

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS
EN PRESENCIA DE LOS EFECTOS SPM Y XPM EN UNA ARQUITECTURA DE
RED MLR DE TIPO NG-PON2**



**Andrés Giovanni Pascuaza Narváez
Gean Steven Cardona Restrepo**

Director: Ing. MSc. Alejandro Toledo Tovar.

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT)
Popayán, 2023**

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS
EN PRESENCIA DE LOS EFECTOS SPM Y XPM EN UNA ARQUITECTURA DE
RED MLR DE TIPO NG-PON2**



**Andrés Giovanni Pascuaza Narváez
Gean Steven Cardona Restrepo**

**Trabajo de Grado presentado a la Facultad de Ingeniería Electrónica y
Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca para la obtención del título
de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

Director: Ing. MSc. Alejandro Toledo Tovar.

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT)
Popayán, 2023**

A Dios por ser mi guía constante, por darme fuerza y sabiduría. A mi querida familia por brindarme su amor y su apoyo incondicional en cada paso de este camino, a mi compañero

Gean por su compromiso y esfuerzo incansable, su dedicación y colaboración fueron fundamentales para alcanzar el éxito. Asimismo, a todos aquellos que, de una forma u otra, formaron parte de mi recorrido en esta etapa. Gracias totales...

Andrés Giovanni Pascuaza Narváez

A mi familia y amigos, quiero agradecerles de todo corazón por su incondicional respaldo durante esta etapa de mi vida. Agradezco su paciencia, consejos y el haber celebrado cada

logro a mi lado. A mi compañero Andrés, por su dedicación y por compartir sus conocimientos que han hecho de este proceso una experiencia enriquecedora. Gracias a

Dios por ponerlos en mi vida; ustedes han hecho de ella una bendición.

Gean Steven Cardona Restrepo

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento a todas las personas y entidades que brindaron su ayuda y apoyo durante la realización de este trabajo de grado.

En primer lugar, queremos agradecer al MSc. Alejandro Toledo Tovar, director del proyecto, por su valiosa orientación y compromiso, su experiencia y guía fueron fundamentales para el desarrollo de esta tesis.

También deseamos expresar nuestro más profundo agradecimiento a nuestra alma mater y al compromiso y dedicación de los docentes, investigadores y personal administrativo, en especial al Departamento de Telecomunicaciones del programa de pregrado en Electrónica y Telecomunicaciones, sus aportes y recomendaciones fueron de gran importancia para fortalecer nuestro trabajo. Así mismo, queremos reconocer al grupo de investigación de Nuevas tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT por su contribución en el planteamiento adecuado de nuestro proyecto.

Por último, pero no menos importante, queremos expresar un profundo agradecimiento a nuestros familiares y amigos, su incondicional apoyo y compañía durante todo el proceso fueron un pilar fundamental para nuestro éxito. A todos ustedes, les estamos enormemente agradecidos por su dedicación, orientación y cariño, sin su ayuda este trabajo de grado no habría sido posible.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	IV
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABLAS	XVI
LISTA DE ACRONIMOS	XVII
INTRODUCCION	XIX
1 GENERALIDADES SOBRE SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS, EFECTOS NO LINEALES, VELOCIDADES DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA MIXTA Y DESEMPEÑO ÓPTICO.....	1
1.1 SISTEMAS WDM.....	1
1.1.1 DWDM.....	3
1.2 REDES FTTX-PON.....	4
1.2.1 Red Óptica Pasiva (PON)	5
1.2.2 Tecnología FTTx.....	10
1.3 VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA ÚNICA EN REDES WDM-PON	12
1.4 VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA MIXTA EN REDES WDM-PON	13
1.5 DEGRADACIONES ÓPTICAS	16
1.5.1 Efectos Lineales	17
1.5.2 Efectos no lineales.....	20
1.6 FORMATOS DE MODULACIÓN.....	24
1.7 MONITOREO DE DESEMPEÑO ÓPTICO - OPM.....	32
1.7.1 Modelo de referencia OPM	32
1.7.2 Parámetros de monitoreo óptico	34
2 MARCO METODOLOGICO.....	38
2.1 HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN.....	38
2.1.1 OptiSystem	38
2.1.2 Optilux	39
2.1.3 OptSim.....	40
2.1.4 Elección del software de simulación	41
2.2 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN	42
2.2.1 Diagrama de flujo de la metodología de simulación	44
2.3 ESCENARIO DE SIMULACIÓN.....	45

2.3.1	Caracterización del escenario de simulación	45
2.3.2	Desarrollo del escenario de simulación.....	51
2.4	CASOS DE ESTUDIO	70
3	ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS EN PRESENCIA DE LOS EFECTOS SPM Y XPM EN UNA ARQUITECTURA DE RED MLR DE TIPO NG-PON2	72
3.1	ANÁLISIS INDIVIDUAL DE LOS EFECTOS SPM Y XPM EN UNA RED MLR DEL TIPO NG-PON2, EN PRESENCIA DE FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS. .	72
3.1.1	Análisis efecto no lineal SPM.....	72
3.1.2	Análisis efecto no lineal XPM.....	76
3.2	RED MLR TIPO 1 BASADA EN FORMATOS DE MODULACIÓN NRZ-OOK, RZ-OOK Y RZ-DPSK.	79
3.2.1	Caso de estudio 1: 2 canales de 2.5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 2 canales de 40 Gbps.	79
3.2.2	Caso de estudio 2: 4 canales de 2.5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 4 canales de 40 Gbps.	98
3.3	RED MLR TIPO 2 BASADA EN FORMATOS DE MODULACIÓN NRZ-OOK, CSRZ-OOK Y RZ-DQPSK.....	117
3.3.1	Caso de estudio 3: 2 canales de 2.5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 2 canales de 40 Gbps.	117
3.3.2	Caso de estudio 4: 4 canales de 2.5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 4 canales de 40 Gbps.	136
4	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	156
4.1	ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LOS FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS EN PRESENCIA DE LOS EFECTOS NO LINEALES SPM Y XPM.	156
4.2	CONCLUSIONES	159
4.3	RECOMENDACIONES.....	160
4.4	TRABAJOS FUTUROS.....	161
	REFERENCIAS	162

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Técnica WDM [3].....	2
Figura 1.2 CWDM y DWDM [6]	2
Figura 1.3 Sistema DWDM [10].....	3
Figura 1.4 Clases de FTTx [15].....	5
Figura 1.5 Terminal de línea óptica [16].	5
Figura 1.6 Unidad de red óptica [16]	6
Figura 1.7 Esquema de red GPON [17].....	7
Figura 1.8 Esquema Punto a Punto [18].....	7
Figura 1.9 Esquema Punto a Multipunto [18]	8
Figura 1.10 Topología de Árbol [19].	8
Figura 1.11 Topología de Bus [19].	9
Figura 1.12 Topología de Anillo [19].....	9
Figura 1.13 Topología de Estrella [19].	10
Figura 1.14 Fibra Hasta el Hogar [22]	11
Figura 1.15 Fibra Hasta el Edificio [22].....	11
Figura 1.16 Fibra Hasta la acera [22]	11
Figura 1.17 Fibra Hasta el nodo [22].....	12
Figura 1.18 Esquema SLR-WDM [27].	12
Figura 1.19 Desarrollo de estándares PON [29].....	13
Figura 1.20. Esquema de una red MLR [31].....	14
Figura 1.21. Velocidad de transmisión según la distancia de enlace [30].....	15
Figura 1.22. Degradaciones Ópticas [7]	16
Figura 1.23. Atenuación en la fibra óptica	17
Figura 1.24. Efecto de la PMD en la fibra óptica [43].....	19
Figura 1.25. Efecto de FWM sobre dos señales [45]	21
Figura 1.26. Efecto de la SPM sobre un pulso [36]	22
Figura 1.27. Códigos de línea NRZ y RZ [51].....	25
Figura 1.28. Diagrama de bloques de un Transmisor NRZ-OOK y RZ-OOK [47].	26
Figura 1.29. Diagrama de bloques del transmisor NRZ-DPSK	28
Figura 1.30. Diagrama de bloques del transmisor RZ-DPSK.....	29
Figura 1.31. Diagrama de bloques del receptor DPSK típico [47].....	29
Figura 1.32. Diagrama de constelación de la modulación DQPSK	30

Figura 1.33. Estructura del transmisor DQPSK [49].	31
Figura 1.34. Estructura del Demodulador y receptor balanceado para DQPSK [57].	32
Figura 1.35. Capas del Modelo de Referencia OPM [58].	32
Figura 1.36 Parámetros de Monitoreo de la capa de Gestión de Canal [59].	33
Figura 1.37. Parámetros de Monitoreo de la Capa de Calidad de Canal [59].	33
Figura 1.38. Parámetro de Monitoreo de Desempeño del Protocolo [59].	34
Figura 1.39. Factor Q [61].	35
Figura 1.40. Distribución de probabilidad para las señales recibidas “0” y “1” lógicos [63].	35
Figura 1.41 Parámetros del Diagrama del ojo [56].	36
Figura 2.1. Logo de OptiSystem [68].	39
Figura 2.2. Herramienta de simulación OptiluX	40
Figura 2.3. Herramienta de simulación OptSim	41
Figura 2.4. Diagrama de flujo empleado en el proceso de simulación.	44
Figura 2.5. Arquitectura lógica de referencia NG-PON2 [89].	49
Figura 2.6. Diseño red WDM – MLR [92].	50
Figura 2.7. Escenario de simulación.	52
Figura 2.8. Propiedades del láser para el canal 2.	53
Figura 2.9. (a) Transmisor NRZ-OOK. (b) Transmisor RZ-OOK. (c) Transmisor RZ-DPSK. (d) Transmisor CSRZ-OOK. (e) Transmisor RZ-DQPSK.	53
Figura 2.11. Medio de transmisión	54
Figura 2.12. parámetro de la rejilla de Bragg	54
Figura 2.13 Recepción en el primer canal	55
Figura 2.14 Parámetros en recepción para el primer canal.	55
Figura 2.15. Diagrama de ojo back to back, CH1 NRZ-OOK a 2.5 Gbps.	57
Figura 2.16. Diagrama de ojo en RX, CH1 NRZ-OOK a 2.5 Gbps.	57
Figura 2.17. Diagrama de ojo back to back, CH2 RZ-OOK a 10 Gbps.	57
Figura 2.18. Diagrama de ojo en RX, CH2 RZ-OOK a 10 Gbps.	57
Figura 2.20. Diagrama de ojo en RX, CH3 RZ-DPSK a 40 Gbps.	57
Figura 2.19. Diagrama de ojo back to back, CH3 RZ-DPSK a 40 Gbps.	57
Figura 2.21. Espectro óptico back to back, CH1 NRZ-OOK a 2,5 Gbps.	58
Figura 2.22. Espectro óptico en RX, CH1 NRZ-OOK a 2,5 Gbps.	58
Figura 2.23. Espectro óptico back to back, CH2 RZ-OOK a 10 Gbps.	59
Figura 2.24. Espectro óptico en RX, CH2 RZ-OOK a 10 Gbps.	59
Figura 2.25. Espectro óptico back to back, CH3 RZ-DPSK a 40 Gbps.	59
Figura 2.26. Espectro óptico en RX, CH3 RZ-DPSK a 40 Gbps.	59
Figura 2.27. Espectro óptico para los tres canales en la red MLR de tipo 1.	60

Figura 2.28. Cálculo de la OSNR real.	61
Figura 2.29. Diagrama de ojo en RX para las distancias de 60 a 120 Km en cada canal. ...	63
Figura 2.30. Espectro óptico en RX para las distancias de 60 a 120 Km en cada canal.....	63
Figura 2.29. Diagrama de ojo en RX, canal 2 de 10 Gbps.	65
Figura 2.28. Diagrama de ojo back to back, canal 2 de 10 Gbps.	65
Figura 2.30. Diagrama de ojo back to back, canal 3 a 40 Gbps.	65
Figura 2.31. Diagrama de ojo en RX, canal 3 en cuadratura a 40 Gbps.....	65
Figura 2.32. Diagrama de ojo en RX, canal 3 en fase a 40 Gbps.....	65
Figura 2.33. Espectro óptico back to back, canal 2 de 10 Gbps.	66
Figura 2.34. Espectro óptico en RX, canal 2 de 10 Gbps.	66
Figura 2.35. Espectro óptico back to back, canal 3 de 40 Gbps.	67
Figura 2.36. Espectro óptico en RX, canal 3 de 40 Gbps.	67
Figura 2.37. Espectro óptico para los tres canales en la red MLR de tipo 2.	67
Figura 2.38. Diagrama de ojo en RX para las distancias de 60 a 120 Km en cada canal. ...	69
Figura 2.39. Espectro óptico en RX para las distancias de 60 a 120 Km en cada canal.....	70
Figura 3.1. Diagramas de ojo para el canal 1, NRZ-OOK a 2.5 Gbps.	73
Figura 3.2. Espectros ópticos en recepción para el canal 1, NRZ-OOK a 2.5 Gbps con potencias de transmisión de 0 dBm (verde) y 18 dBm (rojo).	73
Figura 3.3. Diagramas RZ-OOK (a) espectro óptico para potencias de transmisión de 0 dBm (verde) y 18 dBm (rojo) y (b) Diagrama del ojo a una potencia de 13 dBm.	74
Figura 3.4. Diagramas RZ-DPSK (a) espectro óptico para potencias de transmisión de 0 dBm (verde) y 18 dBm (rojo) y (b) Diagrama del ojo a una potencia de 10 dBm.	75
Figura 3.5. Diagramas CSRZ-OOK (a) espectro óptico para potencias de transmisión de 0 dBm (verde) y 18 dBm (rojo) y (b) Diagrama del ojo a una potencia de 13 dBm.	75
Figura 3.6. Diagramas RZ-DQPSK (a) espectro óptico para potencias de transmisión de 0 dBm (verde) y 18 dBm (rojo) y (b) Diagrama del ojo a una potencia de 10 dBm.	75
Figura 3.7. Escenario de simulación de la red MLR.	76
Figura 3.8. Diagramas en recepción de los canales 1 y 3 bajo el efecto XPM originado por el canal 2, para una dispersión de 0 (verde) y 6 ps/nm/km (rojo).	77
Figura 3.9. Efecto de la XPM sobre el Espectro óptico de la red MLR para una dispersión de la fibra de 0 ps/nm/km (verde) y 6 ps/nm/km (rojo).	78
Figura 3.10. Diagramas de ojo en recepción en los tres canales, para una dispersión de la fibra de 6 ps/nm/km.....	78
Figura 3.11. Escenario de simulación de la red MLR caso 1.	80
Figura 3.12. Diagramas de ojo en recepción.....	81
Figura 3.13. Espectro óptico para los seis canales de la red MLR caso 1.	82
Figura 3.14. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 6 canales con espaciamiento de 100 GHz.	83

Figura 3.15. Diagramas de ojo para los canales 1 y 6 en recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm y 16 dBm en el canal 2 y 5.	84
Figura 3.16. Espectro óptico en recepción para los canales 1 y 6, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.	85
Figura 3.18. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.....	85
Figura 3.19. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 6 canales con espaciamiento de 100 GHz.	86
Figura 3.20. Diagramas de ojo para el canal 1 y 6 en recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km y 16 ps/nm/km.	87
Figura 3.21. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 6, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).....	88
Figura 3.22. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).	88
Figura 3.23. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 6 canales con espaciamiento de 50 GHz.	89
Figura 3.24. Diagramas de ojo para el canal 1 y 6 en recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm y 16 dBm en el canal 2 y 5.	90
Figura 3.25. Espectro óptico en la recepción para el canal 1 y 6, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.	91
Figura 3.26. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.....	91
Figura 3.27. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 6 canales con espaciamiento de 50 GHz.	92
Figura 3.28. Diagramas de ojo para el canal 1 y 6 en recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km y 16 ps/nm/km.	93
Figura 3.29. Espectro óptico en la recepción para el canal 1 y 6, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).....	94
Figura 3.30. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).	94
Figura 3.31. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 6 canales con espaciamiento de 25 GHz.	95
Figura 3.32. Diagramas de ojo para el canal 1 y 6 en recepción , RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm y 16 dBm en el canal 2 y 5.	96
Figura 3.33. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 6, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.	96
Figura 3.34. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.....	97
Figura 3.35. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 6 canales con espaciamiento de 25 GHz.	98
Figura 3.36. Escenario de simulación de la red MLR caso 2.	99

Figura 3.37. Espectro óptico para los seis canales de la red MLR caso 2.....	100
Figura 3.38. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 10 canales con espaciamento de 100 GHz.....	100
Figura 3.41. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 10, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.....	102
Figura 3.42. Espectro óptico en la recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.....	103
Figura 3.43. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.....	103
Figura 3.44. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 10 canales con espaciamento de 100 GHz.....	104
Figura 3.45. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para un valor de dispersión de 0 ps/nm/km.....	105
Figura 3.46. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para un valor de dispersión de 16 ps/nm/km.....	105
Figura 3.47. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 10, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).....	106
Figura 3.48. Espectro óptico en recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).....	106
Figura 3.49. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).....	107
Figura 3.50. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 10 canales con espaciamento de 50 GHz.....	107
Figura 3.51. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para un valor de potencia de 0 dBm en el canal 3 y 8.....	108
Figura 3.52. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para un valor potencia de 16 dBm en el canal 3 y 8.....	109
Figura 3.53. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 10, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.....	109
Figura 3.54. Espectro óptico en recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.....	110
Figura 3.55. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.....	110
Figura 3.56. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 10 canales con espaciamento de 50 GHz.....	111
Figura 3.57. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para un valor de dispersión de 0 ps/nm/km.....	112
Figura 3.58. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para un valor de dispersión de 16 ps/nm/km.....	112
Figura 3.59. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 10, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).....	113

Figura 3.60. Espectro óptico en recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).....	113
Figura 3.61. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).....	114
Figura 3.62. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 10 canales con espaciamiento de 25 GHz.....	114
Figura 3.63. Espectro óptico en recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.....	115
Figura 3.64. Espectro óptico en recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.....	115
Figura 3.65. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 10 canales con espaciamiento de 25 GHz.....	116
Figura 3.66. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).....	116
Figura 3.67. Escenario de simulación de la red MLR caso 3.....	118
Figura 3.68. Diagramas de ojo en recepción.....	119
Figura 3.69. Espectro óptico para los seis canales de la red MLR caso 3.....	120
Figura 3.70. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 6 canales con espaciamiento de 100 GHz.....	121
Figura 3.71. Diagramas de ojo para el canal 1 y 6 en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm y 16 dBm en el canal 2 y 5.....	122
Figura 3.72. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 6, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.....	123
Figura 3.73. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.....	123
Figura 3.74. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 6 canales con espaciamiento de 100 GHz.....	124
Figura 3.75. Diagramas de ojo para el canal 1 y 6 en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km y 16 ps/nm/km.....	125
Figura 3.76. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 6, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).....	126
Figura 3.77. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).....	126
Figura 3.78. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 6 canales con espaciamiento de 50 GHz.....	127
Figura 3.79. Diagramas de ojo para el canal 1 y 6 en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm y 16 dBm en el canal 2 y 5.....	128
Figura 3.80. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 6, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.....	128

Figura 3.81. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.....	129
Figura 3.82. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 6 canales con espaciamento de 50 GHz.....	130
Figura 3.83. Diagramas de ojo para el canal 1 y 6 en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km y 16 ps/nm/km.	131
Figura 3.84. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 6, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).....	132
Figura 3.85. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).....	132
Figura 3.86. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 6 canales con espaciamento de 25 GHz.....	133
Figura 3.87. Diagramas de ojo para el canal 1 y 6 en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm y 16 dBm en el canal 2 y 5.	134
Figura 3.88. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 6, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.....	134
Figura 3.89. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.....	135
Figura 3.90. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 6 canales con espaciamento de 25 GHz.....	136
Figura 3.91. Escenario de simulación de la red MLR caso 4.....	137
Figura 3.92. Espectro óptico para los seis canales de la red MLR caso 4.....	138
Figura 3.93. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 10 canales con espaciamento de 100 GHz.....	139
Figura 3.94. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para un valor potencia de 0 dBm en el canal 3 y 8.....	139
Figura 3.95. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para un valor potencia de 16 dBm en el canal 3 y 8.....	140
Figura 3.96. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 10, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.....	140
Figura 3.97. Espectro óptico en recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.....	141
Figura 3.98 Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.....	141
Figura 3.99. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 10 canales con espaciamento de 100 GHz.....	142
Figura 3.100. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para un valor de dispersión de 0 ps/nm/km.....	143
Figura 3.101. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para un valor de dispersión de 16 ps/nm/km.....	143

Figura 3.102. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 10, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).....	144
Figura 3.103. Espectro óptico en recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).....	144
Figura 3.104. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).....	145
Figura 3.105. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 10 canales con espaciamento de 50 GHz.....	145
Figura 3.106. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para un valor potencia de 0 dBm en el canal 3 y 8.....	146
Figura 3.107. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para un valor potencia de 16 dBm en el canal 3 y 8.....	147
Figura 3.108. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 10, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.....	147
Figura 3.109. Espectro óptico en recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.....	148
Figura 3.110. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.....	148
Figura 3.111. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 10 canales con espaciamento de 50 GHz.....	149
Figura 3.112. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para un valor de dispersión de 0 ps/nm/km.....	150
Figura 3.113. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para un valor de dispersión de 16 ps/nm/km.....	150
Figura 3.114. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 10, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).....	151
Figura 3.115. Espectro óptico en recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).....	151
Figura 3.116. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).....	152
Figura 3.117. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 10 canales con espaciamento de 25 GHz.....	152
Figura 3.118. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 10, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.....	153
Figura 3.119. Espectro óptico en recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.....	153
Figura 3.120. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 10 canales con espaciamento de 25 GHz.....	154
Figura 3.121. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).....	154

Figura 4.1. Parámetros objetivos de los formatos de modulación avanzados variando el espaciamiento para los diferentes casos de estudio. 157

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Comparación de herramientas de simulación.....	42
Tabla 2.2. Características del sistema.	51
Tabla 2.3. Parámetros OPM de la red MLR tipo 1.....	56
Tabla 2.4. Parámetros OPM para el rango de 60 a 100 Km en la red MLR tipo 1.	62
Tabla 2.5. Parámetros OPM de la red MLR tipo 2.....	64
Tabla 2.5. Parámetros OPM para el rango de 60 a 100 Km en la red MLR tipo 2.	68
Tabla 2.6. Casos de estudio.....	71
Tabla 3.1. Valor de potencia máxima para los parámetros OPM en presencia del efecto SPM para una distancia de 80 km.	74
Tabla 3.2. Parámetros del modelo general de red MLR tipo 1.....	79
Tabla 3.3. Parámetros OPM de la red MLR caso 1.	82
Tabla 3.4. Parámetros OPM de la red MLR caso 2.	99
Tabla 3.5. Parámetros del modelo general de red MLR tipo 2.....	117
Tabla 3.6. Parámetros OPM de la red MLR caso 2.	120
Tabla 3.7. Parámetros OPM de la red MLR caso 4.	137
Tabla 4.1. Análisis comparativo de los formatos de modulación avanzados respecto a los parámetros OPM en los diferentes casos de estudio para una potencia de 0 dBm.	156
Tabla 4.2. Análisis comparativo de los formatos de modulación avanzados RZ-DPSK y RZ-DQPSK.	158

LISTA DE ACRÓNIMOS

ADSL	Línea de Suscriptor Digital Asimétrica (Asymmetric Digital Subscriber Line)
BER	Tasa de Error de Bit (Bit Error Rate)
CD	Dispersión Cromática (Chromatic dispersion)
CSRZ	Retorno a Cero Suprimido (Carrier Suppressed Return-to-Zero)
CW	Onda Continua (Continuous Wave)
CWDM	Multiplexación por División Aproximada de Longitud de Onda (Coarse Wavelength Division Multiplexing)
DCF	Fibra Compensadora de Dispersión (Dispersion Compensating Fiber)
DGD	Retraso Diferencial de Grupo (Differential Group Delay)
DPSK	Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase (Differential Phase Shift Keying)
DQPSK	Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura Diferencial (Differential Quadrature Phase Shift Keying)
DWDM	Multiplexación Densa por División de Longitud de Onda (Dense Wavelength Division Multiplexing)
EDFA	Amplificador de Fibra Dopada con Erblio (Erbium Doped Fiber Amplifier)
EPON	Red Óptica Pasiva sobre Ethernet (Ethernet Passive Optical Network)
FSAN	Red de Acceso de Servicio Completo (Full Service Access Network)
FSO	Óptica de Espacio Libre (Free-Space Optical)
FTTB	Fibra hasta el Edificio (Fiber to the Building))
FTTC	Fibra Hasta La Acera (Fiber To The Curb)
FTTH	Fibra Hasta El Hogar (Fiber To The Home)
FTTN	Fibra Hasta El Nodo (Fiber To The Node)
FTTx	Fibra Hasta La x, Fibra Hasta El Lugar (Fiber To The x)
FWHM	Anchura a Media Altura (Full Width at Half Maximum)
FWM	Mezcla de Cuatro Ondas (Four Wave Mixing)
GPON	Red Óptica Pasiva con Capacidad de Gigabit (Gigabit-capable Passive Optical Network)
ICI	Interferencia Interportadora (Inter-carrier Interference)
IEEE	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
ISI	Interferencia Intersimbólica (Intersymbolic Interference)
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones (International Telecommunication Union)
LAN	Red de Área Local (Local Area Network)
MAN	Red de Área Metropolitana (Metropolitan Area Network)
MLR	Velocidad de Transmisión de Línea Mixta (Mixed Line Rate)
MMF	Fibra Óptica Multimodo (Multi-Mode Optical Fiber)
MZ	Mach-Zehnder
NG-PON	Redes Ópticas Pasivas de Nueva Generación (New Generation Passive Optical Networks)
NRZ	No Retorno a Cero (Non Return to Zero)
OAN	Red de Acceso Óptico (Optical Access Network)
OCDMA	Acceso Múltiple por División de Código Óptico (Optical Code-Division Multiple Access)

ODN	Red de Distribución Óptica (Optical Distribution Network)
OLT	Terminal de Línea Óptica (Optical Line Terminal)
ONT	Terminal de Red Óptica (Optical Network Terminal)
ONU	Unidad de Red Óptica (Optical Network Unit)
OOK	Modulación Digital de Amplitud (On–Off Keying)
OPM	Monitoreo de Desempeño Óptico (Optical Performance Monitoring)
OSNR	Relación Señal a Ruido Óptica (Optical Signal-To-Noise Ratio)
OTDM	Multiplexación Óptica por División de Tiempo (Optical Time-Division Multiplexing)
OXC	Conector Óptico Cruzado (Optical Cross-Connect)
PMD	Dispersión por Modo de Polarización (Polarization Mode Dispersion)
PON	Red Óptica Pasiva (Passive Optical Network)
PtM, P2M	Punto a Multipunto (Point to Multipoint)
PtP, P2P	Punto a Punto (Point to Point)
QPSK	Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (Quadrature Phase Shift Keying)
RZ	Retorno a Cero (Return to Zero)
SBS	Difusión/Dispersión Estimulada de Brillouin (Stimulated Brillouin Scattering)
SLR	Velocidad de Transmisión de Línea Única (Single Line Rate)
SMF	Fibra Óptica Monomodo (Single-Mode Optical Fiber)
SPM	Modulación de Auto-Fase (Self-Phase Modulation)
SRS	Difusión/Dispersión Estimulada de Raman (Stimulated Raman Scattering)
TWDM	Multiplexación por División de Tiempo y Longitud de Onda (Time and Wavelength Division Multiplexing)
WAN	Red de Área Amplia (Wide Area Network)
WDM	Multiplexación por División de Longitud de Onda (Wavelength Division Multiplexing)
XG-PON	Red Óptica Pasiva a 10 Gbps (10 Gbps Passive Optical Network)
XGS-PON	Red Óptica Pasiva a 10 Gbps Simétricos (10 Gbps Symmetrical Passive Optical Network)
XPM	Modulación de Fase Cruzada (Cross-Phase Modulation)

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la creciente demanda en transmisión y capacidad de alta velocidad a crecido de manera exponencial y se ha convertido en un aspecto importante de las redes de telecomunicaciones, requiriendo de nuevas tecnologías para mejorar el rendimiento de los sistemas, por lo que se hace necesario un ancho de banda considerable, lo cual plantea la posibilidad de tener una red de acceso que tenga la capacidad de tolerar altas tasas de transmisión para cada usuario. En la actualidad las tecnologías de acceso que mejor cumplen con estos requerimientos de ancho de banda y latencia son las que están basadas en fibra óptica.

Para satisfacer la creciente demanda de tráfico, las redes ópticas utilizan técnicas de multiplexación, basadas en la multiplexación por división de longitud de onda - WDM (Wavelength Division Multiplexing), donde la multiplexación por división de longitud de onda densa - DWDM (Dense Wavelength División Multiplexing) es una de las más utilizadas por su compatibilidad y porque permite transmitir múltiples longitudes de onda a través de una sola fibra óptica. Además, la industria de las comunicaciones ópticas ha adoptado una nueva estrategia de redes DWDM llamada Velocidad de Línea Mixta (MLR- Multi Line Rate) que sumado a la Red Óptica Pasiva de Próxima Generación 2 NG-PON2 (Next-Generation Passive Optical Network 2), se convierte en una de las soluciones más prometedoras para las redes de acceso. Además, adoptar una estrategia de velocidad de línea mixta puede reforzar el sistema NG-PON2, lo que se traduce en una respuesta rentable a la diversa variedad de los requisitos de tráfico que demandan los diferentes servicios. A pesar de esto, este tipo de sistemas a altas velocidades de transmisión son vulnerables a problemas causados por degradaciones ópticas producto de los efectos lineales y no lineales como la Automodulación de Fase - SPM (Self-phase Modulation) y la Modulación de Fase Cruzada - XPM (Cross-phase Modulation), debido a que los canales adyacentes con distintas velocidades de línea tienden a presentar una drástica degradación de la calidad de la señal.

Es importante mencionar que gran parte de los sistemas ópticos usan técnicas simples de modulación óptica basadas en la modulación de intensidad, estas modulaciones son aptas para la mayoría de las situaciones, sin embargo, las necesidades actuales están progresivamente desplazando y sustituyendo estos formatos por modulaciones avanzadas, las cuales son una buena opción para mejorar el desempeño del sistema. Los formatos de modulación avanzados actualmente permiten la migración a redes con alta eficiencia espectral y alta capacidad de acceso y transporte de información, brindando soluciones rentables, escalables y seguras para los nuevos requerimientos de las redes de nueva generación. Por otro lado, este tipo de formato de modulación presenta robustez contra el impacto de los efectos no lineales, los cuales se pueden llegar a presentar en este tipo de redes cuando se modifican sus parámetros de configuración.

Considerando lo expuesto anteriormente, en este trabajo de investigación se lleva a cabo el análisis comparativo del desempeño de diferentes formatos de modulación avanzados en una arquitectura de red MLR de tipo NG-PON2 en presencia de los efectos SPM y XPM. A continuación, se describe el contenido de este trabajo de grado, distribuido en cuatro capítulos, en función de la información obtenida durante el desarrollo de la investigación.

Capítulo 1. Generalidades sobre sistemas de comunicaciones ópticas, efectos no lineales, velocidades de transmisión de línea mixta y desempeño óptico.

En este capítulo se abordan los aspectos generales de las redes ópticas, destacando las técnicas de multiplexación de longitud de onda (WDM) y su relación con las redes ópticas pasivas (PON) y las arquitecturas de red de fibra óptica hasta el usuario final (FTTx). Se realiza un análisis de la velocidad de transmisión en las redes PON, desde la estandarización de la tecnología de transmisión de línea única (SLR) hasta la evolución hacia la velocidad de línea mixta (MLR). Además, se presentan los formatos de modulación avanzados, asimismo se aborda el monitoreo del desempeño óptico (OPM), considerando las degradaciones, parámetros y técnicas utilizadas.

Capítulo 2. Marco metodológico.

En este capítulo, se detalla la metodología utilizada y las herramientas de simulación empleadas para diseñar y desarrollar un modelo de red inicial. Estas herramientas y enfoques metodológicos permitieron plantear los casos de estudio y los escenarios de simulación abordados en este trabajo de investigación.

Capítulo 3. Análisis del desempeño de formatos de modulación avanzados en presencia de los efectos SPM y XPM en una arquitectura de red MLR de tipo NG-PON2.

En este capítulo, se realiza un estudio detallado de los efectos no lineales de forma individual y se lleva a cabo la simulación de una arquitectura de red MLR NG-PON2 para evaluar el desempeño de los formatos de modulación avanzados bajo la presencia de SPM y XPM. Se analizan los resultados obtenidos con el objetivo de apreciar el rendimiento de los formatos de modulación avanzados en esta arquitectura, teniendo en cuenta la presencia de estos efectos no lineales.

Capítulo 4. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

En este capítulo se exponen las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros relacionados con los aspectos fundamentales abordados en el presente trabajo de grado.

CAPÍTULO 1

1 GENERALIDADES SOBRE SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS, EFECTOS NO LINEALES, VELOCIDADES DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA MIXTA Y DESEMPEÑO ÓPTICO.

La creciente demanda por parte de los servicios de telecomunicaciones ha impulsado la búsqueda de tecnologías que mejoren el rendimiento, especialmente en términos de ancho de banda y velocidad. En este contexto, las tecnologías basadas en fibra óptica son las que mejor satisfacen estos requerimientos, destacando la red NG-PON2 como una solución prometedora para las redes de acceso. Sin embargo, estas redes pueden exponerse a las degradaciones generadas por los efectos no lineales. Ante esta situación, están surgiendo formatos de modulación avanzados, los cuales permiten crear redes más eficientes y robustas frente a los efectos no lineales. En este capítulo se proporcionará una explicación de la teoría relacionada con sistemas de telecomunicaciones basados en fibra óptica, considerando algunas investigaciones en el área. En primer lugar, se presentan las técnicas de multiplexación de longitud de onda y sus características, así como las redes ópticas pasivas y su relación con las arquitecturas FTTx. También se analizará la velocidad de línea mixta y sus propiedades. Además, se detallan las degradaciones ópticas haciendo énfasis en los efectos no lineales SPM y XPM, así como los formatos de modulación avanzados, considerando su eficiencia espectral y comportamiento. Finalmente, se aborda el monitoreo del desempeño óptico, considerando las degradaciones, parámetros y técnicas utilizadas.

1.1 SISTEMAS WDM

La multiplexación por división de longitud de onda - WDM (Wavelength Division Multiplexing) es una técnica de transmisión que por medio de un multiplexor monta varias señales sobre un solo hilo de fibra, permitiendo que viajen diferentes longitudes de onda para enviar datos a través del mismo medio [1].

La adaptación de dispositivos WDM en las redes ópticas existentes, se basa en complementar los sistemas de transmisión mientras que la fibra óptica no presenta cambio alguno. En la actualidad los sistemas de transmisión WDM son los más utilizados por tener ventajas significativas en comparación con otras redes ópticas convencionales, mejorando el aprovechamiento del ancho de banda de la fibra y la escalabilidad que se da al aumentar una nueva longitud de onda [2].

En la figura 1.1 se presenta el esquema de una red WDM, el cual está compuesto por los siguientes elementos: Transmisor, Multiplexor, Canal óptico, Demultiplexor y el receptor. Donde cada longitud de onda genera un canal óptico y se procesa independientemente de los canales restantes.

Multiplexación por división de onda (WDM)

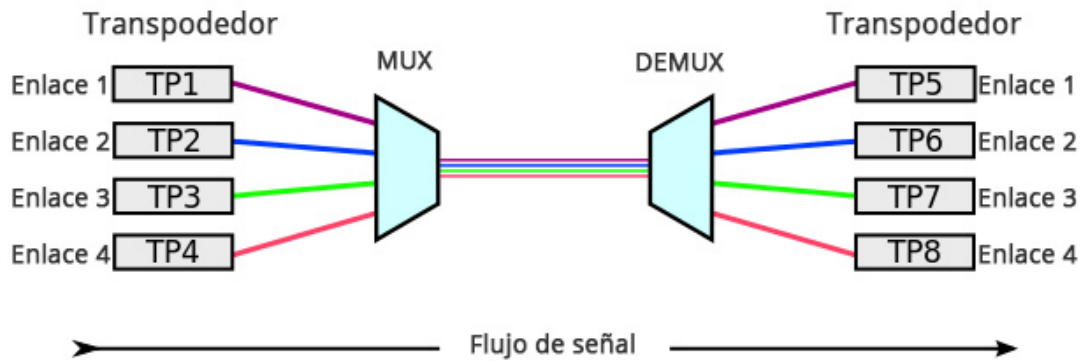


Figura 1.1. Técnica WDM [3]

Es importante mencionar que, en la actualidad, para WDM se encuentran dos variantes las cuales son: la multiplexación por división de longitud de onda densa - DWDM (Dense Wavelength División Multiplexing) y la multiplexación por división aproximada de longitud de onda - CWDM (Coarse Wavelength División Multiplexing) [1]. En las recomendaciones G.694.1 [4] y G.694.2 [5] definidas por La Unión Internacional de Telecomunicaciones - ITU (International Telecommunication Union) se presentan los parámetros característicos de estos sistemas, Además en la figura 1.2 se presenta una comparación entre los dos sistemas.

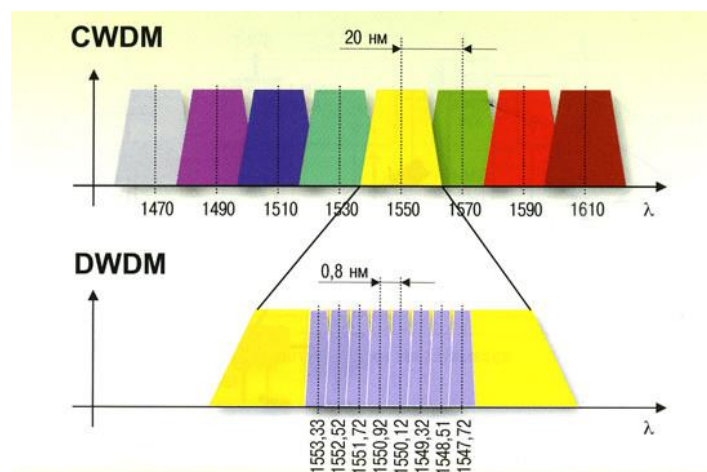


Figura 1.2 CWDM y DWDM [6]

Los sistemas CWDM ofrecen hasta 18 longitudes de onda, definidas en el rango de 1270 nm a 1610 nm con un espaciado de frecuencia de 20 nm, sin embargo, las longitudes de onda se encuentran tan separadas en el sistema CWDM que hacen que no emplee de manera eficiente el espectro óptico. Actualmente solo existe una diferencia de costo apreciable entre los transmisores CWDM y DWDM a 1 Gbps, pero no a velocidades superiores. Por lo tanto, CWDM es adecuado para redes de distancias cortas y para velocidades de transferencia de datos bajas, debido a esto es común encontrar que el sistema DWDM sea el más empleado en los sistemas de alta velocidad [7].

1.1.1 DWDM

El sistema DWDM es una tecnología que permite aprovechar de una mejor manera la capacidad de transmisión de las redes de fibra óptica, esto se debe a que emplea el ancho de banda disponible en la red óptica de tal manera que aumente la capacidad de transmisión de información. Las portadoras ópticas producidas por el transmisor de este sistema se multiplexan y se transmiten a través de una sola fibra, en donde cada portadora emplea una longitud de onda diferente y genera un canal, que se puede procesar independientemente de los demás canales de la fibra, es por eso que en este sistema disminuye el espacio entre canales porque está diseñado para acoplar tantas longitudes de onda como sea aceptable en una sola fibra [8].

En base a lo que se presenta en la recomendación ITU-T G.694.1, se tiene que los sistemas DWDM manejan una separación de canales de 12.5 GHz, 50 GHz, 100 GHz y hasta 200 GHz y velocidades que van desde los 2.5 Gbps a los 100 Gbps. En cuanto a la ventana de operación del sistema DWDM, este hace uso de la ventana que se encuentra entre los 1525 nm y 1565 nm, como se aprecia en la figura 1.3, lo cual es perfecto para disminuir ciertos problemas como la atenuación y la dispersión según la recomendación [9].

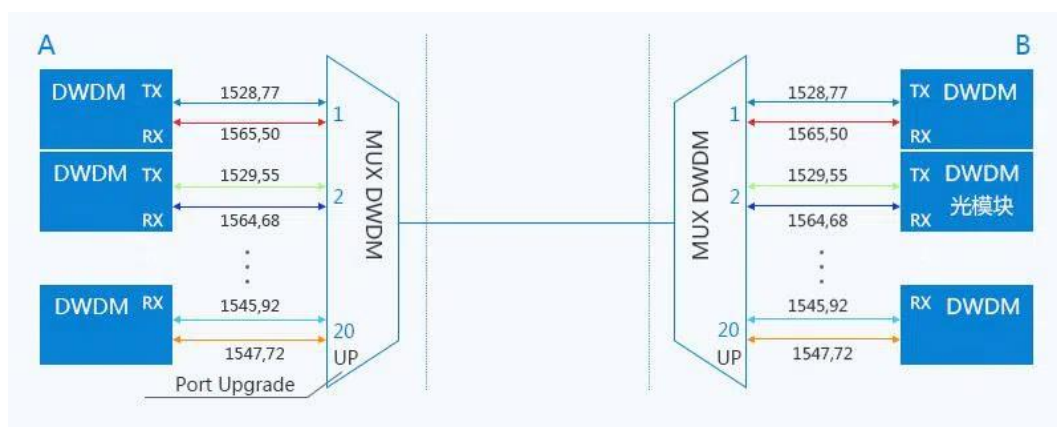


Figura 1.3 Sistema DWDM [10]

Entre las numerosas ventajas que se pueden encontrar en las redes DWDM, se puede destacar que posee la capacidad de transportar grandes cantidades de datos a través de la fibra óptica ya que se puede multiplexar varias señales de datos en un solo haz de luz, lo que permite un uso más eficiente de la red, también se cuenta con la capacidad de escalar la red para adaptarse a las necesidades del usuario, ya que se pueden añadir más longitudes de onda en la fibra óptica o amplificadores con el fin de aumentar la capacidad de la red [7].

Gracias a sus características, las redes DWDM se pueden llegar a emplear en varios tipos de red, como, por ejemplo, en redes de área metropolitanas - MAN (Metropolitan Area Network), la cual cubre un área considerable, como una ciudad y en la cuales se usa topologías de anillo. Además DWDM es usado en redes que cubren largas distancias, por medio de enlaces punto a punto, los cuales se extienden a través de miles de kilómetros, este tipo de red es conocidas como una red de área amplia - WAN (Wide Area Network), en donde la topología punto a punto permite trabajar con un gran flujo de datos a altas velocidades de transmisión [11]. También se puede encontrar que DWDM se usa en redes de área local - LAN (Local Area Networks), en donde el área de cobertura es reducida y se limita a campus universitarios u oficinas y suelen emplear topologías en estrella y anillo [12].

1.2 REDES FTTX-PON

La creciente demanda de transmisión y capacidad de alta velocidad se ha convertido en un aspecto importante de las redes de telecomunicaciones, debido a la excesiva demanda de multimedia el tráfico de la red requiere de nuevas tecnologías para mejorar el rendimiento de los sistemas, en la actualidad las tecnologías de acceso que mejor cumplen con estos requerimientos de ancho de banda y latencia son las que están basadas en fibra óptica. Así, las redes ópticas pasivas - PON (Passive Optical Networks) surgen como una solución, lo que se traduce en una respuesta rentable a la diversa variedad de requisitos de tráfico que tienen demandas de diferentes servicios, PON también puede referirse al último paso entre el proveedor y el consumidor, por lo que están bastante relacionados con la tecnología denominada Fibra hasta la X - FTTX (Fiber To The "X") este es un término que define el conjunto de opciones de arquitectura basada en fibra óptica asociadas con la conectividad en la última milla [13].

En la tecnología FTTX, se pueden encontrar diferentes implementaciones de redes que dependen de la distancia que hay entre un tramo de la fibra y el usuario final, dichas implementaciones se pueden apreciar de mejor manera en la figura 1.4 [14].

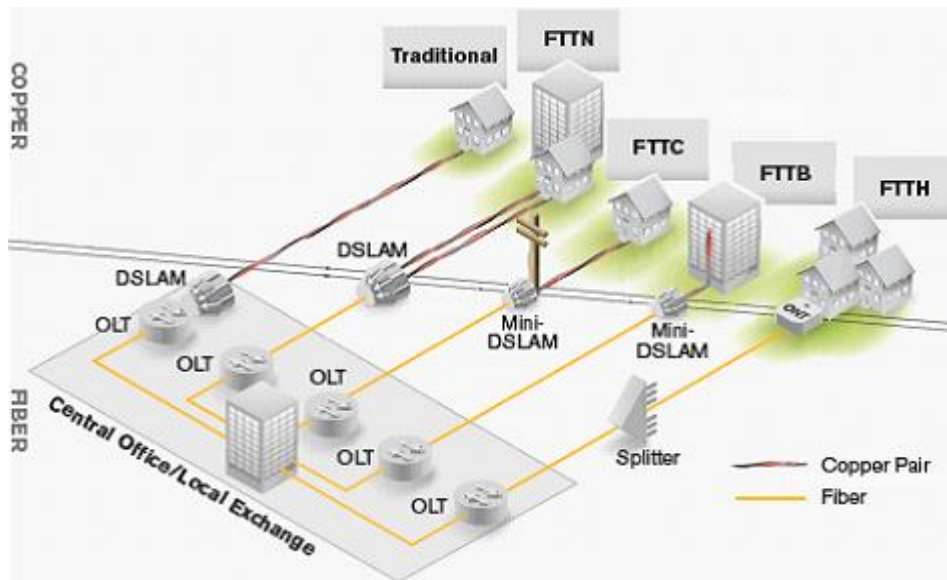


Figura 1.4 Clases de FTTx [15]

1.2.1 Red Óptica Pasiva (PON)

Una Red Óptica Pasiva es un tipo de red de fibra óptica que no utiliza componentes activos en su despliegue, solamente implementa dispositivos pasivos en el trayecto desde la fuente hasta el destino. En comparación con las redes activas, solo se necesita alimentación eléctrica en los puntos de transmisión y recepción, de modo que las PON ofrecen una mejor eficiencia operacional [16].

- Terminal de Línea Óptica - OLT (Optical Line Terminal):** OLT es el equipo activo que conecta la red de distribución óptica (ODN) a los diferentes equipos del proveedor de servicios. Las funciones más importantes son el control de tráfico y de búfer, el suministro de interfaces de red óptica pasiva orientadas al usuario y la asignación de ancho de banda. Además, las OLT tienen integradas tarjetas de gestión, control y servicios, cada puerto de las tarjetas de servicios representa un hilo de fibra de la troncal.



Figura 1.5 Terminal de línea óptica [16].

- **Terminal de Red Óptica - ONT (Optical Network Terminal):** El objetivo de la ONT es convertir la señal óptica en una señal eléctrica, es un dispositivo conectado al usuario final, es decir en el domicilio del cliente. Es el encargado de comunicarse con el OLT y permitir al usuario la conexión a Internet. Las ONT deben estar autenticadas ante la OLT del operador para poder enviar y recibir datos. Los dispositivos de usuario final también pueden denominarse Unidad de Red Óptica - ONU (Optical Network Unit) aunque ONT y ONU son lo mismo. La diferencia radica en la terminología, en donde la ONT es un término de ITU-T, mientras que ONU es un término de IEEE.



Figura 1.6 Unidad de red óptica [16]

- **Red de Distribución Óptica - ODN (Optical Distribution Network):** La red de distribución óptica es toda la red óptica pasiva que no contiene ningún dispositivo activo o dispositivos que requieran energía eléctrica para funcionar, la ODN está formada por:

Red feeder: Es el backbone que conecta el distribuidor óptico ODF ubicado en el nodo central al gabinete FDH.

Red de distribución: conecta el gabinete FDH a la caja de conexiones NAP.

Red de dispersión: Es el segmento de red desde las NAP hasta la roseta óptica ubicada en la casa del cliente.

Además, en esta red existen elementos como los gabinetes FDH, en los que se ubican los divisores (splitters) y las cajas de distribución óptica (NAP).

El gabinete FDH (Fiber Distribution Hub): Está ubicado en un punto específico del enlace y es el encargado de conectar la red feeder a la red de distribución. Los divisores, que pueden soportar hasta 576 puertos o usuarios están ubicados en el gabinete.

El splitter: Es un divisor óptico pasivo comúnmente utilizado en redes de distribución. Cumple la función de dividir la señal igual que la señal original con la misma longitud de onda, pero con menor potencia, dependiendo del número de usuarios puede haber hasta 128 salidas.

Caja de Distribución Óptica (NAP, Network Access Point): Es

responsable de conectar la red de distribución a los terminales individuales de cada suscriptor, permitiendo que la señal sea transmitida de la red de distribución a la red de dispersión. Asimismo, es un punto específico para la realización de tareas de operación y mantenimiento.

Roseta Óptica: Conecta la red de dispersión con el equipo activo ONT.

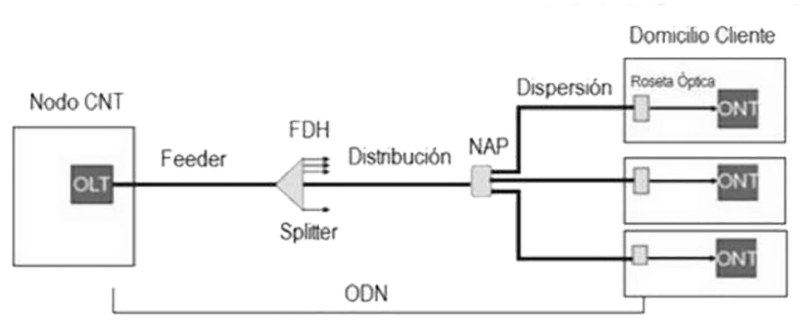


Figura 1.7 Esquema de red GPON [17].

Una topología de red es el diseño de conexión física o lógica de todos los dispositivos o nodos que la componen. Cuando se habla de una conexión física, se refiere a cómo se conectan los dispositivos en la red, y la conexión lógica se refiere a la forma en que se transmiten los datos a través de los dispositivos en la red. Las redes PON suelen estar organizadas de diferentes maneras e implementan diferentes tipos de topologías según las necesidades de la red. Hay dos tipos de topologías de redes ópticas pasivas: redes punto a multipunto (P2MP) y punto a punto (P2P) [18].

- **Punto a Punto (P2P):** Una topología punto a punto es simplemente una red que conecta dos nodos directamente entre sí. Todo el ancho de banda de la conexión se reserva para la transmisión entre estos dos puntos, logrando una conexión de ancho de banda dedicado. La conexión punto a punto usa solo un enlace de fibra para toda la ruta, lo que simplifica la solución de problemas, pero aumenta los costos dependiendo de la longitud del enlace.

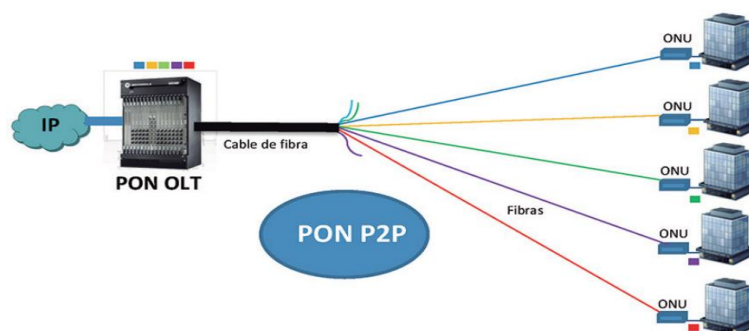


Figura 1.8 Esquema Punto a Punto [18].

- **Punto a Multipunto (P2MP):** Una topología de punto a multipunto es la comunicación lograda a través de una conexión de uno a muchos. Esta topología proporciona acceso a la red desde un único enlace a diversos suscriptores, los cuales comparten el canal y la capacidad del enlace. Una de las características de esta topología es el uso del divisor óptico ubicado entre la OLT y la ONT que no requiere alimentación eléctrica, lo que reduce el costo de los componentes ópticos, por lo que es muy utilizado en redes GPON y EPON.

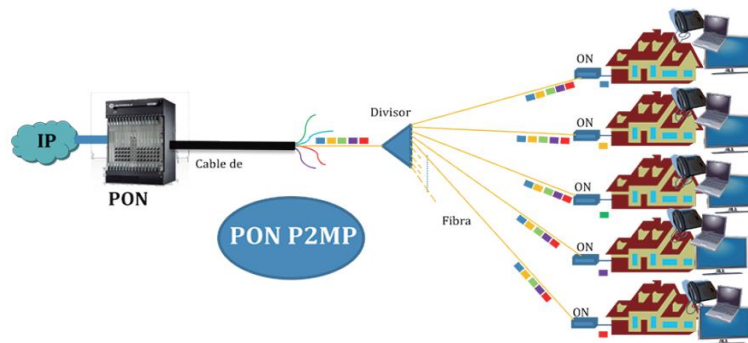


Figura 1.9 Esquema Punto a Multipunto [18]

- **Topología de Árbol:** Una topología de árbol es una estructura en la que cada nodo está conectado jerárquicamente con los demás. Por lo tanto, si un nodo falla una rama inferior se desconectará de la red, solo si falla el nodo principal el funcionamiento de la red se verá afectado en su totalidad. Esta topología brinda facilidad de gestión, mantenimiento, detección y solución de fallas, así como una mayor flexibilidad y escalabilidad.

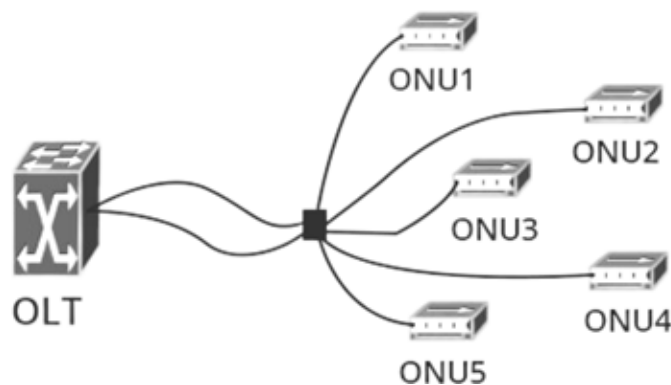


Figura 1.10 Topología de Árbol [19].

- **Topología de Bus:** En la topología de bus, el cable de fibra óptica actúa como la columna vertebral de toda la red, todos los nodos existentes están conectados a esta única línea. La cantidad de nodos que se pueden conectar a esta red son limitados, pero cuanto mayor sea la cantidad de nodos

conectados, mayor será la reducción en el rendimiento de la red. La topología de bus puede presentar degradación de la señal, colisiones y pérdidas significativas al momento de la transmisión.

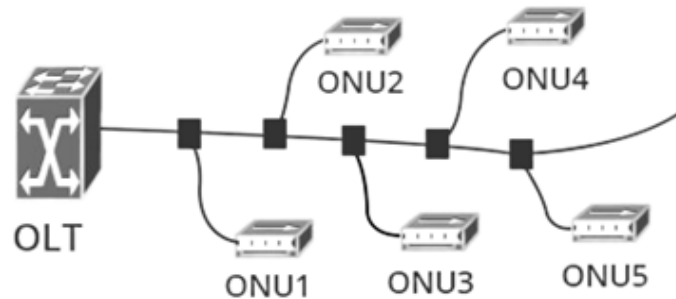


Figura 1.11 Topología de Bus [19].

- **Topología de Anillo:** En la topología en anillo los dispositivos están conectados en una estructura donde se forma un único camino continuo para las señales a través de cada nodo. En comparación con la topología de bus, una topología en anillo es muy eficiente y puede manejar cargas más pesadas, esta configuración tiene la ventaja de proporcionar una vía redundante si falla una fibra, en algunos sistemas se presentan incluso dos anillos de fibra para la protección de la red.

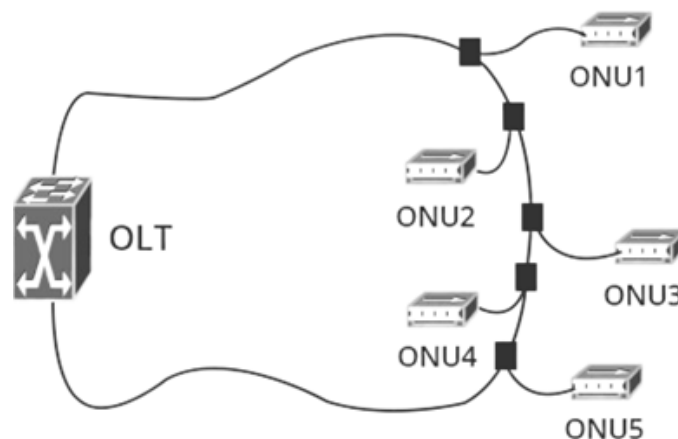


Figura 1.12 Topología de Anillo [19].

- **Topología de Estrella:** La topología en estrella conecta cada ONT en el extremo del usuario con la misma OLT de la oficina central a través de una o un par de fibras ópticas, La OLT cumple las funciones de distribución,

conmutación y control para que la red funcione adecuadamente. El mantenimiento de la red es sencillo por lo que se usan canales de fibra óptica independientes, las ONU no se afectan entre sí, tienen un excelente rendimiento y son fáciles de actualizar. Sin embargo, el costo es demasiado alto, la cantidad de fibras ópticas requeridas es demasiado grande. La fibra óptica y la fuente de luz no se pueden compartir.

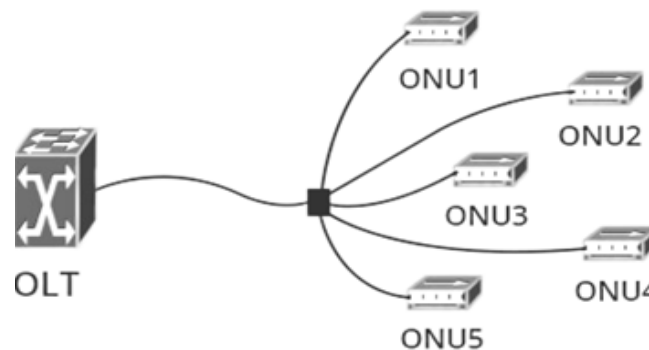


Figura 1.13 Topología de Estrella [19].

1.2.2 Tecnología FTTx

La fibra hasta “x” es el componente básico para el acceso a las redes de próxima generación que describe la evolución de la infraestructura de banda ancha hacia altas velocidades y calidad de servicio (QoS). El diseño de la estructura FTTx tiene en cuenta el entorno de la red en términos de número de usuarios, ubicación, distribución de fibra, puntos de acceso y características de diseño como son los nodos, empalmes y pérdidas totales [20].

Entre las principales arquitecturas de red en FTTX se tienen:

- **FTTH (Fiber to the Home):** La fibra hasta el hogar o FTTH, es una solución para mejorar la calidad y la capacidad de Internet al proveer una conexión de alta velocidad directamente a los hogares mediante fibra óptica. La red de acceso entre el usuario y el último nodo de distribución puede utilizar una o dos fibras dedicadas para cada usuario (conexión punto a punto estableciendo una topología en estrella) o una PON, la cual Adopta una estructura con forma de árbol, en el cual hay una fibra en el lado de la red y múltiples fibras del lado del usuario. Entre sus principales beneficios se tiene que las FTTH al usar fibra óptica pueden brindar una conexión de Internet más rápida y de mejor calidad que los otros tipos de conexiones como el ADSL, lo que significa que el acceso a dichos servicios, como el internet, sea más eficiente, además FTTH emplea sistemas de distribución ópticos con el objetivo de ofrecer servicios avanzados como puede ser el triple play (voz, video y datos). Otra ventaja es que las FTTH son escalables, lo que significa que pueden brindar una mayor cantidad de ancho de banda a los usuarios en el futuro si es necesario [14] [21].

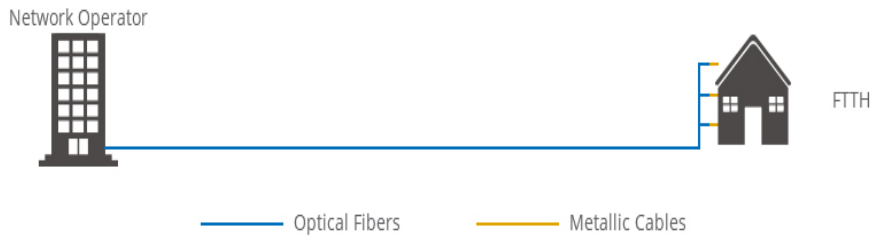


Figura 1.14 Fibra Hasta el Hogar [22].

- **FTTB (Fiber to The Building):** La fibra hasta la acometida del edificio o FTTB, a partir de ahí, la conexión al usuario utiliza la infraestructura existente, redes LAN basadas en Ethernet, distribución basada en telefonía o cable coaxial. La caja de terminación óptica suele estar ubicada en el sótano de un edificio en el área donde se prestan los servicios. Esta situación se da en grandes viviendas, edificios comerciales, hospitales, complejos hoteleros, instalaciones deportivas, etc. [23].



Figura 1.15 Fibra Hasta el Edificio [22].

- **FTTC (Fiber To The Curb):** La fibra Hasta la Acera o FTTC, es un cable de fibra óptica híbrido que contiene una conexión directa a un punto de acceso remoto. El cable óptico se conecta a una cabina de comunicación, que actúa como intermediaria y se encuentra a pocos metros del destino final, y es transportado hasta el domicilio del usuario por un cable de cobre común [24].

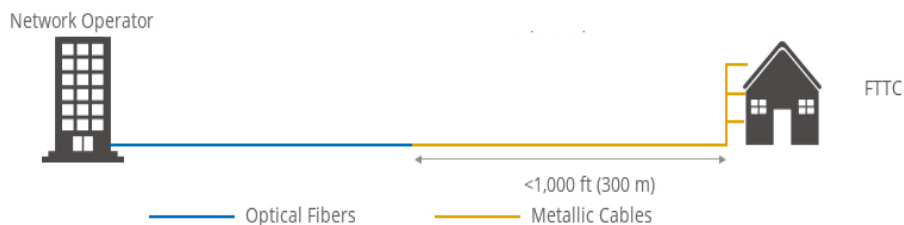


Figura 1.16 Fibra Hasta la acera [22].

- **FTTN (Fiber to the Node):** La fibra hasta el nodo o FTTN, es una red donde la fibra termina en una central secundaria del operador y donde las conexiones finales se realizan sobre cables de cobre existentes. El despliegue de FTTN involucra fibra óptica que termina en un nodo ubicado a pocos kilómetros del

cliente. y el cable cobre o coaxial se extiende hasta el usuario final [25].

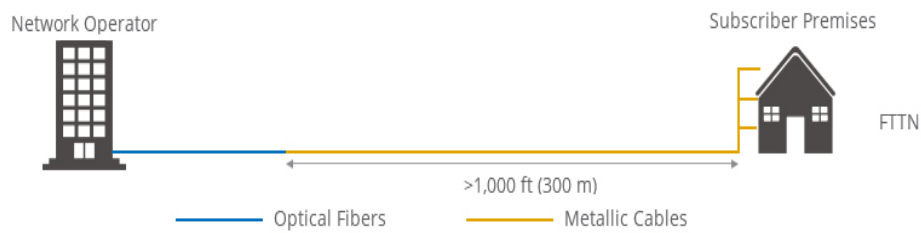


Figura 1.17 Fibra Hasta el nodo [22].

1.3 VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA ÚNICA EN REDES WDM-PON

En términos generales, una red de velocidad de transmisión de línea única - SLR (Single Line Rate) es una red en la que todos los canales de transmisión asignados a una longitud de onda funcionan a la misma velocidad de bits, donde se realizan procesos de control y gestión para el control del tráfico en el despliegue de la red. La multiplexación por división de longitud de onda WDM, ha sido durante mucho tiempo la tecnología elegida para transmitir grandes cantidades de datos entre diferentes ubicaciones permitiendo trabajar con múltiples canales sobre el mismo hilo de fibra. Por lo tanto, una red óptica SLR-WDM es una red que opera a la misma velocidad de bits en todos los canales disponibles [26].

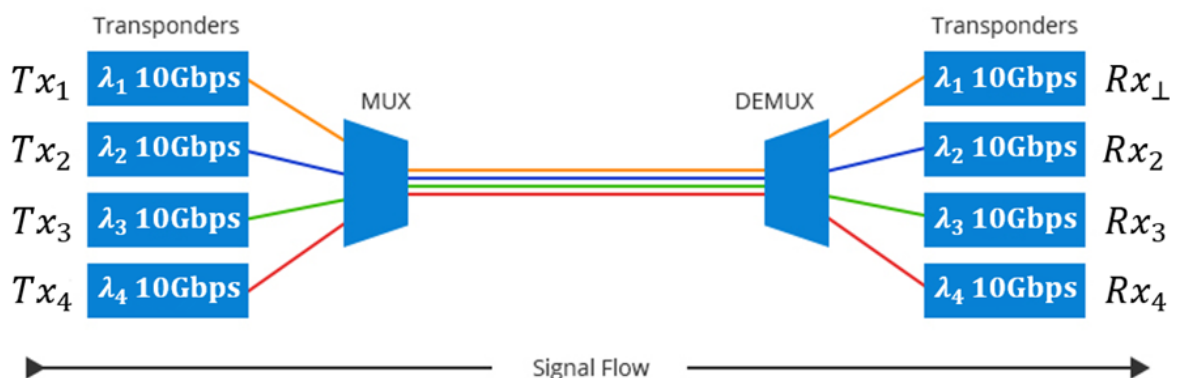


Figura 1.18 Esquema SLR-WDM [27].

Las futuras redes de fibra óptica deben proporcionar una infraestructura eficiente, capaz de admitir una cantidad creciente y variable de tráfico generado por el uso de aplicaciones con diferentes requisitos de velocidad que las redes SLR con formatos de modulación predefinidos no pueden proporcionar, para cumplir con esta tendencia, la ITU y el grupo de Red de Acceso de Servicio Completo (FSAN) han estado

desarrollando la estandarización de la fase 2 de la red óptica pasiva de próxima generación (NG-PON2) en donde se detalla que la NG-PON2 requiere una velocidad de datos de 40 Gbps o superior [28].

