensación	94
3.36. Diagrama del ojo de canal 6 de 40 Gbps para nueva grilla espectral. . .	94
3.37. Espectro en recepción para canales de (a) 10 y (b) 40 Gbps	95
3.38. Separación de canales a 50 GHz.	96
3.39. Separación de canales asimétrica y medida del ancho de banda útil en red MLR tipo 2.	97
3.40. Espectro WDM de red MLR tipo 2, rango de 90-120 Km.	98
3.41. Diagramas del ojo para canales de (a) 10 y (b) 40 Gbps; red MLR tipo 2. Rango de 90-120 Km.	99
3.42. Red MLR tipo 3.	106
3.43. Espectro WDM de red MLR tipo 3.	107
3.44. Diagramas en recepción de canales a 2.5, 10 y 40 Gbps.	109
3.45. Ancho de banda útil de red MLR tipo 3.	110
3.46. Espectro de red MLR tipo 3, rango 90-120 Km.	111
3.47. Diagramas del ojo de canal de 2.5 Gbps, red MLR tipo 3. Rango 90-120 Km	112
3.48. Diagramas del ojo de canal de 10 Gbps, red MLR tipo 3. Rango 90-120 Km	113
3.49. Diagramas del ojo de canal de 40 Gbps, red MLR tipo 3. Rango 90-120 Km	113

LISTA DE TABLAS

1.1.	Distancia entre las Redes FTTx y los usuarios. Adaptado de [28].	14
1.2.	Degradaciones ópticas. Adaptado de [45].	22
1.3.	Degradaciones ópticas y parámetros de monitoreo óptico. Adaptado de [46].	24
1.4.	Correlación entre degradaciones ópticas y parámetros de monitoreo óptico. Adaptado de [46].	25
1.5.	Parámetros OPM Sugeridos. Adaptado de [28].	26
2.1.	Comparación de herramientas de simulación.	31
2.2.	Diagrama de actividades.	34
2.3.	Plan de Frecuencias.	37
2.4.	Formatos de modulación para esquema MLR	41
2.5.	Características del sistema óptico.	44
2.6.	Parámetros OPM en Back-to-Back.	47
2.7.	Parámetros OPM iniciales.	48
2.8.	Parámetros OPM para rango de 60-120 Km.	50
2.9.	Parámetros OPM para rango de 60-120 Km (Canal 2).	51
3.1.	Características iniciales de red MLR tipo 1.	59
3.2.	Parámetros OPM para red MLR inicial.	61
3.3.	Parámetros OPM para compensación de 25-100 %.	62
3.4.	Parámetros OPM para $P_{tx} = 5$ dBm en canales de 10 Gbps.	65
3.5.	Efecto de separación de canales sobre parámetros OPM.	68
3.6.	Parámetros OPM para separación asimétrica entre canales.	70
3.7.	Variables de medición y control, 8 canales híbridos.	72
3.8.	Parámetros OPM en red MLR, rango de 90-120 Km.	74
3.9.	Parámetros OPM para última milla (800-500 m).	76
3.10.	Parámetros OPM para 16, 32 y 64 usuarios.	77
3.11.	Resumen de resultados del análisis para red MLR tipo 1 basada en FTTB.	78
3.12.	Especificaciones para fibra AllWave FLEX 200 μm . Adaptado de [78]. .	80
3.13.	Parámetros OPM para última milla FTTH a 10 y 100 m.	82
3.14.	Parámetros OPM para 16, 32 y 64 usuarios; última milla FTTH de 10 m.	83
3.15.	Parámetros OPM para 16, 32 y 64 usuarios; última milla FTTH de 100 m.	83
3.16.	Resumen de resultados del análisis para red MLR tipo 1 basada en FTTH.	84
3.17.	NG-PON1 vs NG-PON2.	85
3.18.	Características generales de red MLR tipo 2.	90
3.19.	Parámetros OPM para red MLR tipo 2.	95
3.20.	Parámetros OPM de red MLR tipo 2 para separación entre canales de 50 GHz.	96
3.21.	Parámetros OPM de red MLR tipo 2 para separación asimétrica entre canales.	97
3.22.	Variables de medición y control, 6 canales híbridos.	98

3.23. Parámetros OPM en red MLR tipo 2, rango de 90-120 Km.	99
3.24. Parámetros OPM para ultima milla de red MLR tipo 2 (800-500 m). . .	100
3.25. Parámetros OPM de red MLR tipo 2 para 16, 32 y 64 usuarios.	101
3.26. Resumen de resultados del análisis para red MLR tipo 2 basada en FTTB.	101
3.27. Parámetros para última milla FTTH a 10 y 100 m en red MLR tipo 2. . .	102
3.28. Parámetros OPM de red MLR tipo 2 para 16, 32 y 64 usuarios; última milla FTTH de 10 m.	103
3.29. Parámetros OPM de red MLR tipo 2 para 16, 32 y 64 usuarios; última milla FTTH de 100 m.	103
3.30. Resumen de resultados del análisis para red MLR tipo 2 basada en FTTH.	104
3.31. Características generales de red MLR tipo 3.	105
3.32. Parámetros OPM para red MLR tipo 3.	108
3.33. Variables de medición y control, 10 canales híbridos.	110
3.34. Parámetros OPM de red MLR tipo 3, rango 90-120 Km.	112
3.35. Parámetros OPM para última milla de red MLR tipo 3 (800-500 m). . .	114
3.36. Parámetros OPM de red MLR tipo 3 para 16, 32 y 64 usuarios.	115
3.37. Resumen de resultados del análisis para red MLR tipo 3 basada en FTTB.	115
3.38. Parámetros para ultima milla FTTH a 10 y 100 m en red MLR tipo 3. . .	116
3.39. Parámetros OPM de red MLR tipo 3 para 16, 32 y 64 usuarios; ultima milla FTTH de 10 m.	117
3.40. Parámetros OPM de red MLR tipo 3 para 16, 32 y 64 usuarios; ultima milla FTTH de 100 m.	117
3.41. Resumen de resultados del análisis para red MLR tipo 3 basada en FTTH.	118
4.1. Características de modelos de red MLR.	123

LISTA DE ACRÓNIMOS

ADSL	Línea de Suscriptor Digital Asimétrica (<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>)
APON	Red Óptica Pasiva de Modo de Transferencia Asíncrona (<i>Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network</i>)
ASE	Emisión Espontánea Amplificada (<i>Amplified Spontaneous Emission</i>)
ATM	Modo de Transferencia Asíncrona (<i>Asynchronous Transfer Mode</i>)
BER	Tasa de Error de Bit (<i>Bit Error Rate</i>)
BPON	Red Óptica Pasiva de Banda Ancha (<i>Broadband Passive Optical Network</i>)
BW	Ancho de Banda (<i>Bandwidth</i>)
CD	Dispersión Cromática (<i>Chromatic dispersion</i>)
CW	Onda Continua (<i>Continuous Wave</i>)
CWDM	Multiplexación por División Aproximada de Longitud de Onda (<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i>)
DCF	Fibra Compensadora de Dispersión (<i>Dispersion Compensating Fiber</i>)
DGD	Retraso Diferencial de Grupo (<i>Differential Group Delay</i>)
DPSK	Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase (<i>Differential Phase Shift Keying</i>)
DQPSK	Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura Diferencial (<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i>)
DSL	Línea de abonado digital (<i>Digital Subscriber Line</i>)
DSLAM	Multiplexor de Línea de Acceso de Abonado Digital (<i>Digital Subscriber Line Access Multiplexer</i>)
DWDM	Multiplexación Densa por División de Longitud de Onda (<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>)
EDFA	Amplificador de Fibra Dopada con Erblio (<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>)

EPON	Red Óptica Pasiva sobre Ethernet (<i>Ethernet Passive Optical Network</i>)
FSAN	Red de Acceso de Servicio Completo (<i>Full Service Access Network</i>)
FSO	Óptica de Espacio Libre (<i>Free-Space Optical</i>)
FTTB	Fibra hasta el Edificio (<i>Fiber to the Building</i>)
FTTC	Fibra Hasta El Gabinete (<i>Fiber To The Cabinet</i>)
FTTCurb	Fibra Hasta La Acera (<i>Fiber To The Curb</i>)
FTTH	Fibra Hasta El Hogar (<i>Fiber To The Home</i>)
FTTN	Fibra Hasta El Nodo (<i>Fiber To The Node</i>)
FTTx	Fibra Hasta La x, Fibra Hasta El Lugar (<i>Fiber To The x</i>)
FWHM	Anchura a Media Altura (<i>Full Width at Half Maximum</i>)
FWM	Mezcla de Cuatro Ondas (<i>Four Wave Mixing</i>)
GPON	Red Óptica Pasiva con Capacidad de Gigabit (<i>Gigabit-capable Passive Optical Network</i>)
HFC	Híbrido de Fibra-Coaxial (<i>Hybrid Fiber-Coaxial</i>)
ICI	Interferencia Interportadora (<i>Inter-Carrier Interference</i>)
IEEE	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>)
IoT	Internet de las Cosas (<i>Internet of Things</i>)
IPTV	Televisión por Protocolo de Internet (<i>Internet Protocol Television</i>)
ISD	Densidad Espectral de Información (<i>Information Spectral Density</i>)
ISI	Interferencia Intersimbólica (<i>Intersymbolic Interference</i>)
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones (<i>International Telecommunication Union</i>)
LAN	Red de Área Local (<i>Local Area Network</i>)
MAN	Red de Área Metropolitana (<i>Metropolitan Area Network</i>)
MLR	Velocidad de Transmisión de Línea Mixta (<i>Mixed Line Rate</i>)
MMF	Fibra Óptica Multimodo (<i>Multi-Mode Optical Fiber</i>)
MZ	Mach-Zehnder

NG-PON	Redes Ópticas Pasivas de Nueva Generación (<i>New Generation Passive Optical Networks</i>)
NRZ	No Retorno a Cero (<i>Non-Return-to-Zero</i>)
OAN	Red de Acceso Óptico (<i>Optical Access Network</i>)
OCDMA	Acceso Múltiple por División de Código Óptico (<i>Optical Code-Division Multiple Access</i>)
OCM	Monitoreo del Canal Óptico (<i>Optical Channel Monitoring</i>)
ODN	Red de distribución Óptica (<i>Optical Distribution Network</i>)
OFDM	Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>)
OLT	Terminal de Línea Óptica (<i>Optical Line Terminal</i>)
ONT	Terminal de Red Óptica (<i>Optical Network Terminal</i>)
ONU	Unidad de Red Óptica (<i>Optical Network Unit</i>)
OOK	Modulación Digital de Amplitud (<i>On-Off Keying</i>)
OPM	Monitoreo de Desempeño Óptico (<i>Optical Performance Monitoring</i>)
OSNR	Relación Señal a Ruido Óptica (<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i>)
OTDM	Multiplexación Óptica por División de Tiempo (<i>Optical Time-Division Multiplexing</i>)
OTN	Red de Transporte Óptico (<i>Optical Transport Network</i>)
PERT	Técnica de Revisión y Evaluación de Programas (<i>Program Evaluation and Review Technique</i>)
PMD	Dispersión por Modo de Polarización (<i>Polarization Mode Dispersion</i>)
PON	Red Óptica Pasiva (<i>Passive Optical Network</i>)
PtM, P2M	Punto a Multipunto (<i>Point-to-Multipoint</i>)
PtP, P2P	Punto a Punto (<i>Point-to-Point</i>)
QoS	Calidad de Servicio (<i>Quality of Service</i>)
QPSK	Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>)
RZ	Retorno a Cero (<i>Return-to-Zero</i>)

SBS	Difusión/Dispersión Estimulada de Brillouin (<i>Stimulated Brillouin Scattering</i>)
SDH	Jerarquía Digital Síncrona (<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>)
SLR	Velocidad de Transmisión de Línea Única (<i>Single Line Rate</i>)
SMF	Fibra Óptica Monomodo (<i>Single-Mode Optical Fiber</i>)
SNR	Relación Señal a Ruido (<i>Signal-to-Noise Ratio</i>)
SOA	Amplificador Óptico Semiconductor (<i>Semiconductor Optical Amplifier</i>)
SONET	Red Óptica Síncrona (<i>Synchronous Optical Network</i>)
SPM	Modulación de Auto-Fase (<i>Self-Phase Modulation</i>)
SRS	Difusión/Dispersión Estimulada de Raman (<i>Stimulated Raman Scattering</i>)
TDMA	Acceso Múltiple por División de Tiempo (<i>Time Division Multiple Access</i>)
TWDM	Multiplexación por División de Tiempo y Longitud de Onda (<i>Time and Wavelength Division Multiplexing</i>)
UHD	Ultra Alta Definición (<i>Ultra High Definition</i>)
VDSL	Línea de Abonado Digital de Muy alta tasa de transferencia (<i>Very high bit-rate Digital Subscriber Line</i>)
WAN	Red de Área Amplia (<i>Wide Area Network</i>)
WDM	Multiplexación por División de Longitud de Onda (<i>Wavelength Division Multiplexing</i>)
XG-PON	Red Óptica Pasiva a 10 Gbps (<i>10 Gbps Passive Optical Network</i>)
XGS-PON	Red Óptica Pasiva a 10 Gbps Simétricos (<i>10 Gbps Symmetrical Passive Optical Network</i>)
XPM	Modulación de Fase Cruzada (<i>Cross-Phase Modulation</i>)

INTRODUCCIÓN

La evolución de las tecnologías de la información y las comunicaciones en los últimos años ha permitido que cada vez más personas puedan conectarse entre sí y también acceder a una gran cantidad de datos al mismo tiempo. Para finales de 2018 el 51.2 % de las personas en el mundo ya utilizan Internet y según la Agenda Conectar 2030, se tiene como objetivo llegar a un índice de penetración de Internet del 75 % para 2025 por lo que es importante que las redes sean capaces de manejar altas velocidades de transmisión de datos y un gran ancho de banda. Así, las redes basadas en fibra óptica son las más aptas para manejar grandes flujos de información gracias a la constante evolución que presentan con respecto a los medios de transmisión basados en cobre o señales radio; aumentando su capacidad, ancho de banda, seguridad y escalabilidad.

Las Redes Ópticas Pasivas (PON, *Passive Optical Networks*) con arquitecturas de Fibra Hasta La x (FTTx, *Fiber To The x*) se han popularizado como solución de red de acceso ya que reducen costos al utilizar componentes pasivos de baja potencia y soportan el ancho de banda requerido para múltiples servicios gracias a la implementación de técnicas de multiplexación como aquellas basadas en multiplexación por división de longitud de onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*), siendo la multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*) una de las WDM mas utilizadas por su compatibilidad con FTTx y la capacidad de transmitir múltiples longitudes de onda a través de una única fibra óptica.

Además, con el crecimiento del volumen de tráfico y la aparición de varias aplicaciones nuevas, se espera que las redes ópticas basadas en WDM sean cada vez más heterogéneas con respecto a aplicaciones compatibles y tecnologías subyacentes empleadas para poder soportar una amplia variedad de demandas de tráfico. Por ello, se han fomentado estudios más particulares alrededor del concepto de redes DWDM con velocidad de transmisión de línea mixta (MLR, *Mixed Line Rate*) que permiten manejar distintas velocidades de transmisión en un mismo hilo de fibra, lo que su vez supone un mayor compromiso por las limitaciones derivadas en cuanto a diferencias en la complejidad de su implementación y del alcance de transmisión de las señales. Sin embargo, los estudios acerca de redes MLR suelen centrarse en el backbone o troncal de la red sin adentrarse lo suficiente en el último tramo o última milla característica de aplicaciones FTTx, mientras que aquellos estudios de última milla FTTx de redes ópticas que implementan técnicas basadas en WDM son para redes que utilizan una misma velocidad de transmisión o velocidad de línea única (SLR, *Single Line Rate*) por canal.

Teniendo en cuenta lo mencionado previamente, en el presente trabajo de investigación se realizará un análisis de desempeño sobre la migración de una red óptica de

velocidad de transmisión de línea única basada en DWDM (SLR-DWDM) a una red óptica de velocidad de transmisión de línea mixta basada en DWDM (MLR-DWDM) implementando diferentes arquitecturas de red de banda ancha FTTx. A continuación, se describe el contenido de este trabajo de grado, el cual se distribuye en cuatro capítulos de acuerdo con la información obtenida en el desarrollo de la investigación.

Capítulo 1: Generalidades sobre Sistemas de Comunicaciones Ópticas, Velocidad de Transmisión de Línea Mixta Y Desempeño Óptico.

En este capítulo se detallan algunos aspectos generales sobre los sistemas de telecomunicaciones basados en fibra óptica. Se describen sistemas WDM haciendo énfasis en DWDM, se hace una caracterización de PON con enfoque en arquitecturas FTTx y luego se plantea la idea de red SLR, se define el concepto de red MLR y algunos de sus rasgos relevantes para el presente trabajo, y finalmente se abarca el tema de Monitoreo de Desempeño Óptico (OPM, *Optical Performance Monitoring*) en cuanto a parámetros y técnicas que utiliza.

Capítulo 2: Marco Metodológico.

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

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

En este capítulo se realiza el análisis del desempeño de los modelos de red MLR que implementan arquitecturas FTTx obtenidos a partir del modelo inicial de red SLR y los casos de estudio y escenarios propuestos previamente, esto con el fin de identificar aquellas características y parámetros que intervienen para lograr que dichos modelos MLR trabajen en óptimas condiciones.

Capítulo 4: Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros.

En este capítulo se presentan conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros relacionados con los aspectos más importantes de la presente investigación que permitieron diseñar, configurar e implementar arquitecturas de red MLR eficientes y que a su vez aportaron en la realización de los objetivos propuestos.

Palabras clave:

Velocidad de transmisión de Línea Mixta (MLR), Fibra Hasta el Lugar (FTTx), Red Óptica Pasiva (PON), Multiplexación por División de Longitud de onda (WDM), Monitoreo de Desempeño Óptico (OPM).

ABSTRACT

The evolution of information and communication technologies in recent years has allowed more and more people to connect with each other and also access a large amount of data at the same time. By the end of 2018, 51.2% of the people in the world already use the Internet, and according to the Connect 2030 Agenda, the goal is to reach an Internet penetration rate of 75% by 2025, so it is important that networks are capable of handling high data transmission speeds and high bandwidth. Thus, fiber optic-based networks are the most suitable for handling large flows of information thanks to the constant evolution they present with respect to transmission media based on copper or radio signals; increasing their capacity, bandwidth, security and scalability.

Passive Optical Networks (PON) with Fiber To The x (FTTx) architectures have become popular as an access network solution since they reduce costs by using low-power passive components and support the bandwidth required for multiple services thanks to the implementation of multiplexing techniques such as those based on Wavelength Division Multiplexing (WDM), with Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) being one of the most widely used WDMs due to its compatibility with FTTx and the ability to transmit multiple wavelengths through a single optical fiber.

Furthermore, with the growth in traffic volume and the emergence of several new applications, WDM-based optical networks are expected to become increasingly heterogeneous with respect to supported applications and underlying technologies employed in order to support a wide variety of traffic demands. For this reason, more particular studies have been promoted around the concept of DWDM networks with Mixed Line Rates (MLR) that allow managing different transmission speeds in the same fiber strand, which in turn implies a greater commitment due to the limitations derived in terms of differences in the complexity of its implementation and the transmission range of signals. However, studies on MLR networks tend to focus on the backbone of the network without delving enough into the last stretch or last mile of FTTx applications, while those FTTx last mile studies of optical networks that implement WDM-based techniques are for networks that use a Single Line Rate (SLR) on each channel.

Taking into account the aforementioned, in the present research work a performance analysis will be carried out on the migration of a single line rate optical network based on DWDM (SLR-DWDM) to a mixed line rate optical network based on DWDM (MLR-DWDM) implementing different FTTx broadband network architectures. Next, the content of this degree work is described, which is distributed in four chapters according to the information obtained in the development of the investigation.

Chapter 1: Overview of Optical Communications Systems, Mixed Line Rate and Optical Performance.

This chapter details some general aspects of fiber optic-based telecommunications systems. WDM systems are described emphasizing DWDM, a characterization of PON is made with a focus on FTTx architectures and then the idea of SLR network is proposed, the concept of MLR network and some of its relevant features for the present work are defined, and finally the subject of Optical Performance Monitoring (OPM) is covered in terms of parameters and techniques used.

Chapter 2: Methodological Framework.

This chapter defines the methodology and simulation tools, by means of which the design and development of an initial network model will be carried out and which will later allow the approach of the case studies and simulation scenarios for the present work.

Chapter 3: Performance Analysis of MLR-DWDM Optical Networks implementing FTTx architectures.

In this chapter, the performance analysis of the MLR network models that implement FTTx architectures obtained from the initial SLR network model and the previously proposed study cases and scenarios is carried out, this in order to identify those characteristics and parameters that intervene to ensure that these MLR models work in optimal conditions.

Chapter 4: Conclusions, Recommendations and Future Work.

This chapter presents conclusions, recommendations and future work related to the most important aspects of this research that allowed the design, configuration and implementation of efficient MLR network architectures and which in turn contributed to the achievement of the proposed objectives.

Keywords:

Mixed Line Rate (MLR), Fiber To The x (FTTx), Passive Optical Network (PON), Wavelength Division Multiplexing (WDM), Optical Performance Monitoring (OPM).

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES SOBRE SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS, VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA MIXTA Y DESEMPEÑO ÓPTICO

Gracias a los avances de las diferentes tecnologías que componen las redes ópticas, estas han llegado a convertirse en el principal soporte de las redes de telecomunicaciones actuales permitiendo soportar las grandes cantidades de información dadas por la masificación de internet, el incremento de terminales inteligentes y el aumento masivo en la demanda de nuevos servicios de mejor calidad, disponibilidad, ancho de banda y velocidad de acuerdo a los intereses de los usuarios.

En este capítulo se detallarán aspectos básicos de la teoría sobre sistemas de telecomunicaciones basados en fibra óptica, la cual enmarca lo relacionado con sistemas basados en WDM, las redes PON con arquitecturas de última milla FTTx, la velocidad de transmisión de línea mixta en redes ópticas y el desempeño óptico, buscando ofrecer al lector un soporte para entender los conceptos que se tratarán durante el desarrollo del trabajo de investigación.

1.1. SISTEMAS WDM

Las redes basadas en tecnologías ópticas, también denominadas Redes de Transporte Óptico (OTN, *Optical Transport Network*), son muy utilizadas hoy en día debido a las posibilidades que brindan para el manejo de grandes cantidades de tráfico. Siendo así, la utilización de técnicas de multiplexación permite explotar las características de la fibra óptica dando como resultado el envío de una considerable cantidad de información a través de un solo hilo de la fibra, lo cual a su vez permite ampliar la capacidad de la OTN. Entre las técnicas de multiplexación disponibles en las redes ópticas, una de las más utilizadas es la WDM, la cual consiste en la multiplexación de una serie de señales ópticas de distinta longitud de onda a través de un solo hilo de fibra (ver figura 1.1) permitiendo suministrar gran ancho de banda y así alcanzar velocidades del orden de 10 Gbps o en algunos casos de hasta 40 Gbps [1].

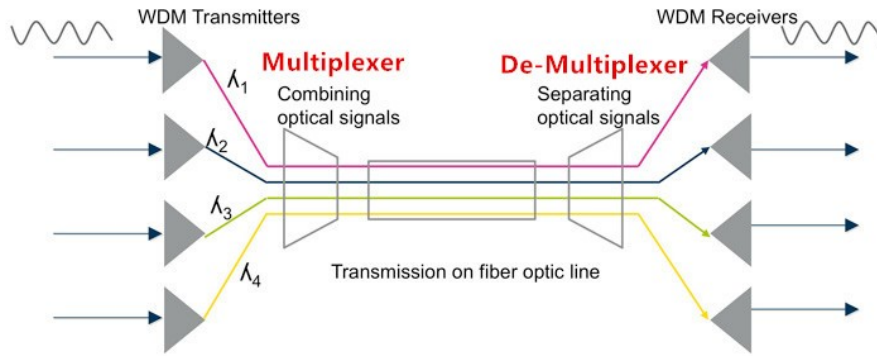


Figura 1.1: Ejemplo de técnica WDM. Tomado de [2].

Las redes WDM además de poseer un nivel de transporte totalmente óptico, también se caracterizan por [3]:

- Mantener independientes las longitudes de onda que se transportan sobre un mismo hilo de fibra óptica con tal de evitar posibles interferencias.
- Reutilizar las longitudes de onda en la misma red para así lograr un mayor aprovechamiento de los recursos de esta.
- Transparencia, es decir, la capa de transporte no depende del formato de modulación empleado a nivel físico de red.

Con los avances dados en las técnicas de multiplexación para las redes ópticas, fue posible transmitir una mayor cantidad de datos a través de más canales en un solo hilo de fibra, con lo que también surgen 2 variantes de WDM: Multiplexación por División de Longitud de onda Aproximada (CWDM, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*) y Multiplexación por División de Longitud de onda Densa (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*). A continuación, en la figura 1.2, se muestra una comparación a nivel general entre CWDM y DWDM.

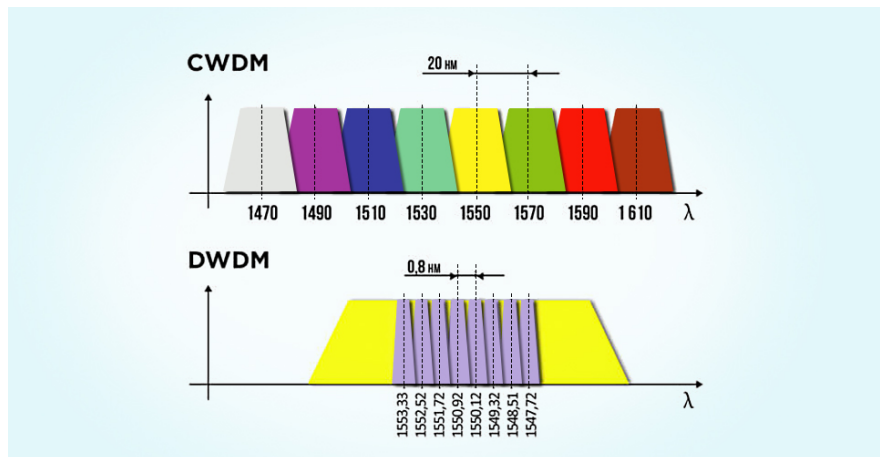


Figura 1.2: CWDM y DWDM. Tomado de [4].

1.1.1. CWDM

CWDM se empezó a utilizar por primera vez en los años 80 con el fin de transportar señales de video a través fibras multimodo. Como se aprecia en la figura 1.3, CWDM es una técnica de transmisión de señales a través de fibra óptica, con un espaciado de canales de 2500 GHz (alrededor de 20 nm) y es usada para longitudes de onda entre 1270 y 1610 nm. Se caracteriza por tener un espacio más ancho entre canales, poseer un menor consumo de energía, así como de un tener menor coste en comparación con otras técnicas como DWDM. Sin embargo, esta técnica no puede ser utilizada en distancias muy largas y solo permite usar hasta 18 canales dentro de la banda disponible [5].

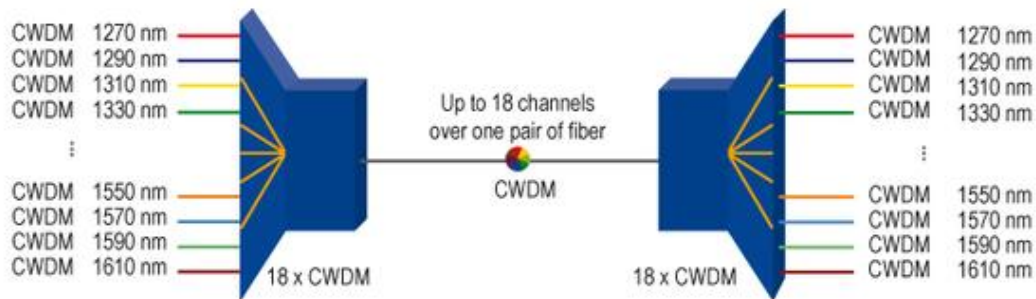


Figura 1.3: Ejemplo de CWDM. Tomado de [6].

La rentabilidad que surge de usar CWDM se da gracias a que los dispositivos a utilizar en un sistema son poco robustos, por lo que no es necesario recurrir a circuitos de refrigeración¹, y se fomenta el uso de láseres simples y filtros pasa-banda amplios. Además, presentan anchos de banda lo suficientemente altos para adaptarse a las necesidades de redes metropolitanas (MAN, *Metropolitan Area Network*) y como soporte para plataformas integradas de clientes, servicios y protocolos [7]. CWDM es definido por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunication Union*) en la recomendación ITU-T G.694.2, donde se presenta el plan de longitudes de onda o grilla espectral para sistemas basados en esta tecnología. Según la recomendación, las características técnicas que representa un sistema CWDM son las siguientes [8]:

- Espaciado de frecuencias de 2.500 GHz (20nm).
- 18 longitudes de onda, especificadas en el intervalo de 1270 a 1610 nm.
- Velocidad actual limitada a 10 Gbps.
- Cobertura alrededor de los 120 Km.
- Gran espectro óptico.

¹Los circuitos de refrigeración se usan para corregir posibles desviaciones de la longitud de onda debido a cambios en la temperatura a la que está sometido el chip.

1.1.2. DWDM

DWDM es una tecnología definida en la recomendación ITU-T G.694.1 [9], donde diferentes portadoras ópticas generadas por diferentes transmisores láser se multiplexan y transmiten mediante una única fibra, utilizando distintas longitudes de onda para cada una de las portadoras. Cada portadora óptica puede ser considerada como un canal que a su vez puede ser tratado de forma independiente del resto de canales que se encuentran dentro del hilo de la fibra, lo que permite aprovechar de forma más eficiente del ancho de banda para la transmisión de información. Además, DWDM trabaja aproximadamente en longitudes de onda de 1525 a 1565 nm en banda C o de 1570 a 1610 nm en banda L y normalmente soporta desde 40 hasta 80 canales de transmisión (ver figura 1.4). También, aunque DWDM suele ser más costoso que CWDM, este primero brinda un mayor alcance de transmisión en las redes que lo implementan por lo que es una buena opción si se requiere implementar Redes de Área Amplia (WAN, *Wide Area Networks*) o de ultra largo alcance, es decir, cuando se necesitan tratar largas distancias [5].

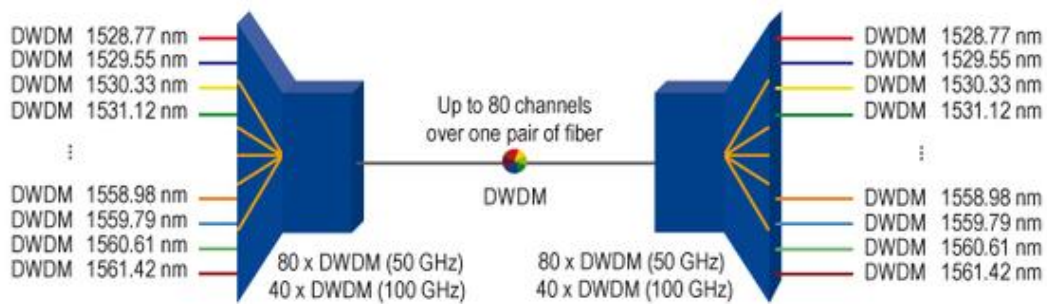


Figura 1.4: Ejemplo de DWDM. Tomado de [6].

La tecnología DWDM ha sido bastante utilizada para el desarrollo de grandes redes que requieren tratar con una gran cantidad de información dando un gran soporte a las telecomunicaciones. Además, DWDM permite la prestación de distintos tipos de servicios dada la variedad de protocolos con los que es capaz de trabajar, y a su vez también ofrece buena cobertura permitiendo que las redes basadas en esta técnica sean altamente utilizadas en los sistemas actuales. El hecho de que DWDM pueda funcionar a grandes distancias hace que sea utilizado para los sistemas punto a punto que abarcan miles de kilómetros y donde suele haber un gran flujo de datos, los cuales conforman lo que se conoce como las redes WAN o redes de distribución [10]. Igualmente, DWDM suele ser utilizado en redes de un tamaño más reducido como redes MAN que operan sobre un área geográfica relativamente extensa [11], o Redes de Área Local (LAN, *Local Area Networks*) que son más utilizadas en entornos tipo campus universitario o dentro de empresas [1]; esto mediante topologías tipo anillo o bus.

Según la recomendación ITU-T G.694.1, se pueden definir ciertas características para DWDM tales como [9]:

- Espacio entre canales de 100 GHz, 50 GHz y 25 GHz.
- Intervalo de Banda C (alrededor de 1530 nm) a Banda L (hasta 1610 nm).
- Velocidades de 10 Gbps para cada canal en banda C con espaciamiento de 100 Ghz.
- Componentes ópticos y optoelectrónicos sofisticados y de alto costo.
- Alcance hasta alrededor de 4500 km (con amplificación).

1.2. REDES FTTx-PON

Debido a la creciente demanda de servicios (voz, video, datos, etc) por parte de los muchos usuarios existentes y teniendo en cuenta que la fibra óptica se considera como el medio de transmisión de información por excelencia, se ha venido buscando la implementación de sistemas basados en fibra óptica que permitan satisfacer dicha demanda a costos razonables. Así, Las Redes Ópticas Pasivas (PON, *Passive Optical Networks*) surge como una alternativa para redes ópticas gracias a la infraestructura de cableado reducida y los atributos de transmisión de medios flexible que ofrece. Las PON pueden referirse también al último tramo entre el proveedor y el usuario, por lo que están bastante relacionadas a lo que se conoce como Fibra Hasta La x (FTTx, *Fiber To The x*) [12,13].

FTTx es un término utilizado para definir una serie de opciones de arquitectura basadas en fibra óptica relacionadas con el último tramo de conectividad (la “x” representa el punto de terminación de la fibra). En la Figura 1.5 se muestra un esquema general de las principales aplicaciones de FTTx según el punto de terminación de la fibra, las cuales son: Fibra Hasta El Hogar (FTTH, *Fiber To The Home*), Fibra Hasta El Edificio (FTTB, *Fiber To The Building*), Fibra Hasta El Gabinete (FTTC, *Fiber To The Cabinet*) y Fibra Hasta El Nodo (FTTN, *Fiber To The Node*) [13].

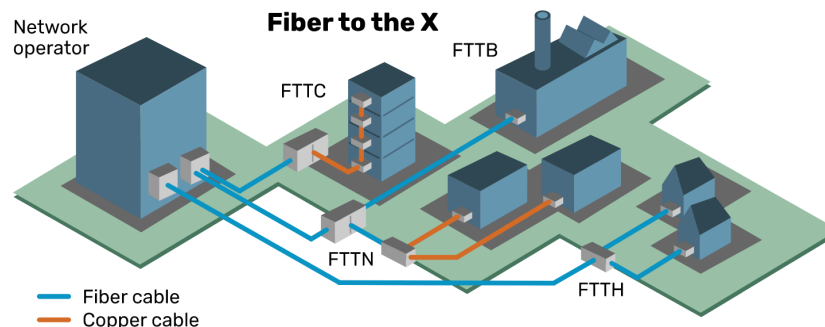


Figura 1.5: Esquema general de redes FTTX. Tomado de [14].

Las PON basadas en arquitecturas FTTx se conocen comúnmente como redes FTTx-PON y son capaces de alcanzar velocidades de transmisión más altas con un

consumo de energía menor [12, 13]. Para estas redes, el enlace de fibra óptica se establece desde una oficina central hasta un punto de distribución intermedio desde el cual se accede a los abonados finales del edificio o de la casa; y si es el caso, se recurre al uso de tecnologías basadas en Línea de Abonado Digital (DSL, *Digital Subscriber Line*) tales como Línea de Abonado Digital Asimétrica (ADSL, *Asymmetric Digital Subscriber Line*) o Línea de Abonado Digital de Muy alta tasa de transferencia (VDSL, *Very high bit-rate Digital Subscriber Line*), a través de medios de cobre como el cable coaxial o el par trenzado, o también de forma inalámbrica. De este modo, el tendido de fibra puede hacerse de forma progresiva, en menos tiempo y con menor costo, reutilizando la infraestructura disponible [15].

1.2.1. Red Óptica Pasiva (PON)

Una Red Óptica Pasiva es un tipo de red de acceso de fibra óptica (OAN, *Optical Access Network*) que no utiliza elementos activos a través de su trayecto desde una fuente hasta un destino. Entre sus principales componentes se encuentran [16, 17]:

- **Terminal de Línea Óptica (OLT, *Optical Line Terminal*):** El terminal de línea óptica es un elemento situado en el nodo de distribución que sirve como el punto final del proveedor de servicios, del cual parte el cable principal de fibra hacia los usuarios y es quien se encarga de gestionar el tráfico hacia los usuarios o proveniente de ellos. Brevemente se describe al OLT, como el equipo donde parte la fibra óptica. Cada terminal de línea óptico tiene capacidad de dar servicio a miles de usuarios. Sus funciones son:
 - Funciona como router para ofrecer servicios.
 - Agregar tráfico y encaminarlo hacia los clientes.
 - Se conecta varios terminales de red óptica (ONT, *Optical Network Terminal*) usando divisores ópticos.
 - Distancia máxima de conexión entre OLT y una ONT es de 20 Km

A continuación, en la figura 1.6, se muestra un ejemplo de un elemento OLT para una red PON:



Figura 1.6: Terminal de línea óptico. Tomado de [17]

- **Unidad de Red Óptica (ONU, *Optical Network Unit*):** La unidad de red óptica realiza una conversión de señales ópticas provenientes de la red a señales eléctricas las cuales se envían luego a suscriptores individuales. En general, existe una distancia u otra red de acceso entre la ONU y las instalaciones del usuario final. La ONU puede enviar, agregar y preparar diferentes tipos de datos provenientes del cliente y enviarlos en sentido ascendente a la OLT. Además, la ONU también puede brindar funciones como multiplexor y demultiplexor según sea necesario. A continuación, en la figura 1.7, se muestra un ejemplo de un elemento ONU para una red de tipo PON:



Figura 1.7: Unidad de red óptica. Tomado de [17]

Los dispositivos de usuario final también pueden denominarse Terminal de Red Óptica (ONT, *Optical Network Terminal*), aunque ONT es de hecho lo mismo que ONU en esencia. ONT es un término de ITU-T, mientras que ONU es un término de IEEE. Entonces, pertenecen a diferentes organismos estándar y ambos se refieren al equipo del lado del usuario en el sistema PON, pero en la práctica existe una pequeña diferencia entre ONT y ONU según su ubicación ya que la primera suele situarse en las instalaciones del cliente mientras que la segunda es más común encontrarla al aire libre o en pasillos cerca del usuario.

- **Red de Distribución Óptica (ODN, *Optical Distribution Network*):** Las ODN son las encargadas de brindar comunicación entre la OLT y el usuario (ONU), con un alcance de 20 Km o más. La red de distribución óptica cuenta con cinco segmentos:
 - La fibra de alimentación
 - El punto de distribución óptica
 - La fibra de distribución
 - El punto de acceso óptico
 - El divisor de fibra

A continuación, en la Figura 1.8, se puede apreciar un esquema general de una red PON y sus elementos:

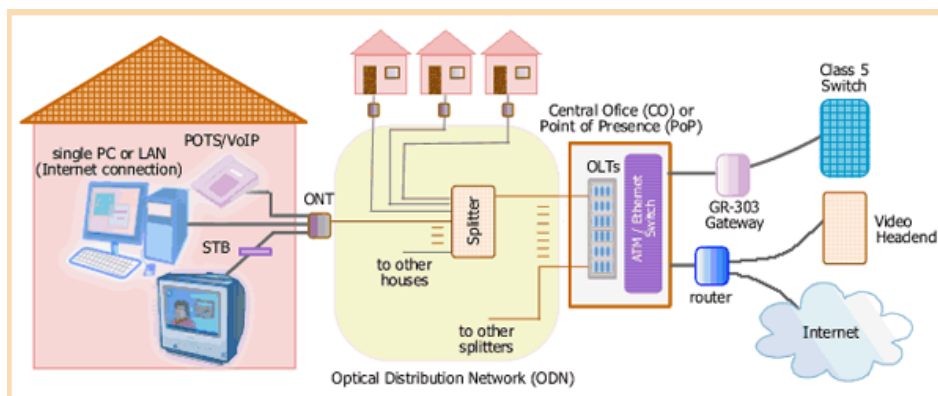


Figura 1.8: Esquema de red PON. Tomado de [17]

Es cierto que PON se empezó a implementar desde hace ya algunas décadas, pero los avances de sistemas basados en fibra óptica le han permitido a este tipo de redes penetrar en el mercado más fácilmente en los últimos años. De ello surge una de las características principales de PON denominada capacidad de sobre-suscripción que permite a los operadores ofrecer a los abonados más tráfico cuando lo necesiten siempre que la red no se encuentre congestionada, es decir, cuando no haya otros abonados en la misma red que estén empleando todo el ancho de banda disponible. Así, PON es una tecnología de acceso efectivo que puede impulsar el rendimiento del enlace descendente con una capacidad de 2,5 Gbps llegando hasta 100 Mbps por abonado aproximadamente [15].

Las redes ópticas PON suelen estar dispuestas de diferentes formas, es decir, poseen diferentes tipos de topologías las cuales se implementan según los requerimientos que se tienen para la red. Entre las topologías más conocidas se tiene [18–21]:

- Punto a Punto (P2P):** En esta topología la fibra óptica se encuentra dispuesta desde la central hasta el usuario final sin emplear divisiones ópticas y determina que para N número usuarios se requiere instalar M número de fibras en el canal de comunicación dependiendo de la distancia a cubrir. Normalmente, en esta topología se suministra un enlace de ancho de banda dedicado a un solo abonado en lugar de ser parte de una red PON compartida, lo cual la hace diferir de redes basadas en FTTH. Además, se tiene facilidad para solución de problemas e implementación de pruebas, pero a su vez suele tener ciertos costos adicionales en cuanto a infraestructura y hardware relacionado.



Figura 1.9: Esquema punto a punto. Tomado de [22].

- **Punto a Multipunto (P2M):** para N número de usuarios, se necesita la instalación de una fibra de acuerdo con el recorrido a cubrir. Esta topología puede ser activa (P2MA) o pasiva (P2MP), donde se necesitan $2 * M + 2$ y $M + 1$ conectores respectivamente. Las ventajas de la P2M pasiva con respecto a la activa son que se reduce el costo de componentes ópticos ya que no requieren de una fuente eléctrica de alimentación, además de que esta incorpora en sus estándares redes ópticas del tipo PON tales como GPON y EPON.

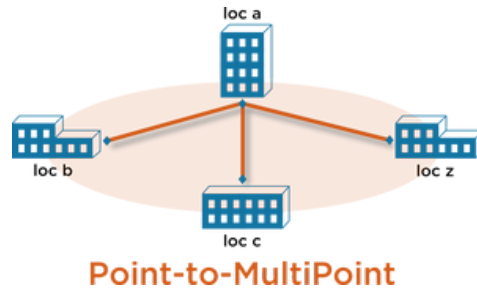


Figura 1.10: Esquema punto a punto. Tomado de [22].

- **Topología de Bus:** en esta existe un único canal o bus por el cual se comparte la información entre los diferentes terminales de la red. Su diseño le da simplicidad y facilidad de implementación, pero posee ciertas implicaciones como un límite en el número máximo de usuarios/equipos, degradación considerable de la señal, difícil reconfiguración, longitud de cable limitada, alta colisión de paquetes, alta tasa de pérdida en la transmisión, entre otras.

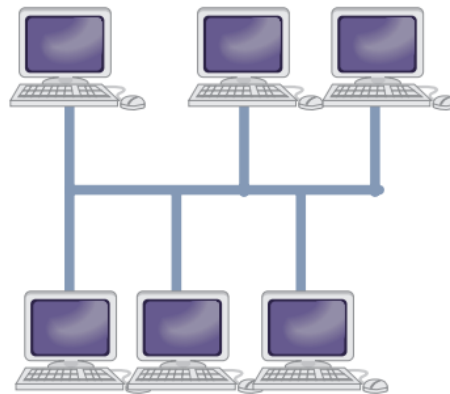


Figura 1.11: Topología de Bus. Tomado de [20].

- **Topología de Estrella:** esta se caracteriza por tener una estación central o host a la cual se encuentran conectados todos demás terminales de red o nodos; por lo que dicha estación central debe realizar funciones de distribución, conmutación y control para que la red funcione adecuadamente. Esto facilita la resolución de problemas sobre los distintos nodos ya que el hecho de que uno de ellos falle no

implica problemas sobre otros, pero también se tiene el inconveniente de que la red depende del host por lo que el fallo de este implica una caída total de la red. Además, una gran cantidad de tráfico puede estropear el funcionamiento de los nodos debido a variaciones significativas de la tensión que los alimenta.

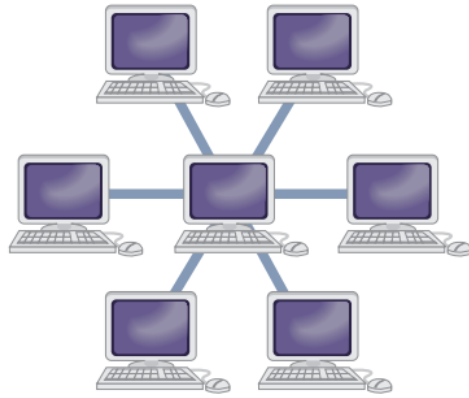


Figura 1.12: Topología de Estrella. Tomado de [20].

- **Topología de Anillo:** esta se caracteriza porque cada terminal o nodo se encuentra conectado sucesivamente a otro formando una especie de anillo cerrado, razón por la cual obtiene su nombre. Aquí, cada nodo tiene un receptor y un transmisor que hacen la función de repetidor hacia el siguiente equipo y presenta menos colisiones por los algoritmos de paso de testigo. Posee las ventajas y desventajas de la topología de bus, agregando el hecho de que un fallo de cualquier nodo representa un caso más grave en comparación. En las redes se suele utilizar algo que se conoce como doble anillo para que la transmisión sea bidireccional o para agregar redundancia y poder contrarrestar fallos.

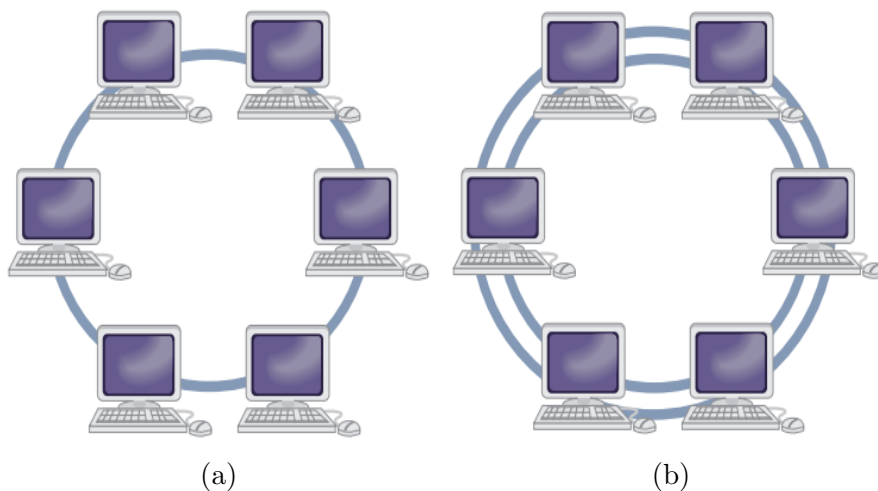


Figura 1.13: (a) Topología de Anillo. (b) Topología de Doble Anillo. Tomado de [20].

- **Topología de Árbol:** integra características de las topologías de bus y de estrella en una estructura jerárquica, de la cual obtiene su nombre. Por lo tanto, si uno de sus nodos falla entonces cualquier terminal o grupo de terminales inferior se desconectará de la red. Esta topología otorga facilidad en la gestión, mantenimiento, detección y corrección de errores; pero debido a su estructura básica, depende en gran medida del cable de bus principal, ya que si se rompe toda la red queda impedida. Esta topología también otorga flexibilidad para expandir la red, pero a medida que se agregan más nodos y segmentos, el mantenimiento se vuelve más difícil.

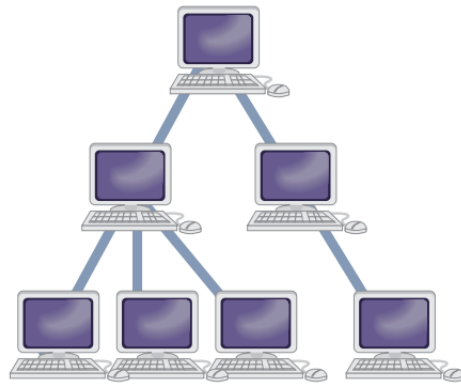


Figura 1.14: Topología de Árbol. Tomado de [20].

1.2.2. Tecnología FTTx

La fibra hasta “x” es un componente básico del acceso de próxima generación, que describe la evolución de la infraestructura de la banda ancha hacia mejores niveles de velocidad y calidad del servicio (QoS). Para el diseño de arquitecturas FTTx se tienen en cuenta consideraciones respecto al entorno de la red que tienen que ver con la cantidad y la ubicación de los usuarios, la distribución de la fibra óptica y los puntos de acceso, así como los elementos que se incorporarán en el diseño. Además, desde un punto de vista más detallado, también debe tenerse en cuenta las ubicaciones de los empalmes, los patrones precisos de distribución de la fibra y los cálculos de la pérdida general. Algunas otras consideraciones para un diseño completo de una red FTTx pueden ser el evitar los servicios existentes y establecer ubicaciones de equipos [13].

Desde una perspectiva física, pueden definirse varios tipos de entorno para FTTx como: ciudades, conjuntos residenciales abiertos, campus o parques industriales en zonas rurales, edificios de apartamentos u oficinas, casas unifamiliares o conjuntos multifamiliares, entre otros. Además, una red FTTx tiene ciertos requisitos para garantizar su funcionalidad los cuales son [23, 24]:

- Debe ser capaz de suministrar servicios de gran ancho de banda a cada usuario.

- El diseño de arquitectura de red debe ser flexible, y debe soportar actualizaciones y una expansión de la misma para satisfacer las necesidades de los usuarios a futuro.
- Es necesario minimizar la interrupción de la red durante la implementación de esta para evitar inconvenientes con terceros.

