

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE REDES WDM FRENTE A VARIACIONES EN
LOS PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN Y SU INCIDENCIA EN LOS EFECTOS
NO LINEALES.**



**JUAN PABLO AGREDO PALACIOS
HENRY JESUS ORDOÑEZ ORDOÑEZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES – GNTT
POPAYÁN
MARZO de 2012**

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE REDES WDM FRENTE A VARIACIONES EN
LOS PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN Y SU INCIDENCIA EN LOS EFECTOS
NO LINEALES.**

**JUAN PABLO AGREDO PALACIOS
HENRY JESUS ORDOÑEZ ORDOÑEZ**

**Documento Final de Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Director
Ing. ALEJANDRO TOLEDO TOVAR**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES – GNTT
POPAYÁN
MARZO de 2012**

*Dedico este nuevo triunfo
A Dios por guiarme,
A mis Padres y Hermanos por su incondicional
Apoyo en todo momento y en especial
A mi sobrino Juan José que llegó para
Llenar de felicidad nuestra familia*

Juan Pablo Agredo P.

*Dedico esta meta alcanzada en mi vida
A mis padres por su amor y apoyo incondicional
A todas las personas que han creído en mí y sinceramente
Me han brindado su amistad, amor y cariño
Y a las personas que llevo en mi corazón y que desde el cielo me iluminan
Esto es para ustedes.....*

Henry Jesús Ordoñez Ordoñez

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a: Alejandro Toledo Tovar, Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones y Director del proyecto, por sus valiosas orientaciones, así como a todos los ingenieros y profesores que hicieron parte de nuestra formación académica universitaria.

Un agradecimiento especial a Jigesh Patel - AllOptic Designs, por ser guía y colaborador con la herramienta de simulación OptiSim de Rsoft, para cumplir con éxito los objetivos propuestos.

También expresamos un especial agradecimiento a nuestros familiares, ya que su incondicional apoyo fue fundamental para alcanzar esta meta tan anhelada en nuestras vidas.

Índice General

Introducción	1
1. Capítulo 1. Parámetros de una red WDM que impactan los efectos no lineales.....	3
1.1 Redes WDM.....	3
1.2 Degradaciones Ópticas.	5
1.2.1 Efectos lineales.....	6
1.2.2 Efectos no Lineales.....	7
1.3 Monitoreo de redes ópticas	16
2. Capítulo 2. Metodología de simulación	19
2.1 Formulación del Problema.....	19
2.2 Herramienta de Simulación	20
2.3 Generación y Definición de Características del Escenario de Simulación.....	21
2.4 Plan de evaluación y pruebas.....	25
3. Capítulo 3. Escenario de Simulación y sus Casos de Estudio.....	27
3.1 Caso de estudio 1, formato de modulación NRZ-OOK y velocidad de transmisión de 10 Gb/s.....	27
3.1.1 Análisis del efecto no lineal SPM.	29
3.1.2 Análisis del efecto no lineal XPM.	33
3.1.3 Análisis del efecto no lineal FWM.	40
3.2 Caso de estudio 2, formato de modulación NRZ-OOK y velocidad de transmisión de 40 Gb/s.....	48
3.2.1 Análisis del efecto no lineal SPM.	50
3.2.2 Análisis del efecto no lineal XPM.	54
3.2.3 Análisis del efecto no lineal FWM.	60
3.3 Caso de estudio 3, formato de modulación RZ-DPSK y velocidad de transmisión de 10 Gb/s.....	69
3.3.1 Análisis del efecto no lineal SPM.	71
3.3.2 Análisis del efecto no lineal XPM.	75
3.3.3 Análisis del efecto no lineal FWM	80
3.4 Caso de estudio 4, formato de modulación RZ-DPSK y velocidad de transmisión de 10 Gb/s.....	87
3.4.1 Análisis del efecto no lineal SPM.	90

3.4.2 Análisis del efecto no lineal XPM	93
3.4.3 Análisis del efecto no lineal FWM.	98
4. Capítulo 4. Efecto conjunto de la variación de los parámetros de transmisión y su impacto en las no linealidades para cada caso de estudio.	103
4.1 Caso de estudio 1.	103
4.2 Caso de estudio 2.	106
4.3 Caso de estudio 3.	109
4.4 Caso de estudio 4.	111
5. Capítulo 5. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.	115
5.1 Conclusiones.....	115
5.2 Recomendaciones.....	116
5.3 Trabajos futuros	117
Bibliografía.....	119

Índice de Figuras

Figura 1.1. La Forma cambiante del tráfico en las redes [4].....	4
Figura 1.2. Sistema de comunicaciones óptico para WDM [5].	4
Figura 1.3 Degradaciones ópticas [9].....	5
Figura 1.4. Dispersión como una función de la longitud de onda para los tipos más comunes de fibra usados en comunicaciones ópticas [10].....	7
Figura 1.5. Potencia de entrada contra potencia de salida, donde se evidencia la Interacción lineal y no lineal en la fibra óptica [12].	7
Figura 1.6. Ejemplo de la compresión y ampliación de un pulso debido a SPM [8].	10
Figura 1.7. Efecto de FWM en tres señales equidistantes [8].....	11
Figura 1.8. Efecto de IFWM [10]	12
Figura 1.9. Principio de la Dispersión Estimulada de Raman [10].	13
Figura 1.10. Espectro de ganancia de Raman [8].	13
Figura 1.11. Señal a una longitud de onda $\lambda = 1550$ nm y a onda dispersada que se genera debido a SBS [5].	14
Figura 1.12. Importancia de los impedimentos no lineales intra-canal e inter-canal en los sistemas WDM de diferentes tasas de bits por canal [15].	15
Figura 1.13. Niveles del modelo de referencia OPM [19].	16
Figura 2.1. Esquema del escenario de simulación.	24
Figura 2.2. Diagrama de flujo para el escenario de simulación.	26
Figura 3.1. Escenario de simulación para el formato de modulación NRZ-OOK y velocidad de transmisión de 10 Gb/s.	27
Figura 3.2. (a) Diagrama del ojo y (b) Espectro óptico en el receptor Back to back.	28
Figura 3.3. Diagramas de correlación y de ojo para el canal a 1550.12 nm, receptor back to back y distancia 78 km, 0 dBm de potencia en los cuatro canales.	29
Figura 3.4. Diagramas de correlación (a) BER vs Potencia de transmisión, (b) Factor Q vs Potencia de transmisión, para distancia 78 km, variando potencia de transmisión.	30
Figura 3.5. Espectros ópticos de entrada y salida para potencias de transmisión de a) 0 dBm y b) 20 dBm y distancia 78 km.	31
Figura 3.6. Diagramas de correlación a) BER vs Dispersión, b) Factor Q vs Dispersión, distancia 78 km, potencia 20 dBm.	32
Figura 3.7. Espectro de señal para una CD=-2 (verde) y CD=14 (rojo), potencia de transmisión 20 dBm, distancia 78 km.	32
Figura 3.8. Diagramas de ojo para a) CD=-10 y b) CD=5, distancia 78 km, potencia 20 dBm.	32
Figura 3.9. Parámetros ópticos de medida del canal 1, para diferentes valores en la potencia de transmisión del canal 2 con una distancia de 78 km.	34
Figura 3.10. Espectro a la entrada del back to back (verde) y en el receptor (rojo) del canal 1 para diferentes valores de potencia de transmisión en el canal 2.	34

Figura 3.11. Diagrama del ojo en recepción sobre el canal 1, para potencias de a) 0 dBm y b) 13 dBm en el canal 2, manteniendo la potencia del canal 1 a 0 dBm a una distancia de 78 kilómetros.	35
Figura 3.12. Espectro del back to back (verde) y la señal en recepción del canal 1 (rojo) para una potencia transmitida por el canal 2 de 24 dBm.....	35
Figura 3.13. Diagrama del ojo en recepción del canal 1, para una potencia en el canal 2 de 24 dBm.	36
Figura 3.14. Espectro del back to back (verde) y la señal en recepción (rojo) del canal 1, para una potencia transmitida por el canal 2 de 24 dBm, con un espaciamiento de 200 Ghz.....	36
Figura 3.15. Espectro de la señal del canal 1 a los 40 (verde) km y 80 (rojo) km.....	37
Figura 3.16. Ensanchamiento del espectro para una dispersión de 4 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo) debido a XPM.....	38
Figura 3.17. Ensanchamiento del espectro para una dispersión de 2 ps/nm/km (verde) y 18 ps/nm/km (rojo) debido a XPM.....	38
Figura 3.18. BER a) y b) Factor Q para diferentes valores de dispersión de la fibra a una distancia de 78 km, para potencia de 0 dBm en el canal 1 y 20 dBm para el canal 2.....	39
Figura 3.19. Distancia máxima alcanzada vs Potencia de entrada sobre el canal 2, manteniendo la potencia del canal 1 constante a 0 dBm, para un BER de $1e-15$ sobre el canal 1 (canal de evaluación de XPM).	39
Figura 3.20. Comparación de la distancia máxima alcanzada por el canal 1, realizando las variaciones de potencia para el análisis de XPM, y FWM.	41
Figura 3.21. Componentes generadas por FWM a una potencia de 25 dBm a 78 km.....	41
Figura 3.22. Parámetros ópticos de medida del canal 1, para diferentes valores en la potencia de transmisión a una distancia de 78 km.....	42
Figura 3.23. Componentes generadas por FWM para una potencia de transmisión de 8 dBm.	43
Figura 3.24. Componentes generadas por FWM para una potencia de transmisión de 20 dBm.	43
Figura 3.25. Diagrama del ojo en recepción sobre el canal 1 para potencias de a) 8 dBm y b) 20 dBm a una distancia de 78 kilómetros.	44
Figura 3.26. Espectro del sistema para una potencia de 20 dBm a los 40 (verde) y 80 (café) y 100 (rojo) km.....	44
Figura 3.27. Componentes generadas por FWM para una dispersión de 4 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo) para una potencia de 20 dBm.....	45
Figura 3.28. Componentes generadas por FWM para una dispersión de 0 ps/nm/km (rojo) y 1 ps/nm/km (verde) para una potencia de 20 dBm.....	45
Figura 3.29. a) BER y b) Factor Q para diferentes valores de dispersión de la fibra a una distancia de 78 km, para una potencia de transmisión de 20 dBm.....	46
Figura 3.30. Potencia de entrada sobre el canal 1 vs Distancia máxima alcanzada para un BER de $1e-15$ para espaciamientos de 50 (verde) 100 (rojo) y 200 (azul) Ghz.....	48

Figura 3.31. Escenario de simulación para el formato de modulación NRZ-OOK y velocidad de transmisión de 10 Gb/s.	48
Figura 3.32. (a) Diagrama del ojo y (b) Espectro óptico en el receptor Back to back.....	49
Figura 3.33. Diagramas de correlación y de ojo para el canal a 1550.12nm, receptor back to back y distancia 5 km, 0 dBm de potencia en los cuatro canales.	50
Figura 3.34. Diagramas de correlación (a) BER vs Potencia de transmisión, (b) Factor Q vs Potencia de transmisión, para distancia 5 km, variando potencia de transmisión.....	52
Figura 3.35. Espectros ópticos de entrada y salida para potencias de transmisión a) 0 dBm y b) 30 dBm y distancia 5 km.....	52
Figura 3.36. Diagramas de correlación a) BER vs Dispersión, b) Factor Q vs Dispersión, distancia 5 km, potencia 25 dBm.	53
Figura 3.37. Espectro de señal para una CD=-10 ps/nm/km (verde) y CD=5 ps/nm/km (rojo), potencia de transmisión 30 dBm, distancia 5 km.	54
Figura 3.38. Diagramas de ojo para a) DC=-10 ps/nm/km y b) DC=5 ps/nm/km, distancia 5 km, potencia 30 dBm.	54
Figura 3.39. a) BER y b) factor Q del canal 1, para diferentes valores en la potencia de transmisión del canal 2 a una distancia de 5 km manteniendo la potencia del canal 1 en 0 dBm.	55
Figura 3.40. Espectro de la señal, en el back to back (verde) y en recepción (rojo), del canal 1 para diferentes valores de potencia en el canal 2.....	56
Figura 3.41. Diagrama del ojo en recepción sobre el canal 1 para potencias de a) 0 dBm y b) 20 dBm en el canal 2, manteniendo la potencia del canal 1 a 0 dBm a una distancia de 78 kilómetros.	56
Figura 3.42. Espectro de la señal transmitida (verde) y señal en recepción (rojo) para una potencia de 24 dBm en el canal 2.....	57
Figura 3.43. Diagrama del ojo en recepción del canal 1 para una potencia en el canal 2 de 24 dBm.	57
Figura 3.44. Espectro del back to back (verde) y la señal en recepción para una potencia transmitida por el canal 2 de 29 dBm, con un espaciamento de 200 Ghz.	58
Figura 3.45. Ensanchamiento del espectro para una dispersión de 4 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo) debido a XPM.....	58
Figura 3.46. Ensanchamiento del espectro para una dispersión de 2 ps/nm/km (verde) y 18 ps/nm/km (rojo) debido a XPM.....	59
Figura 3.47. Ensanchamiento del espectro para una dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo) debido a XPM.....	59
Figura 3.48. Factor Q y BER para diferentes valores de dispersión de la fibra a una distancia de 5 km, para potencias de 0 dBm y 20 dBm para el canal 1 y 2 respectivamente.	59
Figura 3.49. Distancia máxima alcanzada por el canal 1 para degradaciones generadas por FWM (rojo) y XPM (azul).	61
Figura 3.50. Componentes generadas por FWM para una potencia del canal 1 de 0 dBm y 25 dBm para los canales 2, 3 y 4.	61

Figura 3.51. Parámetros ópticos de medida del canal 1, para diferentes valores en la potencia de transmisión a una distancia de 5 km.....	62
Figura 3.52. Componentes generadas por FWM para una potencia de transmisión de 23 dBm a una distancia de 5 km.....	63
Figura 3.53. Componentes generadas por FWM para una potencia de transmisión de 25 dBm a una distancia de 5 km.....	63
Figura 3.54. Diagrama del ojo en recepción sobre el canal 1 para una potencia de 25 dBm a una distancia de 5 kilómetros.....	64
Figura 3.55. Espectro del sistema para una potencia de 23 dBm a los 40 (verde) y 80 (café) y 100 (rojo) km.....	64
Figura 3.56. Componentes generadas por FWM para una dispersión de 4 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo) para una potencia de 20 dBm y una distancia de 5 km.....	65
Figura 3.57. Componentes generadas por FWM para una dispersión de 1 ps/nm/km (verde) y 0 ps/nm/km (rojo).....	65
Figura 3.58. a) Factor Q y b) BER para diferentes valores de dispersión de la fibra a una distancia de 5 km, para una potencia de transmisión de 20 dBm.....	66
Figura 3.59. Potencia de entrada sobre el canal 1 vs Distancia máxima alcanzada para un BER de $1e-15$ para espaciamentos de 100 y 200 Ghz.....	68
Figura 3.60. Escenario de simulación para el formato de modulación RZ-DPSK y velocidad de transmisión de 10Gb/s.....	69
Figura 3.61. (a) Diagrama del ojo y (b) Espectro óptico en el receptor Back to back.....	69
Figura 3.62. Diagramas de correlación y de ojo para el canal a 1550.12nm, receptor back to back y distancia 78 km, 0 dBm de potencia en los cuatro canales.....	71
Figura 3.63. Diagramas de correlación (a) BER vs Potencia de transmisión, (b) Factor Q vs Potencia de transmisión, para distancia 78 km, variando potencia de transmisión....	73
Figura 3.64. Espectros ópticos de entrada y salida para potencias de transmisión a) 0dBm y b) 35 dBm y distancia 78 km.....	74
Figura 3.65. Diagramas de correlación a) BER vs Dispersión, b) Factor Q vs Dispersión, distancia 78 km, potencia 30 dBm.....	74
Figura 3.66. Espectro de señal para una CD=-10 ps/nm/km (verde) y CD=16 ps/nm/km (rojo), potencia de transmisión 30 dBm, distancia 78 km.....	75
Figura 3.67. Diagramas de ojo para a) DC=-10 ps/nm/km y b) DC=16 ps/nm/km, distancia 78 km, potencia 30 dBm.....	75
Figura 3.68. Parámetros ópticos de medida del canal 1, para diferentes valores en la potencia de transmisión del canal 2 con una distancia de 53 km.....	77
Figura 3.69. Espectro en el back to back (verde) y en recepción (rojo) del canal 1 para diferentes valores de potencia de transmisión sobre el canal 2 a una distancia de 53 km.....	77
Figura 3.70. Diagrama del ojo en recepción sobre el canal 1 para potencias de a) 0 dBm y b) 30 dBm en el canal 2, manteniendo la potencia del canal 1 a 0 dBm a una distancia de 53 kilómetros.....	78

Figura 3.71. Ensanchamiento del espectro para una dispersión de 4 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo) debido a XPM, para una potencia de 25 dBm y una distancia de 53 km.....	79
Figura 3.72. Ensanchamiento del espectro para una dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo) debido a XPM, para una potencia de 25 dBm y distancia de 53 km. .	79
Figura 3.73. Factor Q y BER para diferentes valores de dispersión de la fibra a una distancia de 53 km, para potencias de 0 dBm en el canal 1 y 25 dBm para el canal 2.....	79
Figura 3.74. Parámetros ópticos de medida del canal 1, para diferentes valores en la potencia de transmisión a una distancia de 53 km.	81
Figura 3.75. Componentes generadas por FWM para una potencia de transmisión de 30 dBm.	82
Figura 3.76. Componentes generadas por FWM para una potencia de transmisión de 15 dBm.	82
Figura 3.77. Diagrama del ojo en recepción sobre el canal 1 para potencias de a) 15 dBm y b) 30 dBm a una distancia de 78 kilómetros.....	82
Figura 3.78. Espectro de la señal del canal 1 a los 40 (verde) y 80 (café) y 100 (rojo).....	83
Figura 3.79. Componentes generadas por FWM para una dispersión de 4 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).	83
Figura 3.80. Componentes generadas por FWM para una dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 1 ps/nm/km (rojo) para una potencia de 25 dBm.....	84
Figura 3.81. a) Factor Q y b) BER para diferentes valores de dispersión de la fibra a una distancia de 53 km, para una potencia de transmisión de 25 dBm.....	84
Figura 3.82. Potencia de entrada sobre el canal 1 contra distancia máxima alcanzada para un BER de $1e-15$, con espaciamentos de 50 100 y 200 Ghz.	87
Figura 3.83. Escenario de simulación para el formato de modulación NRZ-OOK y velocidad de transmisión de 40 Gb/s.	87
Figura 3.84. (a) Diagrama del ojo y (b) Espectro óptico en el receptor Back to back.....	88
Figura 3.85. Diagramas de correlación y de ojo para el canal a 1550.12nm, receptor back to back y distancia 5 km, 0 dBm de potencia en los cuatro canales.	89
Figura 3.86. Diagramas de correlación (a) BER vs Potencia de transmisión, (b) Factor Q vs Potencia de transmisión, para distancia 5 km, variando potencia de transmisión.	91
Figura 3.87. Espectros ópticos de entrada y salida para potencias de transmisión a) 0 dBm y b) 35 dBm y distancia 5 km.....	91
Figura 3.88. Diagramas de correlación a) BER vs Dispersión, b) Factor Q vs Dispersión, distancia 5 km, potencia 34 dBm.	92
Figura 3.89. Espectro de señal para una CD=16 ps/nm/km (verde) y CD=2 ps/nm/km (rojo), potencia de transmisión 34 dBm, distancia 5 km.	92
Figura 3.90. Diagramas de ojo para a) CD=2 ps/nm/km y b) CD=16 ps/nm/km, distancia 5Km, potencia 34 dBm.....	93
Figura 3.91. Parámetros ópticos de medida del canal 1, para diferentes valores en la potencia de transmisión del canal 2 con una distancia de 5 km.	94

Figura 3.92. Espectro en el back to back (verde) y en recepción (rojo) del canal 1 para diferentes valores de potencia de transmisión sobre el canal 2.	95
Figura 3.93. Diagrama del ojo en recepción sobre el canal 1 para potencias de a) 0 dBm y b) 7 dBm en el canal 2, manteniendo la potencia del canal 1 a 0 dBm a una distancia de 5 kilómetros.	95
Figura 3.94. Espectro de la señal transmitida (verde) a 0 dBm y la señal recibida (rojo) sobre el canal 1, cuando la potencia del canal 2 es de 25 dBm y el espaciamento de 125GHz, a una distancia de 5 km.	96
Figura 3.95. Espectro en el receptor back to back (verde) y en recepción (rojo) del canal 1 para una potencia de transmisión de 25 dBm sobre el canal 2.	96
Figura 3.96. Ensanchamiento del espectro para una dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo) debido a XPM.	97
Figura 3.97. a) BER y b) factor Q en el canal 1 transmitiendo a 0 dBm para diferentes valores de dispersión de la fibra a una distancia de 5 km y una potencia de transmisión de 25 dBm sobre el canal 2.	97
Figura 3.98. Parámetros ópticos de medida del canal 1, para diferentes valores en la potencia de transmisión a una distancia de 5 km.	98
Figura 3.99. Espectro para una potencia de transmisión de a) 27 dBm y b) 30 dBm en la salida de la fibra.	99
Figura 3.100. Componentes generadas por FWM para una dispersión de 4 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo) a una potencia de transmisión de 27 dBm.	100
Figura 3.101. Espectro del sistema para una dispersión de 0 ps/nm/km con una potencia de transmisión de 27 dBm por canal.	100
Figura 3.102. Espectro del sistema para una dispersión de 0 ps/nm/km con una potencia de transmisión de 20 dBm por canal.	101
Figura 3.103. a) Factor Q y b) BER para diferentes valores de dispersión de la fibra a una distancia de 5 km, para una potencia de transmisión de 20 dBm.	101
Figura 4.1 a) Factor Q vs Dispersión, b) BER vs dispersión, potencia de 10 dBm y distancia de 78 km.	104
Figura 4.2. a) Factor Q vs Dispersión, b) BER vs dispersión, potencia de 0 dBm y distancia de 78 km.	104
Figura 4.3. Diagramas de correlación a) BER vs potencia de transmisión, b) Factor Q vs potencia de transmisión, para una distancia de 78 km y dispersión de 2 ps/nm/km.	105
Figura 4.4. a) Espectro óptico, b) Diagrama del ojo, para potencia de 5 dBm, dispersión 2 ps/nm/km, distancia 78 km.	105
Figura 4.5. a) Factor Q contra Dispersión, b) BER contra dispersión, potencia de 25 dBm y distancia de 5km.	107
Figura 4.6. a) Factor Q vs Dispersión, b) BER vs dispersión, potencia de 20 dBm y distancia de 5km.	107
Figura 4.7. Diagramas de correlación a) BER vs potencia de transmisión, b) Factor Q vs potencia de transmisión, para una distancia de 5km y dispersión de 10 ps/nm/km.	108