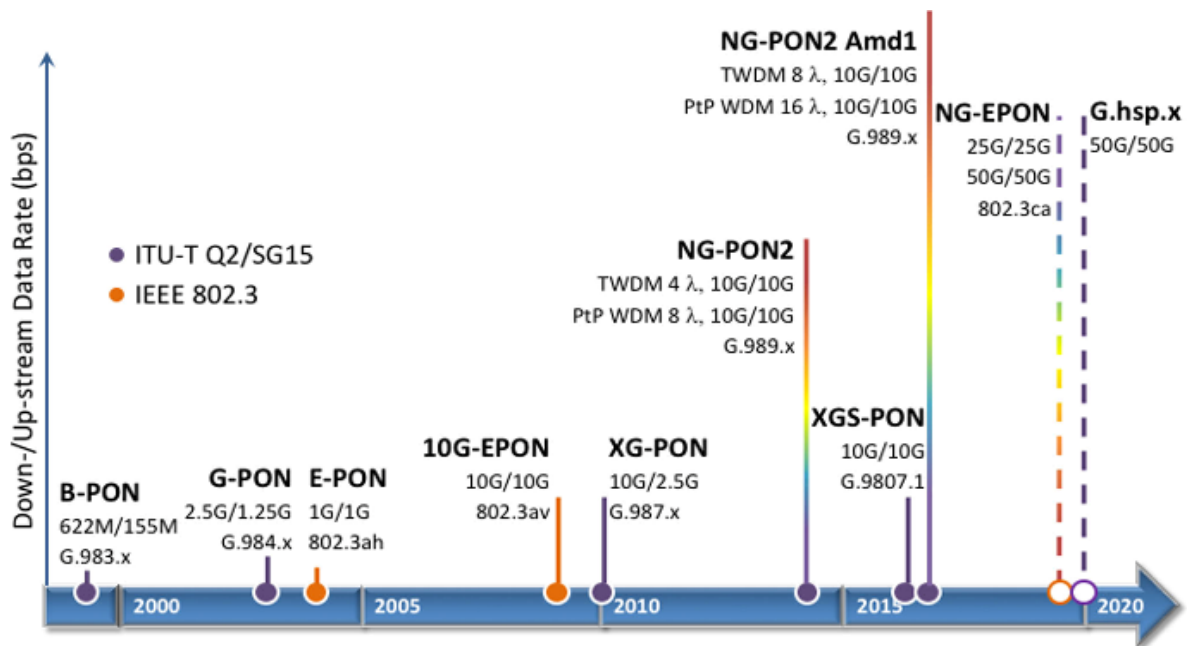


Figura 1.19 Desarrollo de estándares PON [29].

Otro estándar que destaca en este desarrollo se refiere al segundo nivel de redes ópticas pasivas de próxima generación, es decir, el estándar de tercera generación NG-PON2, cuya arquitectura puede proporcionar un rendimiento global de la red de hasta 40 Gbps.

1.4 VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA MIXTA EN REDES WDM-PON

Mediante el uso de técnicas basadas en WDM junto con arquitecturas de tipo PON, es posible aumentar significativamente la capacidad de las redes ópticas, mejorando su rendimiento en los sistemas de comunicación como también su rentabilidad. Así pues, en el contexto de las redes de telecomunicaciones el aumento de la capacidad de una longitud de onda presenta un compromiso entre la capacidad y el alcance incluso en costos adicionales, además se estaría desperdiciando recursos debido a que no toda la infraestructura de la red necesita la misma capacidad. Estas necesidades dan origen a las redes ópticas con velocidad de transmisión de línea mixta - MLR (Mixed Line Rate). En una red óptica MLR, la transmisión de datos se realiza a través de diferentes longitudes de onda a diferentes velocidades de línea dentro de la misma fibra, lo que permite a los operadores diseñar redes rentables (así

como actualizar sus redes existentes) explotando los beneficios de este tipo de redes, con el objetivo de otorgar mayor flexibilidad al momento de asignar velocidades flexibles a servicios de baja tasa de bits y a servicios de alta tasa de bits de forma rentable [30].

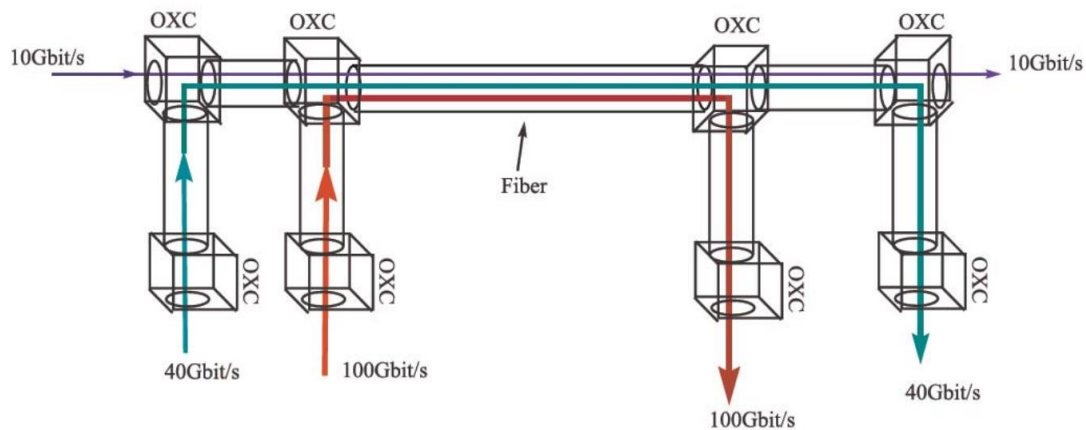


Figura 1.20. Esquema de una red MLR [31].

En la figura 1.20, se puede apreciar el diagrama básico de una red MLR en la cual se distinguen velocidades de 10 Gbps, 40 Gbps y 100 Gbps para diferentes canales que se encuentran compartiendo la misma fibra. En redes MLR, los diferentes canales de longitud de onda pueden tener diferentes capacidades. Por tanto, el espaciado de los canales es una cuestión importante debido a que puede afectar a la calidad de la señal en términos de tasa de errores de bits (BER) y, por tanto, afecta el alcance máximo. Además, el papel de los formatos de modulación se vuelve muy importante, porque su eficiencia espectral tiene que ser muy alta para soportar altas tasas de bits en un espaciado de canal estrecho [32].

- **Conector Óptico Cruzado (OXC):** El OXC es un dispositivo utilizado para conmutar señales ópticas de alta velocidad en una red de fibra óptica, la función principal del OXC será reconfigurar la red dinámicamente, a nivel de longitud de onda, con el fin de adaptarse a los cambios en la demanda de ancho de banda lo cual podría generar beneficios significativos desde el punto de vista de gestión de la red y de costos. La conexión cruzada óptica (OXC) ofrece escalabilidad, alto rendimiento y capacidad de acceso múltiple en las redes de enrutamiento de longitudes de onda totalmente ópticas [33].
- **Amplificador de Fibra Dopada con Erblio (EDFA):** Los amplificadores ópticos funcionan como una parte integrada en el transmisor. EDFA, es el amplificador óptico más utilizado en el sistema WDM, puesto que utiliza fibra dopada con erbio para aumentar la eficiencia de la señal. EDFA opera entre 1530-1565 nm,

tiene poco ruido y puede amplificar múltiples longitudes de onda simultáneamente. Según las funciones, EDFA se puede dividir en tres tipos: Amplificador Booster (amplificador de refuerzo), amplificador en línea y preamplificador; además de tres configuraciones para estimular la longitud de onda de fibra dopada con erbio: co-propagación, en la que la longitud de onda de bombeo y la señal se propagan en la misma dirección; contra-propagación, en esta configuración las longitudes de onda de bombeo y la señal se propagan en direcciones opuestas, y bidireccionales donde la longitud de onda de bombeo se propaga en ambas direcciones. En cualquier tipo de sistema de fibra óptica, debe tenerse en cuenta que los amplificadores como el EDFA solo se pueden usar para extender el rango de la señal hasta cierto punto, ya que introducen algo de ruido y por lo tanto son propensos a degradaciones ópticas a medida que aumenta la distancia. Por lo tanto, las redes ópticas de larga distancia requieren mecanismos de regeneración de señal que restablezcan la calidad de la señal y garanticen una transmisión confiable y sin errores [34].

La planificación de la red para usar MLR en un sistema que admita más de una velocidad de transmisión con diferentes técnicas de modulación puede reducir el costo de la red, pero existe una limitante al momento de evaluar el alcance en un trayecto con una velocidad y formato de modulación determinado el cual cambia en función de la tasa a la cual se trabaje. Además, debido a los efectos de interferencia entre las diferentes velocidades y formatos de modulación utilizados, el rango de transmisión de cada velocidad y formato de modulación afecta a otras transmisiones paralelas en la misma red. Pasar a velocidades de transmisión más altas requiere el uso de formatos de modulación más avanzados con mayor eficiencia espectral y mayor tolerancia a las degradaciones, incluso con estas técnicas de modulación avanzadas, el alcance de la transmisión disminuirá al pasar de una transmisión de 10 Gbps a una de 40 Gbps y de una de 40 Gbps a una de 100 Gbps [35].

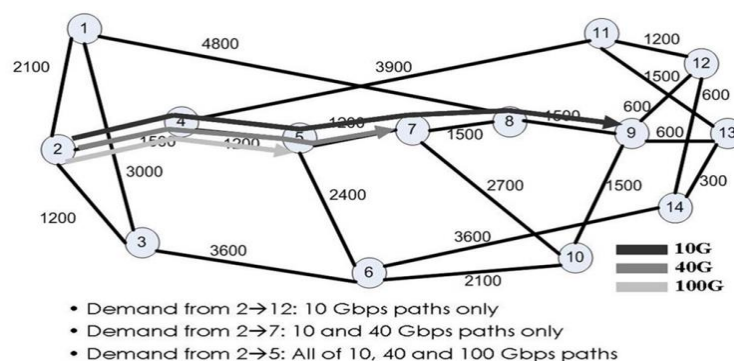


Figura 1.21. Velocidad de transmisión según la distancia de enlace [30].

1.5 DEGRADACIONES ÓPTICAS

La fibra óptica es una de las herramientas más utilizadas para el transporte de la información. Sin embargo, la calidad de la señal que se transmite a través de la fibra óptica está limitada por algunos efectos que se presentan en ella, los cuales tienen un impacto negativo en el desempeño del sistema. Los efectos que se presentan en la fibra se pueden llegar a clasificar en dos grupos [7] [36]:

- Efectos lineales: En los efectos lineales se hace notable el Ruido, la atenuación y los efectos de la dispersión, como la Dispersión Cromática (CD) y la Dispersión por Modo de Polarización - PMD (Polarization Mode Dispersion).
- Efectos no lineales: En los efectos no lineales se puede encontrar a la Dispersión Estimulada de Brillouin - SBS (Stimulated Brillouin Scattering), Dispersión Estimulada de Raman - SRS (Stimulated Raman Scattering), la Mezcla de Cuatro Ondas - FWM (Four Wave Mixing), la Automodulación de Fase - SPM (Self-phase Modulation) y la Modulación de Fase Cruzada - XPM (Cross-phase Modulation) [14].

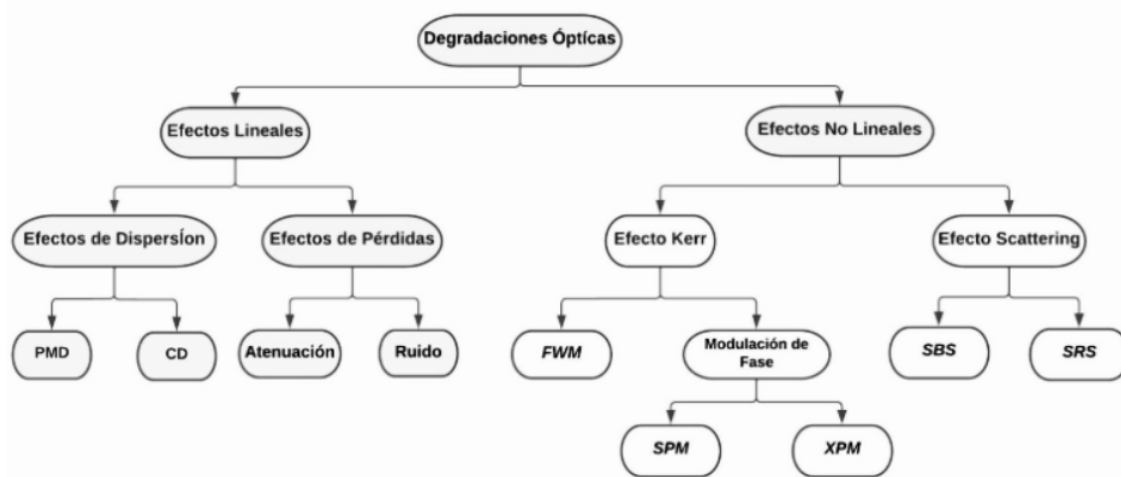


Figura 1.22. Degradaciones Ópticas [7].

A continuación, se realizará una descripción de las degradaciones ópticas que tienen un impacto negativo sobre la capacidad de la transmisión de información en los sistemas de fibra óptica, destacando a los efectos no lineales, debido a que son de vital importancia para este trabajo.

1.5.1 Efectos Lineales

Las degradaciones ópticas que son independientes de la potencia de transmisión se conocen como efectos lineales, dentro de estos se destaca a la dispersión cromática, ya que es la más relevante para los efectos no lineales, debido a que el valor de dicha dispersión influye en el comportamiento de algunos de estos [37].

- **Atenuación:** La atenuación es la pérdida de potencia en una señal de fibra óptica que se produce debido a la absorción y a la dispersión de la luz en la fibra. La absorción es provocada por la absorción de la luz y la conversión en calor por las moléculas en el vidrio, además de otras impurezas presentes en el material. Es importante mencionar que la absorción que se presenta en las longitudes de onda largas se debe tener en cuenta ya que la absorción en estas longitudes suele incrementar de manera notable y llega a representar un problema cuando se trabaja alrededor de 1000 nm, 1400 nm y por encima de 1600 nm, como se muestra en la figura 1.23 [7].

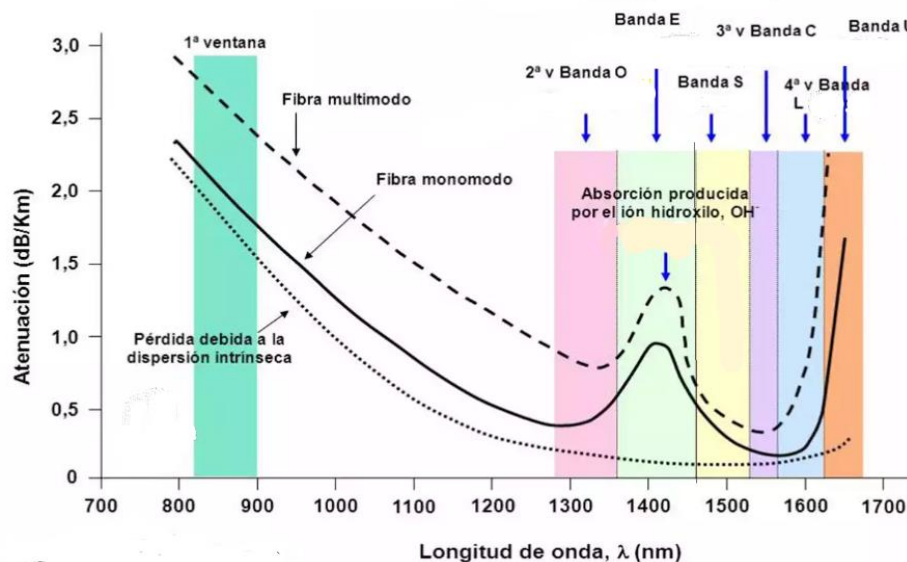


Figura 1.23. Atenuación en la fibra óptica [38].

La mayor causa de atenuación es la dispersión (dispersión de Rayleigh). Esta se produce cuando la luz choca con átomos en el vidrio, la luz que se dispersa en ángulos que están fuera de la apertura numérica de la fibra óptica, suele ser absorbida por su revestimiento. La dispersión está en función de la longitud de onda y afecta a las longitudes de onda corta, debido a esto, para transmisiones a larga distancia, es aconsejable utilizar las longitudes de onda más largas, con el fin de obtener una atenuación mínima y una distancia máxima entre repetidores. Además, existen otros factores que producen atenuación en la

fibra óptica, como el entorno y las técnicas empleadas en la fabricación. La atenuación se suele medir en unidades de decibelios por kilómetro (dB/km) [39].

- **Dispersión cromática:** La dispersión cromática hace referencia al ensanchamiento del pulso óptico cuando este se desplaza por la fibra, esto se produce porque la longitud de onda propagada presenta una dependencia con el índice de refractividad de la fibra, esta dependencia hace que se presente interferencia intersimbólica - ISI (Intersymbol Interference), ya que la duración temporal del pulso óptico transmitido se incrementa. De cierta manera la dispersión define la máxima distancia de transmisión que puede alcanzar un enlace sin la necesidad de recurrir a la regeneración o la compensación [40].

En la dispersión cromática se cuenta con dos componentes, la primera es la dispersión material, esta es la que más aporta dispersión y en esta se puede apreciar como las múltiples componentes de frecuencia óptica viajan a distintas velocidades por el material con el que se fabrica las fibras ópticas, el sílice, esto se origina debido a que el índice de refracción de dicho material depende de la frecuencia óptica. La segunda es la dispersión de guía de onda, en esta la potencia de un modo se propaga en parte a través del núcleo y del revestimiento. El índice efectivo de un modo está entre los índices de refracción del núcleo y el del revestimiento, aproximándose más a uno de ellos en base al porcentaje de potencia que se propaga por ellos y como la distribución de potencia de un modo está relacionado con la longitud de onda, si esta última cambia también lo hará la distribución de potencia y esto producirá una variación en el índice efectivo del modo [41].

La dispersión cromática D está dada por la ecuación 1.1, en esta ecuación se especifica la manera en que la variación del retardo de dispersión grupal respecto a la longitud de onda provoca una incremento en el pulso [42].

$$D = \frac{\partial \beta_1}{\partial \lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad 1.1$$

la ecuación 1.2 describe el grado en el que cambia la dispersión con respecto a la longitud de onda de la luz, esto recibe el nombre de pendiente de la dispersión [42].

$$S = \frac{\partial D}{\partial \lambda} = \frac{4\pi c}{\lambda^3} (\beta_2 + \frac{\pi c}{\lambda} \beta_3) \quad 1.2$$

El impacto que genera la dispersión del material en una señal modulada puede llegarse a especificar por medio de la constante de modo de propagación β . La siguiente ecuación describe los efectos mencionados [37].

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad 1.3$$

En donde, ω_0 es la frecuencia central, c representa la velocidad de la luz en el vacío y $n(\omega)$ es el índice de refracción pendiente que depende de la frecuencia.

- **Dispersión por modo de polarización (PMD):** La dispersión por modo de polarización, es un efecto a tener en cuenta ya que puede limitar el desempeño de la fibra óptica, esta dispersión se origina porque no se presenta simetría en el núcleo de la fibra o por las Impurezas que se presentan en esta debido a los procesos de fabricación además de las tensiones producidas en la instalación, debido a eso, los pulsos de luz presentan distintos modos de polarización cuando se propagan por la fibra, esto se va a reflejar en un ensanchamiento del pulso ya que se crea un retardo en las componentes de los pulsos transmitidos [41].

La fibra óptica suele presentar múltiples birrefringencias en su núcleo, estas se deben a la pérdida de simetría en el índice de refracción. La fibra al ser un material en el cual se pueden presentar birrefringencias, hace que la luz que se propaga por ella cree dos modos de polarización ortogonales entre ellos, esto equivale a que en la señal que se transmite se presente una dispersión temporal, esto se puede apreciar en la figura 1.24, en donde dicha dispersión genera diferentes retardos que son conocidos como el Retardo de Grupo Diferencial - DGD (Differential Group Delay), el cual se mide en picosegundos (ps) [37] [43].

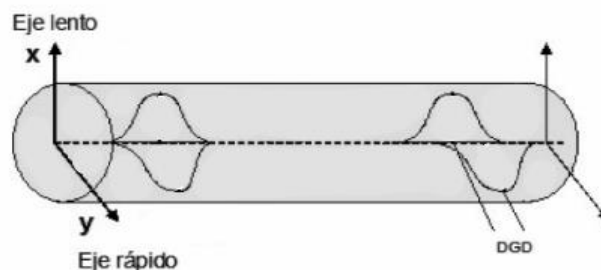


Figura 1.24. Efecto de la PMD en la fibra óptica [43].

Es importante mencionar que la PMD puede llegar a convertirse en un problema para el rendimiento de los sistemas de transmisión que manejan velocidades que están por encima de los 10 Gbps, aunque en ocasiones esto puede mitigarse al no superar una determinada longitud de fibra, asegurando la compensación de la PMD [7].

1.5.2 Efectos no lineales

Los sistemas de comunicaciones ópticos que operan con niveles de potencia y velocidades de transmisión no elevadas, se suelen comportar linealmente, aunque sucede lo contrario cuando se utilizan niveles de potencias considerables o altas velocidades de transmisión, como por ejemplo más de 10 Gbps, ya que se presentan con intensidad los fenómenos no lineales, los cuales tienen un impacto negativo en este tipo de sistemas debido a que limitan los valores de potencia y velocidad de transmisión, además de condicionar la cantidad de canales en el sistema y su separación [7] [41].

Los efectos no lineales en la fibra óptica se producen generalmente debido a dos factores, el primero de ellos se relaciona con la variación en el índice de refracción del medio con la intensidad óptica, de esto se desprende el efecto Kerr, ya que la dependencia de la salida del índice de refracción es el causante de dicho efecto. En base al tipo de señal de entrada, el efecto Kerr se presenta en tres efectos: la Mezcla de Cuatro Ondas - FWM (Four Wave Mixing), la Automodulación de Fase - SPM (Self-phase Modulation) y la Modulación de Fase Cruzada - XPM (Cross-phase Modulation) [44].

El segundo factor está relacionado con el fenómeno de la dispersión elástica, dicha dispersión surge cuando hay niveles elevados de potencia y puede producir efectos estimulados como el esparcimiento estimulado de Brillouin - SBS (Stimulated Brillouin Scattering) y el esparcimiento estimulado de Raman - SRS (Stimulated Raman Scattering). Si la potencia incidente supera un determinado umbral, la dispersión de la intensidad de la luz va a aumentar exponencialmente. Entre la SBS y SRS se presenta una diferencia, ya que la primera de estas genera fonones coherentes (acústicos) e introduce ondas acústicas macroscópicas en la fibra óptica, por otro lado la SRS no crea ondas macroscópicas debido a que produce fonones que son incoherentes [2].

- **FWM:** Este efecto se manifiesta cuando se cumple la condición de phase-matching, se suele conocer como coincidencia de fase, esta condición se satisface cuando dos o incluso más frecuencias distintas se propagan por la misma fibra óptica [37], Dichas frecuencias interactúan entre sí y generan

nuevas frecuencias que pueden llegar a comportarse como componentes de interferencia, Esto es atribuido a la dependencia que existe entre el índice de refracción de la fibra óptica con la potencia de la señal, esto es propicio para la mezcla de la señal, ya que sería posible la aparición de un medio no lineal de propagación [40].

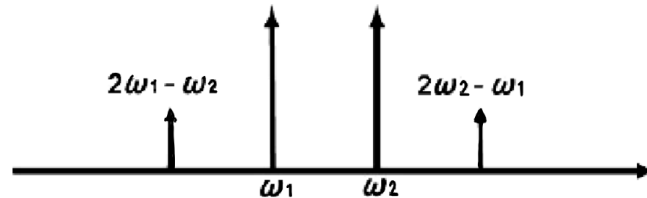


Figura 1.25. Efecto de FWM sobre dos señales [45].

En la figura 1.25 se presenta el efecto que tiene FWM sobre las frecuencias ω_1 y ω_2 , ya que cuando estas dos frecuencias se mezclan, se generan nuevas frecuencias que se encuentran en $(2\omega_1 - \omega_2)$ y $(2\omega_2 - \omega_1)$. Estas nuevas frecuencias pueden llegar a interferir a las frecuencias originales, generando una reducción de la intensidad de la señal [44]. Se tiene que para N frecuencias que se propagan en la fibra óptica, la cantidad de frecuencias generadas por FWM (M) es:

$$M = \frac{N^2}{2} (N - 1) \quad 1.4$$

Es importante mencionar que los niveles de potencia intensifican los efectos de la FWM, otro parámetro a tener en cuenta además de otros como la dispersión es el espaciamiento entre canales, el cual debe aumentarse para reducir la degradación que produce la FWM [45].

- **SPM:** La Automodulación de Fase es un efecto que hace referencia al cambio de fase autoinducido por el campo eléctrico cuando este se propaga por la fibra óptica. La parte de mayor intensidad del pulso óptico encuentra un índice de refracción de fibra más alto a medida que se propaga a lo largo de la fibra a diferencia de otras partes de menor intensidad. Este cambio de índice da lugar a un cambio de fase que varía temporalmente y que se va a presentar en las diferentes partes del pulso debido a la dependencia de las fluctuaciones de fase con respecto a la intensidad, esto da a lugar al chirp, este fenómeno hace referencia a la variación de la longitud de onda de la luz emitida por el láser en la modulación, lo que genera un ensanchamiento del pulso, como se puede apreciar en la figura 1.26 [40] [44].

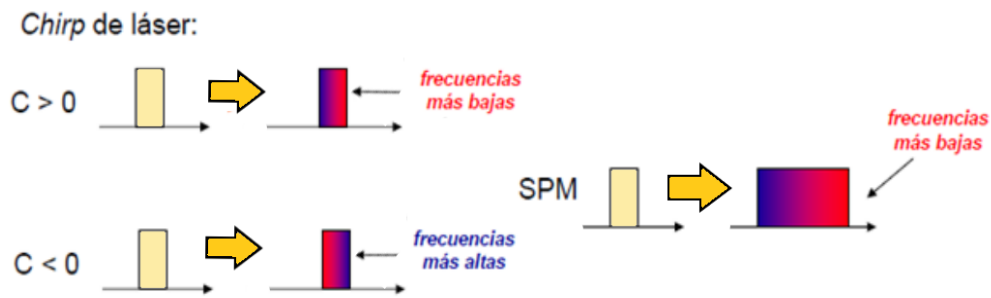


Figura 1.26. Efecto de la SPM sobre un pulso [36].

En un régimen de dispersión normal, el Retardo de Grupo Diferencial - DGD (Differential Group Delay) de la fibra para longitudes de onda mayores es menor y para longitudes de onda menores es mayor, debido a esto el flanco ascendente tiende a ser más rápido y el flanco descendente más lento. A diferencia de cuando se está bajo un régimen de dispersión anormal, ya que pasa totalmente lo contrario, debido a que la DGD de la fibra será mayor para longitudes de onda mayores y para longitudes de onda menores será menor [36].

Es importante mencionar que en sistemas que emplean una alta potencia de transmisión, el efecto de SPM es más fuerte; el ensanchamiento de los pulsos producidos por SPM, está dado por la ecuación 1.5.

$$\Delta\omega = \gamma L_{ef} \frac{dP(t)}{dt} \quad 1.5$$

Donde $P(t)$ representa la potencia del pulso y L_{ef} a la longitud efectiva, por último, se tiene a γ que es el parámetro de no linealidad, este une el área efectiva con el índice de refracción no lineal a través de un solo coeficiente, y está dado por la ecuación 1.6.

$$\gamma = \frac{2\pi\eta_2}{\lambda L_{ef}} \quad 1.6$$

El índice de refracción no lineal η_2 varía entre valores que van desde $2.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ hasta $3.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, sin embargo, el valor que se suele asumir en este parámetro es el de $3.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ [42].

SPM cambia el efecto de la dispersión cromática, por lo que es importante tenerlo en cuenta para sistemas con velocidades de transmisión elevadas de bits como por ejemplo las que se hacen desde 10 Gbps o en sistemas que manejan velocidades inferiores pero emplean elevadas potencias de transmisión, ya que

en estos sistemas la dispersión cromática genera limitaciones considerables [40].

- **XPM:** La Modulación de Fase Cruzada es un fenómeno originado por la intensidad del índice de refracción. Este fenómeno se produce debido a que el índice de refracción no lineal del pulso óptico depende tanto de la intensidad de este haz, como de la de los otros pulsos co-propagados por la fibra óptica. De cierta manera en la modulación de fase cruzada, las fluctuaciones de potencia de un canal en específico producen modulaciones de fase en otros canales que se propagan en el mismo medio. Las consecuencias de XPM se ven reflejadas en una posible distorsión de la forma del pulso, además de generar un ensanchamiento asimétrico del espectro [2] [44].

$$\Delta\omega = \gamma L \frac{dP_1(t)}{dt} + 2\gamma L \frac{dP_2(t)}{dt} \quad 1.7$$

Dejando a un lado la dispersión cromática, la ecuación 1.7, representa el ensanchamiento al que se ve sometido un canal, cuando se copropaga con un segundo canal, las potencias de dichos canales son $P_1(t)$ y $P_2(t)$ respectivamente, el coeficiente de no linealidad está dado por γ de la ecuación 1.7 y la longitud que posee el enlace está determinada por L . La presencia de estos parámetros en la anterior ecuación confirma la dependencia que existe entre estos y el efecto no lineal XPM [40].

El cambio de fase provocado por el efecto XPM para n canales, se encuentra generalizado en la ecuación 1.8, en donde i es el i -ésimo canal al cual se le determina el cambio de fase. En la ecuación el primer término corresponde al efecto no lineal SPM y el segundo término al efecto XPM, se puede apreciar que a una misma intensidad el segundo término es dos veces más eficaz que SPM [46].

$$\varphi_n^i = \gamma L (P_i + 2 \sum_{n \neq i}^n P_n) \quad 1.8$$

XPM puede llegar a representar una fuente importante de degradación en el rendimiento de los sistemas ópticos, tal como lo hace el efecto SPM, específicamente con el chirp, aunque es posible que un impacto negativo en el rendimiento del sistema sea más notable debido a XPM que por SPM. Además cuando estos sistemas cuentan con muchos canales o con un espaciamiento estrecho entre ellos, XPM tiene un impacto perjudicial en el sistema [46].

1.6 FORMATOS DE MODULACIÓN

Uno de los aspectos de suma importancia en el ámbito de las comunicaciones ópticas está ligado a los formatos de modulación, estos no son distintos a los utilizados en otros sistemas de transmisión digital, ya que dichas modulaciones son digitales y con el fin de transmitir información, estas se basan y emplean la amplitud, la polarización, la frecuencia o la fase de una portadora.

En sí la modulación consiste en modificar ciertos parámetros que caracterizan una onda en función de la señal que transporta los datos a transmitir. La portadora es la onda que modifica sus parámetros, mientras que la onda moduladora es la que transporta la información y varía ciertos parámetros de la portadora. Además, en la onda portadora se pueden modificar cuatro parámetros diferentes: amplitud, frecuencia, fase y estado de polarización. En donde según el parámetro seleccionado son posibles cuatro tipos de modulación: modulación por Desplazamiento de amplitud - ASK (Amplitude Shift Keying), modulación por Desplazamiento de frecuencia - FSK (Frequency Shift Keying), modulación por Desplazamiento de Fase - PSK (Phase Shift Keying,) y modulación del estado de polarización - PolSK (Polarization Shift Keying) [47].

Los formatos de modulación en amplitud han sido durante años los más populares, debido a las facilidades que brinda en cuanto su implementación, entre estos se tiene el formato de modulación de Encendido Apagado - OOK (On-Off Keying) que se suele usar por su rendimiento en velocidades que no sobrepasan los 10 Gbps, sin embargo debido a las necesidades que se presentan en la actualidad con respecto a velocidades más altas en los enlaces de comunicación se buscan formatos de modulación más eficientes y más robustos frente a las degradaciones no lineales [48], es por eso que las modulaciones de fase diferencial han llamado la atención debido a los beneficios que presentan, entre ellas destacan la Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase (DPSK, Differential Phase Shift Keying) y la Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase en Cuadratura - DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) [49].

A continuación, se describen los patrones de código de línea y las principales características de las modulaciones que son de interés para los propósitos de este trabajo de grado.

Patrones de código de línea

- **NRZ:** Los códigos NRZ tienen en común la característica de mantener un nivel de tensión constante a lo largo de la duración de un bit, lo que implica que no se produzcan transiciones. Es decir que, en este código, el impulso para representar un bit 1 abarca todo el intervalo de bits, mientras que para un bit 0 no se emplea ningún impulso. En caso de que haya dos bits 1 consecutivos, el

impulso ocupará dos intervalos de bits consecutivos [50]. Este se representa gráficamente en la Figura 1.27.

- **RZ:** En el código RZ, se tiene que para representar al bit 1, se destina únicamente una porción del intervalo de bits, mientras que no se emplea ningún pulso para representar el bit 0, tal como se observa en la figura X.X. Un pulso RZ ocupa solamente una fracción de la ranura de bits, lo que resulta en un ciclo de trabajo menor que 1 y un espectro amplio. Esto destaca las características de RZ, ya que su amplio espectro se traduce en una menor tolerancia a la dispersión y una eficiencia espectral disminuida. Además, la forma del pulso RZ permite una mayor resistencia a los efectos no lineales y a la PMD [51].

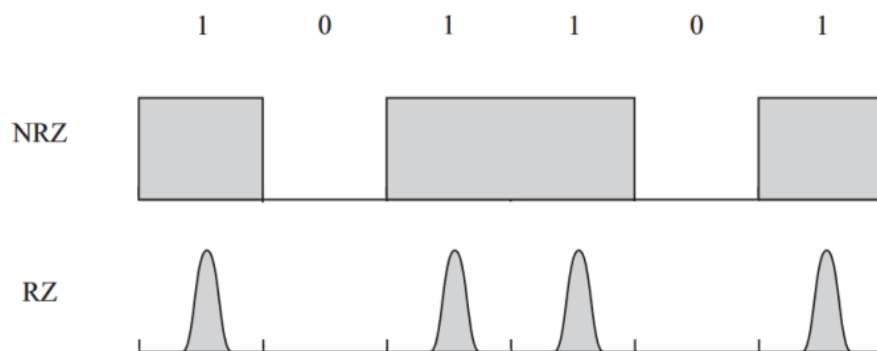


Figura 1.27. Códigos de línea NRZ y RZ [51].

- **CSRZ:** La codificación CSRZ es un caso particular de RZ en la que se suprime la portadora. Entre las características de esta codificación se tiene la reducción de efectos no lineales y la mejora de la eficiencia espectral en sistemas de alta velocidad. La diferencia entre RZ y CSRZ radica en que este último tiene un desplazamiento de fase entre bits adyacentes. Este cambio de fase en el dominio óptico implica la disminución de la componente continua de la señal eléctrica [51].

Modulaciones

- **OOK:** Este es el formato de modulación más básico y popular empleado en las comunicaciones ópticas. En esta modulación se emite un pulso de luz cuando la información recibida por el transmisor es un bit 1, mientras que no se transmite nada cuando la información es un bit 0. El esquema de modulación OOK ofrece la posibilidad de emplear una variedad de codificaciones, en donde las más utilizadas en este contexto son la NRZ y la RZ [47].

El formato de modulación de Encendido Apagado Sin Retorno a Cero - NRZ-OOK (Non-Return-to-Zero On-Off Keying), se caracteriza por ser uno de los más usados y sencillos de generar, debido a que no se necesita contar con un gran ancho de banda eléctrico en sus transmisores y receptores, además posee una insensibilidad al ruido de fase del Láser - FWHM (Full Width at Half Maximum) [37]. En este formato de modulación, la información está representada por la presencia o ausencia de la señal óptica para un tiempo determinado, es decir la presencia de una portadora representara a un binario y una ausencia de la portadora a un bit 0 [1].

Una representación del diagrama de bloques del transmisor NRZ-OOK, se muestra en la figura 1.28(a), en este transmisor se usa un modulador de intensidad externo que puede llegar a ser de Electro-Absorción - EAM (Electro Absorption Modulator) o del tipo Mach-Zehnder - MZM (Mach Zehnder Modulator), estos moduladores externos son los encargados de convertir la señal eléctrica OOK con una tasa de datos R_b en una señal óptica OOK con la misma tasa de datos. En recepción y con el fin de detectar la señal óptica NRZ, se suele convertir los pulsos ópticos de la señal en corriente eléctrica por medio de un fotodiodo [52].

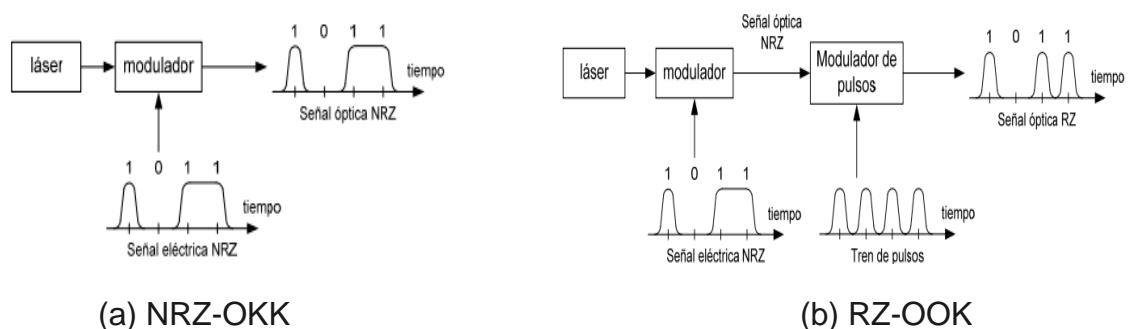


Figura 1.28. Diagrama de bloques de un Transmisor NRZ-OOK y RZ-OOK [47].

En la actualidad y a medida que los requerimientos de velocidad y distancia en los sistemas de comunicaciones ópticas han aumentado, el formato NRZ-OOK ha sido desplazado con respecto a otros formatos de modulación que presentan mejores prestaciones en enlaces de alta capacidad, sin embargo esto no es impedimento para que se use como referencia en la comparación con otros formatos de modulación de este trabajo de grado [47].

Por otro lado el formato de modulación Encendido Apagado Con Retorno a Cero - RZ-OOK (Return to Zero On Off Keying), puede llegar a hacer referencia a que la anchura que posee la señal óptica sea inferior a su periodo de bits, además en comparación con una señal NRZ-OOK, la señal RZ-OOK suele

tener mejor desempeño frente a los efectos no lineales, esto se debe a su patrón regular de datos de la señal óptica y es que gracias a las características que presenta este tipo de señal óptica RZ, se tiene que un bit digital "1" aislado y los "1" digitales continuos necesiten de la misma cantidad de compensación de dispersión óptica en el sistema para una mejor apertura de ojos, de esa manera se muestra una mejor tolerancia a la no linealidad que el NRZ [52].

La figura 1.28(b), presenta el diagrama de bloques de un transmisor RZ-OOK, el funcionamiento de este transmisor es similar al presentado en el de NRZ-OOK. En un principio se genera una señal óptica NRZ-OOK por medio de un modulador de intensidad externo, para después modularla con ayuda de un tren de pulsos que está sincronizado con una frecuencia de datos que es exacta al de la señal eléctrica, usando el otro modulador de intensidad, Además, otro dato a tener en cuenta es que la señal RZ-OOK posee un espectro óptico más ancho en comparación con una señal NRZ-OOK, debido a que tiene una menor anchura en sus pulsos, lo que da como resultado que tenga una eficiencia espectral más baja [52].

- **DPSK:** La Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase (DPSK, Differential Phase Shift Keying), surge como una de las soluciones más populares a las limitaciones que presenta la modulación PSK, por ejemplo, la necesidad de usar un dispositivo sensible a los cambios en la fase o más conocido como detector coherente, el cual toma como referencia a una portadora para compararla con la señal que se recibe, esto se traduce en costos más elevados además de agregar complejidad al sistema. La modulación DPSK al igual que las modulaciones ya presentadas, puede ser implementada con los formatos NRZ y RZ, aunque en DPSK se tiene una serie de ventajas que permiten obtener una mejora en la sensibilidad del receptor de 3 dB, además de brindar mayor tolerancia contra las deficiencias que se presentan en el sistema [49].

En la modulación DPSK la información se codifica mediante el cambio de fase binario entre bits adyacentes, por ejemplo, cuando se transmite un 1 lógico, este se representa como un cambio de fase de π radianes entre los bits de datos consecutivos en la portadora óptica, a diferencia de cuando se transmite un 0 lógico ya que no se presenta cambio de fase, de esta manera cada bit transmitido funciona como referencia para el siguiente bit [53].

En la implementación de transmisores DPSK se puede usar dos tipos de moduladores externos, modulador de fase - PM (Phase Modulator) o un modulador Mach-Zehnder - MZM (Mach-Zehnder modulator), el primero modula la fase de la portadora dejando constante su intensidad, mientras que el segundo modula a lo largo del eje real y siempre genera saltos de π radianes

en fase a costa de la intensidad óptica. El MZM es el más implementado debido a que en la modulación DPSK es más conveniente la modulación exacta de fase que la intensidad óptica constante [53].

El diagrama de bloques de un transmisor NRZ-DPSK se muestra en la figura 1.29, en primer lugar, la señal eléctrica NRZ debe ser precodificada por un codificador DPSK para después ingresar por el modulador de fase externo. En dicho codificador se convierten los datos NRZ mediante una puerta NOR, posteriormente son combinados con su versión retrasada de un bit mediante una puerta XOR. Finalmente la señal codificada por DPSK se emplea para activar el modulador de fase, generando de esta forma una señal óptica NRZ-DPSK [52].

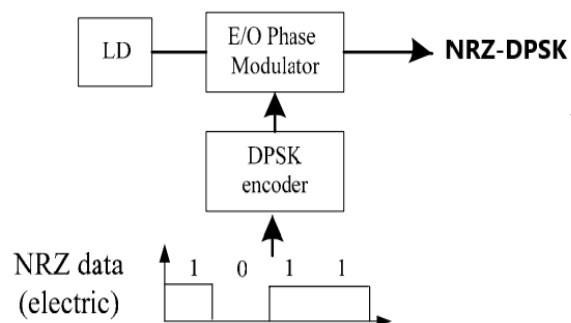


Figura 1.29. Diagrama de bloques del transmisor NRZ-DPSK [52].

La modulación RZ-DPSK surge como una solución para alcanzar mayores distancias de transmisión y mejorar el desempeño del sistema frente a las distorsiones no lineales. A diferencia de cuando se genera una señal NRZ-DPSK, se requiere contar con un modulador de intensidad adicional para generar una señal NRZ-DPSK. En la figura 1.30 se presenta el diagrama de bloques del transmisor RZ-DPSK, en donde lo primero que se tiene es al modulador de fase electro-óptico que está encargado de producir una señal óptica NRZ-DPSK, que luego va a hacer modulada mediante una señal de reloj que tiene la misma velocidad de datos que la que posee la señal eléctrica por medio del modulador de intensidad electro-óptico [53].

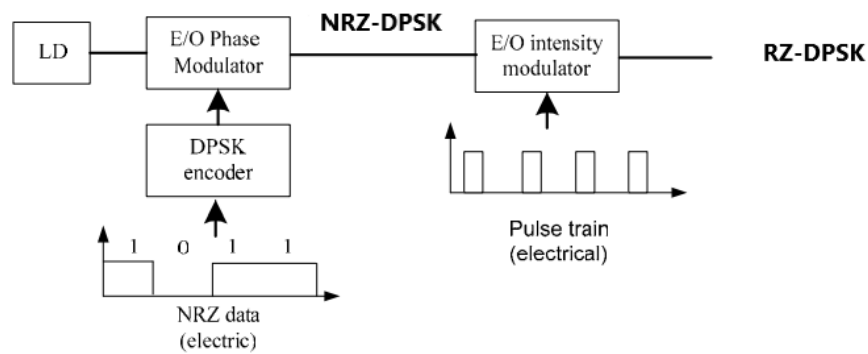


Figura 1.30. Diagrama de bloques del transmisor RZ-DPSK [52].

Un aspecto importante en el proceso de recepción es la incorporación de un interferómetro de retraso - DI (Delay Interferometer), debido a que la señal DPSK no puede ser recibida directamente y se necesita por lo tanto de un elemento que convierte la modulación de fase diferencial en una modulación de intensidad. La estructura del receptor DPSK se muestra en la figura 1.31, el Interferómetro Mach-Zehnder - MZI (Mach-Zehnder Interferometer) tiene un retraso diferencial de un periodo de bit y es el encargado de correlacionar cada bit con sus vecinos, este cuenta con dos salidas denominadas puerto constructivo y puerto destructivo. Si dos bits se encuentran en fase en el puerto constructivo, se suman y producen un nivel de señal alto, aunque si se presenta una diferencia de fase π entre los bits, estos se cancelan y generan un nivel de señal bajo. Para el puerto destructivo sucede lo opuesto [53].

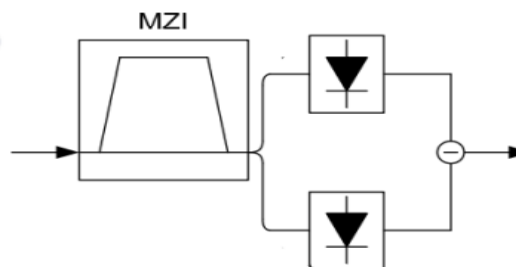


Figura 1.31. Diagrama de bloques del receptor DPSK típico [47].

- **DQPSK:** La Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase en Cuadratura - DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) es conocida por ser un formato de modulación multinivel que transporta más de un bit por símbolo, es decir, requiere de dos bits para representar a cada símbolo que se transmite, además emplea a dos fases ortogonales de una misma portadora, aumentando considerablemente de esta manera la eficiencia espectral en

relación con otros formatos de modulación. Al igual que DPSK esta modulación puede implementarse con codificaciones como la NRZ o RZ, sin provocar impactos en la amplitud [1][54].

La técnica usada en DQPSK es similar a la de DPSK, aunque la fase no se divide por 2 sino por 4, haciendo posible la codificación de 2 bits por símbolo. Los símbolos empleados en la modulación DQPSK están diferenciados por saltos de fase de $\frac{\pi}{2}$, estos son iguales a $0, \frac{\pi}{2}, \pi$ y $\frac{3\pi}{2}$. Para codificar la información de los símbolos se usa al cambio de fase que se presenta al pasar de un período de símbolo al siguiente, en vez de usar una fase absoluta. Para representar a dicha señal que se transmite se puede recurrir a las ecuaciones 1.9 y 1.10 [55].

$$x(t) = A \cos(2f\pi ct + \varnothing(k)) \quad KT \leq t \leq (K + 1)T \quad 1.9$$

Donde:

$$\varnothing(k) - \varnothing(k - 1) = \begin{cases} 0 & \text{si } [I(k), Q(k)] = (1,1) \\ \pi/2 & \text{si } [I(k), Q(k)] = (0,1) \\ \pi & \text{si } [I(k), Q(k)] = (0,0) \\ 3\pi/2 & \text{si } [I(k), Q(k)] = (1,0) \end{cases} \quad 1.10$$

El diagrama de constelaciones de la modulación DQPSK se presenta en la figura 1.32, en este se puede observar que se reduce a la mitad la distancia que hay entre los puntos de las constelaciones en comparación con DPSK, además se duplica el número de símbolos. El hecho de que se reduzca la distancia a la mitad implica que se requiera de al menos 3 dB más de OSNR con el fin de mantener la misma BER [37].

DQPSK: 2 símbolos/bit

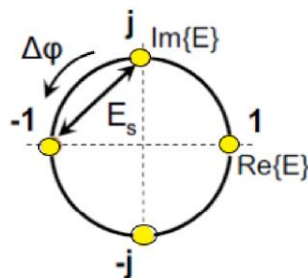


Figura 1.32. Diagrama de constelación de la modulación DQPSK [56].

Transmisor DQPSK: La estructura del transmisor DQPSK se puede observar en la figura 1.33, para implementar dicho transmisor se puede escoger entre varias configuraciones, como por ejemplo a la configuración en serie, simple y paralelo. El arreglo denominado como modulador paralelo DQPSK, suele ser la configuración más utilizada [55].

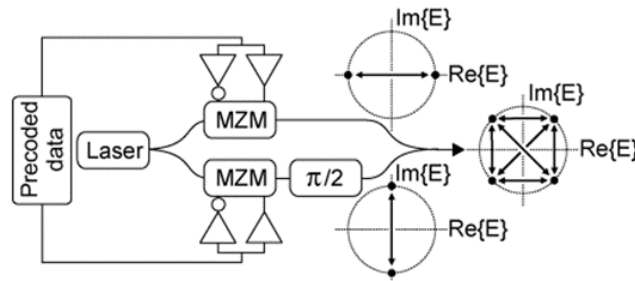


Figura 1.33. Estructura del transmisor DQPSK [49].

En la transmisión de DQPSK es conveniente usar a dos MZM para que actúen como moduladores fase, como se puede apreciar en la anterior figura, la configuración del transmisor consta de una fuente de láser de emisión continua, seguido de este se encuentra un divisor de potencia que divide la luz en dos trayectorias con intensidad similar en dirección a los MZM, en uno de los MZM se cuenta con un conmutador óptico de fase $\pi/2$ y al final se tiene un combinator encargado de generar una señal de salida. Al usar esta configuración se explota el desplazamiento de fase π preciso generado por los MZM, sin que importe el rebasamiento de la señal de accionamiento, además tan solo se requiere de señales electrónicas binarias de accionamiento, las cuales son más fáciles de generar que las formas de onda multinivel a altas velocidades. Por último, si se desea generar RZ-DQPSK, solo es necesario agregar un cargador de pulsos a la configuración [49].

Receptor DQPSK: La estructura de un receptor DQPSK se puede observar en la figura 1.34, este puede estar constituido por un par de demoduladores DPSK, que llevan la señal hacia dos interferómetros de retardo Mach Zehnder - MZDI (Mach Zehnder Delay Interferometer), estos convierten la modulación del dominio de fase al de amplitud y en el receptor DQPSK tienen el objetivo de fijar una diferencia de fase en 45° y -45° , esto con el fin de detectar las componentes en fase (I) y en cuadratura (Q) de la señal DQPSK, respectivamente. Además los MZDI poseen dos tipos de salida, una de componente constructiva y otra de componente destructiva, debido a esto se requieren de 4 fotodiodos para la detección balanceada de DQPSK [57].

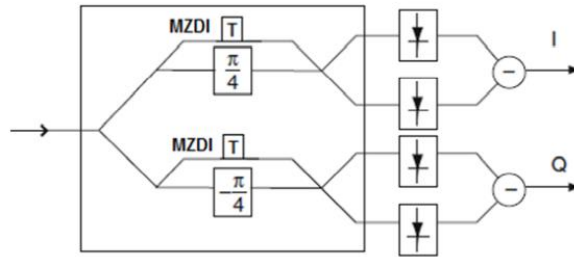


Figura 1.34. Estructura del Demodulador y receptor balanceado para DQPSK [57].

1.7 MONITOREO DE DESEMPEÑO ÓPTICO - OPM

El monitoreo de desempeño óptico - OPM (optical performance monitoring) es una herramienta altamente utilizada en los sistemas de transmisión por fibra óptica, la cual se encarga de supervisar la calidad de la señal a nivel físico y su funcionamiento de extremo a extremo. Las capacidades de OPM son esenciales para garantizar operaciones de redes sólidas y para desempeñar un papel clave que permitan la flexibilidad y el mejoramiento de la eficiencia general de la red.

1.7.1 Modelo de referencia OPM

OPM propone un modelo de referencia que consta de tres capas relacionadas con la gestión del canal, la calidad del canal y el desempeño del protocolo, cada una de las cuales contiene una Base de Datos de Gestión (MIB, Management Information Base) en la que se almacena la información de parámetros relevantes según sus respectivas funciones.

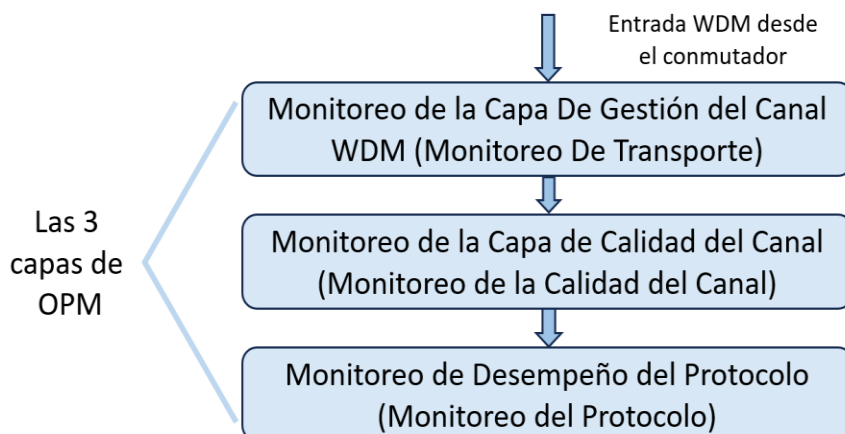


Figura 1.35. Capas del Modelo de Referencia OPM [58].

Monitoreo de transporte: OPM utiliza el plano de transporte como la principal fuente de información para comprender completamente el estado y el rendimiento de las conexiones, es decir el estado de los componentes y dispositivos entre transmisor y receptor. Además de alteraciones en la fibra que pueden causar daño y pérdida de funciones como cortes o rupturas que puedan provocar fallas en el enlace [59].



Figura 1.36 Parámetros de Monitoreo de la capa de Gestión de Canal [59].

Monitoreo de la calidad de la señal: Trabaja en una sola longitud de onda y mide la transmisión de la señal directamente. La siguiente figura muestra los parámetros asociados a esta capa [59].

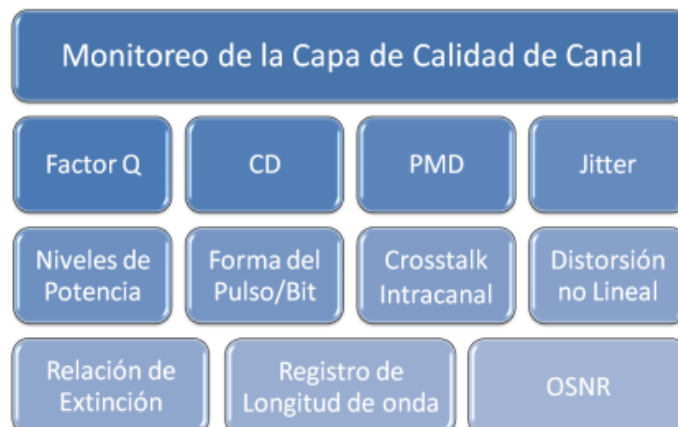


Figura 1.37. Parámetros de Monitoreo de la Capa de Calidad de Canal [59].

Monitoreo del protocolo: Esta capa es la encargada de monitorear el comportamiento del protocolo utilizado en la transmisión, siendo la BER el único parámetro relacionado con el mismo [59].



Figura 1.38. Parámetro de Monitoreo de Desempeño del Protocolo [59].

1.7.2 Parámetros de monitoreo óptico

Cuando se menciona a los parámetros de monitoreo óptico se hace alusión a las variables que se toman como referencia para llevar a cabo ciertas mediciones del impacto de las degradaciones en los sistemas de transmisión óptica, actualmente y gracias a la tecnología se pueden llegar medir los siguientes parámetros: Factor de Calidad, Relación Señal a Ruido Óptico - OSNR (Optical signal to noise ratio), tasa de errores de Bit - BER (bit error rate), Diagrama del Ojo, entre otros. Estos parámetros permiten obtener información sobre el desempeño de la red y la calidad de la señal óptica, estos se encuentran detallados en la recomendación ITU-T G.697 [60].

- **Factor de calidad (Factor Q)**

El factor Q o factor de calidad se define como la relación señal/ruido eléctrico (ESNR - *Electrical Signal to Noise Ratio*) en la entrada de un circuito de decisión del receptor. Esta relación exhibe los efectos producidos por los defectos ópticos y eléctricos para un punto examinado en la red óptica, es por eso que esta se toma como una medida completa de la calidad de la señal de un canal óptico, ya que toma en cuenta, por ejemplo, a los efectos del ruido o los efectos lineales y no lineales [61].

Este factor está definido por la ecuación 1.11 y la ecuación 1.12.

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad 1.11$$

$$Q(dB) = 20 \log_{10} Q(lineal) \quad 1.12$$

En donde μ_1 y μ_0 equivalen a los niveles lógicos y las desviaciones típicas de la distribución de ruido Gaussiano en torno a los niveles 1 y 0 están representadas por σ_1 y σ_0 . En la figura 1.39 se puede apreciar la relación que se presenta entre la tasa de errores en los bits y la función de densidad de probabilidad [61].

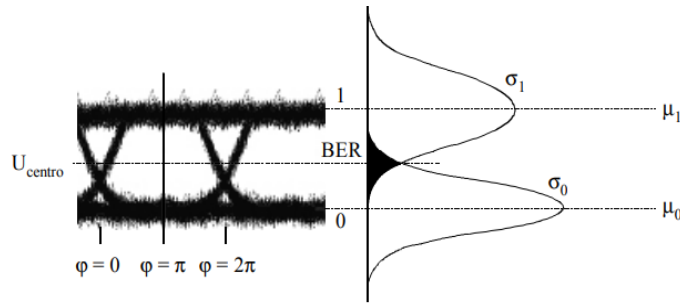


Figura 1.39. Factor Q [61].

Cuando en un canal óptico binario sólo se presenta el ruido gaussiano, la BER de dicho canal tendría que ser igual a la indicada por la medición del factor Q, aunque esto es poco probable que suceda y es por eso por lo que la correlación entre la BER medida después de la regeneración y el factor Q se ve afectada por las características del receptor. Es importante mencionar que se puede utilizar el factor Q para evaluar el rendimiento esperado del sistema, cuando no sea posible obtener una medida de la BER [60].

- **Tasa de errores de bit (BER)**

La tasa de errores de bits o BER (Bit Error Rate) es considerado como uno de los parámetros más importantes para determinar el desempeño en los sistemas de comunicaciones ópticas. La BER se encarga de representar el número esperado de bits erróneos con respecto a los bits transmitidos en un intervalo de tiempo. En base a lo que establece la ITU-T, se recomienda manejar un valor de BER de 10^{-12} en redes WDM [61] [62].

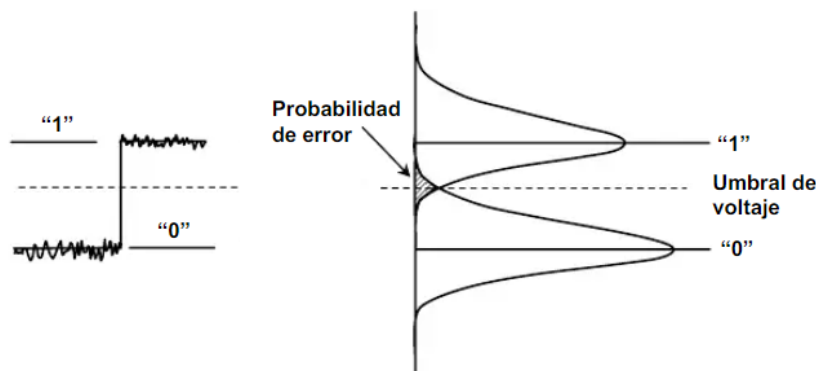


Figura 1.40. Distribución de probabilidad para las señales recibidas "0" y "1" lógicas [63].

En la figura 1.40, se puede apreciar la relación que se presenta entre la tasa de error de bit y el factor Q. Además si las distribuciones en el receptor de las señales correspondientes a los "1" lógicos y "0" lógicos, tienen una forma

Gaussiana, El factor Q puede llegar a emplearse como un valor aproximado de la BER, tal como se muestra en la ecuación 1.13 [63].

$$BER = \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad 1.13$$

- **Relación señal a ruido óptica (OSNR)**

La OSNR es un parámetro que hace referencia a que tanto una señal óptica es degradada por fenómenos como la dispersión o la atenuación, cuando la señal es transmitida por un sistema. La OSNR está definida como la relación de la potencia de la señal con respecto a la potencia de ruido en un canal óptico [64]. La ecuación 1.14 se emplea para calcular la OSNR (en dB)

$$OSNR = 10\log \frac{P_i}{N_i} + 10\log \frac{B_m}{B_r} \quad 1.14$$

En donde P_i representa a la potencia óptica de la señal, B_m es el ancho de banda óptico, N_i es el valor promedio de la potencia de ruido medida en B_m , Por último, se tiene a B_r que corresponde el ancho de banda óptico de referencia, normalmente ese ancho de banda óptico es de 0,1 nm [62].

- **Diagrama del ojo**

El diagrama del ojo es utilizado para obtener información de los pulsos propagados en el canal de transmisión, además se puede llegar a deducir a través del diagrama algunos datos que permiten determinar la calidad de la señal como la BER, el factor Q, niveles de potencia, entre otros. El diagrama del ojo presenta para un periodo de tiempo o una determinada cantidad de bits, las diversas superposiciones de unos y ceros. En base a los que se muestra en la figura 1.41 se determinan dos tipos de cruces, el primero de ellos corresponde al cruce de tiempo, en este se genera la apertura y cierre del ojo, el último cruce corresponde al de amplitud y hace referencia al nivel de voltaje en la apertura y cierre del ojo definiéndose en el periodo de bit [65].

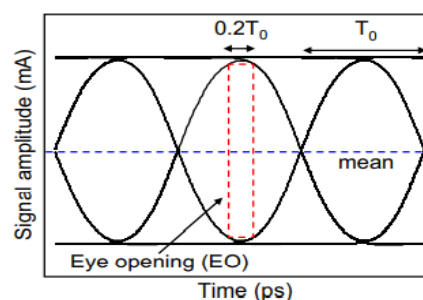


Figura 1.41 Parámetros del Diagrama del ojo [56].

Se observa que en el eje Y se representa al nivel de amplitud de la señal y cuanto menor sea la apertura, el desempeño del sistema se verá más afectado por efectos como la atenuación, el margen de ruido y la interferencia entre símbolos - ISI (Intersymbol Interference), en el eje x o también conocido como el eje de tiempo, se presentan los efectos generados por el jitter y el sincronismo sobre cualquier señal [66].

- **Jitter**

El jitter es un efecto indeseable en cualquier sistema de comunicación y, como tal, causa una serie de problemas en el canal que, si no se manejan apropiadamente, pueden llegar incluso a degradar por completo la calidad y el desempeño del enlace. El jitter hace referencia a la desviación de fase respecto a la posición ideal en el tiempo para una señal digital que se propaga por el canal de transmisión y puede hacer que se produzcan errores de recepción de bits, que pueden llegar a confundir al receptor, haciendo que este no recupere el reloj de sincronismo en el extremo receptor, además debido a que el jitter genera un desplazamiento de las señales que componen el pulso, se puede llegar a presentar interferencia intersimbólica (**ISI**) entre los pulsos que se propagan a través del canal, haciendo imposible identificar en el receptor a los niveles correspondientes de la señal [65].

Nota de autor

En este capítulo se han abordado los aspectos generales de las redes ópticas, haciendo énfasis en las técnicas de multiplexación de longitud de onda (WDM) y sus características, además de las redes ópticas pasivas (PON) y su relación con las arquitecturas de red FTTx, que surgieron como una alternativa para atender las exigencias del mercado y a partir de la cuales se realiza el diseño y la planificación. Igualmente, se realizó un análisis de la velocidad de transmisión en una red PON, destacando la estandarización de la tecnología en la velocidad de transmisión de línea única (SLR) y su posterior evolución al concepto de velocidad de transmisión de línea mixta (MLR) junto con sus características propias, por último, se aborda el monitoreo del desempeño óptico (OPM), considerando las degradaciones, parámetros y técnicas utilizadas. Con respecto al primer objetivo específico propuesto para este trabajo de grado, se ha realizado una investigación basada en diversos libros y artículos, en la cual se han definido las características de una arquitectura de red MLR de tipo NG-PON2 y se han identificado los formatos de modulación adecuados para operar en una red considerando los efectos SPM y XPM.

CAPITULO 2

2 MARCO METODOLOGICO

En este capítulo, se llevará a cabo una descripción tanto de las herramientas de software como de la metodología de simulación que será seguida. Estos aspectos permitirán la generación y análisis por medio de la implementación de escenarios de simulación, del desempeño de los formatos de modulación avanzados frente a los efectos no lineales SPM y XPM, lo cual resulta fundamental para la realización del presente trabajo de grado.

2.1 HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

Es muy importante modelar o simular un sistema de comunicación óptica antes de llevarlo a cabo, debido a que esto permite la posibilidad de crear escenarios del mundo real que muestran el comportamiento de diferentes eventos que podrían influir en el desempeño de la red y degradar la calidad de las aplicaciones y los servicios. Además, las simulaciones permiten tener en cuenta numerosas variables importantes para evaluar el comportamiento de una red. En este sentido, la simulación ahorra tiempo y dinero, y se puede diseñar una red con modelos simples donde se evalúa su rendimiento en base a los parámetros de OPM.

Esta sección presenta algunas herramientas de simulación para redes ópticas, incluyendo herramientas de código abierto y aquellas que necesitan de una licencia. Las características principales de las herramientas de simulación encontradas se describen a continuación:

2.1.1 OptiSystem

La herramienta de Software OptiSystem creada por Optiwave Systems Inc., se caracteriza por ser innovadora y potente además posee propósitos en el ámbito de la educación, está basada en el análisis de resultados y presentación de ejemplos. Esta herramienta permite diseñar y simular varios tipos de enlace óptico en la capa de transmisión, en donde se pueden encontrar redes ópticas que van desde las redes de área local - LAN y las redes de área metropolitana - MAN, hasta redes de ultra larga distancia, asimismo una de las facilidades que ofrece esta herramienta es la de presentar los diferentes análisis y escenarios de forma visual [67].



Figura 2.1. Logo de OptiSystem [68].

Además de permitir el diseño y el análisis de varios tipos de enlace óptico en la capa física, OptiSystem se caracteriza por ser una herramienta con notables prestaciones en cuanto a su calidad de simulación y configuración de características básicas en sistemas de transmisión óptica. Entre sus múltiples beneficios los más sobresalientes son por ejemplo el de suministrar una biblioteca de archivos de muestra que se pueden utilizar para crear proyectos de diseño óptico, también se incluye componentes que introducen parámetros que pueden ser medidos desde dispositivos reales, proporcionando un barrido y una optimización automática de dichos parámetros además de evaluar sus sensibilidades, ayudando a las especificaciones de tolerancia de diseño. La herramienta brinda información global sobre el desempeño del sistema ayudando a mitigar el riesgo y los tiempos de implementación [69].