Finalmente, es necesario contar con soluciones que faciliten la monitorización y el mantenimiento de la red constantemente con tal de poder detectar y localizar de forma remota posibles signos de deterioro o fallos de algún tipo en la fibra óptica, además de mejorar la seguridad ante posibles accesos no autorizados que puedan poner en riesgo la información dentro de la red [13].

Tipos de arquitectura FTTx

Es posible distinguir entre los distintos tipos de arquitecturas/topologías pertenecientes a FTTx según la distancia que hay entre el tramo final de fibra óptica y el usuario. Siendo así, puede verse en la figura 1.6 algunas de las topologías de FTTx más utilizadas, las cuales se mencionan a continuación:

- **Fibra Hasta el Hogar (FTTH):** Como su nombre lo indica, esta topología propone la utilización de fibra óptica hasta el domicilio del usuario. Normalmente, en esta se suelen ofrecer servicios avanzados como los del tipo triple play (voz, video y datos) de altas velocidades a viviendas de los usuarios o a empresas. Gracias a la gran capacidad de la fibra óptica, FTTH puede soportar una mayor cantidad de tráfico en comparación con otras tecnologías basadas en cobre o que sean inalámbricas. La utilización de FTTH también trae otras ventajas tales como la mejora de la eficiencia en la entrega de servicios, mayor rentabilidad para usuarios en zonas rurales, reduce el escape de la señal, además de que reduce el consumo de energía. FTTH también fomenta el uso de otras tecnologías o servicios que requieren de grandes capacidades en la red tales como el Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*), video UHD (*Ultra High Definition*), IPTV (*Internet Protocol Television*), entre otros [25, 26].



Figura 1.15: Fibra Hasta el Hogar. Tomado de [27].

- **Fibra Hasta el Edificio (FTTB):** Es utilizada en edificaciones en las que existan múltiples usuarios u oficinas que requieran de algún servicio tales como

grandes urbanizaciones residenciales privadas, edificios empresariales, hospitales, complejos hoteleros, centros deportivos, etc. La caja de terminación óptica suele encontrarse en el sótano de algún edificio del área en donde se van a proveer los servicios. Siguiendo esta idea, la fibra óptica no llega directamente a los usuarios por lo que se suele distribuir mediante otros medios como los basados en cobre (par trenzado o cable coaxial), los medios inalámbricos (Wi-Fi), o incluso mediante la propia red eléctrica en algunos casos [23, 26].



Figura 1.16: Fibra Hasta el Edificio. Tomado de [27].

- Fibra Hasta el Gabinete (FTTC):** También denominada Fibra Hasta la Acera (FTTCurb, *Fiber To The Curb*). Permite ofrecer servicios de banda ancha a viviendas o negocios que se encuentren en una misma área, la cual suele corresponder a un bloque que se encuentra en la misma calle. Para ello es necesario la utilización de un Multiplexor de Acceso de Línea de Abonado Digital (DSLAM, *Digital Subscriber Line Access Multiplexer*) que permite la multiplexación de los servicios para ser entregados a los distintos usuarios o suscriptores y el cual se encuentra dentro de un gabinete en las cercanías. Como su nombre sugiere, la conexión de fibra solo se realiza hasta el gabinete por lo que los servicios deben ser entregados a cada abonado mediante otros medios, donde se suele utilizar los basados en cobre como el cable coaxial. Las distancias relativamente cortas entre el gabinete y los abonados permiten utilizar tecnologías como VDSL para alcanzar velocidades de hasta 10 Mbps de subida y 40 Mbps de bajada [23, 26].

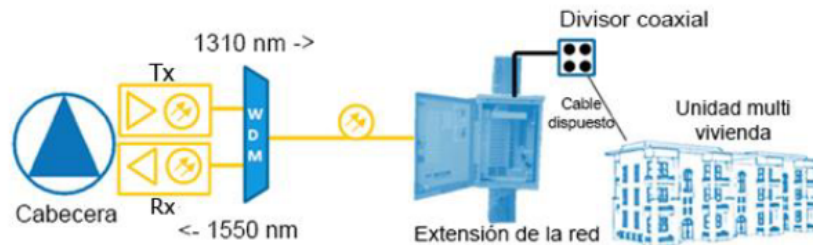


Figura 1.17: Fibra Hasta el Gabinete. Tomado de [27].

- Fibra Hasta el Nodo (FTTN):** También denominada Fibra hasta el Barrio o Fibra hasta el Armario dado que el punto al que llega la conexión de la fibra óptica suele ser un armario que suministra los servicios a un barrio o sector

en particular. Trabaja de forma similar a FTTC, pero suele cubrir una mayor área (normalmente entre 1,5 y 1,6 Km de radio) para poder proveer a muchos más usuarios los servicios a los cuales se encuentren suscritos. Así, FTTN puede suministrar servicios de banda ancha mediante tecnologías del tipo DSL a los usuarios finales a través de medios de cobre que puedan soportarlos siempre que los abonados se encuentren dentro del área estipulada para ello [23, 26].

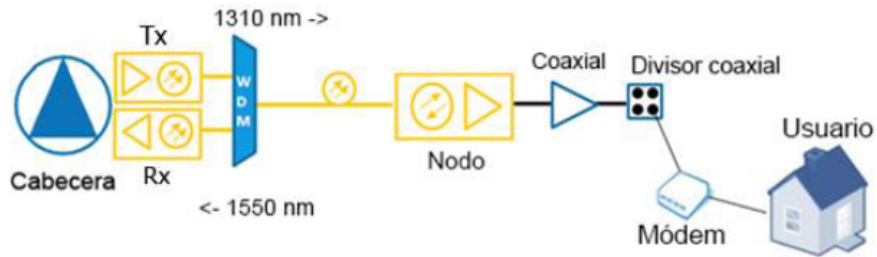


Figura 1.18: Fibra Hasta el Nodo. Tomado de [27].

En la Tabla 1.1, presentada a continuación, se muestran las distancias que hay entre las diferentes redes FTTx y los usuarios.

Tipo de red FTTx	Distancia al usuario
FTTN	El tramo de fibra termina en una cabina situada en la calle entre alrededor de 1 y 2 millas (1.5 a 3 Km) del usuario.
FTTC	La fibra llega hasta la acera. En este caso la cabina se encuentra más próxima al usuario, a una distancia alrededor de 300 m y en ocasiones hasta 600 m.
FTTB	El proveedor de servicio llega hasta el cuarto de distribución del edificio. A partir de este punto se llega al usuario normalmente utilizando par de cobre.
FTTH	La fibra llega al interior o a la fachada de la vivienda.

Tabla 1.1: Distancia entre las Redes FTTx y los usuarios. Adaptado de [28].

1.3. VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA ÚNICA (SLR) EN REDES WDM-PON

Esencialmente, una red de Velocidad de transmisión de Línea Única (SLR, *Single Line Rate*) es aquella cuyo medio de transmisión trabaja con una sola tasa de bits a la vez que permita satisfacer la demanda de tráfico del entorno en que se encuentre implementada dicha red. En el caso de redes ópticas, cuando se implementan técnicas basadas en WDM se puede trabajar con múltiples longitudes de onda en un mismo hilo de fibra óptica, donde cada una de esas longitudes de onda hace referencia a un “nuevo” canal que puede ser utilizado para poder enviar más información. Así, una red óptica tipo SLR-WDM es aquella que trabaja con una misma tasa de bits en todos sus canales o longitudes de onda disponibles (ver figura 1.19) para aprovechar mejor el ancho de banda que posee el medio e incrementar la capacidad total de la misma [29].

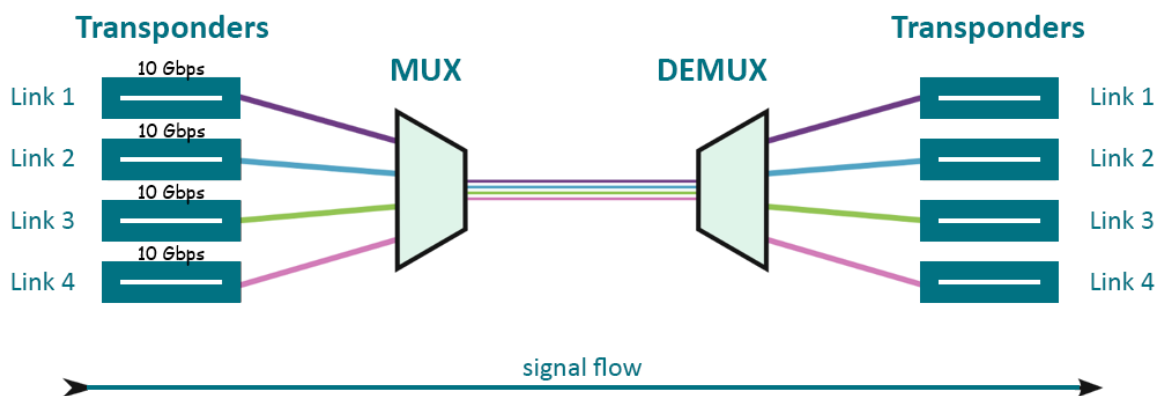


Figura 1.19: Esquema SLR-WDM. Adaptado de [30]

El concepto de SLR puede estar aplicado de forma más general en las redes ópticas ya que muchos estándares acogidos por las entidades relacionadas y empleados por las empresas sugieren valores límite en las tasas de bit a utilizar en las redes, para lo que se acaba definiendo una capacidad específica que permita soportar el tráfico estimado para esas redes dentro de esos valores ya definidos. Esto se ve reflejado en la propia evolución que han tenido las PON cuyas características se han venido promoviendo y estandarizando para el mercado por parte de organismos tales como la ITU y el grupo de Red de Acceso de Servicio Completo (FSAN, *Full Service Access Network*).

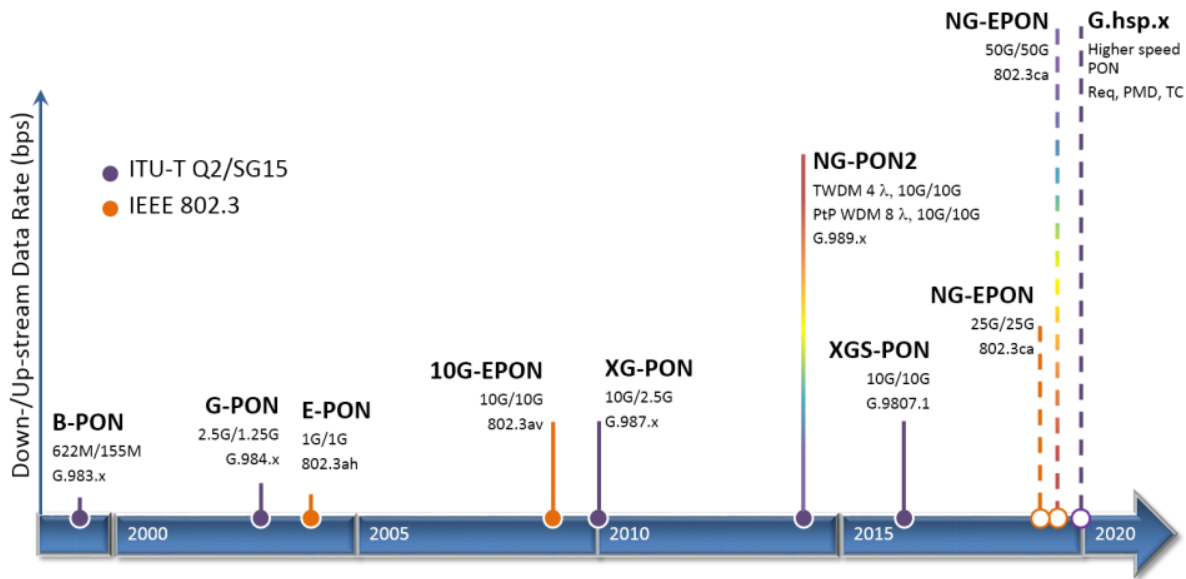


Figura 1.20: Evolución de PON. Tomado de [31].

En la figura 1.20 se puede apreciar el progreso que han tenido las PON y los estándares que se han acogido para cada arquitectura. La primera generación de PON se basó en Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*), siendo APON (*Asynchronous Transfer Mode PON*) y BPON (*Broadband PON*) los primeros estándares de este tipo de redes y los cuales proporcionaron velocidades de transmisión de 622 Mbps y 155 Mbps. Posteriormente, se lograron velocidades de 1 Gbps en EPON (*Ethernet PON*) y de 2,4 Gbps en GPON (*Gigabit PON*) [31]. En las siguientes generaciones, FSAN propone una evolución de arquitecturas de red en dos etapas: Red Óptica Pasiva de Próxima Generación 1 (NG-PON1, *Next-Generation Passive Optical Network 1*) [32] y Red Óptica Pasiva de Próxima Generación 2 (NG-PON2, *Next-Generation Passive Optical Network 2*) [33]. En NG-PON1 se destacan XG-PON (*10-Gigabit PON*) para el que se desarrollaron sistemas que soportan 10 Gbps descendentes y 2,5 Gbps ascendentes, y luego XGS-PON (*10-Gigabit Symmetric PON*) que soporta velocidades de acceso de 10 Gbps simétricas. Otro de los estándares que sobresale en esta evolución hace referencia a la segunda etapa de redes ópticas pasivas de próxima generación, es decir, el estándar de tercera generación NG-PON2 cuya arquitectura es capaz de ofrecer un rendimiento total de red de hasta 40 Gbps [31].

1.4. VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA MIXTA (MLR) EN REDES WDM-PON

El uso de técnicas basadas en WDM en conjunto con arquitecturas de tipo PON han permitido aumentar la capacidad de las redes ópticas considerablemente mejorando su desempeño en los sistemas de comunicaciones, así como la rentabilidad de estos. Sin embargo, se debe tener en cuenta ciertos aspectos que garanticen un buen desempeño

de la red sin incrementar los costos de la misma. Anteriormente, para poder satisfacer una gran cantidad de tráfico, se recurría a incrementar la capacidad disponible hasta alcanzar velocidades (a nivel de acceso) de alrededor de 100 Gbps, pero esto a su vez necesita limitar el alcance de la red para evitar un aumento en las degradaciones propias de los sistemas basados en fibra óptica, las cuales también implicarían de un aumento en el costo de componentes que permitieran compensar dichos problemas. Por otro lado, no todas las partes de una red requieren una capacidad de tal magnitud todo el tiempo, por lo que también se estarían desperdiciando los recursos disponibles [34].

Debido a lo anterior, se vio la necesidad de que las redes ópticas pudieran trabajar con distintas capacidades a la vez dando origen a lo que se denomina como redes ópticas con Velocidad de transmisión de Línea Mixta (MLR, *Mixed Line Rate*). A partir de ello, las redes MLR utilizan técnicas WDM para poder contar con distintos canales o longitudes de onda en un mismo hilo de fibra, donde cada canal deberá trabajar a velocidades de transmisión diferentes con el objetivo de darle una mayor flexibilidad a la red al momento de realizar la asignación de tráfico y tratar de obtener un modelo rentable de dicha red [35].

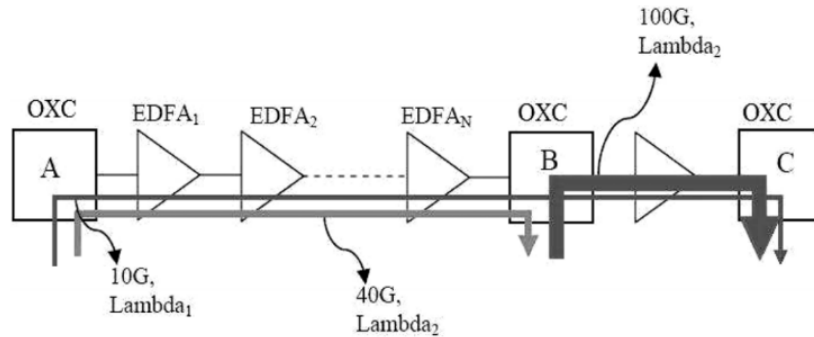


Figura 1.21: Esquema básico de una red MLR. Tomado de [34].

De la figura 1.21 se puede apreciar el esquema básico de una red MLR, donde también se muestran diferentes velocidades de transmisión coexistiendo dentro de una misma fibra. Para efectos prácticos, en este tipo de redes se suelen definir tasas con valores típicos de 10, 40 y/o 100 Gbps para los distintos canales y normalmente con espaciamento de al menos 50 GHz para brindar cierta flexibilidad [36]. No obstante, es posible trabajar con valores diferentes siempre que exista un buen espaciamento entre los canales utilizados como sucede en [37], donde se trabaja con múltiples canales de 20 y 40 Gbps y espaciamientos entre canales de hasta 100 GHz.

En la figura 1.21 también se muestran algunos componentes de la red, los cuales son:

- **Conector Óptico Cruzado (OXC):** es un dispositivo utilizado para conmutar señales ópticas de alta velocidad mediante demultiplexación y multiplexación de dichas señales, ya sea un proceso completamente óptico (OXC transparente)

o requiera conversión Óptico–Eléctrico–Óptica (OXC opaco) [38]. Gracias a las ventajas de cada caso; los OXC ofrecen escalabilidad, alto rendimiento y capacidad de acceso múltiple en redes de enrutamiento de longitud de onda ópticas; esto teniendo en cuenta que también puede tener ciertas desventajas en cuanto a la limitación de ancho de banda del OXC opaco o a la dificultad para realizar el monitoreo de la calidad de señales completamente ópticas en el caso del OXC transparente [39].

- **Amplificador de Fibra Dopada con Erblio (EDFA):** es un amplificador muy utilizado en redes ópticas gracias a las características de costo-beneficio y rendimiento que posee frente a otros tipos de amplificadores ópticos. Entre estas se destaca su ganancia de hasta 30 o 40 dB, una potencia de bombeo moderada, presenta baja atenuación, puede operar entre las bandas C y L (1530 a 1605 nm) que son muy utilizadas en telecomunicaciones, y pueden ser configurados de tres maneras posibles para estimular la fibra dopada con Erblio: i) Co-propagación, en la cual la longitud de onda de bombeo y la señal se propagan en la misma dirección; ii) Contra-propagación, en donde las longitudes de onda de bombeo y la señal se propagan en dirección opuesta; iii) Bidireccional, donde la propagación de la longitud de onda de bombeo es en ambas direcciones [40].

Según lo anterior, el OXC debe ser capaz de conmutar las señales existentes aunque estas posean distintas velocidades entre sí; y en casos mas avanzados dicho OXC debe poder asignar el tráfico de una manera mas inteligente siempre que sea posible, es decir, debe asignar las señales con altas tasas de bits a las longitudes de onda que poseen capacidades más altas (40 o 100 Gbps) y asignar las señales con tasas de bits más bajas a la longitud de onda con menor capacidad (10 Gbps), esto siempre que las condiciones lo permitan. Cabe destacar que el estudio de la asignación de trafico es un tema que se sale de lo propuesto en el presente trabajo de grado por lo que no se abarcara como tal en el mismo.

En cuanto a los EDFA, estos permiten amplificar las señales ópticas que pasan a través de la fibra óptica independientemente de que cada longitud de onda posea distintas velocidades, permitiendo así compensar la atenuación de dichas señales la cual se vuelve un factor considerable a distancias relativamente más largas [40]. De igual manera, es necesario tener en cuenta para cualquier tipo de sistema basado en fibra óptica que el uso de amplificadores como el EDFA para extender el alcance de la señal solo es posible hasta cierto punto ya que introducen algo de ruido y no son capaces de restaurar la señal por lo que cuando se llega a distancias considerablemente largas las degradaciones ópticas tienden a incrementarse y debe recurrirse a métodos y herramientas que permitan recuperar la señal como el uso de regeneradores [41].

A pesar de las posibilidades que ofrece el uso de diferentes velocidades de transmisión, se deben tener en cuenta ciertos aspectos que surgen de ello. Una de las características principales que se trabaja en redes ópticas es el alcance de la transmisión, donde dicho alcance varía según la tasa de transmisión a la cual se trabaje ya que a

mayor tasa de bit suelen presentarse mayores degradaciones en distancias más largas por lo que si se están utilizando tasas de 10/40/100 Gbps para una red MLR, el alcance máximo que se puede obtener a 100 Gbps será menor al de 40 Gbps el cual a su vez será menor que el de 10 Gbps. A partir de ello, en las redes MLR se suele limitar el alcance de transmisión de la señal con tal evitar mayores degradaciones ya que se busca mayor flexibilidad ante variaciones de tráfico (como ya se había mencionado previamente) por lo que ayuda a reducir el multiplexado de servicios de baja capacidad en longitudes de onda destinadas a altas capacidades evitando desperdiciar recursos [42]. En la figura 1.22 se tiene un ejemplo de un esquema general de red adaptado de la NSFNet de Estados Unidos, donde se representa la disponibilidad para usar cierta velocidad de transmisión según la distancia recorrida para el enlace.

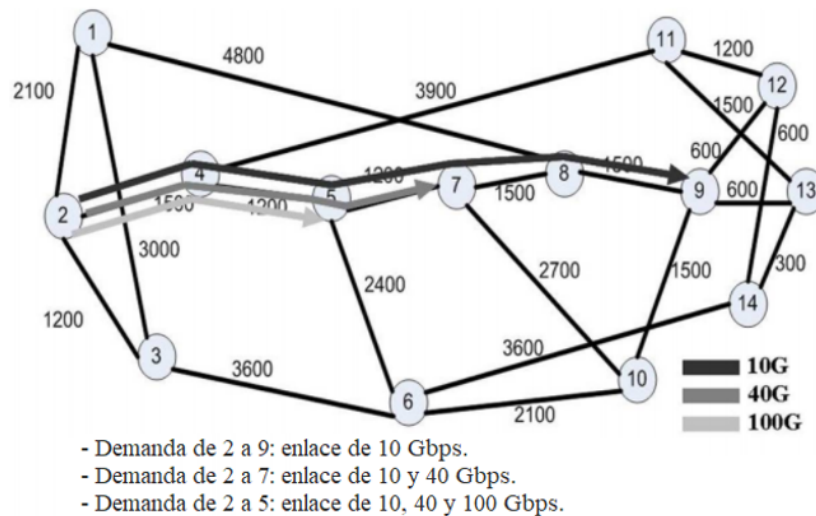


Figura 1.22: Disponibilidad de velocidad de transmisión según distancia de enlace (en kilómetros). Adaptado de [34].

También debe tenerse en cuenta que al usar tasas de bit mayores suele ser necesario emplear formatos de modulación más avanzados ya que estos ayudan a mejorar la eficiencia espectral y la tolerancia hacia las degradaciones ópticas, lo que a su vez permite cierto aumento del alcance de transmisión. Debido a que las redes MLR implementan diferentes velocidades sobre un mismo hilo de fibra óptica mediante técnicas WDM, también es posible utilizar diferentes formatos de modulación sobre cada portadora de la señal según sea necesario, con lo que una portadora de 10 Gbps podría modularse mediante una técnica más sencilla como OOK (*On-Off Keying*) y una portadora de 40 o 100 Gbps podría utilizar técnicas más avanzadas como QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*) o DQPSK (*Differential Quadrature Phase-Shift Keying*) brindándole cierta versatilidad al sistema [34]. Sin embargo, es posible recurrir al uso de una sola técnica de modulación sobre una red MLR ya que en algunos estudios se ha podido comprobar que, a pesar de lo que ello implica, es posible obtener una red lo suficientemente flexible y rentable asignando debidamente cada canal o reduciendo la conmutación de canales ópticos mediante la agrupación de estos en una banda apropiada [35, 43].

Cabe resaltar que el hecho de que sea posible implementar diferentes velocidades de transmisión y distintos formatos de modulación en redes ópticas WDM también implica tener más consideración sobre posibles interferencias a nivel físico de red entre las portadoras que coexisten sobre un mismo hilo de la fibra (Efecto ICI), las cuales acabarían limitando más el alcance de la señal para cada canal implementado, por lo que se debe tener cuidado durante el proceso de diseño para mantener cualquier degradación en un valor mínimo y evitar tener que recurrir al uso de múltiples regeneradores que terminarían incrementando considerablemente el costo de la red [42, 44].

1.5. MONITOREO DE DESEMPEÑO ÓPTICO - OPM

El monitoreo de desempeño óptico (OPM, *Optical Performance Monitoring*) es la manera de supervisar la calidad de la señal a nivel físico y su funcionamiento de extremo a extremo, además provee que la red sea inteligente, autónoma y que soporte la creciente demanda de tráfico que se genera constantemente. Así, un sistema de monitoreo es importante para la entrega de información eficiente que garantice que la fibra óptica esté lista para usarse en el momento indicado, mejorando así el óptimo nivel de utilización, la calidad de los servicios ofrecidos, la rentabilidad de su inversión, y el aprovechamiento de la red [45].

1.5.1. Fundamentos sobre el Monitoreo de Desempeño Óptico

Los sistemas de monitoreo óptico brindan grandes beneficios como: incremento en la satisfacción del cliente a través de un buen monitoreo de la red y el aumento de la productividad generada por la fácil administración de redes ópticas a través de pruebas y documentación precisa de la red. El monitoreo (supervisión) óptico se lleva a cabo para cumplir los siguientes objetivos: detectar anomalías, defectos, degradaciones y fallos que afectan la calidad de la capa óptica. Es de vital importancia tener un monitoreo óptico constante debido a que puede diagnosticar ligeramente degradaciones y cualquier otro daño, al igual que localizar y restaurar problemas de la red [45]. Dentro de los parámetros de monitoreo óptico encontramos los siguientes:

- Longitud de onda de cada canal.
- Relación señal a ruido óptica (OSNR).
- Potencia por canal DWDM.
- Potencia total en la fibra.
- Factor Q.
- Tasa de error de bit (BER).

- Retraso Diferencial de Grupo (DGD).

1.5.2. Modelo de Referencia OPM

Este modelo de referencia OPM contiene 3 capas que hacen referencia a la gestión del canal, a la calidad del canal y al desempeño del protocolo según se aprecia en la Figura 1.23, esto es:

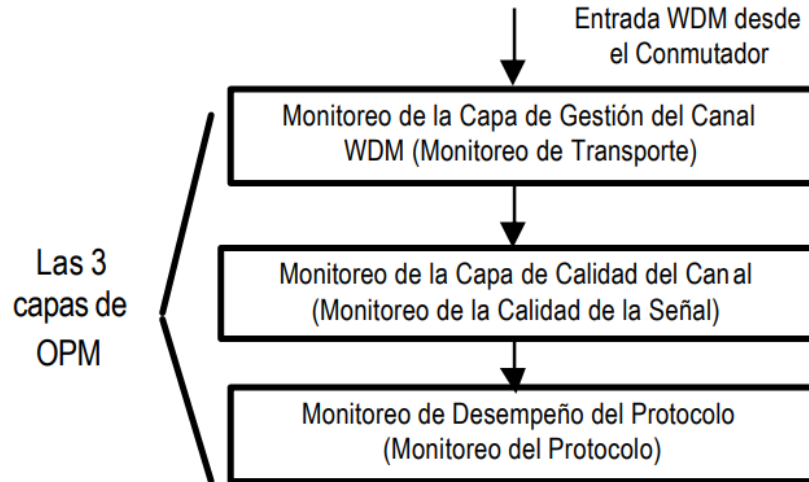


Figura 1.23: Capas del Modelo de Referencia OPM. Tomado de [46].

1.5.3. Degradaciones ópticas y parámetros del Monitoreo de Desempeño Óptico

Dentro de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica están las “Degradaciones ópticas” entre las cuales se encuentran:

- Dispersión cromática.
- Dispersión por modo de polarización (PMD).
- Diafonía.
- Atenuación.
- Jitter.

Cabe resaltar que dentro de las degradaciones que más afectan a la señal limitando su desempeño son los efectos de atenuación, dispersión y efectos no lineales. Además, todas las degradaciones no tienen el mismo nivel de impacto en los sistemas DWDM por lo que en la tabla 1.2 se presenta cuál es su nivel de ocurrencia relativa, según ITU-T Rec. G.697 [45]:

Variación de la Degradación	Frecuencia de Ocurrencia Relativa	Descripción
Atenuación	Elevada	
Variaciones de la potencia del Canal Óptico debido a variaciones de Ganancia	Elevada	
Desviación de la Frecuencia (o Longitud de Onda) del Valor Nominal	Elevada	Rec. ITU-T G.692
Dispersión por Modo de Polarización (PMD) (primer orden y órdenes superiores)	Media	Apéndice II/G.663
Mezcla de Cuatro Ondas (FWM)	Media	Apéndice II/G.663
Ruido de Emisión Espontánea Amplificada (ASE) en Amplificación Óptica	Media	Apéndice II/G.663
Dispersión Cromática	Media	Apéndice II/G.663
Pendiente de Dispersión Cromática	Media	Recs. ITU-T G.652, G.653, G.655
Reflexiones	Media	Apéndice III/G.663
Ruido de Laser	Media	
Diafonía entre canales	Media	Apéndice Sup. ITU-T 39
Diafonía Interferométrica	Media	Sup. ITU-T 39
Modulación de Fase Cruzada (XPM)	Baja	Apéndice II/G.663
Automodulación de fase (SPM)	Baja	Apéndice II/G.663
Difusión Estimulada de Brillouin (SBS)	Baja	Apéndice II/G.650.2, Apéndice II/G.663
Difusión Estimulada de Raman (SRS)	Baja	Apéndice II/G.663

Tabla 1.2: Degradaciones ópticas. Adaptado de [45].

Las degradaciones que se encuentran en la tabla anterior pueden llegar al punto de evitar que el receptor detecte los datos con una tasa de error razonable.

Los niveles de frecuencia de ocurrencia relativa en la tabla 1.2 son:

- Baja: cuando la probabilidad que el efecto sea suficientemente fuerte como para causar una penalidad de X dB, se produzca a razón de un evento en 10 años aproximadamente.
- Media: cuando la probabilidad que el efecto sea suficientemente fuerte como para causar una penalidad de X dB, se produzca a razón de un evento por año aproximadamente.
- Alta: cuando la probabilidad que el efecto sea suficientemente fuerte como para causar una penalidad de X dB, se produzca a razón de 10 eventos por año aproximadamente.

Un evento podría causar una penalidad de X dB en un canal óptico o en un sistema multicanal, por ejemplo, un operador en una red DWDM de 10.000 Km recomienda que el valor de penalidad para determinar que una degradación es significativa es de 3 dB. En cuanto a los parámetros de monitoreo óptico se tiene una lista de cuales de estos parámetros se pueden medir con la tecnología actual en sistemas de transmisión de fibra óptica, esto según como se menciona en el documento de la ITU-T Rec. G.697 y son los siguientes [45]:

- Factor Q (Factor de Calidad): este se define como la relación señal a ruido eléctrica en el circuito de decisión de un receptor de señal digital. Se puede utilizar el método del factor Q para obtener una evaluación de la calidad de funcionamiento que se puede esperar cuando la red está en servicio.
- Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR): se determina mediante el ruido del amplificador y el efecto acumulado de las numerosas distorsiones lineales y no lineales que se producen en los sistemas de transmisión de fibra óptica de alta velocidad.
- Potencia de canal: definida como la cantidad de información que puede ser relativamente transmitida sobre canales de comunicación.
- Potencia total: se refiere a la cantidad de luz necesaria para transmitir señales con éxito a una distancia a través de una conexión de fibra óptica.
- Longitud de onda de canal: la longitud de onda es la distancia física entre dos puntos a partir de los cuales la onda se repite. En términos de la fibra óptica, esta hace uso de longitudes de onda mayores que la luz visible, lo que la sitúa en el campo de los infrarrojos donde se encuentran longitudes de onda de 850, 1310, 1490 y 1550 nm debido a que la atenuación es mucho más baja.

1.5.4. Relación y correlación entre degradaciones ópticas y parámetros de monitoreo óptico

A continuación, en la Tabla 1.3, se muestra el orden de prioridad de las degradaciones ópticas (a excepción de la diafonía) y el orden de prioridad de los parámetros de monitoreo óptico.

Degradaciones Ópticas	Parámetros de Monitoreo Óptico
Dispersión Cromática	Longitud de onda de cada canal
PMD	BER (Factor Q)
Diafonía	OSNR
Atenuación	Potencia por canal DWDM

Tabla 1.3: Degradaciones ópticas y parámetros de monitoreo óptico. Adaptado de [46].

Uno de los daños físicos más importantes dentro de las degradaciones ópticas es la dispersión, el cual es un efecto que genera distorsión en la señal ya que produce Interferencia Intersimbólica (ISI, *InterSymbol Interference*). Por otro lado, los sistemas DWDM son afectados por dos tipos de dispersión: Dispersión Cromática (CD) y Dispersión por Modo de Polarización (PMD). En cuanto a la diafonía, esta posiblemente se produce debido a la variación de las frecuencias centrales y a la multiplexación y demultiplexación anómala. Por su parte, la atenuación refleja las degradaciones dadas durante la transmisión.

En los parámetros de monitoreo óptico se le da prioridad a la longitud de onda de canal, ya que esta hace posible el transporte de la información. Luego, los parámetros correspondientes a BER (factor Q) y OSNR se vuelven de gran importancia debido a que nos informan el estado de la calidad de la señal óptica, mientras que la potencia por el canal DWDM ayuda a obtener información adicional del canal.

A continuación, en la Tabla 1.4, se muestra la correlación entre las degradaciones ópticas y parámetros de monitoreo óptico.

Parámetros Degradaciones	Potencia total	Potencia del Canal	Longitud de Onda del Canal	OSNR	Factor Q
<i>Variación de Atenuación</i>	X	X		X	X
<i>Desviación de Frecuencia (o Longitud de Onda del Valor Nominal)</i>		X	X	X	X

<i>Variaciones de la potencia del canal óptico debido a variaciones de ganancia</i>		X		X	X
---	--	---	--	---	---

Tabla 1.4: Correlación entre degradaciones ópticas y parámetros de monitoreo óptico. Adaptado de [46].

De la anterior tabla se puede concluir que todas las degradaciones ópticas señaladas, tienen una correlación directa con los parámetros de monitoreo: potencia de canal, OSNR, y factor Q, indicando que dichos parámetros son de especial importancia para un buen desempeño de la red.

1.5.5. Técnicas OPM

Las medidas de nivel físico para OPM, que se pueden realizar en una señal óptica son:

- Potencia promedio (por longitud de onda): La potencia promedio o media de los tonos es proporcional a la potencia óptica media del canal.
- Potencia pico: se define como la máxima potencia eléctrica que este puede generar.
- Diagrama de ojo: diagrama que muestra la superposición de las distintas combinaciones posibles de 1 y 0, en un rango de tiempo o cantidad de bits determinados, esta señal es transmitida por el enlace, permite obtener las características de los pulsos que se propagan por la fibra óptica
- Forma del pulso/bit: Un pulso es una señal que pasa de un nivel inicial a otro final en un intervalo finito de tiempo y luego retorna al nivel inicial en otro tiempo finito igual o distinto. El bit es la unidad más pequeña de información digital.
- Espectro de amplitud de potencia: mide el espectro de la señal codificada en la línea portadora óptica, con este podemos medir mejor la calidad de la señal.
- Espectro óptico: se mide con técnicas ópticas de alta sensibilidad y puede proporcionar información sobre el ruido óptico.
- Curva V (Factor Q)/BER: parámetro utilizado en las redes electrónicas para la gestión de fallos y es la métrica utilizada en cada terminal de la red para la QoS.
- Dispersión cromática: este se da como consecuencia de la naturaleza del índice de refracción en una fibra óptica, donde las longitudes de onda en una fibra viajan a diferentes velocidades y llegan en tiempos diferentes. Esta dispersión está catalogada como uno de los principales deterioros que limitan el desempeño de un sistema óptico.

- PMD: propiedad inherente del medio óptico, causado por la diferencia en las velocidades de propagación de la luz en los estados ortogonales principales de polarización del medio de transmisión.

Ahora, en la Tabla 1.5, se muestran los parámetros sugeridos para OPM:

Parámetros del Nivel OCM / WDM	Parámetros Avanzados y de Calidad de la Señal
Potencia Agregada	OSNR dentro de Banda
Potencia del Canal	Factor Q / BER / OSNR
Longitud de Onda del Canal	PMD
OSNR Espectral	Potencia por canal Dispersión Cromática Acumulada
	Velocidad de transmisión de datos
	Jitter

Tabla 1.5: Parámetros OPM Sugeridos. Adaptado de [28].

En la anterior tabla puede verse la clasificación entre los parámetros OCM/WDM y los parámetros avanzados y de calidad de la señal, esto con el propósito de comprender la distribución de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica con respecto a las capas del modelo de referencia OPM.

Nota de autor:

En este capítulo se definen los aspectos generales de redes ópticas, donde en principio se hace énfasis en las técnicas de multiplexación de longitud de onda (WDM) y las características que estas presentan. Posteriormente, se abarca lo referente a redes ópticas pasivas (PON), así como su relación con las denominadas arquitecturas de red de fibra óptica hasta la x (FTTx) sentando las bases para el diseño y planificación de estas. A partir de ello, se trata lo relacionado con la velocidad de transmisión en una red PON que utilice WDM, donde primero se da un enfoque sobre la velocidad de transmisión de línea única (SLR) mediante la propia evolución y estandarización que ha tenido PON, para luego definir el concepto de velocidad de transmisión de línea mixta (MLR) y las características propias que se derivan de este modelo. Finalmente, se habla acerca del monitoreo del desempeño óptico (OPM), donde se tienen en cuenta los tipos de degradaciones ópticas para definir los parámetros de OPM así como las técnicas que se utilizan en este.

CAPÍTULO 2

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se presentan las herramientas y procedimientos abordados en la realización del trabajo de grado. Así, se describen algunas herramientas de software que permiten el diseño y la simulación de redes y se escoge la más apropiada de ellas según sus características. Luego, se presenta la metodología seleccionada y su aplicación dentro del trabajo de grado.

2.1. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

Es de vital importancia realizar una simulación o un modelado de un sistema de comunicaciones antes de ser implementado realmente, por lo que se hace necesaria la elección de una herramienta o software de simulación para lograr el monitoreo y análisis del comportamiento de la señal a través del canal óptico deseado. Estas herramientas permiten y facilitan la recreación del funcionamiento de la red a trabajar dentro de un entorno lo más cercano posible a la realidad, donde se evalúa el desempeño de esta teniendo en cuenta los parámetros de Monitoreo de Desempeño Óptico (OPM).

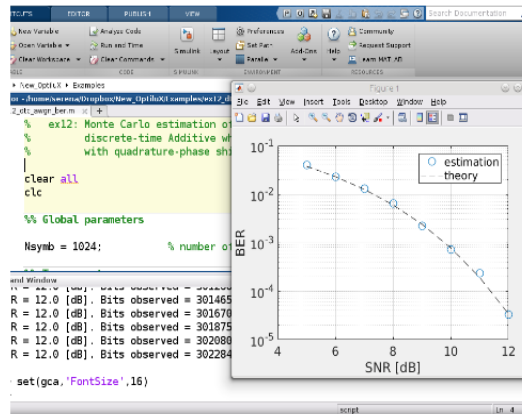
En esta sección se describen algunas herramientas de simulación postuladas para trabajar, entre las cuales hay herramientas que requieren la compra de una licencia y también de código abierto para adquirir de manera gratuita. Para este caso, la herramienta de simulación se elegirá según su comportamiento, disponibilidad de licencia (de ser el caso), e implementación de tecnologías a nivel de enlace y de red. Siendo así, las posibles herramientas se describen a continuación:

2.1.1. OptiluX

Optilux es un software de libre disposición formado por una serie de herramientas o módulos implementados en Matlab y Octave, que proporcionan la capacidad para diseñar, simular y analizar un sistema completo de comunicaciones ópticas con un nivel de fiabilidad y fidelidad realmente alto. Dentro de las ventajas generadas por este software, la principal que lo sitúa entre uno de los mejores entornos de simulación para comunicaciones ópticas se encuentra en la exhaustiva caracterización que realiza del medio de transmisión (la fibra óptica).



(a) Logo OptiluX.



(b) OptiluX en Matlab.

Figura 2.1: Herramienta de simulación OptiluX. Tomado de [47].

Como se nombra anteriormente, Optilux posee un alto nivel de fiabilidad y fidelidad, factores que se pueden observar en la simulación de la propagación de la señal a través de la fibra óptica, la cual es realmente fiel a la realidad ya que tiene en cuenta numerosos factores como la distorsión o la dispersión modal.

Este software de licencia libre permite describir y analizar muchos aspectos de los sistemas ópticos, como los siguientes [47]:

- Transmisión WDM.
- Generadores de patrones de bits.
- Efectos de polarización.
- Formatos de modulación multinivel.
- Fibras ópticas en régimen no lineal.
- Métodos Karhunen-Loève para la evaluación del desempeño.
- Estimación de Monte Carlo.

2.1.2. OptSim

OptSim es una herramienta desarrollada por Synopsys, está basada en un entorno de simulación y modelado intuitivo que realiza el diseño y evaluación del desempeño del nivel de transmisión de sistemas de comunicaciones ópticas. Esta herramienta proporciona una amplia librería con los componentes más utilizado en sistemas de comunicaciones ópticas y se agrupan en varias categorías como: transmisores, generadores de señal, fibras ópticas, multiplexores, demultiplexores, receptores, entre otras. Esto hace que provea un mejor balance entre exactitud y tiempo, además ayuda a optimizar los

diseños para incrementar el rendimiento y reducir los costos, cuenta con un alto nivel de eficiencia y precisión y su interfaz gráfica es de fácil manipulación [48].

Dentro de las aplicaciones de OptSim se tienen [48]:

- Sistemas óptica de espacio libre (FSO)
- LAN´s ópticas
- Sistema DWDM / CWDM amplificados
- Radio sobre fibra (RoF),
- Interconexiones ópticas
- Transmisión soliton
- Sistemas FTTx/PON
- Sistemas OTDM / OCDMA.

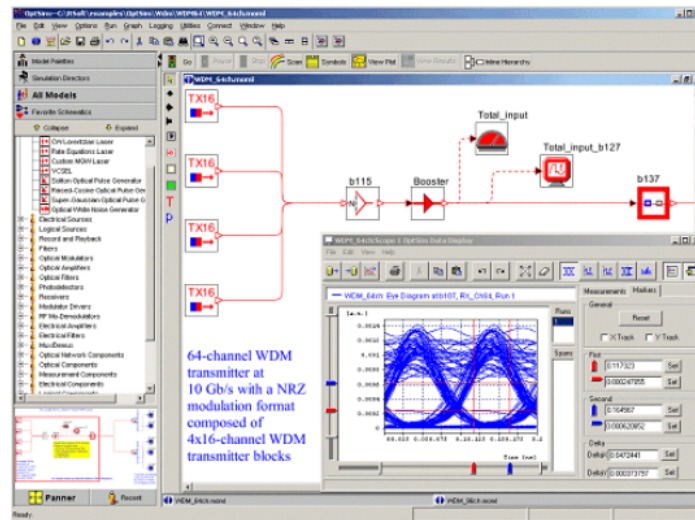


Figura 2.2: Entorno gráfico del software de simulación OptSim. Tomado de [49].

Los resultados de la simulación que produce esta herramienta incluyen representaciones de forma de onda de señal y diagramas de ojo en cualquier punto dentro de los gráficos de sistemas de comunicación óptica y tasa de errores de bit (BER) frente a varios parámetros dentro del sistema, como la potencia óptica recibida.

2.1.3. OptiSystem

Optisystem es un software de simulación de alta calidad desarrollado por Optiwave y que permite la realización de diseños de redes de fibra óptica y la configuración de características esenciales y la realización de diferentes tipos de pruebas. Esta herramienta contiene grandes beneficios, dentro de los cuales está diseñar y crear diferentes tipos de arquitecturas con la implementación de diversos dispositivos disponibles en la librería, visión global del desempeño del sistema, prototipado rápido y de bajo costo, reducción del riesgo y del tiempo de implementación, entre otros [50].

OptiSystem se presenta como una herramienta que contribuye al mejor diseño de enlaces de transmisiones ópticas, los resultados obtenidos tienen un gran porcentaje de aproximación a los resultados reales lo que permite realizar pruebas, análisis de calidad, detección de errores, experimentar con nuevas configuraciones a nuevas distancias, nuevas distribuciones e implementación de nuevos dispositivos. Así, esta herramienta permite diseñar, probar y optimizar lo siguiente [50]:

- Amplificadores (EDFA, SOA, Raman, híbrido) y láseres (optimización para láseres de fibra).
- Óptica de espacio libre (FSO), Radio sobre fibra (ROF), OFDM (directo, coherente).
- Diseño de anillos SONET / SDH, CWDM, DWDM, PON, Cable, OCDMA.
- Procesamiento de señales
- Diseño de subsistema de transmisor y receptor (directo / coherente).
- Análisis del rendimiento del sistema (diagrama de ojo / factor Q / BER, potencia de señal / OSNR, estados de polarización, diagramas de constelación, penalizaciones lineales y no lineales).
- Redes ópticas pasivas (PON) basadas en Fibra Hasta el Hogar (FTTH).

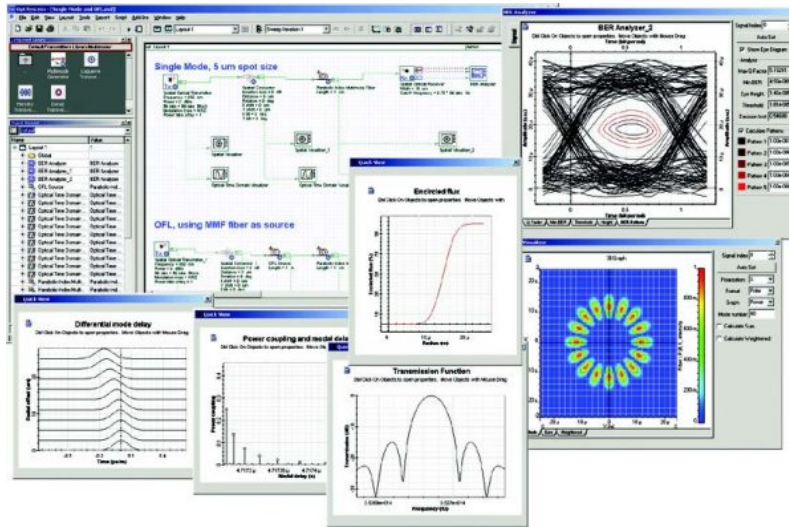


Figura 2.3: Entorno gráfico del software de simulación OptiSystem. Tomado de [50].

2.1.4. Elección del software de simulación

El simulador se ha elegido teniendo en cuenta la escalabilidad, complejidad, funcionalidades, librerías, facilidad de acceso y cuál de ellos proporcionará un modelo más realista. En la tabla 2.1 se muestra un resumen de las herramientas descritas previamente.

Herramientas	OptSim	OptiSystem	OptiluX
Variables			
<i>Licencia</i>	Comercial	Comercial	Libre
<i>Entorno/Interfaz gráfica</i>	Alta	Alta	Alta
<i>Herramientas de medición</i>	Excelentes	Buenas	Buenas
<i>Componentes Librería</i>	Alto	Alto	Bajo
<i>Integración con otras herramientas</i>	Si	Si	Si
<i>Tipo de Software</i>	Simulador de propiedades ópticas	Simulador de propiedades ópticas	Simulador de propiedades ópticas/Matemático
<i>Requisitos del sistema</i>	Windows, Linux, Mac Os, Unix	Windows, Linux	Windows, Linux, Mac Os, Unix

Tabla 2.1: Comparación de herramientas de simulación.

Así, según lo descrito anteriormente y tras haber evaluado la precisión, la facilidad de uso y el cumplimiento de los parámetros requeridos, se utilizará la herramienta de simulación OptSim de la cual la universidad dispone su licencia.

2.2. METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DEL PROYECTO

La metodología a utilizar para el desarrollo del trabajo de grado es el modelo de Técnica de Revisión y Evaluación de Programas (PERT, *Program Evaluation and Review Technique*), el cual define un modelo de seguimiento y gestión, aplicado al sector de las tecnologías donde deben ser consideradas operaciones interdependientes e interrelacionadas para planificar proyectos e identificar flujos de trabajo optimizados. El método PERT presenta ventajas significativas dadas las facilidades para su aprendizaje, planteamiento exacto de los procesos de realización del proyecto, facilidad de control, rapidez en la concepción e introducción de modificaciones y manejo total sobre el proyecto [51]. El método PERT tiene en cuenta las siguientes definiciones [51, 52]:

- **Nodos:** Representan instantes en el tiempo. Específicamente, representan el instante de inicio de una o varias actividades, y simultáneamente, el término de ellas.
- **Holgura:** Tiempo que se pueden retrasar las actividades sin afectar la duración total del proyecto. Se calcula mediante la ecuación 2.1:

$$\text{Holgura} = FTL - FTP \quad (2.1)$$

Donde,

- FTL: Fecha de terminación más lejana de una actividad.
- FTP: Fecha de terminación más próxima de una actividad
- **Ruta crítica:** Determina la duración total del proyecto, y además las actividades que lo conforman deben realizarse necesariamente en el tiempo establecido.

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

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

Donde,

- **Te:** Tiempo esperado para realizar una actividad.
- **To:** Tiempo optimista.
- **Tn:** Tiempo normal o probable de realización de una actividad.
- **Tp:** Tiempo pesimista o mayor tiempo para realizar una actividad.

Además, como se observa en la ecuación 2.3, se calcula la varianza de tiempo respecto a la dispersión entre el tiempo más optimista y el más pesimista:

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

A continuación, en la tabla 2.2, se describen las actividades definidas a partir del proceso metodológico seleccionado, así como los objetivos del trabajo de grado para el desarrollo del mismo.