Figura 4.8. a) Espectro óptico, b) Diagrama del ojo, para potencia de 8 dBm, dispersión 10 ps/nm/km, distancia 5 km.	108
Figura 4.9. Factor Q vs Dispersión para potencia de a) 30 dBm y distancia de 78km. ...	110
Figura 4.10. Diagramas de correlación a) BER vs potencia de transmisión, b) Factor Q vs potencia de transmisión, para una distancia de 78 km y dispersión de 12 ps/nm/km.	110
Figura 4.11. a) Espectro óptico, b) Diagrama del ojo, para potencia de 8 dBm, dispersión 10 ps/nm/km, distancia 78 km.	111
Figura 4.12. a) BER y b) factor Q contra dispersión para una potencia de 30 dBm y una distancia de 78 km.	112
Figura 4.13. a) BER y b) factor Q vs dispersión para una potencia de 25 dBm y una distancia de 78 km.	112
Figura 4.14. Diagramas de correlación a) BER y b) Factor Q vs potencia de transmisión, para una distancia de 5 km y dispersión de 11 ps/nm/km.	113
Figura 4.15. Diagrama del ojo para potencia de 5 dBm, dispersión 11 ps/nm/km, distancia 5 km.	113

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Número máximo de componentes FWM para sistemas WDM con diferente número de canales [8].	12
Tabla 1.2. Efectos no lineales y sus principales características.	18
Tabla 2.1. Ejemplo de frecuencias centrales nominales del plan con DWDM para 50 y 100 Ghz de espaciamento [37].	23
Tabla 2.2. Características y parámetros más relevantes del escenario de simulación.	24
Tabla 2.3. Casos de estudio.	25
Tabla 3.1. Distancia Máxima que se alcanza a una potencia de 0 dBm, espaciamento entre canales de 100 Ghz y velocidad de transmisión de 10 Gb/s con el formato de modulación NRZ-OOK.	28
Tabla 3.2. Distancia máxima que se alcanza a diferentes potencias de transmisión a una velocidad de 10 Gb/s, con el formato de modulación NRZ-OOK.....	30
Tabla 3.3. Valor de potencia donde SPM empieza a generar degradaciones considerables, para una distancia de 78 km	31
Tabla 3.4. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1, manteniendo la potencia constante, para diferentes valores de potencia del canal 2.	33
Tabla 3.5. Potencia máxima de transmisión para alcanzar valores mínimos requerido de los parámetros ópticos de medida.	34
Tabla 3.6. Valores de potencia en recepción para dos de los canales transmitidos.	37
Tabla 3.7. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1 manteniendo la potencia constante en 0 dBm, para diferentes valores de potencia del canal 2.	39
Tabla 3.8. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1, para diferentes valores de potencia de los otros canales.....	40
Tabla 3.9. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1, para diferentes valores de potencia en todo el sistema.	42
Tabla 3.10. Potencia máxima de transmisión para alcanzar valores mínimos requerido en los parámetros ópticos de medida.	43
Tabla 3.11. Espectro del sistema para espaciamentos de 50GHz, 100GHz y 200GHz, con potencia de 20 dBm y distancia de 78 km.....	46
Tabla 3.12. Distancia máxima alcanzada por el canal 1, para diferentes potencias con un espaciamento de 50 Ghz.	47
Tabla 3.13. Distancia máxima alcanzada por el canal 1, para diferentes potencias con un espaciamento de 200 Ghz.	47
Tabla 3.14. Distancia Máxima que se alcanza a una potencia de 0 dBm, espaciamento entre canales de 0.8nm y velocidad de 40 Gb/s con el formato de modulación NRZ-OOK.	49
Tabla 3.15. Distancia máxima que se alcanza a diferentes potencias de transmisión a una velocidad de 40 Gb/s con el formato de modulación NRZ-OOK.....	51
Tabla 3.16. Valor de potencia donde el efecto no lineal SPM empiezan a generar degradaciones considerables, para una distancia de 5 km.	52

Tabla 3.17. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1, manteniendo la potencia constante, para diferentes valores de potencia del canal 2.	55
Tabla 3.18. Potencia máxima de transmisión para alcanzar valores mínimos requerido de los parámetros ópticos de medida.	56
Tabla 3.19. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1, para diferentes valores de potencia de los otros canales.	60
Tabla 3.20. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1, para diferentes valores de potencia en todo el sistema.	62
Tabla 3.21. Potencia máxima de transmisión para alcanzar valores mínimos requerido en los parámetros ópticos de medida.	63
Tabla 3.22. Espectro del sistema para espaciamientos de 50, 100 y 200 Ghz entre los canales.	66
Tabla 3.23. Distancia máxima alcanzada para diferentes potencias, con un espaciamiento de 200 Ghz.	67
Tabla 3.24. Distancia Máxima que se alcanza a una potencia de 0 dBm, espaciamiento entre canales de 0.8nm y velocidad de 10 Gb/s con el formato de modulación RZ-DPSK.	70
Tabla 3.25. Distancia máxima que se alcanza a diferentes potencias de transmisión a una velocidad de 10 Gb/s con el formato de modulación RZ-DPSK.	72
Tabla 3.26 Valor de potencia donde los efectos no lineales empiezan a generar degradaciones considerables, para una distancia de 78 km.	73
Tabla 3.27. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1, manteniendo la potencia constante a 0 dBm, para diferentes valores de potencia del canal 2.	76
Tabla 3.28. Potencia máxima de transmisión para alcanzar valores mínimos requerido de los parámetros ópticos de medida.	77
Tabla 3.29. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1, para diferentes valores de potencia en todos los canales.	80
Tabla 3.30. Potencia máxima de transmisión para alcanzar valores mínimos requerido en los parámetros ópticos de medida.	81
Tabla 3.31. Espectro de las señales para diferentes espaciamientos entre canales a una potencia de transmisión de 30 dBm a 53 km.	85
Tabla 3.32. Distancia máxima alcanzada para diferentes potencias, con un espaciamiento de 50 Ghz.	86
Tabla 3.33. Distancia máxima alcanzada para diferentes potencias, con un espaciamiento de 200 Ghz.	86
Tabla 3.34. Distancia Máxima que se alcanza a una potencia de 0 dBm, espaciamiento entre canales de 0.8 nm y velocidad de 40 Gb/s con el formato de modulación RZ-DPSK.	88
Tabla 3.35. Distancia máxima que se alcanza a diferentes potencias de transmisión a una velocidad de 40 Gb/s con el formato de modulación RZ-DPSK.	90
Tabla 3.36. Valor de potencia donde los efectos no lineales empiezan a generar degradaciones considerables, para una distancia de 5 km.	91

Tabla 3.37. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1, manteniendo la potencia constante en 0 dBm, para diferentes valores de potencia del canal 2.	93
Tabla 3.38. Potencia máxima de transmisión para alcanzar valores mínimos requerido de los parámetros ópticos de medida.	94
Tabla 3.39. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1, para diferentes valores de potencia de transmisión.	98
Tabla 3.40. Potencia máxima de transmisión para alcanzar valores mínimos requerido en los parámetros ópticos de medida.	99
Tabla 4.1. Parámetros de transmisión y sus respectivos valores los cuales determinan el desempeño del sistema.	103
Tabla 4.2. Valores de BER y Factor Q, para 5 dBm, dispersión 4 ps/nm/km, distancia 78 km.	105
Tabla 4.3. Parámetros de transmisión y sus respectivos valores los cuales determinan el desempeño del sistema.	106
Tabla 4.4. Valores de BER y Factor Q, para 5 dBm, dispersión 4 ps/nm/km, distancia 78 km.	108
Tabla 4.5. Parámetros de transmisión y sus respectivos valores los cuales determinan el desempeño del sistema.	109
Tabla 4.6. Valores de BER y Factor Q, para 5dBm, dispersión 4 ps/nm/km, distancia 78 km.	111
Tabla 4.7. Parámetros de transmisión y sus respectivos valores los cuales determinan el desempeño del sistema.	111
Tabla 4.8. Valor de los parámetros ópticos de medida a 5 km, para la configuración recomendada, con potencia de transmisión de 20 dBm y dispersión de 11 ps/nm/km. ..	113

Glosario de Acrónimos

AM	Amplitude Modulation	Modulación de Amplitud
ASK	Amplitude Shift Keying	Modulación por Desplazamiento de Amplitud
ATM	Asynchronous Transfer Mode	Modo de Transferencia Asíncrono
BER	Bit Error Rate	Tasa de Error de Bit
BPSK	Binary Phase Shift Keying	Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria
CS-RZ	Carrier Suppressed Return to Zero	Portadora Suprimida Retorno a Cero
CW	Continuous Wave Laser	Láser de onda continua
DC	Dispersion Coefficient	Coefficiente de Dispersión
DPSK	Differential phase shift keying	Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying	Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura
DSB	Double Side Band Modulation	Modulación de Doble Banda Lateral
DSF	Dispersion Shifted Fiber	Fibra de Dispersión Desplazada
EAM	Electro Absorption Modulator	modulador de electro-absorción
ESNR	Electrical Signal to Noise Ratio	Relación Señal a Ruido Eléctrica
FDSS	Frequency Domain Split-step	
FM	Frequency Modulation	Modulación de Frecuencia
FSK	Frequency Shift Keying	Modulación por Desplazamiento de Frecuencia
FWM	Four Wave Mixing	Mezcla de Cuarta Onda
GVD	Group Velocity Dispersion	Dispersión de Velocidad de Grupo
GVD Slope	Group Velocity Dispersion Slope	Pendiente de Dispersión de Velocidad de Grupo
HDTV	High Definition Television	televisión de alta definición
IFWM	Intra Four Wave Mixing	Mezcla de Cuarta Onda Intracanal
IPTV	Internet Protocol Television	Televisión sobre el protocolo IP
ISI	InterSymbol Interference	Interferencia intersimbólica
ITU-T	Telecommunication Standardization Sector of the International Telecommunications Union	Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones.
IXPM	Intra Cross Phase Modulation	Modulación de fase cruzada Intracanal
MFD	Mode Field Diameter	Diámetro del campo modal
MZI	Mach Zenher Interferometer	Interferómetro de Mach Zenher
NRZ	Non Return to Zero	No Retorno a Cero
NZ-DSF	Non-Zero Dispersion Shifted Fibers	Fibra de Dispersión Desplazada

OCM	Optical Channel Monitor	No Cero
OOK	On-Off Keying	Monitoreo de Canal Óptico
OPM	Optical Performance Monitoring	Codificación Encendido Apagado
OPM	Optical Performance Monitoring	Monitoreo de Desempeño Óptico
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio	Monitoreo de Desempeño Óptico
PM	Phase Modulation	Relación Señal a Ruido Óptica
PMD	Polarization Mode Dispersion	Modulación de Fase
		Dispersión por Modo de Polarización
PPM (PMP)	Performance Monitoring Protocol	Monitoreo de desempeño del protocolo
PSBT	Phase shaped binary transmission	Transmisión de Cambio de Fase Binaria
PSK	Phase Shift Keying	Modulación por Desplazamiento de Fase
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Modulación de Amplitud en Cuadratura
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura
SBS	Stimulated Brillouin Scattering	Dispersión Estimulada de Brillouin
SDH	Synchronous Digital Hierarchy	Jerarquía Digital Síncrona
SONET	Synchronous Optical Network	Red Óptica Síncrona
SPM	Self Phase Modulation	Automodulación de fase
SPT	Spectral Propagation Technique	Técnica de Propagación Espectral
SRS	Stimulated Brillouin Scattering	Dispersión Estimulada de Raman
SSF	Split Step Fourier	Paso Dividido de Fourier
SSMF	Standard Single Mode Fiber	Fibra Monomodo Estándar
TDSS	Time-Domain Split-Step	
VBS	Variable Bandwidth Simulation Technique	Simulación de Ancho de Banda Variable
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Multiplexación por división de longitud de onda
XPM	Cross Phase Modulation	Modulación de fase cruzada

Introducción

El incremento en la potencia de transmisión en redes WDM genera degradaciones debido a las no linealidades de la fibra. Estas no linealidades han generado un amplio campo de estudio, debido al impedimento que estas generan y a sus aplicaciones. Estas degradaciones también han hecho que se desarrollen nuevos tipos de fibra que tratan de minimizar el impacto de las no linealidades.

Este trabajo de grado se constituye en una revisión e investigación, con una población objetivo dirigida a expertos, que busca generar un análisis del desempeño de redes WDM frente a variaciones en los parámetros de transmisión y su incidencia en los efectos no lineales, brindando una base confiable para investigaciones futuras en las cuales se estudien los diferentes efectos no lineales que se presentan en los sistemas WDM.

Con el fin de abordar los temas necesarios para el desarrollo y culminación de este trabajo de grado, el contenido consta de cuatro capítulos que se distribuyen de la siguiente manera:

1. Parámetros de una red WDM que impactan los efectos no lineales.

En este capítulo se lleva a cabo una especificación de las principales características y parámetros de una red WDM y un estudio de las degradaciones que se presentan en los sistemas ópticos, centrándose en los efectos no lineales y en la relación de estos con los parámetros de transmisión.

2. Metodología de simulación.

A través del desarrollo y cumplimiento de una serie de etapas se plasma el escenario de simulación que será utilizado en este trabajo de grado, del cual se desprenden los diferentes casos de estudio, los cuales mediante la herramienta OptSim® de Rsoft, permiten analizar el desempeño del sistema frente a variaciones en los parámetros de transmisión y su incidencia en los efectos no lineales, a través de los parámetros ópticos de medida más relevantes en redes WDM.

3. Escenario de simulación y sus casos de estudio.

Se centra en la simulación de cada uno de los casos de estudio planteados en el capítulo 2 para determinar las degradaciones que se presentan debido a los efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión, ambos definidos en el capítulo 1. Además presenta el correspondiente análisis de los efectos no lineales SPM, XPM, FWM.

4. Efecto conjunto de la variación de los parámetros de transmisión y su impacto en las no linealidades para cada caso de estudio.

Se identifica mediante el análisis de desempeño de los casos de estudios del capítulo 3, la configuración de los principales parámetros de transmisión de una red WDM que brindan un mejor desempeño para cada caso de estudio.

5. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

Se da una serie de conclusiones, recomendaciones y perspectivas a futuro, obtenidas del desarrollo del trabajo de grado.

Capítulo 1. Parámetros de una red WDM que impactan los efectos no lineales.

Para el desarrollo de este trabajo de grado es necesario partir de una base conceptual sólida, la cual cuente con los conceptos principales de una red de Multiplexación¹ por División de Longitud de Onda (WDM - Wavelength Division Multiplexing), los efectos de degradación óptica y su impacto en el desempeño de una red WDM, lo cual se va a evaluar a través del Monitoreo de Desempeño Óptico (OPM - Optical Performance Monitoring). Para esto es necesario conocer los componentes principales que hacen parte de una red WDM y su funcionamiento, de forma clara y precisa. En primer lugar se realiza un estudio de los principales parámetros característicos de una red WDM, para posteriormente, poderlos relacionar con los efectos de degradación óptica.

Al ser el tema principal de este trabajo de grado, los efectos no lineales, los cuales hacen parte de los efectos de degradación óptica, se realiza un análisis profundo de estos fenómenos, su comportamiento, su dependencia de las características de una red WDM y su incidencia en el rendimiento del mismo. Al contar con la base teórica sobre estos dos temas principales se podrá analizar y determinar los principales parámetros de transmisión en una red WDM, que impactan los efectos no lineales.

1.1 Redes WDM

En la actualidad, el incremento exponencial del tráfico de datos y el requerimiento de mayores anchos de banda por parte de los usuarios para acceder a diferentes tipos de servicios como Youtube [1], Skype [2], Google Earth [3], Televisión sobre el protocolo IP (IPTV - Internet Protocol Television), televisión de alta definición (HDTV – High Definition Television), entre otros; ha causado que el par de cobre, que lleva más de 120 años proporcionando servicios de telecomunicaciones, haya quedado obsoleto. Para poder cumplir con las grandes demandas de tráfico de los usuarios, que se incrementa rápidamente con el transcurso de los años, (figura 1.1) [4], se usan redes de comunicaciones ópticas, ya que han demostrado ser el sistema de comunicaciones más eficiente para la transmisión de grandes cantidades de información y presentan ventajas frente a otros medios como inmunidad a interferencias electromagnéticas, mayor seguridad, facilidad para su instalación, entre otras [5]. Esto ha obligado a buscar modelos de multiplexación que soporten mayor capacidad de transferencia de datos, sin necesidad de cambiar todos los equipos y enlaces existentes [6]. Uno de estos modelos es la multiplexación WDM, la cual es usada para combinar o recuperar dos o más señales ópticas a través de portadoras con diferentes longitudes de onda de la fibra, explotando de esta manera el gran ancho de banda con el que cuentan este medio de transmisión [7] [8].

¹ Combinación de dos o más canales de información en un solo medio de transmisión

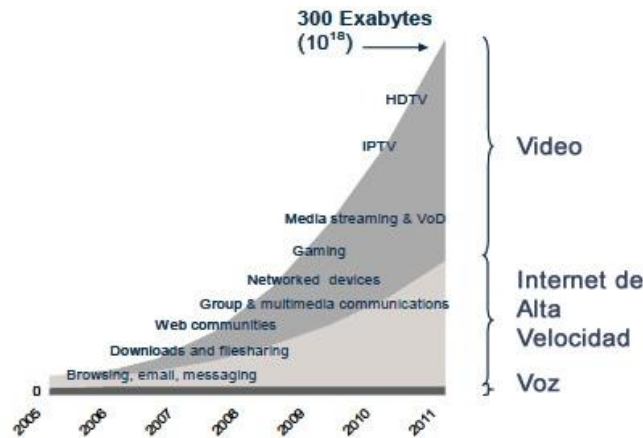


Figura 1.1. La Forma cambiante del tráfico en las redes [4].

Para poder llevar a cabo la comunicación desde el transmisor hasta el receptor, a través de la fibra, el sistema óptico hace uso de diferentes elementos como moduladores, codificadores, divisores de canal, regeneradores, amplificadores, decodificadores y fotoreceptores, como se muestra en la figura 1.2, donde se presenta el esquema de una red WDM.

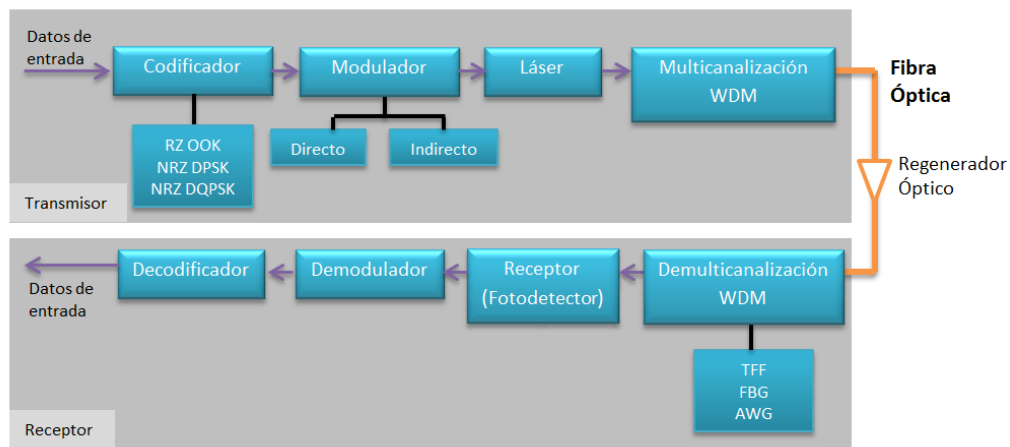


Figura 1.2. Sistema de comunicaciones óptico para WDM [5].

Para que la información pueda ser transmitida a través de un medio de transmisión es conveniente utilizar una tecnología de comunicaciones como Red Óptica Síncrona (SONET - Synchronous Optical Network), Modo de Transferencia Asíncrono (ATM - *Asynchronous Transfer Mode*), Jerarquía Digital Síncrona (SDH - Synchronous Digital Hierarchy), entre otros; para que sea organizada en la forma que

será transmitida. Posteriormente los datos son modulados y multicanalizados empleando diferentes longitudes de onda (WDM) para ser transmitidos a través de la fibra.

Es importante conocer los elementos que conforman una red WDM y su comportamiento. En el anexo A se muestran los dispositivos ópticos que hacen parte de una red WDM.

Otro factor del cual depende el impacto de las no linealidades en el sistema, es el formato de modulación con el cual se trabaje, ya que dependiendo de éste se puede reducir el impacto de este tipo de degradaciones sobre el sistema. En el anexo B, se presentan los principales formatos de modulación utilizados en comunicaciones ópticas y sus principales características.

1.2 Degradaciones Ópticas.

En la fibra óptica se presentan efectos que perjudican la transmisión de las señales, ya que degradan la calidad de la señal óptica, limitando el desempeño de las redes. Como se observa en la figura 1.3, los efectos que causan el deterioro de la calidad de transmisión, se agrupan en dos categorías:

- Efectos lineales: Perdida por atenuación, efectos de dispersión (cromática y PMD).
- Efectos no lineales: en los que se encuentran los efectos que se producen debido a la dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo aplicado: Automodulación de Fase (SPM – Self Phase Modulation), Modulación de Fase Cruzada (XPM – Cross Phase Modulation), Mezcla de Cuarta Onda (FWM – Four Wave Mixing), y también los efectos de dispersión en la fibra: Dispersión Estimulada de Brillouin (SBS Stimulated Brillouin Scattering), Dispersión Estimulada de Raman (SRS - Stimulated Raman Scattering) [9].



Figura 1.3 Degradaciones ópticas [9].

A continuación se hará una descripción de las degradaciones ópticas, que afectan el desempeño de las redes WDM, haciendo énfasis en los efectos no lineales.

1.2.1 Efectos lineales.

Dentro de los efectos lineales que se presentan en la fibra óptica, la degradación que está más relacionada con los efectos no lineales es la dispersión cromática, ya que el comportamiento de algunos efectos no lineales depende del valor de este parámetro.

○ Dispersión cromática

La dispersión cromática de una fibra monomodo se refiere al ensanchamiento del pulso inducido a través de la dependencia de la longitud de onda del índice de refractividad de la fibra, como se observa en la ecuación (1.1), lo que causa que el pulso aumente su duración temporal a medida que se propaga por la fibra, resultando en una interferencia intersimbólica (ISI) en un sistema de transmisión óptico. Esta restricción limita el alcance de la distancia de transmisión sin necesidad de regeneración o de compensación de la dispersión.

El impacto de la dispersión del material en una señal modulada puede ser descrito por la constante de modo de propagación β .

- β_0 [1/Km]: representa un cambio de fase constante.
- β_1 [ps/Km]: velocidad a la cual la envolvente del pulso se propaga.
- β_2 [ps²/Km]: Dispersión de Velocidad de Grupo (GVD - Group Velocity Dispersion).
- β_3 [ps³/Km]: Pendiente de Dispersión de Velocidad de Grupo (GVD Slope).

La dispersión está dada por la ecuación (1.1) y la pendiente de dispersión por la ecuación (1.2).

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

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

La pendiente de la dispersión, dada por la ecuación (1.2), es la medida en la que varía la dispersión como una función de la longitud de onda de la luz.