En su más reciente versión OptiSystem cuenta con una serie de propiedades que permiten planificar y probar diferentes sistemas de comunicaciones ópticas, por ejemplo, las redes ópticas pasivas - PON (Passive Optical Networks) basadas en fibra hasta el hogar FTTH, CWDM y DWDM, e incluso se puede emplear en óptica de espacio libre (FSO) y aplicaciones de Radio sobre fibra (ROF). Además, como los resultados que entrega Optisystem tienen una alta similitud con los resultados reales, es posible desarrollar pruebas utilizando diferentes configuraciones relacionadas con parámetros como la distancia, los dispositivos, entre otras, lo cual satisface las necesidades de investigadores, ingenieros de telecomunicaciones, integradores de sistemas y estudiantes de entender y evaluar el comportamiento de las tecnologías de transmisión óptica [69].

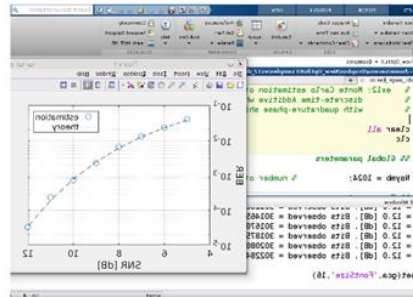
2.1.2 Optilux

OptiluX es un software libre compuesto por un conjunto de herramientas o módulos realizados en Matlab, en el cual se implementan los distintos componentes de un sistema de comunicación óptica, permitiendo el desarrollo de un sistema completo con un alto nivel de fiabilidad para su modelado y análisis. Entre estos módulos

destacamos el relacionado con el canal (fibra óptica), ya que está totalmente definido y representa uno de los puntos fuertes de OptiluX. Otra característica a destacar es la gran cantidad de parámetros y variables que se pueden cambiar en función del canal y la señal a transmitir. Aunque OptiluX centra la mayor parte de su potencial en la simulación de canales, también dispone de un módulo de transmisor y receptor, así como de un módulo adicional encargado de calcular los diagramas de ojos y las tasas de error de bits (BER). Además, OptiluX nos ofrece la posibilidad de transmitir varios canales simultáneamente y simular los efectos que afectarán a esos canales.



Logo OptiluX.



OptiluX en Matlab.

Figura 2.2. Herramienta de simulación OptiluX [70].

Como se mencionó anteriormente, Optilux tiene un alto nivel de fiabilidad y fidelidad, al momento de realizar la simulación de la propagación de la señal a través de la fibra en un sistema de comunicación óptico, Sin embargo, también presenta algunas desventajas, entre las que destacan no tener en cuenta los efectos del ruido en la simulación y la complejidad del código utilizado.

Este software de licencia libre permite describir y analizar muchos aspectos de los sistemas ópticos, incluidos los siguientes [70]:

- 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.

2.1.3 OptSim

OptSim es una herramienta de simulación y modelado desarrollada por Synopsys, para el diseño y la simulación de sistemas de comunicación óptica a nivel de

propagación de señales adaptada a redes WDM, DWDM, CATV, entre otras aplicaciones, y soportada por plataformas Windows y UNIX. La herramienta, además de componentes y técnicas de simulación de última generación brinda también una interfaz gráfica fácil de usar e instrumentos de medición similares a los de un laboratorio que proporcionan una alta precisión y resultados reales.

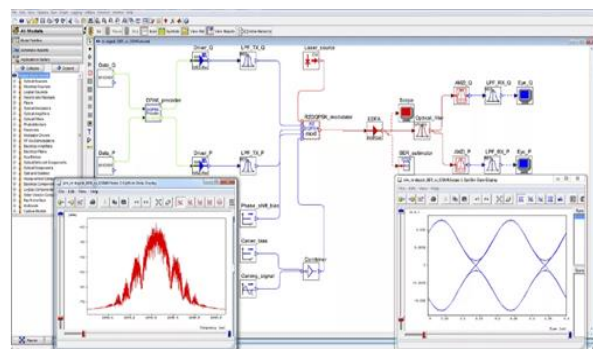
La biblioteca de OptSim brinda gran cantidad de modelos de componentes flexibles y algoritmos de simulación que proporciona un equilibrio entre la elaboración e implementación, logrando reducir el tiempo y el costo de estructuras y diseños de redes ópticas complejas [71] [72].

Dentro de las aplicaciones de OptSim se puede encontrar [71]:

- Sistemas FTTx/PON
- Sistema DWDM / CWDM amplificadas
- LAN's ópticas
- Radio sobre fibra (RoF)
- Enlaces fotónicos de microonda
- Formatos de modulación avanzados
- Sistemas OTDM / OCDMA.
- Interconexiones ópticas
- Sistemas terrestres y submarinos de largo alcance.



Logo OptSim.



Interfaz OptSim.

Figura 2.3. Herramienta de simulación OptSim [71].

2.1.4 Elección del software de simulación

Uno de los procesos más significativos para el desarrollo del presente trabajo de grado es la elección de un entorno de simulación, en dicho proceso se realizó una búsqueda de herramientas dedicadas a la simulación de sistemas ópticos, tanto de código abierto como de código cerrado, entre las más importantes que se hallaron están OptSim y Optisystem, estas como software de pago, mientras que como

software libre se encuentra a Optilux. En la tabla 2.1 se observa un resumen de las principales características de los mencionados entornos de simulación.

Características	Optilux	OptiSystem	OptSim
<i>Tipo de licencia</i>	Libre	Comercial	Comercial
<i>Interfaz gráfica</i>	Baja	Alta	Alta
<i>Requerimientos hardware</i>	Bajo	Medio	Bajo
<i>Herramientas de medición</i>	Buenas	Buenas	Muy buenas
<i>Integración con otras herramientas</i>	Si	Si	Si
<i>Requisitos del sistema</i>	Windows, Linux.	Windows 10 y Windows 11, Linux.	Windows y Linux con kernel y glibc superior a 2.6.32-504 y a 2.12, respectivamente.
<i>Complejidad de manejo</i>	Baja	Media	Media
<i>Componentes de librería</i>	Bajo	Alto	Alto

Tabla 2.1. Comparación de herramientas de simulación.

En base a lo planteado y teniendo en cuenta las características de los entornos de simulación, se busca al que mejor se ajuste a los objetivos del presente trabajo de grado, por lo tanto, se selecciona a OptSim ya que es el que mejor se adapta a dichos requerimientos, además en la actualidad la Universidad del Cauca posee la licencia de esa herramienta de simulación.

2.2 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

La metodología que ha sido elegida para desarrollar el presente trabajo de grado se basa en la metodología de trabajo conocida como modelo lineal secuencial o modelo en cascada, este modelo además de ser ampliamente utilizado es considerado suficientemente resolutivo debido a sus fases y procesos bien definidos. Este modelo lo componen 5 fases que se ejecutan una tras otra según se van completando los requisitos de cada una, las fases del modelo son denominadas como: Fase de

Recolección de Información, Fase de planeación, Fase de Diseño o modelado, Fase de construcción, y Fase de despliegue [73].

La metodología seleccionada con el propósito de desarrollar las simulaciones del presente trabajo de grado se encuentra basada en la metodología de simulación con enfoque práctico [74], en esta se establecen una serie de etapas y de pautas que de ser seguidas adecuadamente permiten el cumplimiento de los objetivos propuestos. Dichas etapas de la metodología escogida son detalladas a continuación:

- **Definición del sistema:** Con el fin de obtener una definición precisa del sistema a simular, se debe efectuar un análisis preliminar para establecer cómo interactúa este con otros sistemas, la relación de las variables que la integran y sus restricciones, además de las medidas de efectividad empleadas para estudiar el sistema y los resultados esperados de dicho estudio.
- **Formulación del modelo:** Después de determinar los resultados que se obtendrán del estudio, el siguiente paso consistirá en elaborar un modelo que genere los resultados deseados. Al desarrollar dicho modelo, se deben definir todas las variables incluidas en este, sus relaciones lógicas y los diagramas de flujo que lo describen.
- **Colección de datos:** En base al grado de dificultad que se tenga para conseguir los datos, se puede ver afectado el desarrollo del modelo. Por lo tanto, se debe definir de forma precisa los datos necesarios para que el modelo logre los resultados esperados. La información puede conseguirse a través de registros, evaluaciones o por experimentación.
- **Implementación del modelo:** Una vez definido el modelo, se procede a definir las herramientas de simulación que se utilizarán en base a los objetivos y necesidades del proyecto.
- **Validación:** En este punto, se debe evaluar y probar el comportamiento del modelo utilizado para verificar si cumple con las expectativas y para asegurar que los parámetros propuestos son los adecuados, si es posible ejecutar una simulación cuyos resultados se conocen de antemano, para verificar su desempeño.
- **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.

2.2.1 Diagrama de flujo de la metodología de simulación

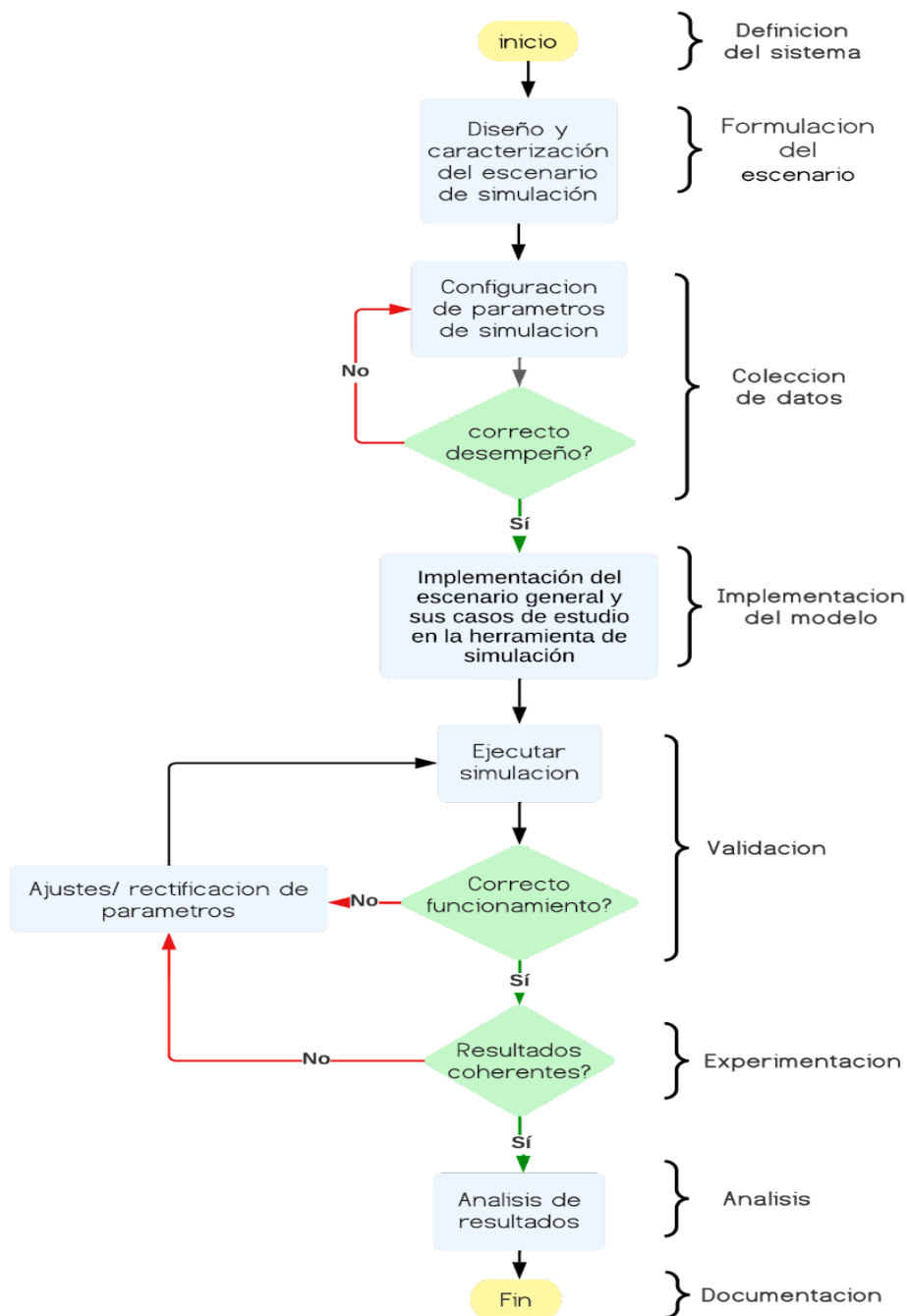


Figura 2.4. Diagrama de flujo empleado en el proceso de simulación.

2.3 ESCENARIO DE SIMULACIÓN

De acuerdo con la teoría presentada en el capítulo 1, se define un modelo de red con diferentes características según los requisitos de red especificados, principalmente equipos comerciales, recomendaciones de la ITU-T y parámetros de desempeño para evaluar el rendimiento de la red. Es necesario enfatizar que el modelo de red se maneja solo a nivel de simulación y no para el análisis económico de la infraestructura.

2.3.1 Caracterización del escenario de simulación

Con el fin de implementar una red con Velocidad de transmisión de línea Mixta (MLR) de tipo NG-PON2, se hace uso de la tecnología DWDM punto a punto unidireccional, la cual admite que la información solo sea enviada en una dirección, por lo que se requiere de la implementación de un sistema de doble fibra para lograr una comunicación integral, no obstante, estos son sencillos de instalar y usar, asimismo brindan altas velocidades de transmisión por medio de enlaces de larga distancia [75].

De acuerdo con la recomendación ITU-T G.694.1, los sistemas DWDM pueden manejar una separación de canales de 12,5 GHz, 50 GHz y hasta 100 GHz a velocidades entre 2,5 Gbps y 100 Gbps. En cuanto las bandas, la recomendación sugiere utilizar las bandas L y C, en donde esta última cubre la región que va de 1530 a 1560 nm y es empleada a menudo en este tipo de redes por su baja atenuación en la fibra óptica. Tomando en cuenta los espaciamientos típicos entre canales, la recomendación ITU-T G.694.1 establece que los canales autorizados están dados en base a las siguientes ecuaciones [4]:

$$25 \text{ GHz: } 193.1 + n \times 0.025 \text{ [THz]} \quad 2.1$$

$$50 \text{ GHz: } 193.1 + n \times 0.05 \text{ [THz]} \quad 2.2$$

$$100 \text{ GHz: } 193.1 + n \times 0.1 \text{ [THz]} \quad 2.3$$

En donde n es un entero positivo o negativo y se incluye al 0, además 193.1 es la frecuencia de referencia en THz.

En base al modo de propagación, es usual encontrar dos clasificaciones para las fibras ópticas, la primera de ellas corresponde a la del tipo monomodo en la cual solo un modo de luz puede propagarse en la fibra, mientras que en la fibra del tipo multimodo es posible que se propaguen simultáneamente múltiples modos de luz. Además, también se hace notable algunas diferencias que están relacionadas con el diámetro del núcleo de la fibra, la longitud de onda y el ancho de banda entre estos dos tipos de fibra [76].

De acuerdo con la recomendación de la ITU-T G.652, el tipo de fibra más adecuado para trabajar con el modelo de simulación es la fibra óptica monomodo, específicamente la Corning SMF-28e+, ya que esta al por poseer un diámetro de núcleo pequeño puede llegar a conseguir grandes distancias junto con elevadas tasas de transmisión. Además, entre sus características presenta una atenuación de 0.275 dB/Km en redes en torno a los 1500 nm y un valor de dispersión cromática de aproximadamente de 17 ps/nm*Km [77].

Los láseres se usan ampliamente en los sistemas de comunicación de fibra óptica, utilizando longitudes de onda de 810 nm, 1310 nm y 1550 nm. Existen diferentes tipos de láseres para la transmisión de datos, de entre los cuales destacan el láser sintonizable, el láser de onda continua - CW (Continuous Wave) y los láseres de semiconductor los que a su vez se dividen en diodos láser - FP (Fabry Perot) y diodos láser - DFB (Distributed Feedback). Una de las características más importantes del diodo láser FP es que puede emitir un rango de longitudes de onda con un ancho espectral amplio, mientras que DFB posee un ancho espectral más estrecho lo cual es altamente requerido en comunicaciones ópticas de alta velocidad, pero siendo su costo más elevado. En la actualidad el láser CW es el más utilizado en redes ópticas debido a que puede manejar altas velocidades de transmisión y tiene una vida útil mucho mayor. La recomendación ITU-T G.691 en cuanto a la potencia del láser CW para redes DWDM debe de estar entre 0 y 6 dBm [55] [78].

Con relación a la amplificación de la señal existen dos tipos principales de amplificadores, los cuales son los amplificadores láser semiconductores y los amplificadores dopados con tierras raras. Para este trabajo de grado se optó en usar un EDFA (Erbium Doped Fiber Amplification) puesto que amplifica del mismo modo todas las longitudes de onda empleadas, obteniendo ganancias superiores con un nivel de ruido más bajo. A pesar de incluir elementos activos como son los amplificadores, la ODN sigue siendo pasiva al situarlos en puntos específicos de la red como son la OLT y las ONUs. Se tendrá en cuenta el uso de los amplificadores en la red en caso de ser necesarios [28] [79] .

El interferómetro Mach-Zehnder es un instrumento que se utiliza para determinar la diferencia relativa en el cambio de fase entre dos haces paralelos resultantes de la división de la luz de una sola fuente. El interferómetro se utilizó, entre otras cosas, para medir los cambios de fase entre los dos haces debido a cambios en el muestreo o longitudes en un solo camino. El dispositivo lleva el nombre de los físicos Ludwig Mach y Ludwig Zehnder quienes lo desarrollaron entre los años 1891-1892, además el interferómetro Mach-Zehnder puede ser utilizado como un dispositivo de modulación externa lo que incluye la capacidad de combinar el láser y el modulador en una estructura, lo que es más rentable al eliminar la necesidad de controlar la polarización siendo uno de los moduladores más utilizados en el montaje de sistemas de comunicación por fibra óptica [80].

Para redes con transmisiones a alta velocidad, el canal se ve muy afectado por la dispersión de tercer orden, que debe ser compensada con técnicas adecuadas a estas velocidades. De estas técnicas, una de las más destacadas suele ser las Rejillas de Fibra de Bragg – FBG (Fiber Bragg Grating) que, al implementarse correctamente en una red, esta introduce una frecuencia de referencia en la longitud de onda central del láser, que posibilita que longitudes de onda más lentas alcancen a las más rápidas. El FBG es un dispositivo dentro del núcleo de la fibra óptica que se construye a partir de cambios en el índice de refracción que tienen una relación periódica con la distancia, en donde la rejilla trabaja como un filtro que refleja una longitud de onda determinada a lo largo de la fibra al cumplirse esa distancia, además de también bloquear la transmisión de una banda específica [75] .

Otra técnica implementada consiste en usar la fibra compensadora de dispersión DCF- (Dispersion Compensating Fiber), esta cuenta con un coeficiente negativo elevado para equilibrar los retardos en las longitudes de onda del pulso, reduciendo así la dispersión en un enlace óptico. Para compensar la dispersión del enlace de fibra, se puede intercalar tramos de fibra de transmisión estándar con fibras compensadoras DCF. La longitud de estos tramos viene determinada por la longitud total del enlace de fibra óptica estándar, de forma que se compensa el efecto de la dispersión total acumulada. Cabe destacar que la fibra DCF tiene pérdidas considerables a 1550 nm. (aprox. de 0,5 dB/km) [55].

Dado que la Dispersión cromática es uno de los fenómenos más complejos y es la principal causante de que los diferentes componentes espectrales de un pulso se propagan a distintas velocidades, el FBG es empleado para confrontar ese problema, ya que las diferentes componentes de longitud de onda del pulso que se propaga en la rejilla se reflejan en diferentes posiciones del dispositivo. generando un retraso de grupo diferencial. Este retraso máximo es proporcional a la longitud de la rejilla [81] .

De igual manera los filtros ópticos son un componente importante en los sistemas de comunicación óptica porque permiten seleccionar las frecuencias de trabajo y eliminar aquellas que están fuera de rango para evitar la diafonía, además de permitir la separación de los diferentes canales de DWDM [82] [83].

Los principales filtros más utilizados son:

- **Filtro de Bessel:** Tiene una excelente respuesta a los impulsos además de un retardo de tiempo uniforme dentro de la banda de paso con la mejor respuesta de paso con un mínimo de sobre impulso o timbre [84].
- **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) [85].

Los receptores ópticos tienen la tarea de convertir las señales ópticas en señales eléctricas y obtener la información transmitida a través de los sistemas de comunicación óptica, el fotodetector es el encargado de esta transformación. Los fotodetectores son diodos semiconductores inversores. Cuando el fotodetector está encendido, las partículas de energía luminosa, también llamadas fotones, se absorben y forman pares de huecos de electrones, creando una corriente eléctrica en presencia de un campo eléctrico.

Ya que se cuenta con una red de tipo PON, se debe de manejar una arquitectura que se adapte a las características de la red propuesta descrita anteriormente. En base a lo que el grupo FSAN recientemente ha presentado, la evolución de la arquitectura de red se puede dividir en dos generaciones: la primera de ellas es la Red Óptica Pasiva de Próxima Generación 1 (NG-PON1, Next-Generation Passive Optical Network 1) [86], en esta generación sobresalen las redes de tipo XG-PON, las cuales operan a una velocidad de transmisión de 10 Gbps en el enlace de bajada y 2,5 Gbps en el enlace de subida, además de este tipo de redes también sobresale la última actualización de ese estándar, nombrado como XGS-PON que se destaca por admitir una velocidad de acceso simétrica de 10 Gbps. En la segunda generación se encuentra la Red Óptica Pasiva de Próxima Generación 2 (NG-PON2, Next-Generation Passive Optical Network 2) [28], la cual puede soportar velocidades de acceso más altas del orden de los 40 Gbps [36].

El grupo FSAN apuesta por desarrollar nuevos estándares para mejorar las características de las redes de acceso de fibra óptica, aprovechando la reutilización de instalaciones implementadas en estándares ya establecidos, es por eso por lo que entre las dos generaciones presentadas prevalecen la coexistencia y la migración entre las diferentes tecnologías de redes de acceso. Por ejemplo, en la primera generación se incorporan funciones de compatibilidad para permitir la migración a redes NG-PON2 [87]. En base a las características mencionadas para este trabajo de grado, es de especial interés las arquitecturas de tipo NG-PON2, por esa razón en este trabajo de grado se hace énfasis en ellas.

Un sistema NG-PON2 implementa el conjunto de protocolos especificados en la serie de Recomendaciones UIT-T G.989 y está compuesto por un conjunto de canales TWDM y/o un conjunto de canales PtP WDM y tiene como objetivo estar capacitado para soportar una variedad de servicios de alta velocidad y calidad. La figura 2.5 muestra la arquitectura del sistema NG-PON2 [28]. Entre sus características más importantes se destacan la capacidad de relacionar múltiples longitudes de onda para brindar servicios de más allá de los 10 Gbps, la adaptabilidad a través de la compatibilidad con velocidades de bits simétricas y asimétricas y la sintonización dinámica de longitudes de onda. Además, estos sistemas poseen una arquitectura que puede alcanzar distancias de 40 Km sin extensores de alcance y de hasta 60 Km si hace uso de dichos extensores [88]. Considerando la tasa de transmisión de los

canales de acceso, se pueden combinar diferentes tipos de canales ópticos para producir una capacidad del sistema de al menos 40 Gbps. A pesar de ello, la finalidad de la red planteada requiere que los canales alcancen una velocidad de acceso nominal por canal, no por la capacidad agregada de un grupo de canales.

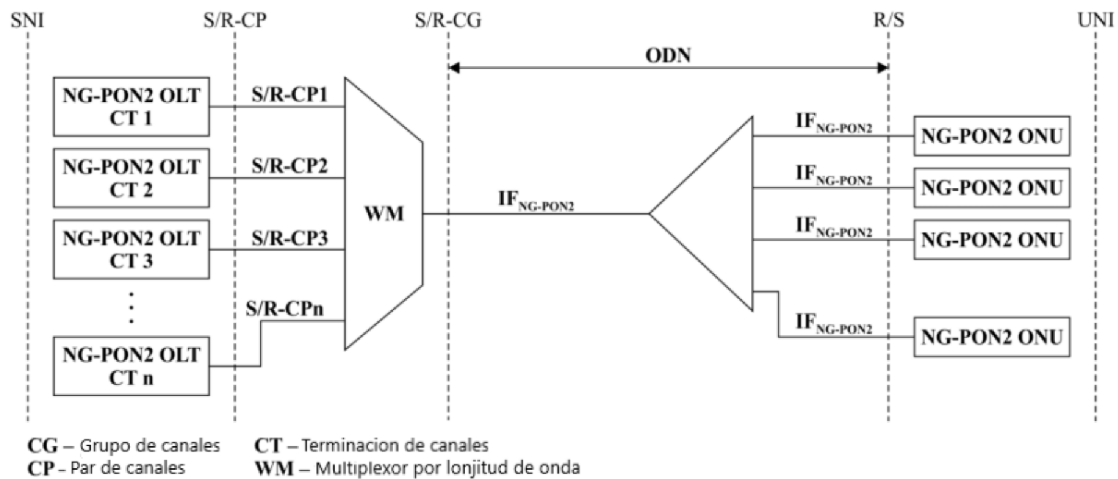


Figura 2.5. Arquitectura lógica de referencia NG-PON2 [89].

En base a lo presentado en el primer capítulo y con el fin de lograr los objetivos planteados en este trabajo de grado, se debe de precisar algunos aspectos que permitan conseguir un modelo de red MLR. Las redes MLR han surgido como una solución rentable debido a la creciente demanda de tráfico heterogéneo, las redes ópticas con velocidad de transmisión de línea mixta admiten diferentes velocidades de datos en diferentes longitudes de onda dentro de la misma fibra. Con el fin de aprovechar los beneficios que presentan este tipo de redes se debe de tener en presente que, con el aumento de la velocidad, las degradaciones de la capa física (PLI) pueden limitar el desempeño de la red óptica. Las degradaciones ópticas consideradas, que afectan el rendimiento de la red óptica, son por ejemplo los efectos no lineales como la SPM y XPM [90]. El impacto de estas suele afectar el alcance óptico de la red y están relacionadas con la potencia acumulada y de la potencia individual de los otros canales ópticos transmitidos en paralelo por la misma fibra, por lo tanto, es aconsejable escoger una separación de canales fija y uniforme de 50 GHz especificada por la ITU-T, o inclusive se puede explorar diferentes valores de separación de canales para diferentes velocidades de línea con el objetivo de optimizar el uso del espectro de la fibra y reducir el costo de la de la red MLR [91].

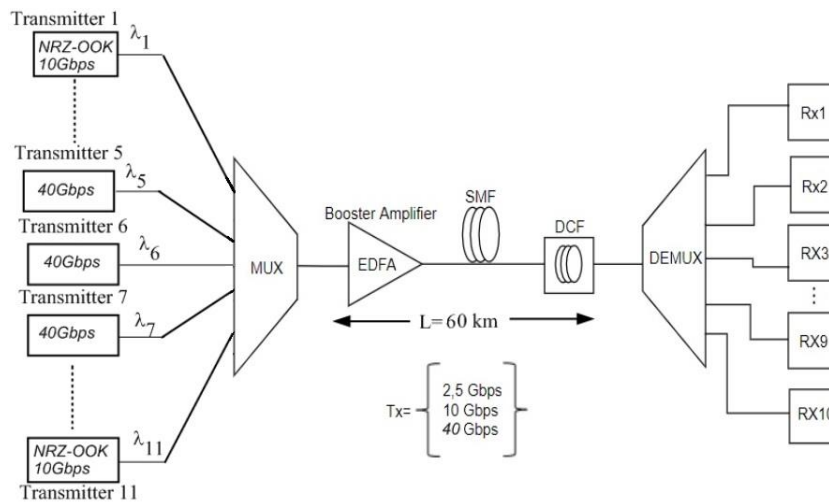


Figura 2.6. Diseño red WDM – MLR [92].

En las redes MLR es necesario utilizar formatos de modulación avanzados con el fin de mantener la separación de canales fija de 50 GHz definidos por ITU-T e integrar canales con velocidades de línea superiores como por ejemplo de 40 Gbps y 100 Gbps en redes WDM existentes. El rol que toman los formatos de modulación es significativo debido a que estos deben de ser muy eficientes espectralmente para admitir un espaciamiento de canal más estrecho en señales con altas velocidades de bits. Los formatos de modulación que se implementarán en este trabajo de grado son seleccionados teniendo en cuenta que las velocidades que se trabajarán son de 2.5, 10 y 40 Gbps, estas se consideran adecuadas para usar en los canales de una arquitectura de red MLR.

En cuanto a los formatos de modulación más implementados según diversos estudios, en velocidades que no superan los 10 Gbps es recomendable utilizar la codificación On-Off – OOK (On-Off Keying) debido a su desempeño, en velocidades más altas que están en el orden de los 20 Gbps, 40 Gbps o 100 Gbps, se requieren de formatos de modulación avanzados como la modulación diferencial por desplazamiento de fase - DPSK (Differential Phase Shift Keying), la Modulación Duobinaria - DB (Duobinary) y la Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase en Cuadratura - DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) [93] [94]. un aspecto a tener presente es la codificación que se va a emplear, se recomienda la codificación RZ puesto que es más tolerante con las no linealidades en velocidades que van desde los 10 Gbps que el formato NRZ [95].

2.3.2 Desarrollo del escenario de simulación

Con base a la información anteriormente suministrada, se elabora el escenario de simulación inicial partiendo de una red MLR basada en una arquitectura NG-PON2, con una velocidad nominal de 2.5 Gbps y un máxima de 40 Gbps. Así mismo, los parámetros objetivos del sistema se determinan de acuerdo con las recomendaciones de la ITU-T: 1) $BER \leq 10^{-12}$, 2) Factor $Q \geq 7$ dB, ($Q \approx 16.9$ dB) y 3) Sensibilidad del Receptor > -30 dBm [62] [96].

En la tabla 2.2 se especifican las características del sistema, teniendo en cuenta las tres secciones del enlace y las variables a modificar para su adaptación.

SECCIÓN	CARACTERÍSTICAS	VARIABLES
OLT	Modulador óptico Mach-Zehnder Láser CW, 0 MHz de FWHM Banda C (1530-1560 nm) Filtro Bessel	Acceso nominal: 2.5/10/40 Gbps Potencia de los canales Formatos de modulación: NRZ-OOK, RZ-OOK, CSRZ-OOK, RZ-DPSK y RZ-DQPSK
ODN	Estándar ITU-T G.652 Fibra Corning SMF-28e+ Rejillas de compensación ideales	Número de Canales Espaciamiento entre canales Distancia del Enlace: 60 Km - 100 Km
ONT	Filtro eléctrico tipo Bessel Filtro óptico de coseno rizado Sensibilidad de -30 dBm Tipo de aplicación FTTH	Número de usuarios finales Splitter

Tabla 2.2. Características del sistema.

El escenario de simulación implementado opera con 3 formatos de modulación y cada una de estos con velocidades de transmisión diferentes, con el fin de satisfacer la arquitectura de red de tipo MLR NG-PON2, esta se puede apreciar en la figura 2.7 Este sistema cuenta con 3 canales con velocidades de transmisión de 2.5, 10 y 40 Gbps para las modulaciones NRZ-OOK, RZ-OOK y RZ-DPSK respectivamente. En el transmisor se requieren drivers de tipo NRZ o RZ rectangular dependiendo de la modulación, además de un láser de onda continua, un modulador MZ de seno cuadrado y el multiplexor. En el medio se ubica un compensador ideal de dispersión y se hace uso de la fibra óptica de tipo Corning SMF-28e con una distancia de enlace de 60 u 80 KM, además de un demultiplexor. En la sección del receptor se implementa

la fibra de última milla la cual nos ofrece una tecnología de telecomunicación de tipo FTTH, un filtro eléctrico Bessel y un Filtro óptico de coseno rizado centrados a la frecuencia de trabajo, por último, se establece el receptor con una sensibilidad máxima de -30dBm.

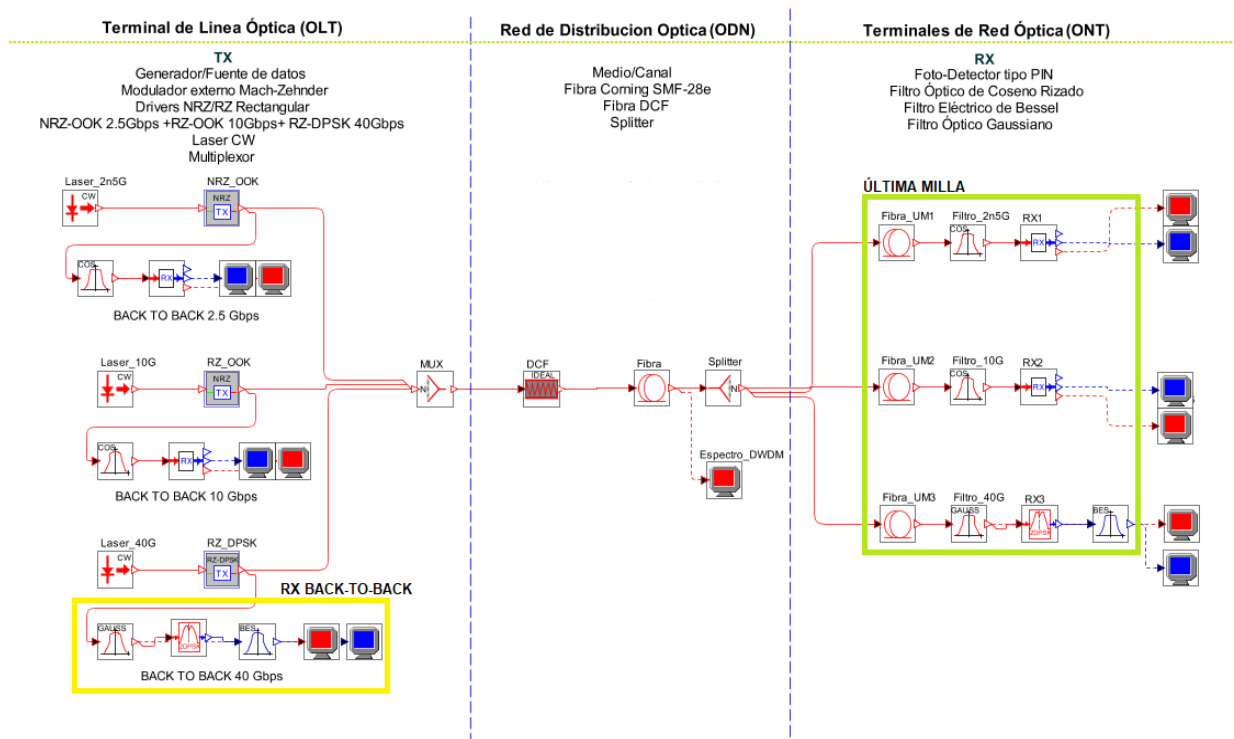


Figura 2.7. Escenario de simulación.

- **Transmisión:**

En la figura 2.8 se observa las propiedades del láser CW, el cual está configurado con una Anchura a media altura - FWHM (Full Width at Half Maximum) igual a 0 MHz evitando ocasionar el efecto de ruido de fase del láser, el cual aumenta las degradaciones de los parámetros de calidad, una longitud de onda específica y la separación de canales es de 100 GHz, siendo la frecuencia central del canal uno 193.8 THz y la del tercer canal 194 THz. Además, en la figura 2.9 se presentan los diferentes bloques de transmisión de los formatos de modulación escogidos, igualmente se tiene presente a los moduladores ópticos externos Mach-Zenhnder y los generadores de datos configurados en base a la necesidad de velocidad de transmisión.

Parameter	Value	Units	Range
Center emission frequency	193.9	THz	[193.31566, 194.51566]
Center emission wavelength	1546.11892	nm	[1541.22532, 1550.79...
Source Status	1		[0, 1]
CW Power	5	dBm	[-3000, 3000]
CW Power	3.16228	mW	(0, Inf)
FWHM Linewidth	0	MHz	[0, Inf)
-20 dBm Linewidth	0.0	MHz	[0, Inf)
Initial Phase	"Random"		

Figura 2.8. Propiedades del láser para el canal 2.

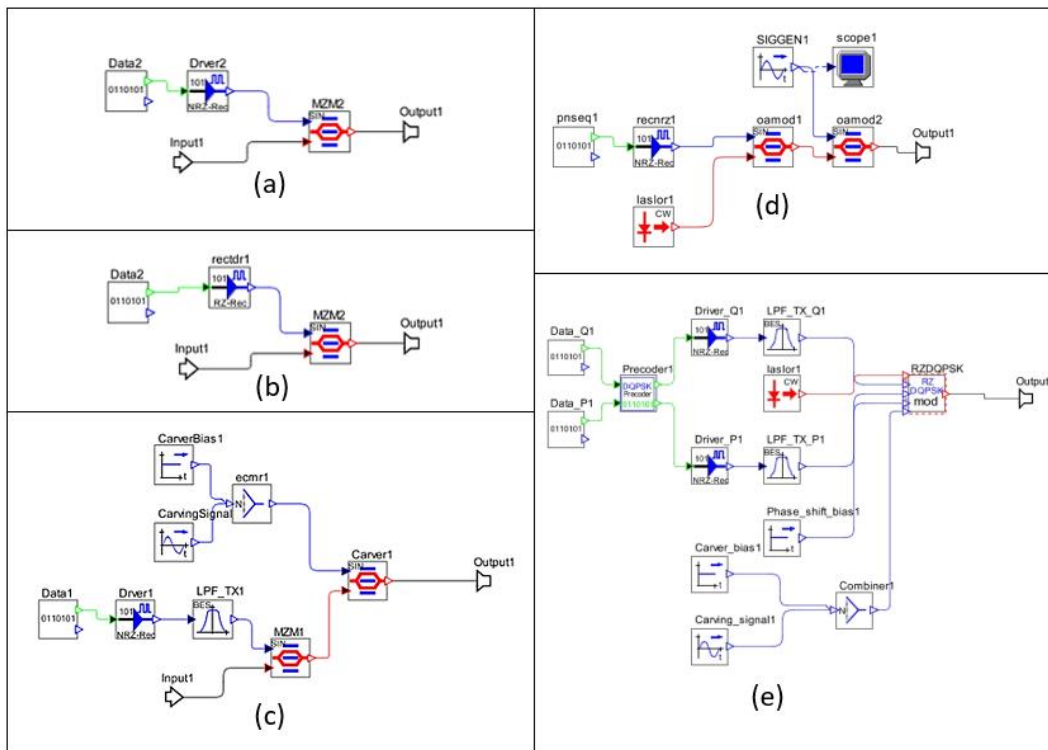


Figura 2.9. (a) Transmisor NRZ-OOK. (b) Transmisor RZ-OOK. (c) Transmisor RZ-DPSK. (d) Transmisor CSRZ-OOK. (e) Transmisor RZ-DQPSK.

Con el objetivo de determinar en un principio las condiciones de funcionamiento del sistema, se cuenta con una configuración BACK TO BACK para cada uno de los canales con el fin de obtener el valor de los parámetros de monitoreo óptico, como son el factor Q, la BER entre otras, con respecto a los formatos de modulación establecidos. Es importante mencionar que los resultados generados por el sistema ideal no contienen los efectos adversos de las degradaciones del canal y por lo tanto son tomados como referencia para una posterior comparación con los resultados en que se hagan en presencia de estos.

- **Medio de transmisión**

Para esta sección del enlace óptico, se ha configurado una compensación al 100% por medio de una rejilla ideal de Bragg con una frecuencia de referencia de 193.41449 THz, además se emplea una fibra Corning SMF-28e+, en la que se hace presente el coeficiente de dispersión y las pérdidas de atenuación, igualmente se configura el splitter de manera ideal para que no genere pérdidas relacionadas con la atenuación.



Figura 2.11. Medio de transmisión

Parameter	Value	Units	Range
Reference Frequency	193.41449	THz	(0, Inf)
Reference Wavelength	1550.0	nm	(0, Inf)
Total Compensating Dispersion D at the ref...	-1296	ps/nm	
Total Compensating Dispersion Beta2 at the...	1652.98087	ps ²	
Total Compensating Dispersion D Slope at t...	-6.29226	ps/nm ²	
Total Compensating Dispersion Beta2 Slope...	-12.9564208471	ps ³	

Figura 2.12. parámetro de la rejilla de Bragg

- **Recepción**

Cuando se reciben señales de los tres canales, pasan por filtros ópticos que permiten diferenciar cada canal. Con respecto al receptor, el modelo actual usa un receptor tipo Sensitivity Optical Receiver, porque simula un receptor óptico completo (contiene un amplificador, un fotodetector y el filtro de post-detección) y se basa en la especificación de la sensibilidad del receptor. La figura 2.13 muestra el bloque de recepción.

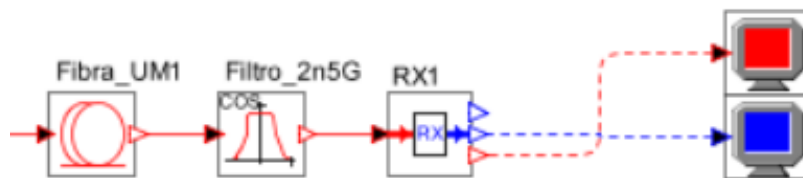


Figura 2.13 Recepción en el primer canal

Los parámetros del receptor se pueden apreciar en la figura 2.14, la sensibilidad de dicho receptor se establece en -30 dBm, Además, se espera obtener una BER de 10-12. Otros parámetros mostrados incluyen la tasa de bit, que puede variar según la velocidad establecida por cada canal y el tipo de pulso utilizado para transmitir la señal óptica.

Parameter	Value	Units	Range
Bit Rate	2.5	Gbit/s	(0, Inf)
Optical test pulse shape	"NRZ_Rectangular" <input type="text"/>		
Duty Cycle	0.5		(0, 1]
Normalized FWHM	0.5	fraction of bit...	(0, 1]
Sensitivity under test condition	-30	dBm	(-54.93184, 1e+32]
Sensitivity reference error probability	1.0E-12		(1e-015, 0.1)
Overall Receiver Responsivity	1.0	A/W or V/W	

Figura 2.14 Parámetros en recepción para el primer canal.

Condiciones iniciales del escenario de simulación inicial

Las condiciones iniciales de los escenarios de simulación y sus respectivos resultados son presentadas en esta sección. Con el fin de evaluar el comportamiento del sistema en condiciones ideales, se utilizó la configuración Back-to-Back en cada formato de modulación, además también se evalúa el efecto de las degradaciones causadas por efectos lineales y no lineales en el lado de recepción, por lo tanto, estos resultados serán considerados como punto de referencia durante el análisis de los resultados obtenidos en el desarrollo del trabajo de grado, para demostrar los efectos negativos de las degradaciones. En resumen, se exponen los resultados más relevantes y detallados de cada evaluación para una mejor comprensión del comportamiento del sistema en diferentes situaciones y condiciones.

Red MLR de tipo 1

En la tabla 2.3 se presentan los valores de BER, Jitter y Factor Q, así como de otros resultados obtenidos al considerar una distancia de transmisión de 80 km y una longitud de última milla de 1 km, en un enlace que cuenta con 3 canales que se transmiten a velocidades mixtas de 2.5, 10 y 40 Gbps y utilizan los formatos de modulación NRZ-OOK, RZ-OOK y RZ-DPSK. La calidad del sistema se refleja en los resultados presentados en dicha tabla, con una tasa de error baja y una potencia de recepción por debajo de los umbrales de sensibilidad del receptor previamente establecidos. En resumen, estos parámetros de monitoreo óptico sugieren que el sistema está funcionando adecuadamente y cumple con los requisitos de calidad necesarios.

Canal	Velocidad (Gbps)	Potencia TX / RX (dBm)	Factor Q (dB)	BER	Jitter (ns)
1	2.5	0 / -22.3507	32.4652	10^{-40}	0.086953
2	10	5 / -22.7228	32.7461	10^{-40}	0.000621
3	40	0 / -26.6366	39.6773	10^{-40}	0.000349

Tabla 2.3. Parámetros OPM de la red MLR tipo 1.

En esta sección se detallan de manera individual los diagramas de ojo obtenidos de la configuración BACK-TO-BACK para los canales 1, 2 y 3 configurados con velocidades de 2,5 Gbps, 10 Gbps y 40 Gbps respectivamente, además de su diagrama en recepción. Esto permite establecer una comparación entre la señal que ingresa al sistema (OLT) y su comportamiento en el otro extremo del enlace (ONT).

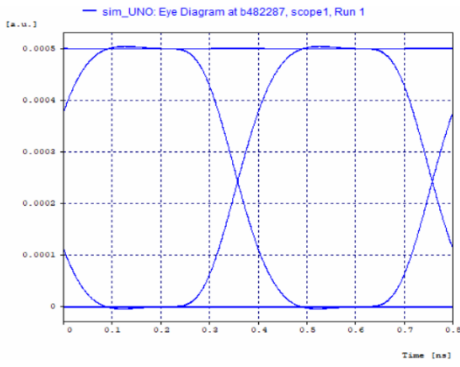


Figura 2.15. Diagrama de ojo back to back, CH1 NRZ-OOK a 2.5 Gbps.

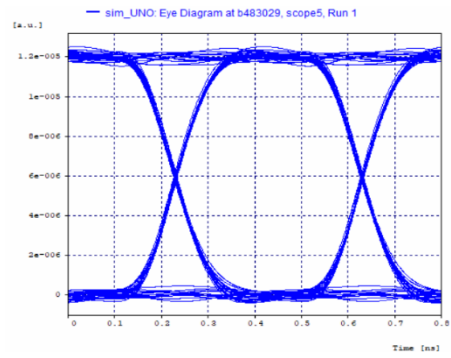


Figura 2.16. Diagrama de ojo en RX, CH1 NRZ-OOK a 2.5 Gbps.

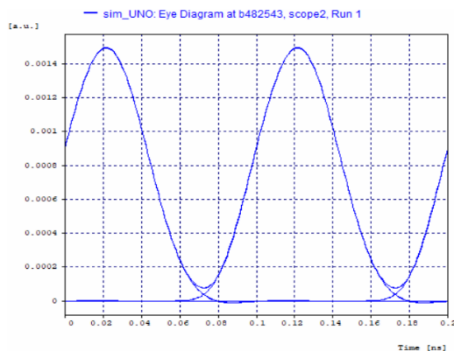


Figura 2.17. Diagrama de ojo back to back, CH2 RZ-OOK a 10 Gbps.

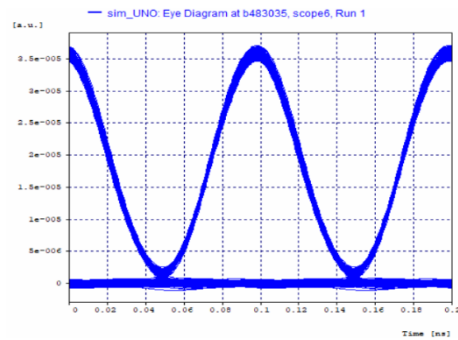


Figura 2.18. Diagrama de ojo en RX, CH2 RZ-OOK a 10 Gbps.

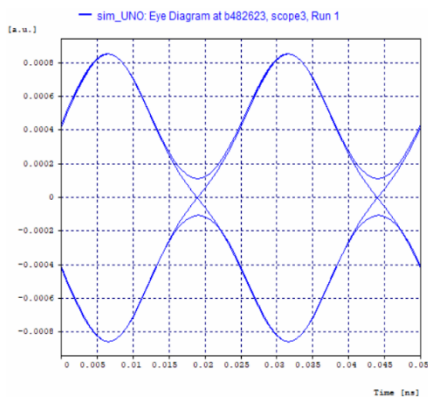


Figura 2.19. Diagrama de ojo back to back, CH3 RZ-DPSK a 40 Gbps.

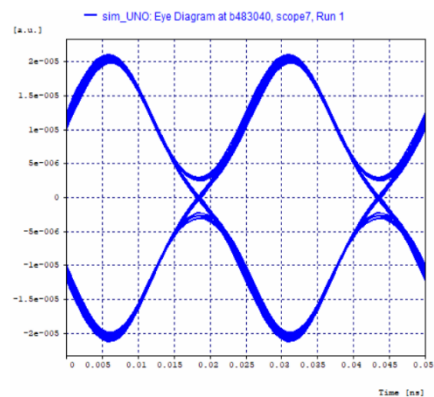


Figura 2.20. Diagrama de ojo en RX, CH3 RZ-DPSK a 40 Gbps.

En las figuras 2.16, 2.18 y 2.20, se pueden ver los diagramas de ojo en recepción para cada uno de los canales. En lo que respecta al diagrama en recepción correspondiente al canal 1, se aprecia que su desempeño es satisfactorio, además de que no se observan cambios significativos en comparación con los otros canales. Esto puede deberse a la compensación ideal utilizada en el sistema y al hecho de que este canal no sobrepasa los 10 Gbps, donde suelen presentarse interferencias y degradaciones con más fuerza. Además, tanto en el canal 2 como en el 3, se observan buenos valores de BER, lo que sugiere que parámetros como la potencia y la compensación están configurados de manera adecuada para minimizar el impacto de las degradaciones, efectos lineales y no lineales, especialmente en el canal 3 que es más susceptible a la dispersión.

En las siguientes figuras se presentan los espectros ópticos obtenidos en la configuración BACK TO BACK y en recepción para cada uno de los 3 canales. Al comparar ambos espectros, se observa que no existen grandes diferencias entre ellos. Sin embargo, se tiene que la señal experimenta una caída en los niveles de potencia al pasar por la longitud del enlace de transmisión, debido al efecto de la atenuación. A pesar de esta disminución, la potencia de recepción se encuentra dentro del umbral de sensibilidad óptico aceptado.

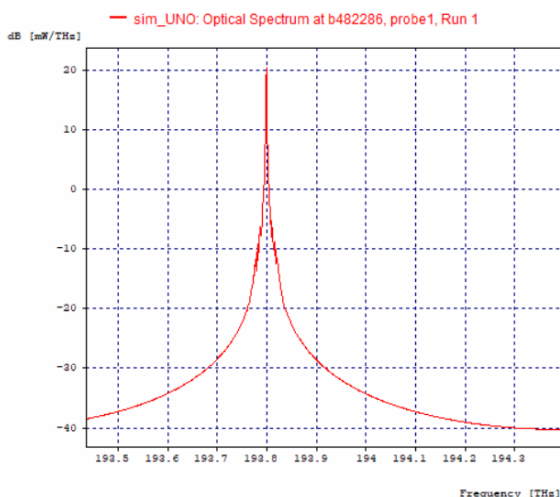


Figura 2.21. Espectro óptico back to back, CH1 NRZ-OOK a 2,5 Gbps.

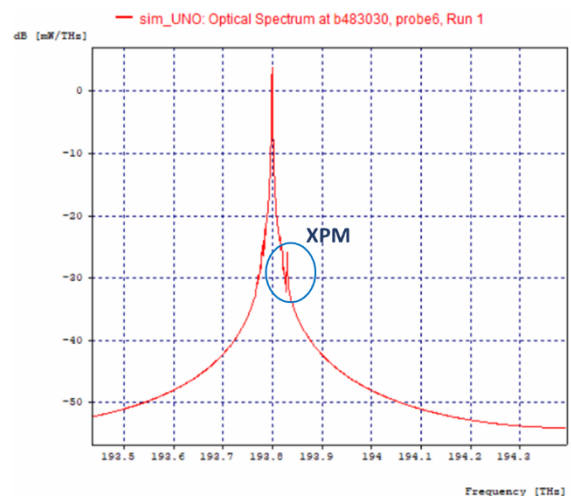


Figura 2.22. Espectro óptico en RX, CH1 NRZ-OOK a 2,5 Gbps.

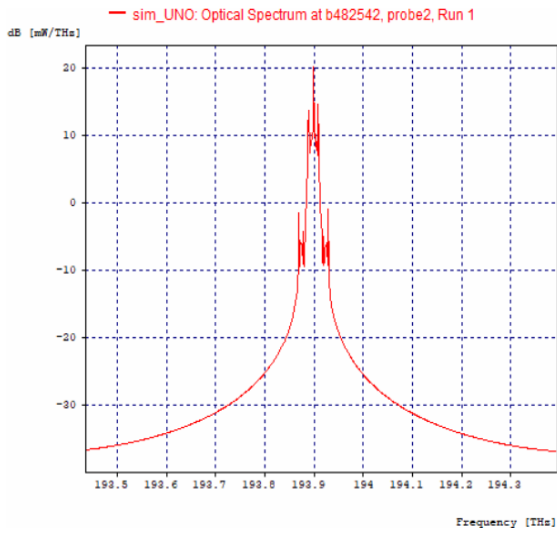


Figura 2.23. Espectro óptico back to back, CH2 RZ-OOK a 10 Gbps.

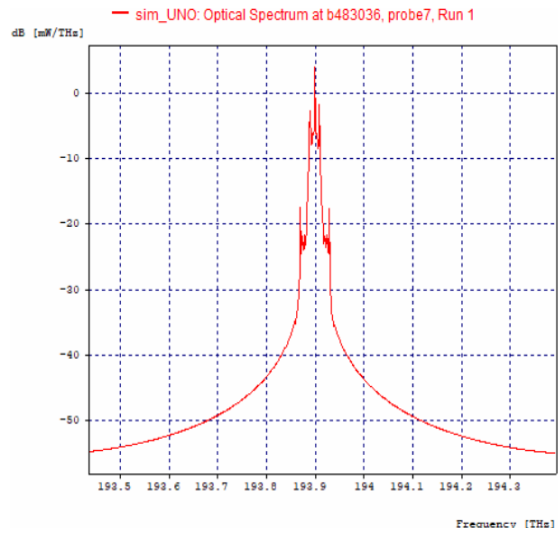


Figura 2.24. Espectro óptico en RX, CH2 RZ-OOK a 10 Gbps.

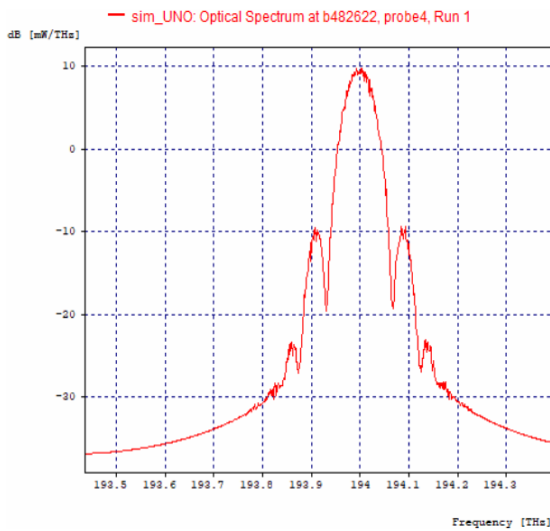


Figura 2.25. Espectro óptico back to back, CH3 RZ-DPSK a 40 Gbps.

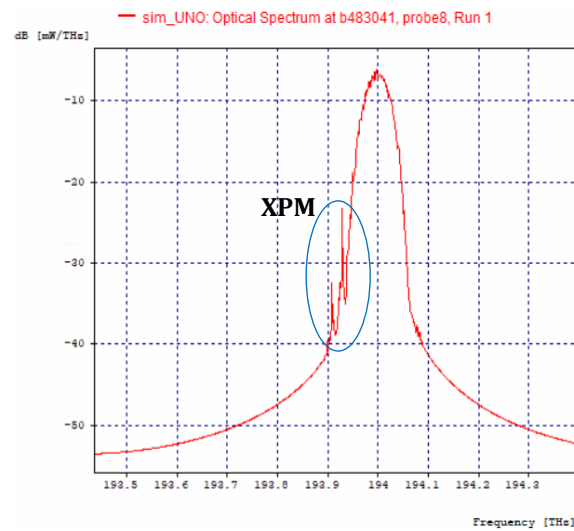


Figura 2.26. Espectro óptico en RX, CH3 RZ-DPSK a 40 Gbps.

En la figura 2.22 se puede observar que el canal 1 está siendo afectado por el canal 2, posiblemente debido al efecto de XPM, el cual se produce cuando las fluctuaciones de potencia de un canal generan modulaciones de fase en otros canales que se propagan simultáneamente, lo que puede provocar una distorsión en la forma del pulso y un ensanchamiento asimétrico del espectro. Por otro lado, en la figura 2.26 se aprecia que el canal 3 presenta una deformación a la izquierda del espectro óptico, la cual se atribuye a la interferencia causada por el canal 2. Al estar contiguos, el canal 2 produce XPM sobre el canal 3, sin embargo, se debe destacar que la influencia de este efecto en el sistema no es lo suficientemente significativa como para provocar degradaciones notables en su rendimiento.

El espectro óptico resultante después de que los tres canales transmitidos atraviesan una distancia de 80 kilómetros de fibra óptica se muestra en la figura 2.27. En la figura es posible identificar la frecuencia central de cada canal, los cuales presentan un espaciamiento de 100 GHz entre ellos. Además, se puede observar la disminución en los niveles de potencia de la señal debido al efecto de la atenuación durante la transmisión.

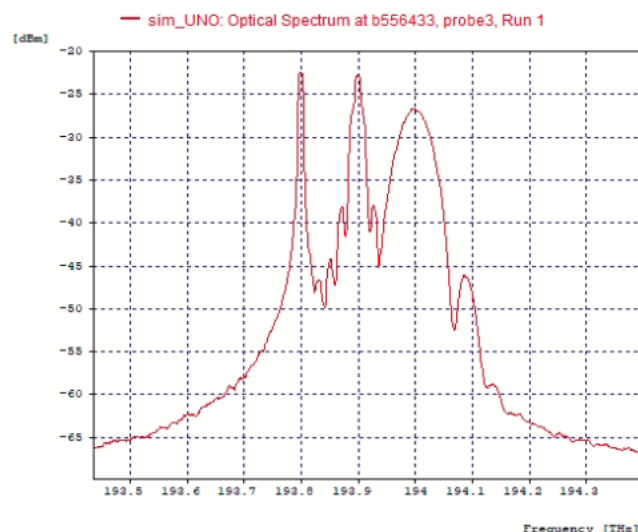


Figura 2.27. Espectro óptico para los tres canales en la red MLR de tipo 1.

En la figura 2.27, se puede observar la singularidad de la señal en cada uno de los formatos de modulación empleados. El canal 1 es menos susceptible a la atenuación, lo que sugiere que es una opción confiable para las transmisiones de datos a larga distancia en estas condiciones. Por otro lado, el canal 2 requiere más potencia para garantizar la calidad de la señal a la distancia establecida. El canal 3 necesita una separación adecuada para evitar interferencias, ya que posee un mayor ancho de banda debido a su velocidad. También, se puede notar que la potencia del canal 3 es prácticamente equiparable a la del canal 2, a pesar de que este último cuenta con una

potencia de transmisión superior. Este hecho resalta las ventajas del formato de modulación DPSK en comparación con OOK, ya que DPSK es conocido por ser robusto ante los efectos negativos del ruido y la atenuación.

A pesar de que los fenómenos SPM y XPM aparecen en el sistema, sus efectos son algo pequeños y pueden considerarse irrelevantes, esto se aprecia mejor en los canales independientes. Con respecto a XPM, se pueden ver crestas cercanas de baja amplitud al lado derecho del tercer canal, Sin embargo, la magnitud de esta es reducida y no representa un riesgo significativo para el sistema en términos de interferencia con la señal. De esta forma, lo mencionado previamente sugiere que el hecho de que se eviten mayores complicaciones a causa de efectos no lineales en el sistema se debe a que se están aplicando niveles de potencia apropiados para la distancia de enlace establecida, lo cual también ayuda a que otro efecto como el FWM sea despreciable debido a su magnitud en este caso.

El valor de OSNR entregado por la herramienta OptSim para una distancia de 80 km y un kilómetro de última milla se presenta en la figura 2.28, en donde se encuentra que resultado obtenido de OSNR para el canal 1 es igual a 50.6820 dB, aunque este valor no refleja una OSNR real, es más bien un valor que se encuentra elevado, ya que se está midiendo desde el piso de ruido hasta la sensibilidad en el receptor que para este caso es de -30 dBm, por lo tanto para obtener un OSNR real se debe de ajustar los marcadores del eje "Y" en la sensibilidad del receptor y la potencia recibida que es de -22.3507 dB, la diferencia entre estas dos líneas paralelas azules, también conocido como delta Y, indica el valor real de OSNR, que en este caso es igual a 7.6493 dB.

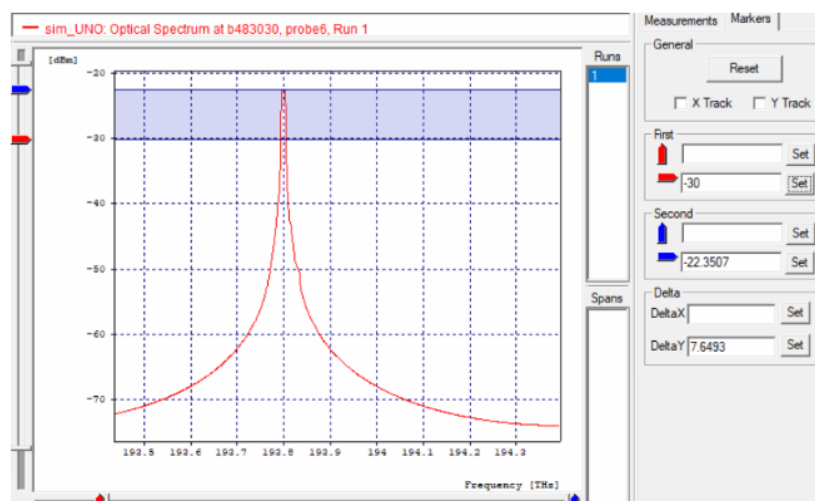


Figura 2.28. Cálculo de la OSNR real.

Los resultados descritos en la Tabla 2.4 se extraen mediante un proceso similar al utilizado para adquirir los datos de la simulación inicial. Estos analizan el rendimiento de la señal en el sistema en recepción, y, al mismo tiempo, tienen en cuenta a las variaciones en la distancia de transmisión, variaciones en la distancia que según las recomendaciones están en un rango que va desde los 60 hasta los 100 Km [28], además la distancia de última milla se mantiene en un kilómetro, lo que permite una implementación similar a una red FTTH.

Distancia (Km)	Canal	Velocidad (Gbps)	Potencia TX / RX (dBm)	Factor Q (dB)	BER	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR Real (dB)
60	1	2.5	0/-18.3313	38.9173	10 ⁻⁴⁰	0.092523	51.6037	11.6687
	2	10	5/-18.8804	34.6084	10 ⁻⁴⁰	0.000605	52.2885	11.1196
	3	40	0/-22.6829	35.5927	10 ⁻⁴⁰	0.000243	46.3947	7.3171
70	1	2.5	0/-20.3783	34.3609	10 ⁻⁴⁰	0.068350	51.1138	9.6217
	2	10	5/-20.8262	33.5397	10 ⁻⁴⁰	0.000668	52.4048	9.1738
	3	40	0/-24.6312	38.2048	10 ⁻⁴⁰	0.000364	46.5928	5.3680
80	1	2.5	0/-22.3507	32.4652	10 ⁻⁴⁰	0.086953	50.6820	7.6493
	2	10	5/-22.7228	32.7461	10 ⁻⁴⁰	0.000621	52.1500	7.2772
	3	40	0/-26.6366	39.6773	10 ⁻⁴⁰	0.000349	46.7072	3.3634
90	1	2.5	0/-24.2845	28.2151	10 ⁻⁴⁰	0.083983	52.1579	5.7155
	2	10	5/-24.7908	30.3991	10 ⁻⁴⁰	0.000665	53.0062	5.2092
	3	40	0/-28.6617	40	10 ⁻⁴⁰	0.000082	46.2812	1.3383
100	1	2.5	0/-26.3159	22.8058	10 ⁻⁴⁰	0.090948	51.0098	3.6841
	2	10	5/-26.8686	27.2778	10 ⁻⁴⁰	0.000801	50.9635	3.1314
	3	40	0/-30.8538	37.4181	10 ⁻⁴⁰	0.000145	46.2631	-0.8538

Tabla 2.4. Parámetros OPM para el rango de 60 a 100 Km en la red MLR tipo 1.

Los resultados de los parámetros de monitoreo presentados en la tabla 2.4 se encuentran dentro de lo esperado. Al aumentar la distancia, es posible que aumente la presencia de los efectos no lineales y eso hace que cambien los parámetros OPM, ya que tanto la OSNR como la potencia de recepción están disminuyendo conforme aumenta la distancia del enlace, el factor Q decrece de igual forma, mientras que por su parte la BER se mantiene en niveles bajos en los casos evaluados para los tres canales. En el caso de la potencia de recepción, se encuentra dentro de los umbrales de sensibilidad del receptor hasta distancias de 90 Km, sin embargo, en el canal 3 de 40 Gbps, a dicha distancia, la potencia de recepción se sitúa en las proximidades de los límites de sensibilidad y como se puede apreciar para distancias superiores a 100 Km, el canal 3 ya no cumple con el parámetro objetivo de sensibilidad y no sería factible sin amplificación.

En las figuras 2.29a, 2.29b y 2.29c se observa la variación que presenta el diagrama de ojo conforme se prueban todas las distancias en el enlace para los 3 canales del sistema, y es que, al variar la distancia entre 60 y 100 km, se puede apreciar que la apertura de los diagramas de ojo disminuye y su altura se reduce. Esto se debe a que la señal transmitida se atenúa con la distancia, lo que hace que la amplitud de la señal disminuya y el ruido de la señal se haga más evidente. También se observa un corrimiento en el periodo de bits, lo cual significa que existe un remanente de

dispersión cromática en el sistema. Además, a una distancia de 60 km, se observa una mayor apertura vertical y, por lo tanto, una mayor inmunidad al ruido en comparación con las otras distancias.