Inicio	Actividades	Precedencia			Tiempo en Semanas				σ^2
					To	Tn	Tp	Te	
A	Análisis de artículos relacionados con redes SLR y MLR, redes FTTx y DWDM.				3	4	5	4	0.1111
B	Determinar las características de las redes SLR para la migración a una red MLR en función de su arquitectura.	A			3	4	5	4	0.1111
C	Profundizar sobre las características y funcionamiento de herramientas para simulación de sistemas ópticos que permita la selección de las mismas según se requiera.	A			3	4	5	4	0.1111
D	Definir un entorno de simulación mediante las herramientas seleccionadas.	B	C		3	4	5	4	0.1111
E	Definir una metodología de simulación.	D			4	5	6	5	0.1111
F	Diseñar y simular una red óptica SLR-DWDM para la migración a una red óptica MLR-DWDM.	D			8	9	10	9	0.1111
G	Diseñar e implementar diferentes arquitecturas de red de banda ancha FTTx para el modelo de red MLR.	F			4	5	6	5	0.1111
H	Análisis del desempeño del sistema MLR-DWDM implementando arquitecturas FTTx.	F			4	5	6	5	0.1111
I	Analizar los resultados obtenidos en los diferentes casos de estudio.	G			4	5	6	5	0.1111

J	Concluir sobre los resultados obtenidos durante el desarrollo del trabajo de grado.	G	H	I	4	5	6	5	0.1111
----------	---	----------	----------	----------	---	---	---	---	--------

Tabla 2.2: Diagrama de actividades.

Una vez definidos y calculados los tiempos esperados para cada actividad, se procede a realizar el diagrama de nodos del desarrollo del trabajo de grado, el cual se muestra a continuación en la Figura 2.4:

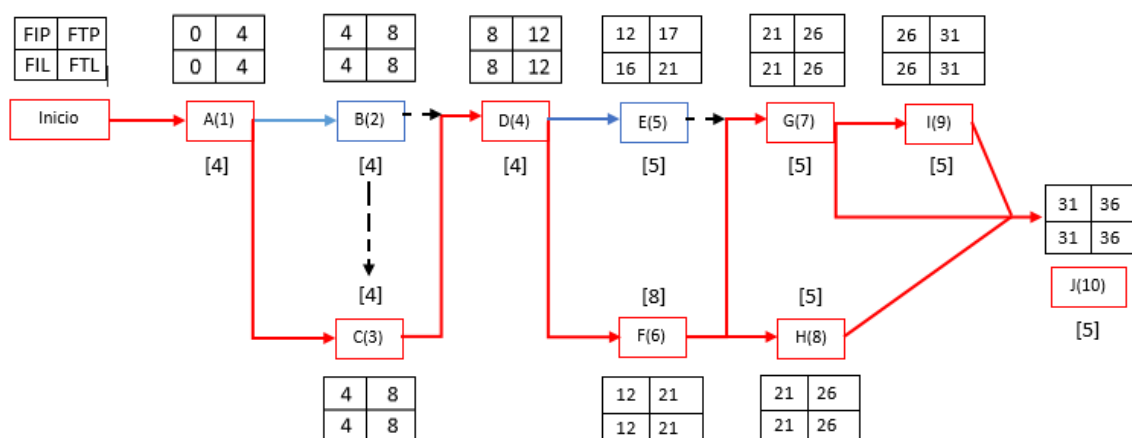


Figura 2.4: Grafo de red de actividades.

Donde,

- FIP: Fecha de inicio más próxima de una actividad.
- FTP: Fecha de terminación más próxima de una actividad.
- FIL: Fecha de inicio más lejana de una actividad, calculado bajo la Ecuación.
- FTL: Fecha de terminación más lejana de una actividad

2.3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Para el desarrollo de la fase de simulaciones se ha optado por aplicar una metodología con enfoque práctico basada en la teoría expuesta en [53]. En dicho documento se establecen unos lineamientos que permiten llevar a cabo la simulación de manera adecuada, puesto que pueden adaptarse al entorno que se tiene y a sus condiciones de funcionamiento. A continuación, se explicarán con detenimiento las fases comprendidas por la metodología de simulación planteada:

- **Definición del sistema:** En esta etapa debe analizarse el problema a resolver y entender cómo interactúan las variables que lo componen entre sí y las posibles restricciones a las que estará sujeto el sistema planteado.

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

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

- **Construcción del modelo:** Con el modelo definido, el siguiente paso es definir las herramientas a utilizar para la construcción y/o adecuación del mismo según las necesidades del proyecto, teniendo siempre en cuenta que el propósito no es el modelo en sí, sino resolver el problema.

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

- **Experimentación:** Consiste en generar datos hasta que estos sean los deseados y realizar un análisis de los parámetros indicados. Este paso se realiza una vez que el modelo ha sido validado.

- **Análisis:** Una vez realizada la validación, se realizan las simulaciones y se procede a estudiar los resultados para sugerir posibles cambios en el modelo.

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

Ahora, en la figura 2.5, se muestra el diagrama para el desarrollo de las simulaciones del presente trabajo de grado.

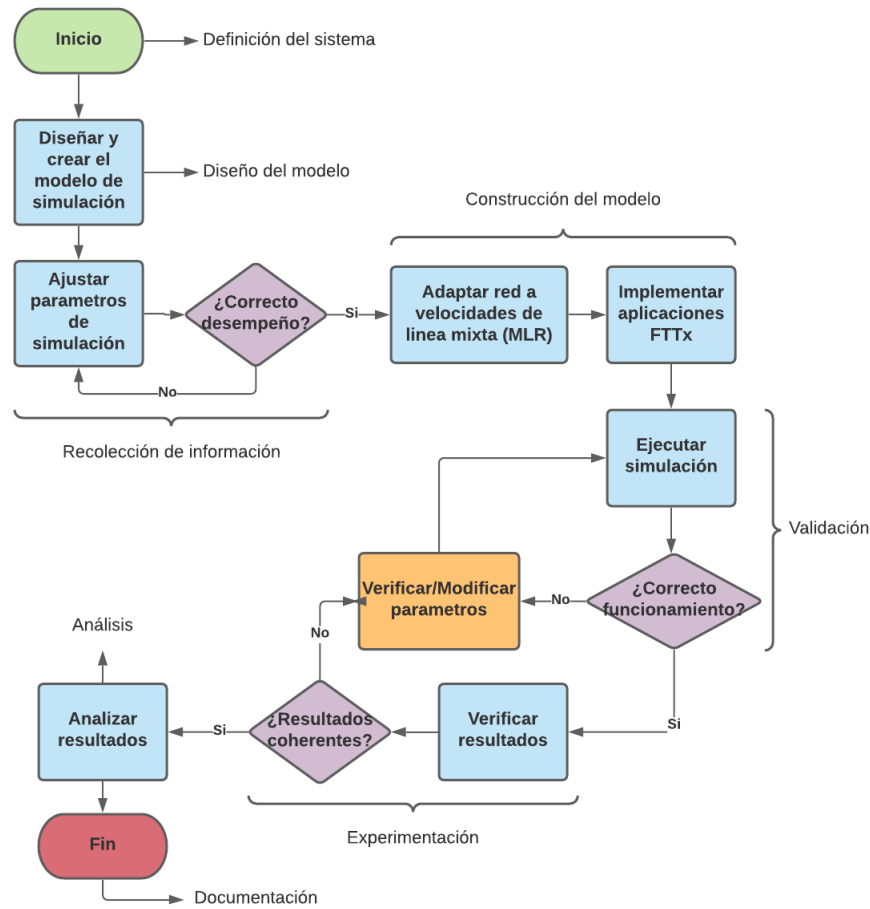


Figura 2.5: Diagrama de flujo / Algoritmo de simulación.

2.4. MODELO DE SIMULACIÓN

Con base en la teoría mostrada en el capítulo 1, se procede a definir un modelo de red simplificado el cual posee diferentes características según los requerimientos de red especificados incluyendo equipos comerciales, recomendaciones de la ITU-T y parámetros de desempeño para observar el rendimiento de la red. Así mismo, se definen ciertos aspectos para lograr la migración al modelo de red objetivo posteriormente. Cabe aclarar que el factor de costos de la red se tiene en cuenta según la complejidad de la misma sin presentar cifras o un análisis financiero como tal ya que tanto el modelo de red inicial como el modelo de red objetivo se abordan únicamente a nivel de simulación y no se hacen para un análisis técnico-económico sobre alguna infraestructura existente.

2.4.1. Caracterización del modelo de simulación

En principio se plantea una red de tipo PON con velocidad de transmisión de línea única (SLR) por lo que se parte de la tecnología DWDM punto a punto unidireccional,

la cual permite el envío de información en un solo sentido por lo que se suele recurrir a la implementación de sistemas con doble fibra con el fin de lograr comunicación completa. Sin embargo, estos sistemas resultan fáciles de instalar y operar, además posibilitan la transmisión de datos a altas velocidades mediante enlaces de larga distancia de hasta 500 km (con amplificación) [54, 55].

Se sabe que la recomendación ITU-T G.694.1 sugiere utilizar las bandas L y C para redes DWDM, en donde la banda C comprende la región que va desde los 1530 a los 1560 nm y debido a que presenta baja atenuación se usa frecuentemente en este tipo de redes [9]. Se parte de una red que posea una velocidad neta de 10 Gbps, pero se hace un enfoque en el enlace de bajada o downlink por canal. Así, para un sistema DWDM, la recomendación ITU-T G.694.1 define que los canales autorizados vienen dados por espaciamentos típicos entre canales de 25 GHz, 50 GHz y 100 GHz [9]; para lo cual se tienen en cuenta las siguientes expresiones:

$$25 \text{ GHz} : 193,1 + (n * 0,025) \text{ [THz]} \quad (2.4)$$

$$50 \text{ GHz} : 193,1 + (n * 0,05) \text{ [THz]} \quad (2.5)$$

$$100 \text{ GHz} : 193,1 + (n * 0,1) \text{ [THz]} \quad (2.6)$$

Donde n es un entero positivo o negativo (incluido el 0), y 193.1 es la frecuencia de referencia en [THz].

Se decide entonces implementar inicialmente 4 canales, cada uno a 2.5 Gbps en downlink con un espaciamento de 100 GHz con el fin de disminuir los posibles efectos de la interferencia de canal adyacente y llegar a la velocidad propuesta. Igualmente, dado que se escogió un espaciamento de 100 GHz, se debe utilizar la ecuación 2.6 para el plan de frecuencias. Así, para los 4 canales definidos se tiene:

	Frecuencia Central Nominal (THz)	Longitud de Onda (nm)
Canal 1	194.0	1545.3219
Canal 2	194.1	1544.5258
Canal 3	194.2	1543.7304
Canal 4	194.3	1542.9359

Tabla 2.3: Plan de Frecuencias.

Para el tipo de fibra óptica utilizada en el enlace, esta puede ser clasificada según el modo de propagación, ya sea del tipo monomodo (SMF, *Single-Mode Optical Fiber*) o del tipo multimodo (MMF, *Multi-Mode Optical Fiber*). En SMF sólo puede propagarse un modo o haz de luz, mientras que en MMF pueden propagarse varios modos de luz a la vez. La principal diferencia entre SMF y MMF es el diámetro del núcleo de la fibra, la longitud de onda, la fuente de la luz y el ancho de banda. Aquí se opta por una SMF al ser ideal para enlaces de redes con gran ancho de banda y que suelen estar distribuidos en áreas extensas [56].

Entre las fibras del tipo SMF normalmente se utiliza la Corning SMF-28e según la recomendación ITU-T G.652, pues esta permite alcanzar largas distancias a altas tasas de transmisión, su coeficiente de dispersión es de entre 16 y 17 ps/nm*Km, y el valor de atenuación para redes alrededor de 1550 nm (banda C) corresponde a 0.275 dB/Km [57]. Igualmente, se debe considerar el uso de fibra compensadora de dispersión (DCF, *Dispersion Compesating Fiber*) que posee un alto coeficiente negativo que equilibra los retardos en las longitudes de onda del pulso de luz con tal de mitigar la dispersión resultante, teniendo en cuenta que sus pérdidas son relativamente elevadas a 1550 nm (alrededor de 0,5 dB/km) [54].

También es necesario definir el láser a utilizar para el enlace óptico. Existen diferentes tipos de láser para la transmisión de datos, de entre los cuales destacan el láser sintonizable y el láser de onda continua (CW, *Continuous Wave*). El láser de onda continua es utilizado actualmente en redes ópticas debido a la alta velocidad de transmisión que maneja y a que cuenta con mayor vida útil [54], por lo que se elige este para el presente trabajo de grado. En cuanto a la potencia de transmisión del láser, la recomendación ITU-T G.691 aplicada a redes DWDM sugiere que esta debe estar en un rango de 0 a 6 dBm [58].

La recomendación ITU-T G.691 también sugiere distancias de al menos 60 Km (con un máximo de 120 Km) para enlaces sin amplificación [58]. Además, cabe mencionar que las recomendaciones ITU-T G.698.1 [59] e ITU-T G. Sup39 [60] establecen que se debe trabajar con OPM objetivos de BER $\leq 10^{-12}$ (teórico), factor Q ≥ 7 (teórico), sensibilidad del receptor ≥ -28 dBm con acceso de 2.5 Gbps y sensibilidad del receptor ≥ -24 dBm con acceso de 10 Gbps.

En cuanto al formato de modulación para la red, se elige On-Off de no retorno a cero (NRZ-OOK, *Non-Return to Zero ON-Off Keying*) por su simplicidad y bajo costo de implementación, además del hecho de que con cada canal trabajando a 2.5 Gbps las degradaciones no lineales no suponen problema mayor. En redes DWDM se suele implementar modulación externa, normalmente a través de un interferómetro, esto debido a que se hace un mejor control del chirp y no limita la velocidad del láser [54]. Así, es común utilizar un interferómetro Mach-Zehnder en redes ópticas WDM ya que el láser y el modulador pueden ser integrados en una sola estructura resultando así más eficiente en coste, se elimina la necesidad de controlar la polarización, son muy sensibles para detectar cambios en el índice de refracción causados por variaciones en temperatura y presión sobre la fibra [56, 61].

En las redes ópticas también se requieren filtros que permitan seleccionar y delimitar un rango de frecuencias de trabajo para eliminar el ruido y otras señales no deseadas en el canal, y para separar canales ópticos con espacios reducidos en sistemas WDM [62]. Entre los filtros mas utilizados se encuentran:

- Filtro de Bessel: conocido también como "filtro Thomson", es un filtro optimizado

para proporcionar un retardo de grupo constante en la banda de paso del filtro, mientras que sacrifica la nitidez en la respuesta de magnitud. Los filtros de Bessel a veces se utilizan en aplicaciones en las que un retardo de grupo constante es fundamental, como en el procesamiento de señales de vídeo analógicas [63].

- **Filtro de Coseno Alzado:** es un filtro que se utiliza con frecuencia para dar forma a pulsos en la modulación digital debido a su capacidad para minimizar la interferencia entre símbolos (ISI). La respuesta de frecuencia ilimitada del pulso rectangular lo hace inadecuado para los sistemas de transmisión modernos. Si el pulso rectangular no es la mejor opción para la transmisión de datos con banda limitada, entonces la forma del pulso decaerá rápidamente y proporcionará cruces por cero en los tiempos de muestreo del pulso [64].

Ahora, al ser una red PON, es necesario utilizar una arquitectura que corresponda a las características previamente expuestas para la red planteada. Se sabe que el grupo FSAN es un grupo de tareas conformado por operadores, laboratorios, y proveedores de telecomunicaciones, con el objetivo de poder lograr redes de acceso de fibra óptica de banda ancha a partir de la evolución de las PON; entre las cuales se encuentran tecnologías (previamente mencionadas en el capítulo 1) tales como APON, BPON, EPON, GPON, entre otras; las cuales ofrecen ciertas características que les permiten satisfacer la demanda de capacidad, velocidad y distancia de las redes actuales [65].

Según se dijo en el capítulo anterior, FSAN propone una evolución de arquitecturas de red con NG-PON1 [32] y NG-PON2 [33]. Dentro de NG-PON1 destacan XG-PON y XGS-PON, donde el primero permite soportar 10 Gbps de bajada y 2,5 Gbps [66], mientras que el segundo permite 10 Gbps simétricos [67]. Por su parte, NG-PON2 propone arquitecturas de red completamente de nueva generación a 40 Gbps [33]. Gracias al modelo propuesto, NG-PON1 y NG-PON2 pueden aprovechar las implementaciones ópticas existentes permitiendo así la compatibilidad entre estos y su antecesor GPON, habilitando la coexistencia entre arquitecturas sobre la misma infraestructura. Así, a partir de las características mencionadas previamente, la red inicial coincide con una arquitectura tipo XG-PON.

También se hace necesario tener en cuenta el último tramo de la red que es en donde se hace entrega a los usuarios de cualquier servicio en cuestión. Según lo mencionado en el capítulo 1, FTTx hace referencia a diferentes opciones de arquitectura de redes de banda ancha que emplean fibra óptica para algunos o todos los últimos tramos de conectividad. Gracias a la compatibilidad de FTTx y PON, se hace posible abarcar a través de estas la parte correspondiente a la última milla en la red de tipo XG-PON planteada. En la figura 2.6 se muestran 3 aplicaciones de las mencionadas anteriormente, las cuales también se resumen a continuación.

- **Fibra Hasta el Gabinete (FTTC):** Aquí se tiene un enlace de fibra óptica que va desde la OLT ubicada en la central hasta un DSLAM ubicado cerca de

las instalaciones de los usuarios y el cual normalmente requiere también de una ONU que convierta las señales ópticas a eléctricas.

- **Fibra Hasta el Edificio (FTTB):** El enlace de fibra óptica va desde el OLT hasta la ONU en las oficinas del usuario, es decir, la fibra llega al límite del edificio, como el sótano en una unidad de viviendas múltiples, y la conexión final con el espacio vital individual se realiza a través de medios alternativos, similares a las tecnologías de bordillos o postes.
- **Fibra Hasta el Hogar (FTTH):** Aquí el enlace de fibra óptica va desde el OLT hasta el ONT ubicada en la sede del cliente, lo que normalmente corresponde al límite del espacio habitable, como una caja en la pared exterior de una casa.

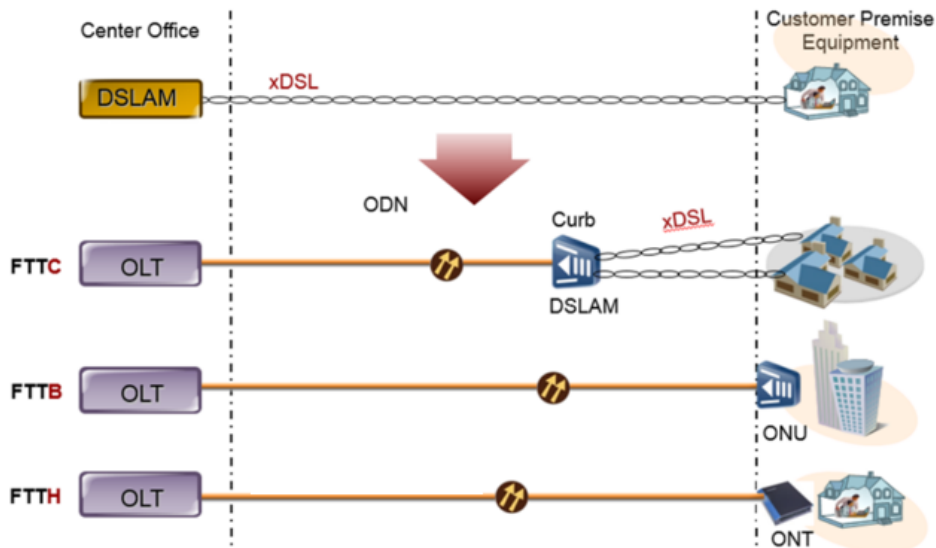


Figura 2.6: Resumen de arquitecturas FTTx. Adaptado de [68].

Es necesario tener en cuenta que para lograr una aproximación más fiel a las implementaciones FTTx y facilitar el análisis de las mismas, se debe diferenciar el segmento de la fibra que corresponde al enlace principal con el segmento para la última milla. Ahora bien, en la red inicial se realiza una aproximación general de FTTx y las características de las diferentes arquitecturas que estas poseen se abarcan posteriormente según sea el caso.

Red MLR

Con tal de poder cumplir con los objetivos propuestos para el presente trabajo de grado, también es necesario definir ciertos aspectos para la obtención un modelo de red MLR a partir del modelo de red SLR propuesto inicialmente. Según se dijo en capítulo 1, las redes MLR utilizan las características brindadas por WDM para proveer canales con diferentes capacidades (por ejemplo 10/40/100 Gbps) lo que las hace altamente

heterogéneas y mas flexibles. Con tal de poder aprovechar la heterogeneidad propia de MLR se debe tener en cuenta aspectos ya mencionados previamente en el capitulo 1 para evitar exceso de degradaciones ópticas por la interacción de los canales a distintas velocidades. Siendo así, se debe considerar un espaciamiento de al menos de 50 GHz entre los canales que trabajen a diferentes velocidades donde dicho valor puede variar con tal de optimizar el uso del espectro en el sistema así como la efectividad del mismo.

La naturaleza de MLR también permite la utilización de distintos formatos de modulación, por lo que es posible obtener un mayor rendimiento de red utilizando formatos mas avanzados para mejorar la eficiencia espectral y la tolerancia a las degradaciones. Para poder elegir formatos de modulación adecuados para los canales a utilizar es necesario primero definir las velocidades mas adecuadas para la red MLR. En diferentes estudios suele utilizarse tasas de bit de 10/40/100 Gbps y para este caso en particular deben de coexistir junto con los canales de la red SLR inicial de 2.5 Gbps. Dado que la red SLR se plantea como una red de arquitectura XG-PON, es posible optar por velocidades que correspondan con las demás arquitecturas tipo NG-PON siguiendo así el modelo propuesto por FSAN para la evolución de las PON. Por tanto, se considera que las velocidades de 10 y 40 Gbps son aptas para ser utilizadas en conjunto con los demás canales de 2.5 Gbps en un escenario MLR.

Ahora, respecto a los formatos de modulación, se ha verificado mediante diferentes estudios que OOK presenta un mayor rendimiento a velocidades de hasta 10 Gbps, y para velocidades mas altas como 20 Gbps, 40 Gbps o 100 Gbps, formatos como el de Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase (DPSK, *Differential Phase Shift Keying*) o Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura diferencial (DQPSK, *Differential Quadrature Phase Shift Keying*) suelen ser mas eficientes [44]. De igual forma, es recomendable utilizar codificación RZ ya que tiene una mejor tolerancia a la no linealidad que el formato NRZ para velocidades de 10 Gbps en adelante [37]. Así, se determino que los formatos de modulación que mejor se adaptan a las velocidades propuestas son:

Velocidad de canal	Tipo de modulación
2.5 Gbps	NRZ-OOK
10 Gbps	RZ-OOK
40 Gbps	RZ-DPSK

Tabla 2.4: Formatos de modulación para esquema MLR

Las recomendaciones relacionadas con NG-PON (ITU-T G.987.1, G.9807.1 y G.989.1) suelen coincidir en que este tipo de redes puede alcanzar una distancia mínima de hasta 60 Km [33, 66, 67]. Sin embargo, el alcance de transmisión en redes MLR también se ve limitado por el canal con mayor tasa de bits haciendo que sea más conveniente optar por el formato de modulación que limite en menor medida dicho alcance. Por tal motivo se escogió DPSK sobre DQPSK a 40 Gbps ya que el primero es menos susceptible a penalidades de potencia las cuales suelen traducirse en un menor alcance de transmisión,

además de que DPSK posee una menor complejidad y puede resultar menos costoso en comparación [69].

Teniendo en cuenta ese condicionamiento del alcance en redes MLR, también puede llegar a precisarse el uso amplificadores que sean capaces de restablecer la amplitud de la señal, con el fin de que ésta esté en el rango de sensibilidad del receptor. Los dos principales tipos de amplificadores ópticos son los amplificadores láser semiconductores y los amplificadores dopados con tierras raras. En redes que implementen WDM suele utilizarse amplificadores de fibra dopada, como los EDFA, al funcionar mejor en este tipo de sistemas que los amplificadores láser [40]. Según lo mencionado de los EDFA en el capítulo 1, se considerara el uso de estos en la red en caso de ser necesarios.

2.4.2. Desarrollo del modelo de simulación

A partir de la información expuesta previamente, se realiza el modelo de simulación inicial partiendo de una velocidad de transmisión nominal de 2.5 Gbps, en 4 canales multiplexados para alcanzar una velocidad de 10 Gbps. Del mismo modo, se definen los parámetros objetivos del sistema según las recomendaciones de la ITU-T: BER $\leq 10^{-12}$, Factor Q ≥ 7 dB, y Sensibilidad del Receptor > -30 dBm.

En la figura 2.7 se aprecia el sistema inicial implementado con el formato NRZ-OOK. Una de las particularidades de la implementación de este formato de modulación, es su fácil configuración, dada la cantidad de elementos utilizados para generar una forma de onda NRZ. El transmisor requiere un driver NRZ rectangular, un láser de modulación externa y un modulador MZ de seno cuadrado. En el medio de transmisión se tiene una fibra tipo Corning SMF-28e y el splitter. En la sección del receptor solo se requiere un filtro eléctrico y óptico centrado a la frecuencia de trabajo y un receptor con una sensibilidad máxima de -30 dBm. Se destaca también la fibra de ultima milla cuya longitud puede variar desde unos pocos metros hasta algunos kilómetros.

La tabla 2.5 resume las características iniciales del sistema en cuanto a sus elementos y variables susceptibles a ser manipuladas en la adaptación del mismo.

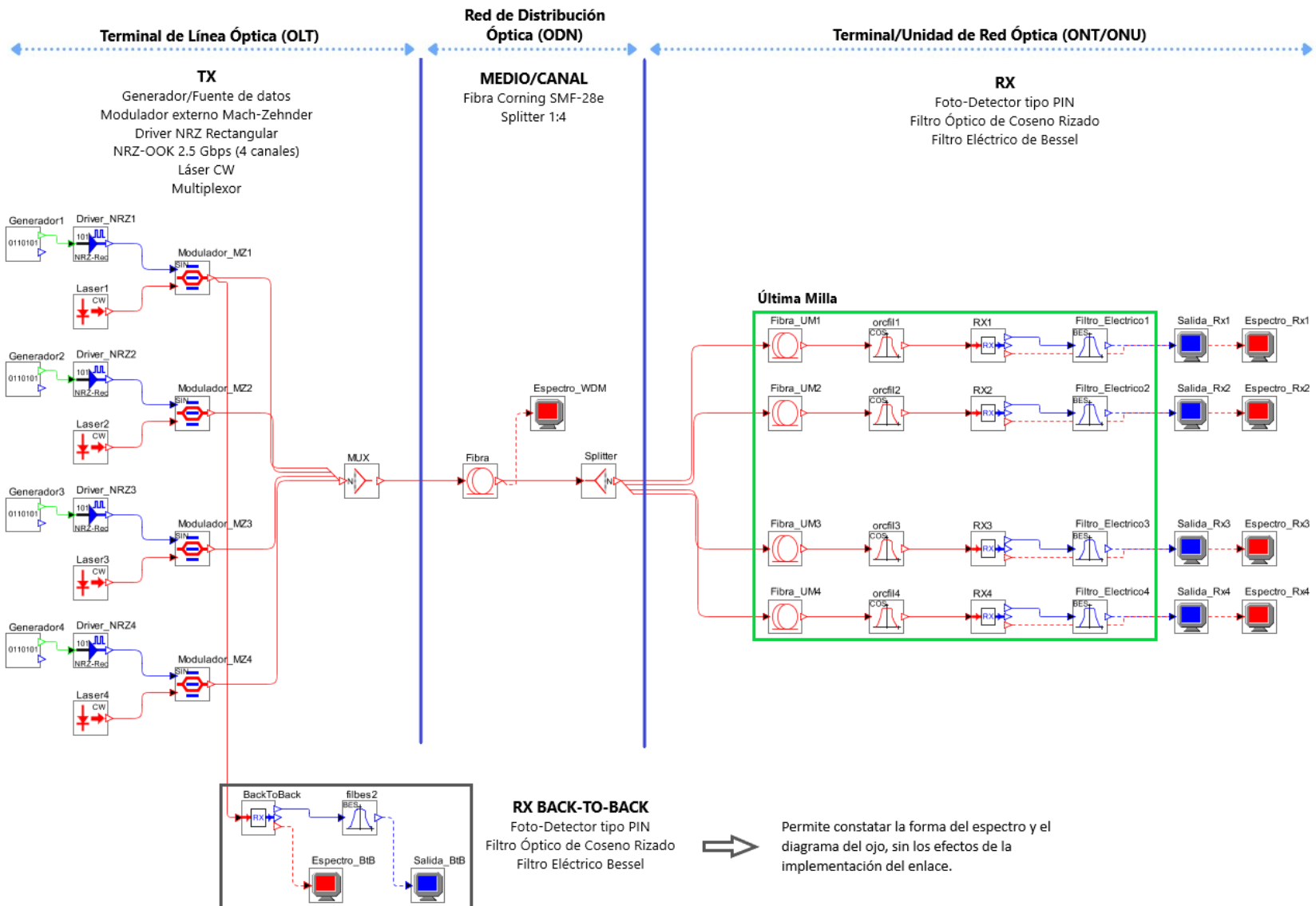


Figura 2.7: Escenario de simulación.

Sección	Elementos	Variables
Tx	Filtro de Bessel Laser CW, 1 MHz de FWHM, 0 dBm Banda C (1530-1560 nm) Modulador óptico Mach-Zehnder 100 GHz de espaciamento	Acceso nominal: 2.5/10/40 Gbps Potencia de los canales Formatos de modulación: NRZ-OOK, RZ-OOK y RZ-DPSK
Medio	Estándar ITU-T G.652 Fibra Corning SMF-28e	Numero de Canales Espaciamento entre canales Distancia del enlace Uso de amplificadores (opcional) Uso de fibra de compensación DCF
Rx	Sensibilidad de -30 dBm Filtro eléctrico tipo Bessel Filtro óptico de coseno rizado	Tipo de aplicación FTTx Longitud de cable de última milla Numero de usuarios finales Splitter

Tabla 2.5: Características del sistema óptico.

Transmisión

En el lado del transmisor se hace uso de un láser de onda continua con FWHM (*Full Width at Half Maximum*) = 1 MHz, moduladores ópticos externos Mach-Zehnder y un generador de datos a 2.5 Gbps. En la figura 2.8 se puede observar las propiedades del láser en la herramienta OptSim, y en la figura 2.9 se muestra el bloque de transmisión.

Parameter	Value	Units	Range
Center emission frequency	= 194.0	THz	[193.09949, 195.72949]
Center emission wavelength	1545.32195	nm	[1531.66682, 1552.528...
Source Status	1		[0, 1]
CW Power	0.0	dBm	[-3000, 3000]
CW Power	1.0	mW	(0, Inf)
FWHM Linewidth	1.0	MHz	[0, Inf)
-20 dBm Linewidth	9.94987	MHz	[0, Inf)
Initial Phase	"Random"		
Deterministic Initial Phase	0.0	rad	[0, 6.28319]
Noise Type	"Ideal"		
Relaxation Oscillation peak Frequency	5.0	MHz	(0, Inf)
Relaxation Oscillation Peak Overshoot	7.0	dB	(0, Inf)

Figura 2.8: Propiedades del láser para un canal.

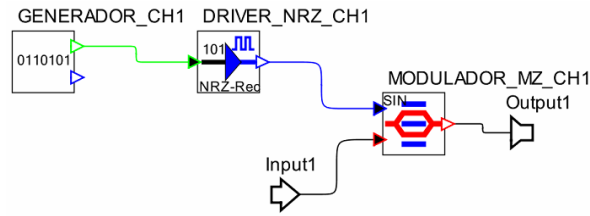


Figura 2.9: Transmisor para Canal 1.

Adicionalmente, se emplea una configuración Back-to-Back que permite obtener las condiciones iniciales de funcionamiento del sistema de formato NRZ-OOK con respecto a la BER, OSNR, y los diferentes parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo. Los resultados obtenidos corresponden a las medidas en un enlace óptico ideal en el que no se consideran imperfecciones de canal, por tal razón serán considerados durante el transcurso del análisis de resultados que arroje el trabajo de grado, como el patrón de referencia empleado para evidenciar el efecto negativo originado por las diversas degradaciones.

Medio de transmisión

En el medio de transmisión se hizo uso de la fibra tipo Corning SMF-28e, con sus respectivas pérdidas de atenuación y coeficiente de dispersión. En cuanto al splitter, se trabajara de forma ideal para evitar inconvenientes en el análisis debidos a la atenuación, tanto en este modelo inicial como para la red que se obtenga posteriormente. La figura 2.10 muestra el espectro óptico de los cuatro canales dispuestos.

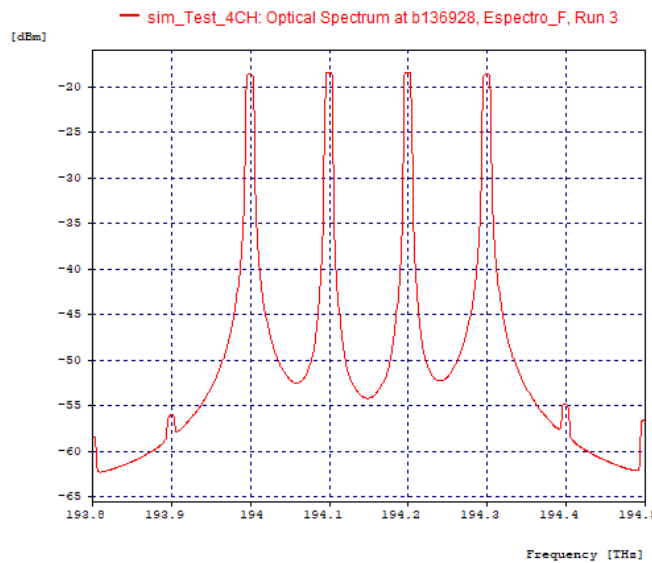


Figura 2.10: Espectro óptico de los 4 Canales.

Recepción

Al recibir las señales de los cuatro canales, estas pasan a través de filtros ópticos que permitan diferenciar cada una de ellas. En cuanto al receptor en sí, Optsim dispone de 3 tipos de receptores ópticos: *Sensitivity Optical Receiver*, *Single Channel Optical Receiver* y *Compound Optical Receiver*. Para el modelo actual se escogió el *Sensitivity Optical Receiver* puesto que simula un receptor óptico completo (incluye el fotodetector, el amplificador y el filtro post-detección) y está basado en la especificación de la sensibilidad del receptor. En la figura 2.11 se observa el bloque de recepción.

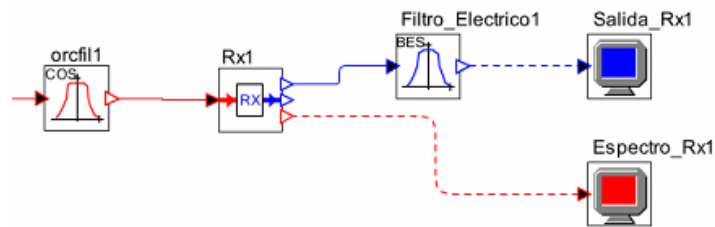


Figura 2.11: Recepción para Canal 1.

En la figura 2.12 se observan los parámetros del receptor utilizado. La sensibilidad nos indica el umbral de detección de la señal la cual se fija a 30 dBm, mientras que se espera obtener al menos una BER de 10^{-12} . También se observan otros parámetros como la Tasa de Bit, que para el esquema general se trabaja en 2.5 Gbps con un pulso NRZ rectangular indicado en el parámetro *Optical test pulse shape*.

Parameter	Value	Units	Range
Bit Rate	2.5	Gbit/s	(0, Inf)
Optical test pulse shape	"NRZ_Rectangular"		
Duty Cycle	0.5		(0, 1]
Normalized FWHM	0.5	fraction of bit...	(0, 1]
Sensitivity under test condition	-30	dBm	(-54.9266, 1e+32]
Sensitivity reference error probability	1.0E-12		(1e-015, 0.1)
Overall Receiver Responsivity	1.0	A/W or V/W	

Figura 2.12: Propiedades del receptor.

Resultados del modelo inicial

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para el modelo inicial los cuales servirán como referencia durante la realización del presente trabajo de grado. En primera instancia se obtienen algunos datos de la configuración Back-to-Back para saber

como se comporta el sistema en condiciones ideales. Siendo así, se obtienen el diagrama del ojo correspondiente y el espectro de la señal en un rango de frecuencias menor para poder apreciarlo mas detalladamente (ver figura 2.13). Igualmente, se obtienen los valores de BER, Jitter y factor Q (ver tabla 2.6)

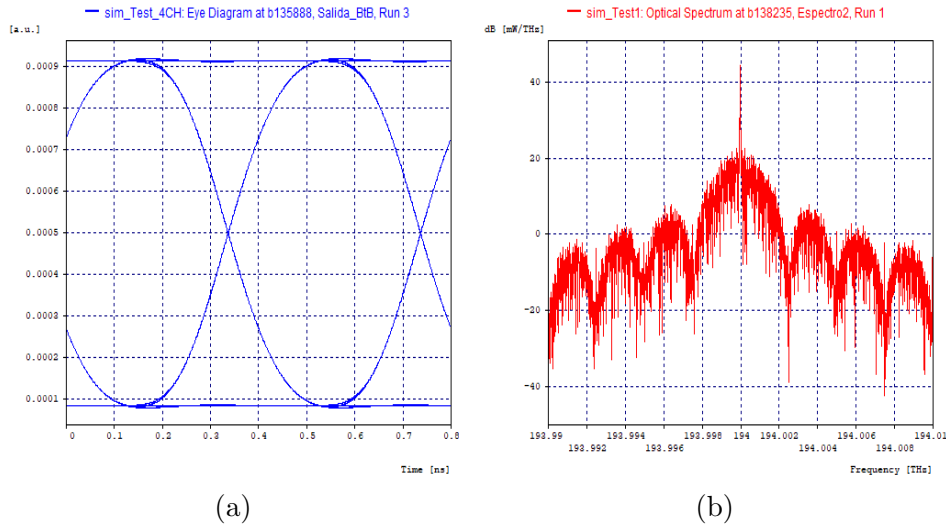


Figura 2.13: (a) Diagrama del ojo en Back-to-Back. (b) Espectro Back-to-Back.

BER (dB)	Jitter (ns)	Factor Q (dB)
40	0.0606158	10^{-40}

Tabla 2.6: Parámetros OPM en Back-to-Back.

Para un primer análisis comparativo se presentan las condiciones iniciales del sistema sin amplificación. Según las recomendaciones se define una distancia objetivo para el enlace de 80 Km y se considera 1 Km en la ultima milla para efectos prácticos. Así mismo, se toma el canal de menor frecuencia del sistema que en este caso corresponde a 194.0 THz. En la figura 2.14, se aprecian las condiciones iniciales de funcionamiento del sistema, con respecto al diagrama del ojo, el espectro óptico propagado y recibido alrededor de los 194.0 THz. Igualmente en la tabla 2.7 se listan algunos de los parámetros OPM obtenidos para este canal.

Como se aprecia en la tabla 2.7, el sistema presenta un valor de tasa de errores bastante bajo, lo que se ve reflejado también en el elevado factor de calidad; donde además se evidencia una potencia de recepción que está por dentro de los umbrales de sensibilidad del receptor que corresponde a -30 dBm. Estos parámetros de monitoreo óptico, permiten deducir que hasta este punto no es necesaria la amplificación ya que el sistema no presenta atenuación o degradaciones excesivas.

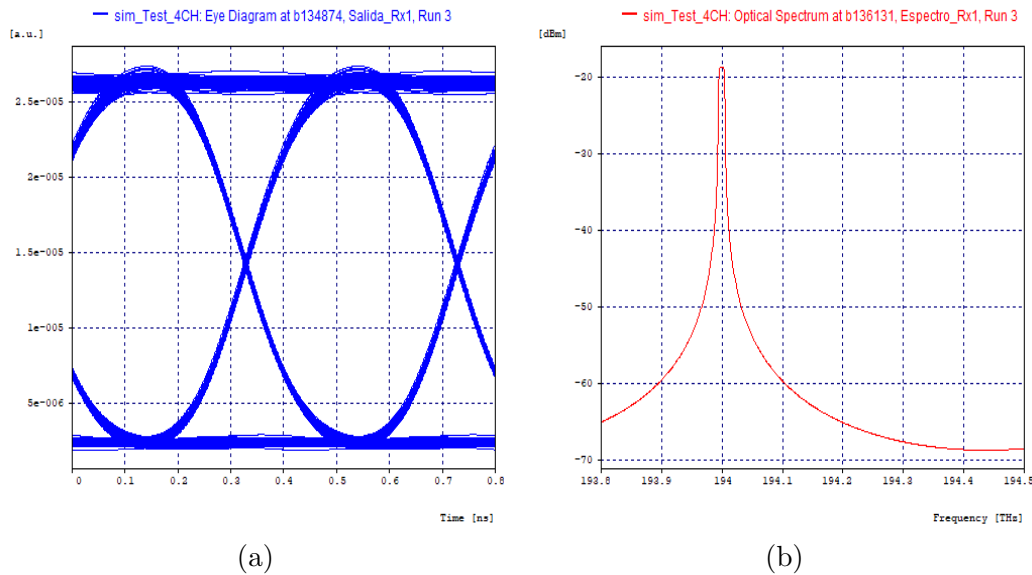


Figura 2.14: (a) Diagrama del ojo en Rx1. (b) Espectro en Rx1.

Distancia enlace (Km)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)
80	-18.6189	10^{-40}	35.5056	0.0654338	48.2340

Tabla 2.7: Parámetros OPM iniciales.

Respecto a la OSNR, esta mide la relación señal a ruido óptico de un sistema (en dB) y guarda una relación directa con la BER. A una distancia de 80 Km de fibra y 1 km de última milla se obtiene una OSNR de 48.16 dB, un valor que no corresponde con la OSNR real del canal. Para obtener el valor real de OSNR se ajustan los marcadores del eje “Y” en la sensibilidad del receptor de -30 dB y a la potencia obtenida en recepción de -18.6189 dB, con lo que el rango entre ambas líneas paralelas azules o *DeltaY* corresponde a la OSNR real en dB (ver figura 2.15), debido a que desde el piso de ruido cerca de -70 dB hasta -30 dB el receptor no tiene la capacidad de percibir señales. A partir de esto, se obtiene una OSNR real de 11.3810 dB el cual es un valor bastante bueno ya que se encuentra muy por encima del piso de ruido evitando que la señal llegue a degradarse por la influencia de dicho ruido.

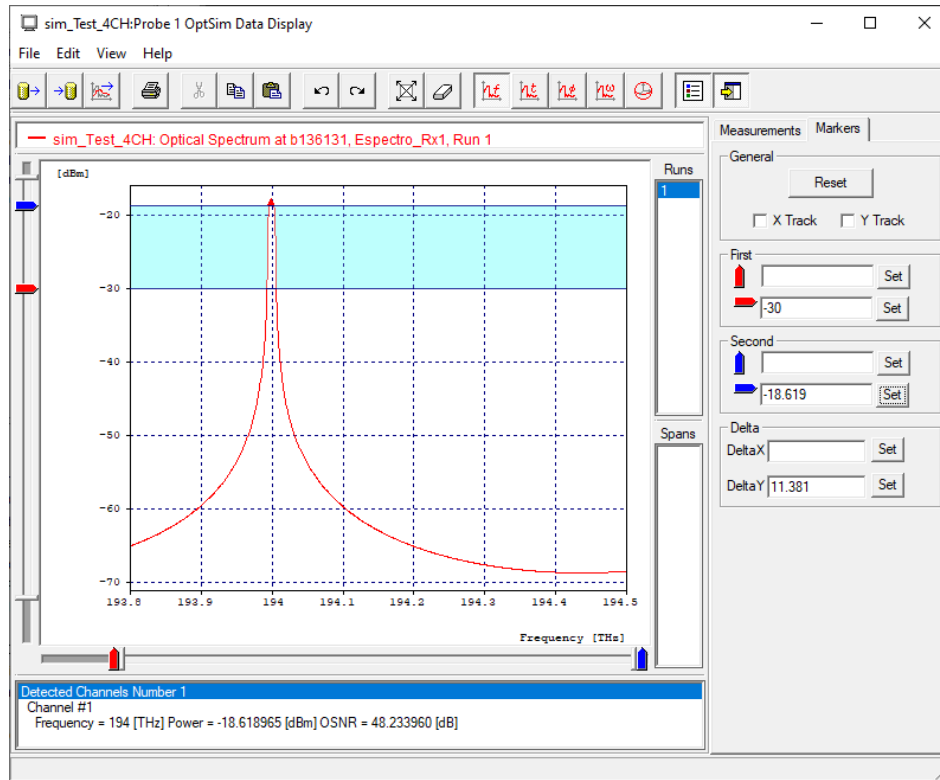


Figura 2.15: Medición de OSNR real.

Por otra parte, es posible evidenciar cierta influencia de efectos no lineales por las componentes adicionales en el espectro de los 4 canales (ver figura 2.10). Normalmente las componentes adicionales se producen por efecto de Mezcla de Cuatro Ondas (FWM, *Four Wave Mixing*) y para este caso dichas componentes poseen diferente amplitud, pero esto no implica mayor riesgo para el sistema dado que la magnitud de estas componentes es bastante reducida como para interferir con la señal.

Tampoco se evidencian cambios considerables sobre las 4 longitudes de onda o canales dados por otros efectos no lineales comunes como Auto-modulación de Fase (SPM, *Self-phase Modulation*) o Modulación de Fase Cruzada (XPM, *Cross-phase Modulation*); donde en el primero, el pulso transmitido sufre un chirp de frecuencia debido al cambio del índice de refracción dependiente de la intensidad; mientras que el segundo ocurre cuando dos o más canales ópticos son transmitidos simultáneamente en una fibra, de manera que la potencia de un canal puede afectar a la fase de otro canal (lo que genera ensanchamiento de pulsos cruzados) [69]. Así, lo anterior indica que se están usando niveles de potencia adecuados dentro de una distancia de enlace óptima con lo que se puede evitar mayores problemas por efectos no lineales.

Siguiendo el mismo procedimiento, se realizaron simulaciones para las demás distancias dentro del rango que sugieren las recomendaciones, desde 60 hasta 120 Km considerando ultima milla (1 Km), cuyos resultados se muestran en la tabla 2.8.

Distancia enlace (Km)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
60	-14.613	10^{-40}	36.8379	0.0696097	47.9314	15.2284
70	-16.623	10^{-40}	35.2809	0.0640233	48.0626	13.2123
80	-18.460	10^{-40}	35.5056	0.0654338	48.2340	11.3810
90	-20.360	10^{-40}	33.9675	0.0655591	48.4881	9.51312
100	-22.253	10^{-40}	29.7269	0.0694683	48.3007	7.60703
110	-24.200	10^{-40}	26.7266	0.0706246	47.8513	5.63642
120	-26.095	10^{-40}	23.1245	0.0763822	48.0686	3.74602

Tabla 2.8: Parámetros OPM para rango de 60-120 Km.

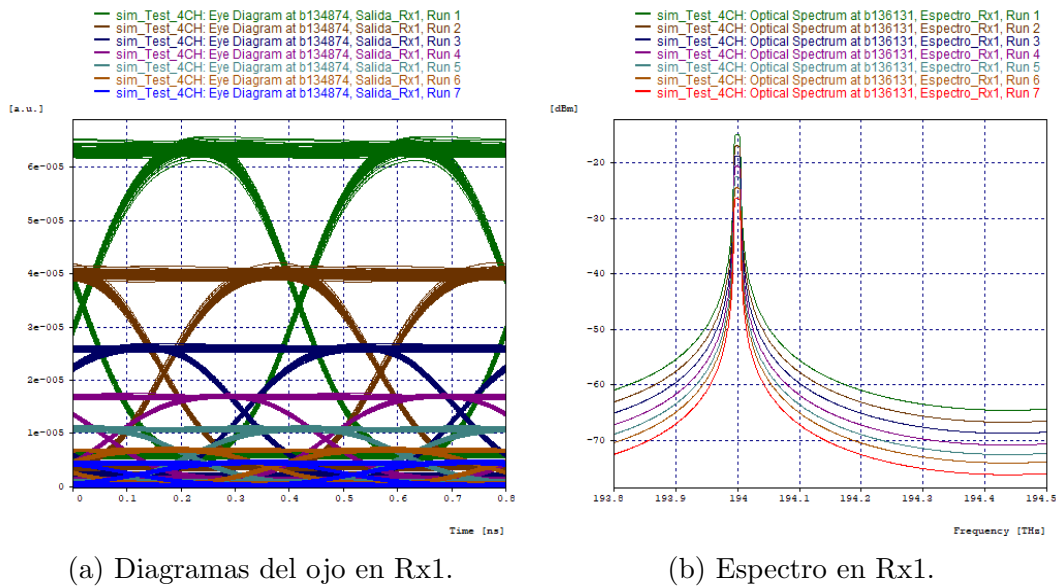


Figura 2.16: Gráficos para distancias de enlace de 60-120 Km.

Estos resultados permiten comprobar el efecto que tiene la variación de la distancia del enlace en redes como las del modelo planteado. Como es de esperarse, la potencia recibida disminuye a medida que la distancia del enlace aumenta y así mismo sucede con el valor real de la OSNR. En cuanto a la BER, se destaca el hecho de que esta se mantiene en un valor bastante bajo en los casos presentes por lo que el sistema en general presenta un buen rendimiento ante los errores. Por otra parte, puede verse que el factor Q incrementa muy levemente al pasar de 70 a 80 km aunque en general tienda a disminuir, y el Jitter tiende a aumentar luego de disminuir un poco a los 70 Km.

En las figuras 2.16a y 2.16b puede comprobarse la atenuación que sufre la señal a media que la distancia incrementa. En los diagramas del ojo se aprecia como la apertura de cada uno de estos disminuye a mayor distancia así como los diferentes retrasos en cada caso dado que ninguno de los cruces de un gráfico coincide exactamente con

los otros. En cuanto a los gráficos del espectro, puede verse que cada uno de los picos tiende a ser menor al incrementar la distancia y el piso de ruido en cada caso tiende a estar a menor valor.

La información obtenida da a entender que los efectos lineales como la dispersión cromática (CD) no están afectando en gran medida al sistema por lo que por el momento no es necesario recurrir a métodos de compensación como la rejilla de Bragg. Esto en parte puede deberse a otros efectos como el chirp generado por la SPM, el cual puede compensar la CD ya que posee signo contrario al que se genera por la dispersión cromática; lo que a su vez explicaría el hecho de que la SPM no se evidencie significativamente en los gráficos previos.