El ensanchamiento de un pulso, debido a la dispersión cromática, está dado por la ecuación (1.3).

$$\frac{T_1}{T_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{\beta_2 L}{T_0^2}\right)^2} \quad (1.3)$$

Donde:

T_1 : Duración del pulso a la salida de la fibra.

T_0 : Duración inicial del pulso.

β_2 : GVD.

L : Longitud de la fibra.

La figura 1.4 muestra el valor de la dispersión para los tipos de fibra más usados. Un coeficiente de dispersión cromática bajo incrementa el deterioro no lineal entre canales, lo que hace la Fibra de Dispersión Desplazada (DSF – Dispersion Shifted Fiber) G.653 inadecuada para WDM [10].

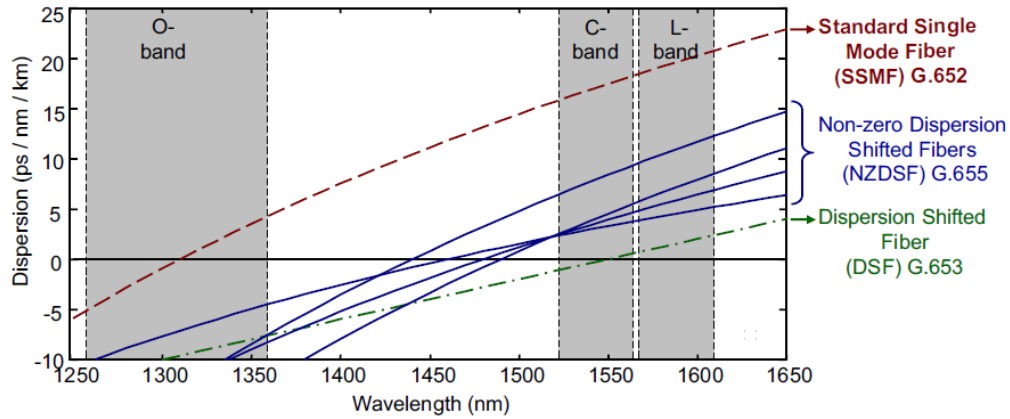


Figura 1.4. Dispersión como una función de la longitud de onda para los tipos más comunes de fibra usados en comunicaciones ópticas [10].

1.2.2 Efectos no Lineales

En el diseño de sistemas de transmisión básicos se asume que la fibra óptica actúa como un medio lineal, en el cual las propiedades de la fibra no cambian con la potencia de la señal, sin embargo, esta suposición es verdadera solo para señales con niveles bajos de potencia y bajas tasas de transmisión. Cuando la velocidad de transmisión supera los 10 Gb/s y/o la potencia se incrementa, es necesario considerar los efectos no lineales y su impacto en el sistema de comunicaciones (figura 1.5), ya que la fibra de silicio es un material, en esencia, no lineal. En el caso de sistemas WDM, las no linealidades pueden limitar la potencia y la tasa de transmisión, por lo que son un factor determinante en la eficiencia de este tipo de sistemas. En este capítulo se discuten los efectos no lineales que son más relevantes para las comunicaciones por fibra óptica [5, 7, 8, 10, 11].

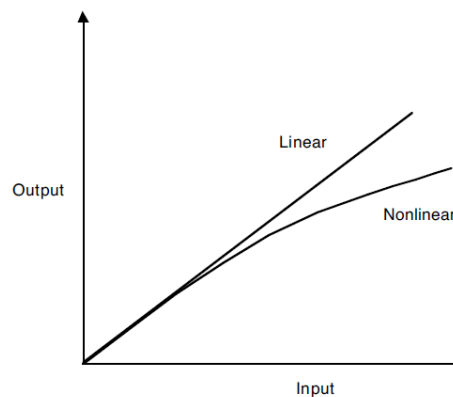


Figura 1.5. Potencia de entrada contra potencia de salida, donde se evidencia la Interacción lineal y no lineal en la fibra óptica [12].

La presencia de los efectos no lineales en la fibra óptica tiene dos causas principales:

- Debido a la dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo aplicado (efecto Kerr). Los efectos a través de los cuales se manifiesta son: Automodulación de Fase (SPM), Modulación de Fase Cruzada (XPM) y la Mezcla de Cuarta Onda (FWM) [11].
- El fenómeno de dispersión inelástica, que se presenta para altos niveles de potencia puede inducir efectos estimulados como Dispersión Estimulada de Brillouin (SBS) y Dispersión Estimulada de Raman (SRS). La dispersión de la intensidad de la luz crece casi exponencialmente si la potencia incidente excede un cierto valor umbral [11].

Existen dos parámetros que es importante definir antes de tratar los diferentes efectos no lineales, ya que dependiendo del valor de estos, varía el impacto de las degradaciones en el sistema [5, 7].

- *Longitud efectiva*: longitud de la fibra en la cual se presenta mayor interacción entre los efectos no lineales. Esta está dada por la ecuación (1.4).

$$L_{ef} = \frac{1-e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (1.4)$$

Donde:

α : Atenuación de la fibra.

L : Longitud total del enlace.

Para fibras con atenuaciones pequeñas, como las que se encuentran actualmente, esta ecuación puede ser aproximada a:

$$L_{ef} \approx \frac{1}{\alpha} \quad (1.5)$$

- *Área efectiva*: la distribución de potencia no es uniforme a través del área de la fibra, ya que en el centro hay una mayor concentración que en los extremos [5]. Para estimar esta área efectiva se utiliza la siguiente ecuación:

$$A_{ef} = \pi w_0^2 \quad (1.6)$$

Donde:

w_0 : Diámetro del campo modal (MFD)

El parámetro w_0 puede ser aproximado al diámetro de la fibra.

○ **Modulación de Fase Inducida (SPM)**

Se presenta debido a que el índice de refracción de la fibra, tiene una componente que depende de la intensidad de la señal, este índice de refracción no lineal induce un desplazamiento de fase que es proporcional a la intensidad del pulso. Es por esto que las diferentes partes del pulso se ven sometidas a diferentes cambios de fase, lo que

da lugar a que se produzca un chirp² en el pulso, lo que también modificará los efectos de la dispersión cromática.

Este efecto es proporcional a la intensidad de la señal de transmisión, razón por la que los efectos del SPM son más pronunciados en los sistemas que utilizan altas potencias de transmisión. El ensanchamiento del pulso generado por SPM, como consecuencia del efecto kerr está dado por:

$$\Delta\omega = \gamma L_{ef} \frac{dP(t)}{dt} \quad (1.7)$$

Donde:

γ : Parámetro de no linealidad
 $P(t)$: Potencia del pulso.
 L_{ef} : Longitud efectiva.

El parámetro de no linealidad combina el índice de refracción no lineal y el área efectiva en un solo coeficiente y está dado por la ecuación [8]:

$$\gamma = \frac{2\pi\eta_2}{\lambda A_{ef}} \quad (1.8)$$

Donde:

η_2 : Índice de refracción no lineal
 λ : Longitud de onda.

El índice de refracción no lineal η_2 varía entre valores de $2.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ a $3.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$. El valor típico que se toma para este parámetro es de $3.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ [8, 10, 13].

El SPM modifica los efectos de la dispersión cromática, por lo tanto es importante considerarlo para sistemas con alta tasa de transmisión de bits (sistemas operando a 10 Gb/s o más, o sistemas operando a velocidades más bajas, pero con potencias de transmisión elevadas) ya que estos tienen unas limitaciones significativas debido a la dispersión cromática.

El signo del desplazamiento de fase debido a la SPM es negativo, el SPM induce un chirp positivo en los pulsos, el efecto de este chirp depende del signo del parámetro β_2 . Si $\beta_2 > 0$ los pulsos experimentan una dispersión normal por lo que la SPM aumenta el efecto de ensanchamiento provocado por la dispersión; si $\beta_2 < 0$ los pulsos experimentan una dispersión anormal y si los efectos de la dispersión son superiores a los de la SPM, la SPM reduce el ensanchamiento que se genera debido a la dispersión [11].

² Fenómeno en el láser donde la longitud de onda de la luz emitida cambia durante la modulación [5].

“Un aspecto positivo de la aparición de la SPM, es que el “chirp” que introduce es de signo opuesto al que se genera por la dispersión cromática, por lo que se puede pensar en compensar dicha dispersión a partir de una cierta no linealidad” [10].

Un pulso al propagarse en la fibra es sometido a una compresión y expansión debido a SPM. Por ejemplo una señal a 10 Gb/s se propaga en una fibra monomodo como se muestra en la figura 1.6. [8].

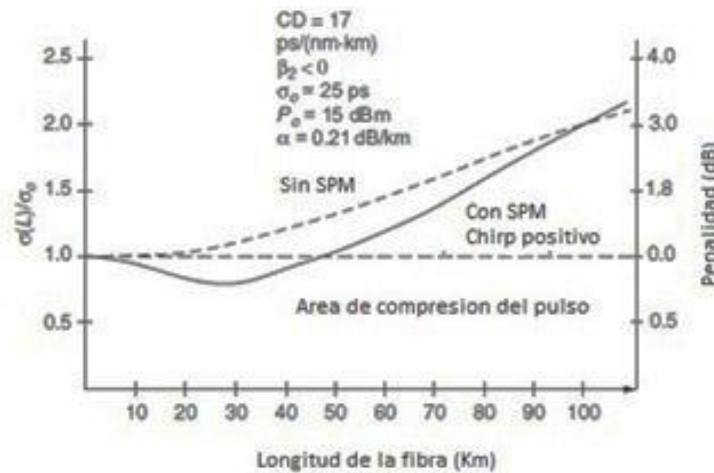


Figura 1.6. Ejemplo de la compresión y ampliación de un pulso debido a SPM [8].

○ Modulación de Fase Cruzada (XPM)

Se genera cuando dos o más canales ópticos son transmitidos simultáneamente a través de la fibra óptica, usando la tecnología de WDM, debido a que el índice de refracción efectivo, para una onda incidente, no solo depende de la intensidad de esa onda sino también de la intensidad de cualquier otra onda que se co-propague a través del canal, debido a la interacción entre ellas [7, 11]. Cuando dos o más señales se propagan simultáneamente el impacto de XPM es similar a SPM. El cambio de fase no lineal inducido por XPM es, sin embargo, es el más perjudicial cuando dos pulsos a diferente longitud de onda están parcialmente solapados en el tiempo [10].

Despreciando la dispersión cromática se obtiene la ecuación (1.9) que muestra el ensanchamiento espectral que sufre el canal que es transmitido con potencia $P_1(t)$ cuando se copropaga un canal con potencia $P_2(t)$, [10, 14].

$$\Delta\omega = \gamma L \frac{dP_1(t)}{dt} + 2\gamma L \frac{dP_2(t)}{dt} \quad (1.9)$$

Donde:

$P_1(t)$: Potencia del canal 1.

$P_2(t)$: Potencia del canal 2.

En la ecuación (1.9) se observa de manera clara la dependencia que este efecto tiene de la potencia de transmisión, la longitud efectiva y el coeficiente de eficiencia no lineal [8]. La dispersión cromática disminuye la XPM ya que ambos canales tienen una velocidad de grupo diferente y por lo tanto se aleja uno del otro. Entre más rápido se alejen los dos pulsos, más pequeña será la diferencia en el cambio de fase no lineal. Este efecto es más perjudicial para canales con espaciamiento estrecho [10,11].

○ Mezcla de Cuarta Onda (FWM)

Cuando dos o más señales ópticas de frecuencias centrales diferentes (diferentes Canales WDM), se propagan en una fibra, se puede dar una mezcla de señales lo cual puede generar nuevos componentes de interferencia de la señal óptica, todo esto debido a la dependencia del índice de refracción de la fibra con la potencia de la señal, lo que causa un medio no lineal de propagación y crea las condiciones para la mezcla de la señal.

En FWM las componentes de la señal generada pueden interferir con la señal original del canal, como también con otros canales WDM adyacentes o cercanos; el número de posibles componentes FWM se incrementa casi exponencialmente con el número de señales que se propagan en la fibra, como se observa en la figura 1.7 [8].

Para que el fenómeno de la FWM ocurra es necesaria la condición de “phase-matching”³, donde, el efecto de la FWM depende de la potencia de la señal, dispersión y del espaciamiento de los canales WDM [9].

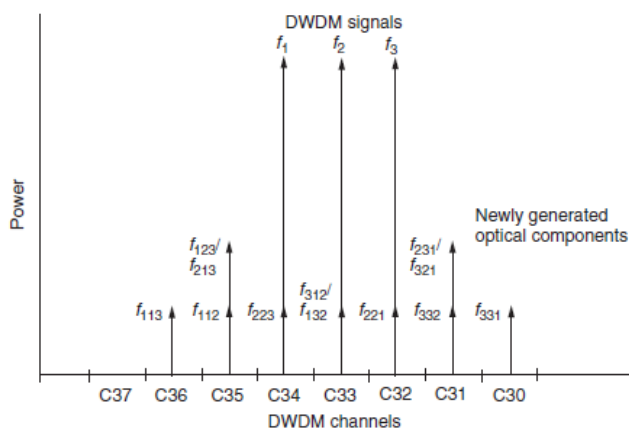


Figura 1.7. Efecto de FWM en tres señales equidistantes [8].

En la tabla 1.1 se muestra el número de componentes de interferencia que se generan cuando se incrementa el número de canales.

³ Encuentro de fase, que se presenta en el caso ideal de fibras sin dispersión.

Tabla 1.1. Número máximo de componentes FWM para sistemas WDM con diferente número de canales [8].

Número de señales	Número total posible de las componentes generadas por FWM
2	2
3	9
8	224
16	1920

○ **Intra Canal XPM e Intra Canal FWM (IXPM e IFWM)**

IXPM e IFWM se producen principalmente en enlaces con fibra de alta dispersión SSMF y son particularmente importantes para tasas de transmisión de 40 Gb/s o superiores. IFWM es el más evidente para señales de amplitud modulada creando un pulso fantasma en el timeslot (intervalo de tiempo) donde un 0 es transmitido [10, 15]. Este induce una transferencia de energía (adicional) resultando en una amplitud de jitter⁴ en el símbolo 1 como se muestra en la figura 1.8.

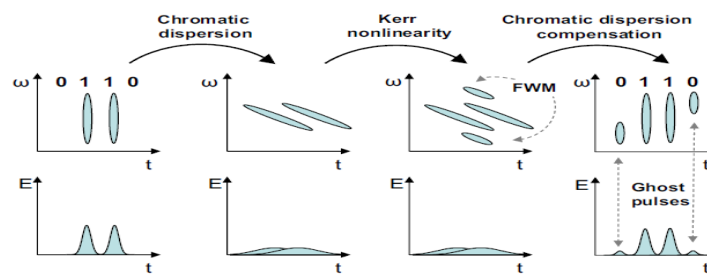


Figura 1.8. Efecto de IFWM [10]

IXPM genera un cambio en la frecuencia debido a la variación de la intensidad de los pulsos traslapados. A través de la interacción con la dispersión cromática este cambio de frecuencia es posteriormente convertido en una fluctuación temporal.

○ **Dispersión Estimulada de Raman (SRS)**

En un sistema WDM la dispersión estimulada de Raman genera transferencia de energía de los canales de mayor frecuencia a los canales de menor frecuencia, este efecto se observa en la figura 1.9 [5].

⁴Variaciones en el tiempo, pequeñas y rápidas, de una señal debido a ruido, cambios en las características de los componentes, voltajes, sincronización, etc.

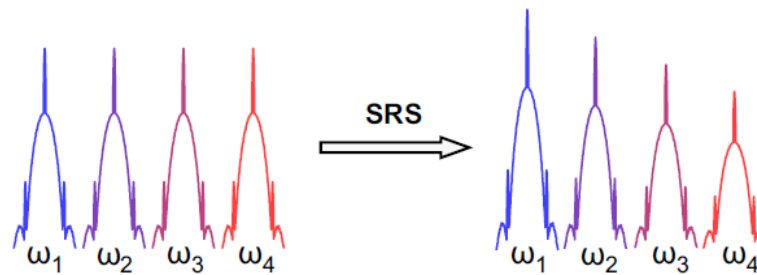


Figura 1.9. Principio de la Dispersión Estimulada de Raman [10].

El coeficiente de ganancia de Raman (g_R) es el parámetro más importante para describir la dispersión estimulada de Raman, este depende de la composición del núcleo de la fibra. El límite de potencia debido a SRS, es el nivel crítico en el cual la potencia incidente y la potencia dispersada son iguales, este está dado por la ecuación (1.10) [5, 11, 16].

$$P_{Limite}(SRS) \approx \frac{16A_e}{g_R L_{ef}} \quad (1.10)$$

Donde:

A_e = Area efectiva de la fibra.

L_{ef} = Longitud efectiva de la fibra.

g_R = Ganancia de Raman.

Para el parámetro de Ganancia de Raman, teniendo en cuenta la literatura y que se trata de una fibra de silicio se toma un valor aproximado de $g_R \approx 5 \times 10^{-13} \text{ m/W}$ [7, 17]. La figura 1.10 muestra las señales antes de ser transmitidas por el enlace de fibra, el espectro de ganancia de Raman y la transferencia de potencia que este genera.

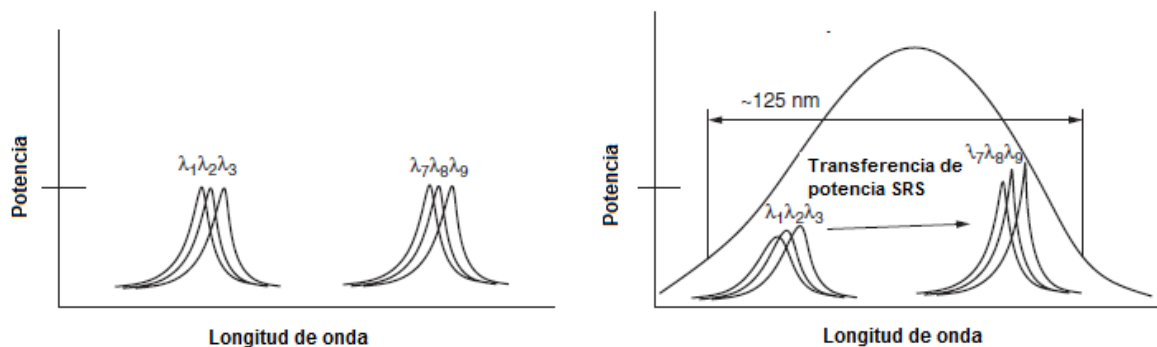


Figura 1.10. Espectro de ganancia de Raman [8].

○ Dispersión Estimulada de Brillouin (SBS)

La dispersión estimulada de Brillouin puede ocurrir a menores niveles de potencia de entrada que los necesarios para que se presente la dispersión estimulada de Raman. Ese efecto no lineal al igual que la SRS se presenta por la generación de una onda

llamada onda de Stokes, la cual se propaga en dirección opuesta a la dirección de propagación de la onda incidente y tiene una frecuencia menor a la de la luz incidente. Debido a la SBS se presenta un cambio en frecuencia de la onda de Stokes aproximadamente de 11GHz el cual es más pequeño por tres órdenes de magnitud comparado con el cambio en frecuencia que genera SRS que es aproximadamente 13THz.

Un importante parámetro de este efecto no lineal es la potencia límite debida a SBS, la cual se define como el nivel de potencia crítica en el cual la potencia incidente y la potencia dispersada son iguales, el valor de la potencia límite puede ser calculada por: [11].

$$P_{limite}(SBS) \approx \frac{21A_e}{g_B L_{ef}} \quad (1.11)$$

Donde:

$$g_B = \text{Ganancia de Brillouin.}$$

El valor de ganancia de Brillouin, para este trabajo de grado, se toma aproximadamente de $g_B = 5 \times 10^{-11} m/W$ [7, 11, 18].

El valor de la potencia límite debido a SBS limita la potencia incidente por canal en un sistema WDM y es independiente del número de canales que se esté empleando.

La figura 1.11 muestra una señal a una longitud de onda $\lambda = 1550 \text{ nm}$ y la onda dispersada que se genera debido a SBS. El espectro de ganancia de la onda dispersada tiene un ancho de 20MHz [5].

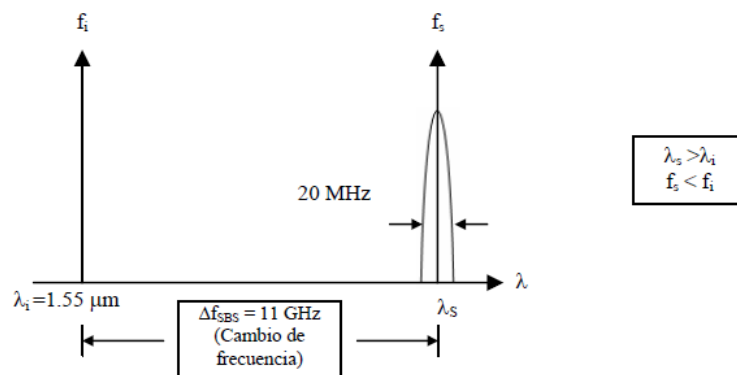


Figura 1.11. Señal a una longitud de onda $\lambda = 1550 \text{ nm}$ y a onda dispersada que se genera debido a SBS [5].

En la figura 1.12 se muestran los efectos no lineales que más afectan el canal de transmisión dependiendo de la velocidad a la que se trabaja, con los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-OOK para diferentes valores de dispersión.

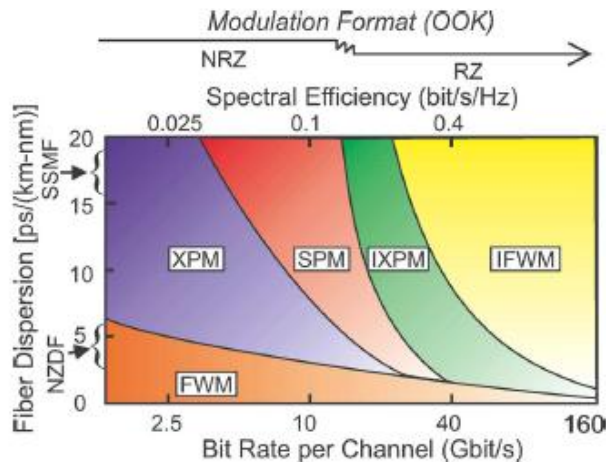


Figura 1.12. Importancia de los impedimentos no lineales intra-canal e inter-canal en los sistemas WDM de diferentes tasas de bits por canal [15].

Hay escalas de longitud relacionadas con la dispersión cromática y los efectos no lineales, las cuales son importantes ya que permiten conocer el segmento donde son más relevantes la dispersión cromática o los efectos no lineales [10, 13]. Estas longitudes características están dadas por:

$$\text{Longitud de Dispersión:} \quad L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad (1.12)$$

$$\text{Longitud No-Lineal:} \quad L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (1.13)$$

Por ejemplo, si la longitud obtenida en estos dos parámetros es mucho menor que la del enlace solo se tendrá en cuenta la atenuación de la fibra, cuya distancia está dada por la longitud efectiva, dependiente de la atenuación de la fibra. Mientras que si el valor de la longitud de estos dos parámetros se aproxima a la longitud del enlace, no se podrán despreciar los efectos no lineales o los dispersivos según corresponda.