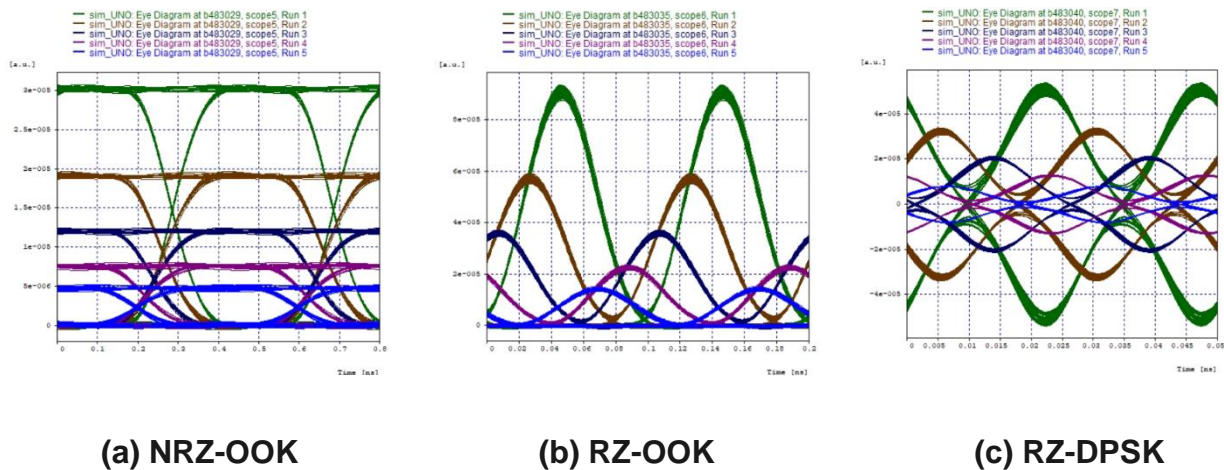


Figura 2.29. Diagrama de ojo en RX para las distancias de 60 a 120 Km en cada canal.

En el caso del espectro óptico, las figuras 2.30(a) a 2.30(c) toman en cuenta las variaciones realizadas en la distancia del enlace. Las simulaciones realizadas tienen un comportamiento similar ya que los gráficos del espectro se superponen y se puede apreciar un ensanchamiento en estos. Además, se puede observar que cada uno de los picos disminuye a medida que aumenta la distancia, al igual que el piso de ruido en todos los casos.

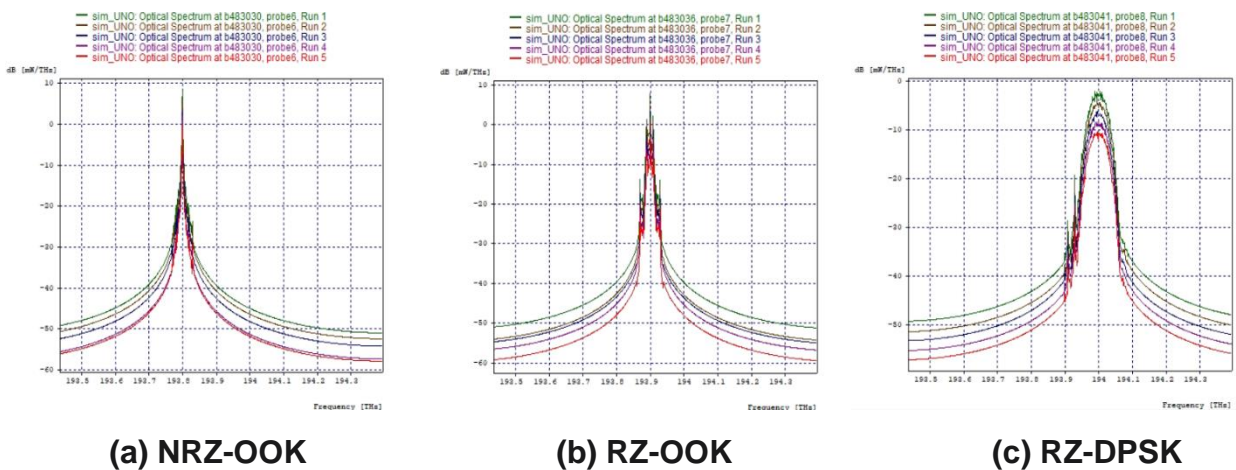


Figura 2.30. Espectro óptico en RX para las distancias de 60 a 120 Km en cada canal.

Con base a lo presentado en las figuras 2.30, se puede concluir que la utilización de una rejilla de Bragg para una pre-compensación ideal es efectiva en la mejora del desempeño de los canales al compensar los efectos de la dispersión cromática y la atenuación, ya que el sistema como tal no se está viendo afectado, aunque sí es posible apreciar ligeros deterioros al incrementar la distancia de transmisión, los cuales son causados por efectos tanto lineales como no lineales. Además, cabe destacar que, de los efectos no lineales, el más significativo es el SPM, debido a que el ensanchamiento presentado en el espectro se le atribuye a éste y también a la presencia de otros efectos producidos por él, como el chirp, que compensan la dispersión cromática.

Red MLR de tipo 2

De igual forma que en el escenario anterior, la tabla 2.5 contiene los valores de BER, Jitter y Factor Q, manteniendo la misma distancia, la longitud de la última milla y la característica de los 3 canales con velocidades mixtas de 2.5, 10 y 40 Gbps con los formatos de modulación NRZ-OOK, CSRZ-OOK y RZ-DQPSK respectivamente. Los datos obtenidos cumplen los requisitos de calidad de los parámetros de monitoreo óptico, lo que sugiere que el sistema está funcionando adecuadamente.

Canal	Velocidad (Gbps)		Potencia TX / RX (dBm)	Factor Q (dB)	BER	Jitter (ns)
1	2.5		0/-21.5945	31.4698	10 ⁻⁴⁰	0.081069
2	10		5/-17.1300	37.0587	10 ⁻⁴⁰	0.000733
3	Cuadratura	40	0/-20.0894	37.0835	10 ⁻⁴⁰	0.000353
	Fase			36.8024		0.000345

Tabla 2.5. Parámetros OPM de la red MLR tipo 2.

En esta sección se detallan de manera individual los diagramas de ojo obtenidos de la configuración BACK-TO-BACK para los canales 1, 2 y 3 configurados con velocidades de 2,5 Gbps, 10 Gbps y 40 Gbps respectivamente, además de su diagrama en recepción. Esto permite establecer una comparación entre la señal que ingresa al sistema (OLT) y su comportamiento en el otro extremo del enlace (ONT).

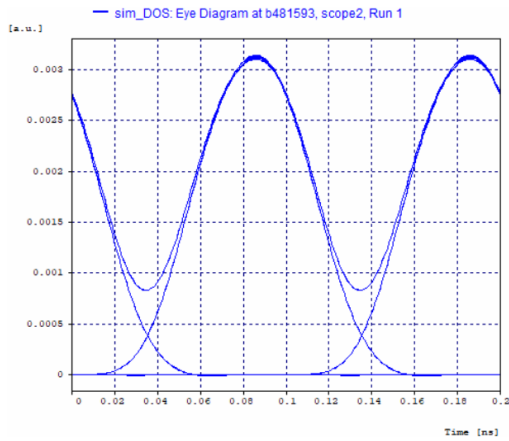


Figura 2.28. Diagrama de ojo back to back, canal 2 de 10 Gbps.

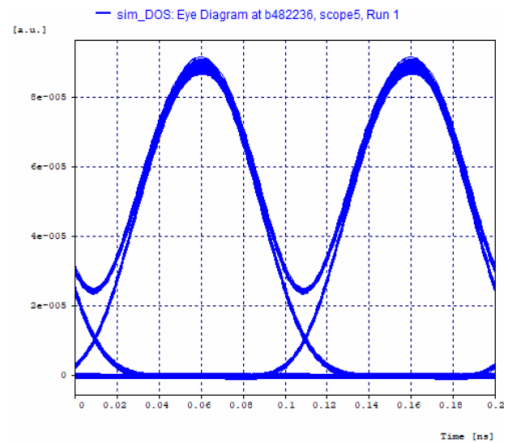


Figura 2.29. Diagrama de ojo en RX, canal 2 de 10 Gbps.

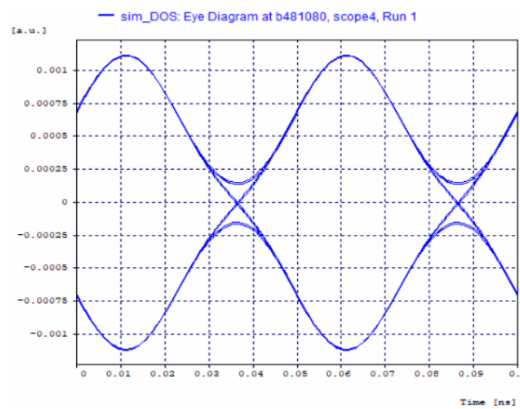


Figura 2.30. Diagrama de ojo back to back, canal 3 a 40 Gbps.

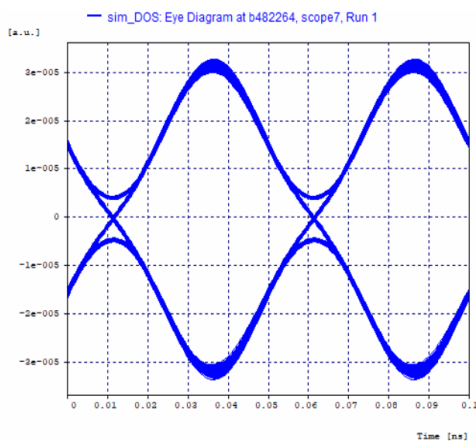


Figura 2.31. Diagrama de ojo en RX, canal 3 en cuadratura a 40 Gbps.

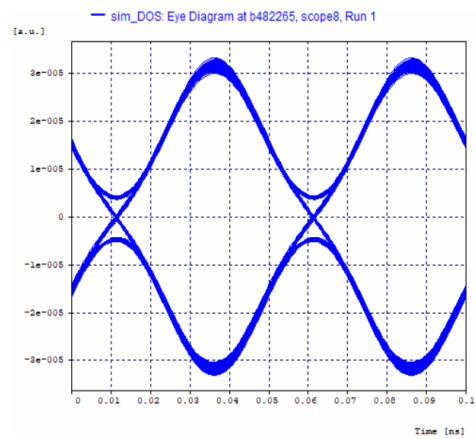


Figura 2.32. Diagrama de ojo en RX, canal 3 en fase a 40 Gbps.

En lo que respecta al diagrama en recepción correspondiente al canal 2, se observa que su desempeño es satisfactorio, además de que no se observan cambios significativos, esto puede deberse a la compensación ideal utilizada en el sistema. Por otro lado, en los diagramas del ojo en recepción del canal 3, tanto en fase como en cuadratura, se puede apreciar una buena apertura del ojo, permitiendo distinguir fácilmente a los niveles lógicos, además de que no hay un desfase significativo en los puntos de cruce. Además, tanto en el canal 2 como en el 3, de manera general se tienen valores aceptables de BER, lo que sugiere que parámetros como la potencia y la compensación están configurados de manera adecuada para minimizar el impacto de los efectos lineales y no lineales.

En las figuras 2.33 a 2.36 se presentan los espectros ópticos obtenidos en la configuración BACK TO BACK y en recepción para el canal 2 y 3. Al comparar ambos espectros, se observa que no existen grandes diferencias entre ellos. Sin embargo, se tiene que la señal experimenta una caída en los niveles de potencia al pasar por la longitud del enlace de transmisión, aunque la potencia de recepción se encuentra dentro del umbral de sensibilidad óptico aceptado. En la figura 2.36 se puede observar que el canal 3 está siendo afectado por el canal 2, posiblemente debido al efecto de XPM, debido a que se presenta una deformación al lado izquierdo del espectro óptico, lo cual se atribuye a la interferencia causada por el canal 2. Se debe destacar que la influencia de este efecto no provoca degradaciones notables en el rendimiento del sistema.

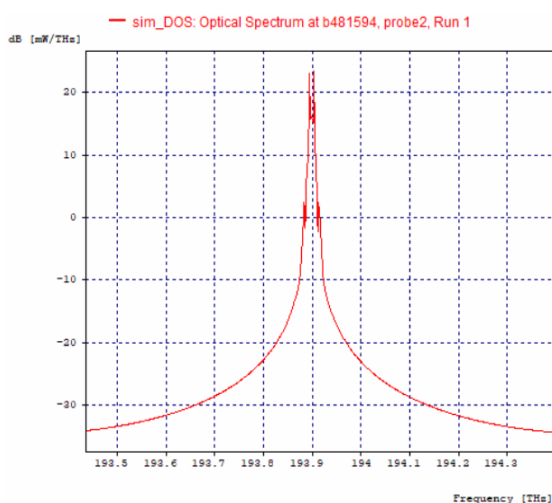


Figura 2.33. Espectro óptico back to back, canal 2 de 10 Gbps.

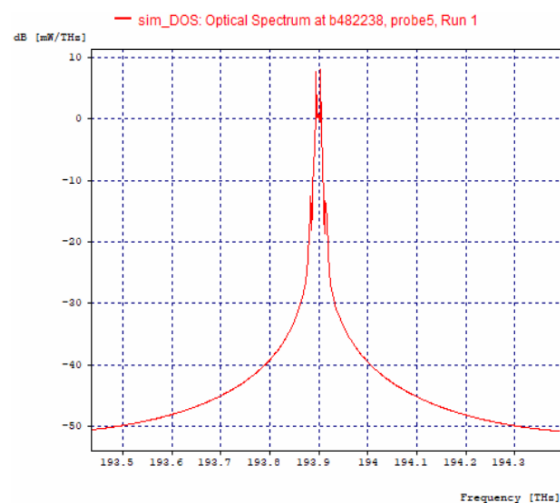


Figura 2.34. Espectro óptico en RX, canal 2 de 10 Gbps.

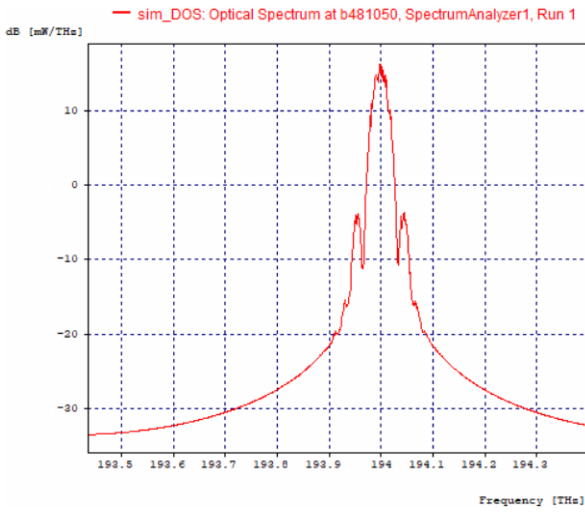


Figura 2.35. Espectro óptico back to back, canal 3 de 40 Gbps.

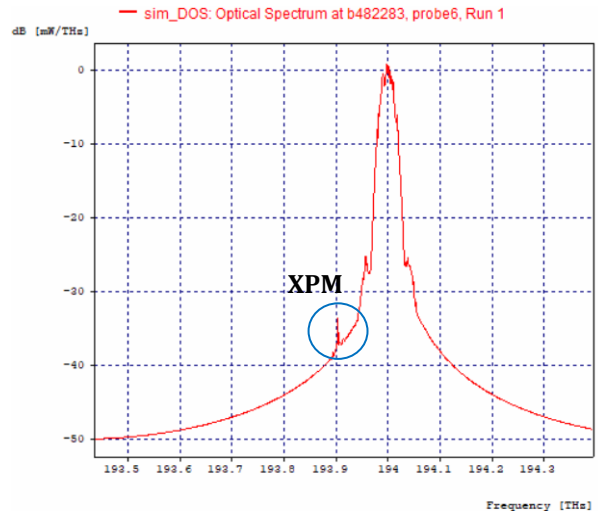


Figura 2.36. Espectro óptico en RX, canal 3 de 40 Gbps.

El espectro óptico resultante después de que los tres canales transmitidos atraviesan una distancia de 80 kilómetros de fibra óptica se muestra en la figura 2.37. En la figura es posible identificar la frecuencia central de cada canal, los cuales presentan un espaciamiento de 100 GHz entre ellos. Además, se puede observar la disminución en los niveles de potencia de la señal debido al efecto de la atenuación durante la transmisión.

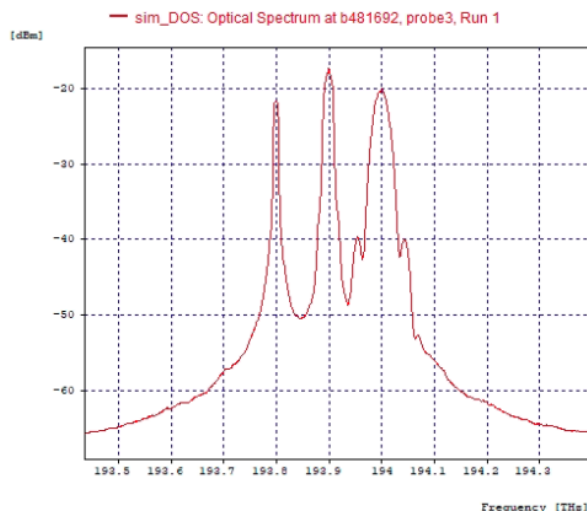


Figura 2.37. Espectro óptico para los tres canales en la red MLR de tipo 2.

En la figura 2.37, se puede observar la singularidad de la señal en los distintos formatos de modulación utilizados, a pesar de que el canal 2 tiene una potencia de transmisión mayor que la del canal 3, las potencias en recepción de ambos canales son prácticamente equiparables. Esto sugiere que el canal 2 requiere más potencia para garantizar la calidad de la señal a la distancia establecida, mientras que el canal 3 logra una transmisión similar con una potencia menor. Además, se pueden apreciar crestas cercanas de baja amplitud debido a XPM, pero su magnitud es reducida y no representa un riesgo significativo para el sistema en términos de interferencia con la señal. En general, estos resultados sugieren que la aplicación de niveles de potencia apropiados para la distancia de enlace establecida evita complicaciones por efectos no lineales en el sistema.

La obtención de los resultados presentados en la Tabla 2.5 sigue un proceso similar al utilizado para la adquisición de los datos de la simulación inicial para este escenario. Estos resultados evalúan el desempeño de la señal en el sistema en recepción, y toman en cuenta las variaciones en la distancia de transmisión que se encuentran dentro del rango recomendado de 60 a 100 kilómetros [28], Además, se mantiene la distancia de la última milla en un kilómetro, lo que posibilita una implementación similar a la de una red FTTH.

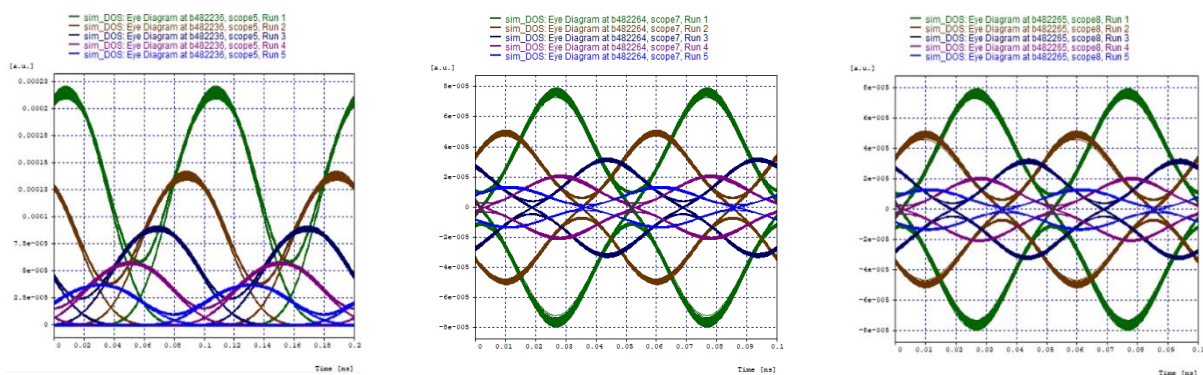
Distancia (Km)	Canal	Velocidad (Gbps)	Potencia TX / RX (dBm)	Factor Q (dB)	BER	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR Real (dB)
60	1	2.5	0/-17.8580	37.6330	10^{-40}	0.079227	52.1550	12.1420
	2	10	5/-13.3387	40	10^{-40}	0.000412	53.0885	16.6613
	3	40	0/-16.2958	37.3378	10^{-40}	0.000237	48.8730	13.7043
37.0169								
70	1	2.5	0/-19.7261	35.1193	10^{-40}	0.080769	50.9279	10.2739
	2	10	5/-15.3129	38.4886	10^{-40}	0.000516	53.1893	14.6871
	3	40	0/-18.1515	37.2053	10^{-40}	0.000198	49.6587	11.8485
36.8866								
80	1	2.5	0/-21.5945	31.4698	10^{-40}	0.081069	52.2527	8.4055
	2	10	5/-17.1300	37.0587	10^{-40}	0.000733	53.5915	12.8700
	3	40	0/-20.0894	37.0836	10^{-40}	0.000353	49.7524	9.9107
36.8024								
90	1	2.5	0/-23.6103	28.6266	10^{-40}	0.080335	50.2437	6.3897
	2	10	5/-19.0458	35.8388	10^{-40}	0.000884	53.5453	10.9542
	3	40	0/-21.9955	36.5743	10^{-40}	0.000376	49.4028	8.0045
36.6214								
100	1	2.5	0/-25.4163	24.8239	10^{-40}	0.082667	52.1159	4.5837
	2	10	5/-20.9308	34.3278	10^{-40}	0.000992	53.1531	9.0692
	3	40	0/-23.8441	35.6530	10^{-40}	0.000368	50.0567	6.1559
35.9654								

Tabla 2.5. Parámetros OPM para el rango de 60 a 100 Km en la red MLR tipo 2.

En la tabla 2.5 se presentan los resultados de los parámetros de monitoreo, los cuales se alinean con las expectativas debido a que al aumentar la distancia, es posible que aumente la presencia de los efectos no lineales y eso hace que cambien los parámetros OPM, se ve como la OSNR y la potencia de recepción disminuyen a medida que se incrementa la distancia del enlace, el factor Q también decrece,

mientras que la BER permanece en niveles bajos para los tres canales evaluados. La potencia de recepción se encuentra dentro de los umbrales de sensibilidad del receptor en todas las distancias analizadas.

Las figuras 2.38(a) a 2.38(c) muestran cómo varía el diagrama de ojo al probar diferentes distancias en el enlace de los 3 canales del sistema. A una distancia de 60 km, se observa una mayor apertura vertical y, por lo tanto, una mayor inmunidad al ruido en comparación con una distancia de 100 km. Al aumentar la distancia del enlace a 100 km, la apertura de los diagramas de ojo disminuye y la presencia de ruido aumenta, indicando una significativa debilitación de la señal. Los resultados obtenidos en las figuras 2.38 son similares a los encontrados en el escenario 1, donde también se evidenció una disminución en la apertura de los diagramas de ojo y una mayor presencia de ruido a medida que se aumentaba la distancia del enlace de transmisión. En ambos casos, la atenuación de la señal debido a la distancia es un factor clave que afecta el rendimiento del sistema de transmisión.



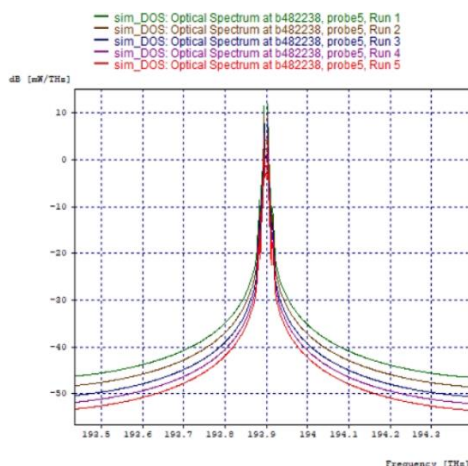
(a) CSRZ-OOK

(b) RZ-DQPSK en Cuadratura

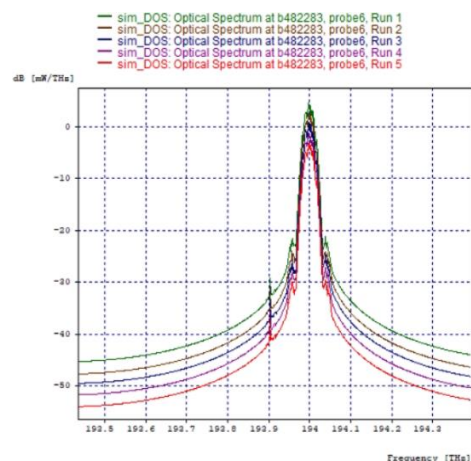
(c) RZ-DQPSK en Fase

Figura 2.38. Diagrama de ojo en RX para las distancias de 60 a 120 Km en cada canal.

En cuanto al espectro óptico, las figuras 2.39(a) y 2.39(b) consideran diferentes distancias en la conexión y muestran que los resultados de las simulaciones tienen un comportamiento similar. Los gráficos del espectro se superponen y se ensanchan, además se observa una disminución en los picos de los gráficos y una reducción en el piso de ruido en todos los casos a medida que aumenta la distancia. En relación con la utilización de una rejilla de Bragg para una pre-compensación ideal, se observa que es efectiva para mejorar el rendimiento de los canales ópticos al reducir los efectos perjudiciales de la dispersión y la atenuación. Este método no afecta el sistema, aunque se observan pequeñas reducciones en la calidad cuando se incrementa la distancia de transmisión debido a efectos lineales y no lineales.



(a) CSRZ-OOK



(b) RZ-DQPSK

Figura 2.39. Espectro óptico en RX para las distancias de 60 a 120 Km en cada canal.

Hasta el momento, gracias a la caracterización y los análisis efectuados, se ha logrado identificar el comportamiento singular de la arquitectura de red MLR de tipo NG-PON2 y sentar las bases que permitirán posteriormente el análisis del desempeño de los formatos de modulación avanzados para dar cumplimiento con los objetivos específicos del presente trabajo de grado. Los resultados obtenidos de los escenarios propuestos previamente han verificado la compatibilidad de los formatos de modulación y su tolerancia frente a los efectos lineales y no lineales logrando un mejor desempeño, robustez y eficiencia de la red MLR.

2.4 CASOS DE ESTUDIO

Después de identificar las características generales de los escenarios de simulación, se llevarán a cabo una serie de casos de estudio con el objetivo de realizar un análisis comparativo de los diversos formatos de modulación avanzados en una arquitectura de red MLR de tipo NG-PON2 en presencia de los efectos SPM y XPM. La figura 2.40 muestra los casos de estudio establecidos para el presente trabajo de grado.

		REDES MLR DE TIPO NG-PON2			
		MLR TIPO 1		MLR TIPO 2	
		CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
PARAMETROS FIJOS	FORMATO DE MODULACION/VELOCIDAD DE Tx	NRZ-OOK/2.5 Gbps RZ-OOK/10 Gbps RZ-DPSK/40 Gbps	NRZ-OOK/2.5 Gbps RZ-OOK/10 Gbps RZ-DPSK/40 Gbps	NRZ-OOK/2.5 Gbps CSRZ-OOK/10 Gbps RZ-DQPSK/40 Gbps	NRZ-OOK/2.5 Gbps CSRZ-OOK/10 Gbps RZ-DQPSK/40 Gbps
	NUMERO TOTAL DE CANALES	6	10	6	10
EFECTOS VARIABLES	SPM	POTENCIA DE Tx COEFICIENTE DE DISPERSION			
	XPM	POTENCIA DE Tx ESPACIAMIENTO ENTRE CANALES COEFICIENTE DE DISPERSION DE LA FIBRA			

Tabla 2.6. Casos de estudio.

Para el desarrollo de los escenarios de simulación, tanto de la red MLR de tipo 1 y tipo 2, se implementará dos casos de estudio, los cuales constará de la siguiente distribución:

Caso de estudio 1: 2 canales de 2,5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 2 de 40 Gbps

Caso de estudio 2: 4 canales de 2,5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 4 de 40 Gbps

Nota de autor

En este capítulo se consideraron los diferentes software de simulación para el desarrollo del trabajo de grado, debido a su capacidad en el diseño y evaluación del desempeño de las redes ópticas se optó por emplear la herramienta de simulación OptSim, además se define la metodología y el diagrama de flujo empleado para el desarrollo de los escenarios de simulación. Posteriormente se caracteriza un modelo de red óptico MLR de tipo NG-PON2, siguiendo las recomendaciones de la ITU-T y considerando parámetros de desempeño, donde se evalúa su rendimiento para garantizar condiciones óptimas en la implementación de múltiples formatos de modulación avanzados, a continuación, se definen los casos de estudio que se desarrollaran durante el trabajo de grado.

CAPÍTULO 3

3 ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS EN PRESENCIA DE LOS EFECTOS SPM Y XPM EN UNA ARQUITECTURA DE RED MLR DE TIPO NG-PON2

En este capítulo se describe el proceso de simulación de una arquitectura de red MLR de tipo NG-PON2, con el fin de evaluar los efectos no lineales SPM y XPM en presencia de formatos de modulación avanzados en una sola fibra. Se presenta un análisis de los resultados obtenidos mediante la simulación en OptSim, teniendo en cuenta la variación de diferentes parámetros definidos en el capítulo dos, como la potencia, la dispersión cromática, el número de canales y el espaciamiento entre ellos. Se logra mitigar los efectos lineales de la fibra, como la atenuación, la PMD y la dispersión lineal, para no tener en consideración estas degradaciones. El impacto de los efectos no lineales de SPM y XPM en la calidad de la transmisión de la señal se analiza utilizando los parámetros OPM como la BER, el factor Q y la relación señal a ruido óptica (OSNR).

A continuación, se realiza un análisis detallado individualmente de los efectos no lineales SPM y XPM para obtener una mejor comprensión del rendimiento de los formatos de modulación avanzados en una arquitectura de red MLR del tipo NG-PON2, en presencia de estos efectos.

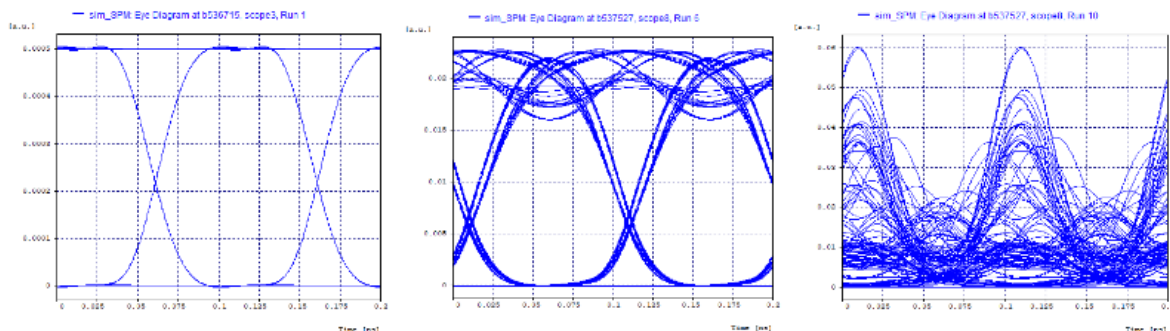
3.1 ANÁLISIS INDIVIDUAL DE LOS EFECTOS SPM Y XPM EN UNA RED MLR DEL TIPO NG-PON2, EN PRESENCIA DE FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS.

3.1.1 Análisis efecto no lineal SPM

Para llevar a cabo el análisis del efecto no lineal SPM, se configura el sistema con una separación entre canales de tal forma que se puedan evitar las interferencias de otros efectos no lineales como la XPM y la FWM. Una vez establecido el canal, es necesario variar la potencia de transmisión para poder apreciar de manera más clara el efecto de la SPM sobre el canal seleccionado. Para ampliar la comprensión del efecto no lineal SPM en diferentes condiciones, se debe repetir el mismo procedimiento variando el formato de modulación, mientras se mantienen los demás parámetros constantes. De esta manera, se puede observar el desempeño de cada formato de modulación en presencia del efecto estudiado, lo que permitirá una mejor comprensión del impacto del efecto no lineal SPM.

Para este análisis se evalúa el comportamiento de los factores de calidad del canal a distancia de 80 Km a diferentes potencias de transmisión, esto se hace ya que los efectos no lineales son significativamente influenciados por diversos parámetros,

siendo la potencia de transmisión uno de los más destacados. Para llevar a cabo estas mediciones se evaluaron las potencias de transmisión de 0 a 18 dBm manteniendo los demás parámetros en todas las simulaciones.



(a) Back to Back (b) Potencia EDFA = 12 dBm (c) Potencia EDFA = 18 dBm

Figura 3.1. Diagramas de ojo para el canal 1, NRZ-OOK a 2.5 Gbps.

Como se observa en la figura 3.1, el efecto de la SPM es un efecto degradante al implementarlo en el formato de modulación NRZ- OOK, dado que al incrementar la potencia de transmisión se aprecia el daño que recibe la señal mediante el diagrama del ojo y sus parámetros de monitoreo óptico. Para el caso de la potencia de transmisión de 12 dBm el sistema cumple con los mínimos parámetros de OPM, caso contrario sucede cuando la potencia de transmisión es de 18 dBm, debido a que no logra cumplir con los estándares de calidad en ningún parámetro. En concreto, la apertura del ojo disminuye con el aumento de la potencia transmitida.

En la figura 3.2 se puede apreciar que, debido al incremento de la potencia de transmisión, el SPM genera un ensanchamiento en el espectro óptico de la señal en recepción, este comportamiento hace visible la fuerte correlación entre el aumento de la potencia de transmisión y la magnitud del impacto del SPM. La señal de color verde posee un nivel de potencia de 0 dBm, mientras que la señal de color rojo cuenta con un nivel de potencia de 18 dBm.

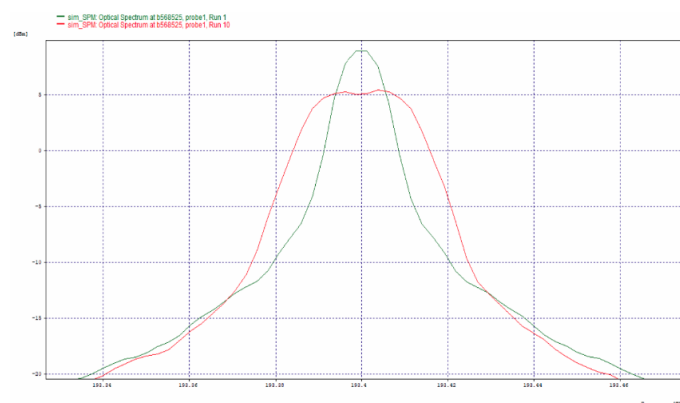


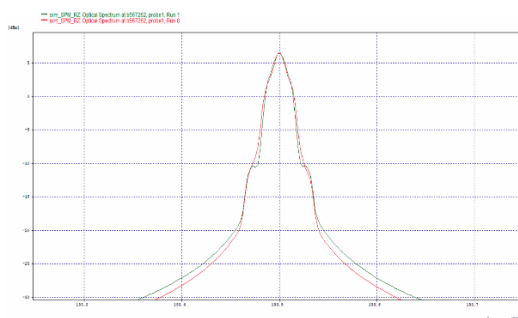
Figura 3.2. Espectros ópticos en recepción para el canal 1, NRZ-OOK a 2.5 Gbps con potencias de transmisión de 0 dBm (verde) y 18 dBm (rojo).

Distancia (Km)	Modulación	Velocidad (Gbps)	Potencia TX / RX (dBm)	Factor Q (dB)	BER	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR Real (dB)
80	NRZ-OOK	2.5	12 / 8.81803	16.7794	$4.16 \cdot 10^{-12}$	0.026927	54.8597	38.8180
	RZ-OOK	10	13 / 6.65258	17.5732	$3.01 \cdot 10^{-14}$	0.008574	52.6507	36.6526
	RZ-DPSK	40	10 / 2.21713	17.9737	$6.46 \cdot 10^{-15}$	0.000288	48.8511	32.2171
	CSRZ-OOK	10	13 / 6.55809	16.7920	$2.14 \cdot 10^{-12}$	0.012904	52.7393	36.5581
	RZ-DQPSK	40	10 / 5.16542	18.6808	$2.57 \cdot 10^{-17}$	0.001022	52.3429	35.1654

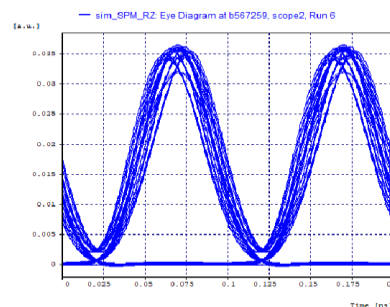
Tabla 3.1. Valor de potencia máxima para los parámetros OPM en presencia del efecto SPM para una distancia de 80 km.

A medida que se incrementa la potencia de transmisión, se puede apreciar el punto en donde cada formato de modulación a determinada velocidad comienza a presentar degradaciones para los parámetros de calidad previamente definidos en la sección 2.3.

En las figuras 3.3 a 3.6 se pueden observar detalladamente los diagramas del ojo y el espectro óptico para cada formato de modulación, con su respectiva velocidad de transmisión. Estas figuras no solo muestran los valores de potencia máximos en los cuales se mantienen los parámetros de OPM establecidos en el capítulo dos, sino que también permiten visualizar el efecto que tiene el fenómeno de SPM sobre la señal transmitida. Es evidente que la variación de la potencia para cada formato de modulación tiene un impacto significativo en la calidad de la señal, y esto se refleja en la forma en que se presentan los diagramas del ojo y el espectro óptico.

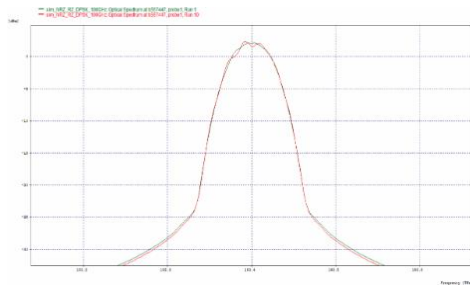


(a) Espectro óptico

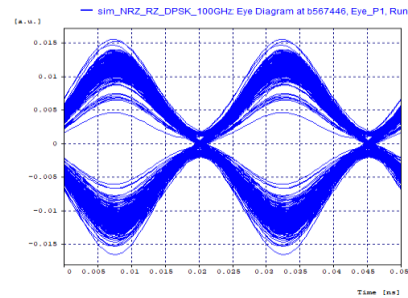


(b) Diagrama de ojo

Figura 3.3. Diagramas RZ-OOK (a) espectro óptico para potencias de transmisión de 0 dBm (verde) y 18 dBm (rojo) y (b) Diagrama del ojo a una potencia de 13 dBm.

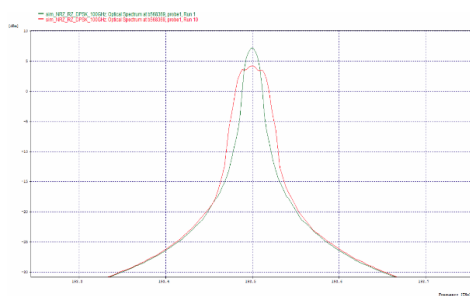


(a) Espectro óptico

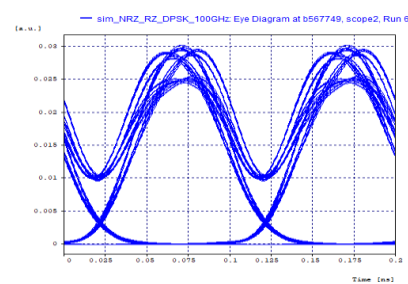


(b) Diagrama de ojo

Figura 3.4. Diagramas RZ-DPSK (a) espectro óptico para potencias de transmisión de 0 dBm (verde) y 18 dBm (rojo) y (b) Diagrama del ojo a una potencia de 10 dBm.

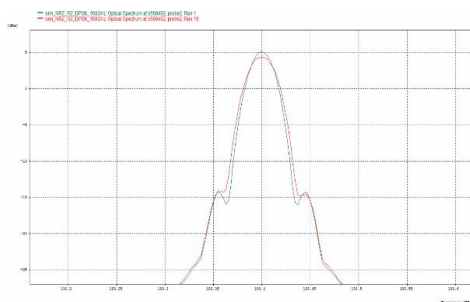


(a) Espectro óptico

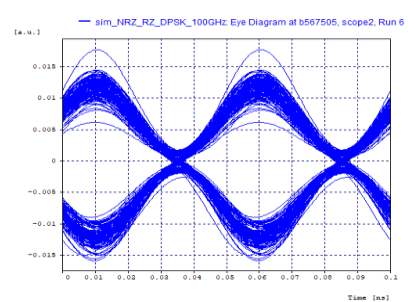


(b) Diagrama de ojo

Figura 3.5. Diagramas CSRZ-OOK (a) espectro óptico para potencias de transmisión de 0 dBm (verde) y 18 dBm (rojo) y (b) Diagrama del ojo a una potencia de 13 dBm.



(a) Espectro óptico



(b) Diagrama de ojo

Figura 3.6. Diagramas RZ-DQPSK (a) espectro óptico para potencias de transmisión de 0 dBm (verde) y 18 dBm (rojo) y (b) Diagrama del ojo a una potencia de 10 dBm.

Con base en la figura 3.5 se puede decir que el formato de modulación menos tolerante al efecto no lineal SPM es el CSRZ-OOK debido a su ensanchamiento

pronunciado ante cambios de potencia, mientras que en la figura 3.4 se muestra que el formato RZ-DPSK es mucho más tolerante al incremento de la potencia y el ensanchamiento en este no es tan pronunciado como en los otros formatos de modulación. El fenómeno de SPM es un factor a tener en cuenta en las redes de transmisión de alta velocidad. Los resultados obtenidos en el análisis de diferentes formatos de modulación avanzados en una red MLR de tipo NG-PON2 evidencian la influencia significativa del SPM en la calidad y estabilidad de la señal transmitida. Los valores de potencia máxima y los parámetros OPM establecidos en el capítulo dos son fundamentales para mantener una transmisión óptica confiable y eficiente.

3.1.2 Análisis efecto no lineal XPM

Con el propósito de analizar el efecto no lineal XPM, se establece una configuración de tres canales con una distancia del enlace de 80 km. Además, para la última milla del enlace se ha utilizado una sección de 1 km de fibra óptica. Uno de estos canales es utilizado como canal de bombeo, con una potencia mayor en comparación con los otros dos canales, con el objetivo de verificar si la potencia de un canal tiene un impacto en la fase de los otros canales, lo cual genera efectos de ensanchamiento de pulsos al propagarse en una fibra con diferentes valores de dispersión.

A continuación, se presenta la configuración utilizada en la red MLR para este caso de estudio, la cual se ilustra en la figura 3.7. En dicha configuración, se utilizan tres canales que transmiten a 2.5, 10 y 40 Gbps, respectivamente, mediante un formato de modulación previamente establecido según el caso. Se considera un espaciamiento inicial de 100 GHz entre los canales. Además, se emplea en el sistema una rejilla de Bragg ideal con una compensación del 100% y se utilizan dos amplificadores, uno actúa como Booster y el otro es un Amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA) como preamplificador. Es importante señalar que los dispositivos EDFA se utilizan solamente con el fin de estimular la presencia de los efectos no lineales utilizando un alto nivel de potencia de 10 dBm para dicho propósito.

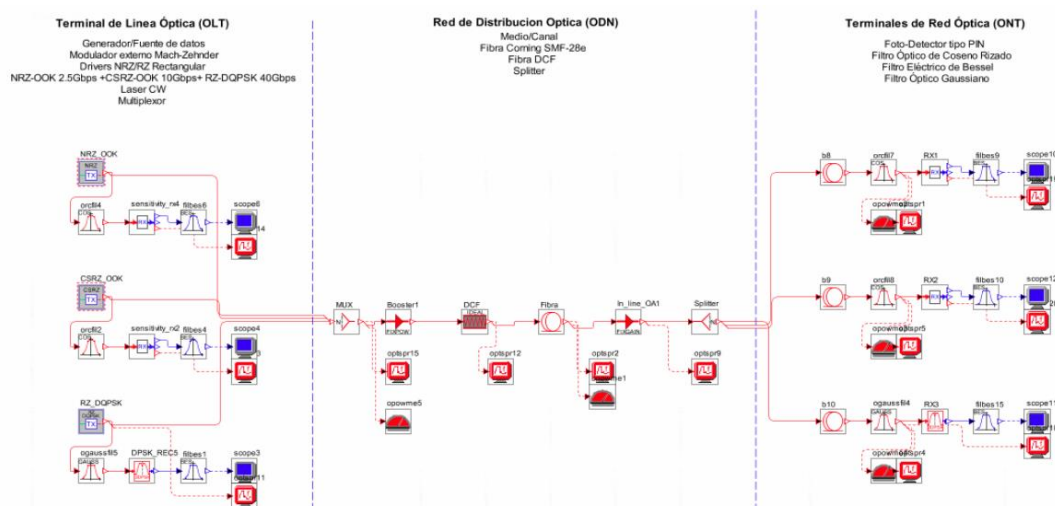
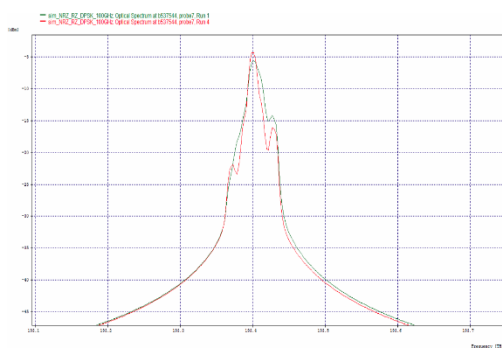
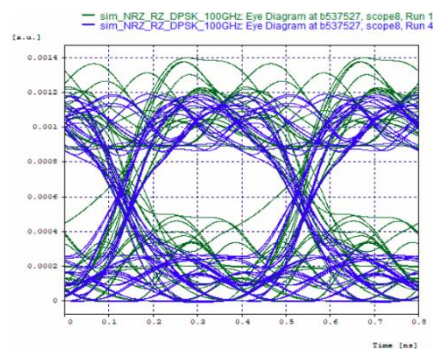


Figura 3.7. Escenario de simulación de la red MLR.

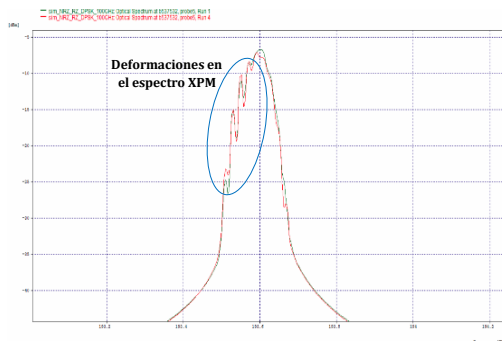
La dispersión de la fibra tiene un impacto considerable en el comportamiento de los efectos no lineales. En particular, una alta dispersión puede limitar el ensanchamiento causado por el XPM. Con el objetivo de evitar cualquier distorsión o interferencia de señales de canales cercanos y garantizar la existencia de XPM, se mantiene la potencia del canal de bombeo en -10 dBm y se fija la del canal 1 y 3 en -30 dBm. Estos ajustes se realizan para evaluar el impacto de variar la dispersión en lugar del tipo de fibra, con el fin de mantener intactas las demás propiedades de la fibra. La dispersión de la fibra varía en un rango de 0 ps/nm/km a 16 ps/nm/km. Este último valor corresponde al valor típico de la fibra SMF-28 de Corning.



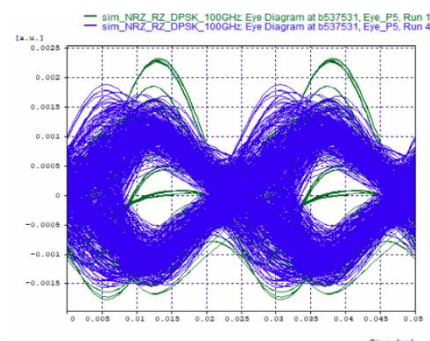
(a) Espectro óptico del canal 1



(b) Diagrama del ojo del canal 1



(c) Espectro óptico del canal 3



(d) Diagrama del ojo del canal 3

Figura 3.8. Diagramas en recepción de los canales 1 y 3 bajo el efecto XPM originado por el canal 2, para una dispersión de 0 (verde) y 6 ps/nm/km (rojo).

En las figuras 3.8(a) a 3.8(d) se muestran los diagramas del ojo y del espectro en recepción correspondientes a los canales 1 y 3 bajo el efecto de XPM para una dispersión de la fibra de 0 y 6 ps/nm/km. En las figuras 3.8 (a) y 3.8 (c) se puede observar el ensanchamiento del espectro de potencia generado por XPM en los canales en recepción al comparar los dos valores de dispersión elegidos. Es posible notar que el impacto de XPM, reflejado en el ensanchamiento del espectro, es mayor cuando el valor de dispersión de la fibra es más cercano a cero. Por otro lado, en las

figuras 3.8 (b) y 3.8 (d) se puede apreciar la degradación causada por las variaciones en el valor de la dispersión, lo que genera distorsión en el diagrama del ojo del canal recibido y resultados adversos en los parámetros OPM.

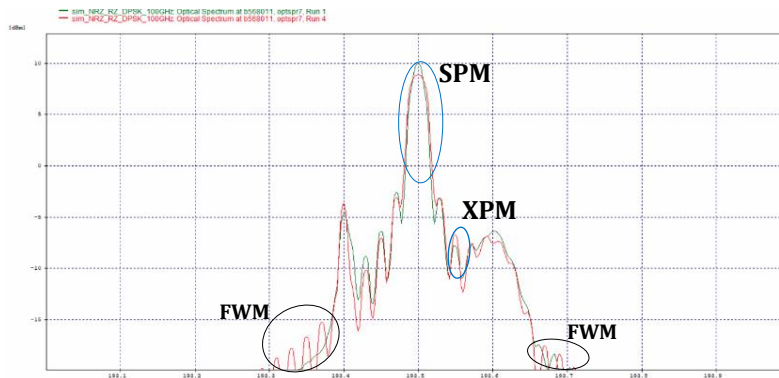
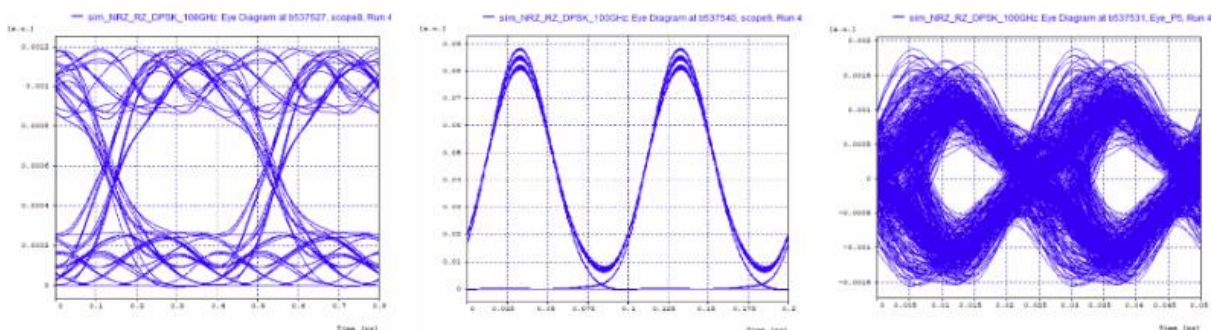


Figura 3.9. Efecto de la XPM sobre el Espectro óptico de la red MLR para una dispersión de la fibra de 0 ps/nm/km (verde) y 6 ps/nm/km (rojo).

En la figura 3.9 se presenta el espectro óptico obtenido del medio, en el cual se observa la afectación que produce el canal dos a una potencia de -10 dBm sobre los canales adyacentes, donde se aprecia claramente los picos adyacentes generados debido al efecto de XPM, como también la ampliación de espectro.

En la figura 3.10 se muestra la afectación cuando el segundo canal posee una potencia mayor a la de los canales adyacentes, es posible apreciar la distorsión que genera el efecto XPM en los diagramas de ojo, el valor de la dispersión de la fibra en que se encuentra el sistema es de 6 ps/nm/km, debido a que en este valor los tres canales obtienen de forma parcial los parámetros OPM.



(a) Canal 1 a 2.5 Gbps.

(b) Canal 2 a 10 Gbps.

(c) Canal 3 a 40 Gbps.

Figura 3.10. Diagramas de ojo en recepción en los tres canales, para una dispersión de la fibra de 6 ps/nm/km.

Al examinar las gráficas resultantes del efecto XPM, se observa una distorsión de mayor magnitud en comparación con las del efecto SPM. Una de las características fundamentales de la presentación de este efecto es la alta correlación entre ambos efectos no lineales, lo que implica que no pueden separarse uno del otro. Por lo tanto, al analizar el escenario de XPM, se aprecia una mayor degradación de la señal, ya que tanto el efecto XPM como el SPM se presentan simultáneamente.

3.2 RED MLR TIPO 1 BASADA EN FORMATOS DE MODULACIÓN NRZ-OOK, RZ-OOK Y RZ-DPSK.

Para la red MLR de tipo 1 se cuenta con un escenario de simulación de una red MLR que opera con las 3 velocidades de transmisión que se han trabajado hasta el momento, es decir 2.5/10/40 Gbps. Se les asignan los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-OOK a las velocidades de 2.5 y 10 Gbps, respectivamente. Además, para la velocidad de transmisión de 40 Gbps, se implementa el formato de modulación avanzado RZ-DPSK. Las simulaciones se llevan a cabo considerando tanto el modelo inicial de la red como los análisis previamente realizados en el capítulo anterior. En la tabla 3.2 se presentan los parámetros del modelo general de la red MLR tipo 1.

Parámetros	Valores
Numero de canales	6-10
Potencia de transmisión del laser	0 dBm
Amplificación EDFA	13-15 dBm
Compensación	Ideal
Longitud del enlace	80 km
Longitud de onda	1530 –1550 nm
Tipo de fibra	Corning SMF-28e+
Sensibilidad del receptor	-30 dBm
Formato de modulación a 2.5 Gbps	NRZ-OOK
Formato de modulación a 10 Gbps	RZ-OOK
Formato de modulación a 40 Gbps	RZ-DPSK

Tabla 3.2. Parámetros del modelo general de red MLR tipo 1.

3.2.1 Caso de estudio 1: 2 canales de 2.5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 2 canales de 40 Gbps.

Para el primer caso de estudio se hace uso del modelo de red presentado en el capítulo anterior, en este caso se plantea un modelo de red MLR con un total de 6 canales, en donde se configura 2 canales a una velocidad de transmisión de 2.5 Gbps, 2 canales con una velocidad de transmisión de 10 Gbps y los 2 restantes con una velocidad de 40 Gbps. Además, se seguirá usando la asignación de las velocidades a determinado formato de modulación, es decir los canales de 2.5 Gbps y 10 Gbps

usarán las modulaciones NRZ-OOK y RZ-OOK respectivamente y los canales de 40 Gbps trabajarán con el formato de modulación avanzado RZ-DPSK.

En el diseño de la red, se optó por utilizar una separación de canales de 100 GHz, en conformidad con la grilla espectral establecida por la recomendación ITU-T G.694.1 [4]. Esta elección permite situar el primer canal en una frecuencia central de 193.2 THz, mientras que el último canal se encuentra en una frecuencia de 193.7 THz. Además, se han tomado en cuenta las separaciones adicionales de 50 GHz y 25 GHz presentadas en dicha recomendación.

Con el objetivo de aislar y apreciar de manera más efectiva los fenómenos no lineales, como el SPM y el XPM, es necesario compensar completamente la dispersión cromática. Por lo tanto, se emplea una rejilla de Bragg ideal con una compensación del 100%. Además, se selecciona una frecuencia de 193.45 con el propósito de garantizar una distribución equitativa de los canales de alta capacidad, evitando así que afecten únicamente a canales ópticos específicos. La red tiene una distancia de enlace de 80 km, y 1 km de última milla. La figura 3.11 muestra el escenario de simulación para el primer caso de estudio.

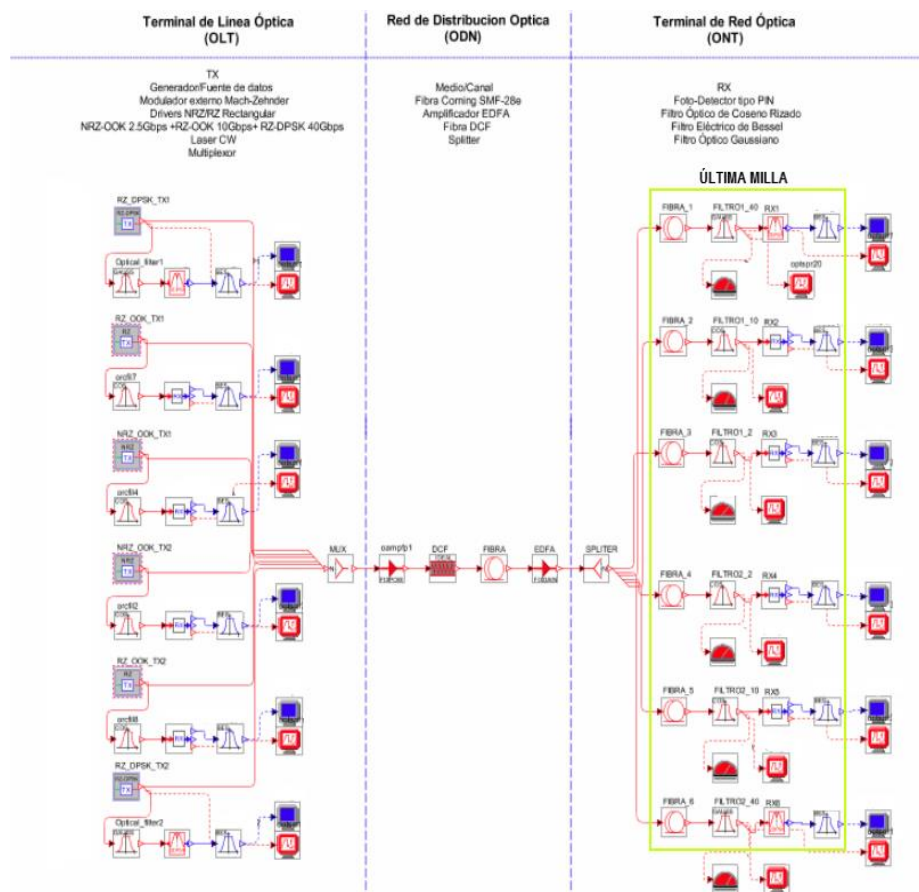
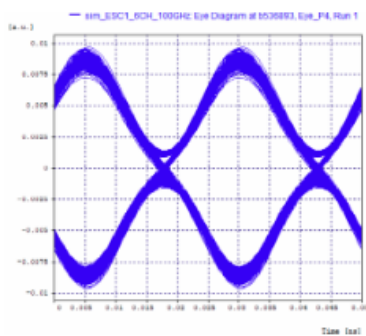


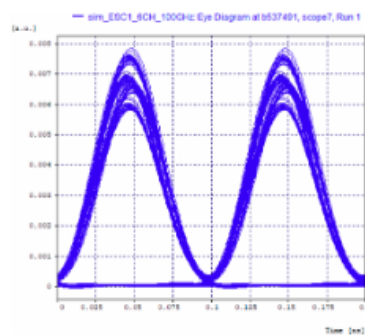
Figura 3.11. Escenario de simulación de la red MLR caso 1.

Desempeño

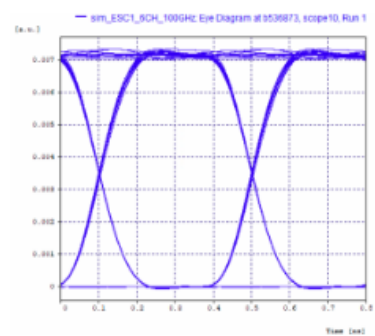
Con base en las características del escenario de simulación previamente presentado, se realiza una evaluación del desempeño. En ese sentido, en las figuras 3.12(a) a 3.12(f) se detallan de manera individual los diagramas de ojo obtenidos en recepción para cada uno de los canales configurados con velocidades de 2,5 Gbps, 10 Gbps y 40 Gbps. Se aprecia que el desempeño en general es satisfactorio para todos los canales según la tabla 3.3, Esto se debe a la compensación ideal utilizada en el sistema y al hecho de que en el sistema todavía no se han realizado las variaciones de algunos parámetros como la dispersión y la potencia, por tanto, no se presentan interferencias y degradaciones notables en recepción.



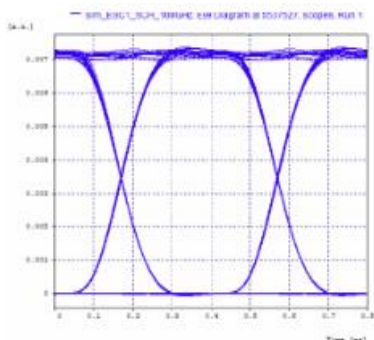
(a) Canal 1 a 40 Gbps.



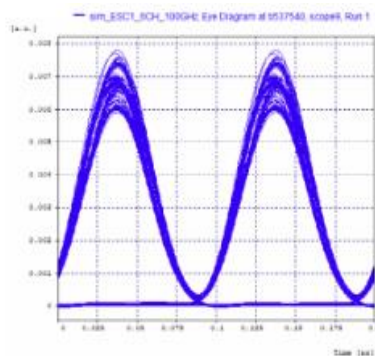
(b) Canal 2 a 10 Gbps.



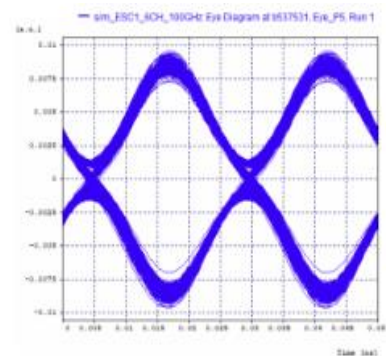
(c) Canal 3 a 2.5 Gbps.



(d) Canal 4 a 2.5 Gbps.



(e) Canal 5 a 10 Gbps.



(f) Canal 6 a 40 Gbps.

Figura 3.12. Diagramas de ojo en recepción.

Canal	Modulación	Velocidad (Gbps)	Potencia RX (dBm)	Factor Q (dB)	BER	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR Real (dB)
1	RZ-DPSK	40	1.04018	28.2768	10^{-40}	0.000204	48.4196	31.0402
2	RZ-OOK	10	-0.78618	21.1769	$3.12 \cdot 10^{-30}$	0.001510	52.9244	29.2138
3	NRZ-OOK	2.5	4.27376	40.0000	10^{-40}	0.087962	54.6254	34.2738
4	NRZ-OOK	2.5	4.62018	40.0000	10^{-40}	0.060842	54.4801	34.6202
5	RZ-OOK	10	-0.69390	22.8098	10^{-40}	0.001363	51.9186	29.3061
6	RZ-DPSK	40	0.90206	28.5728	10^{-40}	0.000275	49.3166	30.9021

Tabla 3.3. Parámetros OPM de la red MLR caso 1.

En la figura 3.13 se muestra el espectro óptico multiplexado obtenido del medio donde se aprecia los seis canales distribuidos a un espaciamiento de 100 GHz. se observa que la presencia de los efectos no lineales es realmente baja y no representan degradaciones apreciables, esto debido a la configuración de los niveles de potencia apropiados para la distancia establecida, además de los dispositivos de compensación y amplificación los cuales generan una reducción de los impactos negativos en la señal cuando esta es transmitida por el medio. No obstante, se observa la presencia de pequeñas distorsiones ocasionadas por la interferencia entre canales (ICI) en el sistema, que surge como consecuencia de la no linealidad inherente de la fibra óptica utilizada.

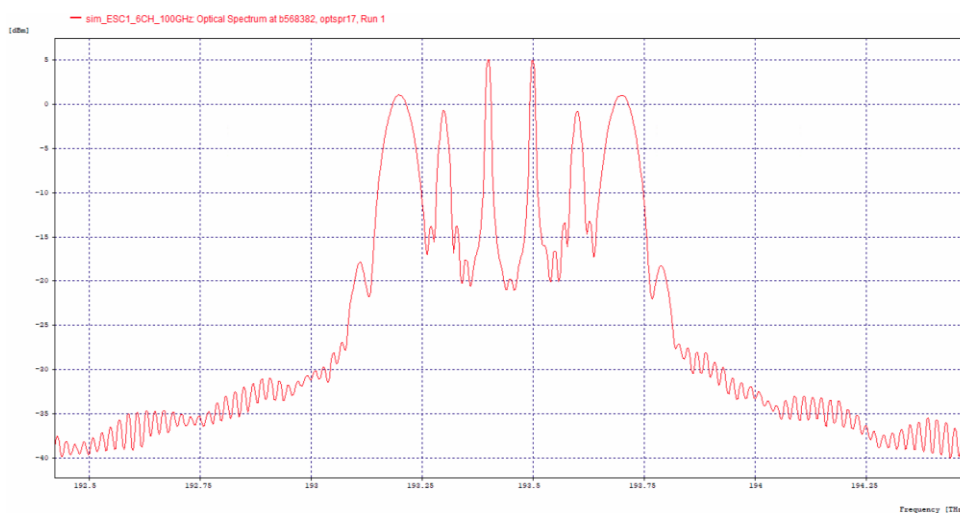


Figura 3.13. Espectro óptico para los seis canales de la red MLR caso 1.

Para un análisis acertado de los fenómenos no lineales SPM y XPM, se debe considerar diversos parámetros, como el número de canales, el espaciamiento entre ellos y los niveles de potencia. De igual forma es crucial evaluar el coeficiente de dispersión de la fibra. A continuación, se estudiarán en detalle estos dos últimos aspectos con el objetivo de analizar el impacto generado por estos dos fenómenos. Así mismo se llevarán a cabo las pruebas realizadas de los efectos SPM y XPM de la sección 3.1, donde la potencia y la dispersión tendrán valores entre 0 a 16 dBm y 0 a 16 ps/nm/km respectivamente.

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la potencia con una separación de 100 GHz entre canales.**

En el primer caso se realiza un análisis de la influencia que tienen los efectos no lineales sobre la red propuesta. para ello se configura un espaciamento de 100 GHz entre los 6 canales y se obtienen los parámetros de desempeño (BER y factor Q, anexo A, tabla 12) para cada uno de los canales que componen la red, en la cual se varía la potencia de los canales 2 y 5 en un rango de 0 a 16 dBm en incrementos de 2 dBm. A continuación, se presentan en la figura 3.14, las gráficas correspondientes a los parámetros de desempeño para el presente caso de estudio.