Ahora, dado que los canales internos y externos en sistemas WDM pueden llegar a comportarse un tanto diferente, también se obtuvieron los datos para uno de los canales internos del sistema, el cual para esta caso es el Canal 2. Los datos obtenidos junto con los gráficos del espectro y del diagrama del ojo del canal 2 se muestran a continuación.

Distancia enlace (Km)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
60	-14.696	10^{-40}	35.2496	0.0703197	54.5451	15.2144
70	-16.515	10^{-40}	33.7972	0.0738848	54.8633	13.4158
80	-18.444	10^{-40}	34.4498	0.0646159	55.1910	11.4911
90	-20.406	10^{-40}	32.7078	0.0691331	54.5634	9.52375
100	-22.299	10^{-40}	29.3722	0.0723184	54.7876	7.61798
110	-24.180	10^{-40}	26.9251	0.0751793	55.1688	5.74275
120	-26.121	10^{-40}	23.1673	0.0732726	54.6170	3.81271

Tabla 2.9: Parámetros OPM para rango de 60-120 Km (Canal 2).

De los datos del canal 2 puede verse que existen pequeñas variaciones comparados con las del canal 1. Para el caso las variaciones de la potencia en recepción y de OSNR no son muy significativas, pero el Factor Q obtenido llega a tener alrededor de 1 dB de diferencia en relación con el canal externo, lo que se refleja en un desempeño un poco menor en recepción. El Jitter tiende a variar un tanto mas y a ser un poco mayor para el canal interno que para el canal externo por lo que la señal del interno puede llegar algo mas desfasada siendo un tanto mas susceptible a un aumento en la BER. Entonces, por ahora no hay cambios lo suficientemente significativos como para que exista una diferencia considerable entre los canales internos y externos por lo que es posible realizar un debido análisis a partir de la información que se obtenga de cualquiera de ellos.

La caracterización y el análisis realizados hasta este punto permitieron identificar el comportamiento propio de una red SLR-DWDM y sentar las bases que permitirán posteriormente la migración de la misma a una red del tipo MLR-DWDM con tal de

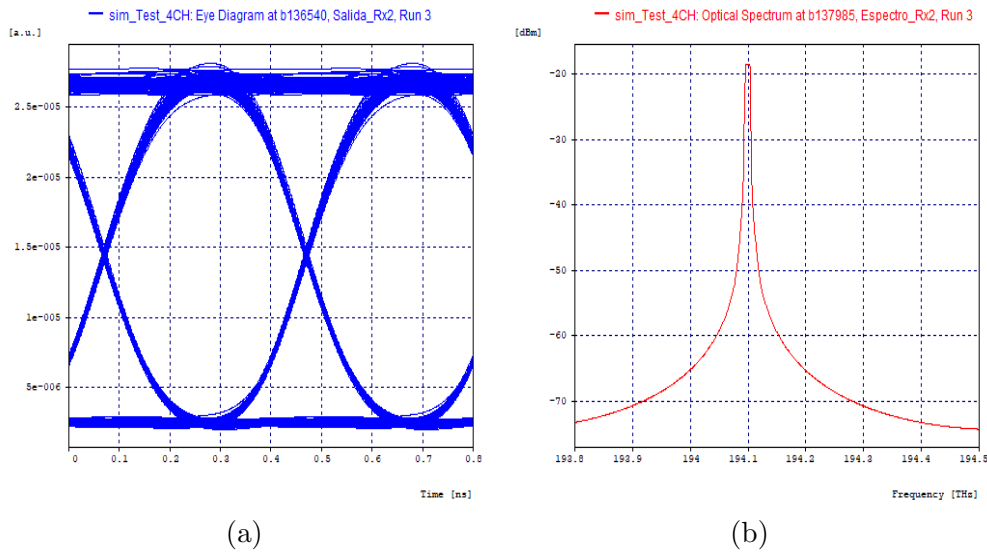


Figura 2.17: (a) Diagrama del ojo en Rx2. (b) Espectro en Rx2.

poder cumplir con el primer objetivo específico propuesto para el presente trabajo de grado: Así, según los resultados del modelo inicial, se cree que es posible realizar la adaptación del modelo actual a un modelo con velocidades de transmisión heterogéneas teniendo en cuenta el condicionamiento que esto conlleva sobre las características y el desempeño de la red como ya se mencionó previamente.

2.5. CASOS DE ESTUDIO

Una vez identificadas las características generales del modelo, se procede a definir los casos de estudio que permitirán realizar un análisis comparativo 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. En la figura 2.18 se presenta un diagrama general de los casos de estudio.

En primera instancia se quiere modelar y simular una red MLR basada en los estándares definidos por la ITU-T (tales como G.694.1, G.691, G.698.1, G.Sup39), partiendo de las características generales de la red SLR simulada en la sección 2.4.2. Así, los casos de estudio se dividen principalmente en 3 partes basándose en las velocidades del modelo propuesto por FSAN para la evolución de las PON; donde se tendrá una red MLR tipo 1 para velocidades de transmisión de 2.5/10 Gbps sugeridas en XG-PON y XGS-PON, una red MLR tipo 2 para velocidades de 10/40 Gbps sugeridas en XGS-PON y NG-PON2, y una red MLR tipo 3 con velocidades de 2.5/10/40 Gbps sugeridas en XG-PON, XGS-PON y NG-PON2.

A partir de ello, se deben caracterizar los requerimientos de las arquitecturas FTTx a implementar para cada tipo de red MLR propuesta. El FTTH-Council considera en

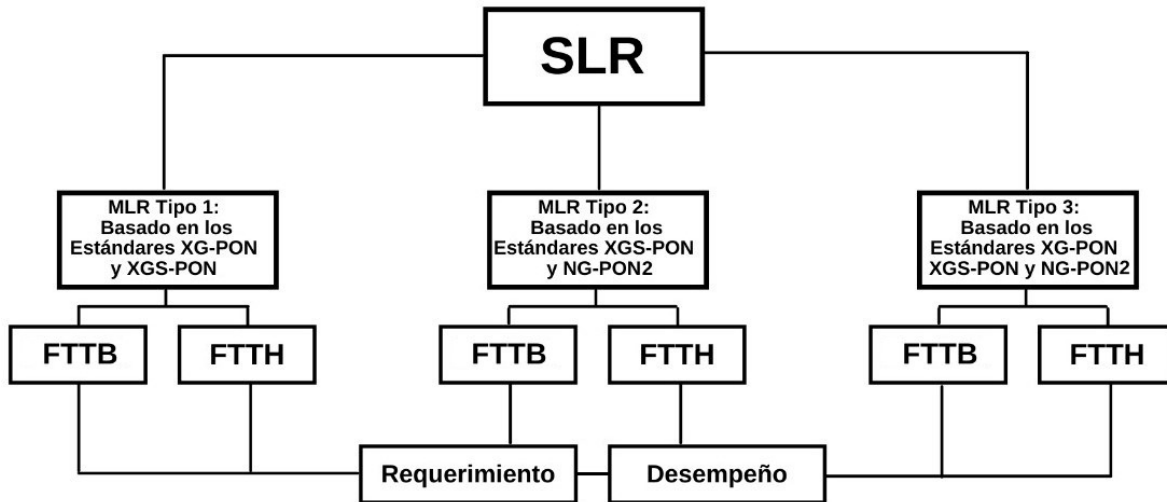


Figura 2.18: Casos de estudio.

su último análisis de predicciones de mercado como arquitecturas de interés a FTTB y FTTH [70], y para el caso actual también se considera relevante tener presente las características de la arquitectura FTTC que ya se han venido mencionando previamente (como la longitud de la última milla) las cuales en general pueden coincidir con las de FTTB según sea el caso. A diferencia de FTTH, en FTTB la fibra óptica no llega directamente hasta el usuario teniendo que recurrir a medios alternativos como el par trenzado o el cable coaxial para la distribución de servicios desde un gabinete hasta el usuario por lo que para facilitar su análisis en una herramienta como Optsim que se centra en el uso de fibra óptica como medio de transmisión, no se abordaran medios distintos de la fibra óptica (tales como el cobre) para el presente trabajo. Según esto, la evaluación del desempeño de cada tipo de red MLR propuesta se hace para las arquitecturas de red de banda ancha FTTx escogidas (FTTH y FTTB).

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

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE REDES ÓPTICAS MLR-DWDM IMPLEMENTANDO ARQUITECTURAS FTT_x

En el presente capítulo se desarrolla el proceso para poder realizar el análisis de requerimientos y del desempeño de redes ópticas MLR-DWDM al implementar diferentes arquitecturas FTT_x, esto según la metodología y los casos de estudio definidos en el capítulo 2. Así, se realiza la migración del modelo de red inicial a los diferentes tipos de red MLR propuestos según las velocidades planteadas en los estándares NG-PON, se caracterizan los requerimientos para la implementación de las arquitecturas FTT_x en cada caso, y se evalúa el desempeño según los parámetros OPM que se consideren de mayor relevancia para el presente trabajo.

3.1. RED MLR BASADA EN LOS ESTÁNDARES XG-PON Y XGS-PON

En este primer caso de estudio se evalúa la red básica MLR desde las velocidades de transmisión sugeridas en los dos estándares de NG-PON1, donde el primero es XG-PON1 (conocido también como 10G-PON) que presenta una transmisión asimétrica con 10 Gbps para downlink y 2,5 Gbps para uplink; y el segundo es XGS-PON, que admite transferencias de datos simétricas de 10 Gbps de mayor velocidad y hace parte de la familia de estándares conocidos como PON con capacidad Gigabit (GPON).

La simulación se realiza mediante la adaptación del modelo de red inicial, utilizando canales totalmente híbridos en cuanto a su velocidad de transmisión de bajada, las cuales a su vez estarán basadas en lo sugerido por los estándares XG-PON y XGS-PON.

3.1.1. Análisis para última milla basada en FTTB

Se parte del modelo de red inicial expuesto en el capítulo 2, el cual posee un enfoque general de arquitecturas FTT_x por lo que ahora es necesario centrar dicho enfoque sobre FTTB que es la arquitectura de interés actualmente.

En la figura 3.1 se presentan diferentes arquitecturas FTT_x, entre las cuales se encuentra FTTB. Aquí se destaca que la conexión presente en FTTB puede realizarse hasta grandes edificaciones o a un conjunto de ellas por lo que la longitud de la fibra

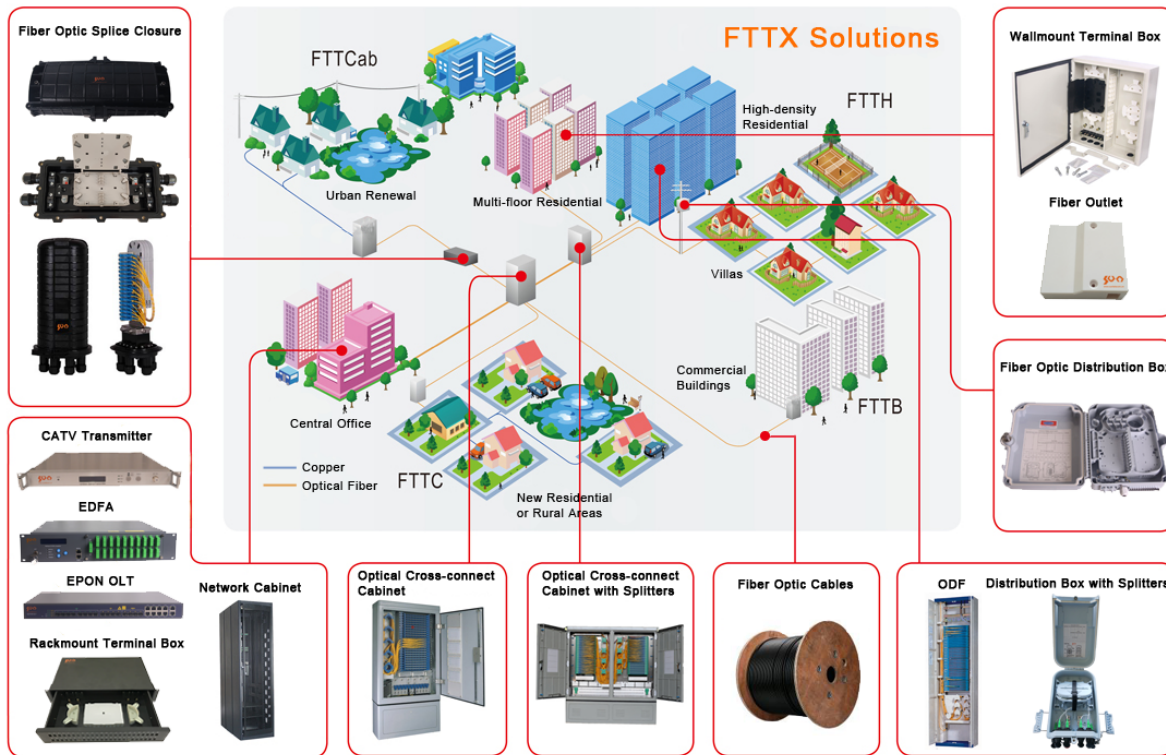


Figura 3.1: Arquitecturas FTTx. Tomado de [71].

en la red puede variar considerablemente en el último tramo dependiendo del caso en particular. Así mismo, los servicios se deben distribuir dentro de los edificios a través de medios alternativos como el par trenzado para garantizar la conexión con el usuario final.

A partir de lo sugerido en el modelo inicial, la red MLR utilizará fibra tipo Corning SMF-28e para un enlace de 80 Km y se considera el tramo adicional de última milla propio de cualquier aplicación FTTx. Según lo dicho previamente, en FTTB la fibra óptica no llega directamente hasta el usuario si no hasta una caja de distribución, por lo que la longitud de la fibra óptica en el último tramo no es exactamente igual a la última milla. Por tal motivo, se parte de las características de las FTTx expuestas en los capítulos previos para definir una longitud inicial de 900 m de fibra para la última milla con tal de tener una aproximación mas enfocada a lo que es FTTB.

Se plantea el modelo de red MLR para un número determinado de canales que permita un análisis adecuado tanto para el caso de estudio actual como para los casos posteriores. Se considera que mantener 4 canales de 2.5 Gbps puede facilitar la adaptación desde la red SLR a una de tipo MLR, por lo que se requiere agregar nuevos canales que utilicen velocidades de transmisión de 10 Gbps en downlink y permita a la red trabajar con tasas de transmisión heterogéneas.

Según el estándar ITU-T G.694.1, los sistemas DWDM se caracterizan porque están en la banda C y el espaciamiento entre canales es de 100 GHz (0,8 nm) o menos, definiendo el ancho de banda total ocupado por un determinado número de canales [9]. Debido a este espaciamiento, DWDM puede incorporar ocho o más canales dentro de la banda de los 1550 nm [7]. Así, se decide trabajar con un total de 8 canales en la red, donde 4 de ellos trabajan con velocidad de transmisión 2.5 Gbps y los 4 restantes trabajan con una velocidad de transmisión 10 Gbps, manteniendo inicialmente un espaciamiento de 100 GHz. Además, a partir de la caracterización de red MLR hecha en el capítulo 2, los canales de 2.5 Gbps emplearán modulación NRZ-OOK y los canales de 10 Gbps emplearán modulación RZ-OOK.

$$f_n : 194 + 0,1 * (n - 1) \text{ [THz]} \quad (3.1)$$

La ecuación 3.1 resume el plan de frecuencias para el modelo actual, donde f_n es la frecuencia de un canal dado y n es el número del canal correspondiente.

Por otro lado, se debe tener en cuenta la organización de los canales de modo que estos no se vean afectados mayormente por algún tipo de interferencia. A partir de los 10 Gbps, los canales son más susceptibles a interferencia tipo ICI debido a que poseen mayor ocupación en el espectro y pueden llegar a superponerse antes que los canales de menor tasa de bits cuando se recurre a medidas como reducir el espaciamiento para mejorar la eficiencia espectral [69]. Igualmente, los resultados obtenidos en el modelo inicial del capítulo 2 indican que los canales que trabajan en frecuencias intermedias son más susceptibles a interferencia debido a cierto aumento en el Jitter en comparación con un canal externo.

Según lo anterior, los efectos producidos por interferencia pueden ser más críticos para los canales de 10 Gbps que para los de 2.5 Gbps, por lo que se considera que es más factible acomodar los canales de tal forma que aquellos de 10 Gbps correspondan a los 2 primeros canales (canal 1 y 2) y a los 2 últimos (canales 7 y 8), mientras que los canales con velocidades de 2.5 Gbps serán aquellos que ocupan las frecuencias intermedias (canales 3, 4, 5 y 6).

La red tendrá inicialmente una carga de 8 usuarios y ya que se tiene originalmente un splitter 1:4, es necesario modificar el diseño de red para que admita un mayor número de usuarios, lo cual es posible si se reemplaza el splitter por uno de mayor capacidad o se agrega un segundo nivel de split en la red. Los operadores suelen decantarse por la segunda opción para evitar que los costos aumenten mucho, por lo que aquí se agrega splitters 1:16 de segundo nivel para satisfacer la carga inicial de usuarios y permitir que la red pueda expandirse hasta un total de 64 de ellos, que es el nivel de división óptica máximo que permite un divisor para redes PON [27, 72]. Por otro lado, no se hará uso de amplificadores por el momento con el fin de analizar si la red puede llegar a requerir de estos o no. En la figura 3.2 se presenta el modelo inicial de red MLR y los bloques de transmisión se representan en las figuras 3.3 y 3.4.

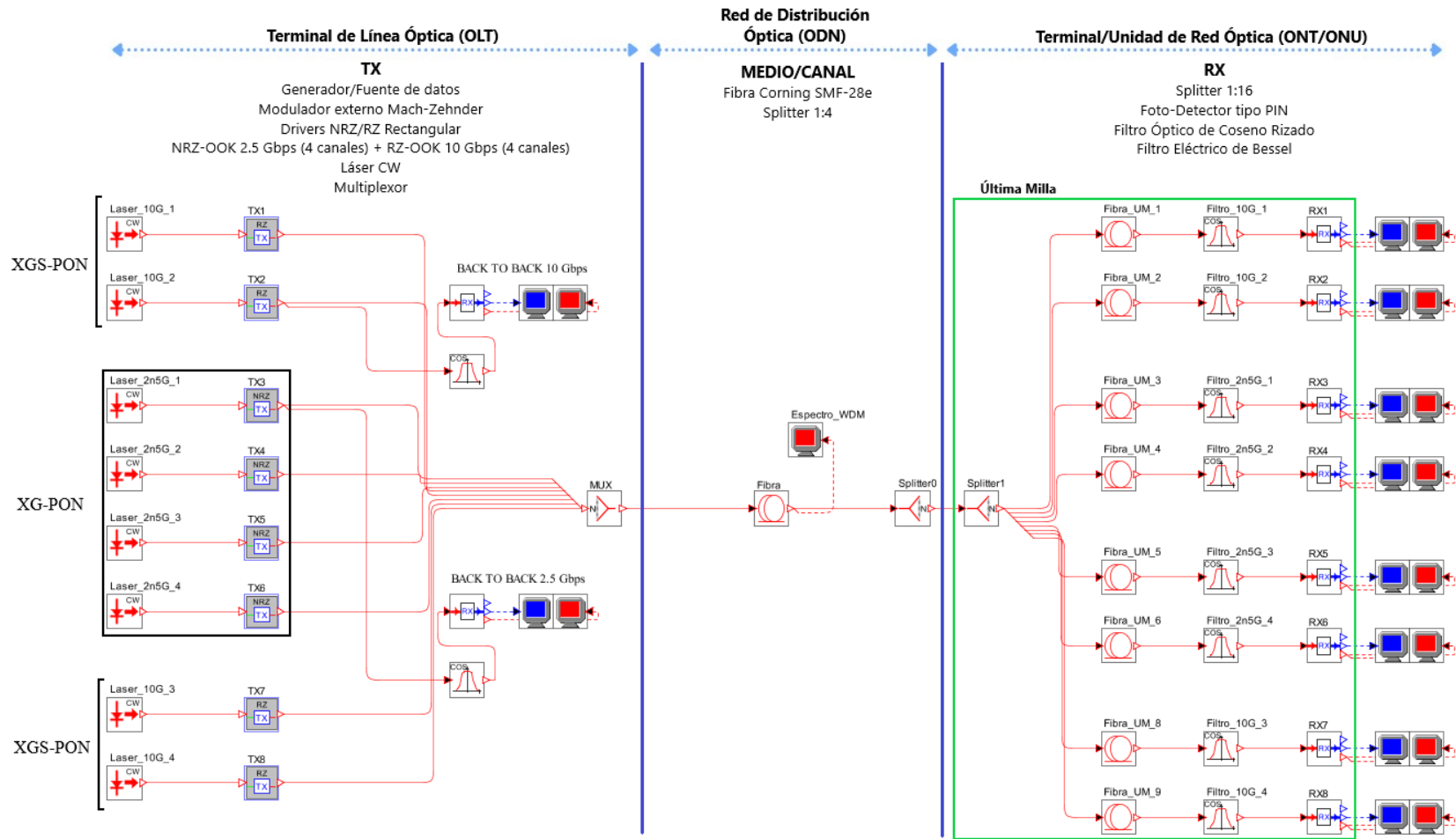


Figura 3.2: Red MLR inicial.

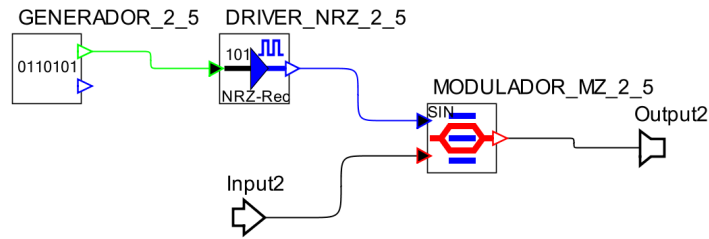


Figura 3.3: Bloque de transmisión para canales de 2.5 Gbps.

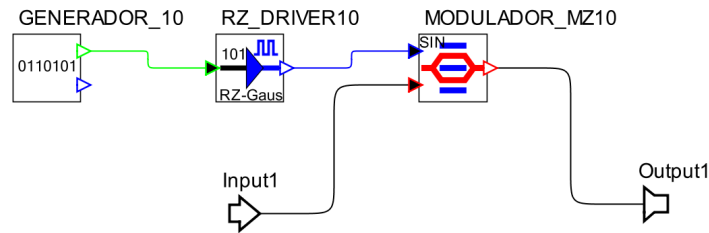


Figura 3.4: Bloque de transmisión para canales de 10 Gbps.

Como se puede apreciar, la diferencia principal entre los 2 bloques de transmisión es que se reemplaza el driver NRZ por uno RZ para los canales de 10 Gbps según se planteo previamente, además de que la velocidad del generador se ajusta a la requerida en cada caso. Sin embargo, el diseño en general se mantiene debido a que ambos tipos de transmisores implementan esencialmente modulación OOK para el caso actual.

En la tabla 3.1 se resumen los parámetros iniciales implementados para la red actual, los cuales se obtienen en gran parte de la información presentada durante la caracterización del modelo inicial (potencia de transmisión, tipo de modulación, sensibilidad, etc.), así como la caracterización general de red MLR realizados en el capítulo 2. Cabe mencionar que, según se dijo en el capítulo 2, el *Sensitivity Optical Receiver* de Optsim posee internamente un filtro post detección de Bessel por lo que es posible omitir el filtro eléctrico adicional utilizado en el modelo inicial.

Parámetros	Valor
Número de Canales	8
Potencia de transmisión a 2.5 Gbps	0-6 dBm
Potencia de transmisión a 10 Gbps	0-6 dBm
Longitud de Onda	1530 – 1560 nm
Tipo de Modulación Óptica a 2.5 Gbps	NRZ-OOK
Tipo de Modulación Óptica a 10 Gbps	RZ-OOK
Sensibilidad del Receptor	-30 dBm
Modulador Óptico	Mach-Zehnder
Fibra Óptica	Corning SMF-28e

Tipo de Filtro Óptico	Coseno Rizado
Tipo de Filtro Eléctrico	Bessel

Tabla 3.1: Características iniciales de red MLR tipo 1.

Desempeño

Una vez caracterizados los requerimientos, se procede a realizar el análisis de desempeño en el enlace de bajada de la red MLR. En la figura 3.5 se presenta el espectro óptico de la señal multiplexada:

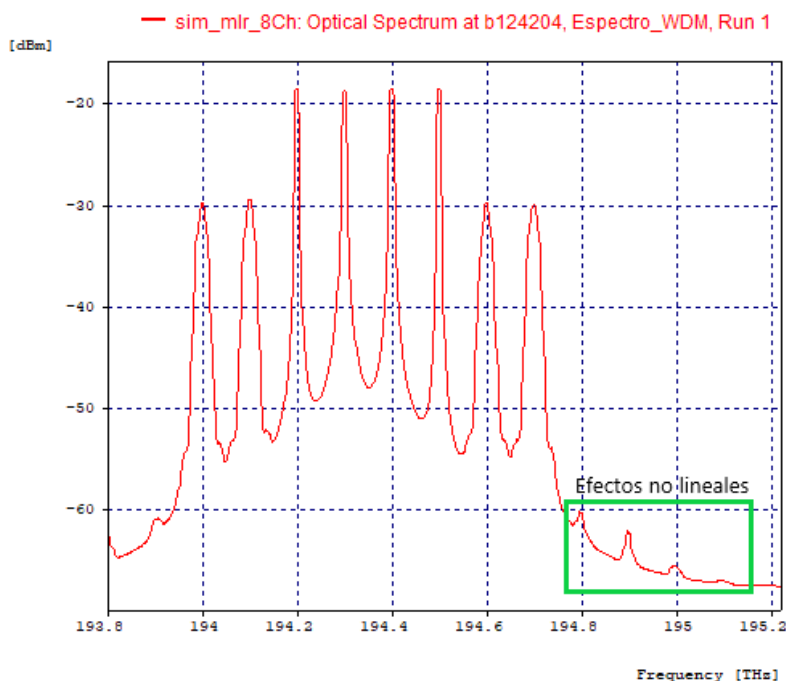
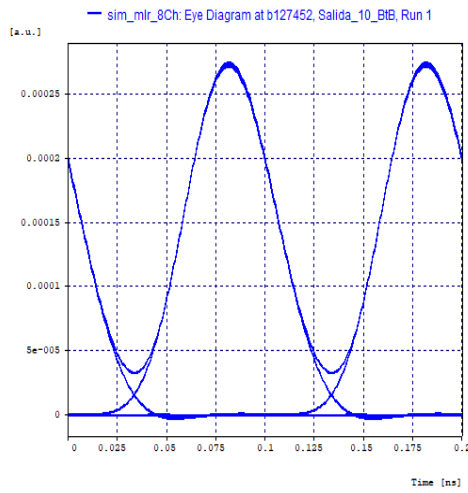


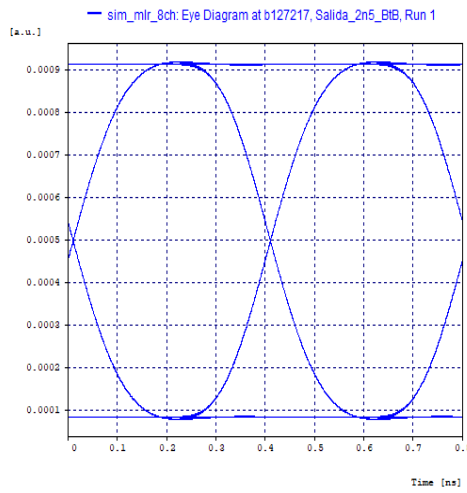
Figura 3.5: Espectro óptico de 8 canales.

La figura 3.5 muestra el espectro óptico después de atravesar los 80 Km de fibra óptica, donde se visualiza la caída de los niveles de potencia de la señal principalmente en los canales de 10 Gbps lo que permite comprobar que las señales de mayor tasa de bits son más susceptibles a la atenuación y en la práctica limitan el alcance de este tipo de redes. De igual forma se aprecia el efecto de FWM en las componentes adicionales que surgen en el espectro las cuales no influyen en mayor medida dada su magnitud.

Se procede a analizar el desempeño de la red propuesta. Para ello, primero se obtiene el diagrama del ojo de la configuración Back-to-Back (ver figura 3.6) que servirá de referencia para el estudio de los canales. Luego, se obtienen los diagramas del ojo y otros datos referentes a parámetros OPM en recepción de los canales de 10/2.5 Gbps para ver el comportamiento de la señal en la red actual.

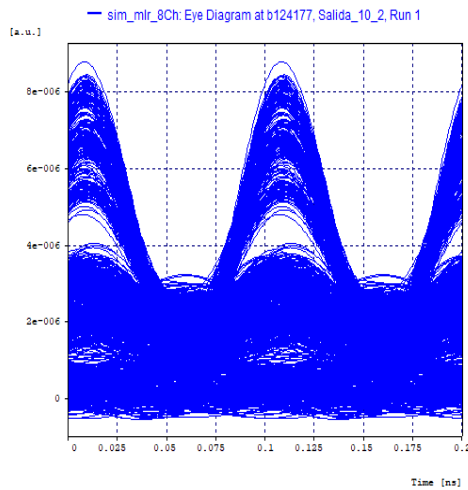


(a)

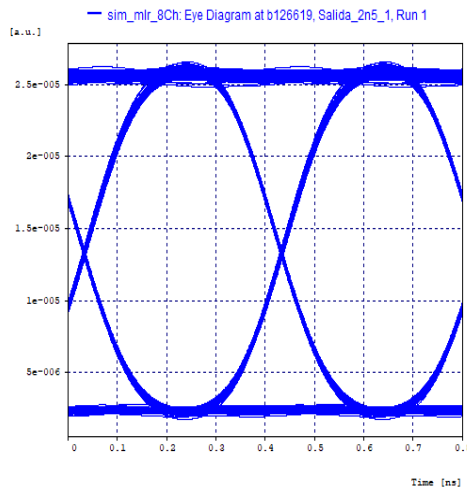


(b)

Figura 3.6: Diagramas del ojo Back-to-Back para (a) 10 y (b) 2.5 Gbps.



(a)



(b)

Figura 3.7: Diagramas del ojo Back-to-Back para (a) 10 y (b) 2.5 Gbps.

Canal	Velocidad Tx (Gbps)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
1	10	-29.8926	0.0227501	6.0206	0.01349	47.8904	0.107371
2		-29.5625	0.0227501	6.0206	0.0138899	49.8268	0.437414
3	2.5	-18.7581	10^{-40}	35.4631	0.0622912	51.7427	11.2419
4		-18.6985	10^{-40}	34.7154	0.0680083	53.0736	11.3015
5		-18.5526	10^{-40}	34.5611	0.0609481	61.5636	11.4473
6		-18.8004	10^{-40}	34.7205	0.0603080	53.3513	11.1995

7	10	-29.7936	0.0227501	6.0206	0.0121353	51.9441	0.206322
8		-29.8001	0.0227501	6.0206	0.0298180	52.6703	0.19991

Tabla 3.2: Parámetros OPM para red MLR inicial.

La figura 3.7 y la tabla 3.2 muestran que un canal de 10 Gbps es más susceptible a degradaciones que un canal de 2.5 Gbps reflejando el impacto de utilizar diferentes velocidades en una misma red. Así, los canales de 10 Gbps poseen una BER bastante alta y el Factor Q por debajo del valor objetivo ambos con valores (resaltados en rojo) de aproximadamente 0.023 y 6 dB respectivamente. Los valores de potencia en recepción rondan los -29.7 dB siendo relativamente bajos y la OSNR real llega a ser bastante más baja al tener valores por debajo de 0.5 dB (ambos valores resaltados en naranja).

Por otro lado, los canales de 2.5 Gbps parecen tener buen rendimiento ya que los valores de sus parámetros son relativamente buenos y bastante similares a los obtenidos para la red SLR. Los valores de potencia en recepción se mantienen alrededor de -18.5 dB, las BER están siempre sobre 10^{-40} , el factor Q es mayor a 34 dB, el Jitter es un poco más variable pero no llega a los 0.07 ns, y la OSNR real se encuentra sobre 11 dB. Se puede destacar el hecho de que los canales de 2.5 Gbps se mantienen trabajando eficientemente a pesar de los problemas existentes en los canales adyacentes de 10 Gbps por lo que hasta el momento no debe existir interferencia significativa entre estos.

De los datos obtenidos se rescata el hecho de que no existen variaciones demasiado significativas entre los canales que trabajan a la misma velocidad por lo que se considera que es posible realizar un buen análisis del sistema si solamente se tienen en cuenta un canal de cada tipo, es decir, 1 canal de 10 Gbps y uno de 2.5 Gbps son suficientes para análisis posteriores. Para este caso se decide tomar los canales 2 (10 Gbps) y 3 (2.5 Gbps) ya que ambos se encuentran próximos tanto a un canal de su misma velocidad como a uno de velocidad diferente permitiendo evaluar posibles efectos que puedan surgir de estos hechos ya sea en cuanto a interferencias, efectos no lineales, entre otros.

Ahora, es necesario confirmar el problema que acontece sobre los canales de 10 Gbps con tal de poder ajustar la red para que trabaje de una manera más eficiente. El diagrama del ojo suele ser un buen indicador de los posibles problemas que sufre la señal, ya que en él se pueden identificar problemas relacionados con pérdidas (atenuación y ruido) o dispersión (CD y PMD) [69]. Teniendo en cuenta la forma del diagrama del ojo y el hecho de que se está trabajando con 10 Gbps, es probable que los problemas en estos canales se deban principalmente a la dispersión por lo que se decide realizar una simulación de un sistema solo con pérdidas y se obtiene los diagramas del ojo para los canales de 2.5/10 Gbps.

En la figura 3.8 se puede observar una mejora considerable en el diagrama del ojo para un canal de 10 Gbps, lo cual confirma que efectivamente el problema que sufren estos canales se debe a la dispersión. También se puede notar una leve mejora en el

canal de 2.5 Gbps demostrando que estos canales también pueden verse afectados por la dispersión pero en menor magnitud dada la velocidad con la que trabajan.

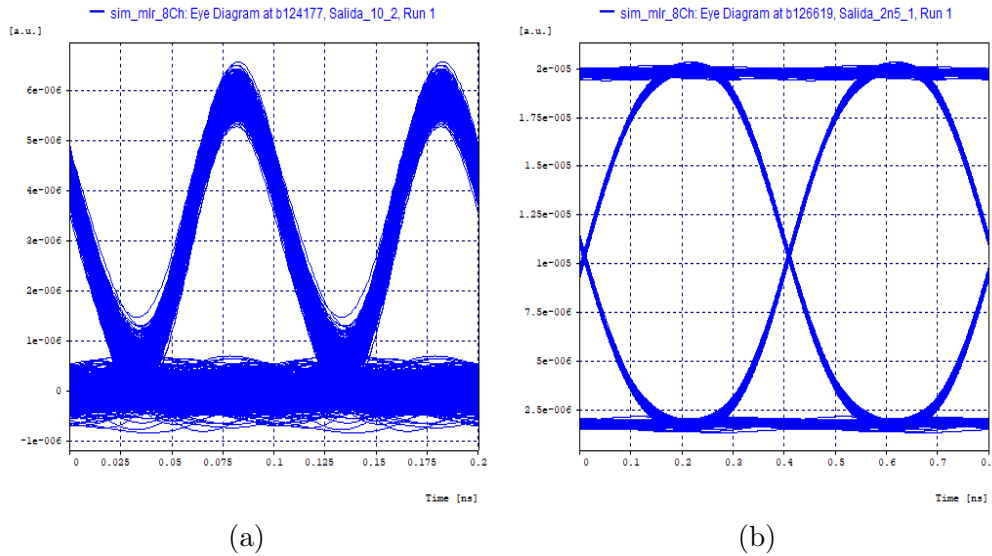


Figura 3.8: Diagramas del ojo en recepción para (a) 10 y (b) 2.5 Gbps, sistema con solo pérdidas.

A partir de esto, se recurre a la rejilla de Bragg mediante una fibra DCF ideal disponible en Optsim que permita compensar efectos de dispersión cromática en el enlace. Para ese caso, se decide utilizar la DCF en modo de pre-compensación (ver figura 3.9) ya que para esta configuración los efectos no lineales son menos significativos en comparación con el modo de post-compensación cuyo uso es mas frecuente [54, 73]. De igual forma, para poder apreciar el efecto de la compensación, esta se realizará en intervalos de 25 % hasta el 100 %.

Compensación (%)	Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
25	2	-29.5301	0.00185745	9.6008	0.0219615	49.9985	0.469918
	3	-18.7015	10^{-40}	35.1806	0.0683498	51.5605	11.2984
50	2	-29.5933	2.91×10^{-14}	17.6243	0.00673348	49.7403	0.406688
	3	-18.6842	10^{-40}	34.7196	0.0541997	51.8598	11.3158
75	2	-29.7041	9.13×10^{-36}	22.1104	0.000962437	49.5873	0.295896
	3	-18.7276	10^{-40}	35.6139	0.0636750	51.6212	11.2723
100	2	-29.6657	10^{-40}	23.5639	0.000639638	50.0313	0.334231
	3	-18.7643	10^{-40}	36.2717	0.0638542	51.4945	11.2356

Tabla 3.3: Parámetros OPM para compensación de 25-100 %.



Figura 3.9: DCF en modo de pre-compensación.

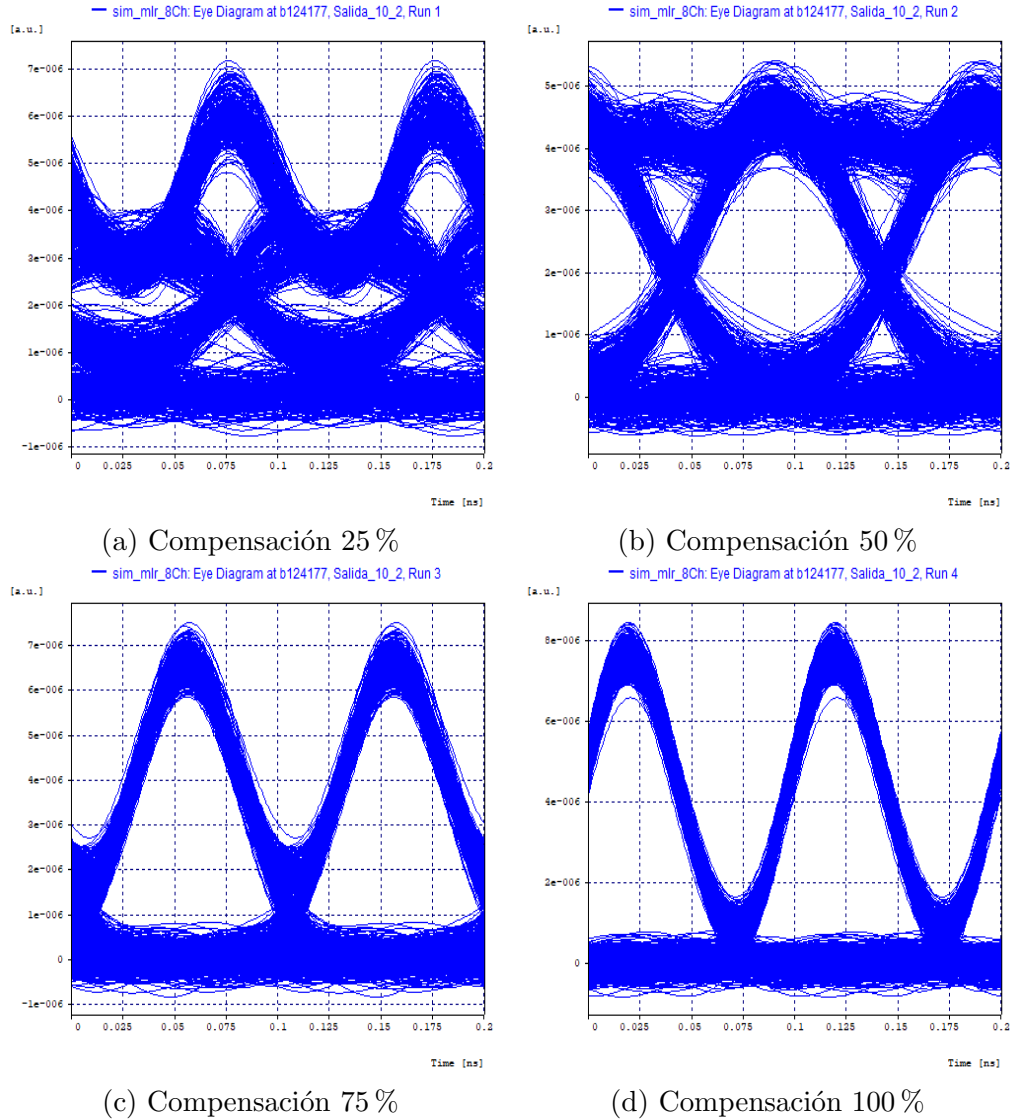


Figura 3.10: Diagramas de ojo de canal de 10 Gbps para compensación de dispersión de 25-100 %.

De los datos en la tabla 3.3 y de la figura 3.10 se puede apreciar la mejora de la señal de 10 Gbps a medida que aumenta el porcentaje de compensación. Así, el diagrama del ojo va tomando una forma cada vez más similar a la gráfica obtenida para la configuración Back-to-Back, el Jitter disminuye considerablemente y los datos de BER y Factor Q superan los objetivos desde el 50 % de compensación.

Por otro lado, el Jitter del canal 3 de 2.5 Gbps tiende a incrementar después del 50 % de compensación cuando el del canal 2 de 10 Gbps disminuye dando a entender que la mejora en los canales de 10 Gbps adyacentes tiene cierta influencia sobre el tiempo de propagación de los demás canales, aunque a pesar de ello, el factor Q del canal 3 presenta una leve mejora luego del 50 % de compensación. No obstante, este canal 3 sigue presentando valores bastante cercanos a los de la red SLR por lo que en general mantiene buen desempeño.

Ya que normalmente se busca reducir costos y el sistema ya presenta una BER por debajo del valor objetivo y un factor Q por encima del mínimo desde el 50 % de compensación, es posible mantener este porcentaje de compensación para una red de este tipo. No obstante, sí se requiere que el sistema posea una mejor calidad y sea más flexible a cambios en la red (mayor distancia del enlace, más número de usuarios, etc), puede llegar a ser recomendable utilizar desde el 75 % de compensación con tal de minimizar aún más la dispersión existente y evitar posibles inconvenientes.

Aunque el sistema presente mejoras considerables, sobre todo en los canales de 10 Gbps, tanto la potencia en recepción como la OSNR real (resaltados en naranja) no presentan mejoras significativas por lo que los canales de 10 Gbps deben requerir más potencia. Así, se elige aumentar la potencia de transmisión de los canales de 10 Gbps dentro del rango definido previamente (0-6 dBm) con tal de lograr cierta mejora en estos parámetros, para lo cual se escoge una potencia de 5 dBm. Se tienen en cuenta una vez más las compensaciones de 50 y 75 % con tal de corroborar cual puede ser más conveniente para la red.

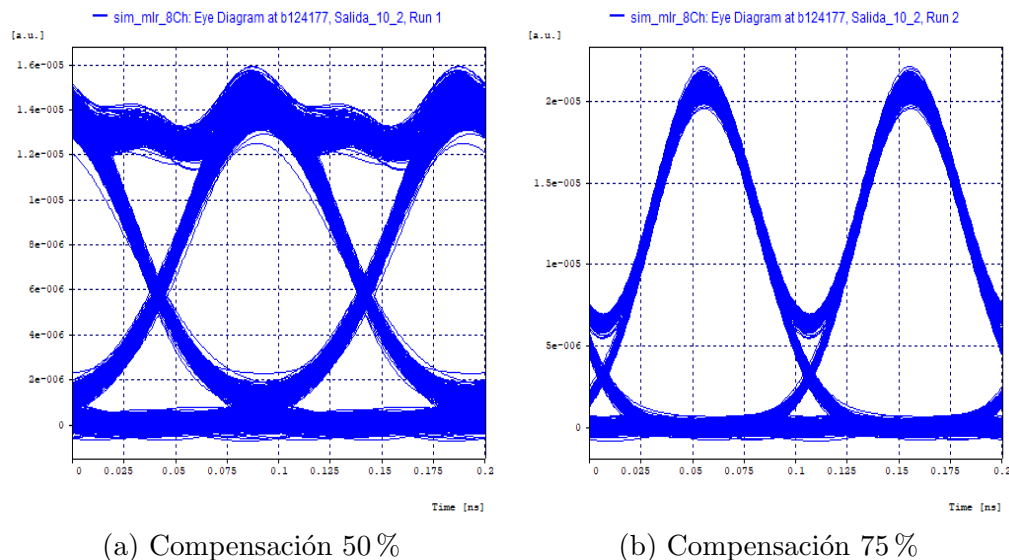


Figura 3.11: Diagramas del ojo para $P_{tx} = 5$ dBm en canales de 10 Gbps.

Compensación (%)	Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
50	2	-24.5626	7.79×10^{-36}	22.1434	0.00366150	49.7703	5.43736
	3	-18.7435	10^{-40}	32.2326	0.0605660	51.8666	11.2565
75	2	-24.5675	10^{-40}	29.4110	0.000372853	49.7124	5.4325
	3	-18.7791	10^{-40}	34.8896	0.0633718	51.6239	11.2208

Tabla 3.4: Parámetros OPM para $P_{tx} = 5$ dBm en canales de 10 Gbps.

Los datos de la tabla 3.4 demuestran la influencia que posee la potencia de la señal dentro del sistema ya que hubo un aumento significativo del Factor Q en el canal 2, además de un mayor valor de la potencia en recepción y de la OSNR real. Así mismo, la BER disminuye más que en el caso previo, lo que también se refleja en la forma de los diagramas del ojo (ver figura 3.11). A pesar de que aún existe una influencia considerable de la dispersión sobre la señal, se cree que el sistema ya funciona bastante bien al 50 % de compensación por lo que se pueden obtener resultados suficientemente favorables con este valor así como la disminución de costos para un entorno real.

Los resultados obtenidos hasta el momento permiten evidenciar una clara diferencia entre los niveles de potencia de las señales transmitidas, siendo los canales de 10 Gbps los que presentan mas atenuación incluso después de realizar un incremento de potencia sobre estos.

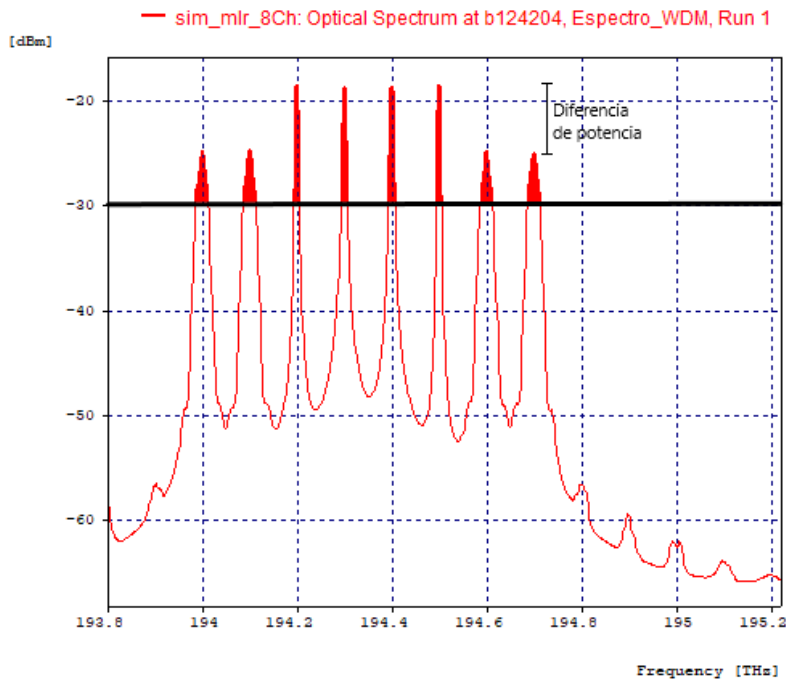


Figura 3.12: Diferencia de potencia en canales de red MLR.

En la figura 3.12 se muestra la diferencia de potencia que existe entre los canales de

2.5 y 10 Gbps, la cual es cercana a 6 dB. Es bien sabido que las señales que operan a mayores velocidades son mas susceptibles a efectos como la atenuación y en este caso en particular se puede notar dicho efecto con mayor claridad al tener múltiples señales a diferentes velocidades. Este hecho surge de la relación que existe entre la velocidad de una señal y la energía que se necesita para transmitir esa señal a dicha velocidad. En primer lugar se debe considerar la ecuación del Teorema de Shannon-Hartley, la cual indica que la capacidad de un canal C es [74]:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (3.2)$$

Donde,

- B es el ancho de banda del canal en Hertz.
- C es la capacidad del canal o tasa de bits de información en bps
- S es la potencia de la señal útil, que puede estar expresada en vatios.
- N es la potencia del ruido presente en el canal, que trata de enmascarar a la señal útil y puede estar expresada en vatios..

La ecuación 3.2 establece que la capacidad de un sistema depende del ancho de banda del canal y de la relación señal a ruido (SNR), por lo que para lograr una mayor capacidad en teoría se puede aumentar el ancho de banda o intentar mejorar la relación SNR. En los sistemas ópticos a altas velocidades la SNR suele estar mas limitada debido a que el incremento en la potencia de la señal para mejorar dicho factor puede excitar considerablemente efectos no lineales [69], resultando mas factible recurrir a un canal de mayor ancho de banda con el que se pueda alcanzar la velocidad requerida.

Luego, el hecho de necesitar un mayor ancho de banda incide en la energía necesaria para transmitir la señal, ya que entre mayor sea el valor de ese ancho de banda se deberá utilizar mas energía para lograr llegar a la tasa de bits objetivo resultando en un mayor consumo de potencia de la señal en un tiempo dado [75]. En este caso en particular, los canales de 10 Gbps que se ven mayormente atenuados que los de 2.5 Gbps, también presentan un mayor ancho de banda por lo que según la información presentada al respecto estos requieren de dicha cantidad de ancho de banda con tal de poder transmitir a esa velocidad haciendo que deban consumir mas energía. Adicionalmente, el hecho de ser una red MLR no parece incidir mucho sobre este aspecto ya que los canales hasta ahora no poseen mucha influencia entre sí que afecte considerablemente la potencia de los mismos.