Finalmente y a manera de resumen, los principales parámetros de transmisión de una red WDM, que inciden en el comportamiento de los efectos no lineales, son:

- Potencia de transmisión.
- Velocidad de transmisión.
- Número de canales.
- Espaciamiento entre canales.
- Área efectiva de la fibra.
- Dispersión de la fibra.
- Formato de modulación.

1.3 Monitoreo de redes ópticas

El monitoreo de las redes ópticas es una herramienta indispensable en el campo de las comunicaciones, ya que facilita su administración a través de pruebas y documentación precisa, logrando así, un óptimo nivel de utilización y mejoras notables en la calidad de los servicios ofrecidos, en este trabajo de grado se toman las herramientas que brinda el modelo de referencia de Monitoreo de Desempeño Óptico (OPM – Optical Performance Monitoring), ya que cuenta con una serie de técnicas de medida con las cuales se puede visualizar el comportamiento de la red, para determinar el impacto de los efectos no lineales a medida que se realizan variaciones en los parámetros de transmisión. A continuación se citan las principales características del modelo de referencia OPM [19-21].

El monitoreo de Desempeño óptico (OPM) se refiere al monitoreo a nivel físico de la calidad de la señal, para obtener un buen funcionamiento de esta en el dominio óptico [19].

El modelo de referencia OPM, consta de tres niveles como se muestra en la figura 1.13.

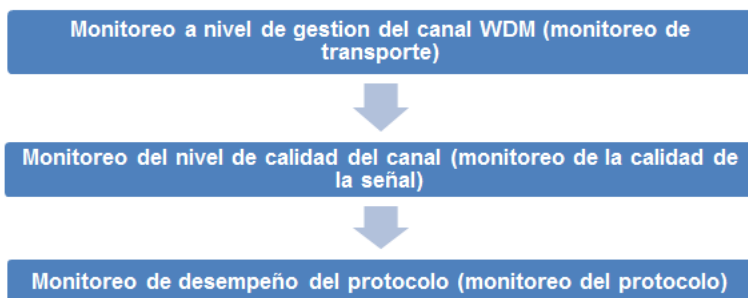


Figura 1.13. Niveles del modelo de referencia OPM [19].

- Monitoreo a nivel de gestión del canal WDM: se refiere al monitoreo del canal óptico (OCM), en este nivel se seleccionan las características del dominio óptico necesarias para el transporte y gestión del canal a nivel de la capa WDM. Para el nivel de monitoreo de transporte se utilizan medidas como: registro de longitud de onda, medidas en tiempo real de la presencia del canal, niveles de potencia y la OSNR espectral [19].
- Monitoreo del nivel de calidad del canal: Se realiza sobre una longitud de onda específica a la cual se efectúan medidas sensitivas de transición de señal. Algunas de las características que se pueden analizar en este nivel son: Factor Q, Estadísticas del Diagrama del ojo así como la distorsión que ocurre en este debido a la dispersión y a los efectos no lineales, la ESNR [19].
- Monitoreo de desempeño del protocolo: Involucra el monitoreo de la información del protocolo de datos y el monitoreo de desempeño del protocolo (PPM) [19].

En este trabajo de grado se van a tener en cuenta medidas y características que se utilizan en los niveles de monitoreo de transporte y monitoreo de la calidad de la señal como niveles de potencia, OSNR espectral [22], Factor Q [23], Diagrama del ojo [24, 25], entre otras.

El nivel de monitoreo del protocolo no se tiene en cuenta, ya que en este trabajo no se involucra información o impacto de estos en el desempeño de una red WDM.

Para determinar los principales parámetros de transmisión de una red WDM que impactan los efectos no lineales fue necesario analizar detalladamente cada efecto no lineal, observar su comportamiento y las ecuaciones que rigen cada uno de ellos, para así determinar las causas de su aparición, el tipo de degradación que generan, la identificación de los parámetros de transmisión que los impactan, la forma de visualizar las degradaciones causadas por estos, basados en las medidas y características del modelo de referencia OPM y cómo lograr la minimización de su impacto variando los diferentes parámetros de transmisión inicialmente definidos. Este estudio realizado en el Capítulo 1 se consolida a través de la tabla 1.2, en la cual se muestran los principales efectos no lineales presentes en las comunicaciones ópticas y su relación con los diferentes parámetros de una red WDM. Esta permite comprender los efectos no lineales de forma rápida, corta y concisa.

Mediante el desarrollo de este capítulo se analizaron los efectos no lineales que impactan los parámetros de transmisión, para determinar la causa, dependencia, impacto, medida y forma de minimizarlos. Este resultado se muestra de forma resumida y concisa en la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Efectos no lineales y sus principales características.

Efecto no lineal	Causa	Dependencia	Impacto	Medida	Minimización Teórica del impacto	Referencias
SPM	<ul style="list-style-type: none"> Efecto Kerr: índice de refracción dependiente de la intensidad 	<ul style="list-style-type: none"> Potencia del canal. Longitud de onda de la señal. Tipo de fibra (área efectiva, dispersión, coeficiente de índice no lineal). Velocidad de transmisión. 	<ul style="list-style-type: none"> Ensanchamiento del espectro de la señal. Dispersión de amplitud. Interferencia entre símbolos (ISI). 	<ul style="list-style-type: none"> Diagrama del ojo. BER. Factor Q. Espectro óptico. 	<ul style="list-style-type: none"> Disminuyendo la potencia del canal. Aumentando la longitud de onda de la señal. Aumentando el área efectiva de la fibra. Aumentando la dispersión de la fibra. Disminuyendo la velocidad de transmisión. 	[7], [8], [26], [27]
XPM	<ul style="list-style-type: none"> Efecto Kerr: índice de refracción dependiente de la intensidad 	<ul style="list-style-type: none"> Potencia de transmisión. Tipo de fibra (área efectiva, dispersión, coeficiente de índice no lineal, longitud efectiva). Número de canales. Velocidad de transmisión. Espaciamiento entre canales. 	<ul style="list-style-type: none"> Cambio de amplitud. Interferencia entre símbolos (ISI). Ensanchamiento del espectro de la señal. 	<ul style="list-style-type: none"> Diagrama del ojo. BER. Factor Q. Espectro óptico 	<ul style="list-style-type: none"> Disminuyendo la potencia de transmisión. Aumentando el área efectiva de la fibra. Aumentando la dispersión de la fibra. Disminuyendo número de canales. Aumento de la velocidad de transmisión. Aumentando la separación de los canales. 	[7], [8], [10], [26], [27]
FWM	<ul style="list-style-type: none"> Interacción múltiple de fotones. 	<ul style="list-style-type: none"> Potencia de transmisión. Número de canales. Tipo de fibra (área efectiva, dispersión, coeficiente de índice no lineal, longitud efectiva). Espaciamiento entre canales. 	<ul style="list-style-type: none"> Generación de componentes FWM Atenuación en la potencia de los canales existentes. 	<ul style="list-style-type: none"> Diagrama del ojo. BER. Factor Q. Espectro óptico 	<ul style="list-style-type: none"> Disminuir la potencia de transmisión. Disminuyendo número de canales Aumentando la dispersión cromática. Aumentando la separación entre canales. 	[7], [8], [14], [26], [28]
IFWM-IXPM	<ul style="list-style-type: none"> Origen similar a FWM y XPM. 	<ul style="list-style-type: none"> Tipo de fibra (área efectiva, dispersión, coeficiente de índice no lineal, longitud efectiva). Velocidad de transmisión. Formato de modulación. 	<ul style="list-style-type: none"> Generación de pulsos fantasmas. Cambio de frecuencia. 	<ul style="list-style-type: none"> Diagrama del ojo. Espectro óptico. 	<ul style="list-style-type: none"> Disminuir la dispersión de la fibra. Disminuir la velocidad de transmisión. 	[8], [10]
SBS	<ul style="list-style-type: none"> Interacción fonon-fonones acústicos 	<ul style="list-style-type: none"> Potencia del canal. Longitud de onda. Tipo de fibra (área efectiva, dispersión, coeficiente de índice no lineal, longitud efectiva). Separación entre canales. Ancho de línea de la señal. 	<ul style="list-style-type: none"> Limita la cantidad de luz que puede transmitirse a través de un trayecto de fibra. Incremento de BER. Inestabilidad en la señal. Diafonía. 	<ul style="list-style-type: none"> BER Espectro óptico. 	<ul style="list-style-type: none"> Utilizando una potencia de señal inferior a la potencia umbral. Aumentando el área efectiva de la fibra. Ancho espectral de la fuente mayor que el ancho de banda Brillouin. Uso de aisladores. 	[7], [26-28]
SRS	<ul style="list-style-type: none"> Interacción fonon-fonones ópticos. 	<ul style="list-style-type: none"> Potencia de transmisión. Tipo de fibra (área efectiva, dispersión, coeficiente de índice no lineal, longitud efectiva). Número de canales. Separación entre canales. 	<ul style="list-style-type: none"> Perdidas en la potencia de la señal. Crosstalk óptico en sistemas WDM. 	<ul style="list-style-type: none"> BER Espectro óptico. 	<ul style="list-style-type: none"> Utilizando una potencia de señal inferior a la potencia umbral. Aumentando el área efectiva de la fibra. Aumentando Dispersión cromática Disminuyendo el número de canales. Disminuyendo la separación entre canales. 	[8], [26, 27]

Capítulo 2. Metodología de simulación

Con el desarrollo del presente capítulo, se pretende obtener un escenario de simulación, que permitirá generar los diferentes casos de estudio, para cada uno de los efectos no lineales más relevantes escogidos para el desarrollo del proyecto. Para desarrollar la simulación se utilizará la herramienta OptSim® de Rsoft en la cual se plasmarán las características de este escenario y posteriormente se analizará el comportamiento de cada caso de estudio, tomando las herramientas que brinda el modelo de referencia OPM definidas en el Capítulo 1.

Una metodología de simulación es necesaria para llevar a cabo la abstracción del escenario de simulación e implementarlo en una herramienta (OptSim®), de esta manera se pueden generar los diferentes casos de estudio, para así evaluar el desempeño de una red WDM al variar ciertos parámetros de transmisión, teniendo en cuenta los parámetros de monitoreo óptico del modelo de referencia OPM.

Para definir la metodología de simulación, se tienen en cuenta los documentos “Introducción a los Simuladores” del Manual de OPNET [29], “Análisis de Desempeño de Formatos de Modulación en Comunicaciones Ópticas sobre Redes WDM” [30] y “Simulación Digital” [31].

Las etapas de la metodología de simulación que se va a utilizar en este trabajo de grado teniendo en cuenta las referencias anteriormente citadas son:

- Formulación del problema.
- Especificación de las características y elección del modo de operación de la herramienta de simulación.
- Generación y definición de las características del escenario de simulación.
- Plan de evaluación y pruebas.

2.1 Formulación del Problema

El objetivo a nivel de simulación es analizar el desempeño de una red WDM frente a variaciones en los parámetros de transmisión y verificar el impacto de los efectos no lineales en este tipo de redes, para lo cual fue necesaria una investigación previa que se realizó de la siguiente manera.

- Análisis de los efectos no lineales: donde se determinó que los efectos no lineales a ser analizados son: SPM, XPM, FWM, ya que son los efectos no lineales que causan degradaciones significativas en las redes WDM.
- Definición de los principales parámetros de transmisión de una red WDM: donde se definieron los parámetros que impactan los efectos no lineales y por consiguiente el desempeño de una red WDM, tabla 1.2.
- Definición de los parámetros de monitoreo óptico: donde se definieron los parámetros que servirán como medida para determinar el desempeño de una red WDM que ha sido afectada por los efectos no lineales, tabla 1.2.

2.2 Herramienta de Simulación

La herramienta de simulación con la que cuenta la Universidad de Cauca para este tipo de proyectos y que va a ser usada es OptSim® de Rsoft. Este software está disponible comercialmente desde 1998 y es usado por destacados ingenieros tanto en la academia como en la industria [32].

OptSim® es un avanzado sistema de simulación que puede ser usado en el diseño de sistemas de comunicación óptica, incluye los más avanzados modelos de componentes flexibles y algoritmos de simulación, que proveen el mejor balance entre exactitud y tiempo. OptSim® es una herramienta ampliamente validada, demostrando fiabilidad en sistemas WDM de gran número de canales, además de poseer una gran base instalada en organizaciones de investigación e industrias [33, 34].

Esta herramienta puede ser utilizada para un amplio rango de aplicaciones ente las cuales se resalta la de análisis de las perdidas en la transmisión y medidas correctivas (efectos de SPM, XPM, FWM...). OptSim® cuenta con modelos de fibra óptica flexibles que permiten al usuario definir dependencias en función de la longitud de onda para parámetros de atenuación, dispersión, perfiles de ganancia de Raman y espectros de bombas de Raman. Estos modelos permiten una completa simulación de los fenómenos lineales, no lineales y relativos a la polarización. Los diferentes efectos incluidos FWM, SPM, XPM, PMD, dispersión Raman, dispersión óptica y atenuación, pueden ser considerados individualmente, o no, para la simulación [33].

OptSim® representa un sistema de comunicaciones ópticas como una interconexión de bloques, cada bloque representa un componente o un subsistema. La señal se pasa de componente a componente como en la vida real y cada bloque es simulado independientemente (usando los parámetros específicos de ese bloque), conocida como metodología de simulación orientada a bloques.

La herramienta de simulación, en el documento “User Guide” [34] define dos modos de simulación en los cuales opera y que dependen del tipo de resultado que se desee obtener.

- **Simulación modo bloque**

La señal de datos pasa entre componentes representando todo el tiempo de simulación en un bloque de datos. La ventaja de este enfoque es que los modelos de los componentes y algoritmos pueden trabajar fácilmente con toda la señal, transformándola entre el dominio del tiempo y de la frecuencia para operar los datos en el dominio más conveniente para el algoritmo de simulación [35].

- **Simulación modo muestra**

En la simulación modo muestra, un componente pasará una nueva muestra de datos a otro en cada paso de tiempo de la simulación, de tal forma que la señal de datos pasa entre componentes y representa una muestra única en cada instante de tiempo.

Una de las ventajas de este modo es que la simulación puede ser realizada durante una cantidad ilimitada de tiempo. El procesamiento de la señal, en este modo, se realiza completamente en el dominio del tiempo. El modo muestra también provee 2 tipos de simulación: una Técnica de Propagación Espectral (SPT – Spectral Propagation Technique) que lleva a cabo simulaciones rápidas del espectro óptico incluido el ruido ASF, amplificaciones ópticas y filtrado óptico; y Simulación de Ancho de Banda Variable (VBS – Variable Bandwidth Simulation Technique) que se lleva a cabo totalmente en el dominio del tiempo, con la opción de incluir todos los efectos, con o sin ruido, en una simulación lineal o no lineal [34, 35].

El método del Paso Dividido de Fourier (Split Step Fourier) es usado por la mayoría de los simuladores comerciales, como es el caso de OptSim®, para resolver ecuaciones diferenciales parciales no lineales como la ecuación No Lineal de Schrödinger. El nombre de este método se debe a que primero se tratan las partes lineales y no lineales de la ecuación por separado, y luego es necesaria una transformada de Fourier ya que las partes se trabajan en dominios diferentes (tiempo y frecuencia). Este método es usado en la propagación de pulsos de campo óptico en fibras ópticas debido a la interacción entre los mecanismos lineales y no lineales hace difícil encontrar una solución analítica general. Este método puede trabajar en el dominio del tiempo (TDSS) o de la frecuencia (FDSS). El primer método es fácil de implementar, pero puede producir graves errores durante el cálculo. En el caso de OptSim® se trabaja en el dominio del tiempo ya que este está libre de errores Aliasing y límites de modelado [34, 35].

Para el desarrollo de este trabajo de grado se elige el modo muestra ya que brinda resultados más confiables gracias a los algoritmos que implementa para simular la propagación de la luz a través de la fibra.

La herramienta de simulación cuenta con valores pre definidos para la fibra SMF-28 de Corning dentro de los cuales se destacan:

- Atenuación: 0.23 dB/km
- Dispersión: 16 ps/nm/km
- Área efectiva: 85 μm^2
- Coeficiente de no linealidad: $1.19 \frac{1}{W \text{ km}}$

2.3 Generación y Definición de Características del Escenario de Simulación.

En esta sección se procede a desarrollar un escenario de simulación que reúna las principales características de una red WDM, esta red debe contar con parámetros variables que permitan controlar la dependencia de estos efectos no lineales con el fin de visualizar, a través de los parámetros ópticos de medida, su impacto en el comportamiento del sistema y rendimiento del mismo. Esto con el fin de evaluar y analizar el efecto conjunto de los principales parámetros de transmisión que impactan los efectos no lineales. La caracterización de este escenario se fundamenta en:

1. Topología punto a punto para simplificar el esquema de la red WDM.
2. Esquema modular de red WDM (especificado en la sección 1.1).

3. Tecnología WDM unidireccional.
4. Velocidad de transmisión 10 y 40 Gb/, ya que son las velocidades a las cuales la mayoría de las empresas de telecomunicaciones están migrando sus servicios, con el fin de aprovechar al máximo los recursos que brinda la fibra óptica.
5. Se utiliza la tercera ventana de operación, más específicamente la banda C, comúnmente usada en sistemas WDM ya que en esta ventana se tienen bajos coeficientes atenuación en este tipo de fibras [7].
6. Tipo de fibra. Se utilizará la fibra SMF-28 de Corning [36], la cual es una de las más utilizadas a nivel comercial y que se rige por la recomendación ITU-T G.652 [37].
7. Número de canales (4). El número de canales impacta en mayor medida el efecto no lineal FWM, tomando cuatro canales es posible observar y analizar el impacto de este efecto en el sistema WDM. Además, se toma en cuenta la tabla 1.1 en la que se observa que para un número elevado de canales se genera un gran número de componentes adyacentes que son de difícil detección ya que estas se incrementan de forma casi exponencial con el número de canales.
8. Espaciamiento entre canales de 200, 100 y 50 Ghz, según la recomendación ITU-T G.694.1 [38].
9. Formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-DPSK, ya que el primero es uno de los formatos de modulación más implementado en las redes debido a su simplicidad y bajo costo, y el segundo debido a que es un formato que presenta mayor robustez frente a las degradaciones no lineales.
10. La potencia de transmisión es variable con el fin de poder determinar el impacto de los efectos no lineales. para 10 Gb/s o 40 Gb/s el valor de la potencia máxima podría ser tomado de la recomendación ITU-T G.691 [39] y algunos equipos comerciales. Sin embargo, debido a que el objetivo de este trabajo de grado es observar la incidencia de la variación de parámetros como este en los efectos no lineales, los niveles máximos de potencia establecidos por la recomendación y en los equipos serán superados con el fin de observar con claridad el impacto de esta variación.

Según la recomendación ITU-T G.694.1 [38], las Frecuencias (en Thz) centrales nominales para sistemas WDM para espaciamientos de 50 y 100 se definen de la siguiente manera:

- Espaciamientos de canales de 50 GHz:

$193,1 + n \times 0,05$, donde n es un entero positivo o negativo incluido el 0.

- Espaciamientos de canales de 100 GHz :

$193,1 + n \times 0,1$, donde n es un entero positivo o negativo incluido el 0.

Tabla 2.1. Ejemplo de frecuencias centrales nominales del plan con DWDM para 50 y 100 Ghz de espaciamiento [37].

Frecuencias centrales nominales (THz) para espaciamientos de		Longitudes de ondas centrales nominales (nm) aproximadas
50 Ghz	100 Ghz	
195,90	195,9	1530,33
195,85	-	1530,72
195,80	195,8	1531,12
195,75	-	1531,51
195,70	195,7	1531,90
193,20	193,2	1551,72
193,15	-	1552,12
193,10	193,1	1552,52
193,05	-	1552,93
193,00	193,0	1553,33
184,75	-	1622,69
184,70	184,7	1623,13
184,65	-	1623,57
184,60	184,6	1624,01
184,55	-	1624,45
184,50	184,50	1624,89

Teniendo en cuenta el plan de frecuencia de la recomendación ITU-T G.694.1 y algunos equipos comerciales, los cuales trabajan se opta por trabajar en las siguientes longitudes de onda:

- Canal 1: 1550.12 nm
- Canal 2: 1549.32 nm
- Canal 3: 1548.52 nm
- Canal 4: 1547.12 nm

Después de revisar los parámetros de una red WDM que impactan los parámetros no lineales, definir el número de canales, definir los principales formatos de modulación, revisar los estándares de la ITU-T concernientes a WDM; se procede a realizar la tabla 2.2 en la cual se resumen las características generales y un esquema, figura 2.1, del escenario de simulación.

Tabla 2.2. Características y parámetros más relevantes del escenario de simulación.

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
PARÁMETRO	VALORES
Tecnología de Red	WDM unidireccional
Velocidad del Sistema	10 y 40 Gb/s
Banda	Banda C (1530-1560 nm)
Ventana	Al rededor de 1550 nm
Estándar Utilizado	G.652
Tipo de Fibra	Corning SMF-28
Atenuación para 1550nm	0.23 dB/km
Coefficiente de Dispersión 1550nm	16 ps/nm/km
Espaciamiento de los canales DWDM	50 GHz (0.4 nm), 100 GHz (0.8 nm), 200 GHz (1.6nm)
Número de canales implementados	4 canales
CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR	
Formato de modulación	NRZ-OOK y RZ-DPSK
Tipo de modulación	Externa con Mach-Zenhder
Potencia de Tx del Láser	0 a 35 dBm
Filtros ópticos en el Tx	Filtros Bessel
Frecuencias centrales nominales	Según recomendación ITU-T G.694.1 y equipos comerciales.
CARACTERÍSTICAS DEL RECEPTOR	
Sensibilidad del receptor	-32 dBm
BER	$1e^{-15}$
Filtros de Recepción ópticos	Filtro Bessel y Coseno Rizado

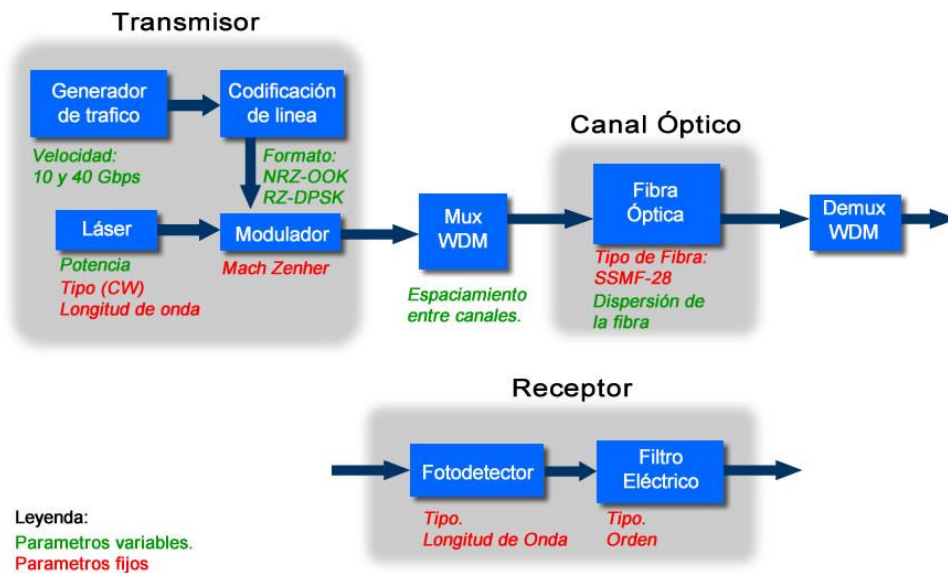


Figura 2.1. Esquema del escenario de simulación.