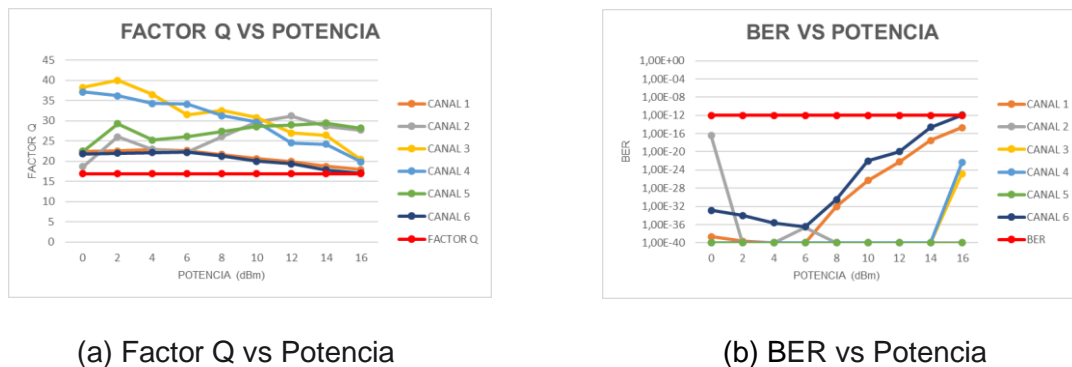
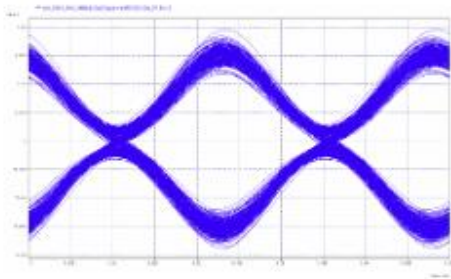


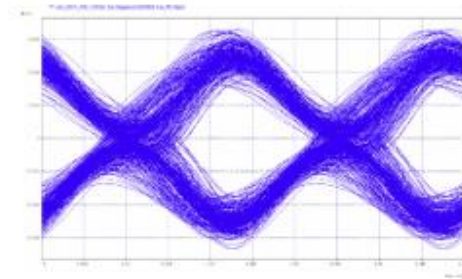
Figura 3.14. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 6 canales con espaciamento de 100 GHz.

Los resultados presentados en la figura 3.14 muestran el comportamiento de cada uno de los canales con respecto a la variación de la potencia, en los canales 1 y 6 correspondientes al formato de modulación RZ-DPSK, se ve que tienen un comportamiento satisfactorio y cumplen con los requerimientos OPM presentados en el capítulo 2, sin embargo al llegar a la potencia de 16 dBm se puede observar que uno de estos canales llega al mínimo requerido de los parámetros de calidad siendo este valor el tope para el análisis del desempeño de estos formatos. En cuanto a los canales 3 y 4 asignados al formato de modulación NRZ-OOK, se puede apreciar un buen desempeño en la BER, sin embargo, se aprecia una disminución continua del factor Q atribuida al aumento en la potencia de los canales adyacentes. En los canales 2 y 5 se presenta un rendimiento óptimo para cada nivel de potencia aplicado, y es que a medida que la potencia se incrementa, se observa una mejora progresiva en los parámetros de monitoreo óptico en estos canales asignados al formato de modulación RZ-OOK. Aunque algunos canales comparten la misma velocidad de transmisión y formato de modulación, se puede observar que los resultados obtenidos difieren entre sí, dicho comportamiento es atribuido a la posición en la que se encuentran a una frecuencia determinada y a la respuesta de la fibra óptica a las diversas longitudes de onda.

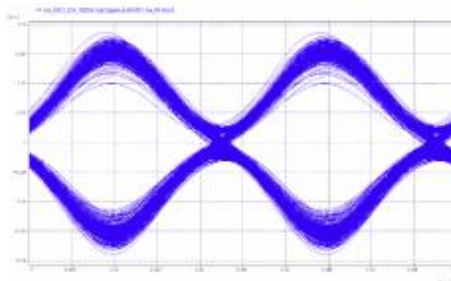
En las figuras 3.15(a) a 3.15(d), se presentan los diagramas del ojo en recepción correspondientes a los canales 1 y 6. Estos gráficos muestran la degradación de los canales debido al efecto XPM, que se produce por la variación de la potencia en los canales 2 y 5. Aunque se observa esta degradación, no tiene un impacto significativo en la calidad de la señal, ya que todavía se cumplen los parámetros de desempeño requeridos.



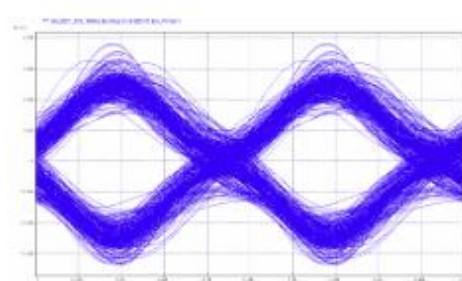
(a) Diagrama del ojo canal 1 a 0 dBm.



(b) Diagrama del ojo canal 1 a 16 dBm.



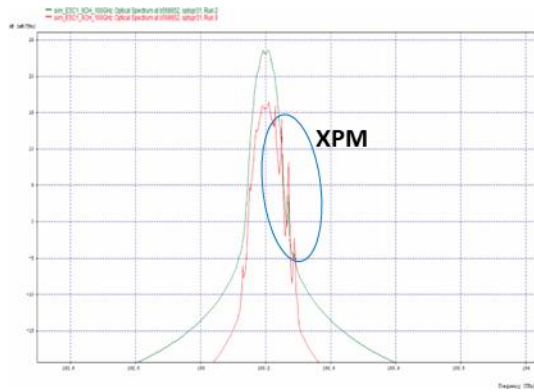
(c) Diagrama del ojo canal 6 a 0 dBm.



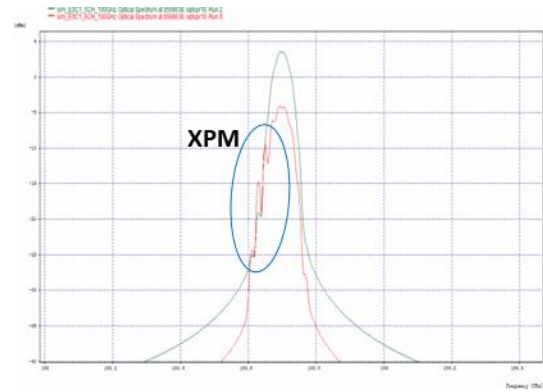
(d) Diagrama del ojo canal 6 a 16 dBm.

Figura 3.15. Diagramas de ojo para los canales 1 y 6 en recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm y 16 dBm en el canal 2 y 5.

En las figuras 3.16(a) a 3.16(b), se presentan los espectros ópticos en recepción correspondientes a los canales 1 y 6. A pesar del incremento de la potencia de transmisión de los canales 2 y 5, las deformaciones causadas por el efecto XPM fueron mínimas y apenas perceptibles en los espectros, sin embargo, es notable la caída en el rendimiento de los parámetros de desempeño y a su vez la aparición de interferencias generadas por los canales adyacentes. Es importante mencionar que el formato de modulación y la velocidad asignada a los canales 1 y 6, demandan cierto espaciamiento que al no cumplirse intensifican los efectos de interferencia y empeora la calidad de la señal.



(a) Espectro óptico canal 1.



(b) Espectro óptico canal 6.

Figura 3.16. Espectro óptico en recepción para los canales 1 y 6, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.

En la figura 3.18 se presenta el espectro óptico multiplexado obtenido del medio, donde se pueden apreciar seis canales distribuidos con un espaciamiento de 100 GHz, en donde se evaluó la potencia en un rango de 0 a 16 dBm en los canales 2 y 5. Como se mencionó anteriormente, SPM y XPM son dos efectos que están ligados entre sí, por ende es muy difícil apreciar las degradaciones atribuidas a cada uno, no obstante a medida que aumenta la potencia de los canales RZ-OOK, el efecto XPM provoca deformaciones en el espectro y se observa que los canales más afectados son aquellos con una tasa de transmisión alta, es decir, los canales 1 y 6. Por otra lado, los canales 2 y 5 experimentan una ligera modificación en su espectro debido a que la intensidad de los demás canales es menor en comparación con su intensidad de potencia. Como resultado, su espectro se mantiene simétrico. Además de la presencia de pequeñas distorsiones en los costados también se observa la aparición del fenómeno FWM contando con dos lóbulos apenas apreciables para el nivel de potencia más alto.

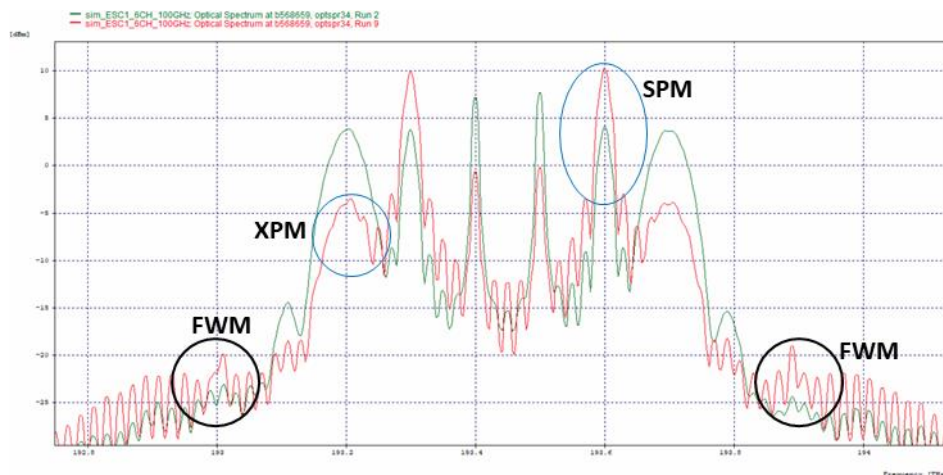
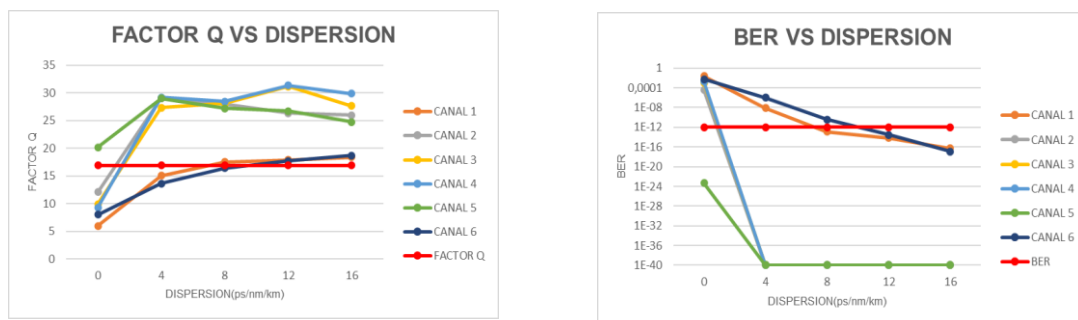


Figura 3.18. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la dispersión con una separación de 100 GHz entre canales.**

Para este análisis se realiza una variación de la dispersión en un rango de 0 ps/nm/km a 16 ps/nm/km que corresponde al valor típico de la fibra Corning SMF-28e+, con el fin de verificar si la dispersión de la fibra tiene un impacto considerable en el comportamiento de los efectos no lineales, se configura el escenario de la siguiente manera; se mantiene la potencia de los canales 2 y 5 en 10 dBm y se fija la de los canales restantes en 0 dBm, y al amplificador BOOSTER se le asigna una potencia de 15 dBm. En la figura 3.19, se presentan las gráficas correspondientes a los parámetros de desempeño para esta configuración (Anexo, tabla 13).



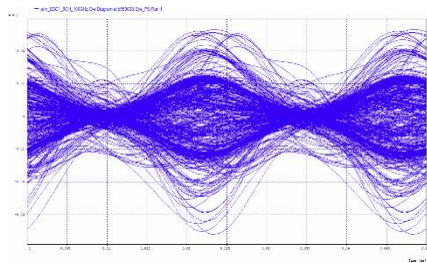
(a) Factor Q vs Dispersión

(b) BER vs Dispersión

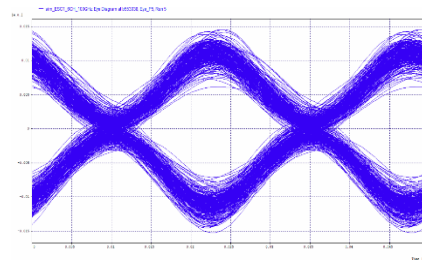
Figura 3.19. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 6 canales con espaciamiento de 100 GHz.

Los resultados presentados en la figura 3.19 muestran el comportamiento de cada uno de los canales con respecto a la variación de la dispersión. Para valores mayores a 9 ps/nm/km de la fibra, los canales 1 y 6, muestran un comportamiento satisfactorio que cumple con los requerimientos OPM presentados en el capítulo 2. Sin embargo, para valores inferiores de dispersión se ven afectados evitando que cumplan con el mínimo requerido de los parámetros de calidad. Por otro lado en el canal 5, configurado como un canal de bombeo tiene un rendimiento que satisface los requerimiento de desempeño en todos los valores de dispersión mientras que en el que el canal 2 se logra a partir de los 2 ps/nm/km, este comportamiento se le atribuye a la posición de estos en la grilla espectral, para los canales restantes los niveles de BER y factor Q mejoran con el aumento de la dispersión, a excepción de la dispersión nula, dicho valor (0 ps/nm/km) representa un punto crítico en términos de degradación del sistema, pero incluso un ligero aumento en este valor resulta en una mejora significativa.

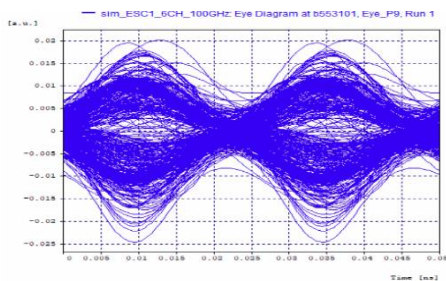
En las figuras 3.20(a) a 3.20(d), se presentan los diagramas del ojo en la recepción correspondientes a los canales 1 y 6, considerando una dispersión de fibra de 0 y 16 ps/nm/km. En las figuras 3.20(a) y 3.20(c), se observa la degradación ocasionada por una dispersión de 0 ps/nm/km, lo que provoca distorsión en el diagrama del ojo del canal recibido y resultados adversos en los parámetros OPM. Esto se debe al efecto de la XPM en estos canales. Estos resultados confirman el impacto significativo de la dispersión en la aparición de los efectos no lineales, que se manifiestan de manera más pronunciada cuando la dispersión de la fibra se acerca a los 0 ps/nm/km.



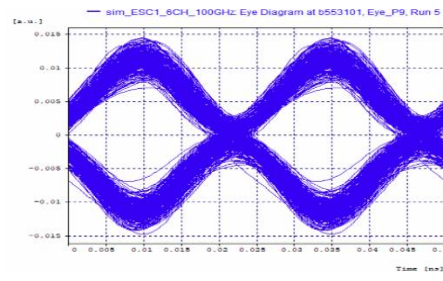
(a) Canal 1 para CD=0 ps/nm/km.



(b) Canal 1 para CD= 16 ps/nm/km.



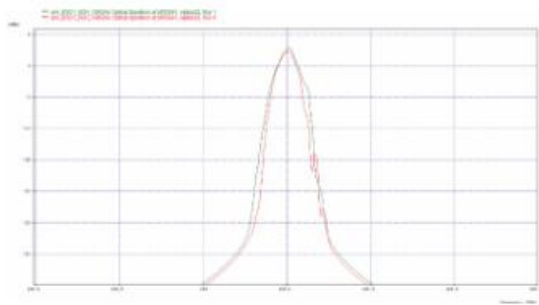
(c) Canal 6 para CD=0 ps/nm/km.



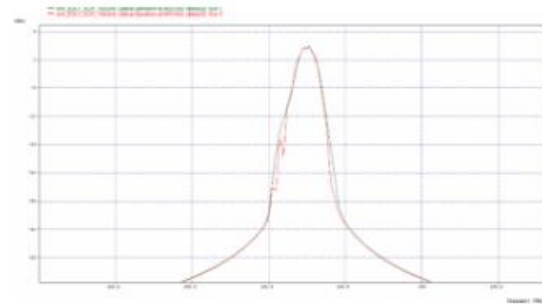
(d) Canal 6 para CD= 16 ps/nm/km.

Figura 3.20. Diagramas de ojo para el canal 1 y 6 en recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km y 16 ps/nm/km.

En la figura 3.21 se presentan los diagramas de espectro en la recepción de los canales 1 y 6, bajo el efecto de XPM para una dispersión de la fibra de 0 y 16 ps/nm/km. Al comparar los dos valores de dispersión seleccionados, se puede apreciar el ensanchamiento del espectro causado por XPM en los canales en recepción, se aprecia que el ensanchamiento generado por XPM es más significativo cuando el valor de dispersión de la fibra es de 0 ps/nm/km.



(a) Espectro óptico canal 1.



(b) Espectro óptico canal 6.

Figura 3.21. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 6, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

En la Figura 3.22 se muestra el espectro óptico multiplexado obtenido del medio utilizando un coeficiente de dispersión de 0 ps/nm/km, en este caso se observa una clara degradación de la señal que llega al receptor. En contraste se presenta la figura correspondiente a 16 ps/nm/km, en la cual se puede apreciar la asimetría del ensanchamiento espectral generado por XPM. Los canales 2 y 5 presentan una deformación moderada en su espectro en comparación con los demás canales. Esto se debe al fenómeno SPM relacionado con la potencia asignada a cada canal. Es importante destacar que con una dispersión de 0 ps/nm/km, se disparan todos los efectos no lineales, especialmente en los canales de baja potencia.

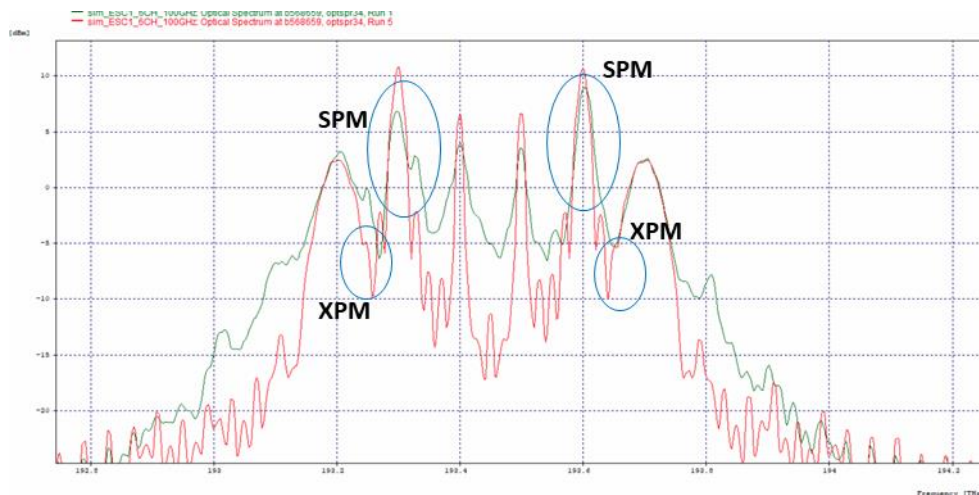
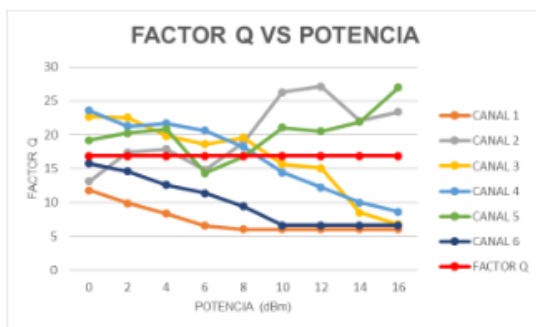


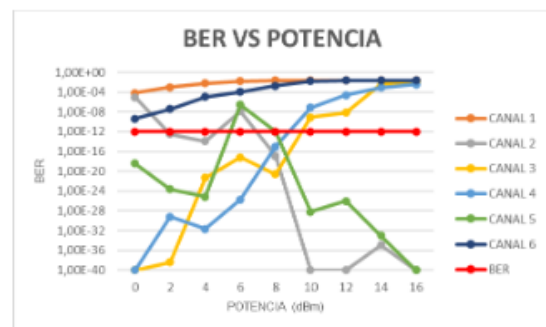
Figura 3.22. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la potencia con una separación de 50 GHz entre canales.**

En siguiente caso se configura un espaciamiento de 50 GHz entre los 6 canales y se obtienen los parámetros de desempeño (Anexo, tabla 14) para cada uno de los canales que componen la red, en la cual se varía la potencia de los canales 2 y 5 en un rango de 0 a 16 dBm en incrementos de 2 dBm, con el fin de analizar la influencia de los efectos no lineales sobre la red propuesta. A continuación, se presentan en la figura 3.23, las gráficas correspondientes a los parámetros de desempeño para el presente caso de estudio.



(a) Factor Q vs Potencia

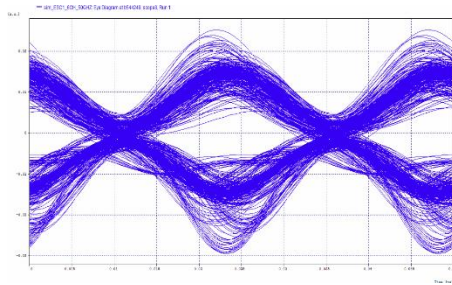


(b) BER vs Potencia

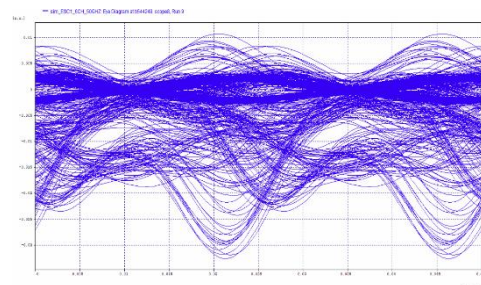
Figura 3.23. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 6 canales con espaciamiento de 50 GHz.

Los resultados de la figura 3.23 muestran el comportamiento de cada uno de los canales con respecto a la variación de la potencia. Los canales 1 y 6 no cumplen ninguno de los requerimientos de desempeño para los valores de potencia estudiados, esto se debe a que requieren un espaciamiento mayor entre canales, lo cual genera interferencia y degrada el rendimiento de los canales con mayor velocidad cuando se incrementa la potencia en los canales adyacentes. En contraste, los canales 2 y 5 presentan un rendimiento óptimo para cada nivel de potencia aplicado y es que a medida que aumenta la potencia, se observa una mejora progresiva en los parámetros de monitoreo óptico. Sin embargo, es importante destacar que los resultados obtenidos varían para valores menores a 2 dBm. Este comportamiento se atribuye a la posición relativa en una frecuencia determinada y a la respuesta de la fibra óptica a diferentes longitudes de onda. En cuanto a los canales 3 y 4, muestran un comportamiento satisfactorio y cumplen con los requisitos de desempeño OPM para valores de potencia menores a 8 dBm. Sin embargo, cuando se supera ese umbral, ambos canales no alcanzan el mínimo requerido en los parámetros de calidad.

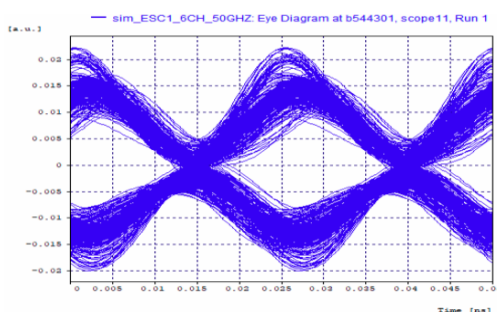
En las figuras 3.24(a) a 3.24(d), se presentan los diagramas del ojo en recepción correspondientes a los canales 1 y 6. Estos gráficos muestran la degradación de los canales debido al efecto XPM, que se produce por la variación de la potencia en los canales 2 y 5. Estas degradaciones generadas por los canales adyacentes, tienen un impacto significativo en la calidad de la señal, ya que no se cumple con ninguno de los parámetros de desempeño bajo los niveles de potencia analizados y es que conforme se aumenta la potencia, la influencia de los efectos no lineales y la interferencia degradan completamente la señal.



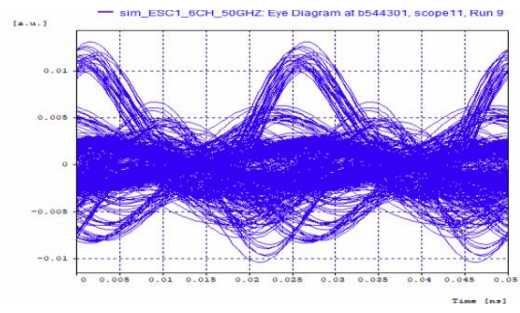
(a) Diagrama del ojo canal 1 a 0 dBm.



(b) Diagrama del ojo canal 1 a 16 dBm.



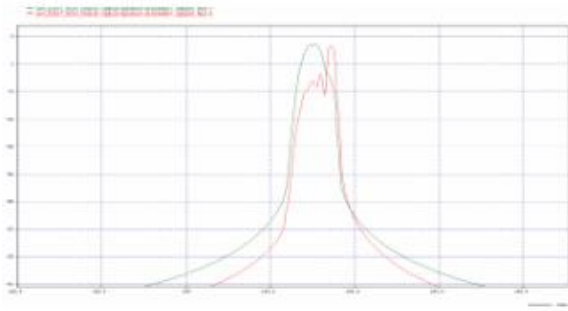
(c) Diagrama del ojo canal 6 a 0 dBm.



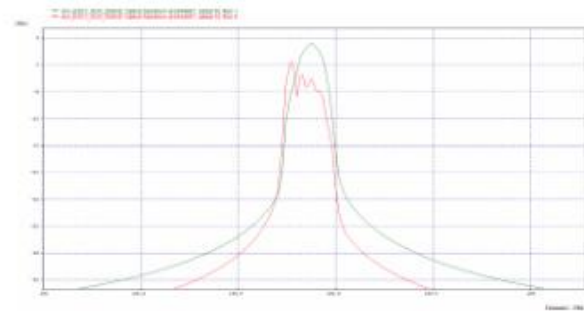
(d) Diagrama del ojo canal 6 a 16 dBm.

Figura 3.24. Diagramas de ojo para el canal 1 y 6 en recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm y 16 dBm en el canal 2 y 5.

El diagrama del espectro óptico en la recepción de los canales 1 y 6, presentados en la figura 3.25, muestran de manera clara que la interferencia se incrementa notablemente cuando la potencia de los canales adyacentes alcanza los 16 dBm. Es importante destacar que el ensanchamiento y la deformación son propios del efecto XPM el cual es generado por el canal contiguo. Además, esta interferencia provoca una distorsión considerable lo cual ocasiona daños en la calidad de la señal.



(a) Espectro óptico canal 1.



(b) Espectro óptico canal 6.

Figura 3.25. Espectro óptico en la recepción para el canal 1 y 6, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.

En la figura 3.26 se presenta el espectro óptico multiplexado obtenido del medio, donde se pueden apreciar que el número de canales obtenido se ha reducido para un espaciamiento de 50 GHz, en donde se evaluó la potencia en un rango de 0 a 16 dBm en los canales 2 y 5. Debido a la separación entre canales escogida en este caso se perjudicó notablemente el espectro de los canales transmitidos lo cual se hace más evidente cuando se aumenta la potencia de los canales RZ-OOK, lo que genera que las degradaciones atribuidas a los efectos no lineales sean notables en los canales que emplean el formato de modulación RZ-DPSK a 40 Gbps. En el espectro óptico no se hace indiferente la presencia de pequeñas distorsiones ocasionadas por la ICI, ya que estas se encuentran ligadas a la no linealidad y a las configuraciones empleadas para este caso. Por lo tanto, se hace más difícil alcanzar los niveles de desempeño establecidos en el capítulo dos.

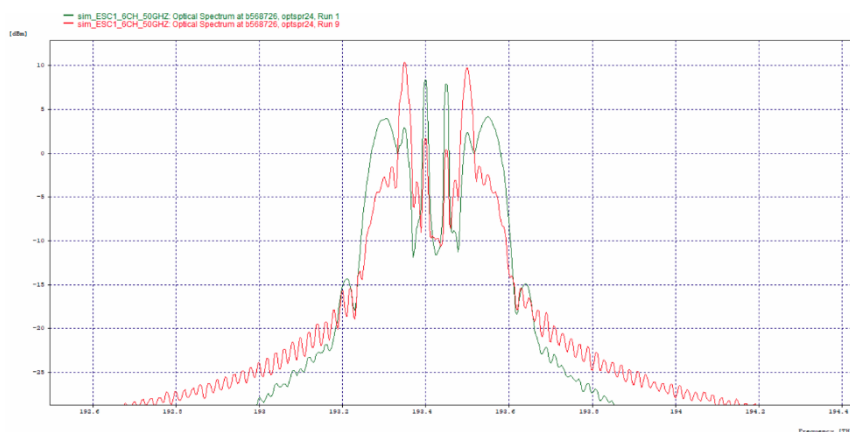
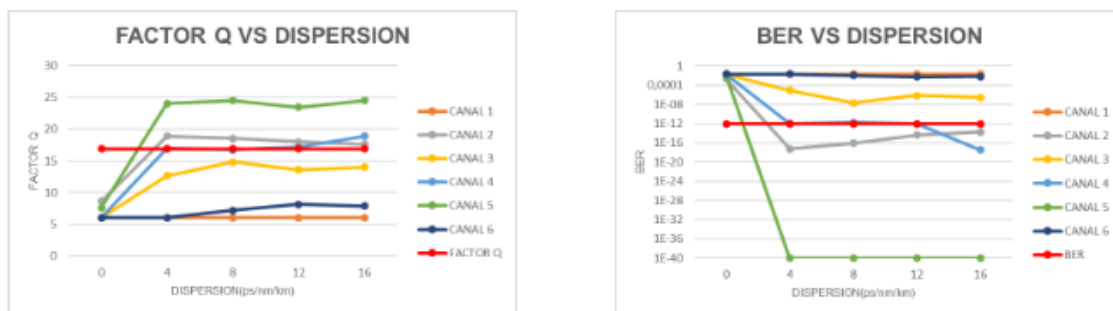


Figura 3.26. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la dispersión con una separación de 50 GHz entre canales.**

Con el propósito de realizar un análisis en este caso, se evaluó el valor de la dispersión en un rango de 0 a 16 ps/nm/km para validar las degradaciones en los parámetros OPM. Se configuró un espaciamiento entre canales de 50 GHz y se ajustó la potencia de los canales 2 y 5 a 10 dBm, mientras que los demás canales se mantuvieron en 0 dBm. Esta configuración se seleccionó para permitir una evaluación de los formatos de modulación avanzados empleados. En la figura 3.27 se presentan las gráficas correspondientes a los parámetros de desempeño para esta configuración (Anexo, tabla 15).



(a) Factor Q vs Dispersión

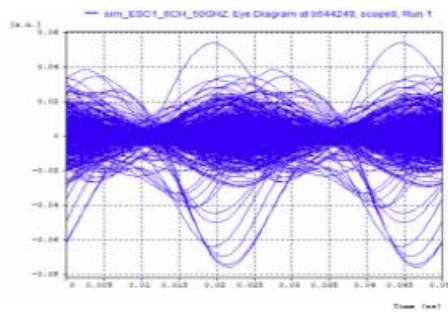
(b) BER vs Dispersión

Figura 3.27. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 6 canales con espaciamiento de 50 GHz.

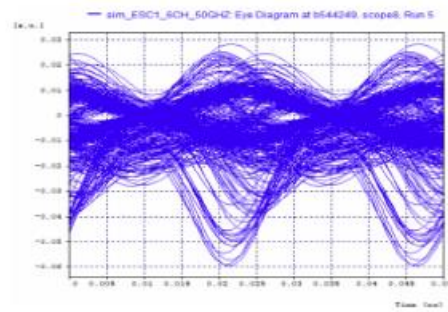
La figura 3.27 presenta los resultados del comportamiento de cada canal en relación con la variación de la dispersión. Para valores de dispersión mayores a 4 ps/nm/km, se observa que los canales 2, 4 y 5 cumplen de manera aceptable con los parámetros OPM establecidos en el capítulo 2. Por el contrario, los canales 1, 3 y 6 se ven afectados y no logran alcanzar el mínimo requerido en términos de calidad para todos los valores de dispersión analizados. Es importante destacar que, en el caso de la dispersión nula (0 ps/nm/km), ninguno de los seis canales cumple con los parámetros de desempeño establecidos, lo que representa un punto crítico en el análisis del sistema y resalta la importancia de considerar la dispersión como un factor determinante en la calidad de la transmisión.

En las figuras 3.28(a) a 3.28(d), se aprecia que los diagramas de ojo correspondientes a los canales 1 y 6 presentan un deterioro completo. Esta situación muestra un impacto significativo en la señal, lo cual puede atribuirse a varios factores. Por un lado, el espaciamiento entre canales tiene un papel importante que al no cumplirse puede generar un efecto adverso logrando afectar la calidad de la transmisión. Además, la presencia de los efectos no lineales SPM y XPM contribuyen a la

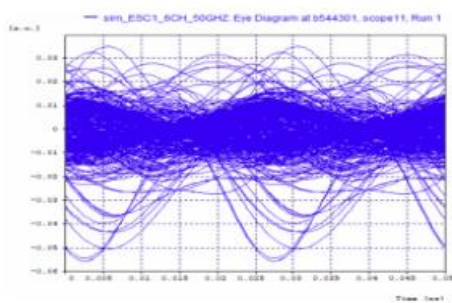
degradación de los parámetros de desempeño OPM, este deterioro indica claramente un daño significativo en la transmisión, lo cual impide una apertura de ojo aceptable dificultando la interpretación de la información provocando errores en el sistema de comunicación.



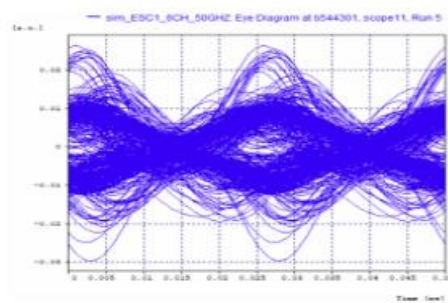
(a) Canal 1 para $CD=0$ ps/nm/km.



(b) Canal 1 para $CD= 16$ ps/nm/km.



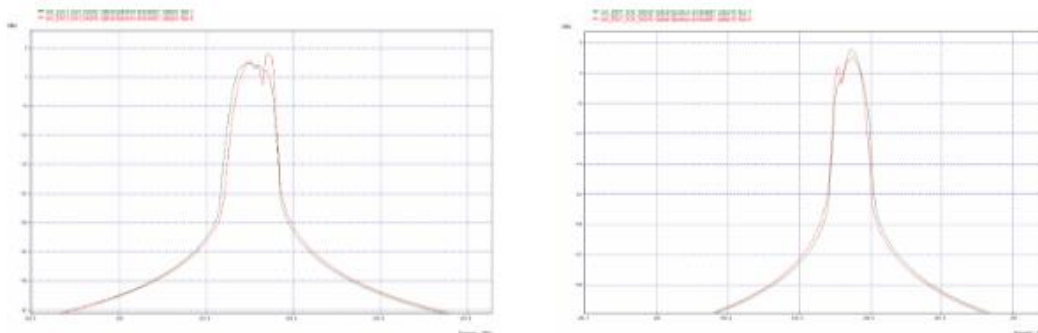
(c) Canal 6 para $CD=0$ ps/nm/km.



(d) Canal 6 para $CD= 16$ ps/nm/km.

Figura 3.28. Diagramas de ojo para el canal 1 y 6 en recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km y 16 ps/nm/km.

En la figura 3.29 se presentan los diagramas de espectro en recepción de los canales 1 y 6, considerando una dispersión de la fibra de 0 y 16 ps/nm/km. Al comparar estos dos valores de dispersión, se puede observar el ensanchamiento del espectro causado por XPM en los canales receptores. Se puede apreciar que la potencia configurada en los canales 2 y 5 genera una interferencia que dificulta la detección de la presencia de XPM para los diferentes niveles de dispersión. Sin embargo, se aprecia un mayor ensanchamiento del espectro en el lado opuesto a los canales 2 y 5 cuando la dispersión es nula. Por otro lado, para valores de dispersión más altos, se puede observar el efecto de la XPM como una deformación atribuida a la diferencia de potencia entre los canales RZ-DPSK y los canales 2 y 5.



(a) Espectro óptico canal 1.

(b) Espectro óptico canal 6.

Figura 3.29. Espectro óptico en la recepción para el canal 1 y 6, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

En la Figura 3.30 se muestra el espectro óptico multiplexado obtenido del medio en el cual se observa la degradación en la señal que llega al receptor. Al comparar los dos niveles de dispersión, se observa que la señal con coeficiente de dispersión de 16 ps/nm/km está siendo menos afectada por la XPM, ya que cuando se emplea una dispersión de 0 ps/nm/km, se nota una total degradación en la señal transmitida. En el valor más grande de dispersión es posible apreciar que los canales correspondientes a los formatos de modulación avanzadas están afectados por la potencia de los canales adyacentes, lo cual puede atribuirse a la necesidad de un ancho de banda mayor para la transmisión de los canales 1 y 6.

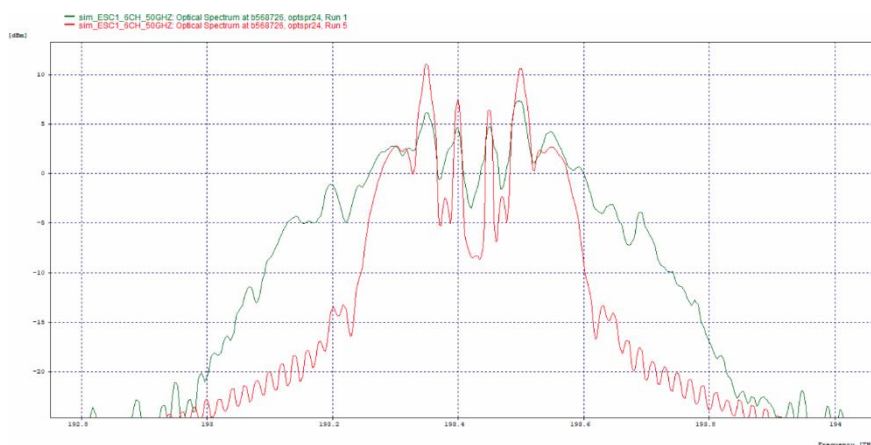
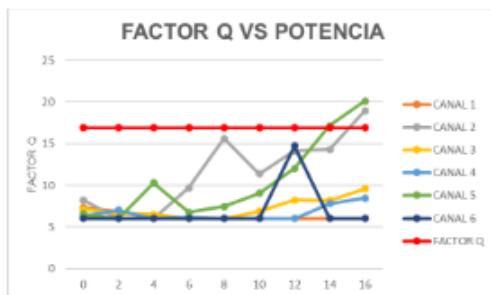


Figura 3.30. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

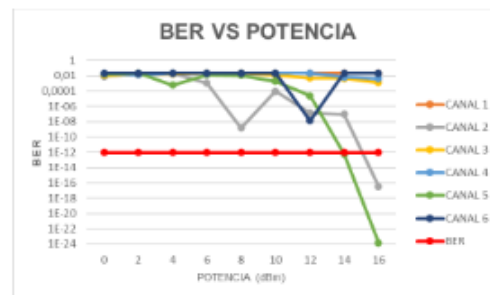
- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la potencia con una separación de 25 GHz entre canales.**

Para este caso en particular, se establece un espaciamiento de 25 GHz entre los seis canales, y se procede a obtener los parámetros de desempeño para cada uno de ellos en la red (Anexo, Tabla 16). En esta configuración, se varía la potencia de los canales 2 y 5 en un rango desde 0 hasta 16 dBm, con incrementos de 2 dBm. En la Figura 3.31, se presentan las gráficas que ilustran los resultados obtenidos para estos parámetros de desempeño.

Debido al espaciamiento tan reducido entre los canales, se observa que el desempeño en la mayoría de ellos resulta insuficiente, sin lograr cumplir con los requisitos de BER ni con el factor Q establecido. Es importante destacar que únicamente los canales 2 y 5, los cuales han sido configurados para incrementar su potencia, logran satisfacer dichos requerimientos únicamente cuando se alcanzan potencias superiores a 14 dBm.



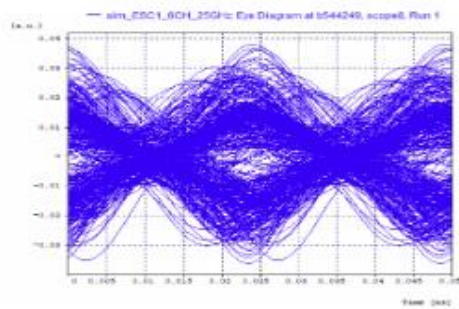
(a) Factor Q vs Potencia



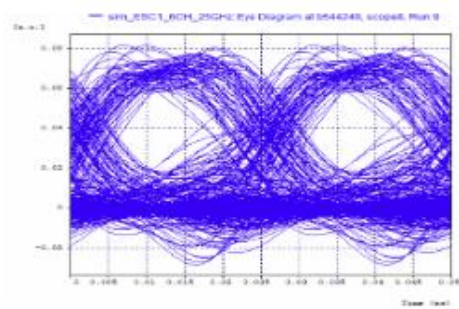
(b) BER vs Potencia

Figura 3.31. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 6 canales con espaciamiento de 25 GHz.

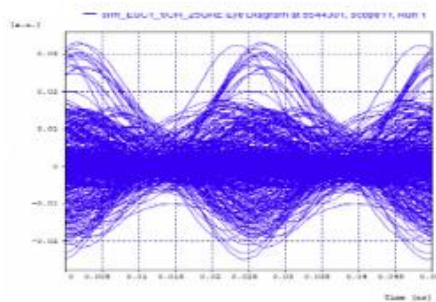
Las figuras 3.32(a) a 3.32(d) muestran un deterioro completo en los diagramas de ojo de los canales 1 y 6, lo cual tiene un impacto significativo en la calidad de la señal transmitida. Esto puede atribuirse al espaciamiento inadecuado entre canales, el ruido, la distorsión y a la presencia de efectos no lineales como SPM y XPM. Estos factores contribuyen a la degradación de los parámetros de desempeño, dificultando obtener una calidad de señal que cumpla con los parámetros de desempeño.



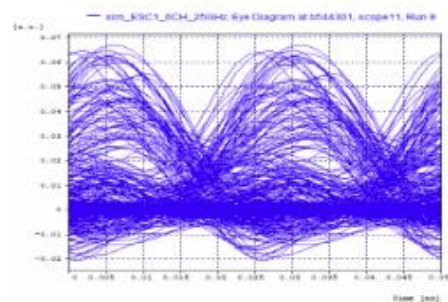
(a) Diagrama del ojo canal 1 a 0 dBm.



(b) Diagrama del ojo canal 1 a 16 dBm.



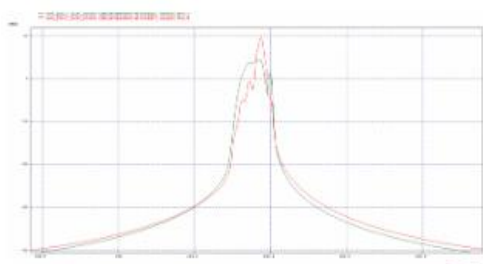
(c) Diagrama del ojo canal 6 a 0 dBm.



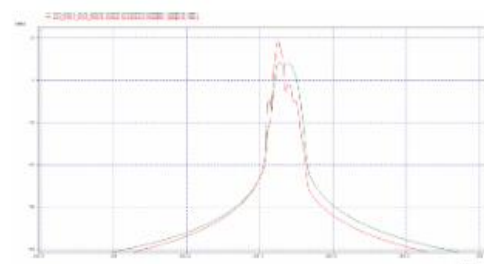
(d) Diagrama del ojo canal 6 a 16 dBm.

Figura 3.32. Diagramas de ojo para el canal 1 y 6 en recepción , RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm y 16 dBm en el canal 2 y 5.

En la figura 3.33 se observa el diagrama del espectro óptico en recepción de los canales 1 y 6. Es evidente que la interferencia experimenta un notable aumento cuando la potencia de los canales adyacentes alcanza los 16 dBm. Es importante destacar que tanto el ensanchamiento como la deformación característicos del efecto XPM se han intensificado en comparación con análisis anteriores. Lo anterior se atribuye al espaciamiento configurado en el sistema, el cual está contribuyendo a aumentar el impacto de los efectos no lineales en la transmisión óptica.



(a) Espectro óptico canal 1.



(b) Espectro óptico canal 6.

Figura 3.33. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 6, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.

En la figura 3.34 se presenta el espectro óptico multiplexado obtenido del medio, debido al espaciamiento configurado en la red la interferencia ha tomado un rol protagónico ya que algunos canales tienen asignada una tasa de transmisión que requiere de cierto espaciamiento para cumplir con los requisitos mínimos de los parámetros OPM establecidos. La elección de esta separación entre canales perjudica el desempeño en los canales transmitidos, especialmente cuando se aumenta la potencia de los canales 2 y 5, ya que esto resulta en notables degradaciones que se aprecian para todos los niveles de potencia en los canales 1 y 6.

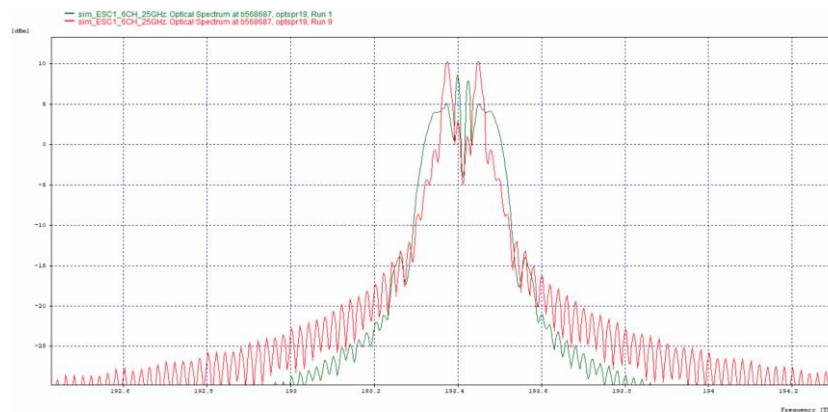
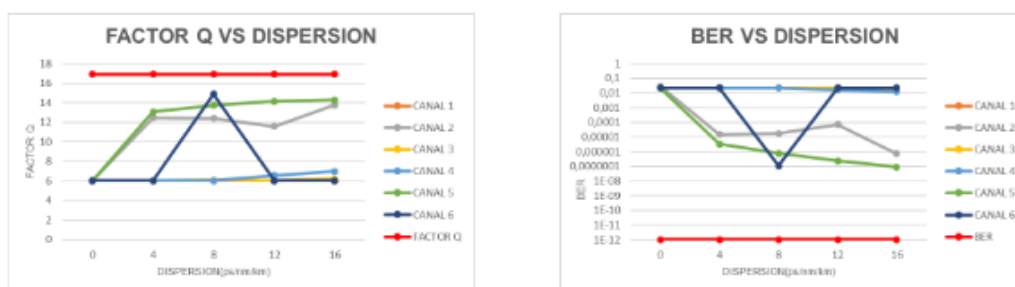


Figura 3.34. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la dispersión con una separación de 25 GHz entre canales.**

En cuanto a la variación de la dispersión con una separación de 25 GHz entre canales, como se muestra en la figura 3.35 (Anexo, Tabla 17), es preciso mencionar que ningún canal cumple con el mínimo requerido para satisfacer los parámetros OPM establecidos. Por lo tanto, no se presenta un análisis específico para los formatos de modulación bajo estas condiciones. Debido a que la dispersión es un parámetro importante en los sistemas de transmisión de redes ópticas, se puede apreciar que un valor mínimo de dispersión junto con un espaciamiento reducido impide que todos los canales alcancen un rendimiento adecuado para cumplir con los requisitos mínimos de los parámetros OPM. Además, al analizar el diagrama de ojo y el espectro en recepción, se observa una degradación masiva de la señal transmitida sin posibilidad de recuperación.



(a) Factor Q vs Dispersión

(b) BER vs Dispersión

Figura 3.35. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 6 canales con espaciamiento de 25 GHz.

3.2.2 Caso de estudio 2: 4 canales de 2.5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 4 canales de 40 Gbps.

En este segundo caso de estudio se hace uso del escenario de red propuesto en el caso anterior, pero se agregan 4 canales. La organización de estos canales permite mantener las condiciones de estudio del caso anterior mediante un análisis y esquema similares. Por tal motivo, se agregan dos canales de 40 Gbps con formato de modulación RZ-DPSK en los extremos de la red, que acompañarán a los dos ya existentes, además de 2 canales de 2.5 Gbps en el interior.

La organización de los canales sería la siguiente: los canales 1, 2, 9 y 10 utilizarán velocidades de 40 Gbps; los canales 3 y 8 trabajarán a velocidades de 10 Gbps, y los canales 4, 5, 6 y 7 se les asignará una velocidad de 2.5 Gbps. Los formatos de modulación asignados a cada velocidad serán RZ-DPSK, RZ-OOK y NRZ-OOK, respectivamente. Además, se decide mantener una separación de canales de 100 GHz, en conformidad con la recomendación ITU-T G.694.1 [4]. Esta elección permite situar el primer canal en una frecuencia central de 193.0 THz, mientras que el último canal se encuentra en una frecuencia de 193.9 THz. Para análisis posteriores se tomarán en cuenta las separaciones adicionales de 50 GHz y 25 GHz presentadas en dicha recomendación.

En la figura 3.36 se presenta el escenario de simulación propuesto para este caso de estudio, en donde se decide compensar la dispersión cromática por medio de una rejilla de Bragg ideal con una compensación del 100%, con el fin de aislar y apreciar de manera más efectiva los fenómenos no lineales, como el SPM y el XPM. La red contará con una distancia de enlace de 80 km, y 1 km de última milla.

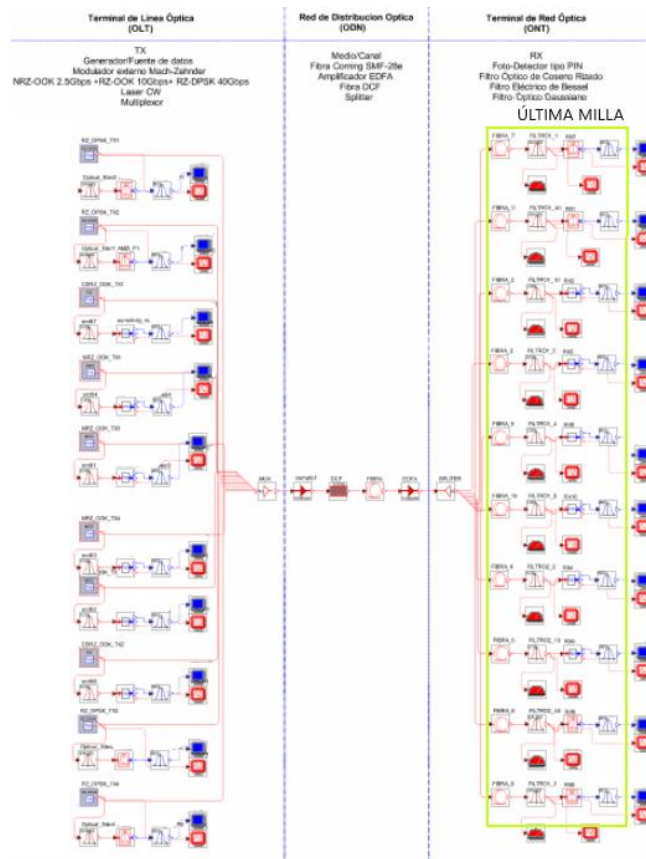


Figura 3.36. Escenario de simulación de la red MLR caso 2.

A partir de las características del escenario de simulación previamente expuesto, se lleva a cabo una evaluación del rendimiento, el cual se muestra satisfactorio en general para todos los canales según la tabla 3.4. Esta situación se debe a la utilización de una compensación ideal en el sistema y al hecho de que aún no se han realizado variaciones en algunos parámetros, como la dispersión y la potencia.

Canal	Modulación	Velocidad (Gbps)	Potencia RX (dBm)	Factor Q (dB)	BER	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR Real (dB)
1	RZ-DPSK	40	1.2118	25.3646	10^{-40}	0.000637	47.9314	31.2118
2	RZ-DPSK	40	1.0950	25.1784	10^{-40}	0.000639	48.2474	31.0950
3	RZ-OOK	10	-0.4858	19.0444	$6.86 \cdot 10^{-19}$	0.002150	51.5807	29.5142
4	NRZ-OOK	2.5	4.9229	27.9412	10^{-40}	0.022635	54.6243	34.9229
5	NRZ-OOK	2.5	5.3280	34.4911	10^{-40}	0.083159	54.1908	35.3280
6	NRZ-OOK	2.5	5.4345	37.5164	10^{-40}	0.083518	54.5301	35.4345
7	NRZ-OOK	2.5	4.6583	35.4706	10^{-40}	0.087685	55.2739	34.6583
8	RZ-OOK	10	-0.6882	21.6305	$4.47 \cdot 10^{-32}$	0.001291	53.5067	29.3118
9	RZ-DPSK	40	1.0933	24.0395	10^{-40}	0.000702	49.8231	31.0933
10	RZ-DPSK	40	1.3564	24.8313	10^{-40}	0.000675	49.9258	31.3564

Tabla 3.4. Parámetros OPM de la red MLR caso 2.

En la figura 3.37 se muestra el espectro óptico multiplexado obtenido del medio, donde se aprecian los diez canales distribuidos con un espaciamiento de 100 GHz. Es posible observar la aparición de distorsiones ocasionadas por la interferencia entre

canales (ICI) en el sistema. Además, se puede apreciar en los canales ubicados en los extremos una superposición debido a que la velocidad asignada en esta demanda un mayor ancho de banda. Debido a la configuración actual del sistema y al hecho de que aún no se han variado parámetros como la potencia y la dispersión, la presencia de los efectos no lineales no ha introducido degradaciones apreciables que afecten negativamente el desempeño del sistema.

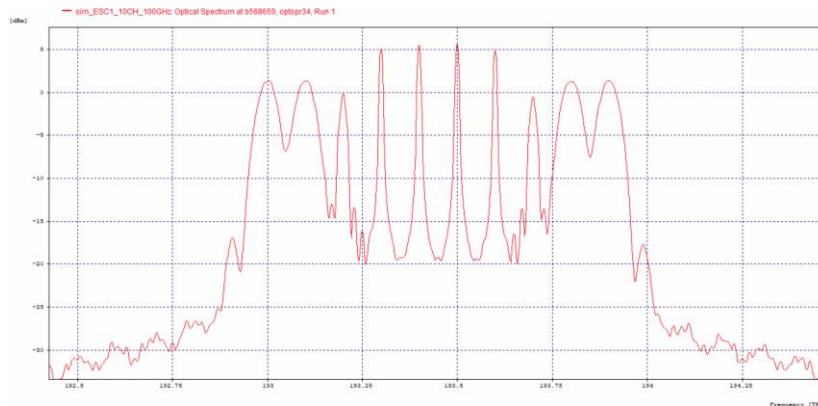
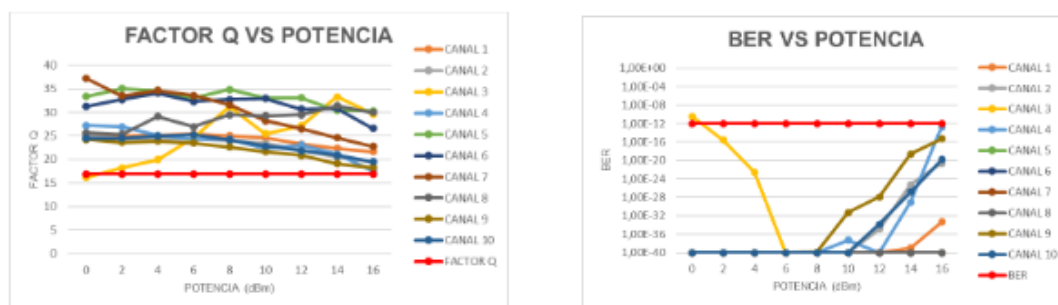


Figura 3.37. Espectro óptico para los seis canales de la red MLR caso 2.

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la potencia con una separación de 100 GHz entre canales.**

Se realiza una configuración en la cual se establece un espaciamiento de 100 GHz entre los diez canales de la red. Para cada uno de estos canales, se obtienen los parámetros de desempeño, como el BER y el factor Q (Anexo, tabla 18). Con el propósito de llevar a cabo un análisis sobre la influencia de los efectos no lineales en la red propuesta, se procede a variar la potencia de los canales 3 y 8, en un rango de 0 a 16 dBm, con incrementos de 2 dBm. Los resultados de este estudio se visualizan mediante las gráficas de la figura 3.38, proporcionando una representación clara de la red en presencia de los efectos no lineales.



(a) Factor Q vs Potencia

(b) BER vs Potencia

Figura 3.38. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 10 canales con espaciamiento de 100 GHz.

Los resultados presentados en la figura 3.38 muestran que los canales 1, 2, 9 y 10, los cuales utilizan el formato de modulación RZ-DPSK, presentan un comportamiento satisfactorio y cumplen con los requerimientos OPM establecidos en el capítulo 2 en cuanto a los niveles de potencia a los que se varían los canales 3 y 8. Sin embargo, el rendimiento de algunos de los canales con mayor tasa de velocidad está directamente relacionado con el aumento de potencia en los canales RZ-OOK, y se espera que, para valores superiores, no cumplan con los requisitos mínimos de los parámetros de calidad. Por otro lado, los canales 4, 5, 6 y 7, que utilizan el formato de modulación NRZ-OOK, presentan un comportamiento similar al mencionado anteriormente. En cuanto a los canales 3 y 8, que se asignan al formato de modulación RZ-OOK, se observa un rendimiento óptimo para cada nivel de potencia aplicado. A medida que la potencia en estos canales se incrementa, se observa una mejora progresiva en los parámetros de monitoreo.

En las figuras 3.39(a) a 3.39(d), se presentan los diagramas del ojo en la recepción correspondientes a los canales 1, 2, 9 y 10. Estos diagramas muestran la representación de la señal recibida para una potencia de 0 dBm en los canales 3 y 8. A pesar de la existencia de cierta interferencia provocada por la separación establecida entre los canales mencionados, es importante destacar que no se observa un impacto significativo en la calidad de la señal.

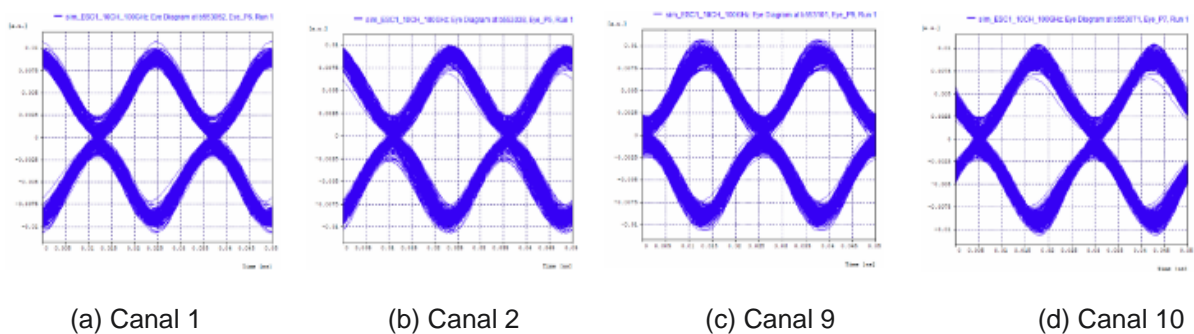
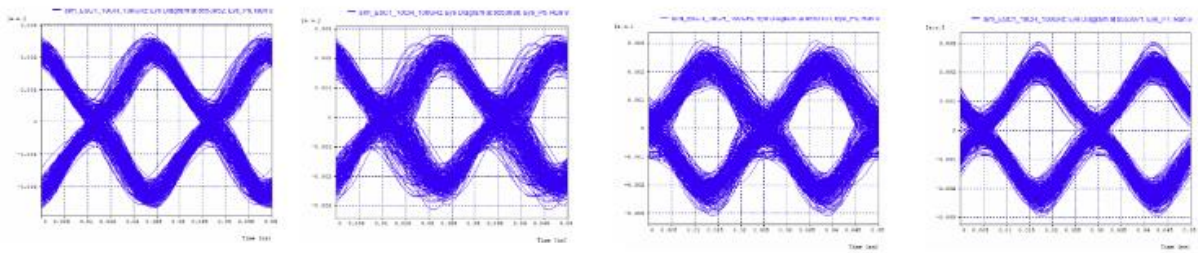


Figura 3.39. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para un valor de potencia de 0 dBm en el canal 3 y 8.

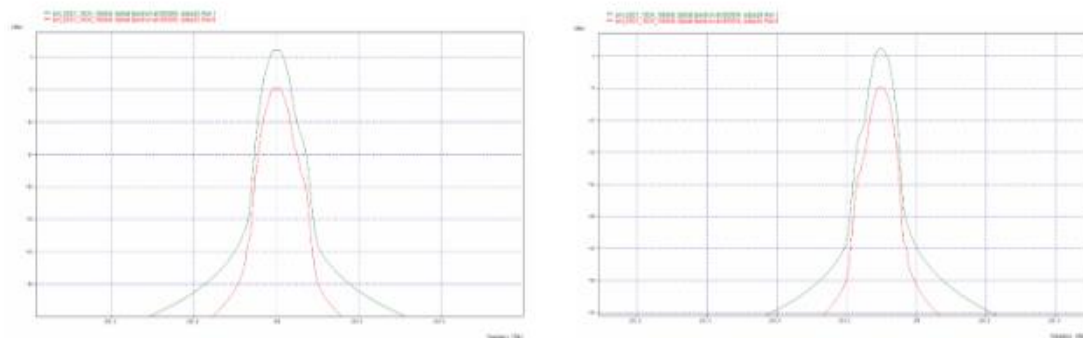
En las figuras 3.40(a) a 3.40(d), se presentan los diagramas del ojo en recepción correspondientes a los canales 1, 2, 9 y 10. Estos gráficos muestran que debido al aumento en la potencia de los canales 3 y 8 se ha generado una distorsión debido al efecto XPM. Aunque se observa que esta degradación, no tiene un impacto significativo en la calidad de la señal, ya que para este caso los diagramas muestran que la apertura del ojo se mantiene lo suficientemente amplia como para permitir una correcta detección y decodificación de los datos transmitidos y por lo tanto todavía se cumplen los parámetros de desempeño requeridos.



(a) Canal 1 (b) Canal 2 (c) Canal 9 (d) Canal 10

Figura 3.40. Diagramas de ojo para los canales en la recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para un valor de potencia de 16 dBm en el canal 3 y 8.

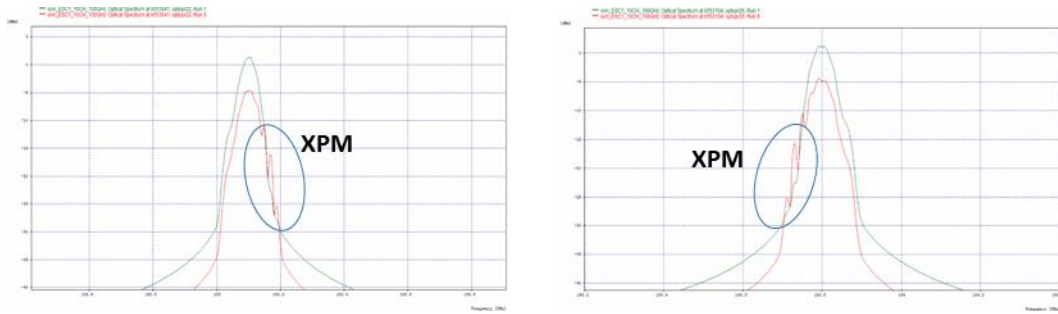
En las figuras 3.41(a) a 3.41(b), se presentan los espectros ópticos en la recepción correspondientes a los canales 1 y 10. A pesar del incremento de la potencia de transmisión de los canales 3 y 8, las deformaciones causadas por el efecto XPM no fueron tan notables en estos canales y apenas perceptibles en los espectros debido a la separación que presentan con los canales 3 y 8.



(a) Espectro óptico canal 1. (b) Espectro óptico canal 10.

Figura 3.41. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 10, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8

En las figuras 3.42(a) a 3.42(b), se presentan los espectros ópticos en recepción correspondientes a los canales 2 y 9. En estos canales, se pueden observar claramente las deformaciones causadas por el efecto XPM. Estas deformaciones son resultado del espaciamiento establecido entre los canales 2 y 9 con los canales 3 y 8. La presencia del efecto XPM se manifiesta en una disminución en el rendimiento de los parámetros de desempeño, así como en la aparición de interferencias.



(a) Espectro óptico canal 2.

(b) Espectro óptico canal 9.

Figura 3.42. Espectro óptico en la recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.

En la figura 3.43 se muestra el espectro óptico multiplexado obtenido del medio. En general, se puede apreciar que el sistema funciona correctamente, aunque se presentan algunas degradaciones en el rendimiento (Anexo, tabla 18). Es posible observar el efecto XPM entre los canales RZ-OOK y NRZ-OOK, lo cual provoca deformaciones en la señal. Este efecto también se hace evidente en los canales RZ-DPSK cercanos a los canales RZ-OOK. Al aumentar la potencia a 16 dBm, se observa la aparición del efecto FWM con la presencia de lóbulos mínimos atribuidos a este fenómeno. A pesar de estas degradaciones, en general, el sistema responde de manera adecuada para la separación establecida.