Ahora, se considera que es posible ahorrar ancho de banda al reducir la separación que existe entre los canales, por lo que es necesario analizar si es posible hacerlo. Así, se separan todos los canales a 50 y 25 GHz para ver como incide esto sobre el sistema (ver figura 3.13)

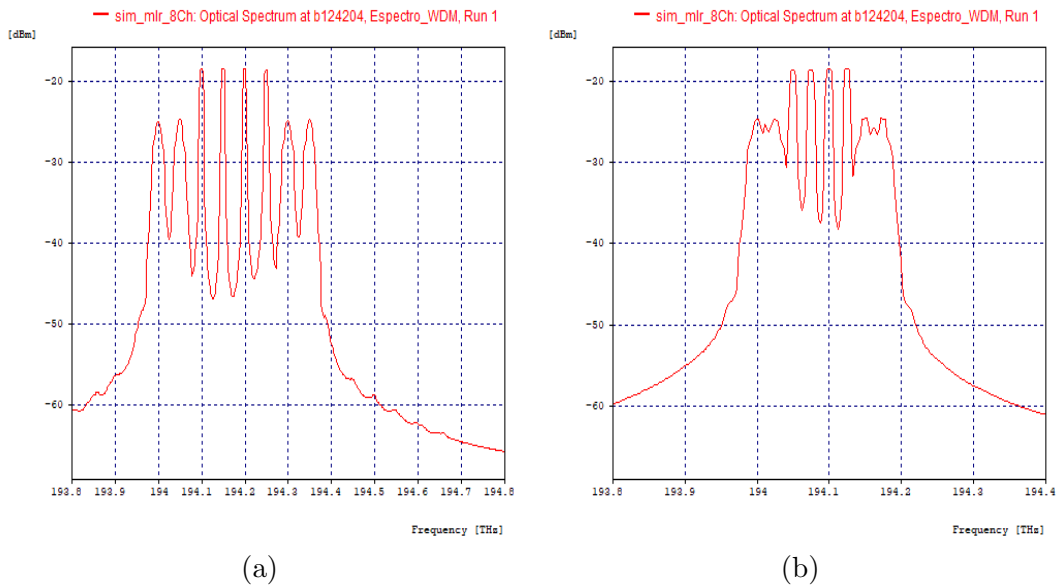


Figura 3.13: Separación de canales (a) 50 GHz y (b) 25 GHz

Según el diagrama del espectro que se ve en la figura 3.13 puede decirse que los canales separados a 50 GHz no parecen sufrir degradaciones graves mientras que al estar separados a 25 GHz los canales a 10 Gbps parecen superponerse siendo más probable que exista interferencia entre ellos. Por ello se hace un acercamiento al espectro de estas señales en recepción que permita comprobar si existe alguna interferencia.

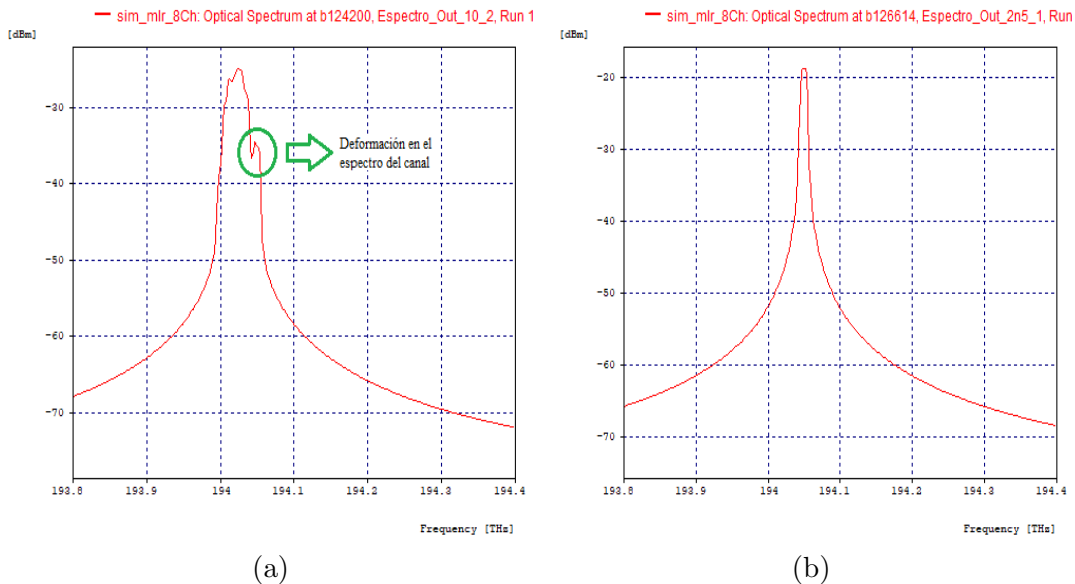


Figura 3.14: Espectro para separación de 25 GHz, (a) canal 2 y (c) canal 3.

El espectro de ambos canales se muestra en las figuras 3.14a y 3.14b. Mientras que el espectro de la señal del canal 3 de 2.5 Gbps no parece verse muy afectado, el del

canal 2 de 10 Gbps sufre pequeñas deformaciones las cuales, según las condiciones que se presentan, probablemente se deban a XPM. El fenómeno de XPM se presenta cuando 2 o más canales ópticos son transmitidos al mismo tiempo de manera que las variaciones de potencia de un canal se traduzcan en variaciones de fase en el canal adyacente ocasionando ensanchamiento de pulsos cruzados. La naturaleza de XPM hace que este fenómeno se fortalezca a medida que incrementa el número de canales y disminuye el espaciamiento entre estos, además de diferencias significativas entre las potencias de cada uno.

Para el caso presente en el canal 2 de 10 Gbps, se puede notar que la deformación que sufre se encuentra del lado donde el canal adyacente corresponde a uno de 2.5 Gbps. Esto confirma la influencia de la potencia de canales de diferente velocidad sobre el efecto XPM ya que el canal de 10 Gbps afectado posee mayor potencia de transmisión que los canales de 2.5 Gbps en la red planteada. Siendo así, también se debe comprobar los parámetros OPM para tener un acercamiento más preciso de lo que sucede con estos a medida que disminuye la separación de canales.

Separación (GHz)	Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
50	2	-24.7449	7.79×10^{-29}	20.9414	0.00380992	48.6356	5.25504
	3	-18.5482	10^{-40}	33.7534	0.0596812	58.9425	11.4518
25	2	-24.6836	9.45×10^{-4}	9.8500	0.0198055	47.3611	5.31636
	3	-18.5711	10^{-40}	31.5691	0.0761339	54.3335	11.4288

Tabla 3.5: Efecto de separación de canales sobre parámetros OPM.

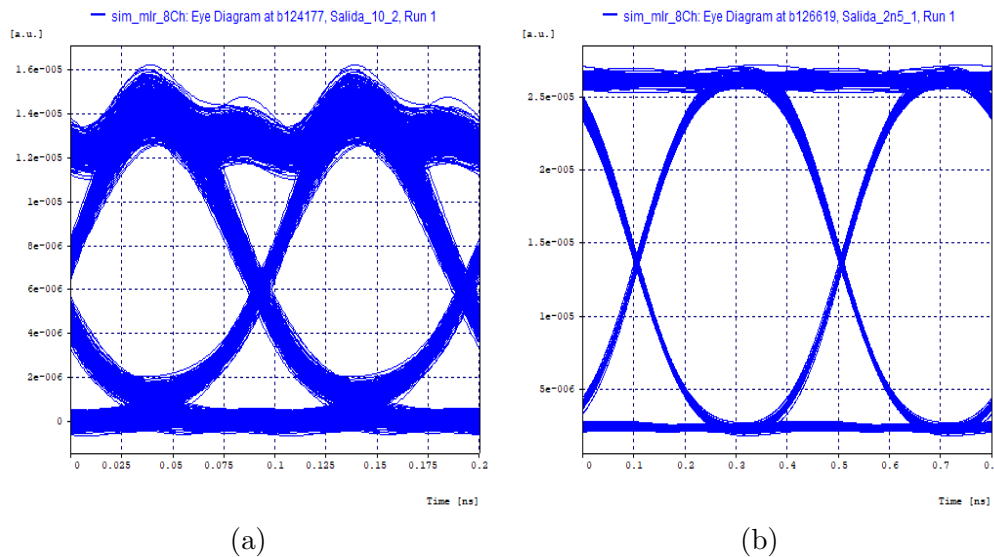


Figura 3.15: Diagramas del ojo de canales de (a) 10 y (b) 2.5 Gbps. Separación de 50 GHz

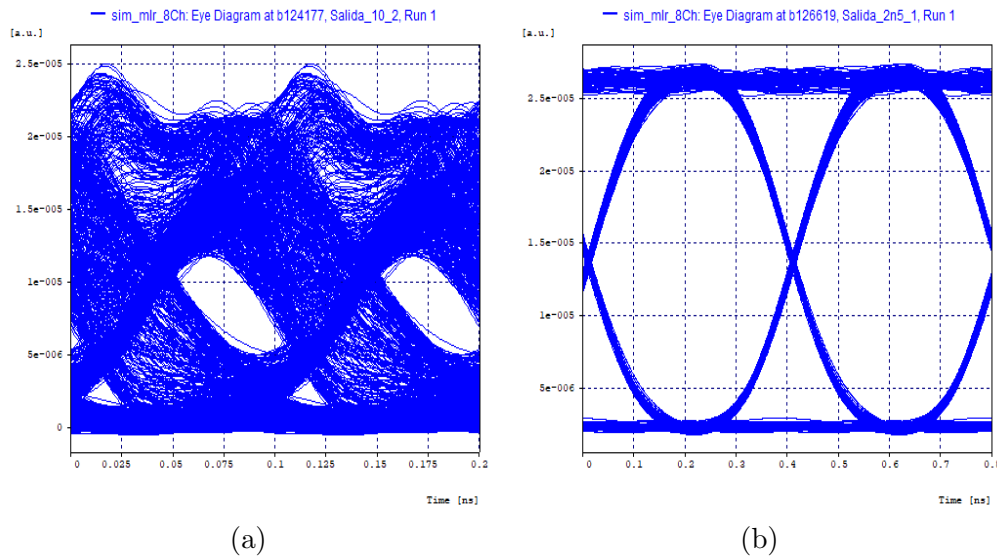


Figura 3.16: Diagramas del ojo de canales de (a) 10 y (b) 2.5 Gbps. Separación de 25 GHz

La información que se muestra en la tabla 3.5 y en las figuras 3.15 y 3.16 permite comprobar la susceptibilidad que poseen las señales de 10 Gbps a medida que los canales se acercan entre sí. A una separación de 50 GHz, el canal 2 ve algo de aumento del Jitter y una disminución del factor Q. No obstante el valor de factor Q aun es bastante bueno y la BER aún se encuentra en un valor debajo del mínimo fijado, además de que la variación en potencia de recepción y OSNR real es muy pequeña. Igualmente, el canal 3 sufre mínimas variaciones con la separación a 50 GHz, por lo que no posee mayor problema hasta ese punto.

Ahora, con una separación de 25 GHz, el canal 2 tiene un incremento en la tasa de errores que llega muy por encima del valor fijado (10^{-12}), el factor Q disminuye fuertemente y también hay un incremento considerable del Jitter. Por otro lado, este espaciamiento no parece influir mucho en la potencia recibida o en la OSNR real. En cuanto al canal 3, a pesar de que su factor Q disminuye un poco, los demás parámetros no presentan variaciones significativas por lo que soporta de mejor manera una menor separación de canales que aquellos que trabajan a 10 Gbps.

Según la información presentada, se puede ahorrar ancho de banda separando los canales que trabajan a 2.5 Gbps hasta 25 GHz de los demás. Así mismo, los canales que trabajan a 10 Gbps pueden tener una separación de los otros de hasta 50 GHz sin degradaciones muy perjudiciales. Por tanto, es posible realizar una asignación asimétrica del espectro que permita aprovechar mas el mismo y evitar que exista interferencia significativa entre los canales.

Para este caso, se debe tener en cuenta que el acercamiento de los canales puede disminuir un poco la calidad del sistema a cambio de un mejor uso del ancho de banda,

algo que usualmente sucede en escenarios reales cuando se busca reducir costos pero que al final puede llegar a ser más rentable.

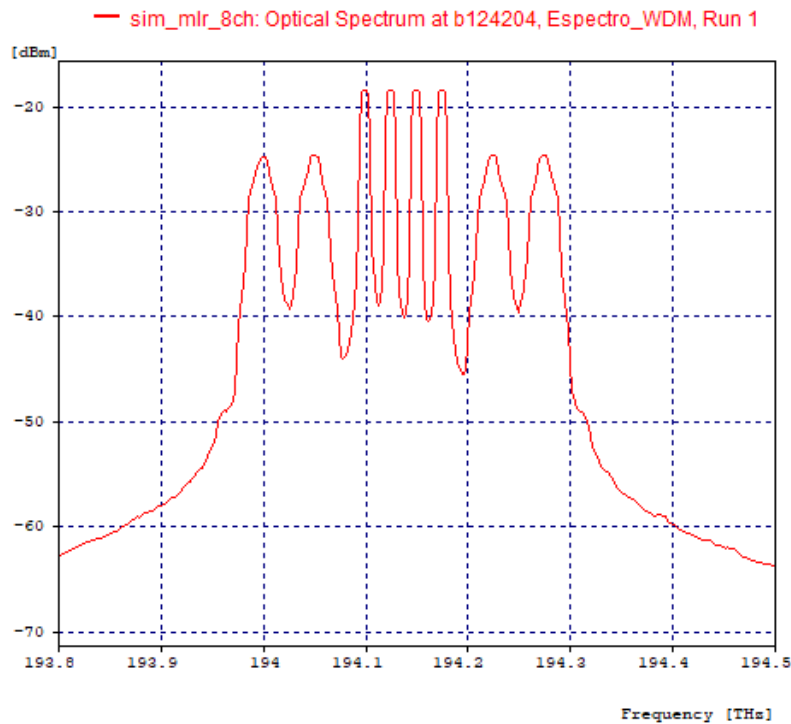


Figura 3.17: Separación asimétrica de canales.

En la figura 3.17 se presenta el espectro de las señales multiplexadas con una separación asimétrica entre las frecuencias centrales de cada canal como la que se menciona anteriormente. A partir de ello, se obtienen los parámetros OPM para esta asignación asimétrica de los canales.

Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
2	-24.7338	$1.73 \cdot 10^{-28}$	21.0660	0.00376518	48.6239	5.26616
3	-18.5338	10^{-40}	34.7727	0.0698480	58.9061	11.4661

Tabla 3.6: Parámetros OPM para separación asimétrica entre canales.

Los datos expuestos en la tabla 3.6 muestran cierta mejora en los parámetros ahora que se tiene una separación asimétrica entre los canales en comparación a la separación simétrica que se tenía de 25 GHz. La tasa de errores o BER del canal 2 de 10 Gbps se acerca bastante a la que se tenía para la separación simétrica de 50 GHz mientras que los demás parámetros relevantes del canal tienen una leve mejora en comparación. Así mismo, el canal de 3 de 2.5 Gbps llega a tener mejores parámetros comprado con cualquiera de los datos para separaciones simétricas, excepto por el jitter que se encuentra en un valor medio entre los datos para separaciones de 25 y 50 GHz pero

que igualmente es de una magnitud aceptable. Con esto se comprueba que es posible implementar una separación asimétrica entre los canales y obtener un buen rendimiento en la red.

A partir de lo anterior, también se puede realizar un análisis espectral en el sistema teniendo en cuenta los criterios definidos para el espaciamiento de los canales. En sistemas de comunicaciones por fibra óptica se habla de eficiencia espectral cuando se tiene un solo canal en el sistema; y cuando se tienen n canales en el sistema se habla de densidad espectral de información (ISD, *Information Spectral Density*), la cual es otro parámetro que permite evaluar el desempeño de las redes DWDM [76]. La ISD máxima total de un sistema que implementa múltiples canales, estaría representada por [69]:

$$\eta[bps/Hz] = \frac{\sum_{i=1}^{\varepsilon} B_{chi} \log_2\left(1 + \frac{P_{s-chi}}{N_0B}\right) + \sum_{j=1}^{\varphi} B_{chj} \log_2\left(1 + \frac{P_{s-chj}}{N_0B}\right)}{\frac{(B_{chi}+B_{chj})}{2} + (N-1)\Delta_V} \quad (3.3)$$

Cuyas variables de medición y control son [69]:

- C_N (Capacidad nominal por longitud de onda): se presenta como la capacidad neta binaria propagada a nivel de acceso.
- C_{Total} (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 Óptico de los canales adyacentes).
- η_{dist} (Eficiencia espectral Distribuida Teórica del sistema): se presenta como una relación de la capacidad total generada en el sistema vs el espaciamiento óptico.
- η_{disa} (Eficiencia espectral Distribuida analítica por el sistema): se presenta como una relación de la ecuación 3.3 entre la capacidad total vs el espectro real ocupado y la relación SNR máxima permisible

Ya que se desea medir la ISD a partir de todo el espectro ocupado por los canales, el valor objetivo para este caso es η_{disa} . Se obtiene el ancho de banda util ocupado por la señal DWDM ajustando los marcadores de la herramienta segun el valor de la sensibilidad de -30 dBm (ver figura 3.18). Luego, se obtienen las variables de medición y control analíticas que permiten llegar al valor de η_{disa} .

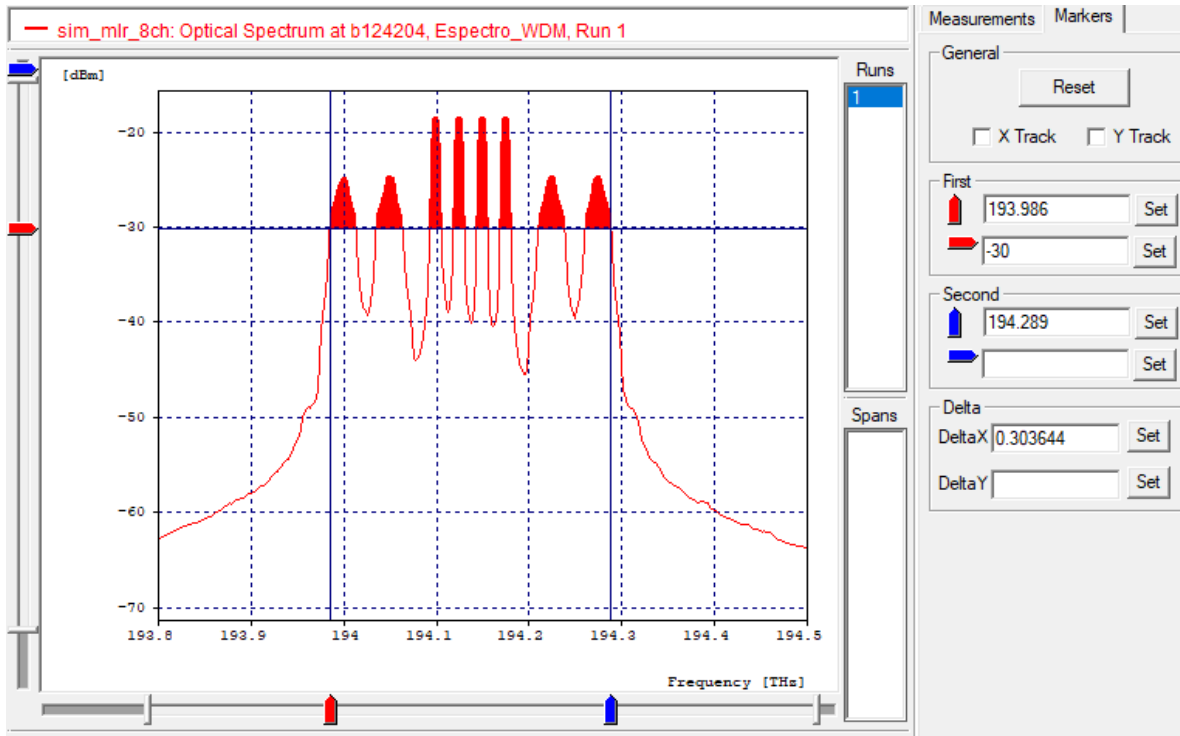


Figura 3.18: Ancho de banda útil para ISD.

$(N-1)\Delta_V$	C_N	C_{Total}	C_{Pro}	Bw	η_{disa}
25 GHz	2.5 Gbps	4 ch * 2.5 Gbps +	<i>Distancia: 80.9 Km</i>	303.64 GHz	16.46 % [bps/Hz]
50 GHz	10 Gbps	4 ch * 10 Gbps = 50 Gbps	4.045 Tbps*Km		

Tabla 3.7: Variables de medición y control, 8 canales híbridos.

La tabla 3.7 resume el comportamiento del sistema DWDM como un resultado de la aplicación de la ecuación 3.3 donde, debido a que la modulación utilizada no es muy robusta para canales de 10 Gbps, no es posible aproximar demasiado los canales ópticos co-propagantes, mientras que por el contrario los canales de 2.5 Gbps son menos susceptibles a degradaciones cuando se reduce el espaciamiento a pesar del formato de modulación implementado para estos. Así, los espaciamientos pueden ser forzados a distancias mínimas de 50 y 25 GHz para los canales de 10 y 2.5 Gbps respectivamente, lo que junto con la capacidad neta de transmisión binaria vista como una sumatoria de los canales independientes, logra una ISD útil del 16.46 %.

Es necesario tener en cuenta que la utilización de muchos canales en un sistema DWDM o la agregación de estos puede disminuir el valor de la ISD del mismo al requerir más espectro para poder soportarlos. Igualmente, aunque fuera posible incrementar la ISD reemplazando los 4 canales de 2.5 Gbps por uno de 10 Gbps, se debe recordar

que la red planteada es del tipo MLR por lo que se hace necesario que los canales de diferentes velocidades puedan trabajar juntos favoreciendo la posibilidad de flexibilizar el sistema y disminuir costos según la heterogeneidad de la información presente en la propia red.

Con el nuevo espaciamiento definido, se cree que puede llegar a ser necesario saber el máximo alcance que posee la red MLR ya que, según se dijo en el capítulo 1, el hecho de utilizar distintas velocidades limita el alcance general de la red al de la señal con una mayor tasa de bits. Siendo así, se aumenta la distancia del enlace en intervalos de 10 Km hasta 120 Km con tal de probar las condiciones de la red para enlaces más largos.

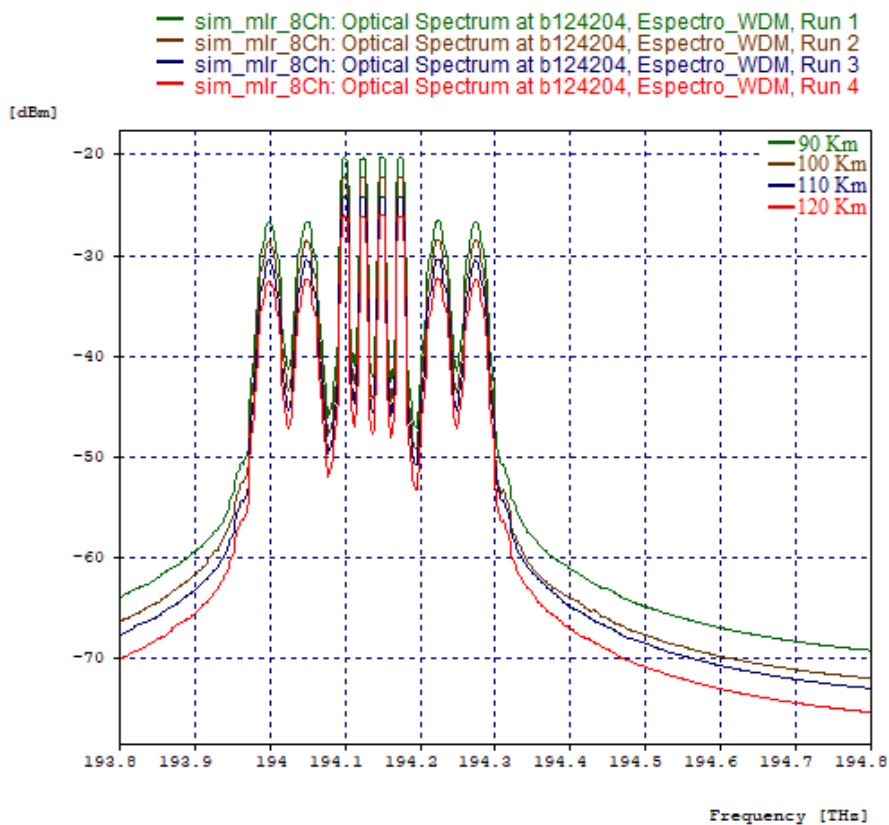


Figura 3.19: Espectro WDM, rango de 90-120 Km.

En la figura 3.19 se presenta el espectro de las señales multiplexadas, donde se aprecia el aumento en la atenuación para cada canal a medida que se incrementa la distancia del enlace. Los picos adicionales generados por efectos no lineales no parecen aumentar significativamente con el aumento de la distancia del enlace. Sin embargo, la magnitud de la señal de los canales de 10 Gbps llega a un valor por debajo de la sensibilidad fijada (-30 dBm) por lo que es probable que esa señal llegue a degradarse considerablemente a medida que viaje durante tramos mas prolongados. Entonces, se procede a comprobar los parámetros OPM de los canales respectivos.

Distancia enlace (Km)	Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
90	2	-26.6430	9.25×10^{-16}	18.0431	0.0178992	48.7535	3.35694
	3	-20.4211	10^{-40}	32.7645	0.0722938	58.9377	9.57889
100	2	-28.4630	4.33×10^{-9}	15.4434	0.0274097	49.6080	1.53697
	3	-22.3573	10^{-40}	29.5605	0.0764499	58.9932	7.64269
110	2	-30.4243	9.28×10^{-5}	11.4426	0.0276338	49.1695	-0.424317
	3	-24.2589	10^{-40}	26.2445	0.0762241	58.9405	5.74102
120	2	-32.3681	0.0130008	6.9397	0.0219508	49.2590	-2.36817
	3	-26.1890	10^{-40}	22.9648	0.0804309	59.0053	3.81093

Tabla 3.8: Parámetros OPM en red MLR, rango de 90-120 Km.

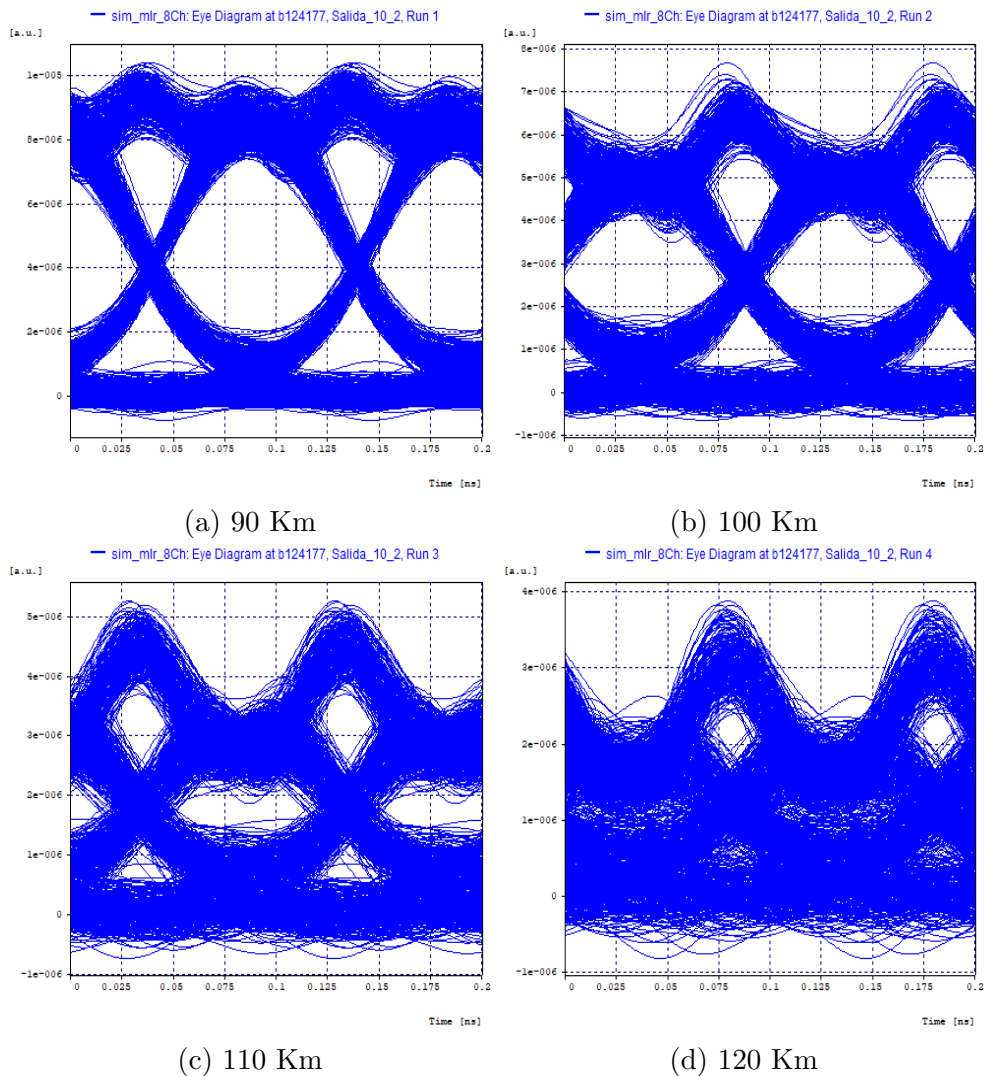


Figura 3.20: Diagramas del ojo en canal de 10 Gbps, rango de 90-120 Km

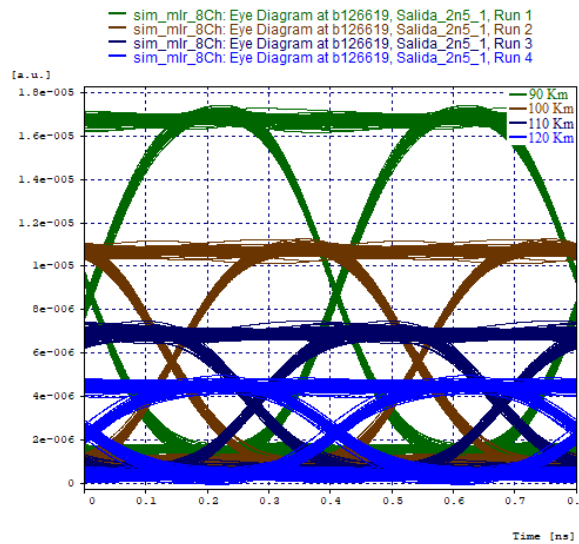


Figura 3.21: Diagramas del ojo en canal de 2.5 Gbps, rango de 90-120 Km.

La información que se expone en la tabla 3.8 y las figuras 3.20 y 3.21 demuestran el deterioro de la señal a medida que se incrementa la distancia del enlace, principalmente en el caso del canal de 10 Gbps el cual presenta mayor atenuación y tasa de errores incidiendo fuertemente en la forma del ojo. También se evidencia un incremento del Jitter y de la BER en la forma del ojo en los diferentes diagramas.

Los datos dispuestos también muestran que efectivamente el aumento de la distancia del enlace para los canales de 10 Gbps es mucho más crítico que para una canal de 2.5 Gbps. Según ello, la BER que se tiene a los 100 Km ya se encuentra por debajo del mínimo recomendado y la OSNR se degrada significativamente. A pesar de esto, la señal de 2.5 Gbps del canal 3 no parece verse demasiado afectada por el bajo desempeño de los demás canales a distancias más altas ya que los datos obtenidos para ella son cercanos a los de la red SLR inicial, manteniendo un comportamiento similar al aumento de distancia.

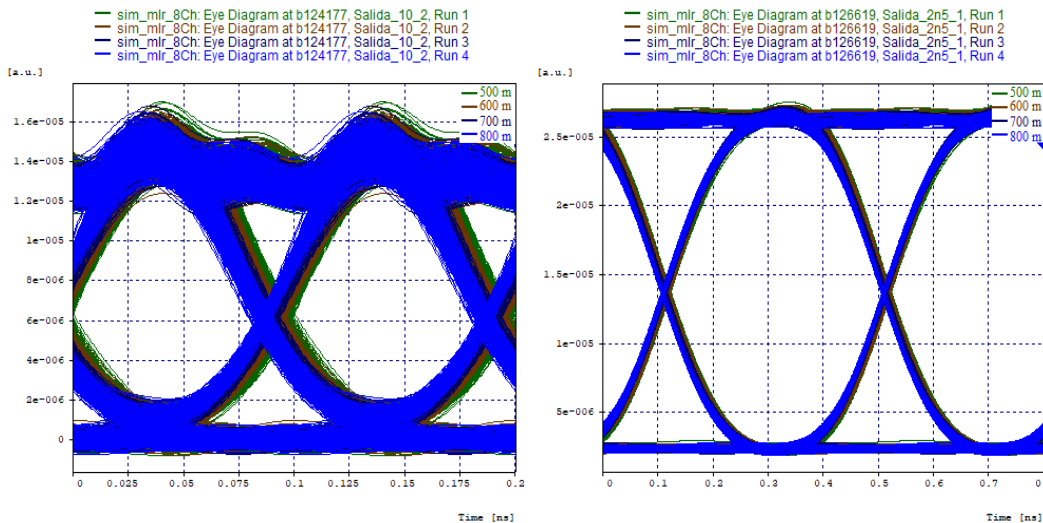
Ya que se busca que los canales trabajen en conjunto, para poder utilizar una red de este tipo en un enlace de mayor distancia se recomienda realizar ciertos ajustes sobre esta. En primer lugar se necesita un mayor porcentaje de compensación por parte de la DCF ya que la dispersión en el canal es proporcional a la longitud del enlace y necesita ser mitigada hasta donde sea posible. Luego, debido a los bajos valores de potencia en recepción y de la OSNR real, se debe de amplificar la señal para permitir que esta viaje por un tramo más largo siempre que las condiciones de la señal lo permitan. Adicionalmente, es posible recurrir al uso de un formato de modulación más avanzado que sea menos susceptible a degradaciones dependiendo del caso.

Una vez establecidas las características para el funcionamiento óptimo el sistema, se procede a evaluar el último tramo o última milla del sistema. Dado que la última milla

suele tener una distancia variable, es posible manipular este valor para ver su incidencia sobre la red. Ahora, FTTB puede usarse desde un único edificio hasta un conjunto de ellos o un campus en general haciendo que la distancia de la última milla llegue a coincidir con las que suelen utilizarse en FTTC (300-600 m entre caja de distribución y usuario). Así, se decide disminuir la longitud fijada de la fibra de última milla (900 m) en intervalos de 100 m hasta un valor de 500 m para una distancia del enlace fija de 80 Km con el fin de ver el efecto de este factor sobre el desempeño de la red.

Última milla de fibra (m)	Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
800	2	-24.7152	$3.39 \cdot 10^{-30}$	21.1943	0.00376713	48.6279	5.28472
	3	-18.5134	10^{-40}	34.6498	0.0704984	59.0244	11.4865
700	2	-24.6957	$2.21 \cdot 10^{-29}$	21.2344	0.00374695	48.6336	5.30424
	3	-18.4941	10^{-40}	34.4590	0.0727085	59.0108	11.5058
600	2	-24.6762	$3.06 \cdot 10^{-30}$	21.3167	0.00365160	48.6316	5.32374
	3	-18.4753	10^{-40}	34.2674	0.0664822	58.9955	11.5247
500	2	-24.6576	$1.25 \cdot 10^{-29}$	21.1863	0.00361537	48.6206	5.34231
	3	-18.4556	10^{-40}	34.7272	0.0663928	58.9833	11.5444

Tabla 3.9: Parámetros OPM para última milla (800-500 m).



(a) Canal 2 (10 Gbps)

(b) Canal 3 (2.5 Gbps)

Figura 3.22: Diagramas del ojo para última milla (800-500 m).

Los datos expuestos en la tabla 3.9 dan a entender que la variación en la distancia de la última milla con intervalos de 100 m no es un factor muy crítico para el sistema ya que los cambios en los parámetros OPM son mínimos lo que también resulta ser conveniente en un escenario real donde todos los usuarios finales no se encuentran a la misma distancia del punto de distribución en este último tramo. La figura 3.22 muestra los

diagramas del ojo para la variación de última milla superpuestos, donde se comprueba que la diferencia entre ellos no es muy significativa, sobre todo para el canal de 2.5 Gbps.

También es posible evaluar las condiciones de la última milla al incrementar la cantidad de tráfico que posee la red (manteniendo fijas las distancias del enlace y de última milla), esto mediante un aumento en el número de usuarios finales como se representa en la figura 3.23. La red inicialmente posee 8 usuarios finales y a cada uno se le asigna una longitud de onda donde la señal se reparte a través de un splitter de segundo nivel. Ya que la red se hizo con 2 niveles de split para permitir el incremento de usuarios, se pueden evaluar el desempeño de la red hasta con 64 de ellos, por lo que se aumentará la cantidad de usuarios hasta llegar a dicho valor. En la tabla 3.10 se presentan los parámetros OPM para casos de 16, 32 y 64 usuarios.

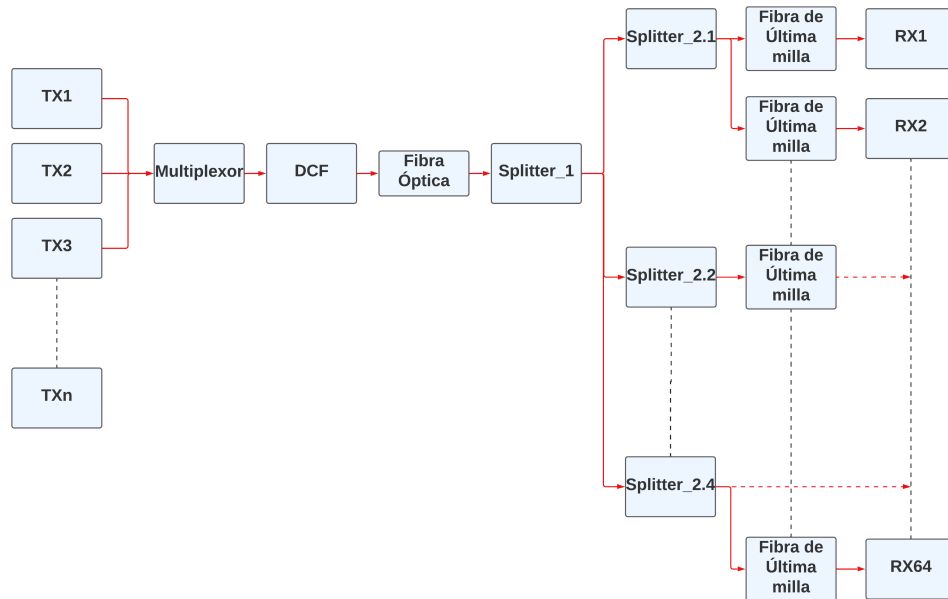


Figura 3.23: Diagrama de red para el aumento del número de usuarios.

# Usuarios finales	Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
16	2	-24.8362	$1.67 \cdot 10^{-27}$	20.8170	0.00370033	48.1312	5.16377
	3	-18.5705	10^{-40}	34.8006	0.0650231	54.9763	11.4294
32	2	-24.8362	$7.18 \cdot 10^{-27}$	20.8315	0.00378813	48.1312	5.16377
	3	-18.5705	10^{-40}	34.7796	0.0607076	54.9763	11.4294
64	2	-24.8362	$3.18 \cdot 10^{-27}$	20.8468	0.00373032	48.1312	5.16377
	3	-18.5705	10^{-40}	35.2902	0.0599841	54.9763	11.4294

Tabla 3.10: Parámetros OPM para 16, 32 y 64 usuarios.

Los datos expuestos en la tabla 3.10 muestran que el aumento de número de usuarios no incide fuertemente en los parámetros obtenidos en el sistema ya que el factor Q y

el Jitter varían levemente, la potencia en recepción y la OSNR no presentan cambios significativos y la BER siempre se mantiene en un valor bastante bueno por lo que el desempeño de la red tiende a ser estable en estos casos. Una de las razones principales que explican este comportamiento es que OptSim tiene en cuenta una variación en el modo de transmisión, lo que se traduce en que todos los usuarios no estarán conectados a la red todo el tiempo y aunque lo estuvieran no todos generarán tráfico en la red, permitiendo así que cada usuario experimente la capacidad total del enlace durante una fracción del tiempo en el que se presta el servicio de acuerdo al nivel de Split [27]. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que en un caso real todos los usuarios no estarían accediendo a la información de un mismo canal al mismo tiempo en una red MLR por lo que normalmente un único canal no llega a tener que ocuparse de la carga total de usuarios disponibles. No obstante, si se presenta una leve degradación en la potencia de recepción y la OSNR real de los canales respecto a cuando se tenían 8 usuarios demostrando que estos no son indiferentes al aumento del número de usuarios.

Los resultados obtenidos hasta el momento muestran que si fue posible obtener un modelo de red para diferentes tasas de transmisión o de tipo MLR acorde con el primer objetivo específico planteado, ya que la red en general es capaz de soportar 2 velocidades (2.5/10 Gbps) y mantiene un desempeño relativamente bueno dentro de las condiciones propuestas. A continuación, la tabla 3.11 presenta resumen de los resultados que se encontraron a partir del análisis realizado para el primer esquema de red MLR-FTTB:

1.	Es posible implementar canales de diferentes velocidades de transmisión de datos sobre una misma fibra.
2.	Es posible implementar canales con diferentes esquemas de modulación sobre una a misma fibra.
3.	El espaciamiento entre canales no necesita ser simétrico para que el sistema funcione adecuadamente.
4.	La ISD del sistema depende de aspectos tales como número de canales, velocidad por canal, formato de modulación, entre otros.
5.	Los canales de mayor velocidad son aquellos que limitan más el desempeño del sistema.
6.	Aspectos como la amplificación y la dispersión se deben considerar mayormente en los canales más complejos y a mayores distancias en un enlace.
7.	La distancia y el número de usuarios de la última milla no inciden fuertemente sobre el desempeño del sistema.

Tabla 3.11: Resumen de resultados del análisis para red MLR tipo 1 basada en FTTB.

3.1.2. Análisis para última milla basada en FTTH

Se parte de las características y resultados obtenidos previamente en este primer caso de estudio para el modelo de red MLR con última milla basada en FTTB, esto con el fin de que la red pueda estar en condiciones óptimas para el análisis de última milla ahora basada en FTTH. Así, se mantiene el esquema de 8 canales con los

mismos formatos de modulación, se comienza con una carga inicial de 8 usuarios, la distancia del enlace en 80 Km y una vez mas se omite el uso de amplificadores en la red.

Además, según los resultados obtenidos para la última milla basada en FTTB se utiliza compensación al 50 % y se realiza el mismo ajuste de espaciado asimétrico, donde los canales de 10 y 2.5 Gbps poseen una separación de 50 y 25 GHz de los demás respectivamente con tal de utilizar de manera mas eficiente el espectro disponible. Entonces, el principal cambio a realizar radica en la arquitectura de acceso ya que en esta ocasión se implementa FTTH donde el cable de fibra óptica llega hasta una ONT ubicada en el domicilio del cliente como se ve en la figura 3.1.

En primer lugar se tiene en cuenta la longitud de la fibra para ultima milla la cual puede llegar a extenderse hasta algunos kilómetros en aplicaciones FTTx. Sin embargo, la continua demanda de más ancho de banda ha dado lugar a implementaciones más profundas de fibra óptica y más cerca de la residencia del suscriptor en redes FTTH por lo que se ha optado por la utilización de cables de bajada o cables drop en estos casos. Los cables ópticos de bajada sirven como enlace directo desde la red de distribución del proveedor de servicios hasta el suscriptor y suelen poseer menos fibra con rangos de longitud de hasta 100 metros [77].

Para efectos prácticos, se hace una búsqueda de un cable de fibra versátil que pueda ser usado como cable de bajada para la última milla de una red basada en FTTH, con lo que se encuentra la fibra AllWave FLEX 200 μm de la compañía OFS perteneciente a Furukawa Electric Co., Ltd.

La fibra óptica AllWave FLEX de 200 μm admite cables de mayor densidad y menor diámetro, lo que proporciona un excelente rendimiento de macrocurvatura y microcurvatura para redes de acceso FTTH, redes corporativas o cualquier aplicación en la que se puedan encontrar diámetros de curvatura pequeños. Esta fibra cumple con la norma G.657.A1 y mantiene una pérdida por flexión muy baja en todo el espectro utilizable de longitudes de onda de 1260 a 1625 nm (tiene cinco veces mejor rendimiento de flexión que las fibras de monomodo convencionales) [78]. Las especificaciones de esta fibra se resumen en la tabla 3.12.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS		
Diámetro de revestido	125,0 \pm 0,7 μm	
Diámetro de revestimiento (sin color)	190 \pm 10 μm	
(con color)	200 \pm 10 μm	
Longitudes de carrete estándar	50.4 kilómetros	
CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS		
Atenuación	Máximo	Típico
\leq 0,35 dB / km	\leq 0,35 dB / km	\leq 0,34 dB / km
\leq 0,31 dB / km	\leq 0,31 dB / km	\leq 0,28 dB / km
\leq 0,24 dB / km	\leq 0,24 dB / km	\leq 0,21 dB / km
\leq 0,21 dB / km	\leq 0,21 dB / km	\leq 0,19 dB / km
\leq 0,24 dB / km	\leq 0,24 dB / km	\leq 0,20 dB / km

<i>Atenuación frente a rango de longitud de onda (nm)</i>	Referencia (nm) λ	α
1285-1330	1310	0.03
1360-1480	1385	0.04
1525-1575	1550	0.02
1460-1625	1550	0.04
*La atenuación en un rango de longitud de onda dado no excede la atenuación de la longitud de onda de referencia (λ) en más del valor α .		
Uniformidad de atenuación / discontinuidades puntuales a 1310 nm y 1550 nm	$\leq 0,05$	
<i>Dispersión Cromática</i>		
Longitud de onda de dispersión cero (λ_0)	1302 – 1322 nm	
Pendiente de dispersión cero (S_0)	$\leq 0,092 ps/nm^2 - km$	
Pendiente de dispersión típica	0,088 ps/nm ² – km	
<i>Índice de refracción grupal</i>		
a 1310 nm	1.467	
a 1550 nm	1.468	
<i>Diámetro del campo de modo</i>		
a 1310 nm	8,6 ± 0,4 μm	
a 1550 nm	9,4 – 10,4 μm (típico)	
Longitud de onda de corte (λ_{cc})	≤ 1260 nm	

Tabla 3.12: Especificaciones para fibra AllWave FLEX 200 μm . Adaptado de [78].

Entre los beneficios que presenta la fibra AllWave FLEX 200 μm se tienen:

- Diseño optimizado de flexión para curvas cerradas y de baja pérdida sin poner en riesgo la resistencia de la fibra y la confiabilidad a largo plazo.
- La fibra Zero Water Peak proporciona un aumento del 50 % en el espectro óptico utilizable, lo que permite CWDM de 16 canales y soporte DWDM.
- 36 % menos de área que la fibra recubierta convencional de 250 μm , lo que permite cables de menor diámetro y un mayor número de fibras por tubo.
- Probado a 100 Kpsi para mejorar la confiabilidad a largo plazo y simplificar cableado.
- La dispersión en modo de polarización ultra baja (PMD) permite actualizaciones de velocidad y distancia.

Para este caso en particular se debe tener en cuenta que las opciones de cableado de fibra óptica disponibles en Optsim son limitadas y un cable de fibra drop como el AllWave FLEX 200 μm no se encuentra disponible razón por la cual se tuvo como criterio que el cable de fibra drop tuviera características similares a la fibra Corning SMF-28e que se ha venido utilizando con tal de permitir mantener esta última en el modelo de simulación y facilitar la adaptación y análisis de la red actual. Esta y las otras características expuestas dan a saber que los cambios se centran en ajustes de parámetros del sistema mientras que los elementos de red en sí se mantienen por lo que

arquitectura de red dentro de la herramienta de simulación no sufre variaciones que se deban exponer a nivel de hardware.

Desempeño

A partir de la información expuesta es posible analizar el modelo de red basado en FTTH y realizar una comparativa con la implementación FTTB ya abordada, esto desde las características propias de cada arquitectura y según el desempeño de la red en el enlace de bajada para cada caso. Tanto FTTB como FTTH en general tienden a mantener una estructura similar a través de una red por lo que la diferencia más destacable se encuentra en el último tramo como se mencionó previamente, ya que FTTB llega hasta el edificio y luego la señal se transmite a los abonados o usuarios finales utilizando medios basados en cobre, mientras que FTTH llega directamente hasta el usuario final. Entre los elementos básicos que comparten estas 2 arquitecturas se encuentran:

- Oficina central - Terminal de Línea Óptica (OLT)
- ODN: Elementos pasivos
 - Fibra Óptica
 - Splitters
 - Conectores
 - Cierres de empalme
- Terminal de Red Óptica (ONT) / Unidad de Red Óptica (ONU)

FTTB presenta algunas ventajas en comparación con FTTH ya que el tiempo de despliegue es menor para poder ofrecer servicios que requieren más ancho de banda. FTTB también requiere una inversión inicial menor debido a la reutilización de la infraestructura de cobre existente permitiendo así un ahorro en coste de tramitación de licencias, coste de mano de obra de ingeniería e instalación y coste de fibra óptica.

Así mismo, FTTB también posee ciertas desventajas ante FTTH ya que FTTB utiliza terminaciones de cable coaxial (es decir del tipo híbrido fibra-coaxial o HFC) desde un punto más o menos alejado del edificio hasta el punto de conexión y envía los datos a los clientes a través de señales eléctricas, por lo que es más susceptible de sufrir interferencias; además de que FTTH puede ofrecer mayor ancho de banda y mantiene la velocidad de la señal durante mayores distancias que FTTB.

En cuanto al desempeño de la red, la adaptación de la misma con base en el modelo previo basado en FTTB permite que el análisis actual para FTTH pueda centrarse en el sitio de interés que corresponde a la última milla de la red con tal de comparar la forma en la que incide este factor en los 2 tipos de aplicaciones FTTx.