Para analizar el comportamiento de los efectos no lineales se tiene el esquema del escenario de simulación, figura 2.1, el cual va a tener diferentes configuraciones, que presentan algunos parámetros fijos y otros variables de donde se desprenden los casos de estudio a ser implementados en el desarrollo de Capítulo 3.

La tabla 2.1 presenta los diferentes casos de estudio, con los parámetros fijos y variables que se van a tener en cuenta para cada uno de los efectos no lineales a ser analizados. Con base en estos casos de estudio se llevarán a cabo las simulaciones que permitan determinar de forma clara y precisa el impacto de las no linealidades sobre el sistema.

Tabla 2.3. Casos de estudio.

		Caso de Estudio 1	Caso de Estudio 2	Caso de Estudio 3	Caso de Estudio 4
Parámetros Fijos	Formato de modulación	NRZ-OOK	NRZ-OOK	RZ-DPSK	RZ-DPSK
	Velocidad de transmisión	10 Gb/s	40 Gb/s	10 Gb/s	40 Gb/s
	Número de Canales	4	4	4	4
	Tipo de Fibra	SMF-28	SMF-28	SMF-28	SMF-28
Parámetros variables dependiendo del efecto no lineal	SPM	Potencia de transmisión Coeficiente de dispersión			
	XPM	Potencia de transmisión Espaciamiento entre canales Coeficiente de dispersión de la fibra			
	FWM	Potencia de transmisión Espaciamiento entre canales Coeficiente de dispersión de la fibra			

2.4 Plan de evaluación y pruebas

A continuación se detalla el plan de evaluación y pruebas a seguir, en el cual se plasma el escenario de simulación planteado en la sección 2.3 mediante la herramienta de simulación OptSim® de rsoft, para a través de los diferentes casos de estudio anteriormente enunciados verificar los principales parámetros de transmisión que impactan los efectos no lineales.

- Se analiza el comportamiento del escenario de simulación con valores típicos en los parámetros de transmisión de una red WDM, para observar el funcionamiento del sistema.
- Se analiza el comportamiento del sistema según el caso de estudio correspondiente, en las cuales se tienen parámetros fijos como formato de modulación, velocidad de transmisión, número de canales, tipo de fibra y otros parámetros variables concernientes a cada efecto no lineal, para así verificar el impacto de dichas variaciones en el rendimiento del sistema.

Lo expuesto anteriormente en el plan de evaluación y pruebas se lleva a cabo mediante el diagrama de la figura 2.2, en el que se explica el proceso de simulación a seguir para cada una de las configuraciones concernientes a la variación de los parámetros de transmisión de una red WDM y su impacto en los efectos no lineales.

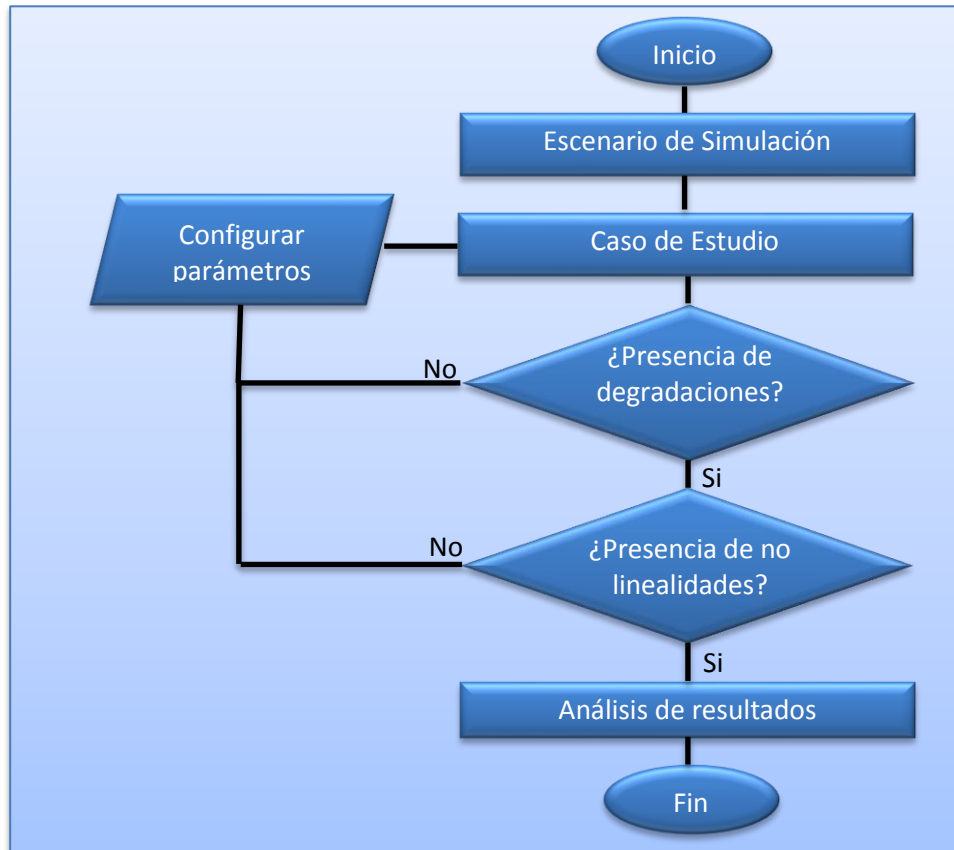


Figura 2.2. Diagrama de flujo para el escenario de simulación.

El análisis de los resultados del plan de evaluación y pruebas descrito anteriormente en los numerales 1 y 2, se determina tomando en cuenta los parámetros de desempeño mínimos de una red comercial y las herramientas de medida que nos brinda OPM, como:

- Estimación de BER: $\leq 10e-9$ (teórico), tomado de $1e-15$.
- Factor Q: 15 dB (teórico), tomado de 18 dB.
- Mínima sensibilidad del receptor -32 dBm.

En este capítulo se obtuvo un escenario de simulación el cual puede ser implementado en la herramienta OptSim® de Rsoft. A partir de esto se generaron los diferentes casos de estudio los cuales permitirán analizar el impacto de los efectos no lineales para determinadas características en el sistema.

En el siguiente capítulo se analiza mediante la herramienta de simulación OptSim® de Rsoft el comportamiento del sistema para los diferentes casos de estudio y se evalúa el impacto de las no linealidades en cada uno de ellos.

Capítulo 3. Escenario de Simulación y sus Casos de Estudio

Tomando el escenario de simulación y los casos de estudio obtenidos, donde se especifican los principales parámetros de transmisión que impactan los efectos no lineales. En el presente capítulo se realizan una serie de pruebas en las que se evalúa el desempeño del sistema frente a la variación de los diferentes parámetros de transmisión definidos para cada uno de los casos de estudio.

3.1 Caso de estudio 1, formato de modulación NRZ-OOK y velocidad de transmisión de 10 Gb/s.

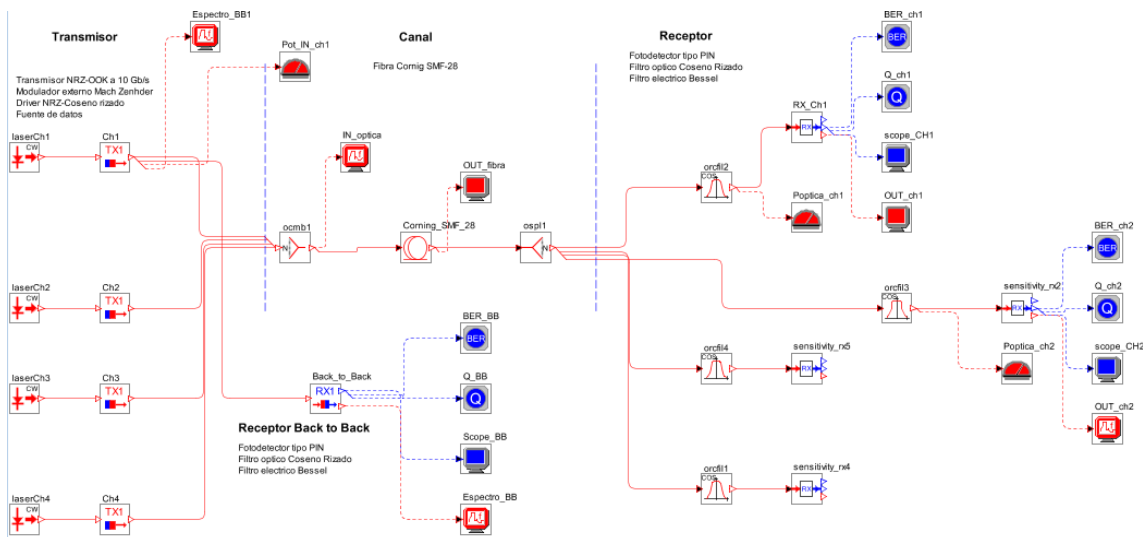


Figura 3.1. Escenario de simulación para el formato de modulación NRZ-OOK y velocidad de transmisión de 10 Gb/s.

En la figura 3.1 esta implementado el sistema para el formato de modulación NRZ-OOK, en el cual su transmisor consta de un driver NRZ coseno rizado, un láser de modulación externa y un modulador MZ de seno cuadrado, en la sección del receptor solo se requiere un filtro eléctrico y óptico centrado a la frecuencia de trabajo y un receptor con una sensibilidad aceptable (-32 dBm).

A continuación se muestra la señal de entrada a una velocidad de transmisión de 10 Gb/s y formato de modulación NRZ-OOK, tomada en el receptor Back to Back, figura 3.2, con el fin de establecer una comparación entre la señal a la entrada del sistema y su comportamiento al final del enlace.

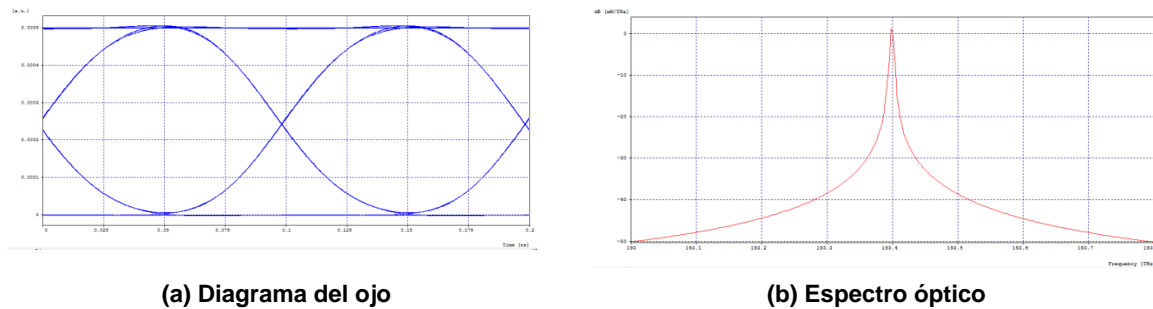


Figura 3.2. (a) Diagrama del ojo y (b) Espectro óptico en el receptor Back to back.

Tanto para el diagrama del ojo como para el espectro óptico la señal de entrada medida en el receptor back to back no presenta degradaciones significativas, figura 3.2.

Para llevar a cabo la comparación entre la señal de entrada y la señal al final del enlace, se procede a encontrar la distancia máxima en la que el sistema cuenta con los valores aceptables en los factores de calidad BER=1e-15, factor Q=18 dB, sensibilidad del receptor = -32 dBm.

- **Distancia máxima que alcanza el sistema configurado con los parámetros típicos de transmisión para velocidad de transmisión de 10 Gb/s y modulación NRZ-OOK**

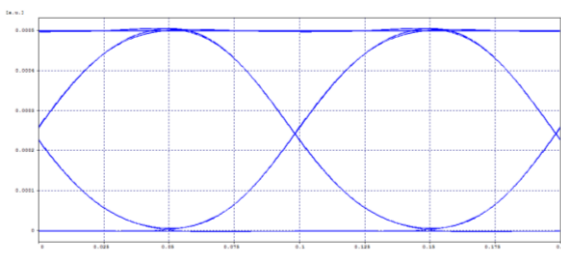
Para determinar la distancia máxima en la que el sistema cuenta con los valores aceptables en los parámetros de calidad, se configura el sistema con valores típicos en los parámetros de transmisión, los cuales son: 4 canales, espaciamiento entre canales de 100 Ghz, potencia de transmisión de 0 dBm por canal, formato de modulación NRZ-OOK y se varia la distancia del enlace, posteriormente se llevan a cabo diferentes medidas sobre el canal a 1550,12 nm y se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 3.1. Distancia Máxima que se alcanza a una potencia de 0 dBm, espaciamiento entre canales de 100 Ghz y velocidad de transmisión de 10 Gb/s con el formato de modulación NRZ-OOK.

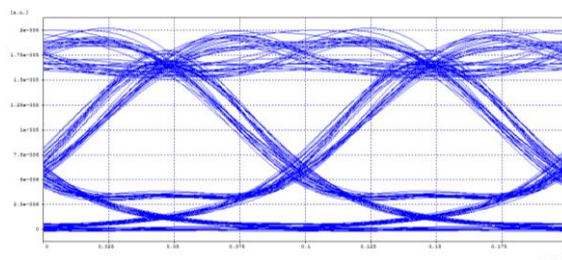
Potencia de transmisión [dBm]	Distancia máxima [km] para un BER=1e-15	Distancia máxima [km] para un factor Q=18 dB	Potencia en recepción [dBm]
0	78,21	77,92	-20,82

Para una potencia de transmisión de 0 dBm en los cuatro canales y una separación entre canales de 0.8 nm, se alcanza una distancia máxima de aproximadamente 78 km manteniendo los valores de los parámetros de calidad definidos anteriormente, tabla 3.1.

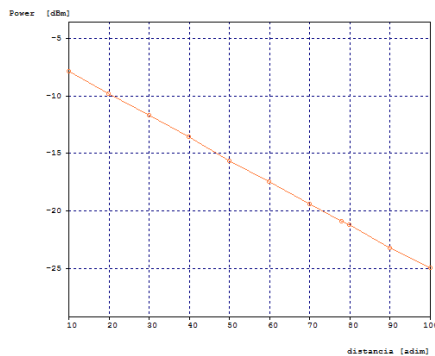
A continuación se muestra el comportamiento del sistema, medido en el receptor back to back y a una distancia de 78 km, distancia en la cual se evidencian ciertas degradaciones, figura 3.3 (a), (b), (f). También se observa la degradación generada en el sistema al incrementar la distancia del enlace figura 3.3 (c), (d), (e).



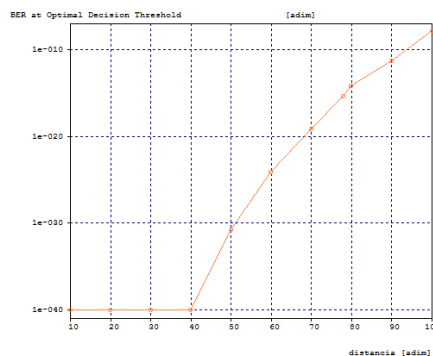
(a) Diagrama del ojo en el receptor Back to Back.



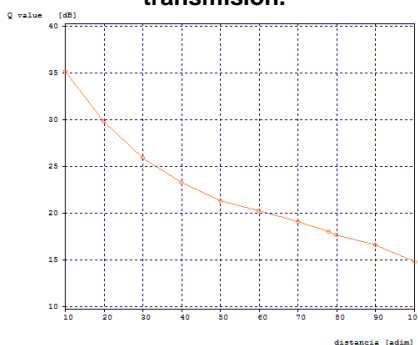
(b) Diagrama del ojo a una distancia de 78 Km.



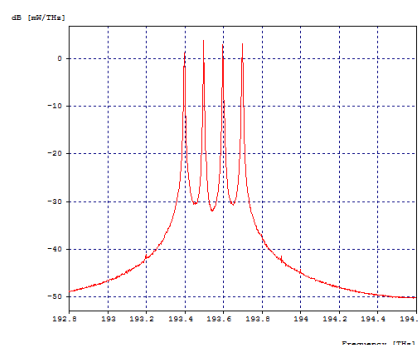
(c) Potencia en recepción vs Distancia de transmisión.



(d) BER vs Distancia de transmisión.



(e) Factor Q vs Distancia de transmisión.



(f) Espectro óptico en recepción a una distancia de 78 Km.

Figura 3.3. Diagramas de correlación y de ojo para el canal a 1550.12 nm, receptor back to back y distancia 78 km, 0 dBm de potencia en los cuatro canales.

3.1.1 Análisis del efecto no lineal SPM.

Para el análisis del efecto no lineal SPM se monitorea un solo canal (1550.12 nm), y se configura el sistema con un espaciado considerable entre canales (200 GHz), se dejan constantes las potencias de transmisión de los 3 canales restantes a una potencia de 0 dBm con el fin de evitar la presencia de otros efectos no lineales como FWM o XPM sobre este canal.

Se aísla el efecto no lineal SPM para observar su impacto en un solo canal, debido a que este produce un efecto de auto modulación de fase, el cual no depende del número de canales que tenga el sistema ni de la separación entre ellos.

Para este análisis se evalúa el comportamiento de los factores de calidad del canal a diferentes potencias de transmisión, con el fin de encontrar las distancias máximas que se pueden alcanzar sin sobrepasar dichos límites establecidos en la sección 2.4, esto se hace ya que la potencia de transmisión es uno de los parámetros de transmisión más influyentes en el impacto de los efectos no lineales en los sistemas de comunicaciones ópticas, causando importantes limitaciones en su diseño.

Para llevar a cabo estas mediciones se evaluaron los parámetros de calidad, BER Y Factor Q dejando fijas las diferentes potencias de transmisión (5, 10, 15, 20 y 25 dBm) y variando la longitud del enlace de 10 km hasta 100 km, con incrementos de 10 km, en una fibra Corning SMF 28 la cual viene predefinida en el simulador y cuenta con diversos parámetros intrínsecos de este tipo de fibra, como coeficiente de dispersión, pérdidas, área efectiva, coeficiente de no linealidad, entre otros.

Tabla 3.2. Distancia máxima que se alcanza a diferentes potencias de transmisión a una velocidad de 10 Gb/s, con el formato de modulación NRZ-OOK.

Potencia en transmisión [dBm]	Distancia máxima [km] para un BER=1e-15	Distancia máxima [km] para un factor Q=18 dB
0	78,21	77,92
5	77,71	78,71
10	79,08	80,09
15	77,83	80,81
20	54,32	54,69
25	61,63	61,17

A medida que se incrementa la potencia de transmisión, la distancia en la que se obtienen los niveles aceptables de calidad también aumenta, pero después de superar un nivel de potencia, la distancia disminuye considerablemente, llegando a una distancia aproximada de 80 km para una potencia de 10 dBm, comparado con los 61 Km a una potencia de entrada de 25 dBm, tabla 3.2.

Para determinar el valor de potencia donde SPM comienza a generar degradaciones considerables se lleva a cabo una prueba donde se varía la potencia de transmisión de 5 dBm a 30 dBm y se configura una distancia constante de 78 Km, la cual es la distancia en la que el sistema mantiene los parámetros de calidad definidos en la sección 2.4, cuando es configurado con los parámetros típicos de transmisión.

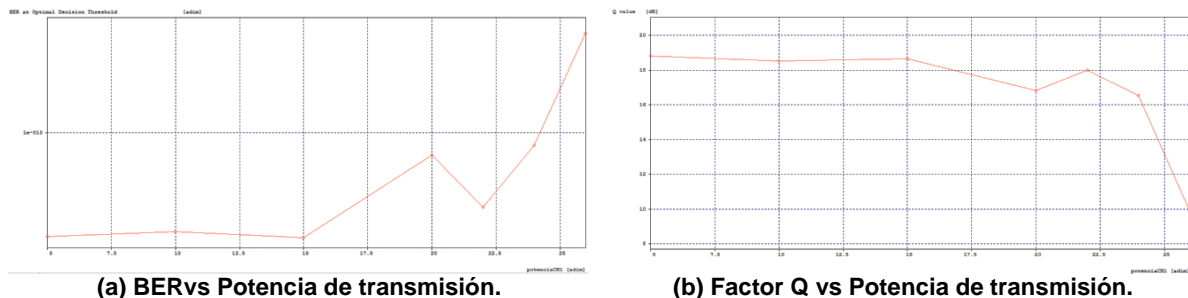


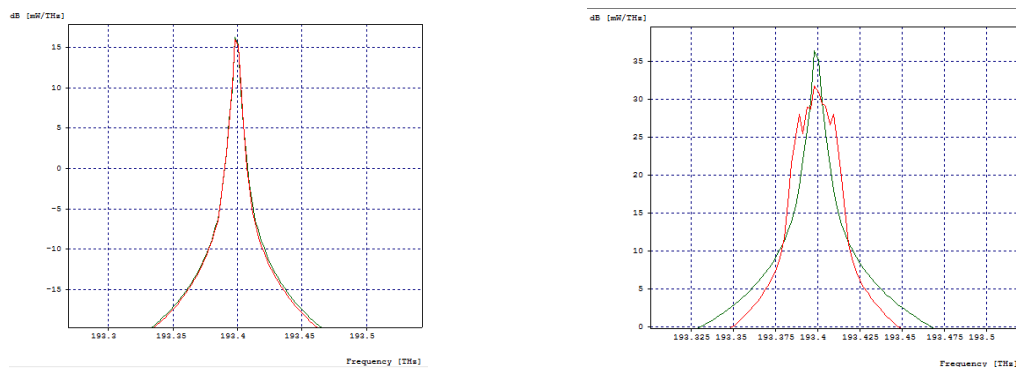
Figura 3.4. Diagramas de correlación (a) BER vs Potencia de transmisión, (b) Factor Q vs Potencia de transmisión, para distancia 78 km, variando potencia de transmisión.

Tabla 3.3. Valor de potencia donde SPM empieza a generar degradaciones considerables, para una distancia de 78 km

Distancia [km]	Potencia en dBm para un BER=1e-15	Potencia en dBm para un factor Q=18 dB
78	18,29	18,25

El límite de potencia en el que se obtienen los niveles aceptables de calidad a la velocidad de 10 Gb/s con el formato de modulación NRZ-OOK es aproximadamente 18 dBm, figuras 3.4 (a), 3.4 (b) y tabla 3.3.

Con el fin de observar el ensanchamiento de la señal causado por el efecto no lineal SPM en el espectro óptico, se apagan las pérdidas de la fibra para que las señales de entrada y salida se muestren a un nivel similar de potencia.