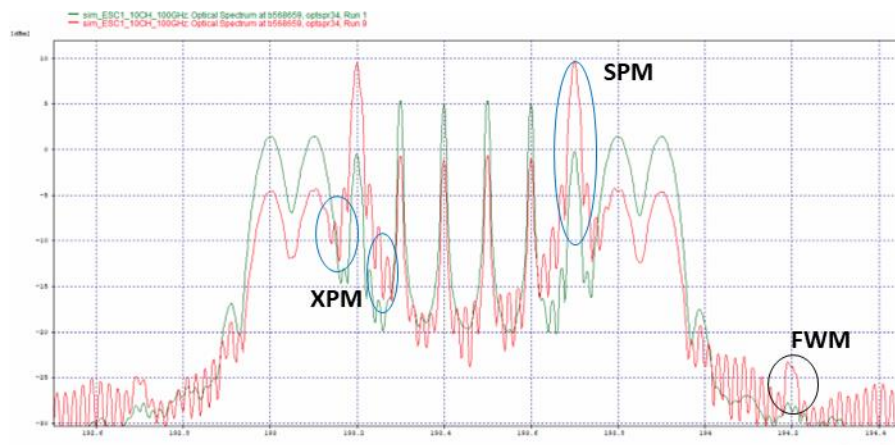
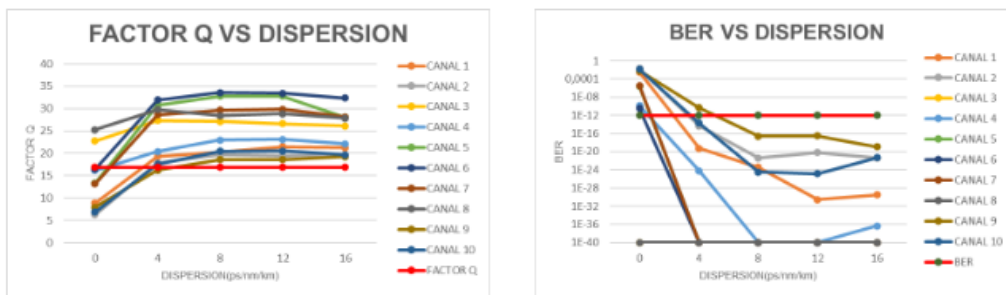


Figura 3.43. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la dispersión con una separación de 100 GHz entre canales.**

Para realizar este análisis, se lleva a cabo una variación de la dispersión en un rango de 0 ps/nm/km a 16 ps/nm/km. El escenario se configura de la siguiente manera: se mantiene la potencia de los canales 3 y 8 en 10 dBm, mientras que la potencia de los canales restantes se fija en 0 dBm. Además, se asigna una potencia de 15 dBm al amplificador BOOSTER. En la figura 3.44 se presentan las gráficas correspondientes a los parámetros de desempeño para esta configuración (Anexo, tabla 19).



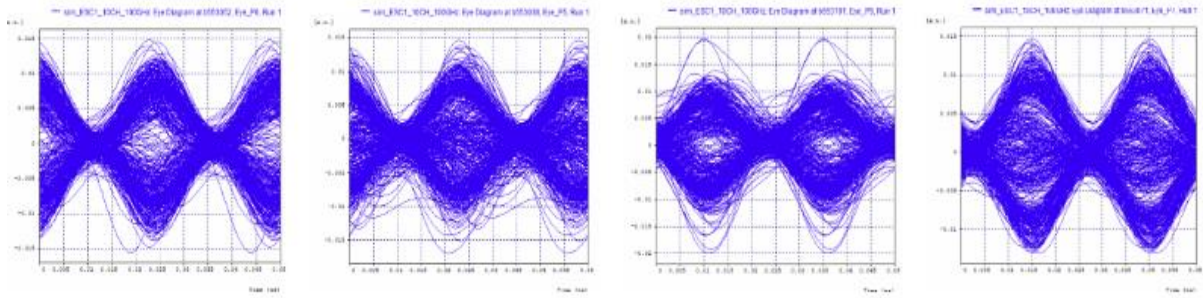
(a) Factor Q vs Dispersión

(b) BER vs Dispersión

Figura 3.44. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 10 canales con espaciamiento de 100 GHz.

Como se puede observar en la figura 3.44, la mayoría de los canales no cumple con los requisitos mínimos de los parámetros OPM y solo logran cumplirlos para valores superiores a 4 ps/nm/km. Sin embargo, los canales 3 y 8, debido a su configuración específica, logran un rendimiento que satisface los requerimientos de desempeño en todos los valores de dispersión analizados. En cuanto a los canales con formato de modulación RZ-DPSK a 40 Gbps, se puede apreciar que no presentan el mismo desempeño uniforme. Los canales 9 y 10 son capaces de cumplir con los parámetros de desempeño para valores de dispersión más altos en comparación con los canales 1 y 2. Esta diferencia se atribuye a la posición asignada a cada canal en la grilla espectral.

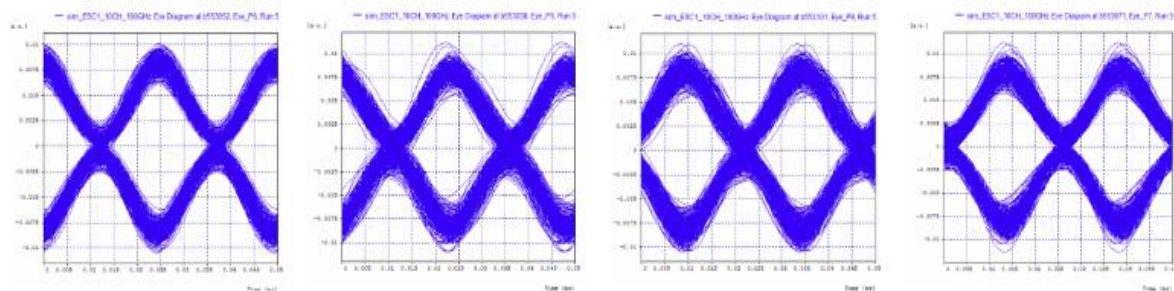
En las figuras 3.45(a) a 3.45(d), se observa que en los diagramas de ojo correspondientes a los canales 1, 2, 9 y 10 presentan un deterioro completo. Este deterioro es consistente con lo que se esperaba para valores de dispersión de 0 ps/nm/km. Además, se observa que las degradaciones atribuidas a las interferencias o a los efectos no lineales se presentan con mayor intensidad en estos canales, lo cual contribuye significativamente a la degradación de los parámetros de desempeño OPM. Este deterioro en los diagramas de ojo indica claramente la existencia de un daño significativo en la transmisión. Como consecuencia, la apertura de ojo no es aceptable, lo que dificulta la interpretación adecuada de la información transmitida.



(a) Canal 1 (b) Canal 2 (c) Canal 9 (d) Canal 10

Figura 3.45. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para un valor de dispersión de 0 ps/nm/km

En las figuras 3.46(a) a 3.46(d), se muestran los diagramas del ojo en recepción correspondientes a los canales 1, 2, 9 y 10 para un valor de dispersión de 16 ps/nm/km. Estos gráficos demuestran que, debido a la potencia de los canales 3 y 8, se genera una degradación por su causa del efecto XPM, el cual es más pronunciado en los canales cercanos, es decir, los canales 2 y 9. Sin embargo, para este valor de dispersión, el efecto no tiene un impacto negativo sobre los parámetros de desempeño. En los diagramas, se puede observar que la apertura del ojo se mantiene a un nivel lo suficientemente amplio como para permitir una correcta recepción de los datos transmitidos.



(a) Canal 1 (b) Canal 2 (c) Canal 9 (d) Canal 10

Figura 3.46. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para un valor de dispersión de 16 ps/nm/km

En las figuras 3.47(a) a 3.47(b), se presentan los espectros ópticos en recepción correspondientes a los canales 1 y 10 para los valores de dispersión analizados. A pesar del incremento de la potencia de transmisión de los canales 3 y 8, el ensanchamiento y las deformaciones causadas por el efecto XPM no fueron tan notables en estos canales y apenas perceptibles en los espectros debido a la separación que presentan con dichos canales.

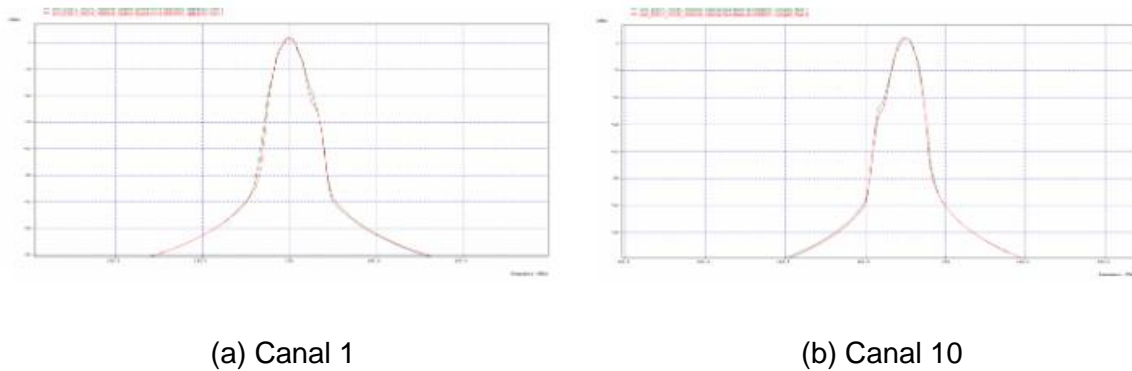


Figura 3.47. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 10, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

En las figuras 3.48(a) a 3.48(b), se presentan los espectros ópticos en recepción correspondientes a los canales 2 y 9. Al analizar estos canales, es posible observar claramente las deformaciones causadas por el efecto XPM, las cuales son consecuencia de la potencia asignada a los canales RZ-OOK. Estas deformaciones se producen debido al espaciamiento establecido entre los canales 2 y 9 con respecto a los canales 3 y 8. La presencia del efecto XPM se manifiesta en una disminución en el rendimiento de los parámetros de desempeño. Además, se observa la aparición de interferencias, lo cual impacta negativamente en la calidad de la señal recibida.

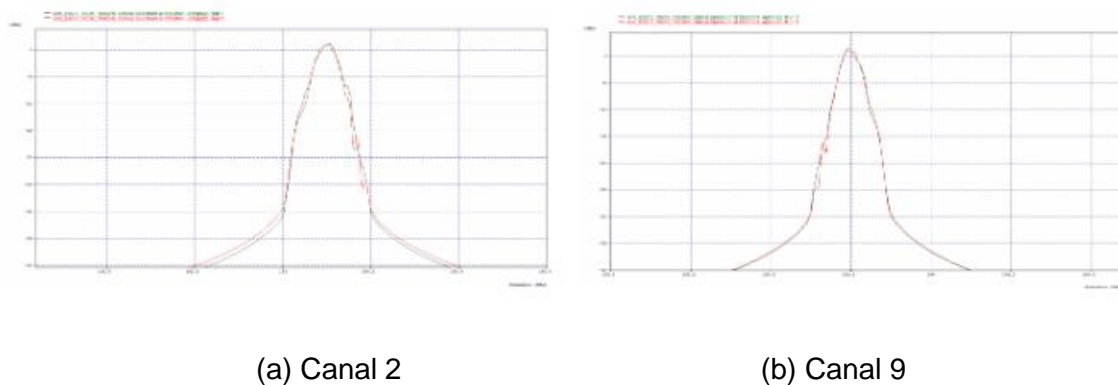


Figura 3.48. Espectro óptico en recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

En la Figura 3.49 se muestra el espectro óptico multiplexado obtenido del medio. En general, el sistema presenta un rendimiento aceptable cuando se alcanzan valores de dispersión por encima de 4 ps/nm/km (Anexo, tabla 19). Sin embargo, en el caso en el que se emplea un coeficiente de dispersión de 0 ps/nm/km, se observa una clara degradación de la señal que llega al receptor, ya que en dicho valor se hace evidente la influencia de los efectos no lineales, especialmente en los canales con baja potencia. En contraste, se presenta la figura correspondiente a 16 ps/nm/km, en la cual se puede apreciar la asimetría del ensanchamiento espectral generado por XPM. Los canales 3 y 8 presentan una deformación moderada en su espectro en

comparación con los demás canales debido a la influencia del fenómeno SPM, el cual está relacionado con la potencia asignada a dichos canales.

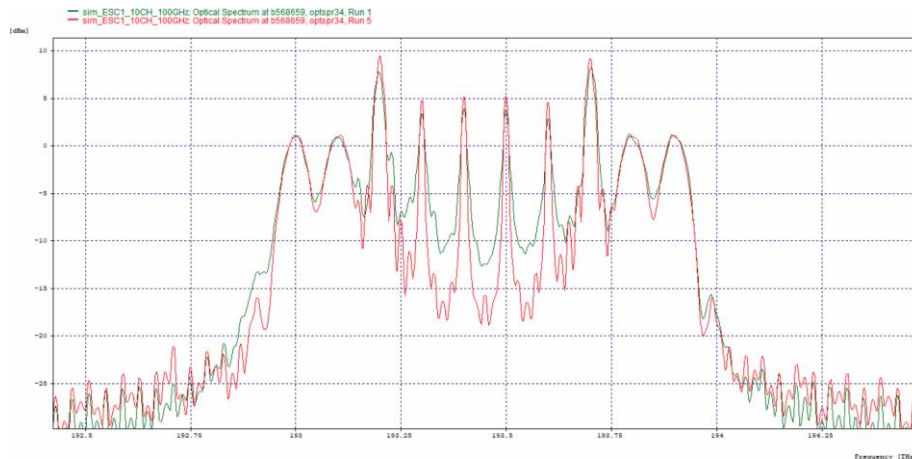
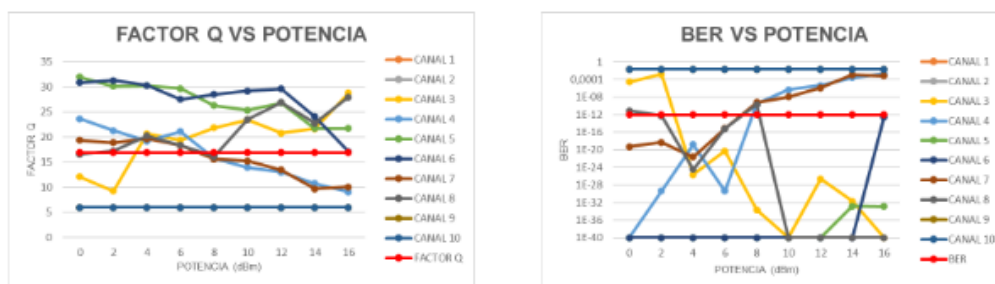


Figura 3.49. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la potencia con una separación de 50 GHz entre canales.**

En siguiente caso se configura un espaciado de 50 GHz entre los 10 canales y se obtienen los parámetros de desempeño (Anexo, tabla 20) para cada uno de los canales que componen la red. A continuación, se presentan en la figura 3.50, las gráficas correspondientes a los parámetros de desempeño para el presente caso de estudio.



(a) Factor Q vs Potencia

(b) BER vs Potencia

Figura 3.50. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 10 canales con espaciado de 50 GHz.

Los resultados de la Figura 3.50 muestran el comportamiento de cada uno de los canales con relación a la variación de la potencia. En general, los canales 4, 5, 6 y 7, con formato de modulación NRZ-OOK, tienen un comportamiento aceptable para valores de potencia inferiores a 8 dBm en los canales 3 y 8. Esto se debe a que los

canales 4 y 7, al estar ubicados junto a estos canales, experimentan la variación de potencia de los canales de bombeo, lo que afecta sus valores de los parámetros de OPM. Por otro lado, los canales 2 y 5 presentan un comportamiento satisfactorio y cumplen con los requisitos de desempeño OPM para valores de potencia superiores a 4 dBm. A medida que aumenta la potencia, se observa una mejora progresiva en los parámetros de monitoreo óptico. Sin embargo, es importante destacar que los resultados obtenidos varían para valores inferiores a 4 dBm. Este comportamiento se atribuye a la posición relativa en una frecuencia determinada y a la respuesta de la fibra óptica a diferentes longitudes de onda.

En cuanto a los canales 1, 2, 9 y 10, que cuentan con un formato de modulación avanzado, ninguno de ellos cumple con los requisitos de desempeño para los valores de potencia estudiados. Esto se debe a que requieren una separación entre canales mayor a la utilizada, lo que genera interferencia y degrada el rendimiento de los canales de mayor velocidad cuando se incrementa la potencia en los canales adyacentes.

En las figuras 3.51(a) a 3.51(d), se presentan los diagramas del ojo en recepción correspondientes a los canales 1, 2, 9 y 10. Estos diagramas muestran la representación de la señal recibida para una potencia de 0 dBm en los canales 3 y 8. Se puede apreciar la presencia de distorsión e interferencia provocada por la separación establecida entre los canales mencionados, es importante destacar que debido a eso se observa un impacto poco favorable en la calidad de la señal.

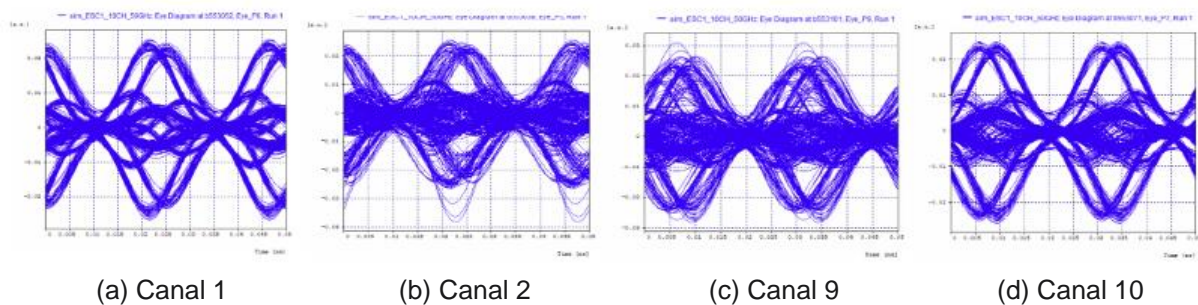


Figura 3.51. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para un valor de potencia de 0 dBm en el canal 3 y 8.

En las figuras 3.52(a) a 3.52(d), se presentan los diagramas del ojo en recepción correspondientes a los canales 1, 2, 9 y 10. Estos gráficos evidencian que debido al incremento en la potencia de los canales 3 y 8 se ha producido una distorsión total, lo que resulta en una pérdida de la información transmitida.

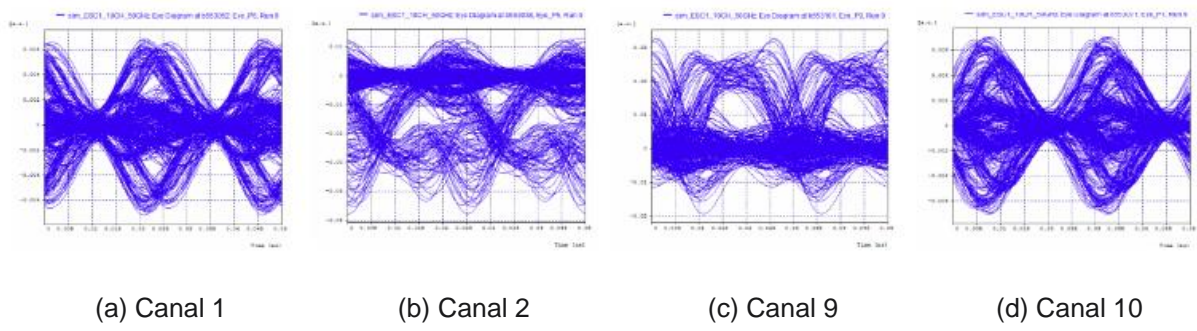


Figura 3.52. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para un valor potencia de 16 dBm en el canal 3 y 8.

En las figuras 3.53(a) a 3.53(b), se presentan los espectros ópticos en recepción correspondientes a los canales 1 y 10. En estos canales se ve el que el incremento de la potencia de transmisión de los canales 3 y 8 ha producido ciertas deformaciones causadas atribuidas a la separación que tienen estos con los otros canales con formato de modulación avanzado y al efecto XPM.

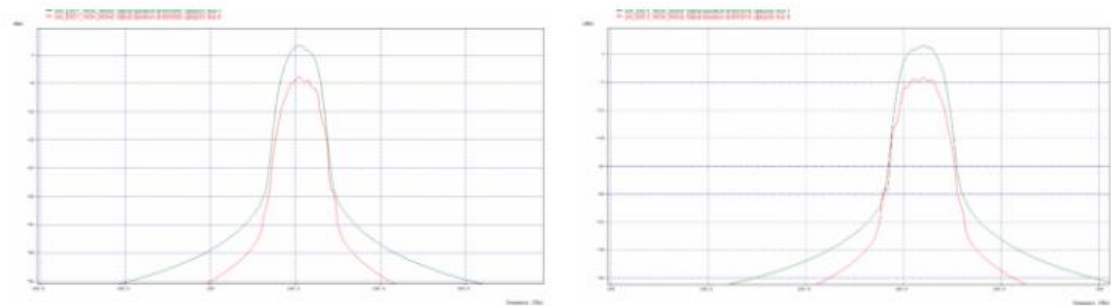
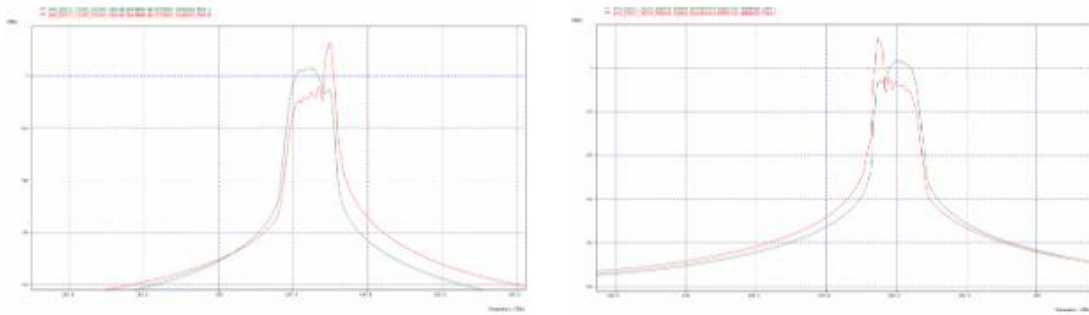


Figura 3.53. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 10, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.

Por otro lado, en las figuras 3.54(a) a 3.54(b), se presentan los espectros ópticos en recepción correspondientes a los canales 2 y 9 para un valor de potencia de 16 dBm en los canales 3 y 8. Es posible observar claramente las deformaciones causadas por el efecto XPM y el impacto de la interferencia debido al espaciamiento establecido entre los canales 2 y 9 con respecto a los canales 3 y 8. Estos fenómenos tienen un impacto negativo en el rendimiento de los parámetros de desempeño, así como en la aparición de interferencias notablemente altas.



(a) Espectro óptico canal 2.

(b) Espectro óptico canal 9.

Figura 3.54. Espectro óptico en recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.

En la figura 3.55 se muestra el espectro óptico multiplexado obtenido del medio, donde se llevó a cabo una evaluación de potencia en el rango de 0 a 16 dBm para los canales 3 y 8. Se puede observar que el espaciamiento entre los canales está generando una afectación significativa en el medio debido a que el espaciamiento configurado en el sistema no es suficiente para los canales 1, 2, 9 y 10 de 40 Gbps, los cuales utilizan el formato de modulación avanzado RZ-DPSK. Esta situación impide obtener parámetros de calidad adecuados. Además, cuando se utilizan valores de potencia elevados en los canales 3 y 8, es evidente la aparición de la ICI.

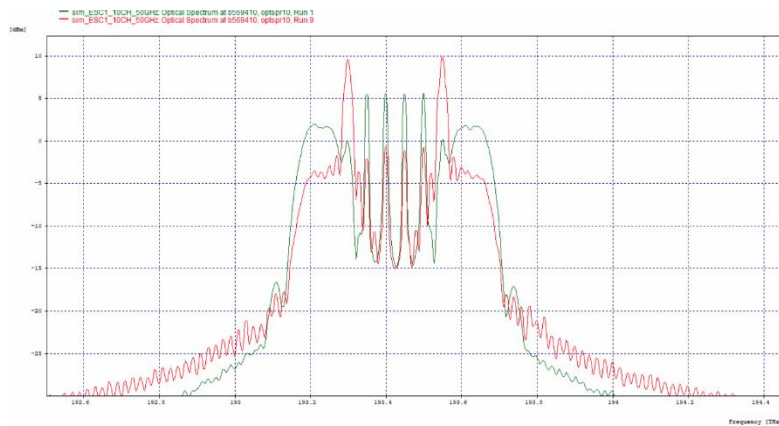
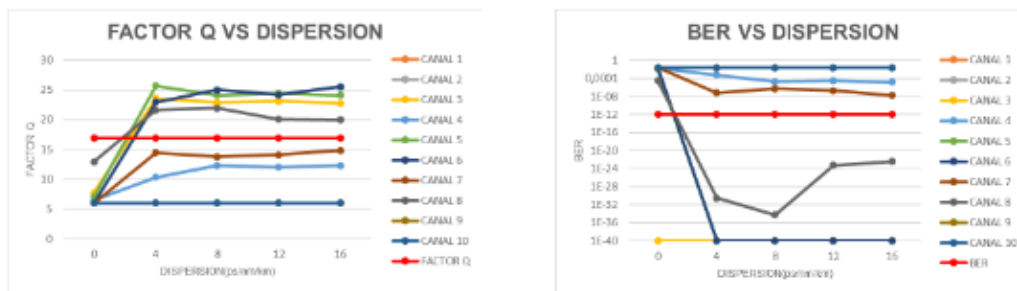


Figura 3.55. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la dispersión con una separación de 50 GHz entre canales.**

Para realizar este análisis, se lleva a cabo una variación de la dispersión en un rango de 0 a 16 ps/nm/km. El escenario se configura de la siguiente manera: se mantiene la potencia de los canales 3 y 8 en 10 dBm, mientras que la potencia de los canales restantes se fija en 0 dBm. En la figura 3.56 se presentan las gráficas correspondientes a los parámetros de desempeño para esta configuración (Anexo, tabla 21).



(a) Factor Q vs Dispersión

(b) BER vs Dispersión

Figura 3.56. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 10 canales con espaciamiento de 50 GHz.

La figura 3.56 muestra que los canales 1, 2, 9 y 10 presentan el peor desempeño en la red, por lo tanto, no cumplen con los parámetros OPM para ninguno de los valores de dispersión analizados. Además, los canales 4 y 7 se ven perjudicados al encontrarse cerca de los canales 3 y 8 que cuentan con una potencia mayor, lo que les impide alcanzar el mínimo requerido. Por otro lado, los demás canales cumplen con los requisitos mínimos de los parámetros OPM para valores superiores a 2 ps/nm/km. Dentro de estos canales, destaca el desempeño de los canales 5 y 6 debido a su configuración específica. Esto se debe a que la velocidad y el formato de modulación asignados a ellos requieren un espaciamiento más bajo, lo que les permite cumplir de manera óptima con los parámetros establecidos.

En las figuras 3.57(a) a 3.57(d), se muestran los diagramas del ojo en recepción correspondientes a los canales 1, 2, 9 y 10, para dispersión de 0 ps/nm/km. Estos gráficos revelan que la dispersión en los canales RZ-DPSK a 40 Gbps es más notable en los canales 2 y 9, donde la forma del diagrama del ojo se ha perdido por completo. Por otro lado, en los demás canales se puede apreciar la forma del ojo, pero su apertura es mínima, lo que genera problemas en la recepción y dificulta la recuperación de la información transmitida.

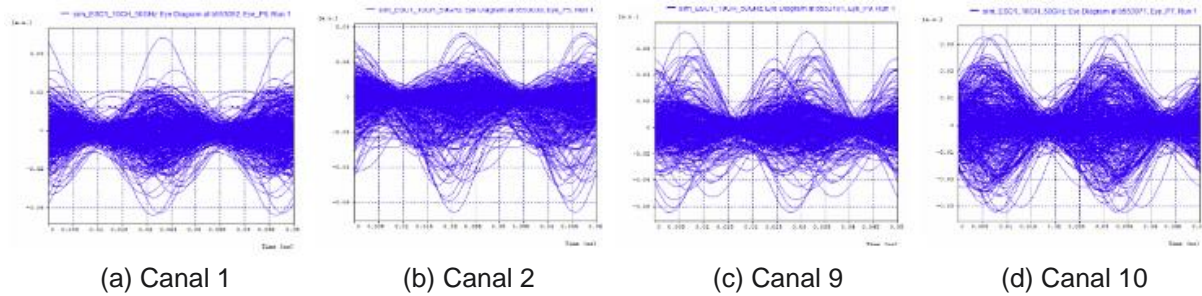


Figura 3.57. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para un valor de dispersión de 0 ps/nm/km.

En las figuras 3.58(a) a 3.58(d), se muestran los diagramas del ojo en recepción correspondientes a los canales 1, 2, 9 y 10, para una dispersión de 16 ps/nm/km. es posible apreciar un desfase de la señal en los canales 1 y 10, por su asimetría en sus cruces de tiempo, en los canales 2 y 9 se aprecia una distorsión total del diagrama de ojo causando en general para todos los canales la presencia considerable de ISI, lo cual es perjudicial para la obtención de los parámetros mínimos de desempeño de los canales.

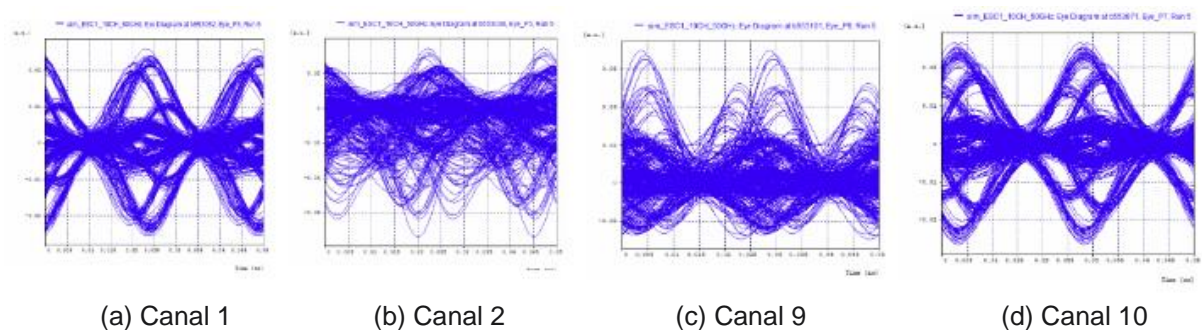
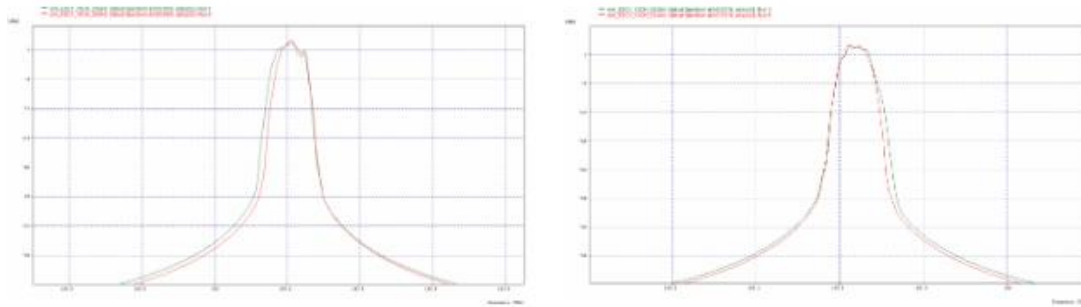


Figura 3.58. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DPSK a 40 Gbps, para un valor de dispersión de 16 ps/nm/km.

En las figuras 3.59(a) y 3.59(b), se presentan los espectros ópticos en recepción correspondientes a los canales 1 y 10, teniendo en cuenta los diferentes valores de dispersión analizados. Estos gráficos revelan la presencia de ensanchamiento y deformaciones en dichos canales debido al efecto XPM. Este fenómeno es causado por la influencia de los canales 2 y 9, los cuales, a su vez, se ven afectados por el incremento en la potencia de transmisión de los canales 3 y 8. Es importante destacar que este efecto se vuelve más evidente a medida que se reduce la separación analizada entre los canales.

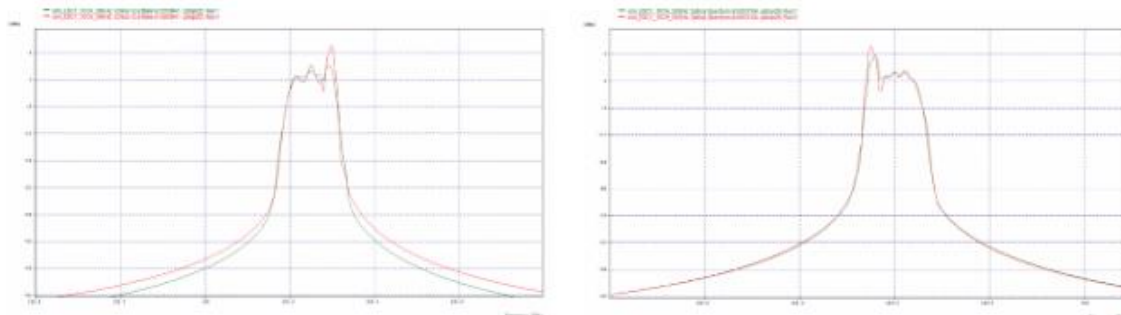


(a) Canal 1

(b) Canal 10

Figura 3.59. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 10, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

En las figuras 3.60(a) a 3.60(b), se presentan los espectros ópticos en recepción correspondientes a los canales 2 y 9. Las deformaciones del efecto XPM se hacen más notorias junto con la interferencia debido a la diferencia de niveles de potencia con los canales 3 y 8. Los resultados obtenidos en los parámetros OPM verifican la degradación presente en la señal lo cual se traduce en una disminución en el rendimiento del sistema.



(a) Canal 2

(b) Canal 9

Figura 3.60. Espectro óptico en recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

En la Figura 3.61 se muestra el espectro óptico multiplexado obtenido del medio, en el cual se observa la degradación en la señal que llega al receptor. Cuando se presenta una dispersión de 0 ps/nm/km, se puede apreciar un ensanchamiento que se vuelve más evidente en los canales de los extremos, y en general se nota una degradación total en la señal transmitida. Por otro lado, cuando el sistema tiene un coeficiente de dispersión de 16 ps/nm/km, se puede observar que los canales RZ-DPSK se superponen entre sí, además de que se hace presente el efecto de XPM generado por los canales RZ-OOK.

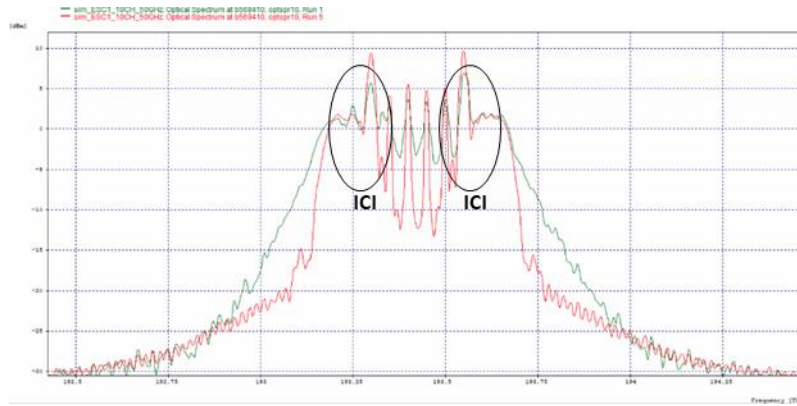
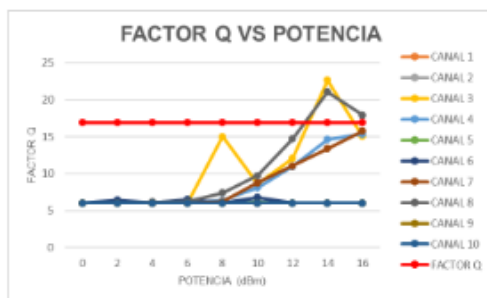


Figura 3.61. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la potencia con una separación de 25 GHz entre canales.**

En el presente análisis se configura una separación de 25 GHz entre los 10 canales, con el fin de determinar el comportamiento para cada uno de ellos en la red (Anexo, Tabla 22). Al igual que en anteriores análisis, se varía la potencia de los canales 3 y 8 en un rango desde 0 hasta 16 dBm, con incrementos de 2 dBm. En la Figura 3.62, se presentan las gráficas que ilustran los resultados obtenidos para estos parámetros de desempeño.



(a) Factor Q vs Potencia



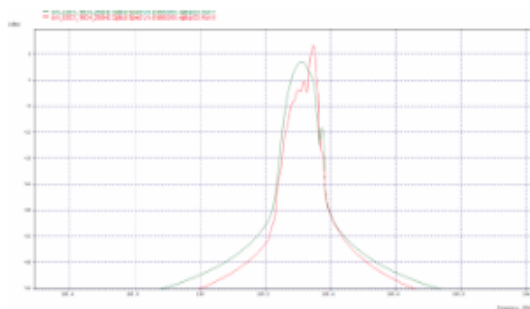
(b) BER vs Potencia

Figura 3.62. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 10 canales con espaciamento de 25 GHz.

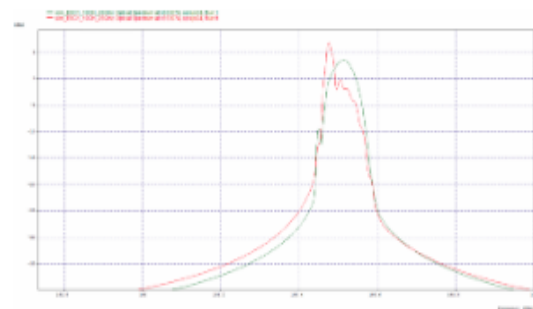
En los resultados OPM obtenidos para el espaciamento configurado en el sistema y mostrados en la figura 3.62, se puede observar que la mayoría de canales no presentan un buen comportamiento, debido a que para todas las variaciones de potencia de los canales 3 y 8, la mayoría de canales en el sistema no obtiene resultados que aseguren una transmisión acorde a los requisitos OPM establecidos. A pesar de esto es posible encontrar resultados superiores al mínimo requerido de Factor de Calidad y BER en los canales 3 y 8 para potencia de mayores a 12 dBm,

sin embargo, las potencias alcanzadas en estos canales pueden generar efectos no lineales.

Para sustentar los resultados (Anexo, tabla 22) se presentan las figuras 3.63 y 3.64 correspondientes al espectro óptico en recepción de los canales 1, 2, 9 y 10. Se puede apreciar una notable degradación debido al espaciamiento configurado en el sistema y al traslape entre canales además de una fuerte interferencia en el canal 2 y 9, a su vez de una interferencia más leve en los canales 1 y 10.

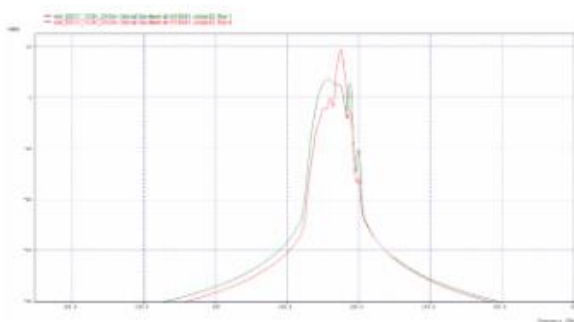


(a) Espectro óptico canal 1.

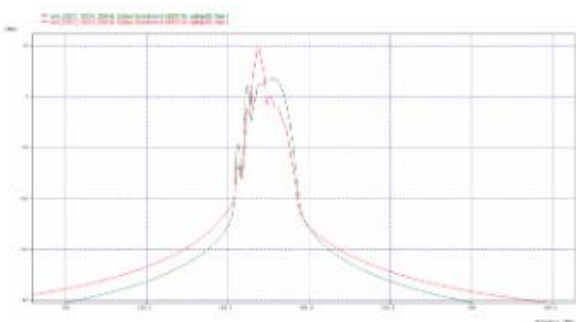


(b) Espectro óptico canal 10.

Figura 3.63. Espectro óptico en recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.



(a) Espectro óptico canal 2.

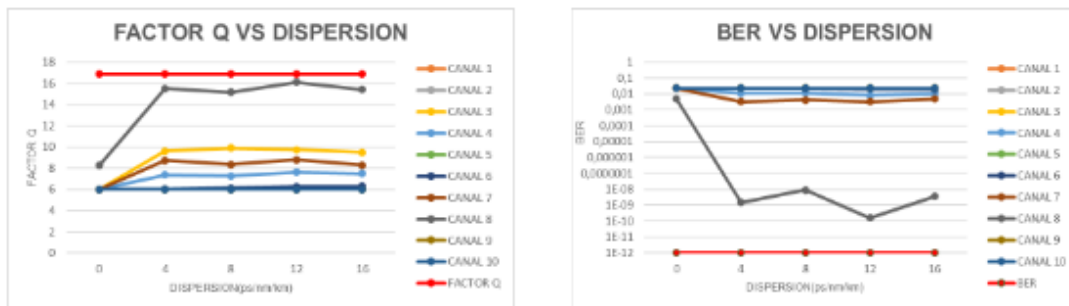


(b) Espectro óptico canal 9.

Figura 3.64. Espectro óptico en recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la dispersión con una separación de 25 GHz entre canales.**

Como se puede apreciar en la figura 3.65 (Anexo, Tabla 23), la variación de la dispersión con una separación de 25 GHz entre los 10 canales ocasiona que ninguno de ellos cumpla con el requisito mínimo para satisfacer los parámetros OPM establecidos. Debido a esta situación, no se incluye un análisis específico para los formatos de modulación bajo estas condiciones.



(a) Factor Q vs Dispersión

(b) BER vs Dispersión

Figura 3.65. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 10 canales con espaciamiento de 25 GHz.

La figura 3.66 muestra el espectro óptico multiplexado obtenido del medio. En dicha figura, se puede observar que cuando el valor de dispersión es 0 ps/nm/km, se produce una deformación completa en los canales ubicados en los extremos, lo que resulta en una pérdida total de la señal. Además, en el valor de dispersión de 16 ps/nm/km, se genera un ICI que impide el correcto funcionamiento de los canales.

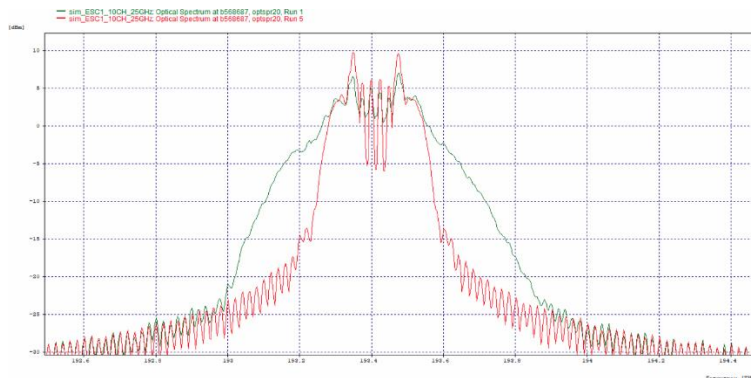


Figura 3.66. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

3.3 RED MLR TIPO 2 BASADA EN FORMATOS DE MODULACIÓN NRZ-OOK, CSRZ-OOK Y RZ-DQPSK.

Al igual que en la red anterior, en la red MLR de tipo 2 se trabajará con un escenario de simulación que opera con las tres velocidades de transmisión utilizadas hasta ahora: 2.5/10/40 Gbps. Para cada velocidad, se ha asignado un formato de modulación específico. En el caso de la velocidad más alta, es decir, 40 Gbps, se implementará el formato de modulación avanzado RZ-DQPSK. Por otra parte, se han asignado los formatos de modulación NRZ-OOK y CSRZ-OOK a las velocidades de 2.5 Gbps y 10 Gbps, respectivamente. Las simulaciones se llevarán a cabo teniendo en cuenta tanto el modelo inicial de la red como los análisis previamente realizados. En la tabla 3.5 se presentan los parámetros del modelo general de la red MLR de tipo 2.

Parámetros	Valores
Numero de canales	6-10
Potencia de transmisión del laser	0 dBm
Amplificación EDFA	13-15 dBm
Compensación	Ideal
Longitud del enlace	80 km
Longitud de onda	1530 –1550 nm
Tipo de fibra	Corning SMF-28e+
Sensibilidad del receptor	-30 dBm
Formato de modulación a 2.5 Gbps	NRZ-OOK
Formato de modulación a 10 Gbps	CSRZ-OOK
Formato de modulación a 40 Gbps	RZ-DQPSK

Tabla 3.5. Parámetros del modelo general de red MLR tipo 2.

3.3.1 Caso de estudio 3: 2 canales de 2.5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 2 canales de 40 Gbps.

En este tercer caso de estudio, se utiliza el modelo de red empleado en los casos anteriores. Se configuran inicialmente 6 canales en una red MLR. Los canales 1 y 6 operarán a una velocidad de 40 Gbps y utilizarán el formato de modulación avanzado RZ-DQPSK. Los canales 2 y 5, con una velocidad de transmisión de 10 Gbps, utilizarán la modulación CSRZ-OOK. Los canales internos, es decir los canales 3 y 4, emplearán la modulación NRZ-OOK a 2.5 Gbps. El espaciamiento entre canales en la red será de 100 GHz, siguiendo la grilla espectral establecida por la recomendación ITU-T G.694.1. Esta elección permitirá que el primer canal de la red se sitúe en una frecuencia central de 193.2 THz, mientras que el último canal ocupará la frecuencia

de 193.7 THz. Además, se tendrán en cuenta las separaciones adicionales de 50 GHz y 25 GHz indicadas en dicha recomendación para análisis futuros.

Para este caso de estudio, es necesario compensar por completo la dispersión cromática para poder aislar y observar de manera más efectiva los fenómenos no lineales. Siguiendo el enfoque utilizado en casos anteriores, se emplea una rejilla de Bragg ideal con una compensación total del 100%. Además, se establecerá una frecuencia de 193.45 con el objetivo de lograr una distribución equitativa de los canales de alta capacidad, evitando que afecten únicamente a canales ópticos específicos. Finalmente, la red tendrá una distancia de enlace de 80 km, seguida de una última milla de 1 km, al igual que en anteriores casos. En la figura 3.67 se puede apreciar el escenario de simulación para el presente caso de estudio.

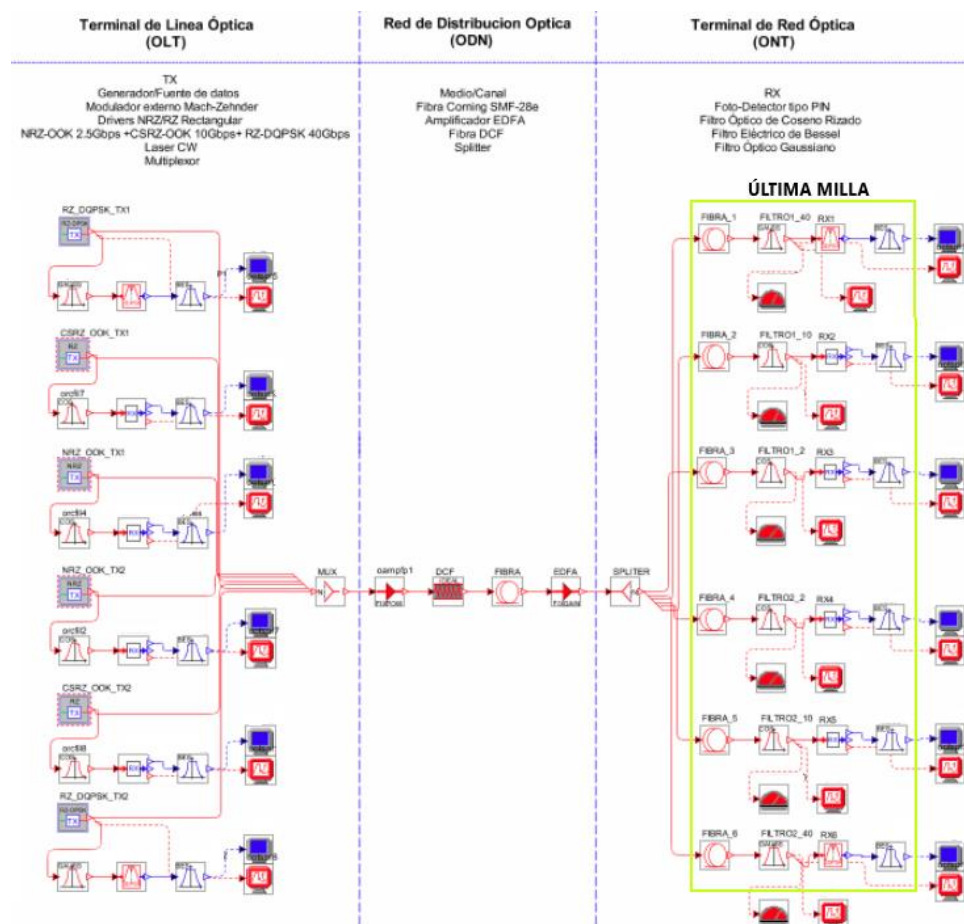
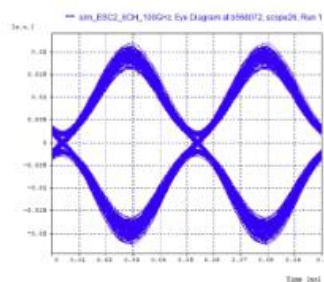


Figura 3.67. Escenario de simulación de la red MLR caso 3.

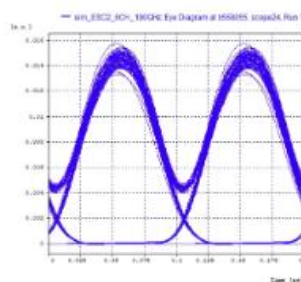
Desempeño

A partir de las características del escenario de simulación presentado, se lleva a cabo una evaluación del desempeño. Las figuras 3.68(a) a 3.68(f) muestran de manera individual los diagramas de ojo obtenidos en recepción para cada uno de los canales configurados a velocidades de 2.5 Gbps, 10 Gbps y 40 Gbps. Se puede observar que los canales no se ven afectados de forma significativa por las degradaciones. Sin embargo, se aprecia una ligera dispersión atribuida al ruido en dichos canales.

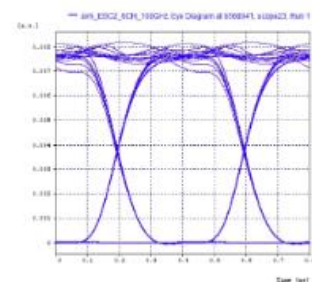
El desempeño en general es satisfactorio en todos los canales y esto se debe a la compensación ideal implementada en el sistema y al hecho de que aún no se han realizado variaciones en parámetros como la dispersión y la potencia. Estos resultados se corroboran con la información presentada en la tabla 3.6. Por consiguiente, no se observan interferencias ni degradaciones notables en la recepción.



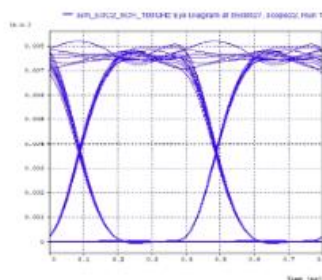
(a) Canal 1 a 40 Gbps.



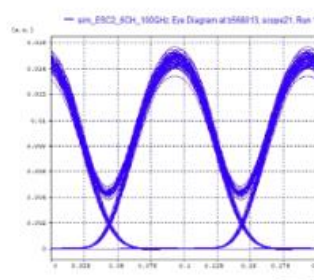
(b) Canal 2 a 10 Gbps.



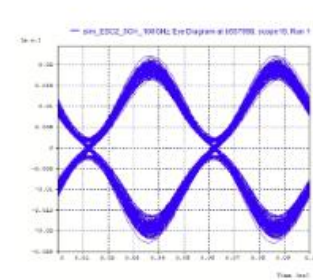
(c) Canal 3 a 2.5 Gbps.



(d) Canal 4 a 2.5 Gbps.



(e) Canal 5 a 10 Gbps.



(f) Canal 6 a 40 Gbps.

Figura 3.68. Diagramas de ojo en recepción.

Canal	Modulación	Velocidad (Gbps)	Potencia RX (dBm)	Factor Q (dB)	BER	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR Real (dB)
1	RZ-DQPSK	40	7.0007	23.7480	10^{-40}	0.000671	51.3873	37.0007
2	CSRZ-OOK	10	4.4594	28.8789	10^{-40}	0.002183	52.5609	34.4594
3	NRZ-OOK	2.5	5.2947	31.9408	10^{-40}	0.090504	54.1675	35.2947
4	NRZ-OOK	2.5	5.4377	35.0798	10^{-40}	0.079665	54.4938	35.4377
5	CSRZ-OOK	10	4.2093	30.3114	10^{-40}	0.001633	51.7885	34.2093
6	RZ-DQPSK	40	7.1548	23.7818	10^{-40}	0.000669	51.8697	37.1548

Tabla 3.6. Parámetros OPM de la red MLR caso 2.

El espectro óptico de la señal multiplexada obtenida del medio se muestra en la figura 3.69. Se pueden apreciar claramente los espectros de los seis canales que conforman la red. Sin embargo, también es posible observar degradaciones debido a los efectos no lineales introducidos por la fibra óptica. Es notable la aparición de pequeños lóbulos en los costados, los cuales corresponden al efecto FWM, de manera que a medida que aumenten los niveles de potencia, estas degradaciones podrían incrementarse en el sistema, lo cual podría afectar la recepción de la señal. A pesar de esto, por el momento, dichos efectos no representan un obstáculo para lograr una buena calidad de la señal. Esto confirma que las configuraciones implementadas en el sistema, como la compensación y la amplificación, están funcionando correctamente y minimizan los efectos negativos en la señal durante la transmisión.

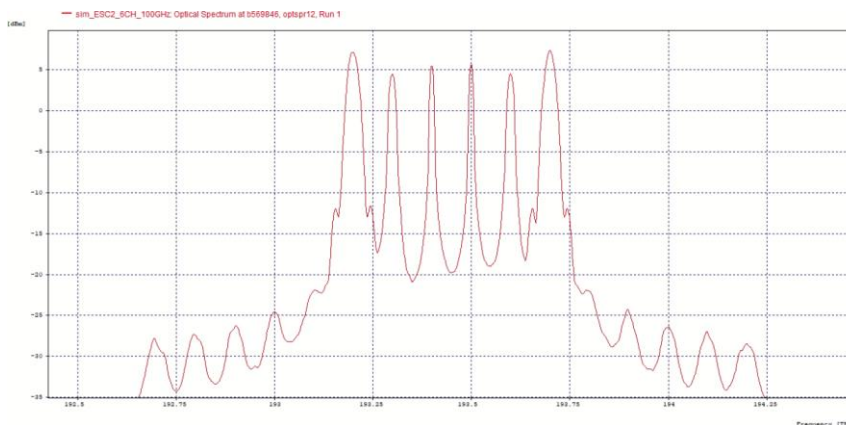
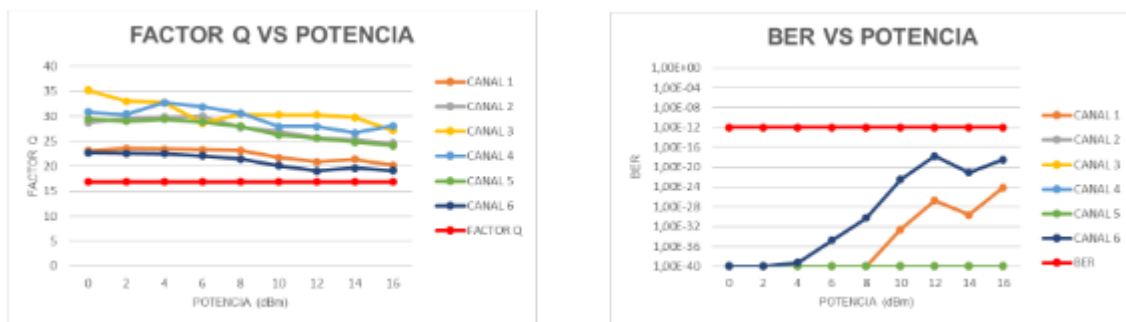


Figura 3.69. Espectro óptico para los seis canales de la red MLR caso 3.

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la potencia con una separación de 100 GHz entre canales.**

En un principio, para el tercer caso de estudio, se configura un espaciamiento de 100 GHz entre los 6 canales de la red. Además, se varía la potencia en los canales 2 y 5 en un rango de 0 a 16 dBm, con incrementos de 2 dBm, mientras que en los otros canales la potencia se mantuvo constante en 0 dBm. Posteriormente, se obtuvieron los parámetros de desempeño BER y factor Q (Anexo, tabla 24) para cada uno de los canales de la red. Esto se realiza con el objetivo de analizar la influencia de los efectos no lineales en la red propuesta. A continuación, se presentan en la Figura 3.70 las gráficas correspondientes a los parámetros de desempeño para el presente caso de estudio.



(a) Factor Q vs Potencia

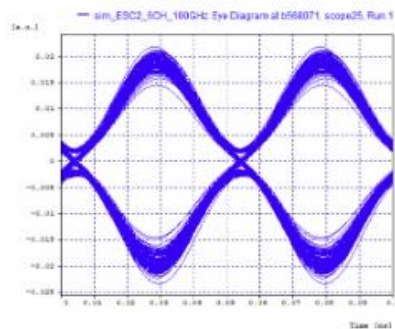
(b) BER vs Potencia

Figura 3.70. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 6 canales con espaciamiento de 100 GHz.

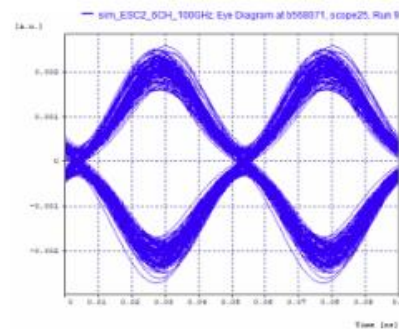
En base a los resultados presentados en la figura anterior, se puede mencionar que todos los canales de la red exhiben un comportamiento satisfactorio y superan el mínimo exigido para los parámetros OPM establecidos en el capítulo 2. La mejora en el rendimiento, en comparación con la red de tipo 1 caso 1 con una separación de 100 GHz, es notable. En cuanto a los canales 1 y 6, que corresponden al formato de modulación RZ-DQPSK, se observa un mejor rendimiento y se obtienen resultados superiores en comparación con su contraparte cuando la potencia aumenta. Además, nunca se alcanzan valores por debajo del límite de los requisitos OPM. La mejora del rendimiento en los canales con formato de modulación NRZ-OOK y CSRZ-OOK es también significativa, ya que mantienen una BER de 10^{-40} en todas las variaciones de potencia y presentan mejores valores en términos del factor de calidad.

Al igual que en la red de tipo 1, se puede observar que los resultados de los canales con la misma velocidad y formato de modulación difieren entre sí. Esta diferencia se atribuye tanto a la posición que ocupan en una frecuencia determinada como a la respuesta de la fibra óptica a las diversas longitudes de onda.

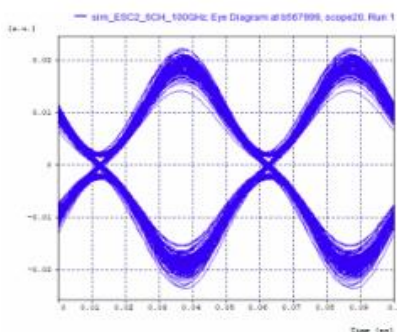
Los diagramas del ojo en recepción correspondientes a los canales 1 y 6 se presentan en las figuras 3.71(a) a 3.71(d). Debido a la variación de la potencia en los canales 2 y 5, los gráficos muestran una degradación de los canales debido al efecto XPM. Sin embargo, se observa que esta degradación no tiene un impacto significativo en la calidad de la señal porque cumple con los parámetros OPM. Al analizar la región de unos y ceros en los diagramas, se puede apreciar que la dispersión es mínima, esto significa que el ruido no degrada la señal, mientras que, en la apertura del ojo, los cruces de tiempo no están desplazados y se mantienen simétricos, demostrando la robustez del formato de modulación RZ-DQPSK.



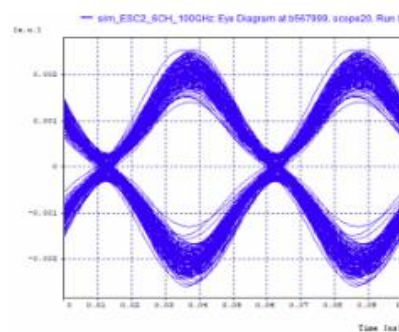
(a) Diagrama del ojo canal 1 a 0 dBm.



(b) Diagrama del ojo canal 1 a 16 dBm.



(c) Diagrama del ojo canal 6 a 0 dBm.



(d) Diagrama del ojo canal 6 a 16 dBm.

Figura 3.71. Diagramas de ojo para el canal 1 y 6 en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm y 16 dBm en el canal 2 y 5.

En las figuras 3.72(a) a 3.72(d) se presentan los espectros ópticos en recepción de los canales 1 y 6. A pesar del incremento de la potencia de transmisión en los canales 2 y 5, las deformaciones causadas por el efecto XPM son leves y apenas se perciben en los espectros. Sin embargo, se observa una notable disminución en el rendimiento de los parámetros de desempeño con el aumento de la potencia. Es importante mencionar que el formato de modulación utilizado en estos canales posee un espectro más ajustado, esto permite que, a esta separación entre canales, no se perjudique la calidad de la señal de los canales contiguos, evitando los efectos de interferencia.

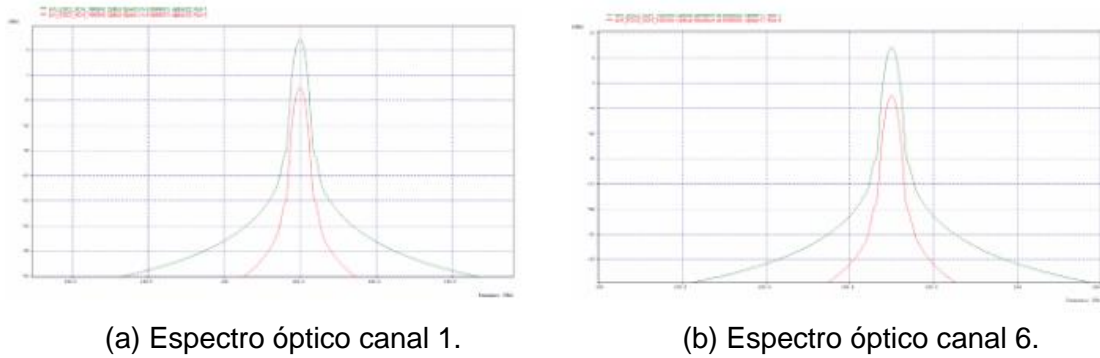


Figura 3.72. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 6, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.

En la figura 3.73 se presenta el espectro óptico multiplexado obtenido del medio, donde se pueden apreciar seis canales para la variación de potencia en un rango de 0 a 16 dBm en los canales 2 y 5. Conforme aumenta la potencia de los canales 2 y 5, el efecto XPM provoca deformaciones en el espectro de los canales contiguos, afectando claramente los canales en los extremos, es decir, aquellos que tienen asignado el formato de modulación avanzado RZ-DQPSK y la tasa de transmisión más alta. Por otro lado, los canales 2 y 5 experimentan una ligera modificación en su espectro debido a que la intensidad de los demás canales es menor en comparación con su potencia, además, se presenta un ensanchamiento atribuido al efecto SPM. La presencia de las distorsiones en los costados se hizo más notable con el aumento de potencia en los canales 2 y 5, y también se observa la aparición del fenómeno FWM, con dos lóbulos aún más definidos a 16 dBm.

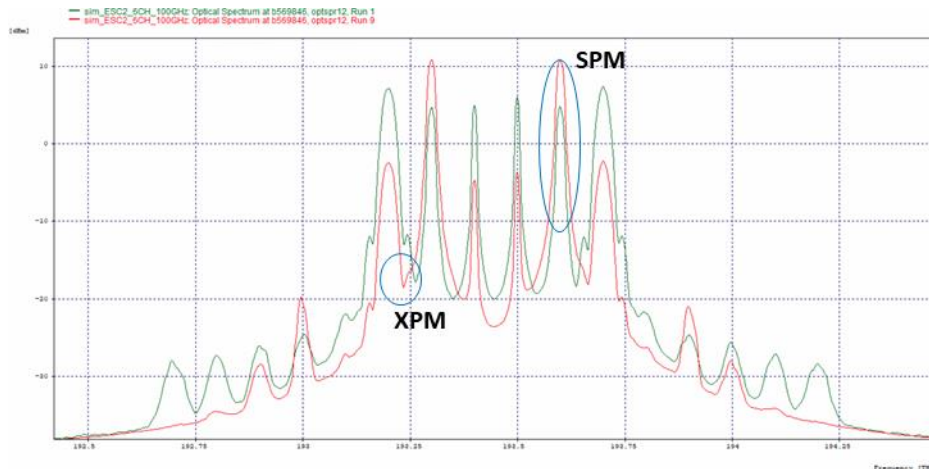
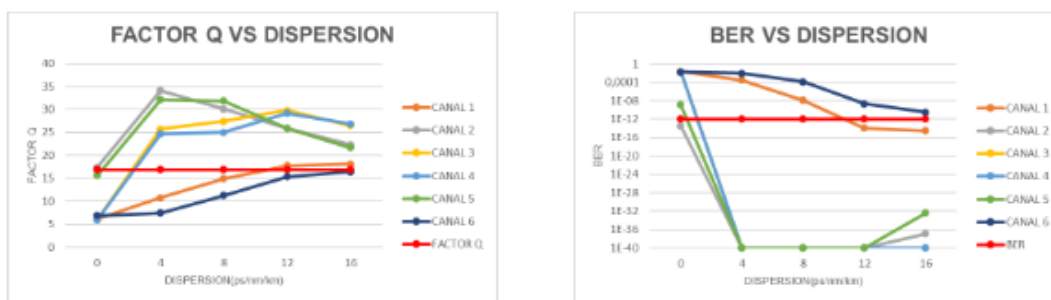


Figura 3.73. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la dispersión con una separación de 100 GHz entre canales.**

Con el objetivo de analizar el impacto de la dispersión de la fibra en el comportamiento de los efectos no lineales, se llevó a cabo una variación de la dispersión en un rango de 0 a 16 ps/nm/km. En la red se mantiene la potencia de los canales 2 y 5 en 10 dBm y se fija la potencia de los canales restantes en 0 dBm, además de asignar una potencia de 15 dBm al amplificador BOOSTER. En la figura 3.74 se presentan las gráficas correspondientes a los parámetros de desempeño para esta configuración (Anexo, tabla 25).