Siguiendo el análisis previo se tiene en cuenta la distancia que abarca la ultima milla como factor que puede influir sobre el desempeño de la red. Ya que para la ultima milla en FTTH se usa cableado de bajada el cual puede llegar hasta alrededor de los 100 m, se decide realizar una simulación para distancias de ultima milla de 10 y 100 m las cuales se encuentran dentro dicho rango y mantienen una diferencia considerable entre si para ayudar con el análisis de las mismas.

Ultima milla de fibra (m)	Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
10	2	-24.5697	$2.59 \cdot 10^{-33}$	21.5622	0.00339175	48.4916	5.43022
	3	-18.3625	10^{-40}	34.9908	0.0708266	58.9293	11.6375
100	2	-24.5864	$5.28 \cdot 10^{-33}$	21.5492	0.00337903	48.4942	5.4136
	3	-18.3798	10^{-40}	34.7572	0.0677666	58.9261	11.6201

Tabla 3.13: Parámetros OPM para última milla FTTH a 10 y 100 m.

La información expuesta en la tabla 3.13 corresponde a los parámetros OPM de la red para una implementación FTTH. Dichos datos muestran que para las condiciones de la red la mayoría de los parámetros expuestos no llegan tener variaciones significativas entre las distancias dadas para ultima milla con excepción de la BER siendo este el valor que se ve mas afectado ya que el mismo llega a ser poco mas del doble cuando se pasa de 10 a 100 m en la distancia para la ultima milla en los canales de 10 Gbps.

Por otro lado, en comparación con la red que implementa FTTB, la red actual basada en FTTH presenta ciertas mejoras en los diferentes valores donde una vez mas se destaca el valor de la BER que se incrementa considerablemente para esta ultima arquitectura. La mejora de los parámetros en FTTH puede explicarse por el hecho de que se implementa menos fibra en la ultima milla permitiendo que la señal deba recorrer un tramo mas corto y pueda evitar mayores degradaciones ópticas. Se debe tener en cuenta que esto ultimo es posible gracias a la cercanía que hay en FTTH entre el usuario y el punto de distribución (representado por el splitter), los cuales en comparación con FTTB se encuentran mas alejados entre sí.

De la misma forma, se puede evaluar el efecto de incrementar la carga de usuarios finales en FTTH tal cual como se hizo para FTTB, esto con el fin de comprobar la influencia de este factor sobre la red actual y a partir de ello sí existe alguna diferencia considerable del desempeño entre diferentes arquitecturas FTTx. Entonces, se realizan pruebas para cargas de 16, 32 y 64 usuarios para las 2 distancias de ultima milla definidas anteriormente.

Los datos presentados en las tablas 3.14 y 3.15 muestran que el incremento del número de usuarios no supone variaciones significativas para la mayoría de los parámetros de la red con excepción de la BER en los canales de 10 Gbps que tiende a variar junto con el aumento del numero de usuarios pero sigue manteniendo valores aceptables que no

# Usuarios finales	Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
16	2	-24.6685	$8.11 \cdot 10^{-30}$	21.2612	0.00329619	48.0350	5.33141
	3	-18.4076	10^{-40}	34.5454	0.0590721	54.9869	11.5924
32	2	-24.6685	$2.28 \cdot 10^{-29}$	21.2288	0.00333051	48.0351	5.33140
	3	-18.4076	10^{-40}	34.7064	0.0609444	54.9869	11.5924
64	2	-24.6685	$2.35 \cdot 10^{-30}$	21.1309	0.00329699	48.0350	5.33141
	3	-18.4076	10^{-40}	35.0715	0.0638807	54.9869	11.5924

Tabla 3.14: Parámetros OPM para 16, 32 y 64 usuarios; última milla FTTH de 10 m.

# Usuarios finales	Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
16	2	-24.6859	$4.21 \cdot 10^{-30}$	21.2583	0.00335069	48.0146	5.31403
	3	-18.4249	10^{-40}	34.8825	0.0620850	54.9840	11.5750
32	2	-24.6858	$2.34 \cdot 10^{-29}$	21.1150	0.00338546	48.0354	5.31419
	3	-18.4249	10^{-40}	35.1227	0.0618633	54.9854	11.5751
64	2	-24.6858	$1.19 \cdot 10^{-30}$	21.2166	0.00334234	48.0354	5.31419
	3	18.4249	10^{-40}	34.8191	0.0647043	54.9854	11.5751

Tabla 3.15: Parámetros OPM para 16, 32 y 64 usuarios; última milla FTTH de 100 m.

deberían perjudicar significativamente al sistema. Se puede rescatar que los valores de BER del canal de 10 Gbps tienden a mantenerse algo mas bajos con 100 m de ultima milla pero con un poco mas de jitter lo que permite notar un poco mejor la influencia del aumento del numero de usuarios. También se puede rescatar que parámetros como la BER, la potencia y la OSNR real se degradan respecto a cuando se tenían 8 usuarios tanto a 10 como a 100 metros.

En comparación con la red basada en FTTB, se sigue teniendo menores valores de BER para FTTH mientras que para los demás parámetros OPM no se presentan variaciones significativas entre ambos escenarios. Según los datos obtenidos hasta ahora sobre la red MLR de este primer caso de estudio bajo las condiciones que se han venido analizando, esta parece presentar un desempeño ligeramente mejor para una implementación de última milla FTTH que para una del tipo FTTB.

No obstante, se reconoce que tanto para FTTB como para FTTH la red es capaz trabajar en condiciones bastante buenas y esto es en parte gracias a las similitudes que poseen ambos tipos de arquitectura lo que a su vez permite abordar cualquiera de estas 2 aplicaciones FTTx sin mayores complicaciones para una red como la del caso de estudio actual. Adicionalmente, se debe tener presente que en un entorno real el factor decisivo entre FTTH y FTTB se encuentra en el tramo que no utiliza fibra óptica de esta ultima debido a las limitaciones de los medios basados en cobre los cuales no se pueden abordar eficientemente en un entorno como Optsim. En la tabla 3.16 se resumen los resultados encontrados del análisis para este primer esquema de red ahora basado en FTTH.

1.	Es posible implementar redes con arquitecturas de ultima milla basadas en FTTH para un esquema de red MLR.
2.	Las implementaciones de fibra mas próximas al usuario final propias de FTTH permiten una leve mejora en los parámetros del sistema en comparación con FTTB.
3.	El desempeño de una red tiende a variar según tipo de arquitectura que maneje para la ultima milla.
4.	Se debe considerar el uso de cables de fibra de bajada sobre un entorno real con distancias cortas para última milla FTTH.
5.	A pesar de ciertas diferencias, tanto FTTH como FTTB en general presentan un buen desempeño dentro del esquema de red MLR propuesto.

Tabla 3.16: Resumen de resultados del análisis para red MLR tipo 1 basada en FTTH.

Acorde con el segundo y tercer objetivos específicos, los resultados obtenidos en general para este primer caso de estudio muestran que es posible implementar diferentes arquitecturas FTTx sobre una red MLR de 2.5/10 Gbps y analizar la forma en la que estas influyen mediante una evaluación del desempeño de la red para cada una de dichas arquitecturas con tal de obtener una red que trabaje en óptimas condiciones. Sin embargo, aun se hace necesario evaluar las condiciones de la red al utilizar en conjunto las velocidades de transmisión mas altas (10 y 40 Gbps) así como al implementar mas de 2 velocidades con tal de lograr un mejor análisis sobre la heterogeneidad que poseen las redes del tipo MLR para aplicaciones de última milla FTTx.

3.2. RED MLR BASADA EN LOS ESTÁNDARES XGS-PON Y NG-PON2

En este segundo caso de estudio se adapta la red para trabajar sobre velocidades basadas en los estándares XGS-PON y NG-PON2. Como ya se sabe, XGS-PON permite operar con velocidades simétricas de 10 Gbps y en esta ocasión se implementa en conjunto con NG-PON2 el cual es un estándar de red de telecomunicaciones de 2015 desarrollado por la UIT para una red óptica pasiva, definida en sus recomendaciones ITU-T G.989.1 a ITU-T G.989.3 [33, 79, 80] donde se estandariza una velocidad nominal a 10 Gbps a nivel de acceso de la red, con el objetivo de generar sistemas con velocidad de transmisión nominal de 40 Gbps. En la tabla 3.17 se realiza una breve comparativa entre NG-PON1 y NG-PON2 a partir de la información dispuesta en [66], [67] y [33].

NG-PON2 es el primer sistema de red óptica pasiva basado en estándares de múltiples longitudes de onda de la industria que es compatible con las redes de distribución óptica de potencia dividida. A este estándar se le han asignado dos tecnologías, TWDM-PON (*Time and Wavelength Division Multiplexing PON*) y PtP WDM-PON [81] con el objetivo principal de habilitar redes de acceso fijo mediante TWDM, desarrollar servicios dedicados mediante PtP WDM y en general, quiere lograr que los sistemas NG-PON2 sean capaces de soportar múltiples servicios de alta calidad y velocidad.

Características		NG-PON1		NG-PON2
		XG-PON	XGS-PON	
Velocidad (Gbps)	Descendente	10	10	40
	Ascendente	2.5	10	10/40
Rango ancho de banda (nm)	Descendente	1575-1580	1575-1580	1596-1602
	Ascendente	1260-1280	1260-1280	1524-1544
Distancia mínima del enlace (Km)		20	40	60
Disponibilidad comercial		Sin despliegue		No disponible actualmente
Tipo		Punto a punto		Punto a punto
		Punto a multipunto		Punto a multipunto
Aplicación		Fibra hasta la x (FTTx)		Fibra hasta la x (FTTx)

Tabla 3.17: NG-PON1 vs NG-PON2.

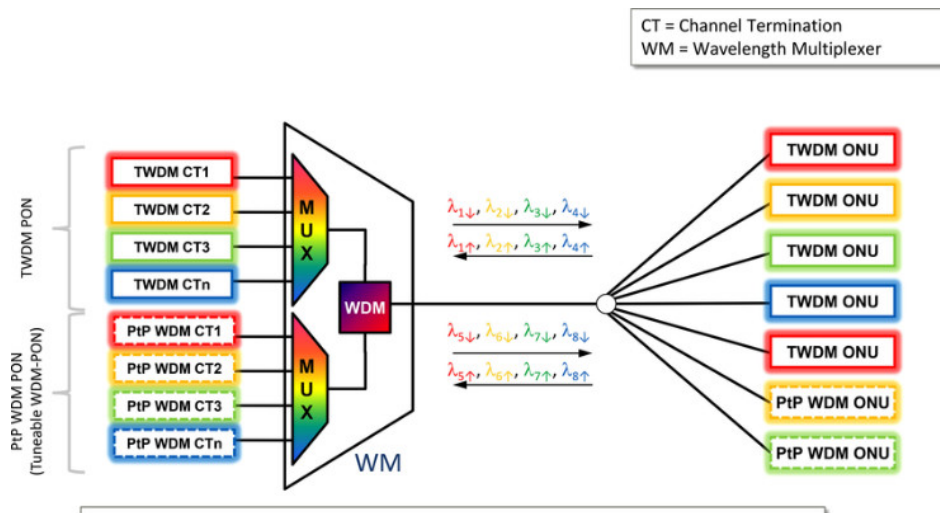


Figura 3.24: Ejemplo de arquitectura NG-PON2. Tomado de [82].

En la figura 3.24 se observa la arquitectura del sistema NG-PON2, la cual concuerda con los estándares basados en GPON. Entre las características que posee NG-PON2 se encuentran la capacidad de vinculación múltiples longitudes de onda para proporcionar servicios de mas de 10 Gbps, la capacidad de adaptarse al admitir tasa de bits simétricas y asimétricas, la sintonización dinámica de longitudes de onda, y la coexistencias con otras tecnologías PON [83].

El alcance de estos sistemas soporta entre 40 a 60 km de distancia, incluso más si se hace uso de extensores de alcance, en cuento al factor de velocidad de transmisión de cada canal de acceso, se puede combinar los diferentes tipos de canales ópticos generando una capacidad global del sistema de mínimo 40 Gbps. Sin embargo, como el objetivo es lograr una red tipo MLR-DWDM, se requiere que los canales implementen velocidades de acceso nominales por cada canal y no mediante la capacidad total de un conjunto de los canales, aclarando que los estándares elegidos se han seleccionado por la velocidad sugerida en cada uno.

Entonces, la simulación se realiza teniendo como base lo expuesto para el modelo inicial y el primer caso de estudio con tal de poder realizar una adaptación de canales que permita velocidades de transmisión híbridas de 10 y 40 Gbps.

3.2.1. Análisis para última milla basada en FTTB

Se parte de las características expuestas respecto a los modelos de red SLR inicial y red MLR que se han abordado hasta el momento, en principio con un enfoque sobre la arquitectura para ultima milla FTTB. Así, la nueva red MLR usa un fibra tipo Corning SMF-28e para un enlace de 80 Km donde se considera el tramo adicional de ultima milla para la misma longitud de fibra óptica que en el caso de estudio previo (900 m). Por su parte se implementa modulación tipo RZ-OOK sobre los canales a 10 Gbps y modulación tipo DPSK sobre los canales a 40 Gbps.

La modulación DPSK es una forma de modulación digital, donde la información binaria de la entrada está compuesta en la diferencia entre las fases de dos elementos sucesivos de señalización, y no en la fase absoluta, en otras palabras, está representada por un cambio de fase, donde se tiene que, cuando se envía un uno binario la fase es igual a la del bit anterior, y un cero binario se representa por un cambio de la fase, en la figura 3.25 se muestra el diagrama de bloques de un modulador DPSK.

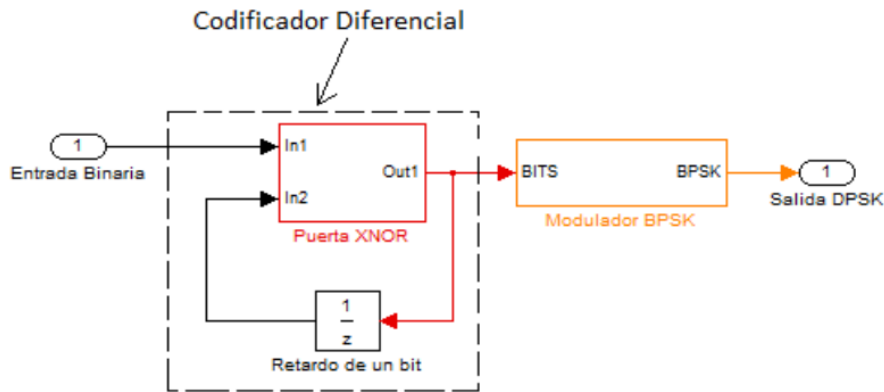


Figura 3.25: Diagrama de bloques de un modulador DPSK. Tomado de [84].

El uso del formato de modulación DPSK mejora las prestaciones para comunicaciones ópticas de larga distancia, en comparación con los formatos OOK, mejorando la sensibilidad del receptor y la tolerancia a los efectos no lineales, además tanto OOK como DPSK pueden ser implementados con codificación NRZ o RZ sin haber impacto en la amplitud. DPSK provee una mejora en OSNR de 3dB debido a que dobla la distancia entre los símbolos como se muestra en la figura 3.26, además de eso tiene una tolerancia mayor contra las deficiencias del sistema que OOK [85].

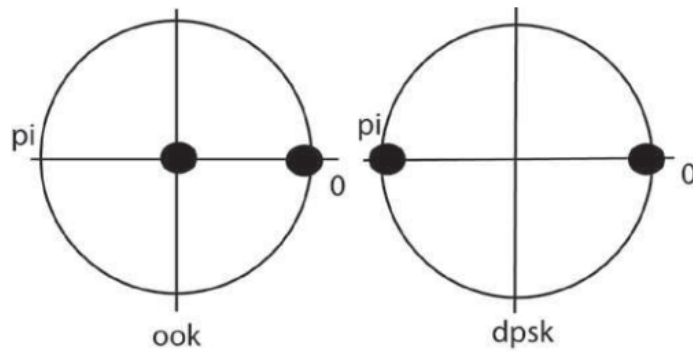


Figura 3.26: Diagrama de Constelación OOK vs DPSK. Tomado de [85].

Ahora en cuanto a los canales de la red, en el caso de estudio previo se implemento un sistema de 8 canales donde la mitad de ellos trabajaban a 2.5 Gbps y la otra mitad a 10 Gbps, pero debido a las velocidades que debe manejar la red actual se cree que es mas conveniente ajustar el numero de canales de tal forma que se mantengan 4 canales de 10 Gbps y a su vez no se tengan demasiados canales de 40 Gbps ya que estos poseen un mayor grado de dificultad en cuanto implementación y a su vez exigen una mayor inversión sobre un escenario real. Entonces se opta por implementar 6 canales en la red actual ya que se hace mas conveniente realizar la organización de forma similar a la del caso de estudio 1 para facilitar la adaptación del esquema y el análisis comparativo sobre la red.

Por tanto los canales correspondientes a 40 Gbps serán el primero y el último (canales 1 y 6), y los canales de 10 Gbps serán aquellos que corresponden a las frecuencias entre estos (canales 2, 3, 4 y 5). En cuanto a la separación de los canales, se comenzara nuevamente con un valor de 100 GHz entre todos los canales siguiendo el plan de frecuencias inicial de la ecuación 3.1 dado que aquellos con velocidades de 40 Gbps pueden ocupar mas espacio dentro del espectro definido al ser de mayor velocidad y a pesar de utilizar un esquema de modulación mas robusto.

Se escogen potencias de transmisión de 5 y 0 dBm para los canales de 10 y 40 Gbps respectivamente. Se comienza con una carga inicial de 6 usuarios finales (uno por cada canal) a través de una segunda etapa de split que permite un incremento hasta de 64 de ellos, no se usan amplificadores y adicionalmente se recurre a compensación de dispersión al 50% dado el comportamiento de los canales de 10 Gbps modulados con RZ-OOK presentado en el primer caso de estudio. En la figura 3.27 se presenta el modelo general de red para este segundo caso de estudio y en la figura 3.28 se muestra el bloque de transmisión para un canal de 40 Gbps.

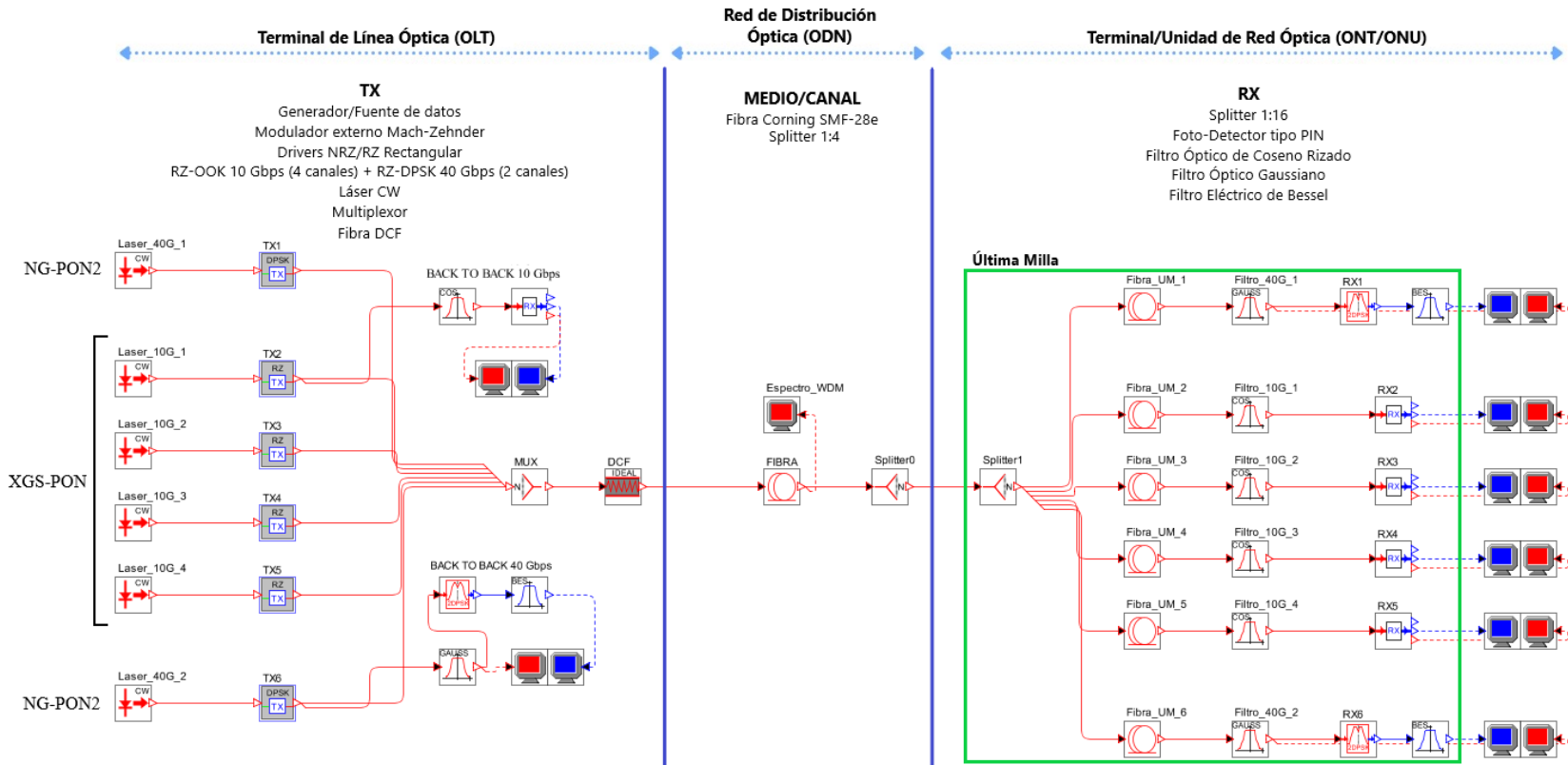


Figura 3.27: Red MLR tipo 2.

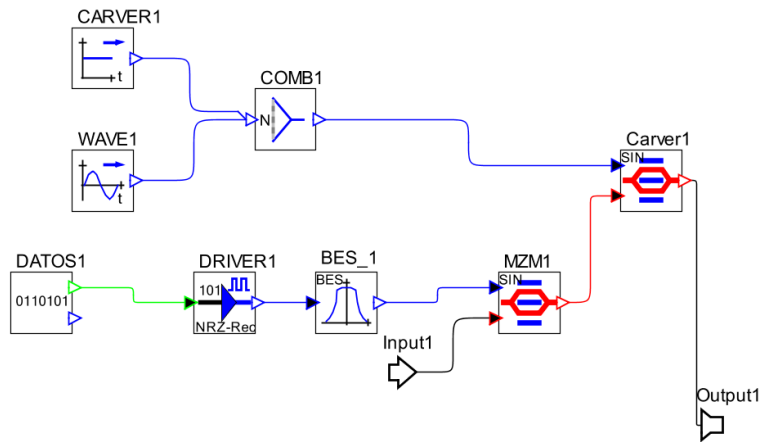


Figura 3.28: Bloque de transmisión para canales de 40 Gbps.

Según puede verse, existen ciertas diferencias entre la red de el caso de estudio actual y la del caso previo en cuanto a la implementación de canales con velocidad de 40 Gbps. En la figura 3.28 se muestra que el transmisor requiere una configuración especial para lograr una modulación DPSK, donde parte de ella corresponde a la utilizada para la modulación NRZ-OOK la cual luego se conecta a un segundo interferómetro Mach-Zehnder denominado grabador de pulsos o modulador carver [69]. El grabador de pulsos a su vez obtiene una señal eléctrica proveniente de un generador de ondas polarizadas y un generador de ondas sinusoidales de la cual detectará los cambios diferenciales de fase y ajustara la señal óptica proveniente del primer interferómetro para poder generar la señal RZ-DPSK deseada [86].

En cuanto al receptor, la figura 3.27 muestra que se utiliza un filtro del tipo Gaussiano en vez del filtro de coseno rizado que se tenía para OOK y ya que DPSK no requiere detección coherente, se utiliza un receptor balanceado ideal disponible en Optsim que permite demodular y obtener mas fácilmente la señal deseada para el usuario final. Dicho receptor no posee un filtro interno como se daba para el Sensitive Optical Receiver que se venia usando por lo que se agrega un filtro eléctrico de Bessel para convertir la señal óptica a una del tipo eléctrico y así poder realizar el análisis respectivo sobre esta. En la tabla 3.18 se resumen los parámetros de red para este segundo caso de estudio.

Parámetros	Valor
Número de Canales	6
Potencia de transmisión a 10 Gbps	5 dBm
Potencia de transmisión a 40 Gbps	0 dBm
Longitud de Onda	1530 – 1560 nm
Tipo de Modulación Óptica a 10 Gbps	RZ-OOK
Tipo de Modulación Óptica a 40 Gbps	RZ-DPSK
Sensibilidad del Receptor	-30 dBm
Modulador Óptico	Mach-Zehnder

Fibra Óptica	Corning SMF-28
Tipo de Filtro Óptico	Coseno Rizado, Gaussiano
Tipo de Filtro Eléctrico	Bessel

Tabla 3.18: Características generales de red MLR tipo 2.

Desempeño

Se procede a realizar el análisis de desempeño en el enlace de bajada de la red basada en FTTB que se propone para este segundo caso de estudio. Antes de obtener cualquier valor numérico respecto a parámetros OPM, primero se obtiene el espectro óptico de la señal multiplexada en el canal y los diagramas del ojo Back-to-Back y de recepción para canales de 10 y 40 Gbps.

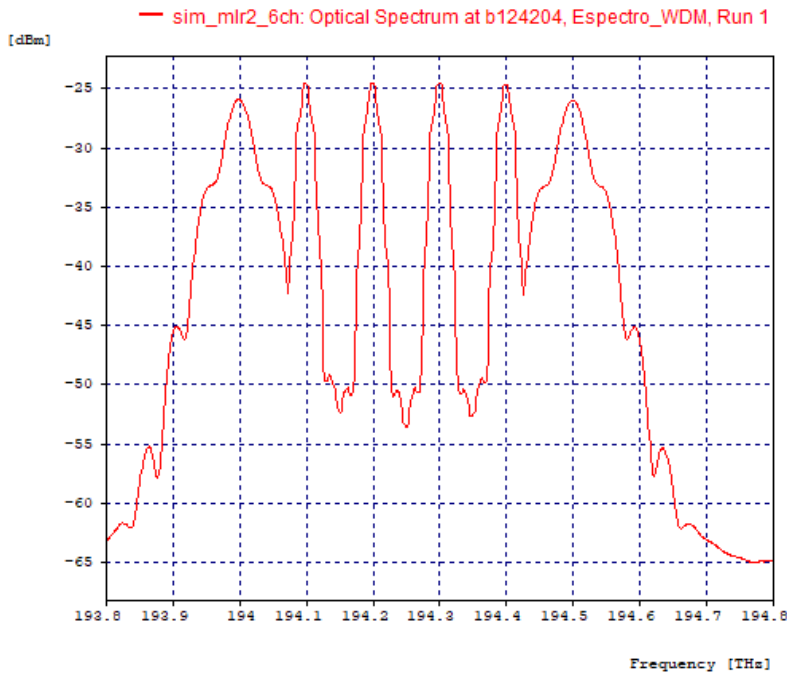


Figura 3.29: Espectro WDM de red MLR tipo 2.

En la figura 3.29 se presenta el espectro de la señal multiplexada donde se puede apreciar como difiere la forma de dicho espectro en comparación con el del caso de estudio previo. De ello se puede resaltar que los canales de 40 Gbps parecen estar algo superpuestos entre sí confirmando que estas poseen un mayor ancho de banda dada su velocidad de propagación. Por otro lado, se puede ver que la potencia que se obtiene en los canales de 40 Gbps es bastante cercana a la de los canales de 10 Gbps a pesar de poseer una potencia de transmisión de menor magnitud demostrando la robustez que posee un formato de modulación como DPSK frente a OOK.

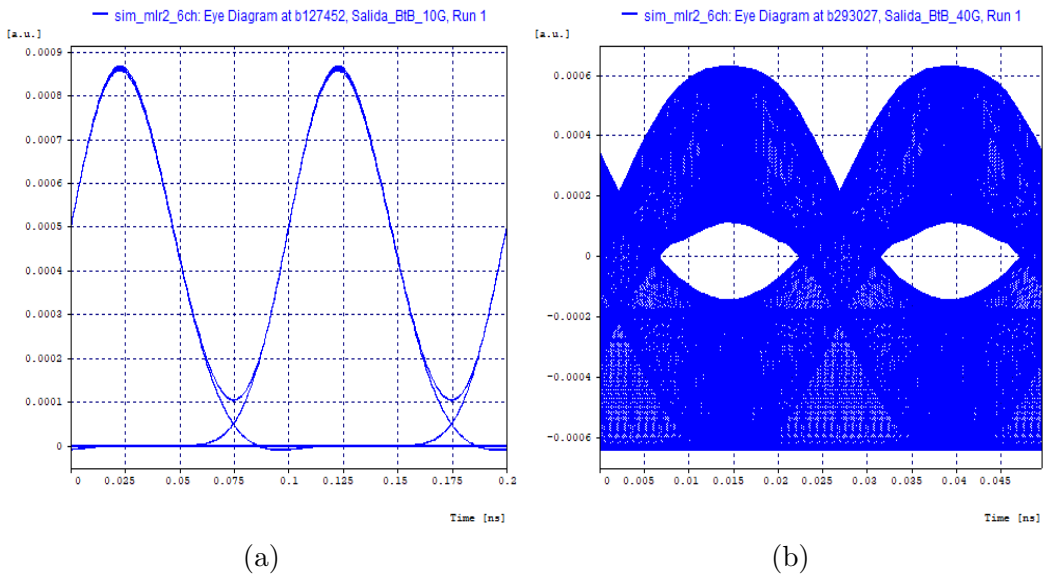


Figura 3.30: Diagramas del ojo Back-to-Back (a) 10 y (b) 40 Gbps.

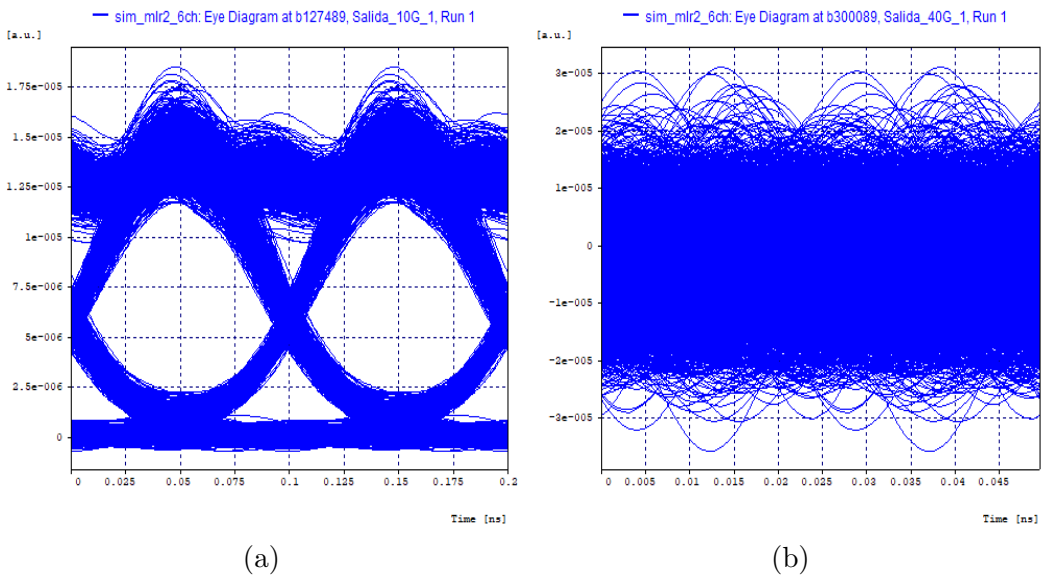


Figura 3.31: Diagramas del ojo en recepción (a) 10 y (b) 40 Gbps.

En cuanto a los diagramas de ojo, mientras que en las figuras 3.30a y 3.31a se obtienen resultados similares a los presentados para el primer caso de estudio, las figuras 3.30b y 3.31b presentan inconsistencias ya que el diagrama Back-to-Back demuestra gran cantidad de errores y en recepción se obtiene un diagrama no legible por lo que es necesario realizar ajustes sobre la red.

Como el diagrama del ojo de la configuración Back-to-Back debe presentar la señal del sistema en condiciones ideales, uno de los problemas en los canales de 40 Gbps se

centra sobre la sección de transmisión por lo que se realizaron variaciones en los parámetros de transmisión sin obtener resultados aceptables. Se decidió entonces abordar los parámetros de simulación reduciendo el ancho de banda del sistema hasta 0.96 THz.

La figura 3.32a evidencia que la reducción del ancho de banda del canal permitió obtener un diagrama del ojo óptimo para condiciones ideales pero por otro lado la figura 3.32b muestra que la señal en recepción aun se encuentra en mal estado dando a entender que el problema de mayor relevancia para esta ultima es de diferente naturaleza.

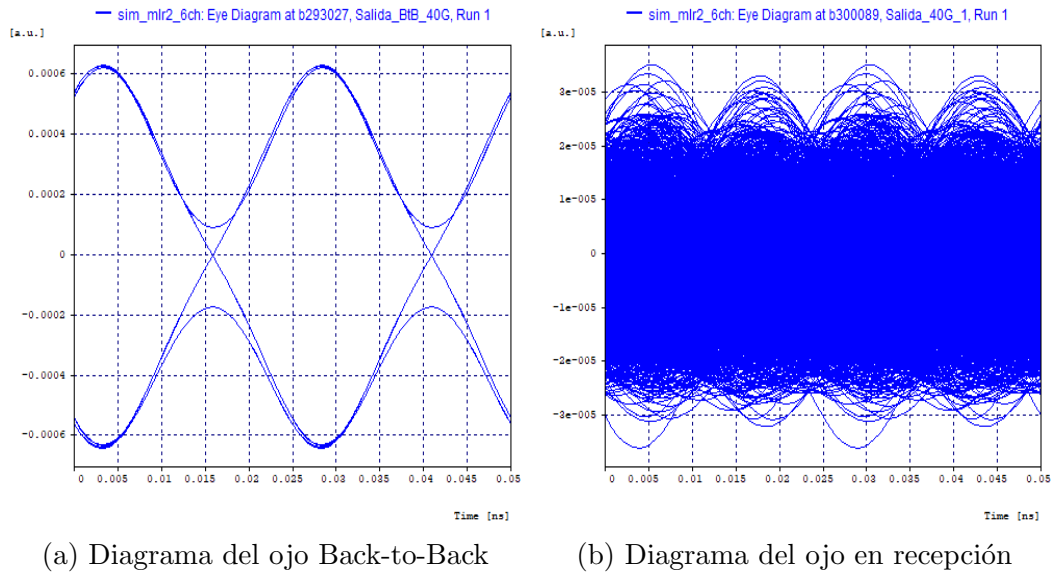


Figura 3.32: Diagramas del ojo de canal de 40 Gbps para 0.96 THz de ancho de banda.

Ya que una tasa de bits de 40 Gbps es mucho mas susceptible a la dispersión que una de 10 Gbps, se cree que el problema presente se da por exceso de dispersión por lo que se decide incrementar el porcentaje de compensación del DCF hasta 75 y 100 % y se analizan los canales en cuestión.

En primer lugar, las figuras 3.33 y 3.34 se muestran los diagramas del ojo para las señales de los 2 canales de 40 Gbps con compensaciones del 75 y 100 %. Según esto, los diagramas de los canales de 40 Gbps tienen mejor correspondencia al diagrama obtenido previamente para Back-to-Back solo cuando se realiza compensación al 100 % demostrando que efectivamente estos canales poseen una mayor susceptibilidad a la dispersión a pesar de utilizar un esquema de modulación mas robusto. Así mismo, se destaca el hecho de que el diagrama del ultimo canal de 40 Gbps no mejoro en la misma magnitud que el primer canal ya que la forma del ojo aun presente ciertas diferencias en comparación tanto entre estos canales como para la configuración Back-to-Back

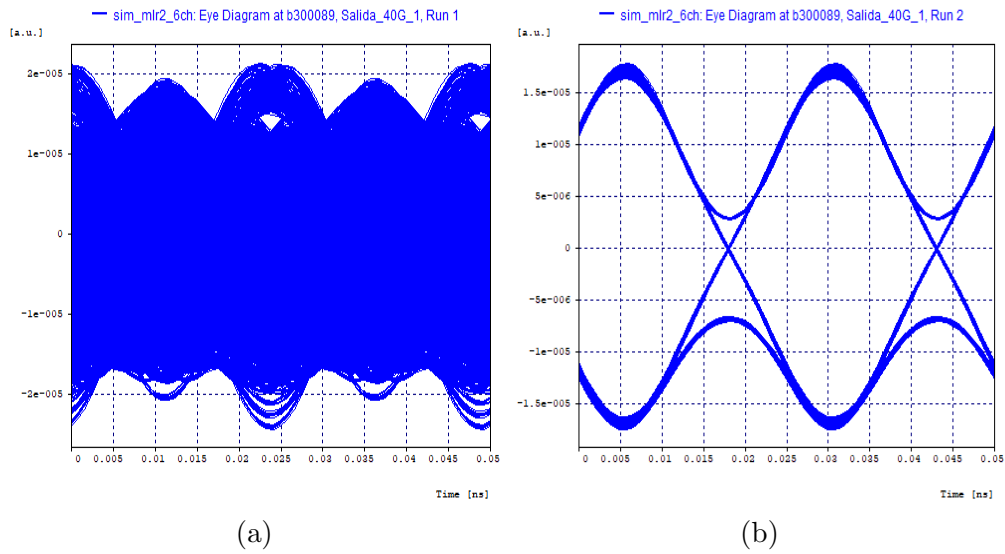


Figura 3.33: Diagramas del ojo de canal 1 de 40 Gbps para (a) 75 y (b) 100 % de compensación

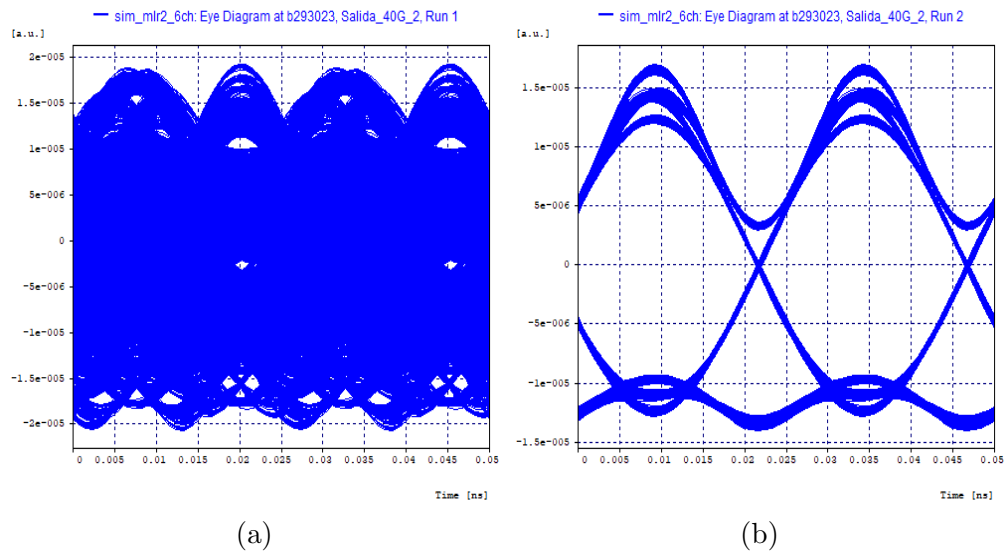


Figura 3.34: Diagramas del ojo de canal 6 de 40 Gbps para (a) 75 y (b) 100 % de compensación

Por otro lado, en la figura 3.35 se presenta una mejora considerable para el diagrama del ojo de 10 Gbps similar a la que se obtuvo cuando se realiza el análisis sobre el efecto de la compensación para el primer caso de estudio. Esto indica que la tasa de errores y el factor de calidad también mejoraron de forma significativa para la señal por lo que se deben esperar resultados numéricos más óptimos para los parámetros OPM.

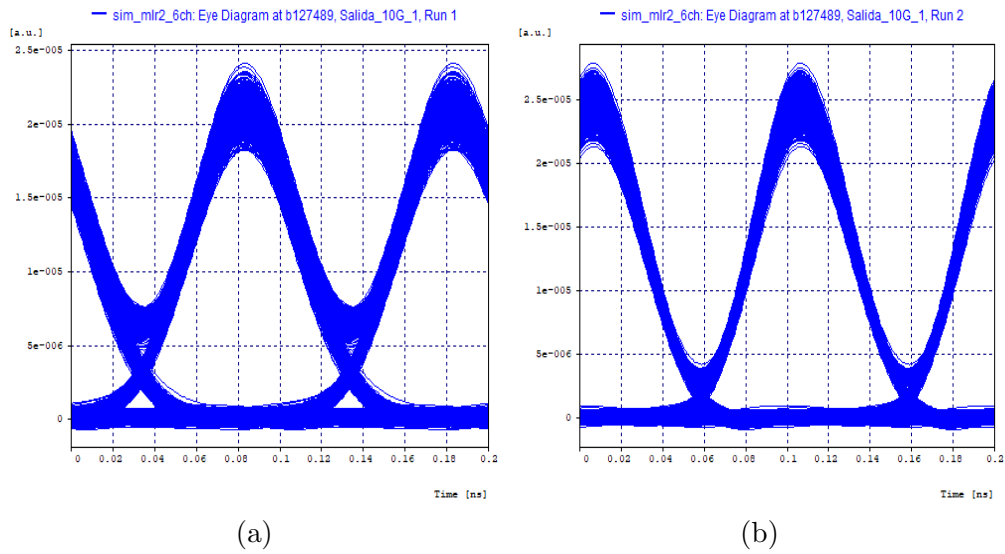


Figura 3.35: Diagramas del ojo de canal de 10 Gbps para (a) 75 y (b) 100 % de compensación

Antes de obtener los parámetros OPM para realizar un análisis mas profundo sobre el sistema, se realizaron pruebas para entender que factor incidía sobre los canales de 40 Gbps para los diagramas del ojo presentaran ciertas diferencias entre ellos. Así, se encontró que al mover la grilla espectral a frecuencias menores el diagrama del ojo del ultimo canal tiende a mejorar por lo que se decide fijar la frecuencia de referencia (frecuencia del primer canal) para el plan de frecuencia en 193.8 THz. En la figura 3.36 se muestra la mejora en el diagrama del ojo para el último canal de la red.

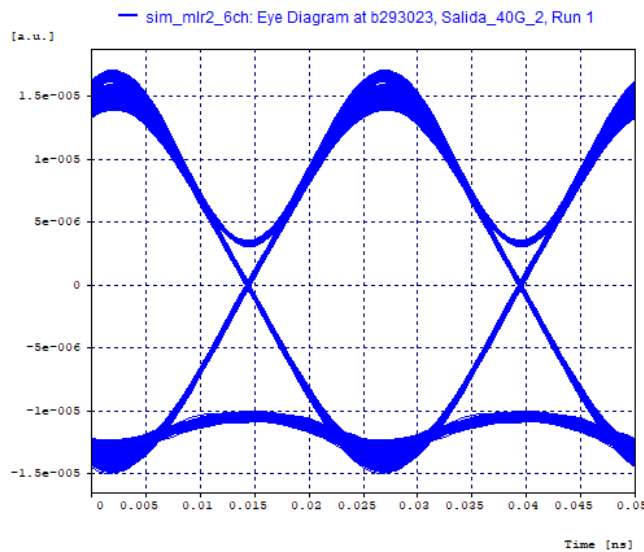


Figura 3.36: Diagrama del ojo de canal 6 de 40 Gbps para nueva grilla espectral.

Con los ajustes realizados se procede a obtener los datos correspondientes a los parámetros OPM para la red actual, los cuales son presentados en la tabla 3.19.

Canal	Velocidad Tx (Gbps)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
1	40	-25.9582	10^{-40}	40	1.30×10^{-5}	44.75	4.04171
2	10	-24.6273	10^{-40}	25.2279	0.000516425	49.0550	5.37262
3		-24.7789	10^{-40}	33.1221	0.000402012	49.1100	5.22103
4		-24.7707	10^{-40}	32.8826	0.000378899	50.1105	5.22928
5		-24.6435	10^{-40}	24.1646	0.000578503	52.0144	5.35647
6	40	-25.9922	10^{-40}	29.9526	0.000406847	46.6136	4.00776

Tabla 3.19: Parámetros OPM para red MLR tipo 2.

Los datos de la tabla en general muestran un desempeño mejor en comparación con la red del caso de estudio previo lo que probablemente se debe al incremento de la compensación de dispersión en el sistema lo cual a su vez llegaría a incidir negativamente en los costos para un entorno real. Los datos permiten confirmar lo que se presentaba previamente en el espectro de la señal acerca de la diferencia de potencia (poco más de 1 dB) entre los canales de 10 y 40 Gbps resaltando que los canales de 10 Gbps aun utilizan una potencia de 5 dBm y los de 40 Gbps se mantienen a 0 dBm, lo que a su vez se ve reflejado en los valores obtenidos de OSNR real.

Además, los valores del factor Q de los canales de 10 Gbps son menores en aquellos que se encuentran próximos a los de 40 Gbps por lo que existe cierta influencia por parte de estos últimos sobre los primeros. De los datos también puede verse que los últimos 2 canales tienden a tener un desempeño por debajo de los demás por lo que es posible centrarse en estos para análisis posteriores. Así, se obtiene el espectro en recepción para los últimos 2 canales con tal de ver cualquier efecto que se produzca entre estos.

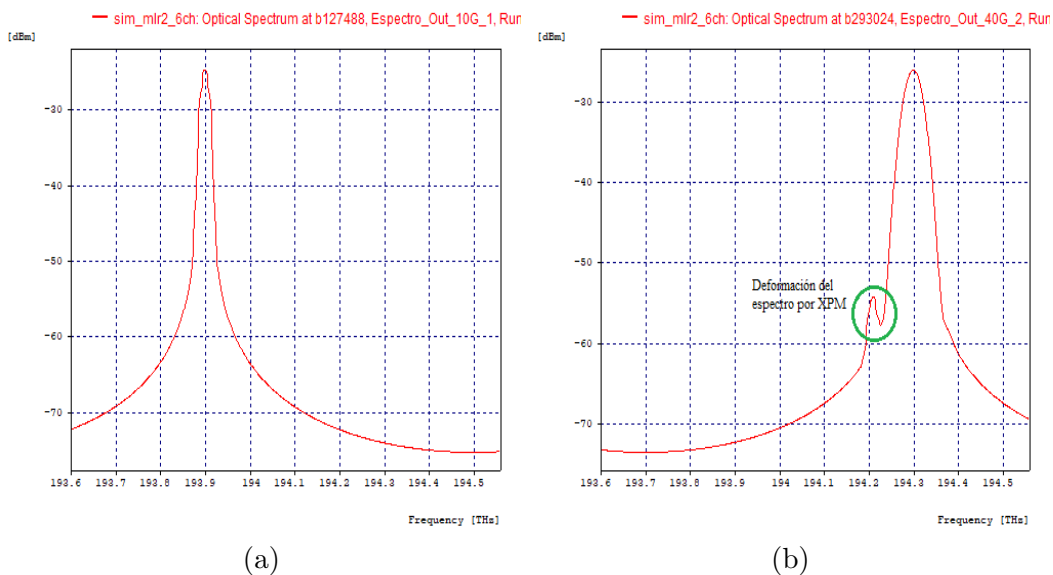


Figura 3.37: Espectro en recepción para canales de (a) 10 y (b) 40 Gbps

Los gráficos del espectro de las figuras 3.37a y 3.37b demuestran que los canales de mayor velocidad tienden a verse afectados por aquellos cercanos de menor velocidad tal como se dio para el primer caso de estudio, lo que se evidencia a partir de la deformación del espectro del canal de 40 Gbps producida por efecto de XPM. No obstante, la influencia de XPM u otro efecto no lineal sobre la red actual no es lo suficientemente significativa como para producir degradaciones importantes sobre esta.

Ahora, para saber si es posible aprovechar de mejor forma el ancho de banda disponible se reduce el espaciamiento entre canales de forma similar a como se hizo en el caso de estudio 1. Para este caso solo se reducirá el espaciamiento hasta 50 GHz teniendo en cuenta que previamente los canales de 10 Gbps no aceptaron positivamente un menor espaciamiento a este.

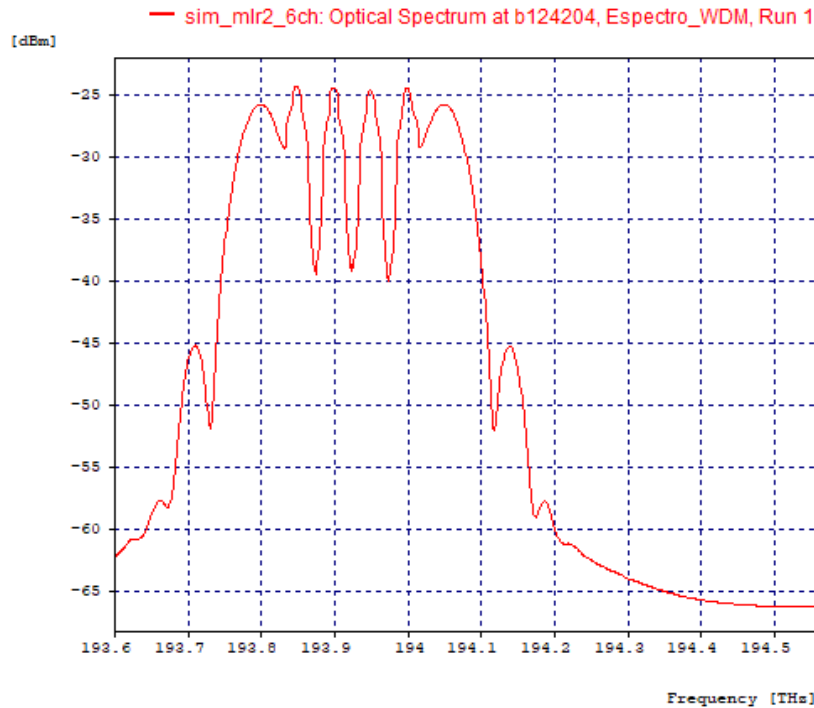


Figura 3.38: Separación de canales a 50 GHz.

Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
5	-24.6192	$4.36 \cdot 10^{-6}$	12.8311	0.00202881	48.6469	5.3808
6	-25.9595	$2.69 \cdot 10^{-10}$	16.0980	0.00130976	46.5361	4.04047

Tabla 3.20: Parámetros OPM de red MLR tipo 2 para separación entre canales de 50 GHz.

El diagrama del espectro de la figura 3.38 y los datos de la tabla 3.20 muestran que al acercar los canales, el desempeño del sistema se reduce significativamente obte-

niendo valores de BER (resaltados en rojo) por encima del valor objetivo. Así mismo existe bastante degradación sobre el factor de calidad y un incremento considerable del jitter. Para el caso se cree que la degradación del sistema depende principalmente del acercamiento de los canales de 40 Gbps ya que previamente el espaciamiento utilizado había dado resultados aceptables para los canales de 10 Gbps por lo cual se cree posible realizar una asignación asimétrica manteniendo los canales de 40 Gbps a 100 GHz de los demás y los canales de 10 Gbps a 50 GHz entre sí.

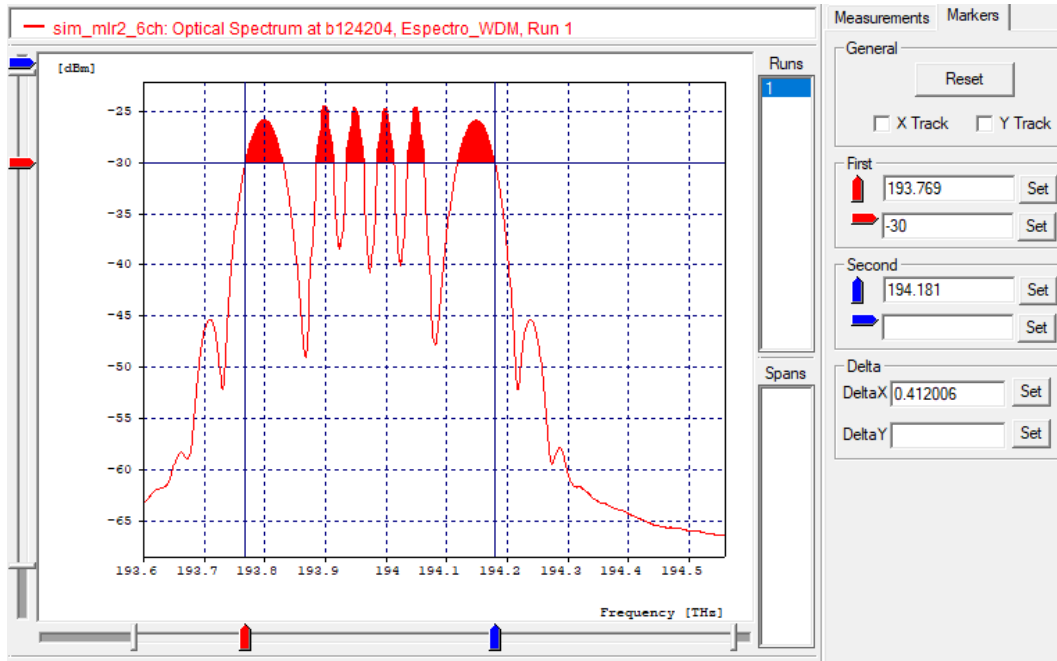


Figura 3.39: Separación de canales asimétrica y medida del ancho de banda útil en red MLR tipo 2.

Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
5	-24.6532	10^{-40}	22.7576	0.000684008	51.3769	5.34679
6	-25.9544	10^{-40}	34.8562	0.000156957	47.2861	4.04551

Tabla 3.21: Parámetros OPM de red MLR tipo 2 para separación asimétrica entre canales.

La información que se muestra en la figura 3.39 y en la tabla 3.21 confirma que los canales de 40 Gbps no pueden aproximarse demasiado a los demás canales con tal de que el sistema mantenga un buen desempeño. Así mismo, aunque no sea posible reducir el espaciamiento para los canales de 40 Gbps, si se logró reducir el espaciamiento entre los canales de 10 Gbps obteniendo un ancho de banda útil de aproximadamente 412 GHz por lo que ahora se realiza la medición de la ISD del sistema.

$(N-1)\Delta_V$	C_N	C_{Total}	C_{Pro}	Bw	η_{disa}
50 GHz	10 Gbps	4 ch * 10 Gbps +	<i>Distancia: 80.9 Km</i>	412 GHz	29.12 % [bps/Hz]
100 GHz	40 Gbps	2 ch * 40 Gbps = 120 Gbps	9.708 Tbps*Km		

Tabla 3.22: Variables de medición y control, 6 canales híbridos.

La tabla 3.22 muestra el comportamiento del sistema para el caso de estudio actual, donde se obtiene una eficiencia espectral del 29.12 % la cual resulta ser mayor a la que se obtuvo para el primer caso de estudio. Esto se debe a que se logra un mayor throughput en el sistema con la red actual a pesar de que también se tiene un mayor ancho de banda ocupado por el uso de velocidades de transmisión bastante elevadas.

Siguiendo el mismo procedimiento realizado anteriormente, se ve el efecto que posee el aumento de la distancia del enlace óptico en el mismo intervalo planteado en el caso de estudio 1, esto con tal de comprobar las condiciones de la red ahora que algunos de los canales trabajan a velocidades de transmisión mucho mayores.

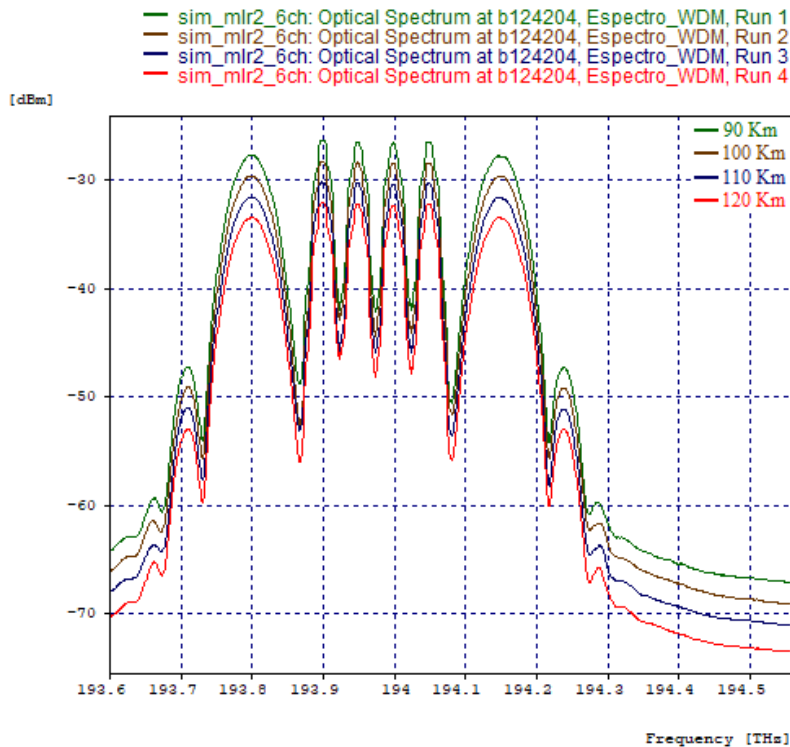


Figura 3.40: Espectro WDM de red MLR tipo 2, rango de 90-120 Km.

En la figura 3.40 se tiene el espectro de la señal multiplexada para diferentes distancias donde puede notarse que la potencia de la señal llega a atenuarse por debajo del valor de sensibilidad fijado por lo que se comprueba la información referente a los parámetros OPM.

Distancia enlace (Km)	Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
90	5	-26.5348	$2.51 \cdot 10^{-35}$	21.9407	0.000717498	50.8991	3.46513
	6	-27.8998	10^{-40}	32.1101	0.00032915	47.5365	2.10014
100	5	-28.5070	$3.21 \cdot 10^{-28}$	20.8087	0.000807114	50.6041	1.49296
	6	-29.7569	10^{-40}	28.8340	0.000372405	47.3771	0.24303
110	5	-30.4101	$2.79 \cdot 10^{-19}$	19.2248	0.000980795	52.3620	-0.410196
	6	-31.7184	10^{-40}	25.9351	0.000443059	47.3550	-1.71845
120	5	-32.3152	$5.34 \cdot 10^{-12}$	16.8058	0.00130434	49.8690	-2.31529
	6	-33.6202	10^{-40}	23.0264	0.000480012	47.6715	-3.62022

Tabla 3.23: Parámetros OPM en red MLR tipo 2, rango de 90-120 Km.

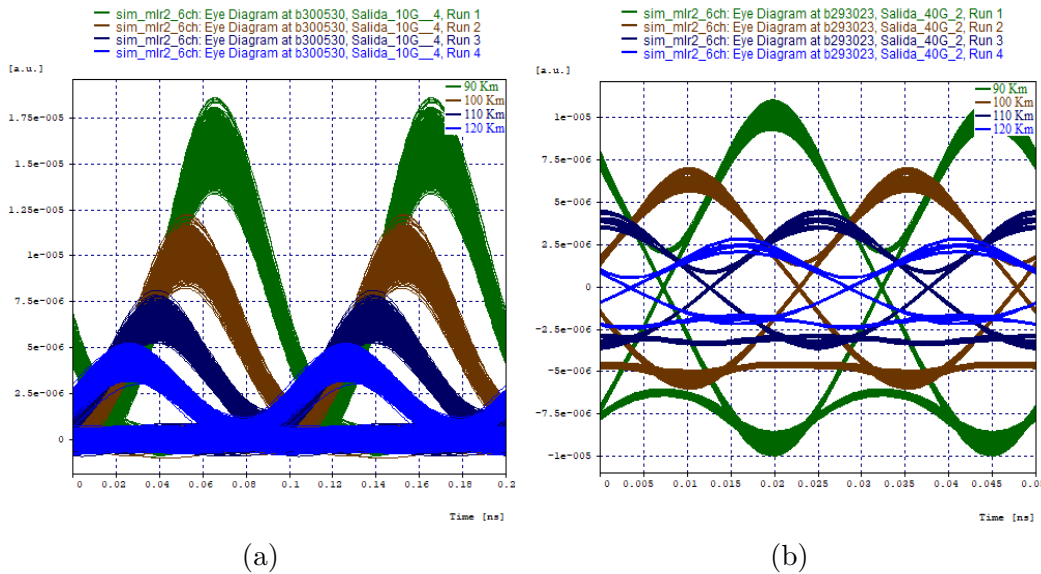


Figura 3.41: Diagramas del ojo para canales de (a) 10 y (b) 40 Gbps; red MLR tipo 2. Rango de 90-120 Km.

La información expuesta en la tabla 3.23 y en la figura 3.41 muestran como se degradan las señales a medida que aumenta la distancia del enlace. Al llegar a 100 Km se resaltan 2 valores ya que la potencia del canal 6 de 40 Gbps se encuentra muy cerca del valor de sensibilidad fijado obteniendo una OSNR apenas por encima 0 dB en este punto y de igual forma después de los 100 Km se obtienen valores de potencia por debajo de la sensibilidad del receptor (resaltados en rojo) para ambos canales comprobando así que los canales con mayores velocidades de transmisión se ven mas afectados por la atenuación en estos casos. A pesar de ello, los valores de BER no llegan a superar el valor fijado hasta los 120 Km aunque si se tiene cierto aumento en el jitter mientras sigue incrementando la distancia del enlace.

También se destaca que en comparación con el primer caso de estudio, ahora los canales de 10 Gbps presentan cierta mejora en su desempeño lo cual debe estar ligado a

que en este caso se esta compensando al 100 % la dispersión en vez de al 50 %. Por otro lado, además de la atenuación que presentan los diagramas del ojo en ambos canales, la forma de estos no se ve mayormente degradada por lo que se abre la posibilidad de recurrir a técnicas de amplificación para mejorar el alcance de la señal sí llega a ser necesario.

Ahora, se debe evaluar a sección correspondiente a la última milla de la red por lo que se procede de forma similar al caso de estudio 1 para ultima milla FTTB. Entonces, primero se disminuye la longitud de la ultima milla en intervalos de 100 m hasta llegar a una longitud de fibra de ultima milla de 500 m y determinar el efecto que posee esta variable para el caso actual. También, ya que se mantiene fija la distancia del enlace de 80 Km, no es necesario recurrir al uso de amplificadores en la red actual.

Ultima milla de fibra (m)	Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
800	5	-24.6435	10^{-40}	22.7978	0.000668194	50.5284	5.3564
	6	-25.9444	10^{-40}	34.0345	0.000187047	47.5535	4.05553
700	5	-24.6304	10^{-40}	22.7874	0.000683209	50.4705	5.36953
	6	-25.9406	10^{-40}	33.1682	0.000263748	47.3197	4.05938
600	5	-24.6104	10^{-40}	22.6371	0.000684019	51.0974	5.38952
	6	-25.9326	10^{-40}	32.2605	0.000352923	47.1095	4.06735
500	5	-24.5892	10^{-40}	22.8665	0.000672777	51.8682	5.41078
	6	-25.9142	10^{-40}	31.3603	0.00036416	47.2226	4.08571

Tabla 3.24: Parámetros OPM para ultima milla de red MLR tipo 2 (800-500 m).

Tal como sucedió en el primer caso de estudio, la tabla 3.24 muestra que variaciones de 100 m en los intervalos para la longitud de última milla no son críticos sobre el desempeño del sistema dados los mínimos cambios entre los parámetros OPM para cada distancia, por lo que tampoco se hace necesario observar los diagramas de ojo o el espectro en cada canal. Sin embargo, el factor Q del canal 6 de 40 Gbps parece disminuir y el jitter tiende a aumentar a medida que se reduce la distancia de ultima milla por lo que puede ser susceptible cuando se utiliza en distancias mas cortas. Otra diferencia que radica entre el caso de estudio de actual y el primero es que se obtiene un mejor desempeño en los canales de 10 Gbps gracias al aumento de la compensación de dispersión aunque esto suponga un mayor costo para un caso real.

De igual forma se evalúa las condiciones de la red para variaciones del numero de usuarios finales de la misma aprovechando el segundo nivel de split presente. Aunque para este caso inicialmente solo se tengan 6 usuarios finales, se realizan simulaciones para 16, 32 y 64 usuarios finales como se hizo previamente agregando nuevos abonados según sea conveniente.

# Usuarios finales	Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
16	5	-24.6532	10^{-40}	22.6888	0.00067419	51.3753	5.34677
	6	-25.9545	10^{-40}	34.8601	0.0001587	47.2865	4.0455
32	5	-24.6532	10^{-40}	22.7210	0.000682661	51.3753	5.34677
	6	-25.9545	10^{-40}	34.8601	0.0001587	47.2865	4.0455
64	5	-24.6517	10^{-40}	22.7826	0.000670035	51.0157	5.34823
	6	-25.9545	10^{-40}	34.8601	0.0001587	47.2865	4.0455

Tabla 3.25: Parámetros OPM de red MLR tipo 2 para 16, 32 y 64 usuarios.

Los datos de la tabla 3.25 muestran que ante el aumento del número de usuarios las variaciones que presentan los parámetros OPM de la red actual son mínimas de forma similar a como sucedió en el primer caso de estudio por lo que se puede corroborar que este hecho es propio del funcionamiento de Optsim con tal de que los usuarios correspondientes a un mismo canal no accedan al mismo tiempo dándole una mayor estabilidad a la red.

Acorde con el primer objetivo específico planteado, fue posible obtener un modelo de red MLR que funcione a velocidades de 10/40 Gbps realizando ciertos ajustes que permitieran a estos canales de velocidades de transmisión altas trabajar en conjunto y mantener un óptimo desempeño. En la tabla 3.26 se presenta el resumen de los resultados obtenidos del análisis para esta red MLR-FTTB de 10/40 Gbps.

1.	Es posible implementar altas velocidades de transmisión y de diferentes valores sobre una misma fibra.
2.	Es posible implementar canales con esquemas de modulación avanzados en conjunto con esquemas de modulación más simples sobre una a misma fibra.
3.	Los canales con altas tasas de transmisión requieren un mayor uso del espectro.
4.	La ISD del sistema puede mejorar al utilizar velocidades de transmisión más altas a pesar de requerir mayor ancho de banda.
5.	A medida que se utilizan mayores velocidades de transmisión sobre una red, es necesario realizar ajustes sobre esta con tal de evitar que esas altas tasas de bit limiten demasiado el desempeño del sistema.
6.	Incluso al utilizar velocidades de transmisión elevadas, la distancia y el número de usuarios de la última milla no inciden fuertemente sobre el desempeño del sistema obtenido.

Tabla 3.26: Resumen de resultados del análisis para red MLR tipo 2 basada en FTTB.

3.2.2. Análisis para última milla basada en FTTH

Según la información obtenida para a última milla basada en FTTB y la información del caso de estudio 1 se adapta el modelo de red actual para aplicación FTTH en última milla. Se mantienen los 6 canales mixtos de 10/40 Gbps con modulaciones RZ-OOK y DPSK respectivamente, la distancia del enlace de 80 Km y se omite la amplificación.

Como se dijo previamente, se suele utilizar cable de fibra tipo drop por las características propias en ultima milla FTTH siendo el cable AllWave FLEX 200 μm apto para este fin y por sus similitudes con la fibra Corning SMF-28e disponible en Optsim es posible mantener esta ultima dentro del entorno de simulación para facilitar la adaptación de la red. Se realiza compensación al 100 % mediante fibra DCF para mitigar los efectos de dispersión sobre los canales y además se mantiene el espaciado asimétrico que se obtuvo anteriormente en FTTB para esta red MLR tipo 2. Así, los cambios realizados radican principalmente en ajustes sobre parámetros del sistema mientras que la arquitectura de red en general no sufre cambios a nivel de hardware de la misma forma que en el primer caso de estudio.

Desempeño

Según lo anterior, se parte del procedimiento realizado para el caso de estudio 1 por lo que se evalúan distancias de ultima milla de 10 y 100 m adecuadas para cables drop, esto manteniendo la distancia del enlace fija en 80 Km.

Ultima milla de fibra (m)	Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
10	5	-24.5076	10^{-40}	22.8278	0.000673887	51.2604	5.4923
	6	-25.8052	10^{-40}	26.8747	0.000390204	47.3225	4.19476
100	5	-24.5248	10^{-40}	22.8995	0.000677963	50.8064	5.47517
	6	-25.8287	10^{-40}	27.6221	0.000374786	47.2999	4.17121

Tabla 3.27: Parámetros para última milla FTTH a 10 y 100 m en red MLR tipo 2.

Los datos dispuestos en la tabla 3.27 muestran que varios de los parámetros no poseen variaciones significativas respecto a los resultados obtenidos en FTTB con excepción del factor Q que se degrada considerablemente y el jitter que parece haber aumentado entre los 2 tipos de FTTx para el canal 6 de 40 Gbps. Así, el factor Q parece incrementar cuando se pasa de 10 a 100 m mientras que el jitter disminuye por lo que el desempeño de este canal desde estos 2 parámetros tiende a disminuir a distancias más cortas como se veía para FTTB cuando habían variaciones de la longitud de última milla. A pesar de ello el desempeño general de la red se mantiene en buena condición por lo que no supone mayor inconveniente hasta el momento.

Ahora, también se incrementa el número total de usuarios finales para ver cómo influye este factor sobre la red del caso actual ahora basada en FTTH. Se realiza de la misma forma que para el caso de estudio 1 donde se tienen 16, 32 y 64 usuarios para las distancias de última milla de 10 y 100 m. Así, se obtienen los parámetros OPM según el número de usuarios finales para las 2 distancias de última milla propuestas, donde los valores de dichos parámetros se presentan en las tablas 3.28 y 3.29.

# Usuarios finales	Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
16	5	-24.5076	10^{-40}	22.7595	0.000694409	51.2604	5.4923
	6	-25.8052	10^{-40}	26.8705	0.000388718	47.3226	4.19477
32	5	-24.5018	10^{-40}	22.8310	0.000685357	51.2018	5.4981
	6	-25.8038	10^{-40}	26.8726	0.000389245	47.3433	4.19618
64	5	-24.5018	10^{-40}	22.8279	0.000694404	51.2017	5.4981
	6	-25.8038	10^{-40}	26.8696	0.000388534	47.3434	4.19618

Tabla 3.28: Parámetros OPM de red MLR tipo 2 para 16, 32 y 64 usuarios; última milla FTTH de 10 m.

# Usuarios finales	Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
16	5	-24.5248	10^{-40}	22.7243	0.000674747	50.8064	5.47518
	6	-25.8287	10^{-40}	27.6068	0.000376912	47.2998	4.17123
32	5	-24.5187	10^{-40}	22.7247	0.000695732	51.2635	5.4812
	6	-25.8287	10^{-40}	27.6271	0.000374103	47.30	4.1712
64	5	-24.5187	10^{-40}	22.7883	0.000675138	51.2638	5.4812
	6	-25.8287	10^{-40}	27.6022	0.000377718	47.2998	4.17123

Tabla 3.29: Parámetros OPM de red MLR tipo 2 para 16, 32 y 64 usuarios; última milla FTTH de 100 m.

Los datos de las tablas 3.28 y 3.29 no presentan variaciones considerables a medida que incrementa el número de usuarios por lo que la red actual también se mantiene estable gracias a las características propias del simulador. Por otro lado, tal como sucedió previamente, el factor Q y el jitter mantienen el comportamiento al pasar de 10 a 100 m donde el primero aumenta y el segundo disminuye.

En cuanto a las 2 arquitecturas FTTx, los canales de 40 Gbps parecen tener una mejor calidad en FTTB ya que el factor Q para esta aplicación es considerablemente mayor que para FTTH, de la misma forma que el jitter es menor en FTTB que en FTTH. A pesar de ello sigue existiendo un buen desempeño por parte de ambas FTTx por lo que se puede usar una u otra dependiendo del caso y teniendo en cuenta las observaciones realizadas de aquellas variables que tienen influencia en ambos escenarios.

También se debe recordar tener en cuenta cierta diferencia entre ambas arquitecturas para un entorno real la cual radica en el tramo eléctrico de FTTB y las limitaciones de medios basados en cobre, donde dicho tramo no se puede abordar de forma mas efectiva en una herramienta como Optsim. En la tabla 3.30 se resumen los resultados encontrados del análisis para el esquema de red de este segundo caso de estudio ahora basado en FTTH.

1. Es posible implementar redes MLR basadas en FTTH para velocidades de transmisión altas.

2.	Parámetros como el factor de calidad o el jitter de señales a altas velocidades son un poco mas susceptibles a la variación de longitud de la ultima milla.
3.	Para altas tasas de transmisión de bits, existe un desempeño levemente mejor para FTTB que para FTTH en redes MLR.
4.	Tanto FTTH como FTTB siguen presentando buen desempeño en general para velocidades mixtas de mayor magnitud como las del presente caso.

Tabla 3.30: Resumen de resultados del análisis para red MLR tipo 2 basada en FTTH.

Acorde con el segundo y tercer objetivos específicos, los resultados obtenidos en general para este segundo caso de estudio muestran que también es posible implementar diferentes arquitecturas FTTx sobre una red MLR de 10/40 Gbps para luego poder evaluar el desempeño de la red en cada una de dichas arquitecturas y así lograr que esta trabaje en óptimas condiciones. No obstante, aun se debe realizar el análisis sobre la red cuando se implementa mas de 2 velocidades a la vez con tal de profundizar un poco mas en la heterogeneidad de las redes MLR para aplicaciones de última milla FTTx.

3.3. RED MLR BASADA EN LOS ESTÁNDARES XG-PON, XGS-PON Y NG-PON2

Como tercer caso de estudio se plantea un enlace óptico que opere con las 3 velocidades o tasas de bit estudiadas previamente teniendo como objetivo una red MLR de 2.5/10/40 Gbps que se basa en las velocidades de bajada propuestas por la FSAN en XG-PON, XGS-PON Y NG-PON2 respectivamente. Por tanto se tienen en cuenta tanto la información presentada en capítulos anteriores como el análisis realizado en los 2 casos de estudio previos.

3.3.1. Análisis para última milla basada en FTTB

Según lo hecho anteriormente, se parte desde el análisis de última milla basada en FTTB con base en los modelos de red abarcados anteriormente. Así, la red actual consta de una enlace óptico sin amplificación con fibra Corning SMF-28e de 80 Km de longitud considerando el tramo adicional de fibra de 900 m para la ultima milla. Se implementan modulaciones NRZ-OOK, RZ-OOK y RZ-DPSK para los canales con velocidades de transmisión de 2.5, 10 y 40 Gbps respectivamente.

Ahora bien, como se ha tratado de mantener cierto numero de canales en cierto orden para cada implementación desde el modelo inicial hasta los 2 casos de estudio anteriores, es posible adaptar este ultimo caso de estudio a un numero de canales que siga la misma lógica para implementar una red MLR con las 3 velocidades objetivo. Por tal motivo, es conveniente utilizar 10 canales para este ultimo modelo de red a evaluar donde los canales 1 y 10 se utilizaran velocidades de 40 Gbps; los canales 2, 3,

8 y 9 trabajaran a velocidades de 10 Gbps; y los canales 4, 5, 6 y 7 serán aquellos con velocidades de 2.5 Gbps.

En cuanto al espaciamiento de los canales, la organización planteada permite considerar la asignación asimétrica que se realizo para casos previos con lo cual es posible optimizar el uso del ancho de banda y así mismo mejorar la ISD del sistema anticipadamente. Por ello, los canales de 2.5 Gbps pueden tener una separación de 25 GHz de los demás, mientras que los canales de 10 Gbps necesitan estar al menos a 50 GHz de los otros y a su vez los canales de 40 Gbps requieren una separación de al menos 100 GHz. Aquí también se tiene en cuenta el ajuste de la grilla espectral realizado en el segundo caso de estudio, por lo que se tiene una frecuencia de referencia (frecuencia del primer canal) de 193.8 THz.

Se utilizara una potencia inicial de 0 dBm para los canales de 2.5 y 40 Gbps, y una potencia de 5 dBm para los canales de 10 Gbps. Se comienza con una carga inicial de 10 usuarios finales (uno por cada canal) a través de una segunda etapa de split que permite un incremento hasta de 64 de ellos, no se usan amplificadores y adicionalmente se recurre a compensación de dispersión al 100 % dado el comportamiento de los canales de 40 Gbps modulados con RZ-DPSK presentado en el anterior caso de estudio. En la tabla 3.31 se resumen los parámetros de red y en la figura 3.42 se presenta el modelo general de red para este tercer caso de estudio.

Parámetros	Valor
Número de Canales	10
Potencia de transmisión a 2.5 Gbps	0 dBm
Potencia de transmisión a 10 Gbps	5 dBm
Potencia de transmisión a 40 Gbps	0 dBm
Longitud de Onda	1530 – 1560 nm
Tipo de Modulación Óptica a 2.5 Gbps	NRZ-OOK
Tipo de Modulación Óptica a 10 Gbps	RZ-OOK
Tipo de Modulación Óptica a 40 Gbps	RZ-DPSK
Sensibilidad del Receptor	-30 dBm
Modulador Óptico	Mach-Zehnder
Fibra Óptica	Corning SMF-28
Tipo de Filtro Óptico	Coseno Rizado, Gaussiano
Tipo de Filtro Eléctrico	Bessel

Tabla 3.31: Características generales de red MLR tipo 3.

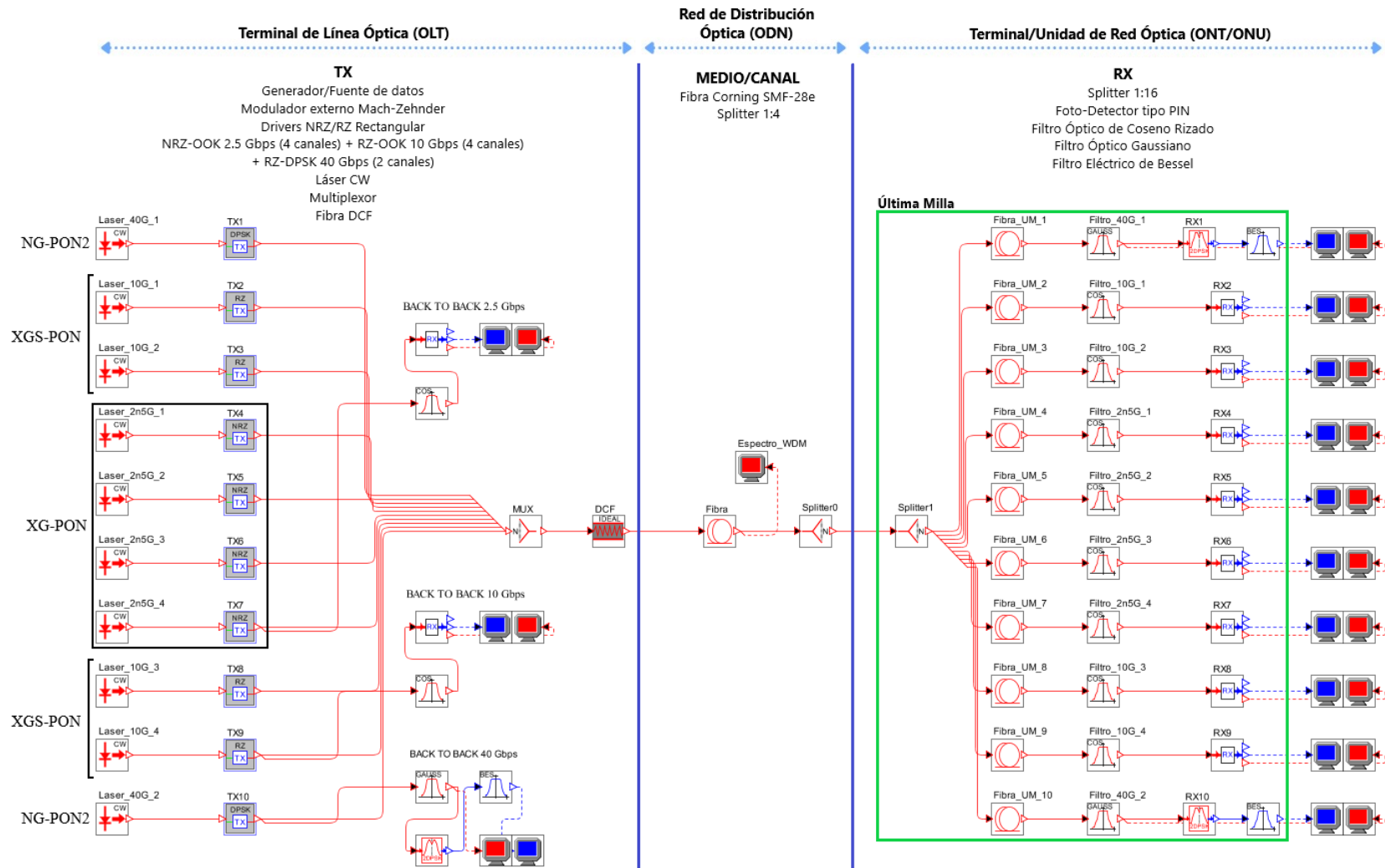


Figura 3.42: Red MLR tipo 3.

El modelo de red de la figura 3.42 muestra un diseño basado en las implementaciones de los casos de estudio previos permitiendo abordar 3 velocidades diferentes en una misma red de forma mas sencilla. Los bloques de transmisión a velocidades de 2.5/10/40 Gbps corresponden a los mostrados previamente en las figuras 3.3, 3.4 y 3.28 respectivamente.

Desempeño

A partir de las características de red expuestas, se procede a evaluar el desempeño en el enlace de bajada de la red para ultima milla FTTB. Así, primero se obtiene el espectro óptico de la señal multiplexada.

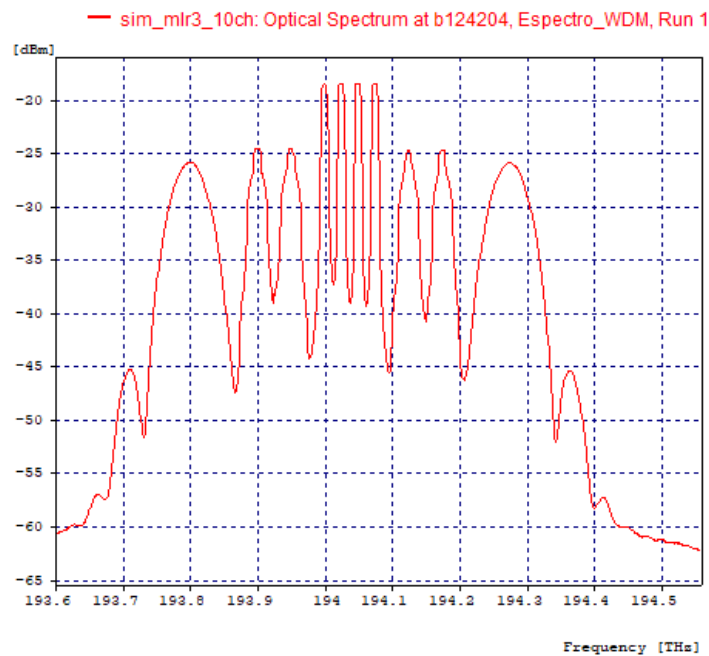


Figura 3.43: Espectro WDM de red MLR tipo 3.

La figura 3.43 muestra el espectro de la señal multiplexada donde pueden compararse los picos de las 3 diferentes velocidades implementadas. Tal como sucedía en casos previos, las señales de 2.5 Gbps son las que se ven menos afectadas por la atenuación y pueden estar mas cerca entre sí, mientras que los canales de 10 Gbps aun utilizan mayor potencia de transmisión para poder llegar a la distancia fijada (80 Km) con una calidad decente y los canales de 40 Gbps son los que requieren una mayor separación entre canales para no tener interferencia significativa. Hecho esto, se procede a obtener los parámetros OPM del sistema.

Los datos que se exponen en la tabla 3.32 muestran que a pesar de cierto aumento en el jitter y una disminución del factor Q en los canales de 10 y 40 Gbps, la red actual posee en general un buen desempeño desde el principio lo cual se debe a que los problemas derivados de la implementación de redes con velocidades heterogéneas

podieron abordarse en los casos de estudio previos permitiendo así llegar a un diseño que tuviera en cuenta cada ajuste realizado y lograr una red que trabaje en mejores condiciones. Las variaciones que se logran apreciar probablemente están ligadas al uso de 3 velocidades distintas cuya interacción en un mismo medio no produce degradaciones lo suficientemente significativas como para afectar en gran medida al sistema en general.

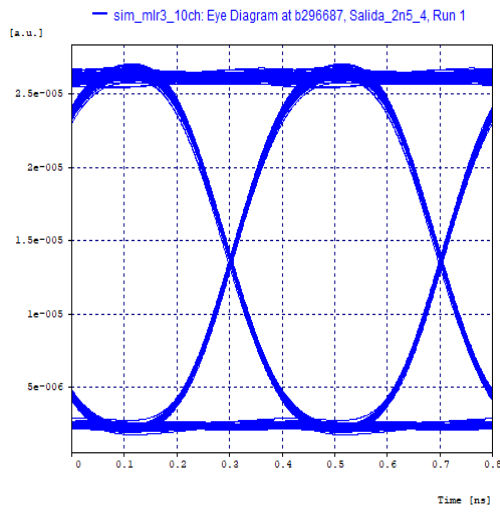
Canal	Velocidad Tx (Gbps)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
1	40	-25.9526	10^{-40}	36.5009	0.000222999	44.5601	4.04733
2	10	-24.5264	10^{-40}	24.0679	0.000596529	49.1936	5.47355
3		-24.6505	10^{-40}	30.2538	0.000366381	49.0162	5.34942
4	2.5	-18.6001	10^{-40}	35.7774	0.0618284	51.6105	11.3999
5		-18.5604	10^{-40}	36.2849	0.0616056	55.4139	11.4396
6		-18.5248	10^{-40}	35.9214	0.0672369	60.1681	11.4752
7		-18.5407	10^{-40}	35.8429	0.0605379	55.7015	11.4592
8	10	-24.8913	10^{-40}	30.1241	0.000342675	50.3339	5.10864
9		-24.6972	$4.84 \cdot 10^{-37}$	22.1904	0.000718670	51.5369	5.30274
10	40	-26.0007	10^{-40}	32.1506	0.000389221	47.6739	3.99931

Tabla 3.32: Parámetros OPM para red MLR tipo 3.

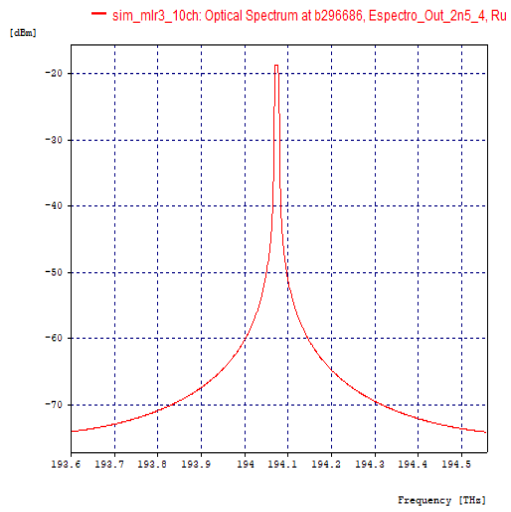
Entre los datos obtenidos se destaca que el canal 9 de 10 Gbps posee una tasa de errores mayor que los demás canales y a su vez un menor factor Q, mientras que de los 2 canales de 40 Gbps el canal 10 es el que posee menor factor Q y mayor jitter lo cual sugiere cierta influencia entre estos 2 similar a como ocurría en el segundo caso de estudio. Por otro lado los canales de 2.5 Gbps tienden a presentar valores similares para sus parámetros por lo que no hay variaciones significativas entre estos de forma similar a como sucedía en casos previos.

Según la información presentada es posible tomar un canal de cada velocidad para facilitar el análisis sobre la red tal como se he venido haciendo hasta ahora en el presente trabajo, por lo que se decide centrar el análisis sobre los canales 7, 9 y 10 de 2.5, 10 y 40 Gbps respectivamente. Con esto, se obtienen los diagramas del ojo y el espectro en recepción de los canales de cada velocidad.

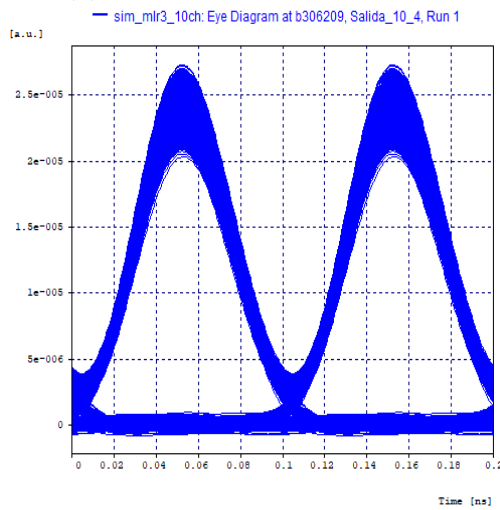
Las figuras 3.44a a 3.44f presentan los diagramas del ojo y el espectro de cada señal para los 3 canales de diferentes velocidades. En el diagrama del ojo en 3.44c se puede apreciar una mayor BER para el canal de 10 Gbps correspondiendo a lo que se obtuvo en los parámetros OPM del mismo, y en cuanto el espectro del canal de 40 Gbps aun se ve reflejado el efecto de XPM por estar contiguo al canal de 10 Gbps que para el caso no produce una degradación significativa. Por su parte, los diagramas para el canal de 2.5 Gbps (figuras 3.44a y 3.44b) no presentan variaciones significativas en comparación con otros casos además de una ligera mejora gracias a la compensación de dispersión actual.



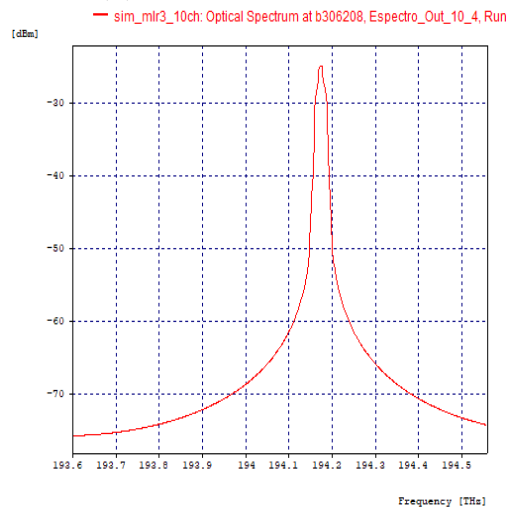
(a) Diagrama del ojo, canal 7.



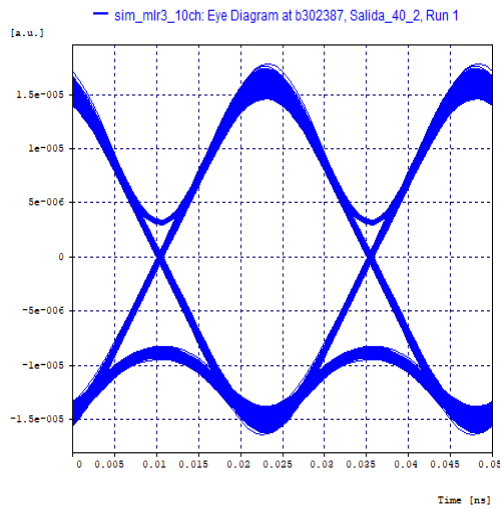
(b) Espectro del canal 7.



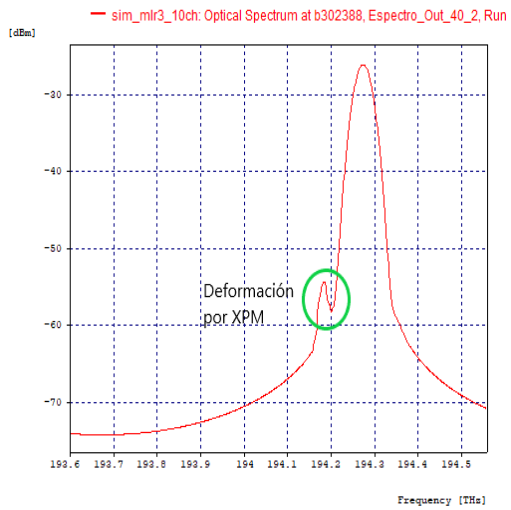
(c) Diagrama del ojo, canal 9.



(d) Espectro del canal 9.



(e) Diagrama del ojo, canal 10.



(f) Espectro del canal 10.

Figura 3.44: Diagramas en recepción de canales a 2.5, 10 y 40 Gbps.

También se debe realizar la medición de la ISD del sistema que se tiene actualmente, ya que ahora se tiene un mayor número de canales que en casos previos y en esta ocasión se utilizan 3 velocidades distintas. Además, en el presente caso de estudio ya se consideró desde el principio un espaciamiento asimétrico para mejorar el uso del ancho de banda en el sistema por lo que se hace necesario comprobar la eficiencia espectral en el mismo.

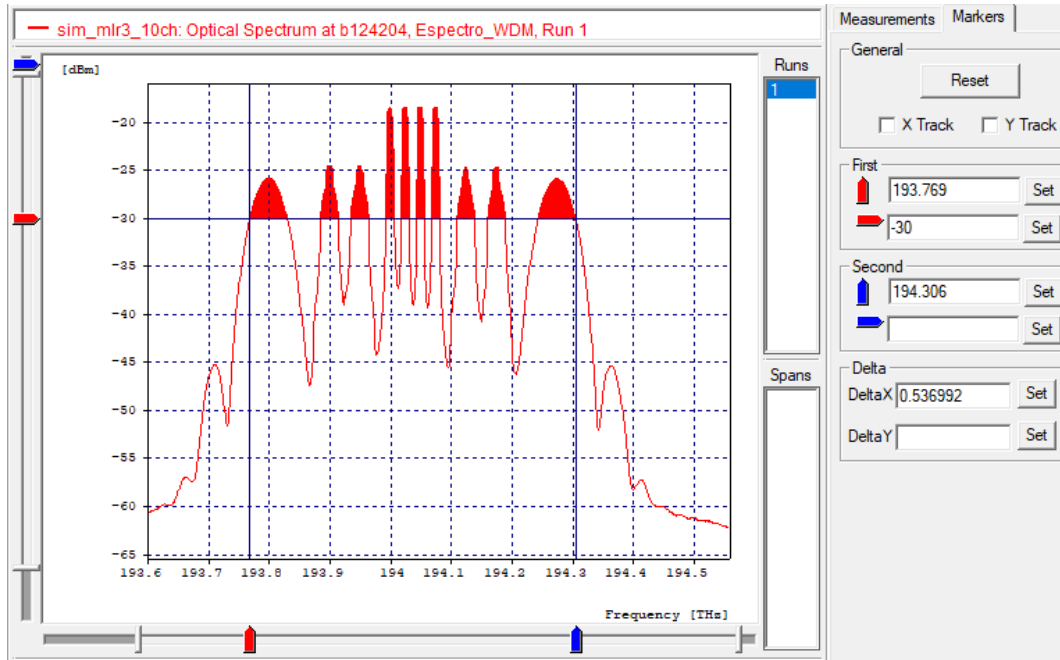


Figura 3.45: Ancho de banda útil de red MLR tipo 3.

$(N-1)\Delta_V$	C_N	C_{Total}	C_{Pro}	Bw	η_{disa}
25 GHz	2.5 Gbps	4 ch * 2.5 Gbps +	<i>Distancia: 80.9 Km</i>	536.99 GHz	24.20 % [bps/Hz]
50 GHz	10 Gbps	4 ch * 10 Gbps +	10.517 Tbps * Km		
100 GHz	40 Gbps	2 ch * 40 Gbps = 130 Gbps			

Tabla 3.33: Variables de medición y control, 10 canales híbridos.

A partir del ancho de banda útil del sistema (ver figura 3.45) en la tabla 3.33 se obtiene el valor de la ISD del sistema que corresponde al 24.20% siendo este menor al que se obtuvo para el segundo caso de estudio. Esto sucede ya que al agregar los canales de 2.5 Gbps se logra un mínimo aumento en el throughput mientras que el ancho de banda incrementa considerablemente provocando que se reduzca la eficiencia espectral en general. Así, los resultados obtenidos permiten corroborar lo que se menciona en el primer caso de estudio acerca de la disminución de la ISD del sistema al agregar más canales que además no aportan mucho al throughput del mismo, lo cual no es un factor

decisivo para el presente trabajo ya que se busca que canales a diferentes velocidades puedan trabajar juntos para posibilitar la flexibilidad en la red ante la heterogeneidad de la información presente.

Ahora se procede a comprobar si existe influencia significativa al usar 3 velocidades distintas en el alcance de transmisión de las señales del enlace por lo que se toma el mismo intervalo utilizado en los casos de estudio previos de 90-120 Km y se obtiene el espectro de la señal multiplexada.

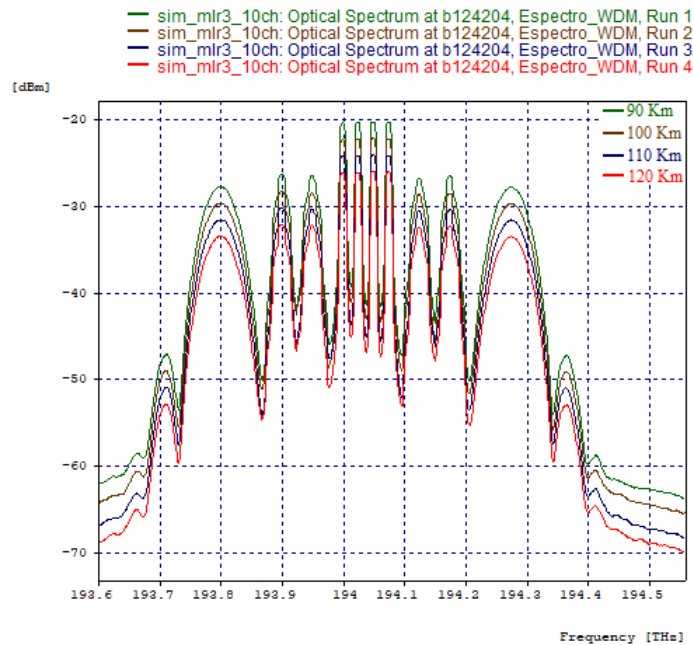


Figura 3.46: Espectro de red MLR tipo 3, rango 90-120 Km.

El espectro en la figura 3.46 muestra la atenuación de las señales en cada canal a medida que aumenta la distancia del enlace con un comportamiento similar al de los casos de estudio anteriores, donde la señal de menor velocidad es la que pierde menos potencia a media que viaja a través de la fibra mientras que las otras 2 de mayor velocidad son mas susceptibles a la atenuación. Se debe obtener la información relacionada con los parámetros OPM con tal de observar con mayor claridad sí existe alguna variación considerable en comparación con lo que se ha hecho previamente.

De la información de la tabla 3.34 y las figuras 3.47 a 3.49 puede verse que la red posee un comportamiento similar al de casos previos ya que al aumentar la distancia del enlace disminuye el factor Q, la potencia en recepción y la OSNR real, y también tiende a aumentar el jitter. Puede verse que a los 100 Km la potencia en recepción (resaltada en naranja) del canal 10 de 40 Gbps se encuentra bastante cercano a la sensibilidad obteniendo también una OSNR real baja como sucedía en el anterior caso. Así mismo, los valores resaltados en rojo muestran que para distancias después de los 100 Km no son viables sin amplificación.

Distancia enlace (Km)	Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
90	7	-20.4656	10^{-40}	33.3085	0.0712725	55.5194	9.5343
	9	-26.6564	$2.14 \cdot 10^{-31}$	21.5111	0.000752522	52.0905	3.3436
	10	-27.9578	10^{-40}	29.6902	0.000399944	46.9687	2.04218
100	7	-22.3648	10^{-40}	30.3756	0.0768999	55.8431	7.63514
	9	-28.5820	$1.22 \cdot 10^{-26}$	20.5186	0.000802882	51.5545	1.41796
	10	-29.8119	10^{-40}	27.3581	0.000504978	47.1210	0.188029
110	7	-24.2932	10^{-40}	26.2568	0.0800708	55.4942	5.70676
	9	-30.4576	$1.98 \cdot 10^{-19}$	19.0193	0.00100487	51.0720	-0.45768
	10	-31.7330	10^{-40}	24.6215	0.000565807	46.9765	-1.73306
120	7	-26.1763	10^{-40}	23.4272	0.0776743	55.7999	3.8236
	9	-32.3532	$3.11 \cdot 10^{-12}$	16.7409	0.00135595	50.5835	-2.35326
	10	-33.6865	$6.70 \cdot 10^{-34}$	21.8735	0.000577588	46.8763	-3.68659

Tabla 3.34: Parámetros OPM de red MLR tipo 3, rango 90-120 Km.