(a) Espectro óptico con potencia de entrada de 0 dBm. (b) Espectro óptico con potencia de entrada de 20 dBm.

Figura 3.5. Espectros ópticos de entrada y salida para potencias de transmisión de a) 0 dBm y b) 20 dBm y distancia 78 km.

Las figuras 3.5 (a) y 3.5 (b) son tomadas a los niveles de potencia de 0 dBm y 20 dBm respectivamente y a una distancia de 78 km, para cada una de ellas la señal de entrada es de color verde y la señal en recepción es la señal de color rojo, en estas se puede observar como al incrementar la potencia de transmisión se presenta un mayor ensanchamiento de la señal enviada, de esta forma se observa la presencia del efecto no lineal SPM y se comprueba la fuerte dependencia de su impacto a medida que se incrementa la potencia de transmisión.

Un parámetro de transmisión que influye en el impacto que SPM genera en el sistema, es el Coeficiente de Dispersión (CD) de la fibra, ya que si el $CD > 0$ (régimen de dispersión anómalo), SPM reduce el ensanchamiento que se genera debido a la dispersión ya que tienen signos opuestos, pero si $CD < 0$ (régimen de dispersión normal), se genera un mayor ensanchamiento de la señal debido a SPM y a la dispersión de la fibra [10]. Esta prueba se realiza solo con el fin de mostrar el impacto que se genera en el sistema al variar este parámetro de transmisión, ya que la fibra Corning SMF 28 tiene una dispersión de 16 ps/nm/km. Para esto se envía una señal en un enlace de 78 km con una potencia de 20 dBm, la cual es considerable para que haya presencia de SPM y se varía el parámetro dispersión de la fibra entre -10 ps/nm/km y 16 ps/nm/km.

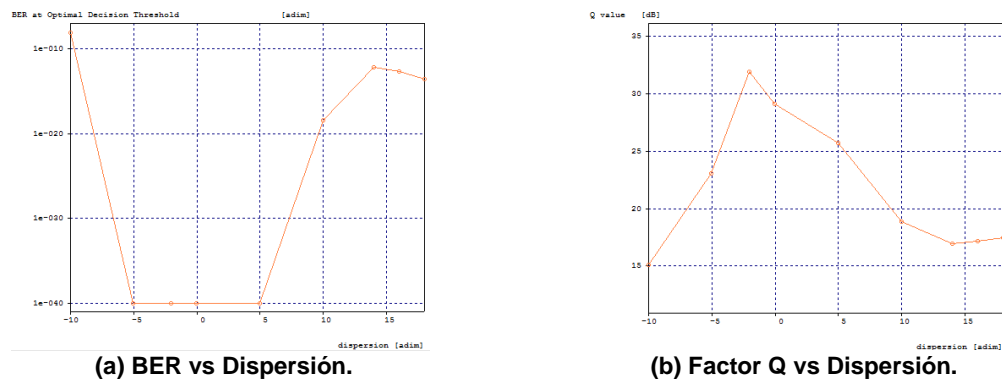


Figura 3.6. Diagramas de correlación a) BER vs Dispersión, b) Factor Q vs Dispersión, distancia 78 km, potencia 20 dBm.

El valor de dispersión que más favorece la transmisión es -2 ps/nm/km ya que se obtienen los valores más altos de calidad y en el que se tienen las condiciones menos favorables es -10 ps/nm/km, figuras 3.6 (a) y 3.6 (b), a continuación se compara el espectro de la señal para valores de dispersión de 2 ps/nm/km y 14 ps/nm/km, ya que un valor de -10 ps/nm/km no es un valor que se encuentre en fibras comerciales.

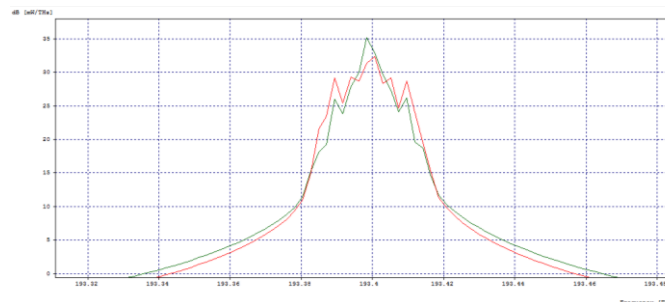


Figura 3.7. Espectro de señal para una $CD=-2$ (verde) y $CD=14$ (rojo), potencia de transmisión 20 dBm, distancia 78 km.

En la figura 3.7 se tiene la señal de salida con una dispersión de -2 ps/nm/km (color verde) y una señal de salida con dispersión de 14 ps/nm/km (color rojo), se puede observar que con un valor de dispersión de -2 ps/nm/km, se reduce el ensanchamiento debido al efecto no lineal SPM.

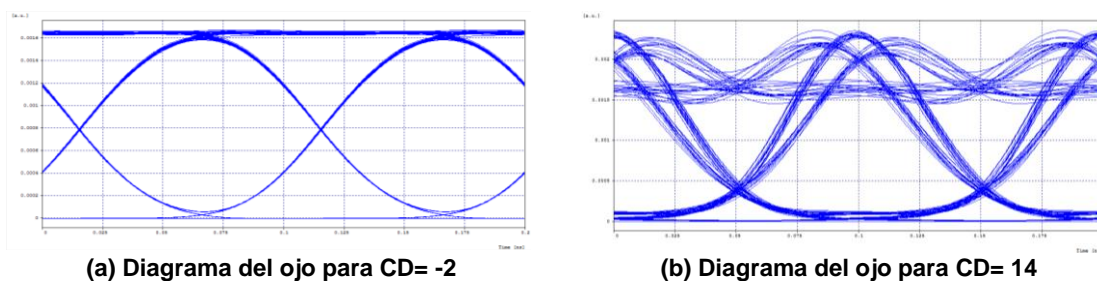


Figura 3.8. Diagramas de ojo para a) $CD=-10$ y b) $CD=5$, distancia 78 km, potencia 20 dBm.

El parámetro de transmisión dispersión cromática influye en el comportamiento del efecto no lineal SPM, y se observa como mejora el comportamiento del sistema con valores específicos en este parámetro de transmisión, figuras 3.8 (a) y 3.8 (b).

3.1.2 Análisis del efecto no lineal XPM.

Para XPM se toma el escenario de simulación y se realizan variaciones sobre la potencia de transmisión del canal 2, esto con el fin de observar las degradaciones que se presentan debido a XPM sobre el canal 1. El canal 2 actúa como un canal de “bombeo” [40] que es necesario para poder determinar el impacto de XPM sobre el sistema. La configuración utilizada para este caso de estudio se muestra en la figura 3.1, el cual cuenta con cuatro canales transmitiendo a 10 Gb/s con el formato de modulación NRZ-OOK, con un espaciamiento entre canales de 100 Ghz.

De la ecuación 1.9, sección 1.3.2, se observa que el ensanchamiento debido a XPM se produce por la incidencia de otro canal que se transmite a través de la fibra, además, que los efectos de SPM y XPM van a estar ligados en el sistema, y no es posible aislar uno del otro ya que son de naturaleza muy similares, con la diferencia de que XPM se presenta por efecto de altas potencias en canales adyacentes. Sin embargo, al mantener la potencia fija sobre el canal de estudio, canal 1 a 1550.12 nm, se evita que sobre este se genere SPM contrario a lo que sucede en el canal 2, a 1549.32 nm, donde los altos valores de potencia hacen que se genere SPM como se ha demostrado para el caso de estudio 1 para SPM. La potencia del canal 1 se deja fija, para observar los impactos que se presenten sobre este canal al realizar variaciones en la potencia del otro canal (canal de bombeo), ya que aunque este canal no se modifique puede que presente degradaciones debido a la no linealidad de la fibra. De este modo, el canal 1 se deja fijo con una potencia de 0 dBm mientras se realizan variaciones en el canal 2. Sobre el canal 1 se deben observar las degradaciones y el ensanchamiento del pulso debido a XPM. Para esta prueba se toma la distancia máxima del escenario (78 km), la cual se obtuvo en las pruebas transmitiendo a 0 dBm, con el fin de determinar el impacto de las variaciones de potencia en canales adyacentes que generen XPM, tabla 3.4. Además, como no se realizan variaciones de potencia sobre el canal 1, este no podrá alcanzar una distancia superior a la anteriormente definida.

Tabla 3.4. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1, manteniendo la potencia constante, para diferentes valores de potencia del canal 2.

Potencia de transmisión del canal 2 [dBm]	Distancia máxima [km] para un BER=1e-15	Distancia máxima [km] para un factor Q=18 dB
0	77,73	78,18
5	77,46	78,54
10	74,95	77,03
15	52,75	52,38
20	45,30	45,32
25	36,88	35,69

La tabla anterior permite determinar que el canal 1 comienza a degradarse para potencias superiores a 10 dBm en el canal de bombeo (canal 2) debido a XPM. Esto hace que la distancia máxima alcanzada se reduzca de aproximadamente 75 km, para 10 dBm, a 52 km aproximadamente para 15 dBm.

La figura 3.9 presenta los diagramas de correlación entre potencia y los parámetros ópticos de medida BER y factor Q, donde la potencia sobre el canal medido (canal 1) permanece constante en 0 dBm mientras se realizan variaciones de potencia en el canal 2.

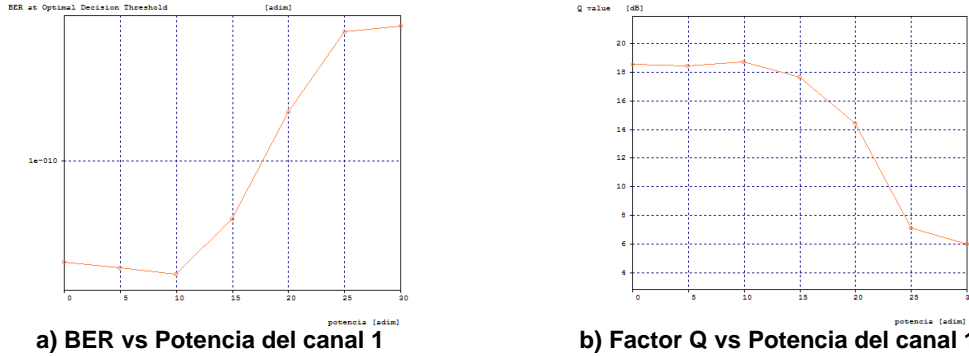


Figura 3.9. Parámetros ópticos de medida del canal 1, para diferentes valores en la potencia de transmisión del canal 2 con una distancia de 78 km.

A través de estos diagramas de correlación se determina que la potencia máxima con la cual se puede transmitir a 78 km es de 12,86 dBm, tabla 3.5. A partir de dicha potencia, los parámetros ópticos de medidas se degradan por debajo de los niveles mínimos, definidos en la sección 2.4.

Tabla 3.5. Potencia máxima de transmisión para alcanzar valores mínimos requerido de los parámetros ópticos de medida.

Distancia [km]	Potencia en dBm para un BER=1e-15	Potencia en dBm para un factor Q=18 dB
78	12,86	13,35

A través del espectro de la señal se determina el ensanchamiento que sufre la señal debido a XPM. En la figura 3.10 se tiene la superposición de los espectros transmitido y recibido para una potencia de 0 y 13 dBm, y en la figura 3.11 los correspondientes diagramas del ojo. Para esto se no se tienen en cuenta las pérdidas de la fibra (pérdidas = 0 dB/km), con la finalidad de poder comparar los espectros en transmisión y recepción.

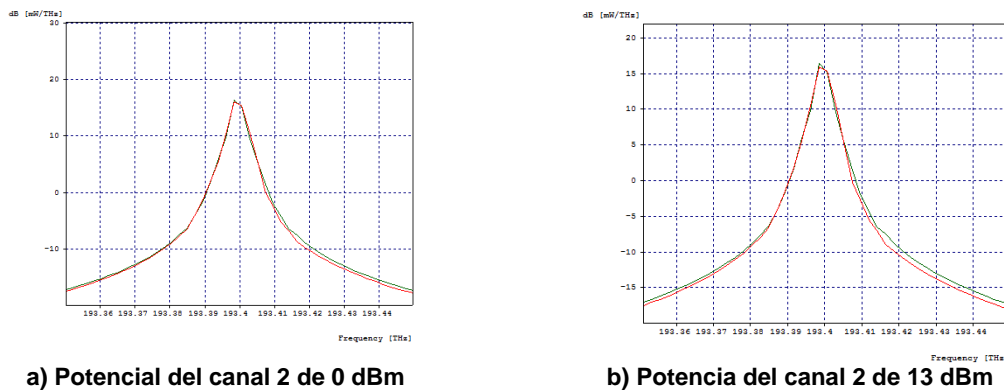


Figura 3.10. Espectro a la entrada del back to back (verde) y en el receptor (rojo) del canal 1 para diferentes valores de potencia de transmisión en el canal 2.

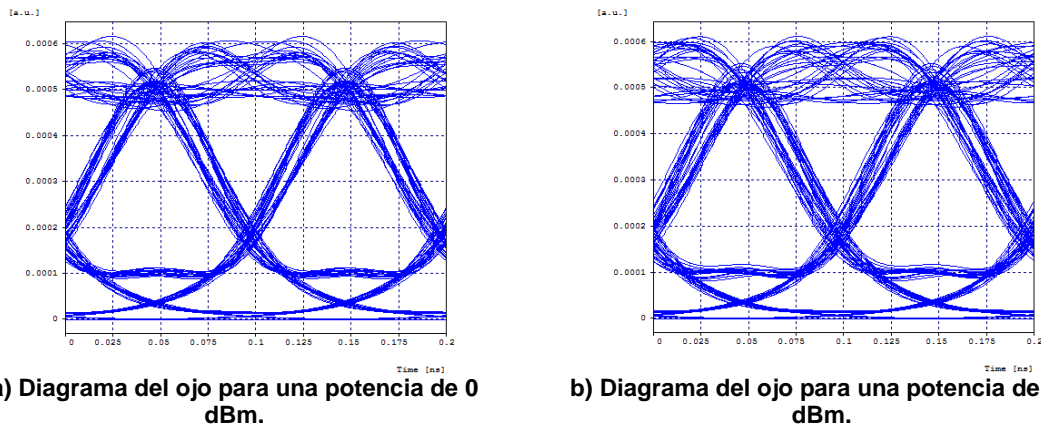


Figura 3.11. Diagrama del ojo en recepción sobre el canal 1, para potencias de a) 0 dBm y b) 13 dBm en el canal 2, manteniendo la potencia del canal 1 a 0 dBm a una distancia de 78 kilómetros.

A pesar de que los valores de los parámetros ópticos de medida se degradan, en el espectro de la señal no se percibe un ensanchamiento considerable debido a XPM, figura 3.10, por esto se realiza un incremento en la potencia del canal 2 con el objetivo de que se visualice de forma más clara el impacto de XPM sobre el sistema. Un incremento en la potencia de transmisión a un valor de 24 dBm en el canal 2, mientras la potencia del canal 1 (donde se realizan las medidas) se mantiene constante en 0 dBm, genera un ensanchamiento en el espectro de la señal debido a XPM, el cual se puede apreciar a través del espectro de la señal, figura 3.12. La degradación generada por este ensanchamiento, a causa de XPM, se puede observar a través del diagrama del ojo, figura 3.13.

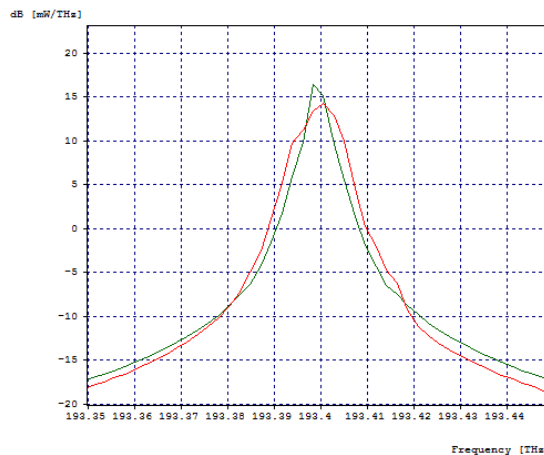


Figura 3.12. Espectro del back to back (verde) y la señal en recepción del canal 1 (rojo) para una potencia transmitida por el canal 2 de 24 dBm.

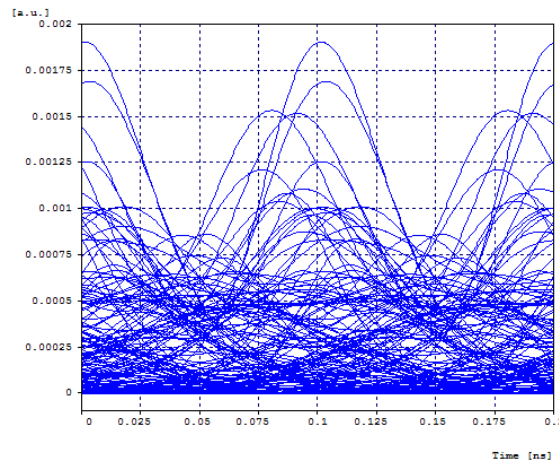


Figura 3.13. Diagrama del ojo en recepción del canal 1, para una potencia en el canal 2 de 24 dBm.

La degradación observada (figuras 3.12 y 3.13) es igual para el canal 3, el cual se encuentra a 1546.92 nm, próximo al canal 2. Sin embargo, la degradación para el canal 4 no va a ser significativa ya que este se encuentra a 200 Ghz de espaciamiento del canal 2. Esto se demuestra a través de la figura 3.14, donde se incrementa el espaciamiento entre los canales a 200 Ghz.

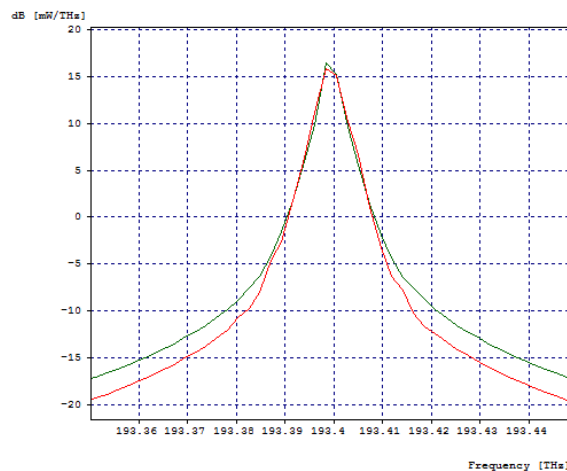


Figura 3.14. Espectro del back to back (verde) y la señal en recepción (rojo) del canal 1, para una potencia transmitida por el canal 2 de 24 dBm, con un espaciamiento de 200 Ghz.

Para canales que se encuentren espaciados a 200 Ghz el impacto de XPM es mínimo, figura 3.14. Un espaciamiento por debajo de los 100 Ghz provocaría que se incremente la degradación debido a XPM.

Aunque, según la ecuación 1.9, el ensanchamiento debido a XPM debería ser dos veces el generado por SPM, hay que tener en cuenta que dicha ecuación no considera los efectos de la dispersión ni el espaciamiento que exista entre los canales. Por esto y como

se ha observado, el impacto de XPM sobre el ancho del pulso no es tan marcado como el generado por SPM.

A diferencia de los efectos de SBS y SRS, XPM no genera una transferencia de potencia entre canales. La tabla 3.6 presenta los valores de potencia en recepción para dos de los canales transmitidos. Se puede determinar que la potencia en el canal 1, transmitido a 0 dBm, permanece casi constante ante las altas variaciones de potencia del canal 2, con una potencia de aproximada de -20,76 dBm.

Tabla 3.6. Valores de potencia en recepción para dos de los canales transmitidos.

Potencia de entrada canal 2 [dBm]	Potencia de recepción canal 1 [dBm]	Potencia de recepción canal 2 [dBm]
0	-20,77	-20,85
5	-20,76	-15,85
10	-20,77	-10,85
15	-20,76	-5,86
20	-20,81	-0,89
25	-20,74	3,21

La figura 3.15 muestra el espectro para diferentes longitudes en la fibra con una potencia de 24 dBm, la atenuación de la fibra se ha apagado para poder observar si un incremento en la distancia del enlace genera una mayor degradación debido a XPM.

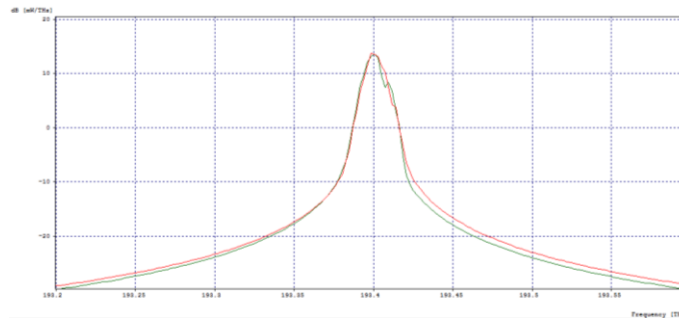


Figura 3.15. Espectro de la señal del canal 1 a los 40 (verde) km y 80 (rojo) km.

La distancia de la fibra no es un parámetro que incrementa el efecto de XPM sobre el sistema, ya que no se presenta un claro incremento en el ancho del espectro para valores de 40 y 80 km, figura 3.15.

Uno de los parámetros que impacta el comportamiento de los efectos no lineales es la dispersión de la fibra, ya que un valor alto de dispersión debe reducir el ensanchamiento debido a XPM. La potencia del canal 1 se mantiene en 0 dBm y la potencia del canal 2 se configura a 20 dBm, con el fin de garantizar la presencia de XPM y que la señal no presente distorsión ni interferencia por el canal contiguo. Se elige el valor típico de la fibra SMF-28 de Corning de 16 ps/nm/km y se compara con una de 4 ps/nm/km. Estas variaciones se llevan a cabo con el fin de verificar únicamente el impacto del cambio del valor de dispersión más no el cambio del tipo de fibra, por lo que se mantienen las otras propiedades de la fibra. La distancia que se toma es de 78 km. Un valor bajo de dispersión genera que se incremente el impacto de XPM, por lo cual se aprecia en un leve

ensanchamiento para un valor de dispersión bajo (4 ps/nm/km) el cual se reduce para un valor más elevado de dispersión (16 ps/nm/km), figura 3.16.

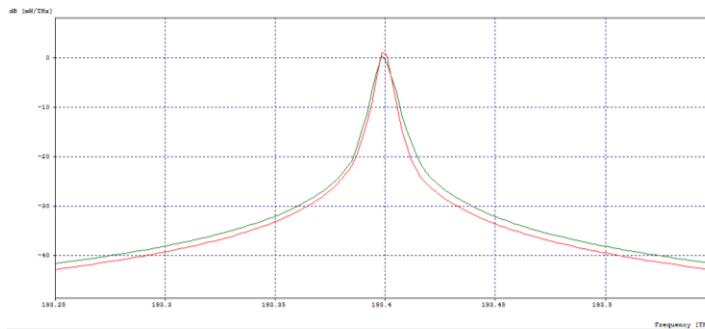


Figura 3.16. Ensanchamiento del espectro para una dispersión de 4 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo) debido a XPM.