(a) Factor Q vs Dispersión

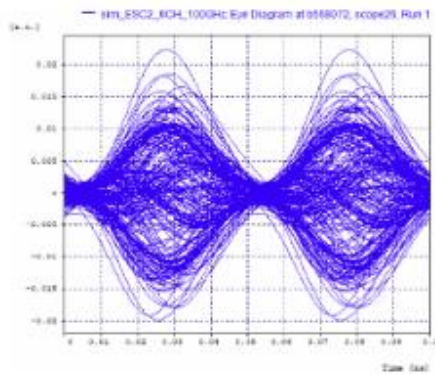
(b) BER vs Dispersión

Figura 3.74. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 6 canales con espaciamento de 100 GHz.

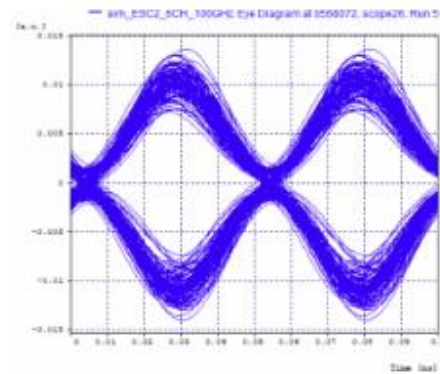
El comportamiento de los canales presentando en la figura 3.74, muestra que para valores superiores a 0 ps/nm/km, la mayoría de canales presentan un buen desempeño y cumplen con los requerimientos OPM, excepto los canales 1 y 6 configurados con el formato de modulación RZ-DQPSK. De estos canales, que tienen la tasa de transmisión más alta, solo el canal 1 logra cumplir con los requerimientos de desempeño a partir de los 12 ps/nm/km, mientras que el canal 6 no logra satisfacer estos requerimientos en ninguno de los valores de dispersión. Este comportamiento en particular se atribuye a la posición de estos dos canales en la grilla espectral. En general, los canales se ven afectados, lo que impide que cumplan con el mínimo requerido de los parámetros de calidad cuando la dispersión es igual a 0 ps/nm/km. Este punto crítico representa una degradación del sistema.

En las figuras 3.75(a) a 3.75(d), se muestran los diagramas del ojo correspondientes a los canales 1 y 6 en la recepción, considerando una dispersión de la fibra de 0 y 16 ps/nm/km. Al analizar el valor de dispersión de 0 ps/nm/km, se observa una degradación debido a la dispersión, lo cual resulta en una disminución de la apertura del ojo. Esta reducción se traduce en una disminución del factor de calidad y de la BER, lo que genera una degradación completa del canal. Además, se suman las

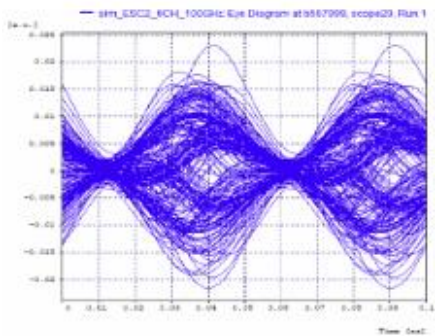
degradaciones causadas por el efecto XPM, que es provocado por el aumento de la potencia en los canales 2 y 9. En los diagramas de ojo, con un valor de dispersión de 16 ps/nm/km, se puede apreciar una ligera dispersión en la región de unos y ceros, lo que indica la presencia de ruido en los canales. Sin embargo, se observa simetría en los cruces de tiempo, lo que resulta en una apertura de ojo aceptable. A pesar de esto, los parámetros OPM obtenidos indican que apenas cumplen con el mínimo requerido.



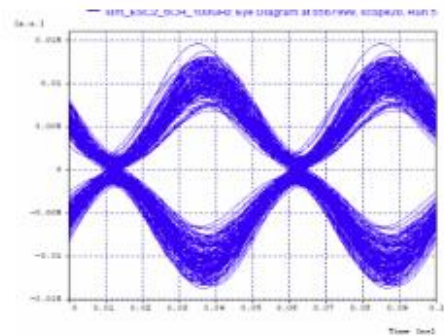
(a) Canal 1 para **CD=0 ps/nm/km**.



(b) Canal 1 para **CD=16 ps/nm/km**.



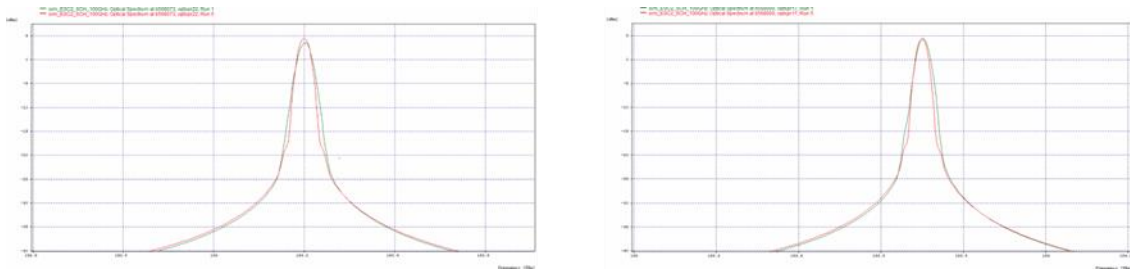
(c) Canal 6 para **CD=0 ps/nm/km**.



(d) Canal 6 para **CD=16 ps/nm/km**.

Figura 3.75. Diagramas de ojo para el canal 1 y 6 en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km y 16 ps/nm/km.

En la figura 3.76 se muestran los diagramas de espectro en recepción de los canales 1 y 6. Al considerar la variación de la dispersión de la fibra de 0 a 16 ps/nm/km, se puede apreciar la aparición del efecto no lineal XPM. Al comparar los dos valores de dispersión seleccionados, se observa un ensanchamiento del espectro causado por este efecto no lineal en los canales en recepción. Se destaca que el ensanchamiento generado por XPM es mayor cuando el valor de dispersión de la fibra es de 0 ps/nm/km.



(a) Canal 1

(b) Canal 6

Figura 3.76. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 6, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

En la Figura 3.77 se muestra el espectro óptico multiplexado obtenido del medio. Cuando se emplea un valor de dispersión de 0 ps/nm/km, se observa una clara degradación en la señal que llega al receptor. Además, la presencia de los efectos no lineales se vuelve más notable. Debido a este valor, las deformaciones y ensanchamientos en el espectro se intensifican en todos los canales. En contraste, en la figura correspondiente a 16 ps/nm/km, se puede apreciar la asimetría en el ensanchamiento espectral generado por el efecto XPM. Los canales 2 y 5 presentan una deformación moderada en su espectro en comparación con los demás canales. Esto se debe al fenómeno SPM, que está relacionado con la potencia asignada a cada canal. Además, el efecto FWM se hace presente, generando nuevas componentes en frecuencia a los costados de los canales 1 y 6.

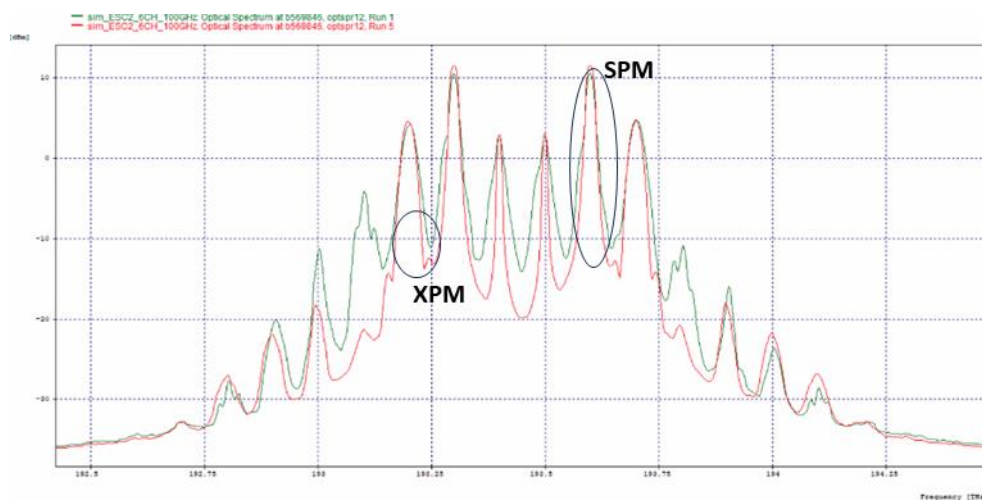
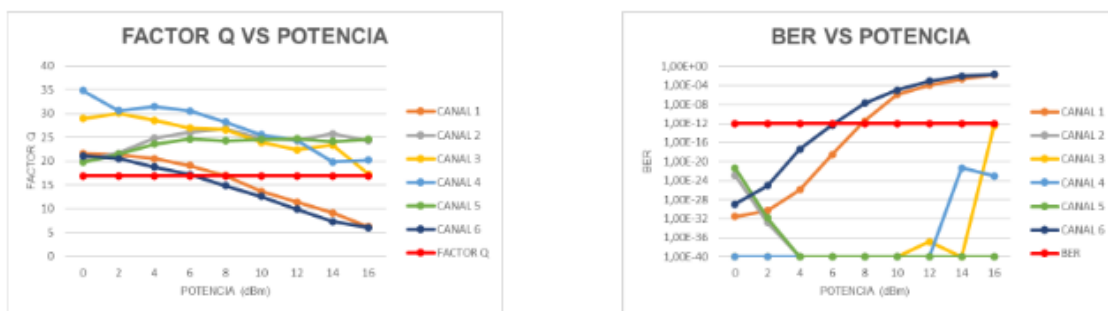


Figura 3.77. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la potencia con una separación de 50 GHz entre canales.**

En el presente caso de estudio, se han obtenido los parámetros de desempeño para cada uno de los canales que componen la red (Anexo, tabla 26). Además, se ha establecido un espaciamiento de 50 GHz entre los 6 canales para analizar la influencia de los efectos no lineales sobre la red propuesta, se ha llevado a cabo una variación de la potencia de los canales 2 y 5 en un rango de 0 a 16 dBm, con incrementos de 2 dBm. En la figura 3.78 se presentan las gráficas correspondientes a los parámetros de desempeño obtenidos para este caso.



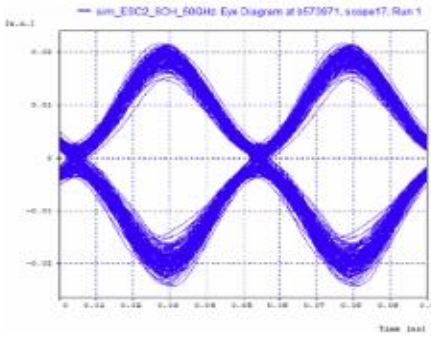
(a) Factor Q vs Potencia

(b) BER vs Potencia

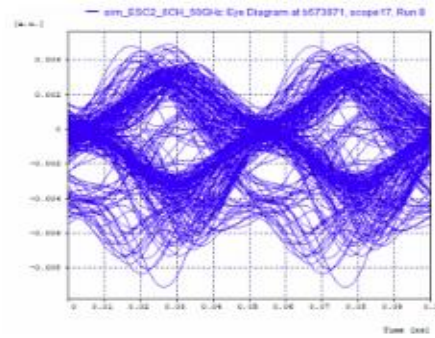
Figura 3.78. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 6 canales con espaciamiento de 50 GHz.

En la figura 3.78 se puede apreciar que, para niveles de potencia mayores a 6 dBm, los canales más afectados son los de mayor tasa de transmisión, es decir, los canales 1 y 6. Además, se observa que el comportamiento de los canales restantes es aceptable hasta un valor de potencia de 16 dBm, sin embargo, en este punto los canales 3 y 4 experimentan una reducción en su desempeño. En comparación con la red tipo 1 caso 1 con separación de 50 GHz, se observa que el presente escenario tiene un mejor rendimiento del sistema. Esto se debe a que el desempeño de los canales NRZ-OOK mantiene un nivel más alto en este caso.

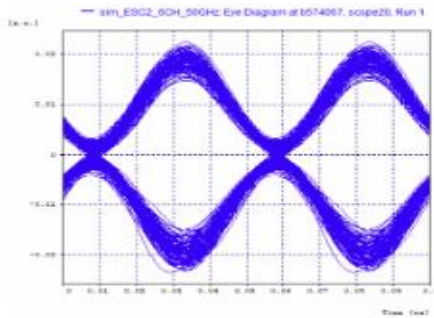
En las figuras 3.79(a) a 3.79(d), se presentan los diagramas de ojo para los canales 1 y 6, los cuales corresponden al formato de modulación RZ-DQPSK a una tasa de transmisión de 40 Gbps. En estos diagramas, se puede apreciar la degradación causada por los canales adyacentes al aumentar su potencia, donde se refleja en una disminución considerable en la apertura de ojo, lo cual afecta negativamente la calidad de la señal y, por ende, el desempeño del canal impidiendo que se cumplan con los parámetros OPM establecidos.



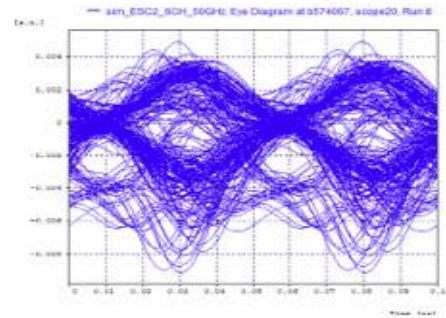
(a) Diagrama del ojo canal 1 a 0 dBm.



(b) Diagrama del ojo canal 1 a 16 dBm



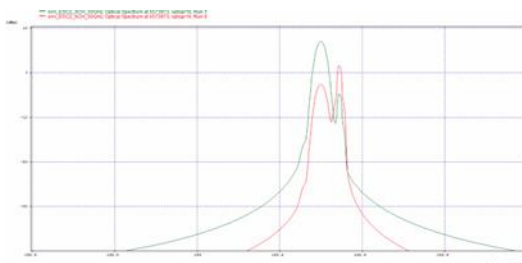
(c) Diagrama del ojo canal 6 a 0 dBm.



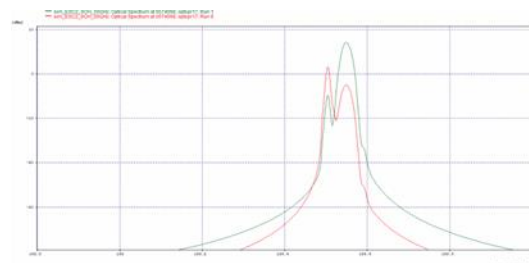
(d) Diagrama del ojo canal 6 a 16 dBm

Figura 3.79. Diagramas de ojo para el canal 1 y 6 en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm y 16 dBm en el canal 2 y 5.

En las figuras 3.80(a) a 3.80(d), se puede apreciar el espectro en recepción de los canales 1 y 6, se observa claramente que a medida que aumenta la potencia de los canales adyacentes se genera una interferencia notable en estos canales. Además, se puede apreciar que el ensanchamiento y la deformación presentes en el espectro propias al efecto XPM provocan una distorsión considerable en la señal recibida.



(a) Espectro óptico canal 1.



(b) Espectro óptico canal 6.

Figura 3.80. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 6, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.

La figura 3.81 muestra el espectro óptico obtenido del medio, donde se evaluó la potencia de transmisión en un rango de 0 a 16 dBm en los canales 2 y 5, con un espaciamiento de 50 GHz entre los demás canales. Es importante destacar que, debido a esta separación, el espectro se ve afectado al aumentar la potencia en los canales CSRZ-OOK. Además, se observan distorsiones en el espectro óptico causadas por ICI, las cuales están relacionadas con la no linealidad y las configuraciones utilizadas en este caso. A medida que la potencia de los canales 2 y 5 alcanza los 16 dBm, se observa la aparición del efecto no lineal FWM, generando pequeños lóbulos que pueden causar mayores interferencias en la recepción de la señal transmitida.

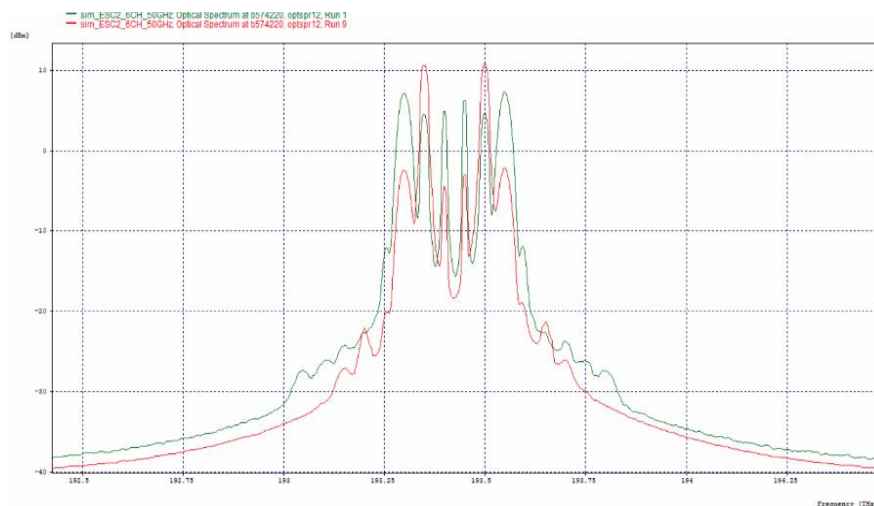
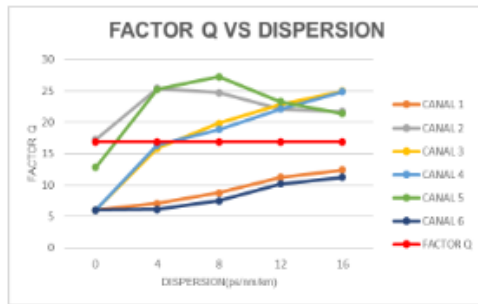


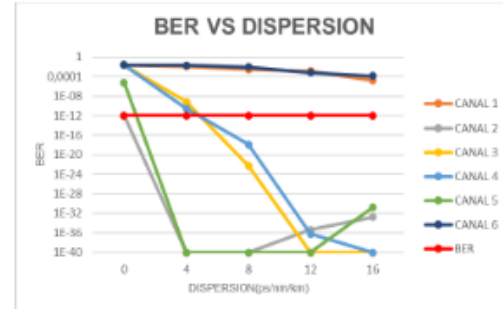
Figura 3.81. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la dispersión con una separación de 50 GHz entre canales.**

En este caso, se evaluó el valor de la dispersión en un rango de 0 a 16 ps/nm/km para validar las degradaciones en los parámetros OPM. Se configuró un espaciamiento entre canales de 50 GHz y se ajustó la potencia de los canales 2 y 5 a 10 dBm, mientras que los demás canales se mantuvieron en 0 dBm. En la figura 3.82 se presentan las gráficas correspondientes a los parámetros de desempeño para esta configuración (Anexo, tabla 27).



(a) Factor Q vs Dispersión

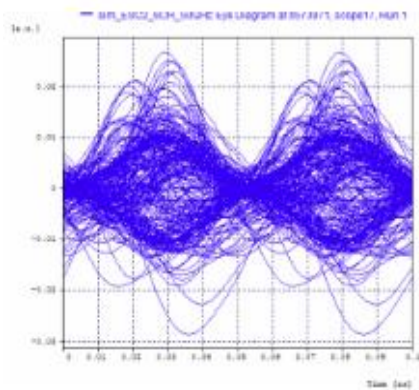


(b) BER vs Dispersión

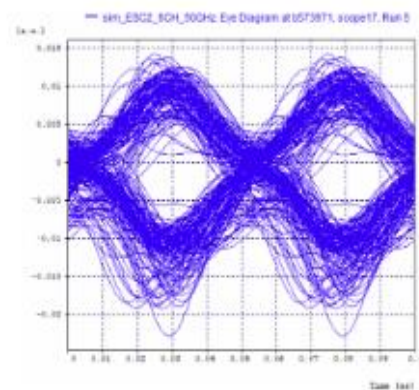
Figura 3.82. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 6 canales con espaciamento de 50 GHz.

Se observa que, para valores de dispersión mayores a 1 ps/nm/km, los canales 2, 3, 4 y 5 cumplen de manera aceptable con los parámetros OPM establecidos en el capítulo 2. Sin embargo, los canales 1 y 6, que utilizan el formato de modulación RZ-DQPSK a una tasa de transmisión de 40 Gbps, se ven afectados y no logran alcanzar el mínimo requerido en términos de calidad para todos los valores de dispersión analizados. Es importante destacar que para un valor de dispersión de 0 ps/nm/km, difícilmente el canal 3 alcanza a cumplir con el mínimo de los parámetros de desempeño establecidos, en contraste con los demás canales que no cumplen. En comparación con la red tipo 1 caso 1 con una separación de 50 GHz, se aprecia una mejora considerable en este escenario, ya que más canales logran cumplir con los parámetros OPM.

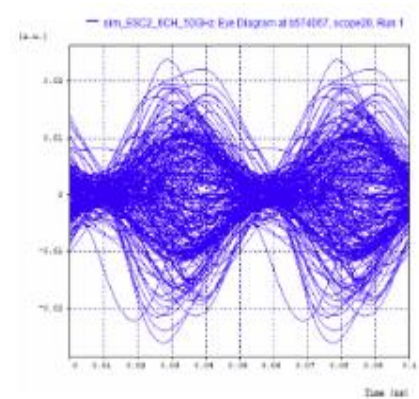
Las figuras 3.83(a) a 3.83(d) muestran los diagramas de ojo de los canales 1 y 6 en recepción. En dichos gráficos se aprecia que para una dispersión de 0 ps/nm/km, la degradación de la señal cuando ha salido del medio es notable. Esto viene acompañado de dispersión y una fuerte presencia de varios efectos que distorsionan y ocasionan la disminución de los factores de calidad y el aumento de la BER, lo cual dificulta la labor de recuperación de los datos en recepción. Por otro lado, para una dispersión de 16 ps/nm/km, se observa una reducción en la apertura del ojo y el efecto de la dispersión es considerable.



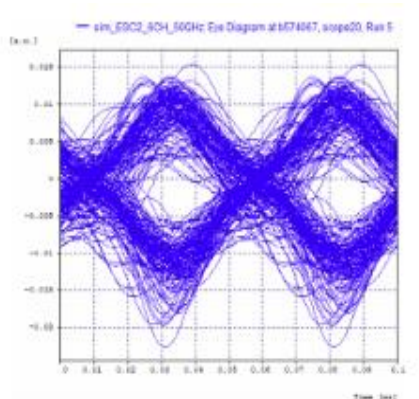
(a) Canal 1 para $CD=0$ ps/nm/km.



(b) Canal 1 para $CD=16$ ps/nm/km.



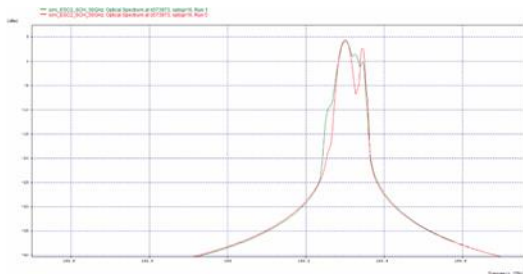
(c) Canal 6 para $CD=0$ ps/nm/km.



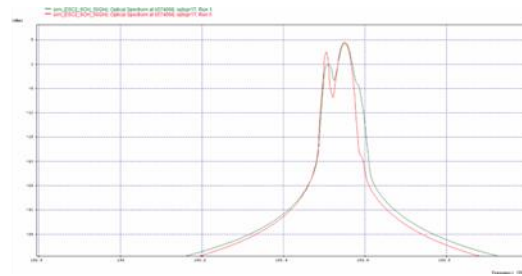
(d) Canal 6 para $CD=16$ ps/nm/km.

Figura 3.83. Diagramas de ojo para el canal 1 y 6 en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km y 16 ps/nm/km.

En las figuras 3.84(a) a 3.84(d), se puede apreciar el espectro en recepción de los canales 1 y 6. Al comparar los dos valores de dispersión, se puede identificar el ensanchamiento generado por el efecto no lineal XPM. Además, se observa una interferencia notable generada por la diferencia de intensidad entre los canales 2 y 5 con respecto a los canales 1 y 6. Esta interferencia se ubica casi en la frecuencia central de los canales, y es importante destacar que en una dispersión de 0 ps/nm/km se presenta un punto crítico donde la señal se degrada aún más. Debido al espaciamiento configurado en la red, los canales RZ-DQPSK se ven afectados de manera significativa, lo cual impide alcanzar valores de desempeño óptimos.



(a) Canal 1



(b) Canal 6

Figura 3.84. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 6, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

La figura 3.85 muestra el espectro óptico multiplexado del medio, se puede observar que para una dispersión de 0 ps/nm/km se produce una degradación total de los canales en la red, debido a que este es un valor crítico que estimula el deterioro generado por los efectos no lineales. Por otro lado, cuando se utiliza una dispersión de 16 ps/nm/km se aprecian interferencias notables generadas por el espaciado configurado, lo cual evidencia la necesidad del ancho de banda para los canales con formato de modulación avanzada y la diferencia de intensidad que tienen estos con los canales adyacentes.

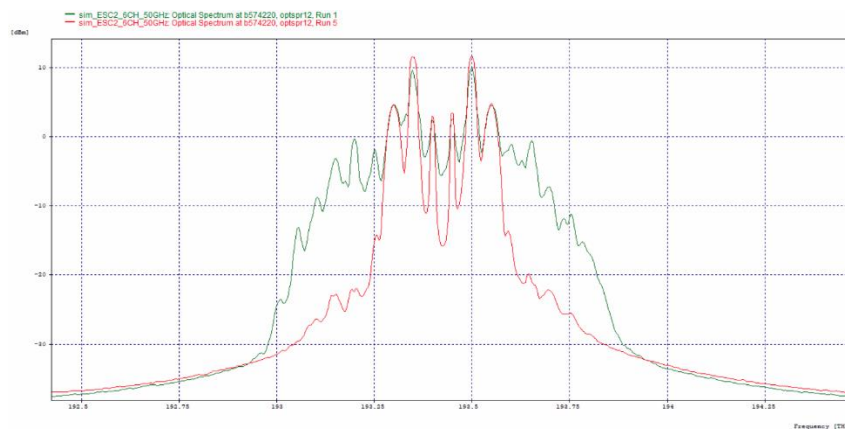
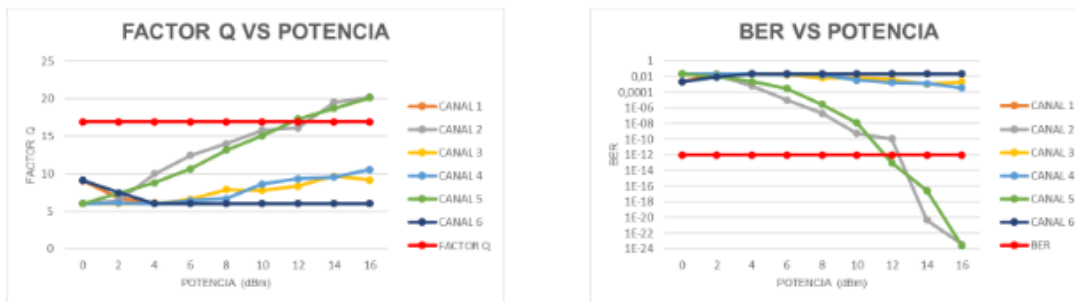


Figura 3.85. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la potencia con una separación de 25 GHz entre canales.**

En este análisis, se configura en la red un espaciamiento de 25 GHz entre los seis canales que componen la red. Se varía la potencia de los canales 2 y 5 en un rango que va desde 0 hasta 16 dBm, con incrementos de 2 dBm. Esto se realiza con el fin de obtener los parámetros de desempeño para cada uno de ellos en la red (Anexo, Tabla 28). En la figura 3.86 se presentan las gráficas que muestran los resultados de los parámetros de desempeño en los canales.



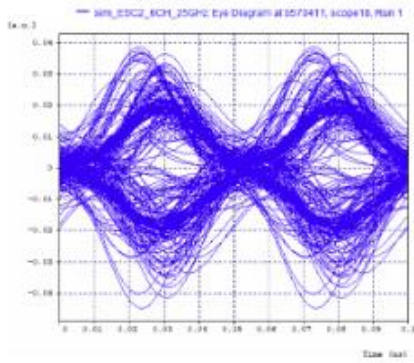
(a) Factor Q vs Potencia

(b) BER vs Potencia

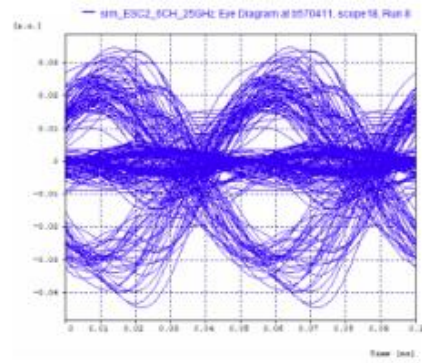
Figura 3.86. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 6 canales con espaciamiento de 25 GHz.

Para este caso, los canales 1, 4, 5 y 6 no cumplen con los valores mínimos para satisfacer los parámetros de desempeño del OPM, lo cual se puede atribuir al espaciamiento entre los canales configurados en la red. Al igual que en la red tipo 1 caso 1, los únicos canales que cumplen con los requerimientos de desempeño son aquellos que tienen una potencia más alta. Sin embargo, en este caso se presentan mejores resultados debido a que los canales 2 y 5 alcanzan los requisitos establecidos en el capítulo dos con un valor de potencia más bajo.

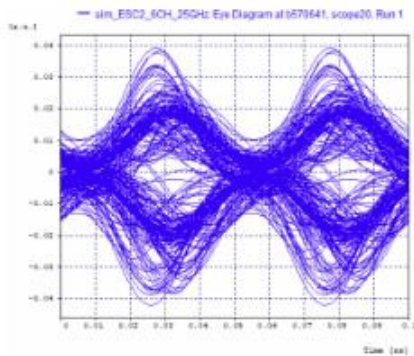
En las figuras 3.87(a) a 3.87(d), se puede observar un deterioro completo en los diagramas de ojo de los canales 1 y 6 cuando el espaciamiento entre los canales es de 25 GHz, este comportamiento se evidencia en la mayoría de los canales en esta configuración. En consecuencia, resulta imposible realizar la transmisión debido a que no cumplieron con los parámetros OPM. También se aprecian múltiples efectos que distorsionan por completo la señal transmitida, lo que hace imposible su recuperación en el receptor, además la presencia de ISI, así como una baja apertura del ojo en el diagrama indican una alta dispersión en el rango de potencias analizadas.



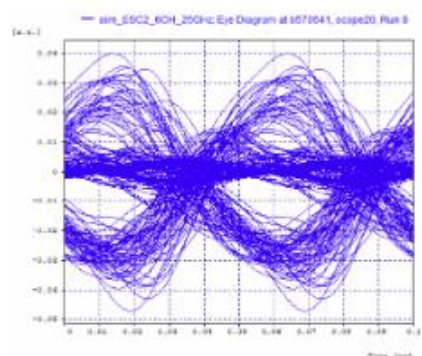
(a) Diagrama del ojo canal 1 a 0 dBm.



(b) Diagrama del ojo canal 1 a 16 dBm



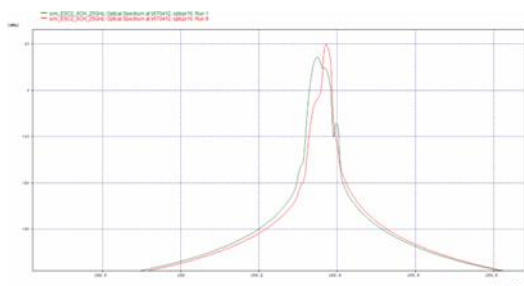
(c) Diagrama del ojo canal 6 a 0 dBm.



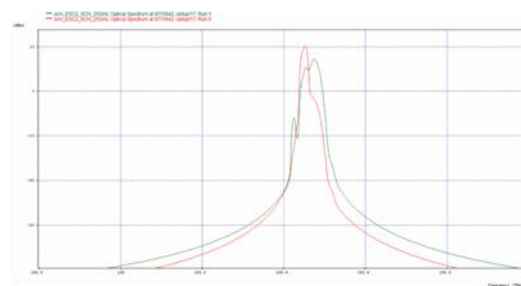
(d) Diagrama del ojo canal 6 a 16 dBm

Figura 3.87. Diagramas de ojo para el canal 1 y 6 en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm y 16 dBm en el canal 2 y 5.

En la figura 3.88(a) y 3.88(b) se presentan los diagramas del espectro óptico en recepción de los canales 1 y 6. Debido al espaciamiento entre los canales, el efecto de la interferencia en el espectro se ha intensificado y es más notable cuando en los canales 2 y 5 se tiene el nivel de potencia más alto. A pesar de esto, el ensanchamiento generado por el efecto XPM se hace presente deformando de manera notoria el espectro de los canales RZ-DQPSK.



(a) Espectro óptico canal 1.



(b) Espectro óptico canal 6.

Figura 3.88. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 6, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.

En la figura 3.89 se observa el espectro óptico multiplexado obtenido del medio, en donde el desempeño de la red está totalmente comprometido y no entrega resultados favorables que cumplan con los parámetros OPM, como se ha venido indicando el espaciamiento entre canales, no es el adecuado y lo único que produce es la intensificación de la interferencia entre los canales. Además, se observa un espectro óptico totalmente deformado por el traslape de los canales contiguos. En el mejor de los casos solo se alcanzan a detectar 4 de los 6 canales implementados, en donde dos de ellos están completamente dañados.

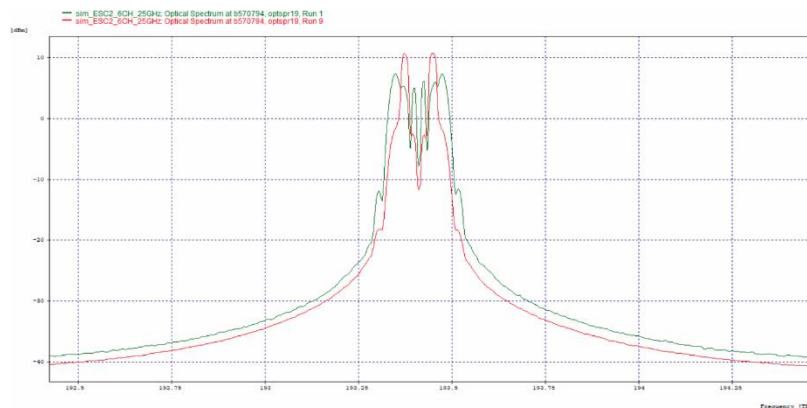
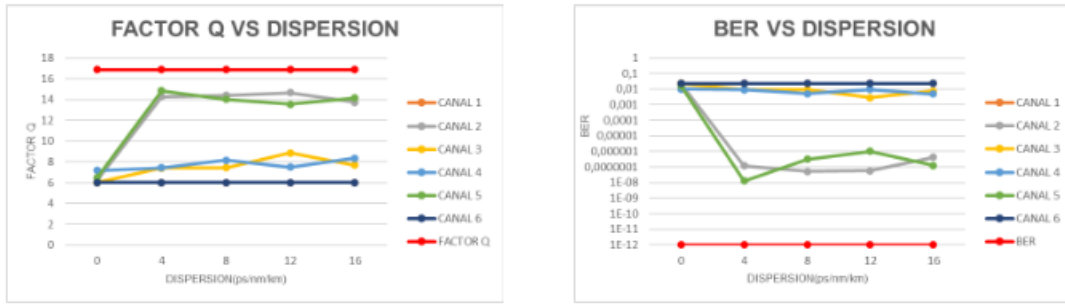


Figura 3.89. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la dispersión con una separación de 25 GHz entre canales.**

La variación de la dispersión con una separación de 25 GHz entre canales se muestra en la figura 3.90 (Anexo, Tabla 29). Para este caso el desempeño en los canales no superó el mínimo requerido para cumplir con los parámetros OPM, debido al espaciamiento entre canales implementado en este caso y a la potencia configurada en los canales 2 y 5. Por lo tanto no se justifica realizar un análisis detallado del desempeño en los canales, por medio de diagramas de ojo o espectro, en especial con los canales que cuentan con un formato de modulación avanzada que son los que tienen el peor desempeño para todas las variaciones de dispersión.



(a) Factor Q vs Dispersión

(b) BER vs Dispersión

Figura 3.90. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 6 canales con espaciamento de 25 GHz.

3.3.2 Caso de estudio 4: 4 canales de 2.5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 4 canales de 40 Gbps.

En este cuarto caso de estudio se toma como referencia el escenario de red propuesto en el caso anterior, pero con la diferencia de que se agregan 4 nuevos canales, dos corresponden al formato de modulación RZ-DQPSK a una tasa de transmisión de 40 Gbps y los dos restantes al formato de modulación NRZ-OOK a 2.5 Gbps. La organización de los canales se configura de la misma manera que la red MLR tipo 1 caso 2, en este caso los formatos con la tasa de transmisión más alta ocuparán los extremos, en el centro se ubicarán 4 canales NRZ-OOK y entre estos dos formatos estará ubicado un canal de 10 Gbps asignado al formato de modulación CSRZ-OOK. Además, se ha optado por mantener una separación de 100 GHz entre los canales siguiendo la recomendación ITU-T G.694.1 [4], El primer canal estará ubicado en una frecuencia central de 193.0 THz, mientras que el último canal se encuentra en una frecuencia de 193.9 THz. Para análisis futuros, se considerarán también las separaciones de 50 GHz y 25 GHz mencionadas en dicha recomendación.

En la figura 3.91 se muestra el escenario de simulación propuesto para este caso de estudio. La distancia de enlace será de 80 km, mientras que la última milla tendrá una extensión de 1 km. Al igual que en casos anteriores, se opta por utilizar una rejilla de Bragg ideal para compensar la dispersión cromática al 100%. Esto permitirá aislar y observar los fenómenos no lineales, como el SPM y el XPM.

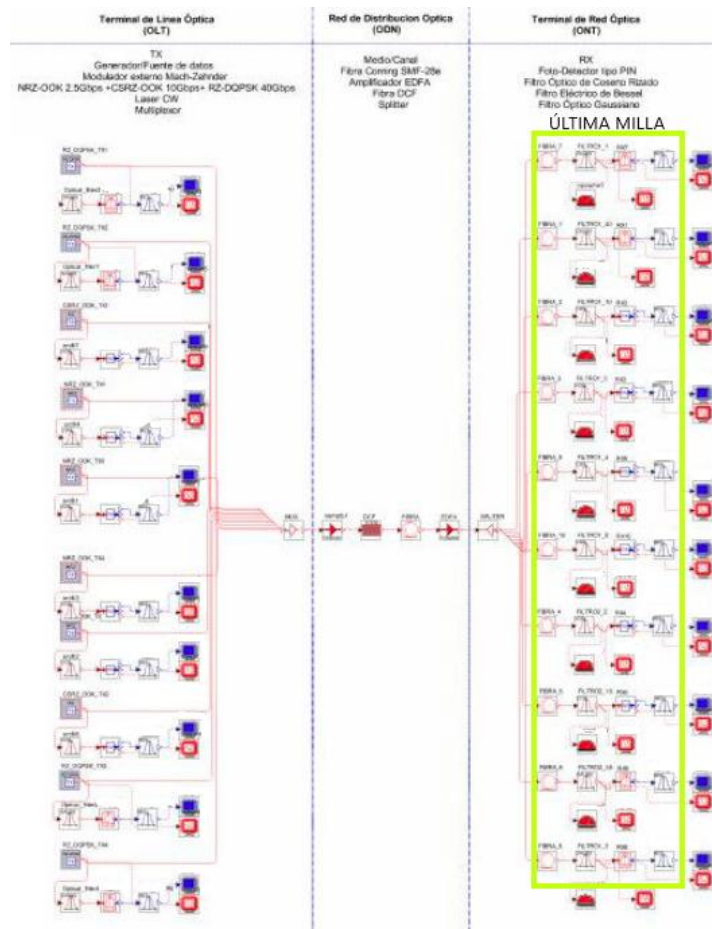


Figura 3.91. Escenario de simulación de la red MLR caso 4.

Se procede a realizar una evaluación del rendimiento en función de las características del escenario de simulación mencionado anteriormente. En general se observa que todos los canales muestran un rendimiento satisfactorio, tal como se detalla en la tabla 3.7. Esto se debe a la implementación de una compensación ideal en el sistema y sin la variación en ciertos parámetros, como la dispersión y la potencia.

Canal	Modulación	Velocidad (Gbps)	Potencia RX (dBm)	Factor Q (dB)	BER	Jitter (ns)	OSNR (dB)	OSNR Real (dB)
1	RZ-DQPSK	40	4.4955	26.8055	10^{-40}	0.000425	51.0865	34.4955
2	RZ-DQPSK	40	4.4578	26.7971	10^{-40}	0.000427	51.3283	34.4578
3	CSRZ-OOK	10	1.9720	30.0439	10^{-40}	0.001974	52.5562	31.9720
4	NRZ-OOK	2.5	2.7917	31.2083	10^{-40}	0.083497	54.2833	32.7917
5	NRZ-OOK	2.5	2.6193	31.7704	10^{-40}	0.089810	54.3270	32.6193
6	NRZ-OOK	2.5	2.9578	32.2850	10^{-40}	0.085344	54.5256	32.9578
7	NRZ-OOK	2.5	2.9138	31.5008	10^{-40}	0.099548	54.9827	32.9138
8	CSRZ-OOK	10	1.9614	27.8931	10^{-40}	0.002074	53.4691	31.9614
9	RZ-DQPSK	40	4.6339	26.7006	10^{-40}	0.000443	51.9719	34.6339
10	RZ-DQPSK	40	4.6840	26.6053	10^{-40}	0.000414	52.0652	34.6840

Tabla 3.7. Parámetros OPM de la red MLR caso 4.

En la figura 3.92 se muestra el espectro óptico multiplexado obtenido del medio, en donde se aprecian los diez canales que componen la red distribuidos con un espaciamiento de 100 GHz. Se pueden apreciar las distorsiones generadas por los canales en el sistema, además se observa en los canales de los extremos una superposición debido a que estos demandan un mayor ancho de banda y una deformación introducida por XPM, en los costados es notable la aparición de componentes en frecuencia debido al efecto FWM. En general, la configuración actual del sistema cumple con los parámetros de calidad OPM, manteniendo los valores muy por encima de la recomendación de la ITU-T [62] [96].

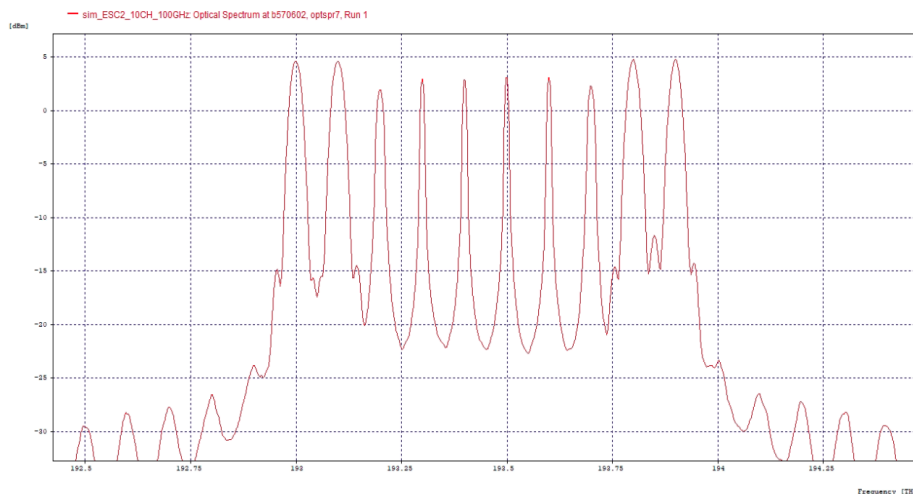
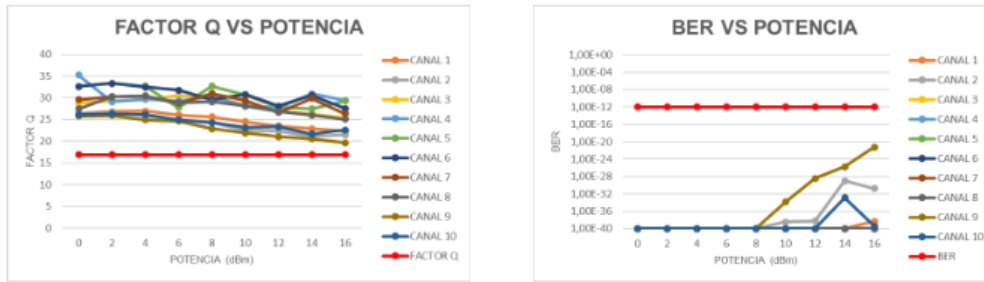


Figura 3.92. Espectro óptico para los seis canales de la red MLR caso 4.

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la potencia con una separación de 100 GHz entre canales.**

Se lleva a cabo una configuración en la cual se establece un espaciamiento de 100 GHz entre los diez canales de la red. Se obtienen los parámetros de desempeño, como la BER y el factor Q (Anexo, tabla 30) para cada uno de estos canales. Con el fin de analizar la influencia de los efectos no lineales en la red MLR Tipo 2, se procede a variar la potencia de los canales 3 y 8 en un rango de 0 a 16 dBm. Los resultados de este estudio se presentan en las gráficas que se muestran en la figura 3.93.



(a) Factor Q vs Potencia

(b) BER vs Potencia

Figura 3.93. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 10 canales con espaciamento de 100 GHz.

En la figura 3.93 se puede apreciar que todos los canales que componen la red cumplen los parámetros de calidad OPM, sugeridos por la recomendación de la ITU-T [62] [96]. La mejora en el desempeño, en comparación con la red de tipo 1 caso 2 con una separación de 100 GHz es notable. En cuanto a los canales que tienen asignado el formato de modulación RZ-DQPSK, se observa una mejora en el rendimiento y se obtienen resultados superiores en comparación con su contraparte, además no se alcanzan valores por debajo del límite de los requisitos OPM. La mejora del desempeño en los canales 4, 5, 6 y 7 con formato de modulación NRZ-OOK es también significativa, ya que mantienen una BER de 10^{-40} y presentan el mejor del factor de calidad para los valores de potencia analizados.

En las figuras 3.94(a) a 3.94(d), se presentan los diagramas del ojo en recepción correspondientes a los canales 1, 2, 9 y 10. Estos diagramas muestran la representación de la señal recibida para una potencia de 0 dBm en los canales 3 y 8. A pesar de la existencia de la interferencia provocada por la separación establecida entre los canales mencionados, se observa que el impacto de la dispersión es mínimo en las marcas de unos y ceros, además se presenta simetría en los cruces de tiempo y apertura del ojo, lo cual indica un daño mínimo en la calidad de la señal.

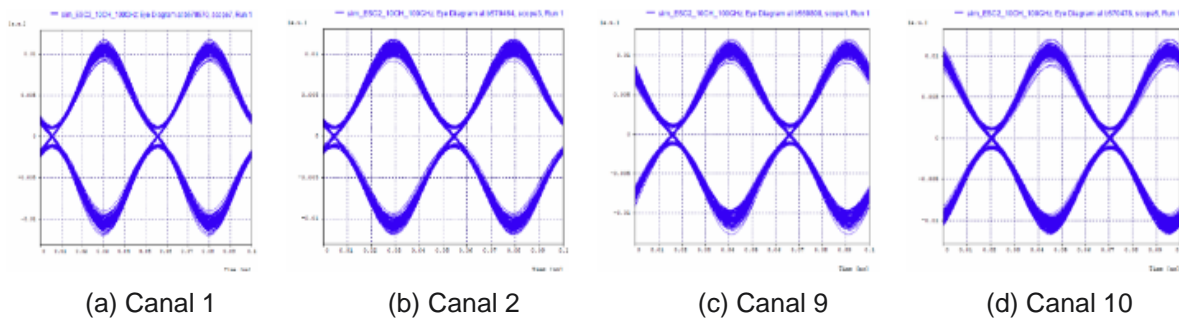


Figura 3.94. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para un valor potencia de 0 dBm en el canal 3 y 8.

En las figuras 3.95(a) a 3.95(d), se presentan los diagramas del ojo en recepción correspondientes a los canales 1, 2, 9 y 10. Se aprecia que al aumentar la potencia de los canales 3 y 8 se ha generado una distorsión que influye en los canales más cercanos a estos, lo cual se atribuye al efecto XPM. No obstante, esta degradación no tiene un impacto significativo en la calidad de la señal, dado que para este caso los diagramas muestran que la apertura del ojo se mantiene lo suficientemente amplia como para permitir una correcta recepción de los datos transmitidos, es decir que los parámetros de desempeño cumplen con los propuestos en el capítulo 2.

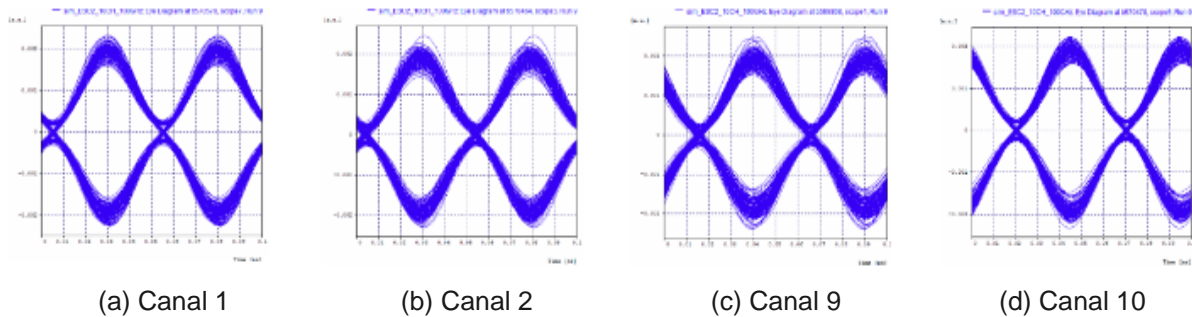


Figura 3.95. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para un valor potencia de 16 dBm en el canal 3 y 8.

En las figuras 3.96(a) a 3.96(b), se presentan los espectros ópticos en recepción correspondientes a los canales 1 y 10. A pesar del incremento de la potencia de transmisión de los canales 3 y 8, se puede apreciar que el formato de modulación avanzado en esta red es más robusto y es menos susceptible a las deformaciones causadas por el efecto XPM, donde estas son apenas perceptibles en los espectros.

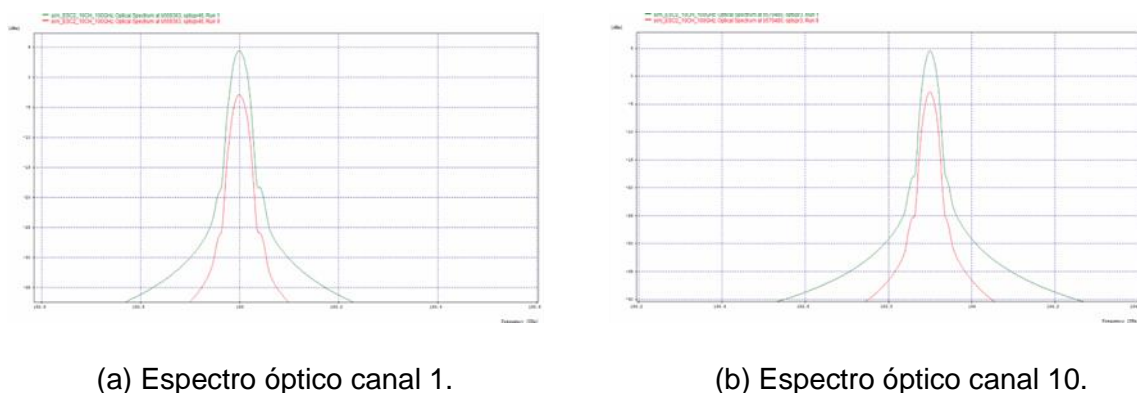
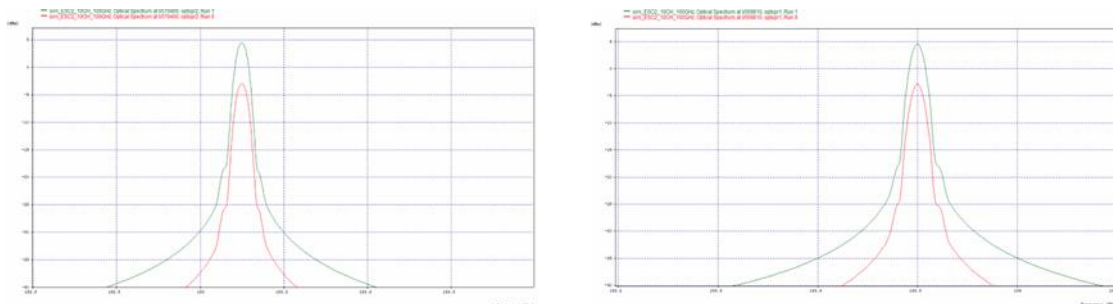


Figura 3.96. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 10, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.

En las figuras 3.97(a) a 3.97(b), se presentan los espectros ópticos en recepción correspondientes a los canales 2 y 9. A pesar del aumento de la potencia en los canales 3 y 8, se puede apreciar la robustez del formato de modulación RZ-DQPSK, lo cual lo hace menos susceptible a las deformaciones características del efecto XPM.



(a) Espectro óptico canal 2.

(b) Espectro óptico canal 9.

Figura 3.97. Espectro óptico en recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.

En la figura 3.98 se muestra el espectro óptico multiplexado obtenido del medio. Aunque el sistema funciona correctamente para la separación establecida, se presentan algunas degradaciones en el espectro. En consecuencia, a la variación de potencia de los canales 3 y 8, se puede observar deformaciones en el espectro entre los canales con formato de modulación avanzada, las cuales se atribuyen al efecto XPM y al espaciamiento entre estos canales. En los canales de bombeo, se observa un ensanchamiento al aumentar sus potencias, lo cual indica la presencia del efecto SPM. Además, al aumentar la potencia a 16 dBm se observa la aparición del efecto FWM con la presencia de componentes en frecuencia atribuidos a este fenómeno.

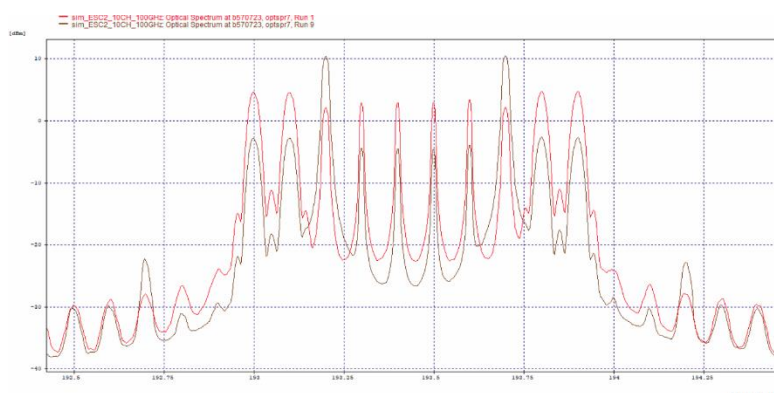
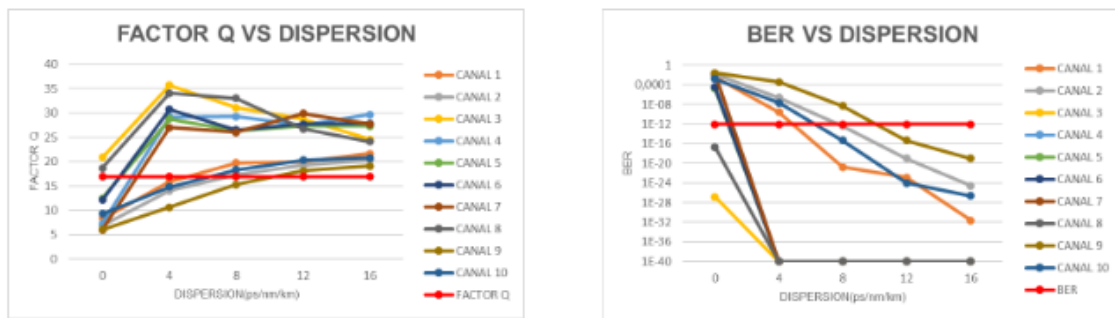


Figura 3.98 Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la dispersión con una separación de 100 GHz entre canales.**

Para realizar este análisis, el escenario se configura de la siguiente manera: se mantiene la potencia de los canales 3 y 8 en 10 dBm, mientras que la potencia de los canales restantes se fija en 0 dBm, además se lleva a cabo una variación de la dispersión en un rango de 0 ps/nm/km a 16 ps/nm/km y se obtienen los parámetros de desempeño, como la BER y el factor Q (Anexo, tabla 31) para cada uno de los canales en la red MLR Tipo 2. En la figura 3.99 se presentan las gráficas correspondientes a los parámetros de desempeño para esta configuración.



(a) Factor Q vs Dispersión

(b) BER vs Dispersión

Figura 3.99. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 10 canales con espaciamento de 100 GHz.

En la figura 3.99, se puede observar que los canales 1, 2, 9 y 10 con formato de modulación avanzado RZ-DQPSK a 40 Gbps cumplen únicamente con los parámetros OPM establecidos en el capítulo 2 para valores de dispersión mayores a 11 ps/nm/km, este comportamiento contrasta con lo observado en la red MLR de tipo 1 caso 2, donde se lograban cumplir con dichos parámetros incluso con valores más bajos de dispersión. Además, se presentan diferencias entre los resultados de los canales RZ-DQPSK, lo cual se atribuye a la posición asignada a cada canal en la grilla espectral. Por otro lado, en la red MLR de tipo 1 de 10 canales a 100 GHz, se aprecia un mejor desempeño frente a las variaciones de dispersión en comparación con la red MLR tipo 2, sin embargo, la red MLR de tipo 2 muestra un mejor desempeño en términos de variaciones de potencia. Estas diferencias se atribuyen a las configuraciones específicas de cada escenario de simulación.

En las figuras 3.100(a) a 3.100(d) se presentan los diagramas de ojo correspondientes a los canales 1, 2, 9 y 10. Se observa en los diagramas un notable deterioro que es coherente con el valor de dispersión de 0 ps/nm/km, en este valor las degradaciones atribuidas a las interferencias y a los efectos no lineales se presentan con mayor intensidad y afectan negativamente los parámetros de desempeño OPM, resultando

en una apertura de ojo no aceptable y dificultando la correcta interpretación de la información transmitida.

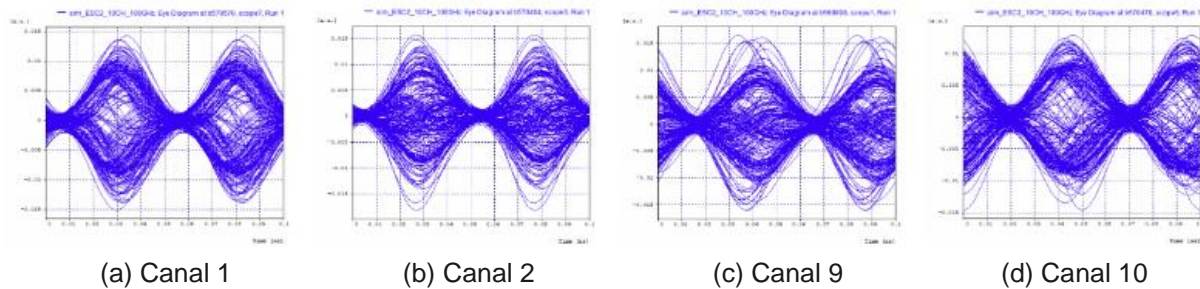


Figura 3.100. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para un valor de dispersión de 0 ps/nm/km.

En las figuras 3.101(a) a 3.101(d), se muestran los diagramas del ojo en recepción correspondientes a los canales 1, 2, 9 y 10 para un valor de dispersión de 16 ps/nm/km. Estos gráficos demuestran que, debido a la potencia de los canales 3 y 8, se genera una degradación por su causa del efecto XPM, el cual es más pronunciado en los canales cercanos, es decir, los canales 2 y 9. Sin embargo, para este valor de dispersión, el efecto no tiene un impacto negativo sobre los parámetros de desempeño. En los diagramas, se puede observar que la apertura del ojo se mantiene a un nivel lo suficientemente amplio como para permitir una correcta recepción de los datos transmitidos, logrando cumplir parámetros de desempeño OPM establecidos anteriormente. Aunque se perciben niveles de dispersión bajos, estos no son perjudiciales para las señales y se pueden omitir.

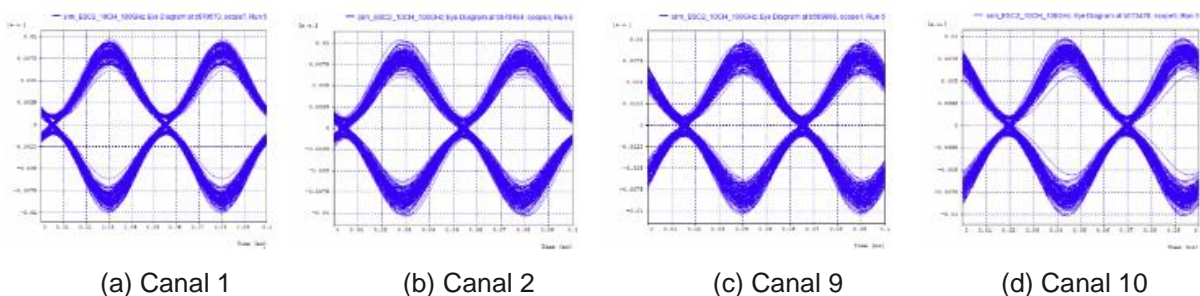
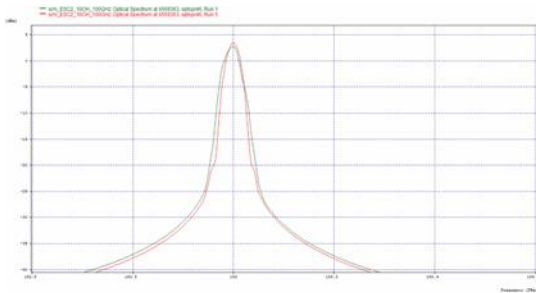
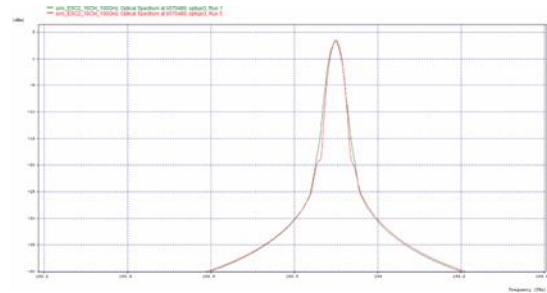


Figura 3.101. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para un valor de dispersión de 16 ps/nm/km.

En los gráficos 3.102(a) y 3.102(b), se observan los espectros ópticos en recepción de los canales 1 y 10, considerando los diferentes valores de dispersión analizados. Con el aumento en la potencia de transmisión de los canales de bombeo, es posible observar las deformaciones y el ensanchamiento ocasionados por el efecto XPM, aunque estas no son prominentes y apenas perceptibles en los espectros debido a su separación con los canales 3 y 8.



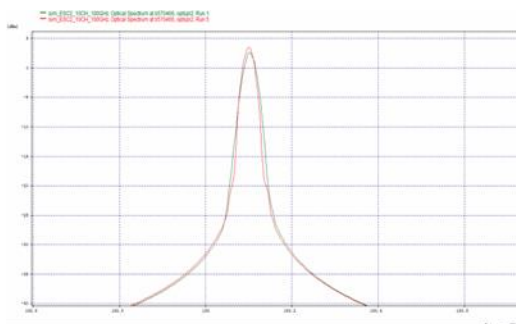
(a) Canal 1



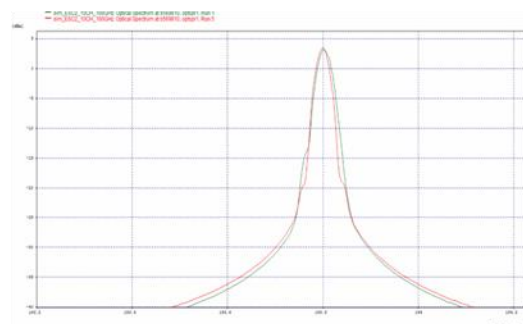
(b) Canal 10

Figura 3.102. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 10, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

En los gráficos 3.103(a) y 3.103(b), se observan los espectros ópticos en recepción de los canales 2 y 9, considerando los diferentes valores de dispersión evaluados. Al analizar estos canales, es posible observar que para un valor de dispersión igual 0 ps/nm/km, las deformaciones y ensanchamiento causadas por el efecto XPM, no son destacadas y apenas se perciben en los espectros, lo cual se atribuye a la robustez del formato de modulación RZ-DQPSK.



(a) Canal 2



(b) Canal 9

Figura 3.103. Espectro óptico en recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

En la Figura 3.104 se muestra el espectro óptico multiplexado obtenido del medio. En general, el sistema presenta un desempeño aceptable para valores de dispersión superiores a 11 ps/nm/km (Anexo, tabla 31). Se observa que al emplear un coeficiente de dispersión de 0 ps/nm/km, se produce un notable ensanchamiento en los canales debido al efecto XPM, también se evidencia la presencia del efecto FWM con la generación de componentes en frecuencia en un costado del canal RZ-DQPSK. Por otro lado, cuando la dispersión es de 16 ps/nm/km, el efecto predominante es el FWM,

debido a que se pueden identificar múltiples componentes en frecuencia en ambos extremos de los canales.