Se encontró que el valor del factor Q en los 3 canales posee menor valor en comparación con casos previos, mientras que hay algo de incremento del jitter especialmente en los canales 7 y 9 de 10 y 40 Gbps respectivamente. El canal 9 de 10 Gbps en comparación con el del caso anterior parece tener mayor BER hasta los 100 Km y luego de esta distancia es un poco menor. La potencia en recepción y la OSNR real de los 3 canales llegan a valores ligeramente menores en este caso. También se destaca que los diagramas del ojo, en especial los de 2.5 y 40 Gbps, se mantienen legibles al no presentar severas degradaciones lo cual se debe a la compensación de dispersión así como a las propias características de cada uno.

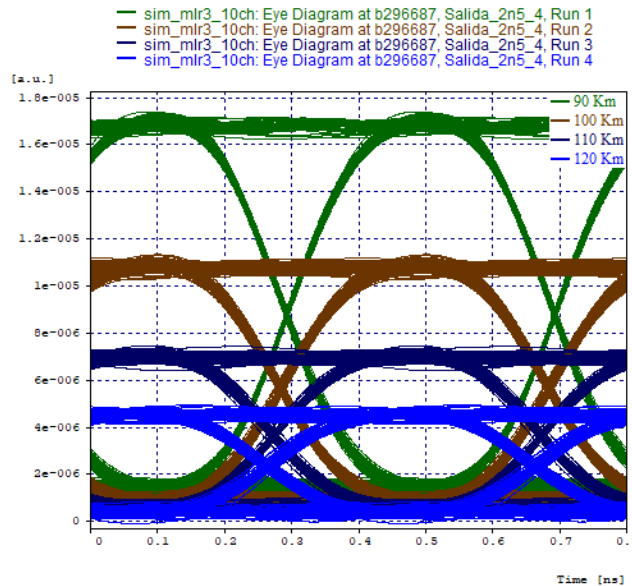


Figura 3.47: Diagramas del ojo de canal de 2.5 Gbps, red MLR tipo 3. Rango 90-120 Km

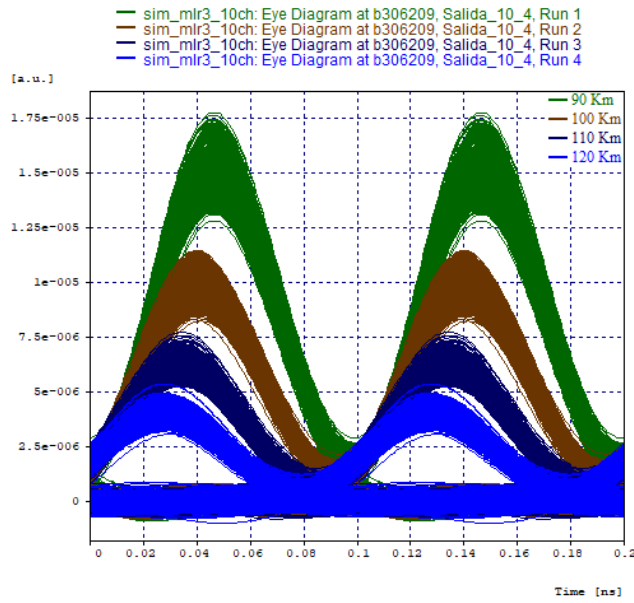


Figura 3.48: Diagramas del ojo de canal de 10 Gbps, red MLR tipo 3. Rango 90-120 Km

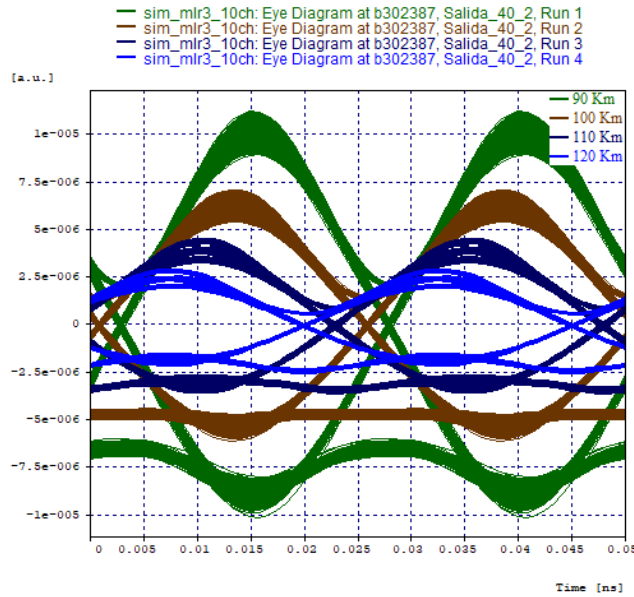


Figura 3.49: Diagramas del ojo de canal de 40 Gbps, red MLR tipo 3. Rango 90-120 Km

Ahora bien, para evaluar la influencia de la última milla FTTB en la red actual se procede de la misma forma que se hizo en casos de estudio previos por lo que primero se hace variación de la longitud de la fibra de ultima milla desde los 800 m en intervalos de 100 m hasta llegar a 500 m, esto manteniendo la distancia del enlace fija a 80 Km y sin usar amplificación.

Ultima milla de fibra (m)	Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
800	7	-18.5222	10^{-40}	35.4986	0.0652112	55.6602	11.4777
	9	-24.6797	$2.33*10^{-36}$	22.1327	0.000698582	51.4196	5.32024
	10	-25.9867	10^{-40}	31.4092	0.000414889	46.4827	4.01326
700	7	-18.5026	10^{-40}	35.8256	0.0622889	55.6704	11.4974
	9	-24.6639	$4.79*10^{-36}$	22.1552	0.000706493	50.8772	5.33603
	10	-25.9521	10^{-40}	30.5875	0.00038702	46.7066	4.04785
600	7	-18.4837	10^{-40}	35.6190	0.0626243	55.6828	11.5163
	9	-24.6440	$1.88*10^{-36}$	22.1679	0.000737517	51.1439	5.35596
	10	-25.9003	10^{-40}	29.9780	0.000379605	46.9263	4.09966
500	7	-18.4644	10^{-40}	35.6475	0.060654	55.6941	11.5356
	9	-24.6252	$1.45*10^{-36}$	22.1882	0.000682003	51.8279	5.37474
	10	-25.8614	10^{-40}	29.3093	0.000407153	47.1156	4.13857

Tabla 3.35: Parámetros OPM para última milla de red MLR tipo 3 (800-500 m).

En la tabla 3.35 puede verse que las variaciones de 100 m en la última milla no producen grandes cambios en los parámetros OPM de forma similar a los casos de estudio previos. Entre los cambios que ocurren a medida que disminuye la longitud de la última milla, el que mas destaca es el factor Q el cual tiende a disminuir para el canal 10 de 40 Gbps y aumenta levemente para el canal 9 de 10 Gbps, mientras que para el canal 7 de 2.5 Gbps se mantienen valores sobre 35 dB. El jitter de los 3 canales tiende a fluctuar un poco mas que otros parámetros pero llega a ser menor para los 500 m que para los 800 m. En cuanto a la BER del canal 9, esta en general tiende a disminuir con la distancia de la ultima milla, mientras que la potencia en recepción y la OSNR real incrementan con ella.

Frente a casos previos, el canal 7 de 2.5 Gbps llega a tener un factor Q y un jitter levemente mejores que el canal correspondiente en el primer caso de estudio, mientras que esos mismos parámetros para los canales 9 y 10 de 10 y 40 Gbps respectivamente son algo menores en comparación con los canales correspondientes del segundo caso de estudio, además de que el canal de 10 Gbps también posee mayor BER para el caso actual. Sin embargo, al no tener degradaciones criticas, la red sigue manteniendo buenas condiciones ante variaciones de longitud de ultima milla FTTB para el presente caso.

Siguiendo con el análisis de la ultima milla FTTB, ahora se ve el efecto de la variación del numero de usuarios finales en la última milla de la red que se hace posible gracias al segundo nivel de split. Sí bien ya se tenían 10 usuarios finales o abonados en el presente caso de estudio, se realizan pruebas con las cargas de 16, 32 y 64 usuarios en la red tal como se ha venido haciendo hasta ahora.

En la tabla 3.36 se muestran los datos obtenido de los parámetros OPM los cuales en su mayoría no cambian significativamente con el incremento del numero de usuarios. El cambio mas notable se refleja en la BER del canal 9 de 10 Gbps que varía con el numero

de usuarios pero no llega a tener un efecto negativo lo suficientemente relevante como para perjudicar al sistema. Respecto a los otros casos de estudio, en este tercer caso la red posee un comportamiento similar ante el aumento de la carga total de usuarios corroborando el funcionamiento de Optsim frente a este tipo de situaciones.

# Usuarios finales	Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
16	7	-18.5408	10^{-40}	35.5422	0.0696652	55.7014	11.4592
	9	-24.6973	8.26×10^{-37}	22.2119	0.000718793	51.5334	5.30269
	10	-26.0007	10^{-40}	32.1588	0.000388358	46.6738	3.9993
32	7	-18.5408	10^{-40}	35.4305	0.0654478	55.7014	11.4592
	9	-24.6973	2.13×10^{-36}	22.1287	0.000722047	51.5334	5.30269
	10	-26.0007	10^{-40}	32.1588	0.000388358	46.6738	3.9993
64	7	-18.5417	10^{-40}	35.6022	0.0641489	55.6508	11.4582
	9	-24.6965	1.1×10^{-36}	22.2017	0.0006993	51.8331	5.30344
	10	-26.0007	10^{-40}	32.1588	0.000388358	46.6738	3.9993

Tabla 3.36: Parámetros OPM de red MLR tipo 3 para 16, 32 y 64 usuarios.

Conforme con el primer objetivo específico para el presente trabajo si fue posible obtener un modelo de red MLR para 3 velocidades de transmisión distintas correspondientes a 2.5/10/40 Gbps gracias a los ajustes realizados en los casos de estudio anteriores logrando así un buen desempeño en las condiciones mínimas propuestas. En la tabla 3.37 se presenta el resumen de resultados obtenidos mediante el análisis sobre esta red MLR-FTTB de este tercer caso de estudio.

1.	Es posible implementar mas de 2 velocidades de transmisión con diferentes valores sobre una misma fibra.
2.	La ISD del sistema se reduce al utilizar canales con bajas tasas de transmisión debido a su mínimo aporte en el throughput y a una ocupación considerable del ancho de banda disponible.
3.	A medida que se implementan mas canales con diferentes velocidades de transmisión en una misma fibra, aquellos con tasas de bits mas elevadas tienden a degradarse ligeramente.
4.	Incluso al utilizar 3 velocidades de transmisión en un mismo medio, la red puede seguir manteniendo un buen desempeño frente a variaciones de las propiedades de ultima milla FTTB.

Tabla 3.37: Resumen de resultados del análisis para red MLR tipo 3 basada en FTTB.

3.3.2. Análisis para última milla basada en FTTH

Finalmente, se parte de los resultados obtenidos hasta el momento con tal de adaptar el modelo de red de este tercer caso de estudio a una aplicación de última milla FTTH. En general se tiene un enlace sin amplificación con 10 canales a velocidades mixtas de 2.5/10/40 Gbps con los mismos esquemas de modulación abordados anteriormente (NRZ-OOK, RZ-OOK y RZ-DPSK), una distancia de 80 Km con tramo de ultima milla

FTTH de máximo 100 m de cable tipo drop, y compensación por DCF del 100 %. De la misma forma se mantiene la fibra Corning SMF-28e por sus similitudes con un cable tipo drop como el AllWave FLEX 200 μm y también se mantiene el espaciamiento asimétrico que se trabajo previamente para la misma red basada en FTTB.

Desempeño

Se procede entonces a evaluar los efectos ante variaciones de las condiciones sobre la ultima milla basada en FTTH, empezando por la variación de longitud del cable de fibra para la misma tomando los mismos valores de los casos anteriores para FTTH, es decir, longitudes de 10 y 100 m.

Ultima milla de fibra (m)	Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
10	7	-18.3684	10^{-40}	35.5766	0.0625276	55.7923	11.6316
	9	-24.5307	$7.75 \cdot 10^{-36}$	22.1554	0.000690134	51.9218	5.46928
	10	-25.8318	10^{-40}	25.5078	0.00049656	47.6875	4.16819
100	7	-18.3855	10^{-40}	35.4381	0.0637636	55.7867	11.6144
	9	-24.5514	$3.79 \cdot 10^{-37}$	22.2751	0.000716395	51.9156	5.44486
	10	-25.8368	10^{-40}	26.1065	0.000423195	47.4681	4.16314

Tabla 3.38: Parámetros para ultima milla FTTH a 10 y 100 m en red MLR tipo 3.

Según los datos en la tabla 3.38 tampoco parecen haber cambios significativos de los parámetros entre las 2 distancias de última milla FTTH evaluadas por lo que aun mantiene buen desempeño. Se puede destacar que el factor Q e canal 10 de 40 Gbps disminuye y su jitter aumenta a menor distancia contrario a lo que sucede con los canales de 10 y 2.5 Gbps. Por otro lado la BER del canal 9 de 10 Gbps también es mayor a los 10 m siendo tambien algo susceptible a cortas distancias.

Comparado a la red basada en FTTB de este mismo caso, ahora se tiene menor factor Q en el canal de 40 Gbps y mas jitter tanto en este como en el de 10 Gbps siguiendo la misma lógica de que estos factores empeoraran a menor distancia. Además, el canal de 10 GBps también tiene mayor BER aqui en FTTH que en FTTB. En lo que respecta a casos previos, los canales de 10 y 40 Gbps tiene un comportamiento similar al del caso de estudio 2 aunque con menor factor Q y mayor jitter además de una mayor BER para el de 10 Gbps, mientras que el comportamiento del canal 7 de 2.5 Gbps se asemeja un poco mas al del primer caso con un jitter levemente mayor.

Ahora, se realiza el análisis sobre la variación en la carga total de la red mediante un incremento en el numero de usuarios, por lo que se hacen pruebas para 16, 32 y 64 usuarios tal como se hizo previamente en los demás casos de estudio. Luego, se obtienen los parámetros OPM para las distancias de última milla de 10 y 100m.

Los datos presentados en las tablas 3.39 y 3.40 permiten apreciar que la mayoría de los parámetros no presentan cambios importantes ante el incremento de usuarios finales, siendo el mas significativo de estos la variación de la BER del canal 9 de 10 Gbps aunque no es algo que pueda perjudicar al sistema. Como pasaba en el segundo caso de estudio y para el escenario de ultima milla FTTB del tercer caso de estudio, los canales de 10 y 40 Gbps tienen una leve mejora del factor Q y jitter al pasar de 10 a 100 metros, mientras que el canal de 2.5 Gbps tiende a tener un comportamiento mas constante entre casos de estudio y los diferentes escenarios de cada uno.

# Usuarios finales	Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
16	7	-18.3684	10^{-40}	35.5405	0.067964	55.7916	11.6316
	9	-24.5309	$2.76*10^{-36}$	22.1942	0.000710814	51.9711	5.46905
	10	-25.8318	10^{-40}	25.5065	0.00049461	47.6872	4.16818
32	7	-18.3692	10^{-40}	35.1565	0.0664951	55.7536	11.6308
	9	-24.5335	$6.45*10^{-36}$	22.1381	0.000695579	51.9805	5.46642
	10	-25.8335	10^{-40}	25.5067	0.000493265	47.6073	4.16646
64	7	-18.3692	10^{-40}	35.7317	0.0615641	55.7536	11.6308
	9	-24.5335	$3.91*10^{-36}$	22.1744	0.000710825	51.9806	5.46642
	10	-25.8335	10^{-40}	25.5072	0.000494162	47.6074	4.16646

Tabla 3.39: Parámetros OPM de red MLR tipo 3 para 16, 32 y 64 usuarios; ultima milla FTTH de 10 m.

# Usuarios finales	Canal	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
16	7	-18.3855	10^{-40}	35.5332	0.0590269	55.7858	11.6144
	9	-24.5521	$1.95*10^{-38}$	22.2303	0.000731651	51.8444	5.44785
	10	-25.8368	10^{-40}	26.1282	0.000426029	47.4701	4.16311
32	7	-18.3862	10^{-40}	35.6649	0.0644672	55.7538	11.6138
	9	-24.5514	$8.72*10^{-38}$	22.1733	0.000735411	51.9145	5.44857
	10	-25.8368	10^{-40}	26.1195	0.000426013	47.4694	4.16312
64	7	-18.3862	10^{-40}	35.8447	0.0634194	55.7538	11.6138
	9	-24.5514	$9.31*10^{-37}$	22.2119	0.000728801	51.9151	5.44856
	10	-25.8368	10^{-40}	26.1054	0.000422434	47.4676	4.16315

Tabla 3.40: Parámetros OPM de red MLR tipo 3 para 16, 32 y 64 usuarios; ultima milla FTTH de 100 m.

En cuanto a las 2 arquitecturas del presente caso, la red basada en ultima milla FTTB en general tiene un desempeño ligeramente mayor a la red basada en FTTH como sucedió en el segundo caso de estudio debido a que los canales de 10 y 40 Gbps son susceptibles a ciertas degradaciones a distancias mas cortas lo que se vio reflejado en el jitter y el factor Q de ambos canales junto con la BER del canal de 10 Gbps. Sin embargo, cualquiera de las 2 arquitecturas puede mantener un buen desempeño como sucedía en casos de estudio anteriores por lo que es posible usar cualquiera de ellas en un entorno real dependiendo del contexto en el que se necesiten y teniendo en cuenta las

limitaciones que diferencian a ambas FTTX respecto a medios de transmisión eléctricos que no logran abordarse correctamente en un software de simulación como Optsim. En la tabla 3.41 se resumen los resultados encontrados del análisis para el esquema de red de este ultimo caso de estudio ahora basado en FTTH.

1.	Es posible implementar redes MLR con mas de 2 velocidades de transmisión diferentes para arquitecturas de ultima milla FTTH.
2.	Algunos parámetros de red pueden ser un poco mas susceptibles a distancias mas cortas cuando se tienen mas de 2 velocidades de transmisión y mas canales. Aun para una red mixta con 3 velocidades de transmisión, existe un desempeño levemente mejor para ultima milla basada en FTTB que en FTTH de aquellos canales con tasas de bits mas altas.
3.	En general se tiene un desempeño óptimo en la red MLR tipo 3 tanto para FTTH como para FTTB .

Tabla 3.41: Resumen de resultados del análisis para red MLR tipo 3 basada en FTTH.

De acuerdo con el segundo y tercer objetivos específicos, los resultados que se obtuvieron en este tercer caso de estudio confirman que es posible implementar diferentes arquitecturas FTTx en una red MLR de 2.5/10/40 Gbps y así evaluar el desempeño de la misma en cada escenario con lo que finalmente se pudo obtener una red heterogénea que trabaje en condiciones óptimas bajo los requisitos mínimos planteados.

Según la información obtenida de los esquemas de red MLR respecto al modelo de red SLR inicial, se observo que la red MLR tiene un mayor throughput y aprovecha mas el ancho de banda disponible, lo que a su vez conlleva a una mayor eficiencia espectral. De igual forma, los parámetros de desempeño obtenidos muestran valores dentro de lo esperado para las condiciones de cada esquema de red, con resultados bastante similares para los canales de 2.5 Gbps de ambos tipos de red, mientras se logra mantener buenos valores para los canales de 10 y 40 Gbps de la red MLR tanto para los requisitos mínimos propuestos como ante las variaciones realizadas. Además, aunque la red SLR pueda lograr un mayor alcance, esto se le atribuye a la utilización de una tasa de bit relativamente baja por lo que es posible que una red SLR con velocidades de transmisión mas altas presente similitudes en cuanto al alcance de la señal con la red MLR propuesta. Entonces, se puede decir que los modelos de red MLR propuestos logran un mejor desempeño que el modelo inicial de red SLR.

Respecto a otros estudios relacionados con la investigación realizada, se tuvo como base lo abordado en [87] donde las autoras se enfocan en la medida de la eficiencia espectral en redes heterogéneas o redes MLR del tipo NG-PON mediante diferentes combinaciones de velocidades de transmisión para un régimen de propagación cuasilineal. Los resultados de dicho estudio permitieron tener un referente para la medida de la eficiencia espectral o ISD en el trabajo actual logrando valores similares o al menos que correspondan a las condiciones de las redes analizadas en ambos estudios. No obstante, en [87] las autoras procuran que la red ya logre un buen desempeño desde el principio

con tal de poder centrarse en la medida de la eficiencia espectral sin profundizar en los parámetros OPM o en la influencia de la última milla por lo que no es posible comparar estos factores debidamente con los de la investigación del presente trabajo.

También se consideró el estudio realizado en [69] donde se proponen soluciones para mejorar la eficiencia espectral de sistemas DWDM con arquitecturas de red FSAN (NG-PON), donde además de realizar la medida de la eficiencia espectral también se tiene en cuenta el desempeño de las redes tipo NG-PON ante ciertas condiciones que se plantean en dicho estudio. Aunque las redes analizadas en [69] sean del tipo SLR, las velocidades de transmisión que se utilizan corresponden con las mismas tratadas en la investigación del presente documento, por lo que al comparar los resultados de ambos estudios se pudo notar que se dan menos degradaciones para una red SLR que para una red MLR dado que la del primer tipo no debe considerar interacciones de señales de diferentes velocidad sobre el mismo hilo de fibra, además de que en [69] se implementan formatos de modulación DPSK y DQPSK que son considerablemente mas robustos que el OOK que se utilizó en la presente investigación. Sin embargo, los resultados obtenidos para el actual trabajo de grado son los suficientemente buenos para decir que las redes MLR pueden lograr un desempeño cercano al de otros diseños de red como los propuestos en [69] a pesar de las limitaciones que se presentan para MLR. Adicionalmente, las redes MLR pueden ser un poco mas escalables a futuro ya que brindan la posibilidad de flexibilizar el trafico dentro de estas con tal de aprovechar mejor los recursos disponibles.

Por lo dicho anteriormente, los modelos de red MLR propuestos fueron capaces de lograr un desempeño lo suficientemente bueno y así, conforme con el objetivo general para el presente trabajo de grado, se logró realizar el análisis de desempeño al migrar de una red óptica SLR a una red óptica MLR para diferentes arquitecturas de ultima milla FTTx.

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 (FTTB y FTTH) 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 objetivos específicos definidos para el presente trabajo de grado. La información obtenida permitió inferir que los modelos de red MLR fueron capaces de alcanzar un mejor desempeño que el modelo de red SLR inicial ante las condiciones propuestas. Además, según los resultados de otros estudios lo suficientemente relacionados con los de la presente investigación se pudo confirmar que las redes MLR abordadas aquí

fueron capaces de lograr un desempeño y eficiencia espectral decentes frente a otros modelos de red ajenos dadas las condiciones en las que se encuentran y a pesar de las limitaciones existentes. En resumen, en el presente capítulo se logró realizar el análisis de desempeño al migrar de una red óptica SLR a una red óptica MLR para diferentes arquitecturas de última milla FTTx conforme con el objetivo general propuesto para el trabajo de grado.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el presente trabajo de investigación, se realizó el análisis 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, donde se presenta la implementación de diferentes velocidades de transmisión (2.5/10/40 Gbps) sobre modelos de red NG-PON con arquitecturas de última milla FTTB y FTTH, permitiendo realizar una comparación entre los diferentes resultados obtenidos y determinar las condiciones para obtener modelos de red óptimos de tipo MLR con aplicaciones de última milla FTTx. En este capítulo, se presentan conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros relacionados, con respecto a los aspectos más importantes que aportaron en la realización de los objetivos propuestos.

4.1. CONCLUSIONES

Con los modelos de red óptica tipo MLR definidos y realizado su respectivo análisis, se resume que:

4.1.1. Conclusiones sobre los resultados

- Al tener velocidades de transmisión más altas se debe trabajar con un porcentaje de compensación más alto, ya que en el modelo con velocidades de 2.5/10 Gbps solo se requirió de una compensación del 50 % y para aquellos modelos que utilizan velocidades de 40 Gbps se necesitó usar el 100 % de compensación por la mayor susceptibilidad que estos poseen a la dispersión a pesar de tener un esquema de modulación más robusto.
- Se resalta la importancia de los esquemas de modulación utilizados, ya que se lograron obtener buenos resultados a través de la combinación de esquemas más robustos como RZ-DPSK en conjunto con esquemas más simples como NRZ-OOK y RZ-OOK, además de que fue posible observar las diferencias entre dichos esquemas.
- La adecuada asignación en el espectro de canales de diferente velocidad hace posible lograr un buen desempeño y buen funcionamiento de la red logrando con esto evitar interferencias y traslape entre los canales.
- Para obtener un diagrama de ojo en mejor condición para los canales de 40 Gbps,

se debe mover la grilla espectral a frecuencias menores que poseen menor incidencia sobre este aspecto.

- El espaciamiento entre canales no necesita ser igual para que el sistema funcione, pues se comprobó que la red puede trabajar correctamente con hasta tres velocidades diferentes (2.5/10/40 Gbps) en una misma fibra a través de una asignación asimétrica.
- Los canales de mayor velocidad requieren un poco más de atención debido a que estos pueden limitar más el desempeño del sistema y deben hacer un mayor uso del espectro, por lo que se necesita tener en cuenta ajustes sobre parámetros de red tales como la separación de canales, potencia de transmisión y la compensación.
- Para los modelos de red con tasas de bits de 2.5/10 Gbps las implementaciones de fibra más próximas al usuario final propias de FTTH permiten una ligera mejora en los parámetros del sistema en comparación con FTTB, mientras que para los modelos con tasas de bits de 10/40 y 2.5/10/40 Gbps se obtienen parámetros levemente mejores con FTTB que en FTTH.
- La densidad espectral de información (ISD) del sistema puede mejorar al utilizar velocidades de transmisión más altas a pesar de requerir mayor ancho de banda, ya que se observó que la ISD se reduce al utilizar canales con bajas tasas de transmisión por su mínimo aporte en el throughput y a una ocupación considerable del ancho de banda disponible.

Expuestas las conclusiones sobre los resultados obtenidos en la presente investigación, que permitieron lograr la realización del análisis de 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, la tabla 4.1 define el comportamiento de los esquemas de simulación propuestos, manejando parámetros como: el número de canales y usuarios, asignación del espectro, potencia y velocidad de transmisión por canal, distancia del enlace y compensación.

Características	Red MLR basada en los estándares XG-PON y XGS-PON	Red MLR basada en los estándares XGS-PON y NG-PON2	Red MLR basada en los estándares XG-PON, XGS-PON y NG-PON2
<i>Número de canales</i>	8	6	10
<i>Carga Máxima de Usuarios fijada</i>	64	64	64
<i>Velocidades de Transmisión a utilizar</i>	2.5 / 10 Gbps	10 / 40 Gbps	2.5 / 10 / 40 Gbps

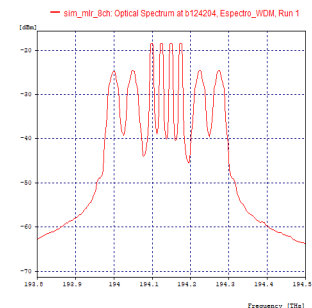
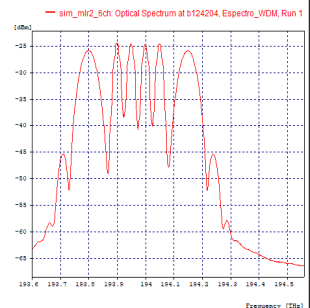
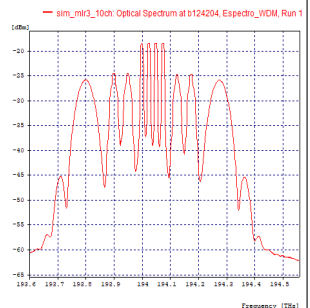
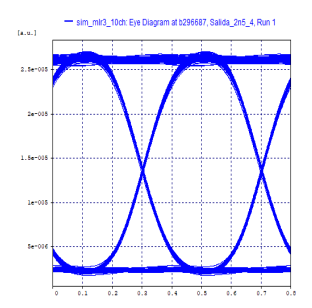
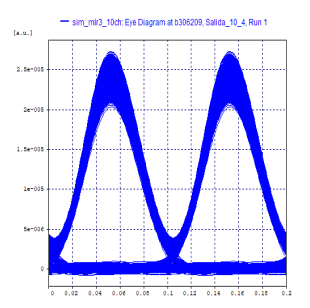
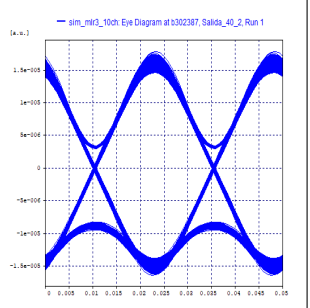
<i>Distancia de Transmisión fija</i>	80 Km	80 Km	80 Km
<i>Máxima distancia alcanzada</i>	90 Km	100 Km	100 Km
<i>Compensación de Dispersión</i>	50 %	100 %	100 %
<i>Throughput de la Red</i>	50 Gbps	120 Gbps	130 Gbps
<i>Densidad espectral de información</i>	$\eta = 16.46 \%$ [bps/Hz]	$\eta = 29.12 \%$ [bps/Hz]	$\eta = 24.20 \%$ [bps/Hz]
<i>Desempeño de la red</i>	Medio	Alto	Medio
<i>Nivel de complejidad</i>	Media	Alta	Alta
<i>Espectro de señal multiplexada</i>			
<i>Diagrama del Ojo característico</i>	 2.5 Gbps	 10 Gbps	 40 Gbps

Tabla 4.1: Características de modelos de red MLR.

4.1.2. Conclusiones sobre la investigación

- En el presente proyecto se muestra que fue posible la realización del objetivo general del trabajo de grado, llevando a cabo el análisis del desempeño al migrar de una red óptica SLR a una red óptica MLR para diferentes arquitecturas de última milla FTTx.
- Se consiguió generar un modelo de red MLR para 3 velocidades de transmisión diferentes con valores de 2.5, 10 y 40 Gbps, lo cual fue gracias a los ajustes

realizados en los casos de estudio expuestos en el desarrollo del trabajo, logrando así un buen desempeño en las condiciones mínimas propuestas.

- Las características de diseño en la migración desde el modelo SLR al modelo MLR fueron: el aumento del número de canales, la inclusión de diferentes transmisores, la implementación de procesos de compensación de dispersión y la variación en la carga de usuarios.
- La implementación de diferentes arquitecturas FTTx en una red MLR de 2.5/10/40 Gbps fue lograda con éxito, obteniendo una red heterogénea que trabaje en condiciones óptimas incluso ante variaciones que ocurren comúnmente en la última milla de la red.
- A comparación con la red SLR inicial, la red MLR logró un mejor desempeño en general debido a que fue capaz de mantener buenos valores para sus parámetros ópticos mientras genera un mayor throughput y aprovecha más eficientemente el ancho de banda.
- Los aspectos fundamentales para poder obtener una red MLR con buen desempeño fueron: el porcentaje de compensación, la asignación adecuada del espectro y la separación entre canales.
- La metodología PERT para el desarrollo de la investigación permitió una buena gestión del mismo gracias a la facilidad de control que tuvo sobre actividades y tiempos, a su adaptabilidad para realizar modificaciones en los procesos ante imprevistos y a la compatibilidad que presentó con la metodología de simulación de enfoque práctico propuesta.

Se concluye que la implementación de redes MLR en un sistema, a pesar de presentar mayor complejidad a medida que se agregan canales con mayores velocidades de transmisión, es posible obtener una red heterogénea que trabaje en buenas condiciones siempre y cuando se tengan en cuenta las limitaciones de implementar diferentes tasas de bits en un mismo hilo de fibra óptica con tal de poder realizar los ajustes necesarios que permitan minimizar las degradaciones ópticas que sufren las señales multiplexadas tanto individualmente como las que se dan por la influencia que tienen unas sobre otras.

4.2. RECOMENDACIONES

Para el análisis de una red óptica MLR basada en arquitecturas FTTx y con diferentes formatos de modulación, se necesita considerar algunas recomendaciones que permitan la obtención y comprensión de resultados, como las presentadas a continuación:

- Realizar una búsqueda minuciosa de información teórica y práctica acerca de sistemas ópticos, esquemas de modulación, software de simulación y si hay trabajos

previos relacionados con el tema, para tener una gran base de información a partir de la cual se pueda comenzar a desarrollar el trabajo.

- Tener una buena organización en el desarrollo del trabajo facilita la comprensión de los resultados obtenidos y su análisis.
- Tener en cuenta otras alternativas de herramientas de simulación que ofrezcan características similares a OptSim y que incluso no requieran una licencia de uso.
- Establecer una metodología que facilite el desarrollo del proyecto.
- Determinar los elementos a usar en el montaje de la red, con sus respectivos parámetros.
- Realizar una simulación de cada canal que tengan velocidades diferentes entre sí, para poder analizar qué pasa con cada canal de manera independiente.
- Tener en cuenta que se pueden generar varios cambios en los parámetros de la red, hasta encontrar un resultado óptimo que genere un buen desempeño de la misma.

4.3. TRABAJOS FUTUROS

- Analizar el desempeño de una red óptica MLR-DWDM en distancias ultra largas.
- Analizar el efecto del uso de amplificadores sobre una red óptica MLR-DWDM.
- Realizar el análisis de una red óptica MLR-DWDM basada en arquitectura FTTN.
- Analizar el efecto del uso de diferentes formatos de modulación en una red óptica MLR-DWDM con diferentes arquitecturas FTTx.
- Realizar el análisis del desempeño de una red óptica MLR-DWDM con diferentes tipos de fibras.
- Diseño de un algoritmo para enrutamiento y asignación de longitudes de onda en una red óptica MLR-DWDM con diferentes arquitecturas FTTx.
- Estudio de factibilidad Técnico-Económica para la implementación de una red MLR-DWDM basada en diferentes arquitecturas FTTx.

REFERENCIAS

- [1] R. Ramaswami and K. Sivarajan, *Optical networks: a practical perspective*. Morgan Kaufmann, 2 ed., 2009.
- [2] Fiber Optic Solutions, “How to Use WDM for Fiber Capacity Expansion.” Available on: <http://www.fiber-optic-solutions.com/use-wdm-fiber-capacity-expansion.html>, 01 2017.
- [3] C. DeCusatis, “Dense wavelength division multiplexing for parallel sysplex and metropolitan/storage area networks,” *Optical Networks*, vol. 2, no. 1, pp. 69–80, 2001.
- [4] T. D. Nadeau and K. Gray, *SDN: Software Defined Networks: an authoritative review of network programmability technologies*. O’Reilly Media, Inc., 1 ed., 2013.
- [5] G. Gonzales, “Tecnología WDM: CWDW-DWDM.” Available on: <https://sillexfiber.com/tecnologia-wdm-cwdw-dwdm/>, 06 2019.
- [6] E. Magalhães, P. Perry, and L. Barry, “SDN control of optical nodes in metro networks for high capacity inter-datacentre links,” *Optics Communications*, vol. 402, pp. 173–180, 06 2017.
- [7] E. I. Mena and R. E. Mendoza, “Diseño de una red para Andinatel S.A en la Provincia de Tungurahua,” tech. rep., Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 09 2009.
- [8] International Telecommunication Union (ITU), *Spectral grids for WDM applications: CWDM Wavelength grid*. Rec. G.694.2, ITU Telecommunication Standardization Sector, 03 2012.
- [9] International Telecommunication Union (ITU), *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*. Rec. G.694.1, ITU Telecommunication Standardization Sector, 02 2012.
- [10] L. N. Binh, *Advanced Digital Optical communications*. Munich, Alemania: CRC Press, 2 ed., 2015.
- [11] J. Shu, L. Liu, and S. Song, “A study on dynamic wavelength assignment algorithm for DWDM-based OAN,” in *Photonic Applications in Devices and Communication Systems* (P. Mascher, A. P. Knights, J. C. Cartledge, and D. V. Plant, eds.), vol. 5970, (Ontario, Canada), pp. 692 – 701, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2005.
- [12] VIAVI Solutions Inc, “Red Óptica Pasiva (PON).” Available on: <https://www.viavisolutions.com/es-es/red-optica-pasiva-pon>.

- [13] VIAVI Solutions Inc, “Diseño e Implementación de Redes FTTx.” Available on: <https://www.viavisolutions.com/es-es/disenoeimplementacionde-redes-fttx>.
- [14] Allied Telesis, “Fiber to the X (FTTx).” Available on: <https://www.alliedtelesis.com/en/solutions/fttx>, 11 2016.
- [15] R. Millán, “GPON (Gigabit Passive Optical Network).” Available on: <http://www.ramonmillan.com/tutoriales/gpon.php>, 2007.
- [16] V. Cobos Melià, “Design and Performance Evaluation of Passive Optical Networks,” Master’s thesis, Universidad Politecnica de Cataluña, Escuela de Ingeniería de Telecomunicación y Aeroespacial de Castelldefels, Barcelona, España, 06 2011.
- [17] “ANÁLISIS DE PON: Qué es OLT, ONU, ONT y ODN | Fibra óptica.” Available on: <https://www.adslzone.net/foro/fibra-optica.94/analisis-pon-que-es-olt-onu-ont-odn.461996/>.
- [18] A. Cortés Castillo, “Planificación y diseño de redes FTTH basadas en zonificación y servicios,” *Revista Prisma Tecnológico (ISSN 2076 - 8133)*, vol. 7, pp. 20–25, 11 2016.
- [19] T. M. Corcoran, RTPM, and CFHP, “Understanding FTTH Architecture.” Available on: https://www.sandisfieldma.gov/sites/sandisfieldma/files/uploads/understanding_ftth_architecture_v5.pdf.
- [20] J. A. Gomez, *Redes Locales*. Ciclos Formativos, Editorial Editex, 2011.
- [21] P. Sparrow, “Tree Topology: Advantages and Disadvantages.” Available on: <http://www.ianswer4u.com/2012/01/tree-topology-advantages-and.html>.
- [22] M. Caldwell, “Fiber Optic Network Topologies.” Available on: <https://sunesysllc.wordpress.com/2013/03/12/fiber-optic-network-topologies/>, 03 2013.
- [23] D. Saavedra, “Que es FTTx y sus aplicaciones.” Available on: <http://telemediciones.com/blog/fibra-optica/que-es-fttx-y-sus-aplicaciones/>, 08 2017.
- [24] J. Salgado, M. Fischer, and E. Connolly, *FTTH Handbook*. FTTH Council, 8 ed., 2018.
- [25] T. Venkateswarlu and R. Renuka, “Design of Fiber to the Home (FTTH) Access Network and Implementing Online Monitoring to Increase Efficiency,” *IJCSMC Journal*, vol. 5, no. 4, 2017.
- [26] S. Harris, *FTTX Technologies*. Society of Cable Telecommunications Engineers, 2016.

- [27] F. Velasco and M. A. Melo., “Estudio de factibilidad técnico - económico para la implementación de una red FTTH-GPON en el contexto colombiano para servicios triple play,” tech. rep., Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2018.
- [28] A. Escallón Portilla and V. Guachetá, “Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios Quad Play al integrar un módulo RoF,” Master’s thesis, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 12 2018.
- [29] S. Satkunarajah, D. Samarakkody, and W. A. S. C. Perera, “Comparison of single-line rate for dedicated protection on wdm optical network topologies,” in *2016 IEEE International Conference on Information and Automation for Sustainability (ICIAfS)*, pp. 1–6, 2016.
- [30] L. Moscalu, “Wave Division Multiplexing (WDM) – PeakOptical Fiber Optic Definitions.” Available on: <https://peakoptical.com/2018/05/wdm-definition/>, 05 2018.
- [31] J. S. Wey and J. Zhang, “Passive Optical Networks for 5G Transport: Technology and Standards,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 12, pp. 2830–2837, 2019.
- [32] International Telecommunication Union (ITU), *10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms*. Rec. G.987, ITU Telecommunication Standardization Sector, 2012.
- [33] International Telecommunication Union (ITU), *40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements*. Rec. G.989.1, ITU Telecommunication Standardization Sector, 03 2013.
- [34] A. Nag, M. Tornatore, and B. Mukherjee, “Optical Network Design With Mixed Line Rates and Multiple Modulation Formats,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 4, pp. 466–475, 2010.
- [35] S. Ferdousi, A. Nag, and A. Reaz, “Mixed-line-rate (MLR) optical network design with wavebanding,” in *2010 IEEE 4th International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems*, pp. 46–48, 2010.
- [36] A. Nag and M. Tornatore, “Impact of channel spacing on the design of a mixed-line-rate optical network,” in *2009 IEEE 3rd International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems (ANTS)*, pp. 1–3, 2009.
- [37] O. Ozolins and V. Bobrovs, “Theoretical study of all-optical rz-ook to nrz-ook format conversion in uniform fbg for mixed line-rate dwdm systems,” *Chinese Optics Letters*, vol. 13, pp. 060603–60607, 06 2015.
- [38] G. Ellinas, J.-F. Labourdette, J. Walker, S. Chaudhuri, L. Lin, E. Goldstein, and K. Bala, “Transparent Optical Switches: Technology Issues and Challenges,” *IEC Annual Communications Review*, 11 2003.

- [39] M. Džanko, B. Mikac, N. A. Gonzalez, G. S. Zervas, and D. Simeonidou, “Availability analysis of optical cross-connect implemented by architecture on demand,” in *2012 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pp. 1–4, 2012.
- [40] P. Martín-Ramos, P. Chamorro-Posada, and J. Martín-Gil, *Complejos de erbio(III) e iterbio(III) con ligandos fluorados para aplicaciones fotónicas en Telecomunicaciones: EDFAs y YEDFAs*. PhD thesis, Universidad de Valladolid, Valladolid, España, 06 2010.
- [41] S. Kartalopoulos, *DWDM: Networks, devices, and technology*. Wiley-IEEE Press, 01 2002.
- [42] K. Christodoulopoulos, K. Manousakis, and E. Varvarigos, “Adapting the transmission reach in mixed line rates WDM transport networks,” in *15th International Conference on Optical Network Design and Modeling - ONDM 2011*, pp. 1–6, 2011.
- [43] A. Nag and M. Tornatore, “Optical network design with mixed line rates,” *Optical Switching and Networking*, vol. 6, pp. 227–234, 12 2009.
- [44] K. Christodoulopoulos, K. Manousakis, and E. Varvarigos, “Planning mixed-line-rate WDM transport networks,” in *2011 13th International Conference on Transparent Optical Networks*, pp. 1–4, 2011.
- [45] International Telecommunication Union (ITU), *Optical monitoring for dense wavelength division multiplexing systems*. Rec. G.697, ITU Telecommunication Standardization Sector, 06 2004.
- [46] A. Escallon Portilla, A. Tovar, and J. Lis, “Incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana WDM,” *Revista Colombiana De Tecnologías De Avanzada (RCTA)*, vol. 2, pp. 12–19, 04 2008.
- [47] P. Serena, “OptiluX.” Available on: <https://optilux.sourceforge.io/index.html>.
- [48] “OptSim - Photonic System Tools — Synopsys Photonic Solutions.” Available on: <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/rssoft-system-design-tools/system-network-optsim.html>.
- [49] RSoft Design Group, “Diseño de Sistemas y Redes – OptSim.” Available on: <https://docplayer.es/39732354-Diseno-de-sistemas-y-redes-optsim.html>.
- [50] Optiwave Systems Inc., “OptiSystem Overview.” Available on: <https://optiwave.com/optisystem-overview/>.
- [51] P. Poggioli, *Aplicación práctica del método Pert*. Editores Técnicos Asociados, 1973.

- [52] B. Salazar López, “PERT – Técnicas de Evaluación y Revisión de Proyectos.” Available on: <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/investigacion-de-operaciones/pert-tecnica-de-evaluacion-y-revision-de-proyectos/>, 06 2017.
- [53] R. Pressman, *Ingeniería del Software. Un Enfoque Practico*. McGraw-Hill, 7 ed., 2010.
- [54] J. Herrera Varona, J. Toledo Noguera, and A. Tovar, “Análisis comparativo del desempeño de los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK frente a Técnicas de Compensación Ópticas de la Dispersión Cromática en Redes DWDM a 10 Gbps,” *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 12, pp. 9–15, oct. 2018.
- [55] S. Kartalopoulos, *Introduction to DWDM technology : data in a rainbow*. Wiley-IEEE Press, 1 ed., 1999.
- [56] R. Millán, “Redes y tecnología WDM.” Available on: <https://www.ramonmillan.com/documentos/trabajos/PFCCapitulo2.pdf>.
- [57] International Telecommunication Union (ITU), *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*. Rec. G.652, ITU Telecommunication Standardization Sector, 11 2016.
- [58] International Telecommunication Union (ITU), *Optical interfaces for single channel STM-64 and other SDH systems with optical amplifiers*. Rec. G.691, ITU Telecommunication Standardization Sector, 03 2006.
- [59] International Telecommunication Union (ITU), *Multichannel DWDM applications with single-channel optical interfaces*. Rec. G.698.1, ITU Telecommunication Standardization Sector, 11 2009.
- [60] International Telecommunication Union (ITU), *Optical system design and engineering considerations*. Rec. G.Sup39, ITU Telecommunication Standardization Sector, 02 2016.
- [61] M. Fok and P. Prucnal, “Switching based on optical nonlinear effects,” in *Optical Switches* (B. Li and S. J. Chua, eds.), Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, pp. 181–205, Woodhead Publishing, 2010.
- [62] S. Rebhi and M. Najjar, “High q-factor optical filter with high refractive index sensitivity based on hourglass-shaped photonic crystal ring resonator,” *Optik*, vol. 202, 10 2019.
- [63] M. T. Thompson, “Chapter 14 - analog low-pass filters,” in *Intuitive Analog Circuit Design (Second Edition)* (M. T. Thompson, ed.), pp. 531–583, Boston: Newnes, second edition ed., 2014.

- [64] D. K. Chy and M. Khaliluzzaman, “Comparative performance of ber in the simulation of digital communication systems using raised cosine filter,” in *Third Intl. Conf. on Advances in Computing, Electronics and Electrical Technology-CEET*, 2015.
- [65] FSAN, “About FSAN.” Available on: <https://www.fsan.org>, 2019.
- [66] International Telecommunication Union (ITU), *10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: General requirements*. Rec. G.987.1, ITU Telecommunication Standardization Sector, 03 2016.
- [67] International Telecommunication Union (ITU), *10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON)*. Rec. G.9807.1, ITU Telecommunication Standardization Sector, 06 2016.
- [68] K. Borzycki, “Fttx access networks: Technical developments and standardization,” in *Broadband Communications Networks* (A. Haidine and A. Aqqal, eds.), ch. 14, Rijeka: IntechOpen, 2018.
- [69] 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,” Master’s thesis, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2019.
- [70] R. Montagne, “FTTH Forecast for Europe - Market forecasts 2021-2026,” tech. rep., FTTH Council, Belgium, 09 2021.
- [71] Sun Telecom, “FTTX Solutions.” Available on: <https://en.suntelecom.cn/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=24>.
- [72] S. A. Jyothi, A. Singla, P. B. Godfrey, and A. Kolla, “Measuring and understanding throughput of network topologies,” in *SC '16: Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, pp. 761–772, 2016.
- [73] A. V. Trujillo Imbachí and A. D. Zemanate Trujillo, “Diseño de un módulo compensador de dispersión cromática en un entorno de Co-Simulación MATLAB/OPTSIM para una red DWDM a 10gbps,” tech. rep., Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2019.
- [74] C. E. Shannon, “A mathematical theory of communication,” *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 379–423, 1948.
- [75] D. M. Dourado, R. J. Lima, M. de Lacerda Rocha, and U. R. Duarte, “Energy consumption and bandwidth allocation in passive optical networks,” *Optical Switching and Networking*, vol. 28, pp. 1–7, 2018.

- [76] J. D. Bolaños Pérez and J. S. León Escobar, “Impacto sobre la densidad espectral de información (ISD) en el cambio de una red DWDM de 10 Gbps a 40 Gbps implementando los formatos CSNRZ-OOK y CSRZ-OOK,” tech. rep., Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2017.
- [77] S. K. Sharma, “FTTH Access Network on GPON Technology.” Available on: <https://www.linkedin.com/pulse/ftth-access-network-gpon-technology-sushmesh-sharma/>, Oct 2019.
- [78] OFS, “Allwave flex 200 μm fiber.” Available on: <https://www.ofsoptics.com/wp-content/uploads/AllWave-FLEX-200-um-Fiber-146-web-3.pdf>, 2017.
- [79] 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, 2013.
- [80] International Telecommunication Union (ITU), *40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Transmission convergence layer specification*. Rec. G.989.3, ITU Telecommunication Standardization Sector, 2013.
- [81] International Telecommunication Union (ITU), *40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Definitions, abbreviations and acronyms*. Rec. G.989, ITU Telecommunication Standardization Sector, 2013.
- [82] A. Prashanthan, “NG-PON 2 (Next Generation - Passive Optical Network 2 - 40 Gbps Capable),” Apr 2017.
- [83] Broadband Forum, “NG-PON2 Council.” Available on: <https://www.broadband-forum.org/ng-pon2-council?cn-reloaded=1>.
- [84] J. D. Velasco Delgado, “Sistema de comunicación óptica DPSK utilizando fibra óptica,” tech. rep., Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2012.
- [85] D. F. Alzate and A. Cárdenas, “Retos en la transmisión de 40/100Gb/s sobre fibra óptica,” *Revista en telecomunicaciones e informática*, vol. 1, 2011.
- [86] M. J. Herrera Illescas, “Evaluación de la modulación digital DPSK y OQPSK utilizados en sistemas de comunicaciones ópticos sobre OPTISYSTEM,” Master’s thesis, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 02 2015.
- [87] E. M. Rivera and A. N. Girón, “Medida de la eficiencia espectral de una arquitectura de red heterogénea de tipo NG-PON para un régimen de propagación cuasilineal,” tech. rep., Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2022.

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.