Se puede tomar un valor más bajo de dispersión para compararlo con uno alto y poder observar de forma más clara el impacto de dicha variación sobre la degradación generada por XPM, figura 3.17, en la cual se compara el espectro de la señal recibida para una dispersión de 2 ps/nm/km y una de 18 ps/nm/km. Entre más próximo se encuentre el valor de dispersión de la fibra a 0 ps/nm/km se presenta un mayor impacto de XPM, lo cual genera un mayor ensanchamiento del espectro, el cual se reduce conforme se incrementa el valor de dispersión de la fibra.

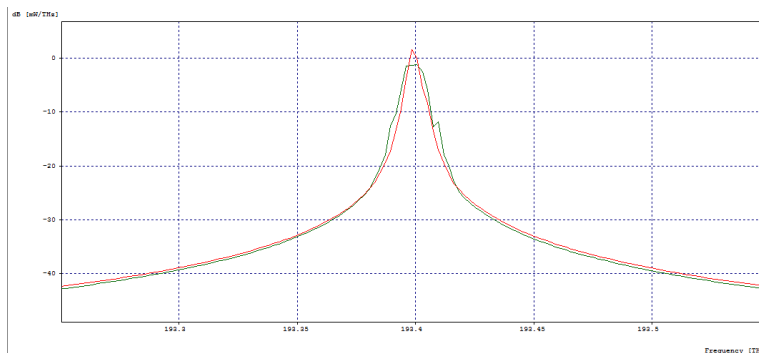


Figura 3.17. Ensanchamiento del espectro para una dispersión de 2 ps/nm/km (verde) y 18 ps/nm/km (rojo) debido a XPM.

Sin embargo, valores altos de dispersión limitan el desempeño del sistema ya que reducen los factores de calidad del sistema, figura 3.18.

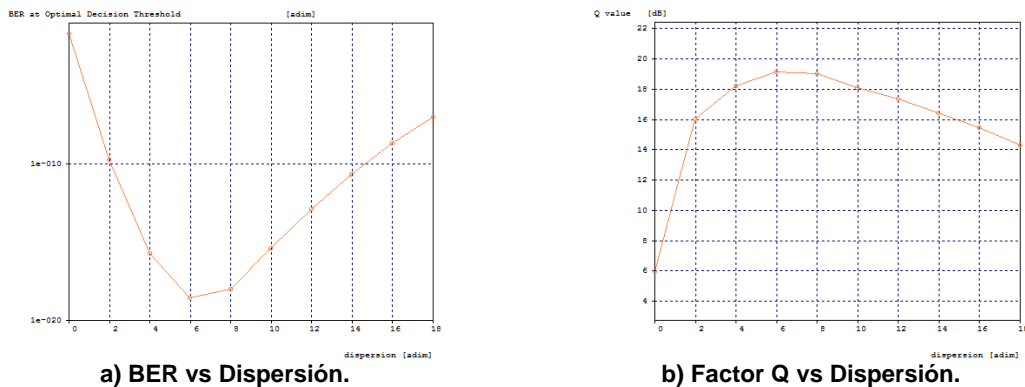


Figura 3.18. BER a) y b) Factor Q para diferentes valores de dispersión de la fibra a una distancia de 78 km, para potencia de 0 dBm en el canal 1 y 20 dBm para el canal 2.

Se realiza una prueba reduciendo el espaciamiento a 50 Ghz con el fin de determinar el impacto del espaciamiento sobre las degradaciones generadas por XPM. En la tabla 3.7 se presentan las distancias máximas alcanzadas para diferentes valores de potencia, manteniendo los factores mínimos de calidad de los parámetros ópticos de medida.

Tabla 3.7. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1 manteniendo la potencia constante en 0 dBm, para diferentes valores de potencia del canal 2.

Potencia de transmisión del canal 2 [dBm]	Distancia máxima [km] para un BER=1e-15	Distancia máxima [km] para un factor Q=18 dB
0	78,30	78,23
5	76,64	77,50
10	74,32	74,83
15	65,78	66,26
20	45,67	45,49

Dado que las distancias máximas alcanzadas tanto para el factor Q como para el BER son muy aproximadas, se elige uno de ellos para realizar una comparación entre las distancias máximas alcanzadas utilizando un espaciamiento de 100 Ghz, con las alcanzadas con un espaciamiento de 50 Ghz, figura 3.19.

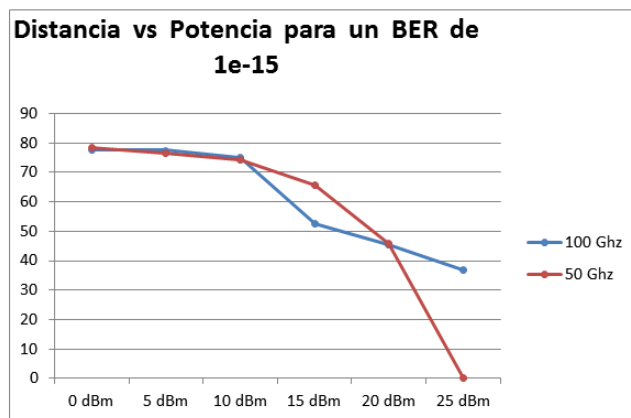


Figura 3.19. Distancia máxima alcanzada vs Potencia de entrada sobre el canal 2, manteniendo la potencia del canal 1 constante a 0 dBm, para un BER de 1e-15 sobre el canal 1 (canal de evaluación de XPM).

Se presenta un comportamiento algo ambiguo, ya que para un espaciamiento de 50 Ghz se logra una mejora en la distancia máxima alcanzada para una potencia de 15 dBm, mejorando el alcance en 15 km, figura 3.19. Sin embargo, potencias mayores a 20 dBm, donde existe un mayor impacto de XPM, generan una degradación alta de los parámetros ópticos de medida. Esto se debe a que para un espaciamiento de 50 Ghz se genera interferencia entre los canales ya que SPM, como se ha mencionado anteriormente, no se puede aislar y por lo tanto el canal 2 presenta un ensanchamiento que genera solapamiento con el canal 1. Por estas razones, y teniendo en cuenta que se presentan otros efectos que degradan el sistema, no es posible determinar con claridad el impacto de XPM sobre sistemas con este espaciamiento, lo que hace que el estudio de XPM sobre sistemas con este tipo de espaciamiento no genere resultados claros que contribuyan con el estudio de este efecto.

3.1.3 Análisis del efecto no lineal FWM.

El caso de estudio 1 para FWM parte del escenario de simulación realizando diferentes variaciones que permiten determinar el impacto de FWM sobre el sistema. Cada una de estas variaciones se especifica a través del desarrollo de este apartado y siguen el mismo orden planteado para los diferentes efectos no lineales del caso de estudio 1.

La primera prueba que se realiza es variar la potencia de los canales 2, 3 y 4, al tiempo, manteniendo fijo el canal 1 a 0 dBm. Esta prueba se realiza con el fin de tener un punto de comparación entre la degradación generada por XPM y la generada por FWM. A través de estas variaciones de potencia se generan, aunque a niveles bajos, degradaciones debido a FWM. De esta forma es posible generar una comparación del nivel de degradación de estos dos efectos. La tabla 3.8 muestra la degradación generada sobre los parámetros ópticos de medida debido a estas variaciones. Los resultados obtenidos en esta tabla se comparan con los de la tabla 3.4, generada para XPM. Teniendo en cuenta que las distancias alcanzadas para los parámetros ópticos de medida son muy similares, se elige el BER para determinar la distancia máxima alcanzada por el sistema. La figura 3.20 presenta una comparación de la distancia máxima alcanzada por el canal 1, realizando las variaciones de potencia mencionadas anteriormente, y las variaciones de potencia generadas en el caso de estudio 1 de XPM.

Tabla 3.8. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1, para diferentes valores de potencia de los otros canales.

Potencia de transmisión del canal 1 [dBm]	Potencia de transmisión canales 2, 3 y 4 [dBm]	Distancia máxima [km] para un BER=1e-15	Distancia máxima [km] para un factor Q=18 dB
0	0	79,60	78,39
0	5	77,21	78,85
0	10	77,80	76,55
0	15	58,85	58,86
0	20	33,90	33,84

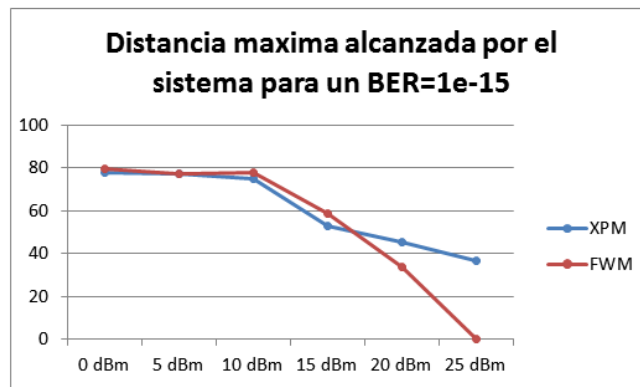


Figura 3.20. Comparación de la distancia máxima alcanzada por el canal 1, realizando las variaciones de potencia para el análisis de XPM, y FWM.

La degradación generada por FWM es más elevada para potencias altas de transmisión, sin embargo, XPM degrada un poco más el sistema entre los 10 y los 15 dBm aproximadamente. La degradación que se genera a potencias elevadas debido FWM, se debe a que para dichas potencias, las componentes generadas tienen un nivel más alto de potencia y generan una interferencia elevada, figura 3.20. Sin embargo, se esperaba que FWM generara una mayor degradación sobre el sistema ya que la potencia total incidente sobre la fibra en dicha configuración es más alta que la que se tenía en XPM, donde solo se realizaban variaciones sobre el canal 2, contiguo al canal 1. A pesar de esto, la diferencia entre las distancias alcanzadas para potencias inferiores a 20 dBm no supera los 10 km.

La presencia de FWM se aprecia a través de la generación de componentes interferentes que causan degradaciones sobre el sistema, figura 3.21.

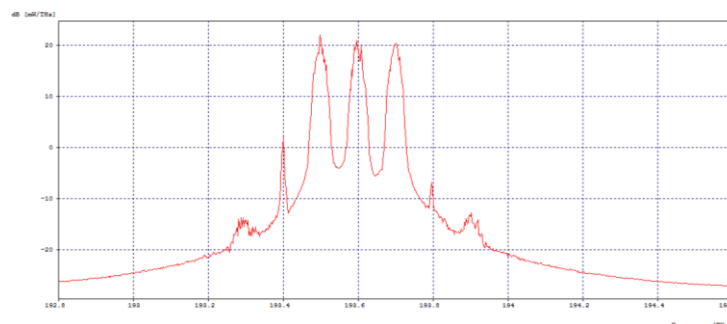


Figura 3.21. Componentes generadas por FWM a una potencia de 25 dBm a 78 km.

Para poder observar de forma más clara el impacto de FWM y el espectro de las componentes generadas por FWM, la potencia de todos los canales se varía al tiempo, con el fin de tener una mayor potencia incidiendo sobre la fibra, lo cual debe generar una mayor degradación en las componentes generadas por este efecto.

Para este análisis se toma un canal (canal 1) debido a que los resultados para todos los canales son iguales. En la tabla 3.9 se presentan las distancias máximas alcanzadas para

diferentes valores de potencia, cumpliendo con los mínimos valores de los parámetros ópticos de medida (BER y factor Q).

Tabla 3.9. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1, para diferentes valores de potencia en todo el sistema.

Potencia de transmisión [dBm]	Distancia máxima [km] para un BER=1e-15	Distancia máxima [km] para un factor Q=18 dB
0	81,97	78,35
5	79,76	78,80
10	79,46	79,89
15	76,15	76,18
20	48,57	48,67
25	27,97	27,25

La tabla anterior permite determinar que la distancia máxima alcanzada por el sistema comienza a degradarse para potencias superiores a 15 dBm, donde los niveles de potencia de las componentes generadas por FWM son más altos y generan interferencia a los canales contiguos. En la prueba realizada al comienzo de este apartado, en la que se variaba la potencia de los canales 2, 3 y 4 mientras la del canal 1 permanecía constante a 0 dBm, se tenía que la señal del canal 1 se degradaba cuando la potencia de los otros canales era de 10 dBm. Hay que tener en cuenta que esta degradación no significa que FWM degrade más el sistema para dicha prueba, sino que al tener una diferencia entre la potencia del canal 1 (sobre el que se realizan las medidas) y los demás canales, se genera algo de interferencia, además la potencia del canal medido permanece constante. Para la prueba que se realiza ahora, y cuyos resultados fueron consignados en la tabla 3.9, la potencia del canal 1 se incrementa en la misma medida que el resto de canales, por lo que la degradación se presenta a niveles más altos de potencia. Por lo tanto este resultado no implica que FWM tenga un impacto mayor cuando se varía la potencia de tres de los cuatro canales.

La figura 3.22 muestra los diagramas de correlación entre potencia y los parámetros de medida óptica BER y factor Q, la potencia de los cuatro canales se incrementa desde los 0 dBm hasta los 30 dBm.

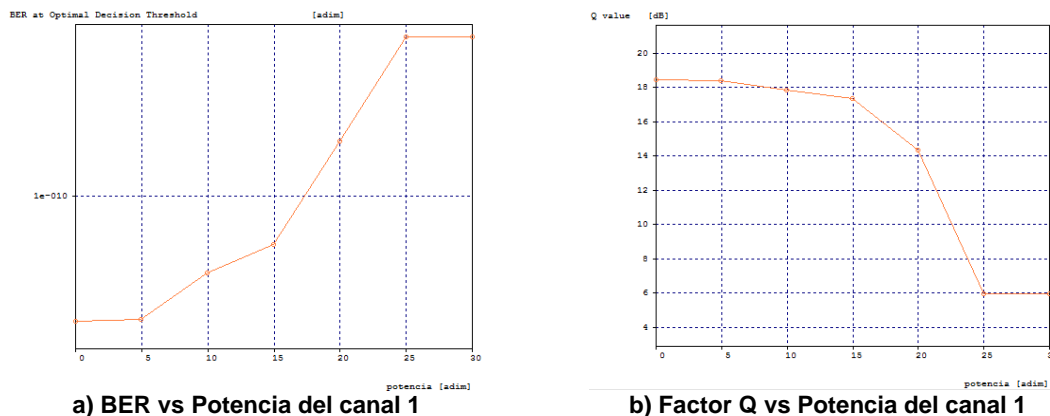


Figura 3.22. Parámetros ópticos de medida del canal 1, para diferentes valores en la potencia de transmisión a una distancia de 78 km.

La degradación generada por el incremento en la potencia de transmisión de todos los canales afecta más el sistema que cuando se incrementaba la potencia en un solo canal (SPM). Esto se debe a que la potencia total que incide sobre la fibra es mayor.

A través de estos diagramas de correlación se determina que la potencia máxima con la cual se puede transmitir a 78 km es de 7,94 dBm, tabla 3.10. Esto muestra que la potencia máxima se limita cuando la potencia de los canales en el sistema es igual, ya que la degradación generada por FWM es mayor que la generada por XPM y por SPM.

Tabla 3.10. Potencia máxima de transmisión para alcanzar valores mínimos requerido en los parámetros ópticos de medida.

Distancia [km]	Potencia en dBm para un BER=1e-15	Potencia en dBm para un factor Q=18 dB
78	7,94	8,97

Una potencia de 8 dBm es suficiente para que se presenten componentes generadas por FWM en el espectro del sistema, sin embargo, el nivel de potencia de dichas componentes no es tan elevado, figura 3.23.

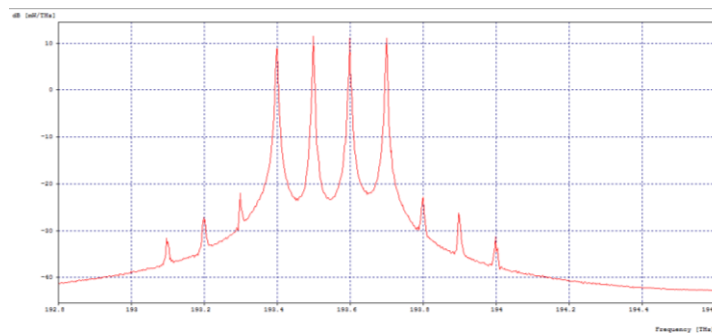


Figura 3.23. Componentes generadas por FWM para una potencia de transmisión de 8 dBm.

Un incremento en la potencia de transmisión a 20 dBm causa que la degradación que se genera debido a FWM se incremente, observándose niveles de potencia más elevados en las componentes generadas debido a este efecto no lineal, figura 2.24.

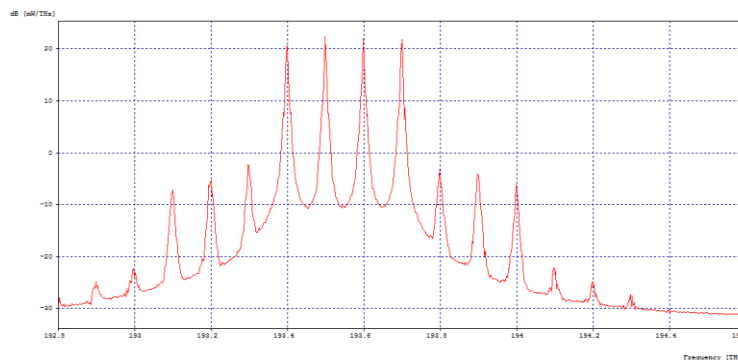


Figura 3.24. Componentes generadas por FWM para una potencia de transmisión de 20 dBm.

La degradación generada debido al incremento en la potencia de transmisión también se aprecia en el diagrama del ojo, figura 3.25, generándose una caída en el valor de los parámetros ópticos de medida por debajo del umbral mínimo requerido.

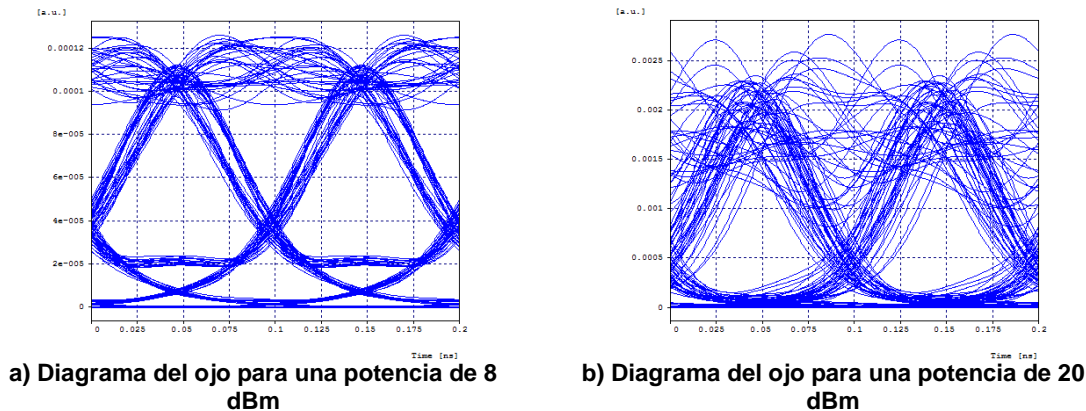


Figura 3.25. Diagrama del ojo en recepción sobre el canal 1 para potencias de a) 8 dBm y b) 20 dBm a una distancia de 78 kilómetros.

El impacto de FWM es menor para distancias cortas, sin embargo para distancias superiores a 50 km la degradación se mantiene casi constante, además el incremento no es grande para distancias largas, figura 3.26. Se tiene en cuenta que el objetivo de los enlaces de comunicaciones es buscar las mayores distancias, y como a distancias largas el impacto de FWM se mantiene con variaciones muy pequeñas, se puede determinar que la distancia no es un factor determinante sobre el escenario de simulación.

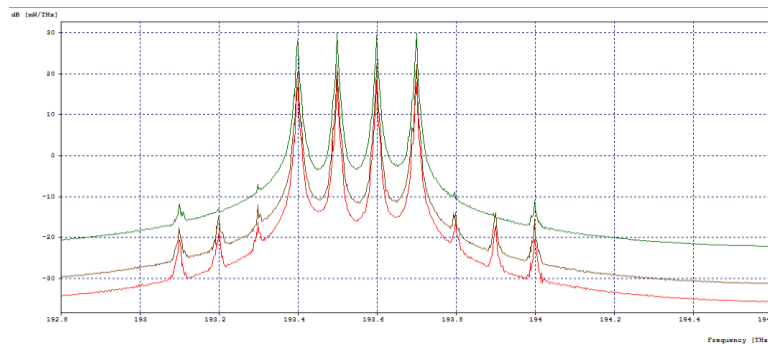


Figura 3.26. Espectro del sistema para una potencia de 20 dBm a los 40 (verde) y 80 (rojo) km.

Como se ha mencionado anteriormente, la dispersión de la fibra es un parámetro que impacta en gran medida el comportamiento de los efectos no lineales. Por esta razón se realizan variaciones en el valor de este parámetro, para así poder determinar el impacto de dichas variaciones en FWM. La potencia se deja en 20 dBm, lo que garantiza, a parte de la presencia de FWM, niveles de potencia de las componentes que comienzan a generar interferencia y degradar el sistema en mayor medida. Se realiza una variación en el valor de dispersión de la fibra manteniendo sus otras propiedades constantes. La distancia se mantiene en 78 km.

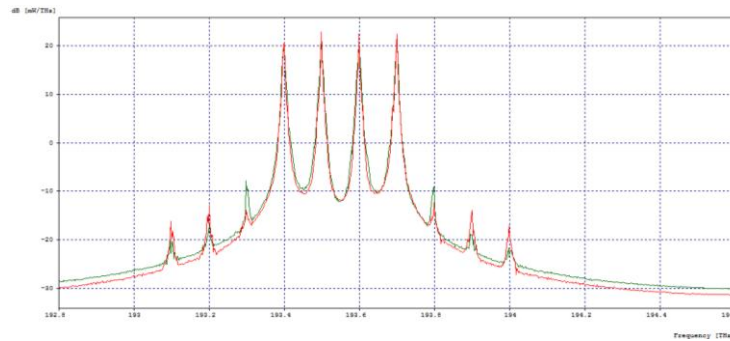


Figura 3.27. Componentes generadas por FWM para una dispersión de 4 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo) para una potencia de 20 dBm.

La mitigación de FWM no aumenta ante la variación del valor de dispersión de la fibra por encima de los 4 ps/nm/km. Un incremento en el valor de dispersión de 4 a 16 ps/nm/km hace que el nivel de potencia de las componentes FWM más degradantes disminuya, sin embargo, esta disminución es bastante baja y no genera una mejora considerable, figura 3.27. Sin embargo, trabajar con valores de dispersión por debajo de los 4 ps/nm/km hace que se incremente en gran medida el impacto de FWM sobre el sistema, figura 3.28.