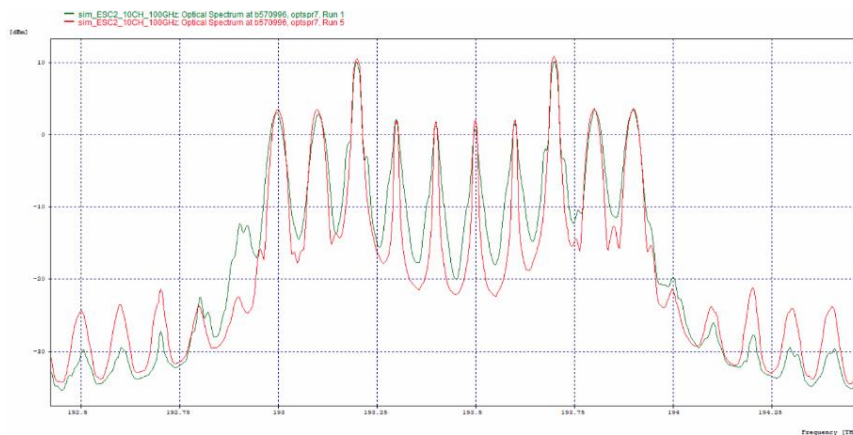
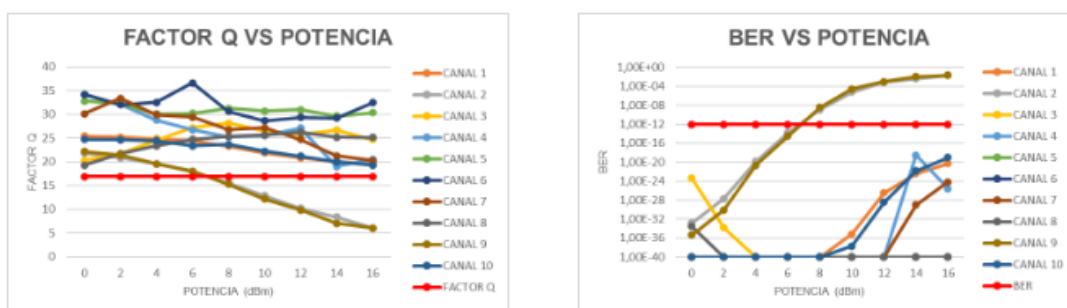


Figura 3.104. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la potencia con una separación de 50 GHz entre canales.**

En siguiente caso se configura un espaciamento de 50 GHz entre los 10 canales y se obtienen los parámetros de desempeño, como la BER y el factor Q (Anexo, tabla 32) para cada uno de los canales que componen la red MLR Tipo 2. A continuación, se presentan en la figura 3.105, las gráficas correspondientes a los parámetros de desempeño para el presente caso de estudio.



(a) Factor Q vs Potencia

(b) BER vs Potencia

Figura 3.105. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 10 canales con espaciamento de 50 GHz.

Los resultados de la Figura 3.105 muestran el comportamiento de cada uno de los canales en relación con la variación de la potencia. en donde se observa que el desempeño de la mayoría de canales cumple con los requerimientos para potencia menores a 6 dBm, valores superiores a este valor causan degradaciones notables en los canales 2 y 9 los cuales están más cerca de los canales de bombeo y experimentan la variación de potencia en estos, afectando sus valores de parámetros de OPM. En comparación con red MLR tipo 1 caso 2 con separación de 50 GHz, la red analizada es superior en el desempeño otorgado en esta configuración, debido a que la cantidad de canales que alcanzan un desempeño adecuado para todos los valores de potencia es mayor.

Las figuras 3.106(a) a 3.106(d) muestran los diagramas del ojo en recepción de los canales 1, 2, 9 y 10. En estos gráficos, se puede observar el nivel de desfase presente, así como la dispersión causada por el ruido y la separación establecida entre los canales mencionados. Es importante destacar que esto tiene un impacto negativo en la calidad de la señal, pero a pesar de ello, para este nivel de potencia aún se cumple con el mínimo establecido en los parámetros OPM.

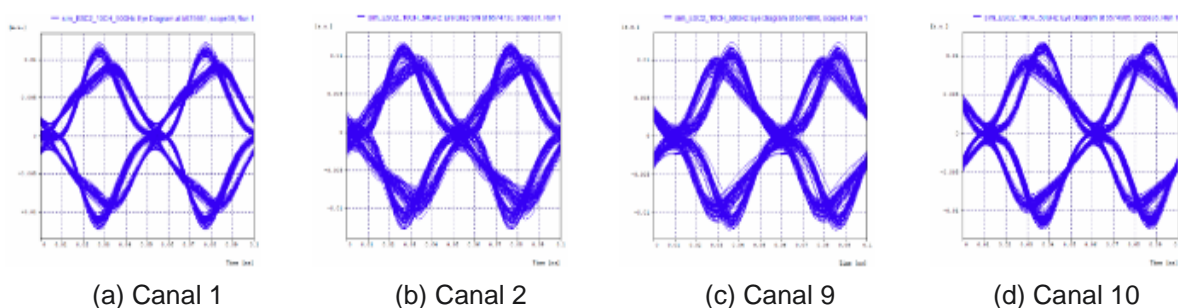


Figura 3.106. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para un valor potencia de 0 dBm en el canal 3 y 8.

En las figuras 3.107(a) a 3.107(d), se presentan los diagramas del ojo en recepción de los canales 1, 2, 9 y 10. Se puede observar que en el caso de los canales 2 y 9, la potencia de 16 dBm es un punto crítico debido a que la dispersión y la deformación del efecto XPM resultan en una fuerte ISI, haciendo que en estos canales no se cumpla con el mínimo requerido por los parámetros OPM. En comparación con los canales 1 y 10, el daño generado por los canales adyacentes hace que estos sufran de un leve desfase, lo cual implica asimetría en los cruces de tiempo y una degradación en la señal.

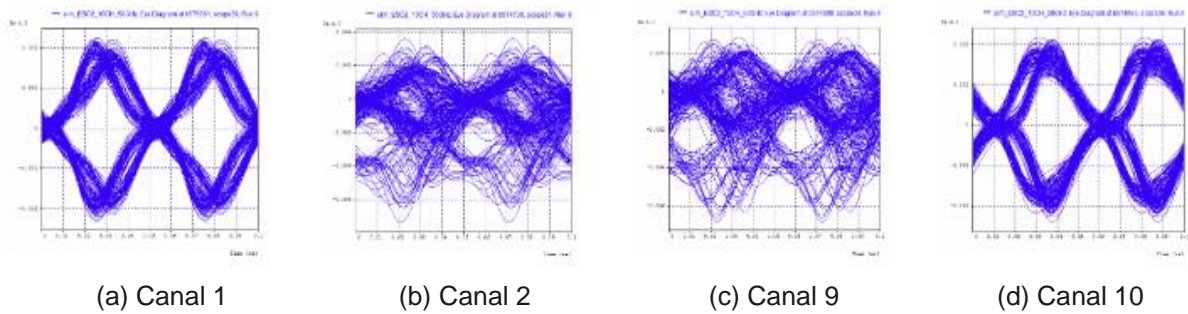


Figura 3.107. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para un valor potencia de 16 dBm en el canal 3 y 8.

En las figuras 3.108(a) a 3.108(b), se muestran los espectros ópticos en recepción correspondientes a los canales 1 y 10. En estos canales, se observan claras deformaciones en el lado del espectro que está adyacente a los otros canales con formato de modulación avanzado, estas deformaciones son causadas por el espaciamiento configurado entre los canales, lo que intensifica el efecto XPM.

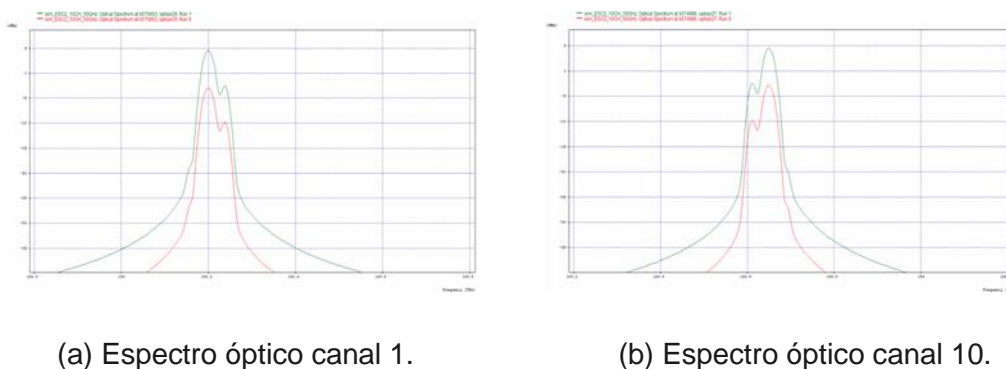
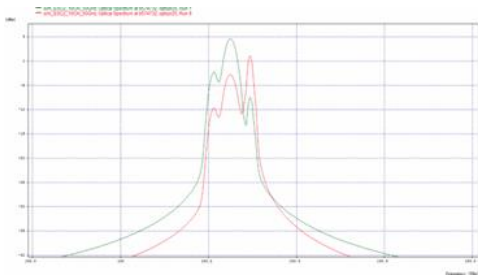
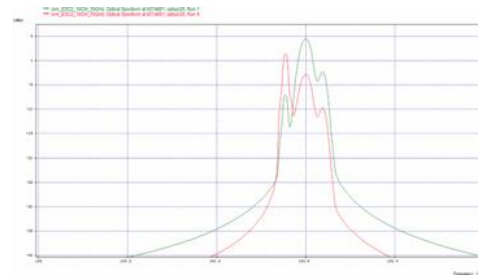


Figura 3.108. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 10, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.

En las figuras 3.109(a) a 3.109(b), se muestran los espectros ópticos en recepción correspondientes a los canales 2 y 9. En los gráficos es evidente la interferencia causada por los canales 3 y 8 a sus canales adyacentes, generando una interferencia con alta degradación, esto junto con la presencia del efecto XPM deforman la señal y se puede notar que el espectro ha cambiado su forma en recepción debido al impacto negativo de los efectos no lineales, además se aprecia un ligero ensanchamiento del espectro producto de la degradación sufrida en la señal debido a los efectos.



(a) Espectro óptico canal 2.



(b) Espectro óptico canal 9.

Figura 3.109. Espectro óptico en recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.

En la figura 3.110 se presenta el espectro óptico multiplexado obtenido del medio para un espaciado de 50 GHz en donde se evalúa la potencia en un rango de 0 a 16 dBm en los canales 3 y 8. Debido a la separación entre los canales, las degradaciones introducidas por los efectos no lineales en los espectros se hacen más evidentes a medida que aumenta la potencia de los canales CSRZ-OOK, en donde estos presentan un ensanchamiento debido al efecto SPM. Cuando en los canales de bombeo se configura una potencia de 16 dBm, el efecto FWM se presenta con dos componentes en frecuencia a los extremos de los canales. La mayoría de los canales con formato de modulación avanzada cumplen con los parámetros OPM hasta potencias de 7 dBm en los canales de bombeo, sin embargo, cuando se superan estas potencias y debido al espaciado los canales 2 y 9 no logran cumplir con dichos parámetros.

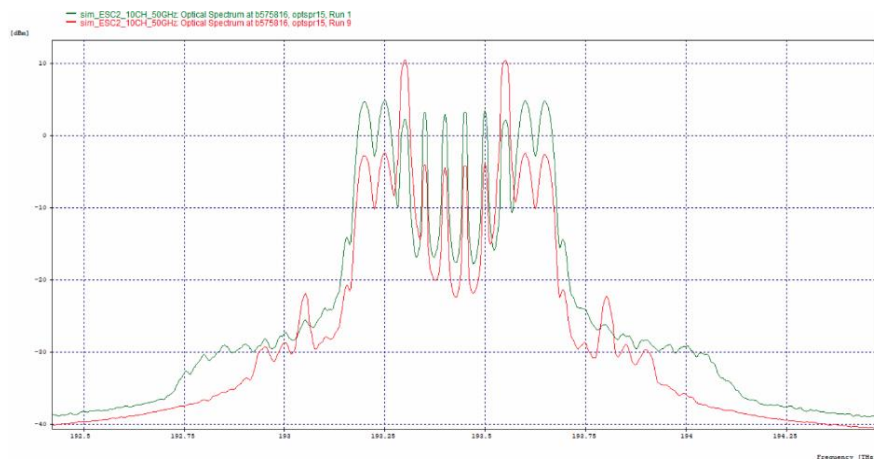
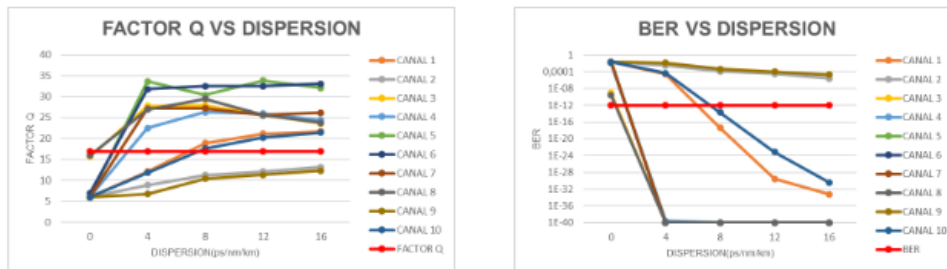


Figura 3.110. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 2 y 5.

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la dispersión con una separación de 50 GHz entre canales.**

Para realizar el análisis en la red MLR TIPO 2 para 10 canales, se configura de la siguiente manera: se mantiene la potencia de los canales 3 y 8 en 10 dBm, mientras que la potencia de los canales restantes se fija en 0 dBm y se lleva a cabo una variación de la dispersión en un rango de 0 a 16 ps/nm/km. Las gráficas correspondientes a los parámetros de desempeño para esta configuración se presentan en la figura 3.111 (Anexo, tabla 33).



(a) Factor Q vs Dispersión

(b) BER vs Dispersión

Figura 3.111. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 10 canales con espaciamiento de 50 GHz.

En los gráficos de la figura 3.111 referentes al análisis de dispersión versus factor Q y la BER, se observa que para niveles superiores a 8 ps/nm/km, la mayoría de los canales cumplen con los parámetros OPM establecidos en el capítulo 2, sin embargo, para valores menores a este se puede apreciar que para algunos canales se dificulta alcanzar el valor objetivo tanto en factor Q como en la BER. Para los canales con formato de modulación RZ-DQPSK se observa que solamente los canales cerca a los de bombeo no cumplen con los parámetros de desempeño establecidos. En comparación con la red MLR tipo 1 caso 2 de 10 canales con un espaciamiento de 50 GHz, el caso 4 presenta una mejoría significativa en el desempeño, dado que 8 de los 10 canales cumplen con los parámetros OPM frente a los 4 canales que cumplen con los parámetros en el caso 2. En consecuencia, la configuración y la grilla espectral tienen influencia en los resultados obtenidos, además de la separación entre los canales y al ancho de banda que cada uno de estos necesita en el espectro.

En las figuras 3.112(a) a 3.112(d), se muestran los diagramas del ojo en recepción correspondientes a los canales 1, 2, 9 y 10, para una dispersión de 0 ps/nm/km. Estos gráficos revelan que las degradaciones en los canales RZ-DQPSK a 40 Gbps son notables debido a que la forma del diagrama del ojo se ha perdido por completo. Por otro lado, la apertura de ojo es muy baja, lo que genera problemas en la recepción y

dificulta la recuperación de la información transmitida. Para este valor de dispersión tan crítico, ninguno de los canales cumple con los parámetros OPM establecidos.

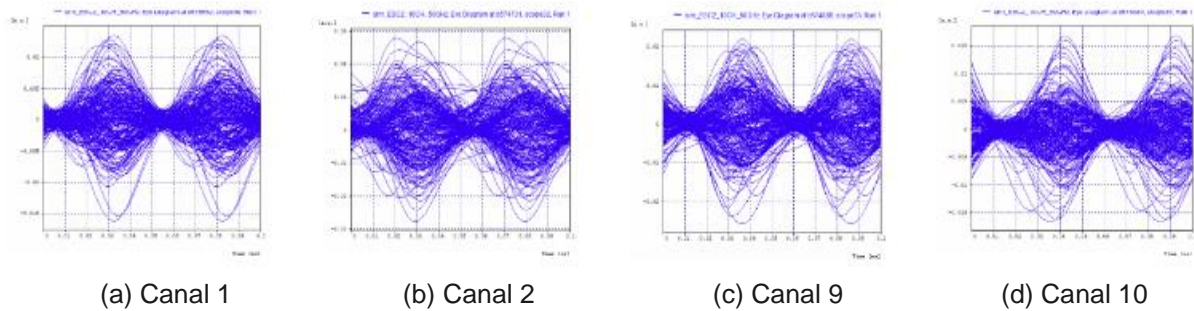


Figura 3.112. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para un valor de dispersión de 0 ps/nm/km.

En las figuras 3.113(a) a 3.113(d), se muestran los diagramas del ojo en recepción correspondientes a los canales 1, 2, 9 y 10, para una dispersión de 16 ps/nm/km. Se puede observar que los canales 2 y 9 presentan una dispersión y distorsión considerable, lo cual se traduce en la presencia considerable de ISI en estos canales. En cambio, para los canales 1 y 10 se aprecia un desfase leve, lo cual afecta en menor medida sus parámetros de desempeño. Sin embargo, esta situación no es grave y cumplen con los requisitos establecidos para los parámetros OPM.

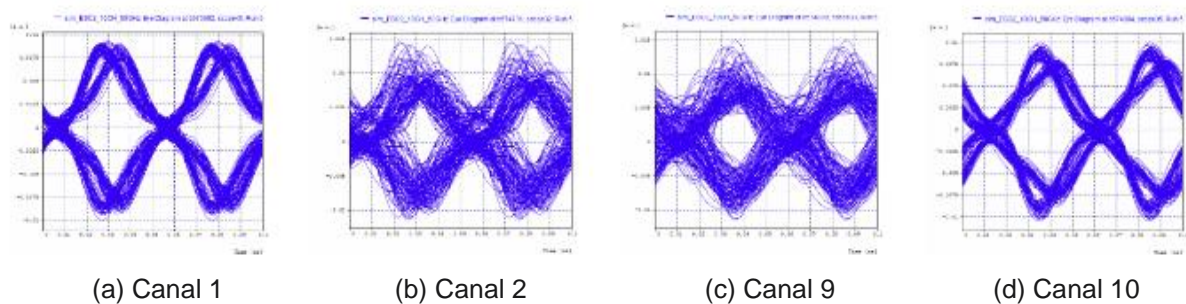


Figura 3.113. Diagramas de ojo para los canales en recepción, RZ-DQPSK a 40 Gbps, para un valor de dispersión de 16 ps/nm/km.

En las figuras 3.114(a) y 3.114(b), se presentan los espectros ópticos en recepción correspondientes a los canales 1 y 10, teniendo en cuenta los diferentes valores de dispersión analizados, estos gráficos revelan la presencia de ensanchamiento en dichos canales debido al efecto XPM, además el espaciamiento que presentan con los canales 2 y 9 intensifican las deformaciones, en donde estos últimos se ven afectados por el incremento en la potencia de transmisión de los canales 3 y 8.

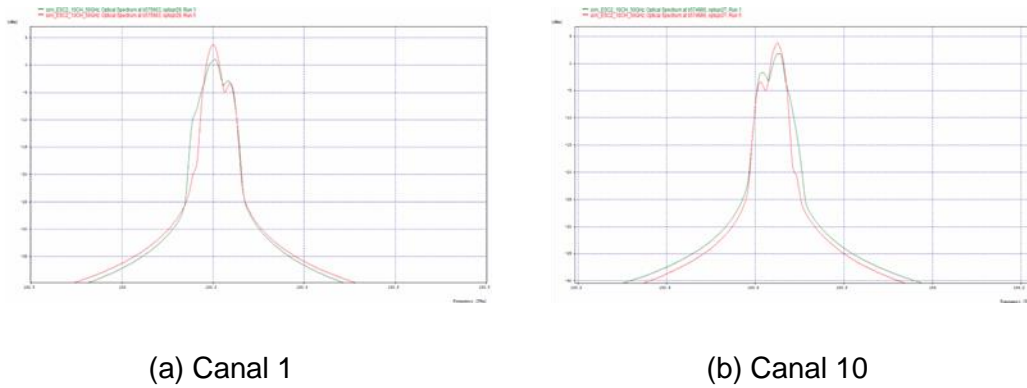


Figura 3.114. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 10, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

En las figuras 3.115(a) a 3.115(b), se muestran los espectros ópticos correspondiente a los canales 2 y 9, en donde dichos canales se presenta una interferencia grave generada por los canales 3 y 8. Además se observa un ensanchamiento en ambos lados debido al efecto XPM y a los canales adyacentes. Estas distorsiones y degradaciones son de carácter severo, impidiendo el cumplimiento adecuado de los parámetros OPM y afectando negativamente la calidad y la transmisión de la señal en los canales 2 y 9.

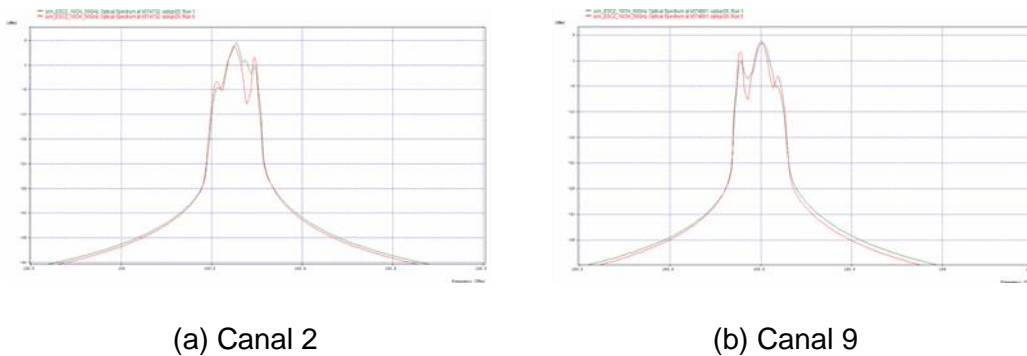


Figura 3.115. Espectro óptico en recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

La Figura 3.116 muestra el espectro óptico multiplexado obtenido del medio. Se observa que, para una dispersión de 0 ps/nm/km, todos los canales experimentan una degradación completa, perdiendo la estructura del espectro. Sin embargo, con una dispersión de 16 ps/nm/km, se aprecia que los efectos de degradación son leves, debido a que los canales están claramente definidos y se presentan interferencias mínimas entre ellos, igualmente los lóbulos correspondientes al FWM en los costados de los canales son mínimos. Por otro lado, se evidencia un traslape notorio entre los canales de alta tasa de velocidad, lo cual resulta en la pérdida de gran parte del espectro, mostrando solo una porción de los canales, No obstante, se observa un deterioro significativo en los canales 2 y 9, mientras que los canales 1 y 10 mantienen niveles aceptables de desempeño.

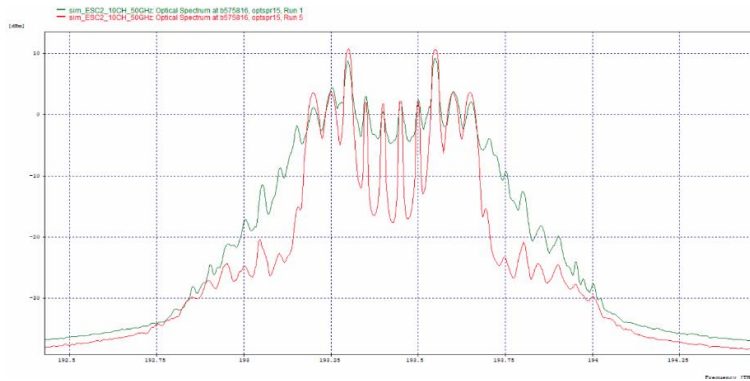
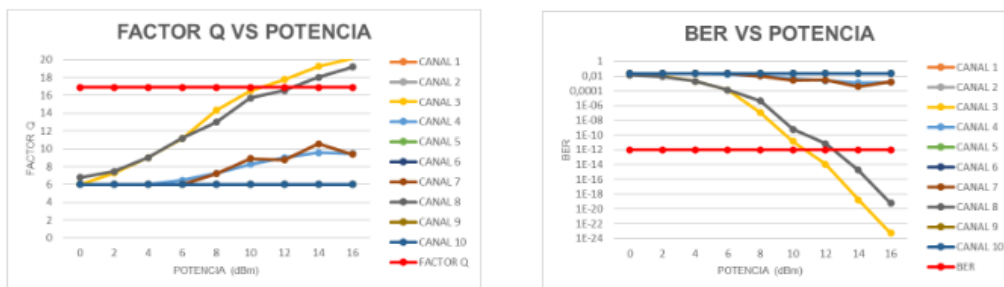


Figura 3.116. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la potencia con una separación de 25 GHz entre canales.**

En el presente análisis se configura una separación de 25 GHz entre los 10 canales, con el fin de determinar el comportamiento para cada uno de ellos en la red (Anexo, Tabla 34). Al igual que en los anteriores casos, la potencia de los canales 3 y 8 se varía en un rango desde 0 hasta 16 dBm, con incrementos de 2 dBm. En la Figura 3.117, se presentan las gráficas que ilustran los resultados obtenidos para estos parámetros de desempeño.



(a) Factor Q vs Potencia

(b) BER vs Potencia

Figura 3.117. Parámetros objetivos al variar la potencia para la red MLR de 10 canales con espaciamiento de 25 GHz.

Al analizar la red MLR TIPO 1 caso 4 de 10 canales con espaciamiento de 25 GHz, se observa que los diagramas muestran un comportamiento deficiente y solo algunos canales logran cumplir con los parámetros OPM después de alcanzar una potencia de 12 dBm, específicamente los canales 3 y 8 son los que cumplen con los parámetros

OPM en este caso, este comportamiento también se presenta en la red MLR TIPO 1 de 10 canales separados por 25 GHz. En particular, los canales con alta tasa de transmisión RZ-DQPSK presentan el peor desempeño, generando una degradación considerable de los parámetros OPM. Para ambos casos el espaciamento configurado de 25 GHz representa un factor determinante en la calidad de la señal para todos los formatos de modulación transmitidos.

Las figuras 3.118 y 3.119 muestran el espectro óptico en recepción de los canales 1, 2, 9 y 10, que se corresponden con los resultados de los parámetros OPM (Anexo, tabla 34). En estas figuras se observa una notable degradación del espectro debido al traslape entre canales y al espaciamento configurado en el sistema. Además, se aprecia una fuerte interferencia en los canales 2 y 9 debido a que estos se encuentran más cerca de los canales de bombeo, los canales 1 y 10 presentan una interferencia leve causada por los canales 2 y 9. Sin embargo, ambas interferencias degradan completamente la señal y perjudican los valores de los parámetros OPM.

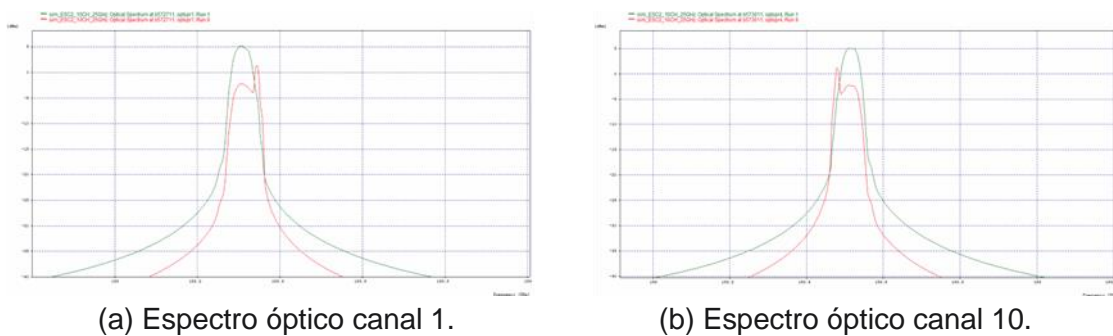


Figura 3.118. Espectro óptico en recepción para el canal 1 y 10, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.

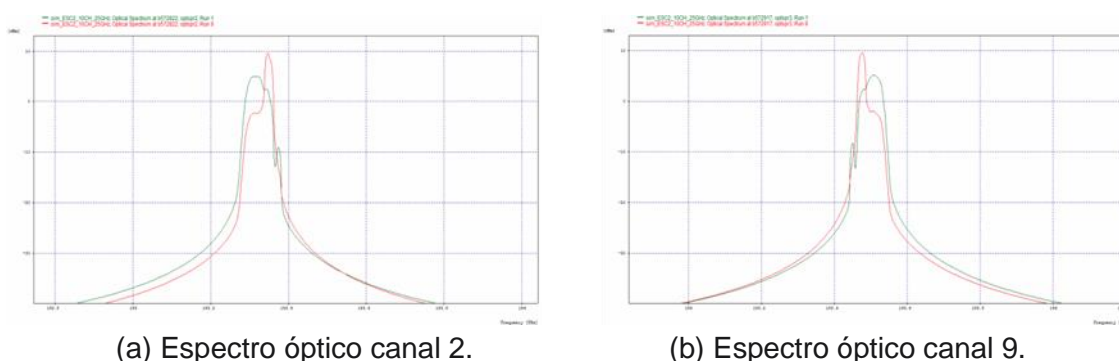
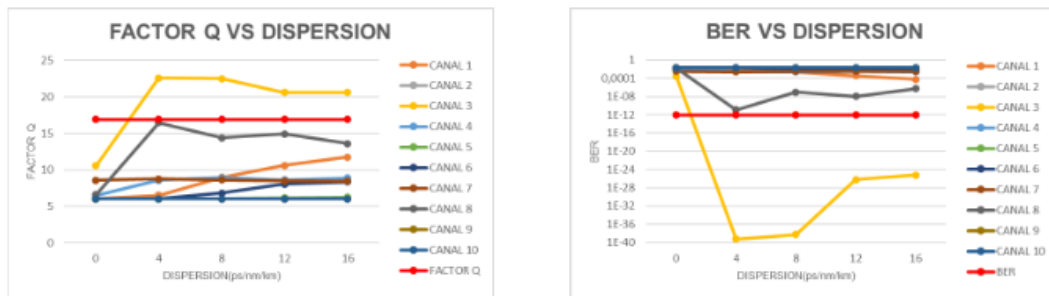


Figura 3.119. Espectro óptico en recepción para el canal 2 y 9, RZ-DPSK a 40 Gbps, para valores de potencia de 0 dBm (verde) y 16 dBm (rojo) en el canal 3 y 8.

- **Análisis de los efectos SPM y XPM al variar la dispersión con una separación de 25 GHz entre canales.**

Se puede apreciar en la figura 3.120 (Anexo, Tabla 35), la variación de la dispersión con una separación de 25 GHz entre los 10 canales ocasiona una degradación en la señal de la mayoría de ellos, Como consecuencia, ninguno de ellos logra cumplir con los parámetros OPM establecidos, excepto el canal 3 que está configurado como canal de bombeo. Por lo tanto, no se realiza un análisis específico de los formatos de modulación avanzados en estas condiciones.



(a) Factor Q vs Dispersión

(b) BER vs Dispersión

Figura 3.120. Parámetros objetivos al variar la dispersión para la red MLR de 10 canales con espaciamento de 25 GHz.

En la figura 3.121 se presenta el espectro óptico multiplexado obtenido del medio. En esta figura, se puede observar que al tener un valor de dispersión igual a 0 ps/nm/km, todos los canales experimentan una distorsión completa, lo que resulta en la pérdida total de la señal. Además, al variar la dispersión a un valor de 16 ps/nm/km, se genera una ICI que impide el adecuado funcionamiento de los canales.

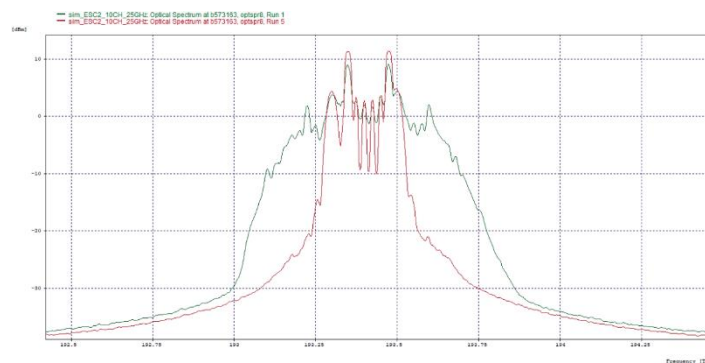


Figura 3.121. Espectro óptico de salida de la red MLR, para valores de dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

Nota de Autor:

En este capítulo se desarrollaron los cuatro casos de estudio mencionados previamente en el capítulo 2, donde se estableció el modelo de red MLR tipo NG-PON2 junto con sus respectivos formatos de modulación avanzados. Con base en eso, se llevó a cabo la evaluación de los requisitos necesarios para implementar de manera apropiada la arquitectura de red en cada uno de los casos de estudio, en donde se evaluó mediante simulación el desempeño de las configuraciones de red con diferentes formatos de modulación avanzados en presencia de los efectos no lineales SPM y XPM, teniendo en cuenta el aumento en el número de canales y el espaciamiento entre ellos, además de la variación de la potencia y el coeficiente de dispersión. Con esto, se realiza un análisis comparativo de los formatos de modulación avanzados para determinar cuál de estos presenta mejor desempeño al estar bajo la influencia de las degradaciones generadas por los efectos no lineales SPM y XPM. De esta manera, se logra dar cumplimiento al segundo y tercer objetivo específico propuesto en el presente trabajo de grado.

CAPÍTULO 4

4 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el presente trabajo de grado, se realizó un análisis del desempeño de los formatos de modulación avanzado en una arquitectura de red MLR de tipo NG-PON2 en presencia de los efectos no lineales SPM y XPM, esto permite realizar una evaluación comparativa de los diversos resultados obtenidos de los casos de estudio, con el fin de determinar qué formato de modulación resulta más tolerante frente a estas degradaciones. En el presente capítulo se exponen las conclusiones, recomendaciones y posibles investigaciones futuras relacionadas con los aspectos más relevantes que contribuyeron a alcanzar los objetivos planteados.

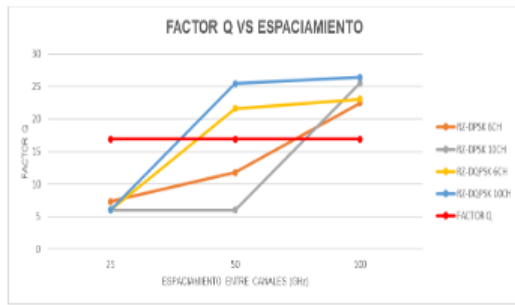
4.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LOS FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS EN PRESENCIA DE LOS EFECTOS NO LINEALES SPM Y XPM.

Una vez desarrollados los casos de estudio, en los cuales se implementaron los formatos de modulación avanzados RZ-DPSK y RZ-DQPSK que operan con la tasa de transmisión de 40 Gbps, los cuales fueron configurados utilizando los mismos parámetros con el fin de comparar su comportamiento y su robustez frente al impacto que produce los efectos no lineales. En la tabla 4.1 se presenta una recopilación de los resultados obtenidos en los diferentes casos de estudio para los parámetros OPM con el fin de determinar si el formato de modulación avanzado cumple con las condiciones mínimas de desempeño definidas.

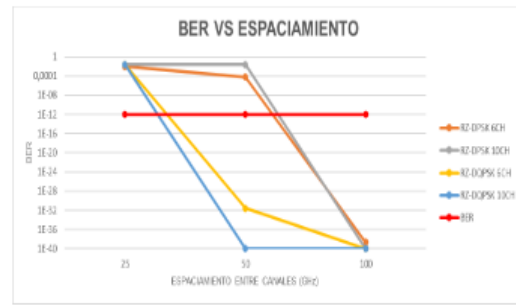
Formatos de modulación	Numero de canales	Espaciamiento entre canales (GHz)	Potencia RX (dBm)	Factor Q (dB)	BER	Jitter (ns)	OSNR
RZ-DPSK	6	100	3.7773	22.4931	$2.17 \cdot 10^{-39}$	0.000363	48.5631
		50	3.7110	11.7790	$6.42 \cdot 10^{-5}$	0.001207	50.0002
		25	4.4962	7.3360	0.010141	0.003313	48.3247
	10	100	1.1413	25.5519	10^{-40}	0.000632	47.8096
		50	1.6994	6.0206	0.022750	0.003436	47.3301
		25	3.5916	6.0206	0.022750	0.003963	49.1239
RZ-DQPSK	6	100	7.0001	23.0767	10^{-40}	0.000620	51.4675
		50	7.0517	21.6013	$2.61 \cdot 10^{-32}$	0.001053	51.5581
		25	7.1657	9.0884	0.002404	0.004718	51.0456
	10	100	4.4477	26.4064	10^{-40}	0.000352	51.0609
		50	4.5436	25.4188	10^{-40}	0.002967	51.0672
		25	5.1736	6.0206	0.022750	0.007354	49.9853

Tabla 4.1. Análisis comparativo de los formatos de modulación avanzados respecto a los parámetros OPM en los diferentes casos de estudio para una potencia de 0 dBm.

Con base en la tabla 4.1 se compara el desempeño de los canales con formato de modulación avanzada que hacen parte de los diferentes casos de estudio analizados por medio de la figura 4.1.



(a) Factor Q vs espaciamento



(b) BER vs espaciamento

Figura 4.1. Parámetros objetivos de los formatos de modulación avanzados variando el espaciamento para los diferentes casos de estudio.

- En general los formatos de modulación RZ-DPSK y RZ-DQPSK presentan un comportamiento ideal a medida que el espaciamento entre los canales aumenta y alcanza una separación de 100 GHz, es decir que el impacto causado por los efectos no lineales SPM y XPM no son un factor predominante en el comportamiento del desempeño de los parámetros OPM, lo cual posibilita el aumento el aumento de canales con un comportamiento óptimo.
- En espaciamentos menores a 100 GHz se encuentra que el comportamiento de las modulaciones es distinto, específicamente a 50 GHz solo el formato de modulación RZ-DQPSK configurado en las redes de 6 y 10 canales cumple con los parámetros OPM establecidos, sin embargo, ninguno de los formatos de modulación analizados cumple con los requerimientos cuando se llega a un espaciamento de 25 GHz. Dependiendo de la configuración y del formato de modulación, un espaciamento de 50 o de 25 GHz puede intensificar la influencia de los efectos no lineales.
- Al analizar los resultados obtenidos de la tabla 3.8 para los formatos de modulación en los casos de estudio, se observa que cuando la red cuenta con un espaciamento de 25 GHz, tanto RZ-DPSK y RZ-DQPSK no logran cumplir con los parámetros OPM necesarios para garantizar la calidad de la señal, debido a la estrecha separación con los canales adyacentes que interfieren entre sí, además se incrementan las degradaciones introducidas en la red por la presencia de los efectos no lineales.
- Al comparar los formatos de modulación RZ-DPSK y RZ-DQPSK a una velocidad de transmisión de 40 Gbps en términos de potencia y parámetros OPM, se destaca que el formato RZ-DQPSK muestra una mejor relación en potencia y rendimiento, superando al formato RZ-DPSK. Sin embargo, se observa que cuando ambos formatos operan con una potencia muy baja, alcanzan de manera similar los parámetros de desempeño establecidos en el capítulo dos, lo que sugiere que la diferencia entre ellos se minimiza en esas condiciones específicas.

- Los formatos de modulación avanzados RZ-DPSK y RZ-DQPSK, tiene un impacto significativo en la cantidad de información que se puede transmitir en un solo símbolo y en el espaciamento mínimo requerido entre canales adyacentes. En el caso de RZ-DPSK, donde se transmite un bit por símbolo, el espaciamento mínimo está limitado por la sensibilidad del receptor y por la interferencia entre canales. Por otro lado, RZ-DQPSK transmite dos bits diferentes en cada símbolo, lo que permite utilizar espaciamentos más pequeños entre canales. Las simulaciones realizadas confirman estos efectos, para una separación de 50 GHz, los casos de estudio que emplean RZ-DQPSK obtienen resultados favorables para las redes MLR de 6 como a 10 canales, mientras que RZ-DPSK no supera el umbral establecido para los parámetros de desempeño OPM.

La tabla 4.2 presenta de manera detallada el comportamiento de los formatos de modulación avanzados RZ-DPSK y RZ-DQPSK para una velocidad de transferencia de 40 Gbps. El formato de modulación RZ-DQPSK obtiene mejores resultados respecto a parámetros OPM y eficiencia espectral con un espaciamento más pequeño entre canales, pero posee un nivel de complejidad en su configuración e implementación, de igual manera, RZ-DPSK es robusto, fácil de configurar, pero posee un ancho de banda más amplio lo cual lo hace más susceptible a la interferencia entre canales.

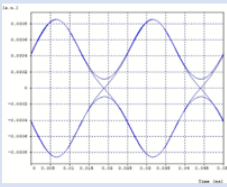
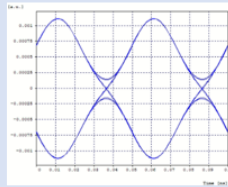
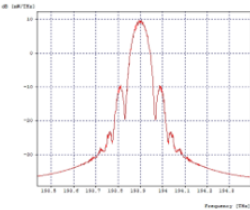
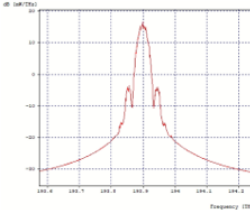
Características	RZ-DPSK	RZ-DQPSK
Diagrama del ojo		
Espectro óptico		
Tolerancia a SPM y XPM	Buena	Buena
Penalidades de potencia	No muy susceptible	susceptible
Arquitectura de red alcanzada	NG-PON 40 Gbps de Acceso	NG-PON 40 Gbps de Acceso
Distancia de transmisión garantizada	80 km	80 km
Complejidad en la configuración	Complejo	Considerablemente Complejo
Ancho de banda ocupado	138 GHz	68 GHz

Tabla 4.2. Análisis comparativo de los formatos de modulación avanzados RZ-DPSK y RZ-DQPSK.

4.2 CONCLUSIONES

Después de definir los casos de estudio de la red MLR y realizar un análisis detallado de los mismos, se concluye que:

- Los formatos de modulación RZ-DPSK como el RZ-DQPSK no son tolerantes a una separación de 25 GHz a 40 Gbps. En todos los casos estudiados no se cumplen los parámetros de desempeño necesarios para garantizar una transmisión adecuada, debido al estrecho espaciamiento los canales adyacentes sufren interferencias del tipo ICI, lo que impide la decodificación correcta de la señal. Además, los efectos no lineales causan deformaciones significativas en el espectro, lo que dificulta su detección en el receptor.
- Mediante la simulación de distintos escenarios, se logró identificar que los sistemas que utilizan el formato de modulación RZ-DQPSK presentan un mejor desempeño frente a las variaciones de potencia. Por otro lado, los escenarios que emplean RZ-DPSK obtuvieron resultados superiores ante los cambios de dispersión. Estas diferencias en el desempeño se deben a la configuración específica de la arquitectura de la red MLR de tipo NG-PON2 asignada para cada uno de estos formatos.
- La dispersión de la fibra y la compensación de la dispersión cromática son necesarias para manejar las no linealidades y mejorar el rendimiento de los formatos de modulación avanzados.
- A partir del análisis se identificó que gran parte de los efectos no lineales están estrechamente relacionados con las características de la fibra óptica. Entre los efectos no lineales más perjudiciales para las comunicaciones ópticas se encuentran SPM y XPM. Además, es importante mencionar que la presencia de estos efectos no lineales no solo depende de los parámetros de transmisión, sino que también de los efectos lineales, como la dispersión cromática..
- La potencia óptica es uno de los parámetros más relevantes en la transmisión de señales, ya que está directamente relacionada con la aparición de penalidades de potencia, las cuales generan la aparición de fenómenos de tipo no lineal en la señal. Por lo tanto, es necesario encontrar un equilibrio óptimo al seleccionar niveles adecuados de potencia y la separación entre canales para minimizar las penalidades de potencia y así garantizar un desempeño aceptable en los sistemas de comunicación.
- Tras evaluar los resultados de la herramienta OptSim, se confirma que el formato de modulación RZ-DQPSK supera al RZ-DPSK en los parámetros de desempeño OPM.

4.3 RECOMENDACIONES

Para analizar el desempeño de los formatos de modulación avanzados en presencia de los efectos SPM y XPM en una arquitectura de red MLR de tipo NG-PON2, es necesario tener en cuenta algunas recomendaciones que faciliten la obtención y análisis de los resultados, tal como se mencionan a continuación:

- Realizar una búsqueda detallada de información tanto teórica como práctica acerca de sistemas ópticos, esquemas de modulación, herramientas de simulación y de estudios previos relacionados con el tema, con el fin de tener una amplia base de conocimientos a partir de la cual se podrá iniciar el desarrollo del trabajo.
- Se debe establecer una metodología sólida y definir los escenarios de simulación adecuados para garantizar una obtención de resultados eficiente y acorde con el contexto del trabajo de investigación. Es importante tener presente que la herramienta OptSim cuenta con sus propias técnicas y estrategias de simulación, las cuales resulta valioso revisar y aprovechar para facilitar la obtención de los resultados deseados.
- Para obtener una guía adecuada, es útil consultar documentos y tutoriales, así como explorar los ejemplos predefinidos de la herramienta OptSim, además simular los escenarios de los efectos no lineales deseados nos permite comprender mejor sus características y resultados esperados.
- Determinar los formatos de modulación y las configuraciones adecuadas bajo las cuales se trabajará. Además, es importante seleccionar los formatos de modulación apropiados debido a que algunos tienen una mayor tolerancia a las no linealidades, lo que puede ayudar a evitar impactos negativos en el sistema.
- Asegurar en primer lugar que los canales de mayor velocidad cumplan con los estándares establecidos, antes de realizar ajustes en los canales de menor velocidad. Al transmitir los canales con una velocidad de 40 Gbps, se debe considerar la ubicación en frecuencia del canal en la grilla espectral debido a que esto puede provocar un impacto negativo en el desempeño del canal.
- Una estructura organizada en el desarrollo del trabajo es fundamental debido a que facilita tanto la comprensión de los resultados obtenidos como su análisis, además permite visualizar de manera clara y acorde los diferentes escenarios simulados, asegurando una mejor interpretación de los resultados.

4.4 TRABAJOS FUTUROS

- Analizar el desempeño de formatos de modulación avanzados en presencia de los efectos de scattering SRS y SBS, en una arquitectura de red MLR de tipo NG-PON2.
- Analizar el desempeño de formatos de modulación avanzados en presencia de los fenómenos SPM y XPM en una arquitectura de red MLR de tipo NG-PON2 para una velocidad de 100 Gbps
- Analizar el desempeño de formatos de modulación avanzados en presencia de los fenómenos SPM y XPM en una arquitectura de red MLR de tipo NG-PON2, ante las variaciones de las propiedades de la DCF para diferentes tipos de fibra monomodo estándar.
- Estudio de técnicas de compensación digital para mitigar los efectos de SPM y XPM en la transmisión de datos en una arquitectura NG-PON2.
- Estudio de factibilidad técnico-económica para la implementación de una arquitectura de red MLR de tipo NG-PON2 para en distintos formatos de modulación avanzados
- Comparación de la capacidad de transmisión y alcance de diferentes formatos de modulación avanzados bajo efectos de SPM y XPM en una red NG-PON2.

REFERENCIAS

- [1] D. F. Álzate C. and A. Cárdenas, “Retos en la transmisión de 40/100Gb/s sobre fibra óptica,” *Rev. En Telecomunicaciones E Informática*, vol. 1, no. 2, pp. 23–60, 2011.
- [2] T. Ivaniga and P. Ivaniga, “Suppression of Nonlinear XPM Phenomenon by Selection of Appropriate Transmit Power Levels in the DWDM System,” *Int. J. Opt.*, vol. 2019, pp. 1–8, Jun. 2019, doi: 10.1155/2019/9357949.
- [3] Community Fs, “¿Cuál es la diferencia entre la tecnología CWDM y DWDM?,” *Sep. 2018*, Available on: <https://community.fs.com:7003/es/blog/wdm-technology-basis-cwdm-vs-dwdm.html>
- [4] International Telecommunication Union (ITU), “Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid.” Rec. G.694.1, ITU Telecommunication Standardization Sector, Oct. 2020.
- [5] International Telecommunication Union (ITU), “Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid.” Rec. G.694.2, ITU Telecommunication Standardization Sector, Dec. 2003.
- [6] Fiber Optic Components, “Differences between CWDM and DWDM,” *Aug. 2015*, Available on: <https://www.fiber-optic-components.com/differences-between-cwdm-and-dwdm-2.html>
- [7] A. F. Escallón Portilla and J. R. Barrios Lis, “Criterios para el monitoreo del canal óptico y la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana WDM,” Universidad del Cauca, Popayán, 2008.
- [8] A. G. Salazar Rodríguez and S. F. Chaves Salamanca, “Diseño a nivel de simulación de un compensador de dispersión cromática basado en estructuras Mach Zehnder para redes DWDM a 2.5 Gbps,” Universidad del Cauca, Popayán, 2015.
- [9] D. C. Eguizabal M and I. A. Muñoz V, “Impacto del formato de modulación sobre la ISD en una red DWDM a 10 Gbps y 40 Gbps,” Universidad del Cauca, Popayán, 2015.
- [10] Fiber Optical Transceivers, “¿Conoce la diferencia entre el sistema DWDM pasivo y el sistema DWDM activo?,” *Nov. 2020*, Available on: <http://www.fiber-optical-transceivers.com/info/do-you-know-the-difference-between-passive-dwd-52192301.html>
- [11] J. Silva Chávez and Y. A. Díaz García, “Análisis comparativo del desempeño en la migración de una red DWDM de 10 a 40 gbps, ante las variaciones de las propiedades de una fibra compensadora de dispersión (DCF),” Universidad del Cauca, Popayán, 2016.
- [12] S. D. Ossa Hernández and J. A. Vargas Gutiérrez, “Algoritmo cognitivo para la asignación de recursos de red, en una plataforma DWDM,” Universidad del Cauca, Popayán, 2019.
- [13] Viavi solutions, “Diseño e implementación de redes FTTx,” *Aug. 2019*, Available on: <https://www.viavisolutions.com/es-es/disenio-e-implementacion-de-redes-fttx>
- [14] A. F. Escallón Portilla and V. H. Ruiz Guachetá, “Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios Quad Play al integrar un módulo RoF,” Universidad del Cauca, Popayán, 2018.
- [15] Khrista Dasetra, “Fiber To The Node (FTTN) Networks,” *Aug. 2016*, Available on: <https://www.khrista.co.id/fttn-networks/>
- [16] Community Fs, “Análisis de PON: Qué es OLT, ONU, ONT y ODN,” *Oct. 2018*, Available on: <https://community.fs.com/es/blog/abc-of-pon-understanding-olt-onu-ont-and-odn.html>
- [17] Neo Broadband, “Elementos de la red GPON,” *Jul. 2021*, Available on: <https://neobroadband.net/elementos-de-la-red-gpon/>
- [18] P. Notario, “Nuevos estándares PON para sistemas FTTx,” *Revista española de electrónica*, no. 725, pp. 62–64, 2015.
- [19] Sopto, “System structure and topology of Passive Optical Network (PON),” *Aug. 2020*, Available on: https://www.sopto.com.cn/sp_news/show-3506.html
- [20] G. A. Gonzalez Parra and H. A. López Mazorra, “Análisis a nivel de simulación del desempeño en la migración de una red óptica SLR-DWDM a una red óptica MLR-DWDM implementando diferentes arquitecturas de red de banda ancha FTTx,” Universidad del Cauca, Popayán, 2022.

- [21]D. Saavedra, "Que es FTTx y sus aplicaciones," *Aug. 2017*, Available on: <http://telemediciones.com/blog/fibra-optica/fttx/>
- [22]Community Fs, "Comprehensive Understanding of FTTx Network," *Jul. 2020*, Available on: <https://community.fs.com/blog/a-comprehensive-understanding-of-fttx-network.html>
- [23]L. Pavón Serrano, "¿Qué significa FTTx, FTTH, FTTO, FTTR, FTTD ...?," *Feb. 2019*, Available on: <https://www.linkedin.com/pulse/qu%C3%A9-significa-fttx-ftth-ftto-fttr-fttd-leandro-pav%C3%B3n-serrano/?originalSubdomain=es>
- [24]Voz, "Diferencias entre Fibra ftth vs fttc: ¿Cuál es mejor?," *Nov. 2021*, Available on: <https://voz.com/diferencias-entre-fibra-ftth-vs-fttc-cual-es-mejor/>
- [25]Focc Technology, "Diferencias entre FTTH, FTTC y FTTN," *Sep. 2019*, Available on: <http://www.fibresplitter.com/info/differences-between-ftth-fttc-and-fttn-39431798.html>
- [26]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)*, Dec. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICIAfS.2016.7946546.
- [27]Huawei Enterprise, "WDM-PON-The Next Major Advance in Access Networking," *May. 2022*, Available on: <https://forum.huawei.com/enterprise/en/wdm-pon-the-next-major-advance-in-access-networking/thread/882497-100181>
- [28]International Telecommunication Union (ITU), "40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements." Rec. G.989.1, ITU Telecommunication Standardization Sector, Mar. 2013.
- [29]J. S. Wey and J. Zhang, "Passive Optical Networks for 5G Transport: Technology and Standards," *J. Light. Technol.*, vol. 37, no. 12, pp. 2830–2837, Jun. 2019, doi: 10.1109/JLT.2018.2856828.
- [30]A. Nag, M. Tornatore, and B. Mukherjee, "Optical Network Design With Mixed Line Rates and Multiple Modulation Formats," *J. Light. Technol.*, vol. 28, no. 4, pp. 466–475, Feb. 2010, doi: 10.1109/JLT.2009.2034396.
- [31]S. Iyer and S. P. Singh, "Physical layer impairment-aware Routing and Wavelength Assignment (PLI-RWA) strategy for mixed line rate (MLR) wavelength division multiplexed (WDM) optical networks," in *2015 Twelfth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*, Sep. 2015, pp. 1–5. doi: 10.1109/WOCN.2015.8064489.
- [32]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)*, New Delhi, India: IEEE, Dec. 2009, pp. 1–3. doi: 10.1109/ANTS.2009.5409872.
- [33]G. Ellinas *et al.*, "Transparent Optical Switches: Technology Issues and Challenges," Nov. 2003.
- [34]Focc Technology, "Amplificador óptico - EDFA (amplificador de fibra dopado con erbio) para el sistema WDM," *Jun. 2019*, Available on: <http://m.fibresplitter.com/info/optical-amplifier-edfa-erbium-doped-fiber-a-35901322.html>
- [35]M. Liu, M. Tornatore, and B. Mukherjee, "New Strategies for Connection Protection in Mixed-Line-Rate Optical WDM Networks," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 3, no. 9, pp. 641–650, Sep. 2011, doi: 10.1364/JOCN.3.000641.
- [36]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," Universidad del Cauca, Popayán, 2019.
- [37]G. A. Gómez Agredo and J. F. Grijalba, "Análisis del desempeño de formatos de modulación en comunicaciones ópticas sobre redes WDM," Universidad del Cauca, Popayán, 2010.
- [38]Incom Blog, "Atenuación en la fibra óptica," *Jun. 2019*, Available on: <https://blog.incom.mx/entrada/Atenuaci%C3%B3n/28>
- [39]The Fiber Optic Association, "The FOA Reference For Fiber Optics - Measuring Loss," *May. 2019*, Available on: <https://www.thefoa.org/tech/ref/testing/test/loss.html>

- [40] J. G. López Perafán, A. Toledo Tovar, H. Ordoñez, and J. P. Agredo, "Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM," *Rev. Fac. Ing.*, vol. 20, Art. no. 31, 2011.
- [41] A. Gonzales Garcia, "Análisis de Atenuación, dispersión y automodulación de fase en sistemas de comunicaciones de único canal por fibra óptica a 10 Gb/s," Centro de investigaciones en Óptica (A.C), León Guanajuato, México, 2007.
- [42] J. P. Agredo Palacios and H. J. Ordoñez Ordoñez, "Análisis del desempeño de redes WDM frente a variaciones en los parámetros de transmisión y su incidencia en los efectos no lineales," Universidad del Cauca, Popayán, 2012.
- [43] A. Leiva L, M. Tarifeño G, and R. Olivares V, "Efectos de la dispersión por modo de polarización (PMD) en la propagación de pulsos a través de fibras ópticas," *Ingeniare Rev. Chil. Ing.*, vol. 15, no. 3, Dec. 2007, doi: 10.4067/S0718-33052007000300014.
- [44] S. N. Bhusari, V. U. Deshmukh, and S. S. Jagdale, "Analysis of SPM, XPM, and FWM in Fiber Optic Communication using OptiSystem," *Int. J. Sci. Technol. Eng.*, vol. 2, no. 07, pp. 136–142, Jan. 2016.
- [45] L. K. Tyagi, A. K. Jaiswal, M. Kumar, and T. Joshi, "Performance Analysis of Four Wave Mixing Based Wavelength Conversion in Commercial Optical Fibers," *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 2, no. 7, p. 5, 2012.
- [46] S. P. Singh and N. Singh, "Nonlinear effects in optical fibers: Origin, management and applications," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 73, pp. 249–275, 2007, doi: 10.2528/PIER07040201.
- [47] P. Moreno Gómez, "Formatos de Modulación Avanzados para Sistemas de Comunicaciones Ópticas Coherentes," Universidad de Sevilla, España, 2011.
- [48] K. Christodoulopoulos, K. Manousakis, and E. Varvarigos, "Planning mixed-line-rate WDM transport networks," in *2011 13th International Conference on Transparent Optical Networks*, Stockholm, Sweden: IEEE, Jun. 2011, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICTON.2011.5970835.
- [49] P. J. Winzer and R. J. Essiambre, "Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks," *J. Light. Technol.*, vol. 24, no. 12, pp. 4711–4728, Dec. 2006, doi: 10.1109/JLT.2006.885260.
- [50] C. A. Ararat Mina and E. D. Paz Cordoba, "Análisis del desempeño de los formatos (RZ-NRZ)/ DQPSK a 10 y 40 Gbps en una Red Metropolitana DWDM," Universidad del Cauca, Popayán, 2013.
- [51] A. García-Pérez, J. A. Andrade-Lucio, O. G. Ibarra-Manzano, E. Alvarado-Méndez, M. Trejo-Duran, and H. Gutiérrez-Martín, "Efficient Modulation Formats for High Bit-Rate Fiber Transmission," *Acta Univ.*, vol. 16, no. 2, pp. 17–26, 2006, doi: 10.15174/au.2006.184.
- [52] S. Zhang, "Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System," M. Sc thesis, University of Kansas, 2004.
- [53] A. H. Gnauck and P. J. Winzer, "Optical phase-shift-keyed transmission," *J. Light. Technol.*, vol. 23, no. 1, pp. 115–130, Jan. 2005, doi: 10.1109/JLT.2004.840357.
- [54] SHF Communication Technologies AG, "Application Note DQPSK Bit Error Test Solution," 2008.
- [55] J. D. Herrera Varona and J. T. Toledo Noguera, "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," Universidad del Cauca, Popayán, 2016.
- [56] D. Van den Borne, "Robust optical transmission systems: modulation and equalization," Ph.D. thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2008.
- [57] D. M. García Satizabal and R. Santiago Sánchez, "Evaluación del Desempeño del Formato de Modulación CSRZ-DQPSK en una Red WDM," Universidad del Cauca, Popayán, 2012.
- [58] A. F. Escallon Portilla, A. Toledo Tovar, and J. R. Barrios Lis, "Incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana WDM," *Rev. Colomb. Technol. Av.*, vol. 2, pp. 12–19, Apr. 2008.

- [59]C. M. Gómez Muñoz and Á. M. Viveros Egas, “Establecimiento de la relación entre el área funcional de desempeño de la arquitectura TMN, con el modelo OPM,” Universidad del Cauca, Popayán, 2009.
- [60]International Telecommunication Union (ITU), “Optical monitoring for dense wavelength division multiplexing systems.” Rec. G.697, ITU Telecommunication Standardization Sector, Nov. 2016.
- [61]International Telecommunication Union (ITU), “Q-factor test equipment to estimate the transmission performance of optical channels.” Rec. O.201, ITU Telecommunication Standardization Sector, Jul. 2003.
- [62]International Telecommunication Union (ITU), “Optical system design and engineering considerations.” Rec. G.Sup39, ITU Telecommunication Standardization Sector, Feb. 2016.
- [63]E. J. Gualda Manzano, “Optimización de las prestaciones de enlaces ópticos submarinos de gran capacidad y larga distancia mediante el control de la dispersión,” Universitat Politècnica de Catalunya, España, 2005.
- [64]T. Chakma, “Optical Signal to Noise Ratio (OSNR),” International University Bremen, 2005.
- [65]J. A. Dinamarca Ossa, “Análisis de Diagramas de Ojo,” Universidad Técnica Federico Santa María, Chile, 2002.
- [66]A. Toledo Tovar, J. G. López Perafán, and G. L. Agredo Méndez, “Análisis del efecto del ruido en recepción de redes WDM con detección coherente,” *Entre Cienc. E Ing.*, vol. 7, no. 14, pp. 17–23, 2013.
- [67]HR Universal Systems Inc., “OptiSystem - Optical Communication System Design,” 2022, Available on: <https://www.hrunisys.com/product/5/OptiSystem-Optical-Communication-System-Design>
- [68]Goldlite, “Optical System and Design Software,” 2015, Available on: <https://www.goldlite.com.sg/optical-system-and-design-software/>
- [69]Optiwave Systems Inc., “OptiSystem Overview,” Dec. 2019, Available on: <https://optiwave.com/optisystem-overview/>
- [70]“OptiluX,” Available on: <https://optilux.sourceforge.io/>
- [71]“Synopsys OptSim for Optical Communication | Synopsys Photonic Solutions,” 2022, Available on: <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/optsim/single-mode-network.html>
- [72]“Photonic System Tools | Synopsys Photonic Solutions,” 2022, Available on: <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/optsim.html>
- [73]R. S. Pressman, *Ingeniería del Software. Un Enfoque Práctico*, 7th ed. McGraw-Hill, 2010.
- [74]R. Coss Bu, *Simulación: un enfoque práctico*. Editorial Limusa, 2003.
- [75]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,” Universidad del Cauca, Popayán, 2019.
- [76]R. Millán, “Redes y tecnología WDM,” Available on: <https://www.ramonmillan.com/documentos/trabajos/PFCCapitulo2.pdf>
- [77]International Telecommunication Union (ITU), “Characteristics of a single-mode optical fibre and cable.” Rec. G.652, ITU Telecommunication Standardization Sector, Nov. 2016.
- [78]D. López Mata, “Láser de fibra óptica WDM empleando un interferómetro Mach-Zehnder y un amplificador óptico de semiconductor,” Universidad nacional autónoma de México, Ciudad de México, 2019.
- [79]D. Martín González, “Análisis de prestaciones de láseres en redes de acceso ópticas pasivas de siguiente generación NG-PON2 (next generation passive optical networks),” Universidad de Valladolid, Valladolid, 2017. [Online]. Available: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/26094/TFM-G686.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [80]N. Morales Duran and L. A. Gutierrez Lopez, “Interferómetrode Mach-Zehnder,” Universidad de los Andes, 2014.

- [81] E. M. Rivera Castaño and A. N. Girón Zúñiga, "Medida de la Eficiencia Espectral de una arquitectura de red heterogénea de tipo NG-PON para un régimen de propagación cuasilineal," Universidad del Cauca, Popayan, 2022.
- [82] FIBRAIN, "DWDM Filters - Fibrain PON pasywna optyka - CWDM, DWDM, FTTH, LGX, splitter, sprzęgacze optyczne, mierniki optyczne.," 2017, Available on: <https://pon.fibrain.com/produkt/dwdm-filters,106.html>
- [83] M. G. Ayala Labanda, "Estudio de los filtros ópticos y análisis de su comportamiento mediante simulación," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2018.
- [84] K. P. Kaur, R. Randhawa, and R. S. Kaler, "Performance analysis of WDM-PON architecture using different receiver filters," *Optik*, vol. 125, no. 17, pp. 4742–4744, 2014, doi: 10.1016/j.ijleo.2014.04.070.
- [85] K. Gentile, "The care and feeding of digital pulse-shaping filters," *RF Des. Mag.*, pp. 50–58, 2002.
- [86] International Telecommunication Union (ITU), "10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms." Rec. G.987, ITU Telecommunication Standardization Sector, Jun. 2012.
- [87] M. F. Brito Jiménez, "Estudio del despliegue de una red de acceso NG-PON2 en la ciudad de Quito," Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2021.
- [88] J. F. P. Moposita, "Diseño de una red de acceso NG-PON2 (40-Gigabit-Capable Passive Optical Networks) para brindar servicio triple play a determinadas zonas urbanas de la parroquia de Sangolquí," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2021.
- [89] International Telecommunication Union (ITU), "40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Definitions, abbreviations and acronyms." Rec. G.989, ITU Telecommunication Standardization Sector, Oct. 2015.
- [90] R. Bajpai, S. Sengar, and S. P. Singh, "Comparison of performance of a mixed line rate optical WDM network using different modulations at 40Gbps," in *2016 International Conference on Advances in Computing, Communication, & Automation (ICACCA) (Spring)*, Dehradun, India: IEEE, Apr. 2016, pp. 1–3. doi: 10.1109/ICACCA.2016.7578869.
- [91] S. Iyer and S. P. Singh, "Effect of Channel Spacing on the Design of Mixed Line Rate Optical Wavelength Division Multiplexed Networks," *J. Opt. Commun.*, vol. 40, no. 1, pp. 75–82, Jan. 2019, doi: 10.1515/joc-2016-0127.
- [92] S. Iyer and S. P. Singh, "Spectral and power efficiency investigation in single- and multi-line-rate optical wavelength division multiplexed (WDM) networks," *Photonic Netw. Commun.*, vol. 33, no. 1, pp. 39–51, Feb. 2017, doi: 10.1007/s11107-016-0618-3.
- [93] S. Iyer, S. Sengar, R. Bajpai, and S. P. Singh, "On the Performance of MLR Optical WDM Network Based on ITU-T Conforming Fibers in the Presence of Dominant Physical Layer Impairments," *J. Commun. Inf. Netw.*, vol. 3, no. 3, pp. 91–108, Sep. 2018, doi: 10.1007/s41650-018-0019-0.
- [94] A. Nag, M. Tornatore, and B. Mukherjee, "On the effect of channel spacing, launch power, and regenerator placement on the design of mixed-line-rate optical networks," *Opt. Switch. Netw.*, vol. 10, no. 4, pp. 301–311, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.osn.2013.03.004.
- [95] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, and G. H. Sasaki, *Optical Networks: A Practical Perspective*, vol. 3. Boston: Morgan Kaufmann, 2010. doi: 10.1016/B978-0-12-374092-2.50012-6.
- [96] International Telecommunication Union (ITU), "Aplicaciones multicanal de multiplexación por división en longitud de onda densa con interfaces ópticas monocanal." Rec. G.698.1, ITU Telecommunication Standardization Sector, Nov. 2009.