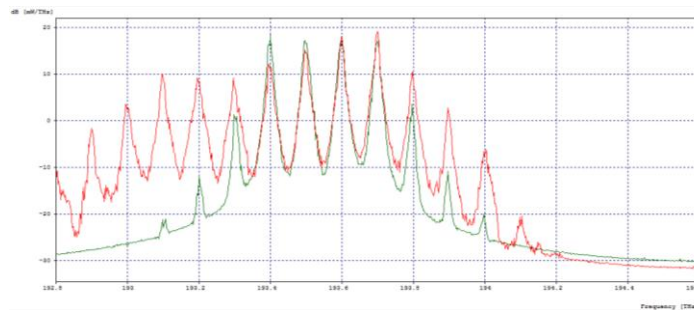


Figura 3.28. Componentes generadas por FWM para una dispersión de 0 ps/nm/km (rojo) y 1 ps/nm/km (verde) para una potencia de 20 dBm.

Si bien valores superiores a los 0 ps/nm/km no logran mitigar en su totalidad la degradación debido a FWM, si generan una importante disminución de su impacto, especialmente en el rango de 0 a 4 ps/nm/km, siendo este último un valor suficiente para mitigar en gran parte la degradación generada por FWM. Este resultado comprueba que las fibras DSF, como se mencionó en la sección 1.3.2, son inadecuadas para compensar el impacto de las no linealidades. También se determina que un valor de dispersión superior a 16 ps/nm/km no genera mayor mitigación de FWM. Es importante tener en cuenta que valores más elevados de dispersión generan una degradación adicional en el rendimiento del sistema, figura 3.29.

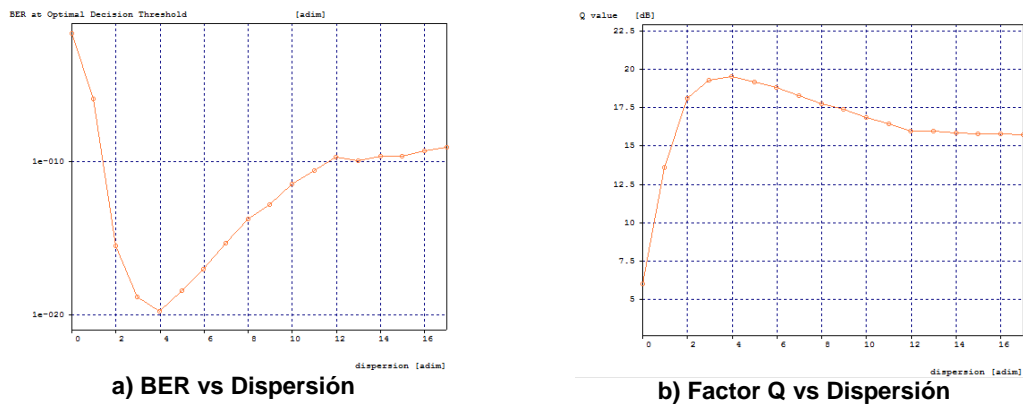
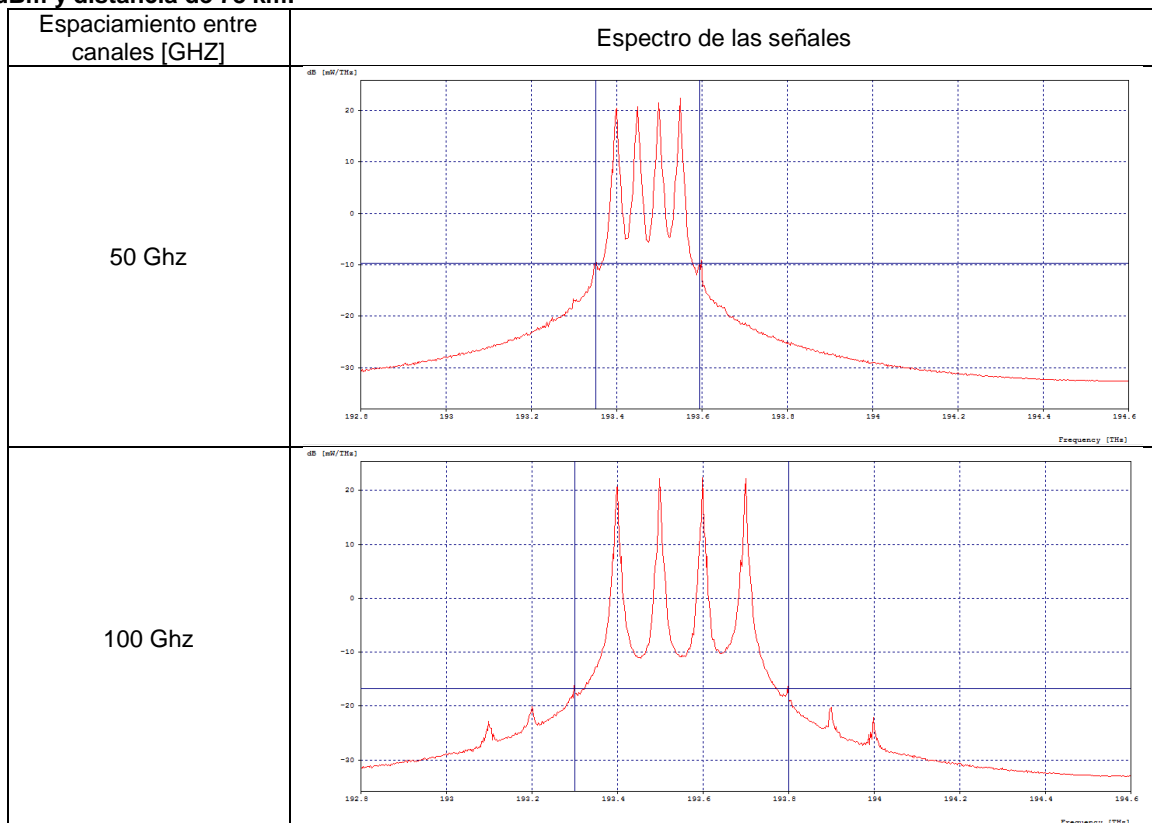
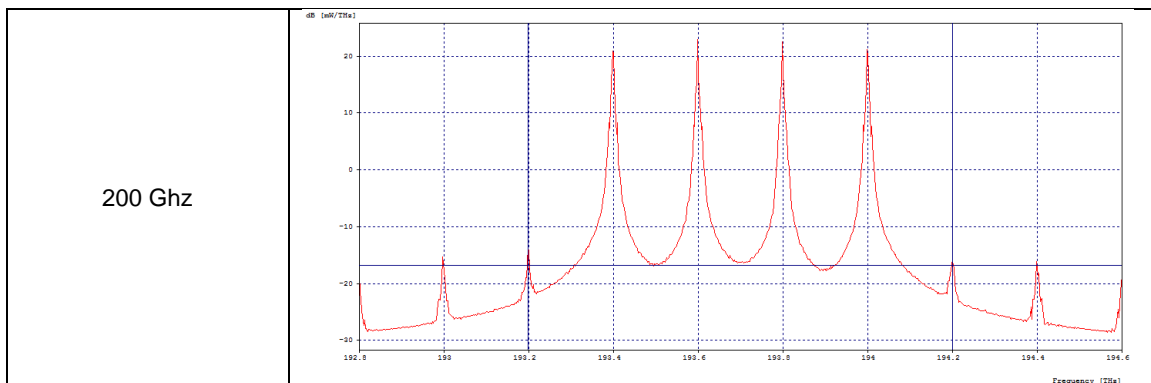


Figura 3.29. a) BER y b) Factor Q para diferentes valores de dispersión de la fibra a una distancia de 78 km, para una potencia de transmisión de 20 dBm.

El impacto de FWM también se ve afectado por el espaciamento que existe entre los canales. Las pruebas que se han realizado hasta el momento han tenido el mismo espaciamento (100 GHz). Para XPM se realizó una variación del espaciamento para demostrar que espaciamentos mayores disminuían su impacto y por eso solo afectaba canales contiguos. Sin embargo, FWM se ve más afectado por el espaciamento entre los canales, ya que todo el sistema se degrada. La tabla 3.11 presenta los espectros para espaciamentos de 50, 100 y 200 GHz.

Tabla 3.11. Espectro del sistema para espaciamentos de 50GHz, 100GHz y 200GHz, con potencia de 20 dBm y distancia de 78 km.





Para un espaciamiento de 50 Ghz las componentes generadas por FWM tienen un pico que alcanza los -10 dBm, y se reduce aproximadamente a -17 dBm para un espaciamiento de 100 Ghz. Para un espaciamiento de 200 Ghz las componentes siguen manteniendo un pico aproximado de -17 dBm, ya que desde los 100 Ghz el nivel de potencia de estas componentes es bastante pequeño. Se puede observar de forma clara como al disminuir el espaciamiento entre los canales el impacto de FWM es mayor. Debido a esto se debe tener especial cuidado con el impacto de este efecto cuando se trabajen con espaciamiento pequeños entre canales. Las tablas 3.12 y 3.13 muestran la distancia máxima alcanzada para diferentes potencias a espaciamientos de 50 y 200 Ghz.

Tabla 3.12. Distancia máxima alcanzada por el canal 1, para diferentes potencias con un espaciamiento de 50 Ghz.

Potencia de transmisión [dBm]	Distancia máxima [km] para un BER=1e-15	Distancia máxima [km] para un factor Q=18 dB
0	78,42	78,19
5	77,55	79,22
10	79,08	79,37
15	65,98	67,99
20	38,03	38,11
25	-	-

Tabla 3.13. Distancia máxima alcanzada por el canal 1, para diferentes potencias con un espaciamiento de 200 Ghz.

Potencia de transmisión [dBm]	Distancia máxima [km] para un BER=1e-15	Distancia máxima [km] para un factor Q=18 dB
0	82,40	79,79
5	78,00	79,23
10	77,47	78,09
15	73,95	76,20
20	49,55	50,06
25	33,84	34,32

De las tablas 3.9, 3.12 y 3.13 se toma la distancia a la que se alcanza un BER=1e-15 para presentar la figura 3.30 que muestra la degradación en el alcance del sistema debido a la variación del espaciamientos entre los canales. Así se determina que un espaciamiento entre canales pequeño, genera una mayor degradación del sistema debido al incremento de FWM y de la interferencia entre los canales.

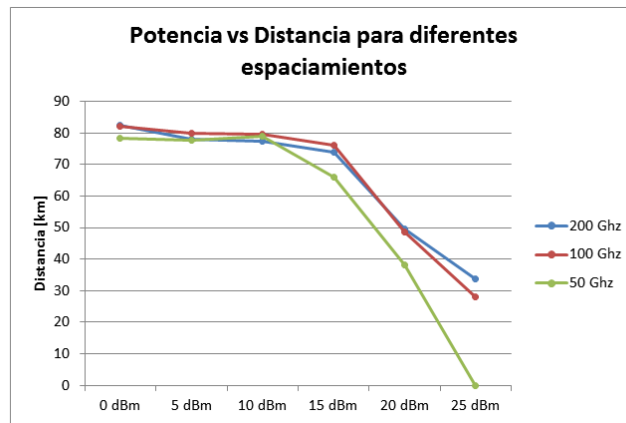


Figura 3.30. Potencia de entrada sobre el canal 1 vs Distancia máxima alcanzada para un BER de $1e-15$ para espaciamentos de 50 (verde) 100 (rojo) y 200 (azul) Ghz.

La diferencia entre un espaciamento de 100 y 200 Ghz no es significativa debido a que la tasa de transmisión de 10 Gb/s no requiere de un ancho de banda tan grande para cada uno de los canales transmitidos, sin embargo, un espaciamento de 50 Ghz sí genera una degradación más alta del sistema.

En este caso de estudio se evidenció la aparición de los efectos no lineales, debido a que el formato de modulación NRZ-OOK no es robusto frente a este tipo de degradaciones.

Principalmente a través del espectro óptico de la señal se notó de forma clara la presencia de los efectos no lineales y que los principales parámetros de transmisión que rigen el comportamiento de la mayoría de estos, son la potencia de transmisión y el coeficiente de dispersión de la fibra.

3.2 Caso de estudio 2, formato de modulación NRZ-OOK y velocidad de transmisión de 40 Gb/s.

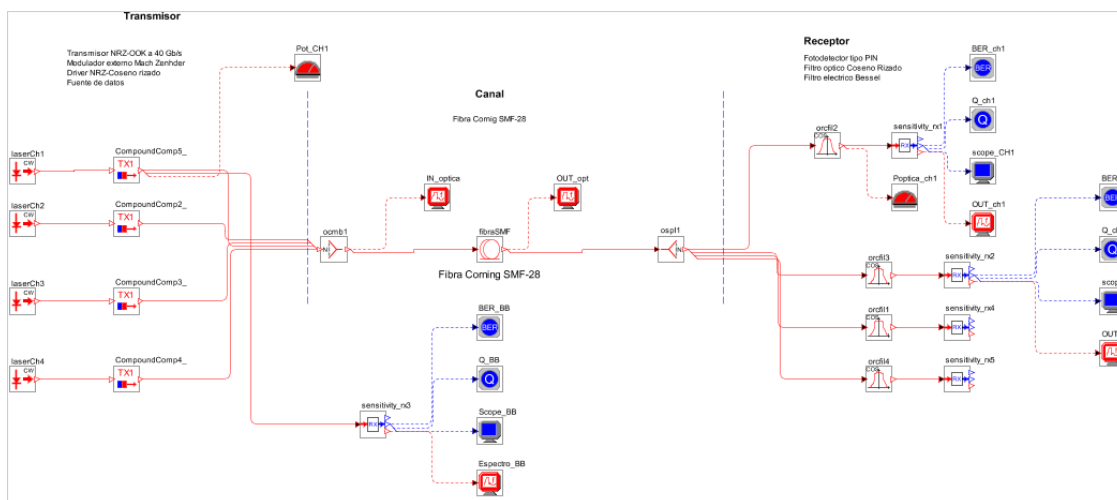


Figura 3.31. Escenario de simulación para el formato de modulación NRZ-OOK y velocidad de transmisión de 10 Gb/s.

En la figura 3.31 esta implementado el sistema para el formato de modulación NRZ-OOK y velocidad de transmisión de 40 Gb/s.

A continuación se muestra la señal de entrada a una velocidad de transmisión de 40 Gb/s y formato de modulación NRZ-OOK, tomada en el receptor Back to Back, figura 3.32, con el fin de establecer una comparación entre la señal a la entrada del sistema y su comportamiento al final del enlace.

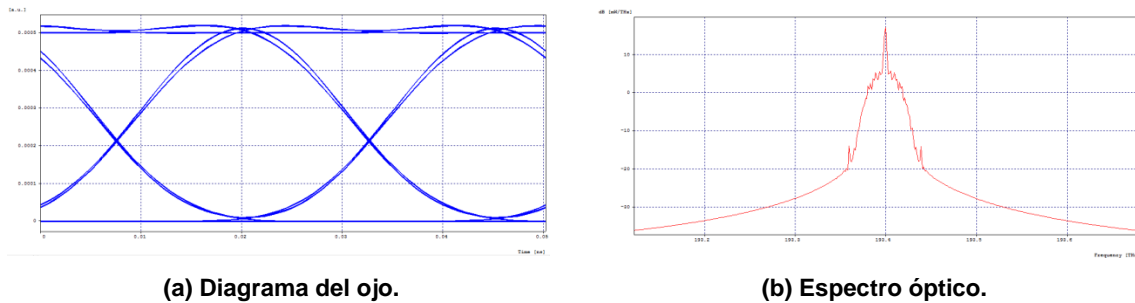


Figura 3.32. (a) Diagrama del ojo y (b) Espectro óptico en el receptor Back to back.

Tanto para el diagrama del ojo como para el espectro óptico la señal de entrada medida en el receptor back to back no presenta degradaciones significativas, figura 3.32.

Para llevar a cabo la comparación entre la señal de entrada y la señal al final del enlace, se procede a encontrar la distancia máxima en la que el sistema cuenta con los valores aceptables en los factores de calidad BER=1e-15, factor Q=18 dB, sensibilidad del receptor = -32 dBm.

- **Distancia máxima que alcanza el sistema configurado con los parámetros típicos de transmisión para velocidad de transmisión de 40 Gb/s y modulación NRZ-OOK**

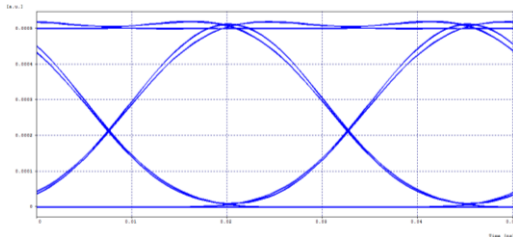
Para determinar la distancia máxima en la que el sistema cuenta con los valores aceptables en los parámetros de calidad, se configura el sistema con valores típicos en los parámetros de transmisión, los cuales son: 4 canales, espaciamiento entre canales de 100 Ghz, potencia de transmisión de 0 dBm por canal, formato de modulación NRZ-OOK y se varia la distancia del enlace, posteriormente se llevan a cabo diferentes medidas sobre el canal a 1550.12 nm.

Tabla 3.14. Distancia Máxima que se alcanza a una potencia de 0 dBm, espaciamiento entre canales de 0.8nm y velocidad de 40 Gb/s con el formato de modulación NRZ-OOK.

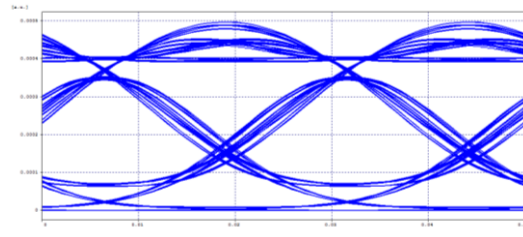
Potencia de transmisión [dBm]	Distancia máxima [km] para un BER=1e-015	Distancia máxima [km] para un factor Q=18 dB	Potencia en recepción [dBm]
0 dbm	4,98	4,98	-7,13

Para una potencia de transmisión de 0 dBm en los cuatro canales y una separación entre canales de 100 Ghz (0.8 nm), se alcanza una distancia máxima de aproximadamente 5 km manteniendo los valores de los parámetros de calidad definidos anteriormente, tabla 3.14.

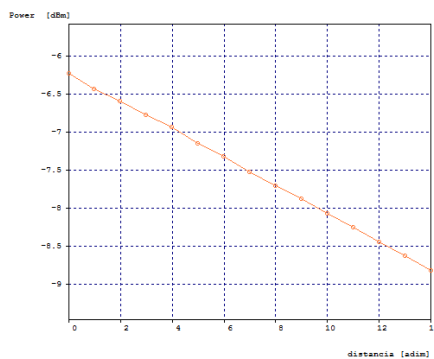
A continuación se muestra el comportamiento del sistema, medido en el receptor back to back y a una distancia de 5 km, distancia en la cual se evidencian ciertas degradaciones, figura 3.33 (a), (b), (f). También se observa la degradación generada en el sistema al incrementar la distancia del enlace figura 3.33 (c), (d), (e).



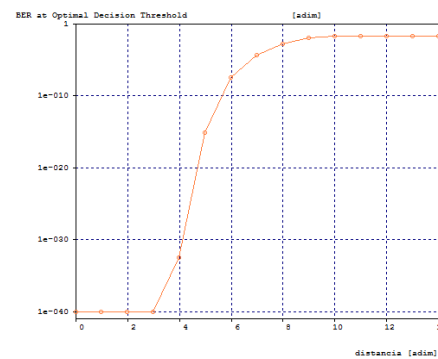
a) Diagrama del ojo en el receptor Back to Back.



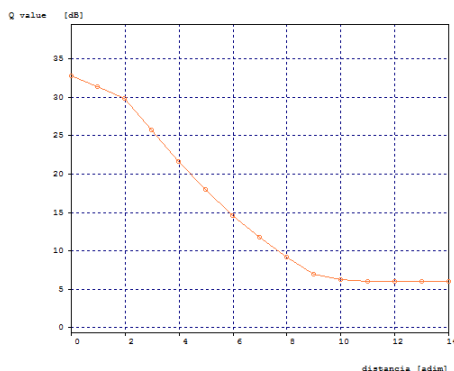
(b) Diagrama del ojo a una distancia de 5 km.



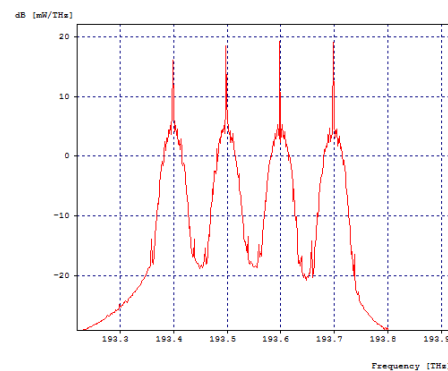
c) Potencia en recepción vs Distancia de transmisión



d) BER vs Distancia de transmisión



e) Factor Q vs Distancia de transmisión



f) Espectro óptico en recepción a una distancia de 5 km

Figura 3.33. Diagramas de correlación y de ojo para el canal a 1550.12nm, receptor back to back y distancia 5 km, 0 dBm de potencia en los cuatro canales.

3.2.1 Análisis del efecto no lineal SPM.

Para el análisis del efecto no lineal SPM se monitorea un solo canal (1550.12 nm), y se configura el sistema con un espaciado considerable entre canales (200 GHz), se dejan constantes las potencias de transmisión de los 3 canales restantes a una potencia

de 0 dBm con el fin de evitar la presencia de otros efectos no lineales como FWM o XPM sobre este canal.

Se aísla el efecto no lineal SPM para observar su impacto en un solo canal, debido a que este produce un efecto de auto modulación de fase, el cual no depende del número de canales que tenga el sistema ni de la separación entre ellos.

Para este análisis se evalúa el comportamiento de los parámetros de calidad del canal a diferentes potencias de transmisión, con el fin de encontrar las distancias máximas que se pueden alcanzar sin sobrepasar los límites establecidos en la sección 2.4, esto se hace ya que la potencia de transmisión es uno de los parámetros de transmisión más influyentes en el impacto de los efectos no lineales en los sistemas de comunicaciones ópticas, causando importantes limitaciones en su diseño.

Para llevar a cabo estas mediciones se evaluaron los parámetros de calidad, BER Y Factor Q dejando fijas las diferentes potencias de transmisión (5, 10, 15, 20 y 25 dBm) y variando la longitud del enlace de 0 km hasta 15 km, con incrementos de 1 km, en una fibra Corning SMF 28 la cual viene predefinida en el simulador y cuenta con diversos parámetros intrínsecos de este tipo de fibra, como coeficiente de dispersión, área efectiva, entre otros.

Tabla 3.15. Distancia máxima que se alcanza a diferentes potencias de transmisión a una velocidad de 40 Gb/s con el formato de modulación NRZ-OOK.

Potencia en transmisión [dBm]	Distancia máxima [km] para un BER=1e-015	Distancia máxima [km] para un factor Q=18 dB
0	4,98	4,98
5	4,88	4,85
10	4,91	4,90
15	4,98	5,01
20	5,47	5,41
25	7,16	7,14
30	3,22	3,13

A medida que se incrementa la potencia de transmisión, la distancia en la que se obtienen los niveles aceptables de calidad también aumenta, pero después de sobrepasar un nivel de potencia, esta distancia disminuye considerablemente, alcanzando una distancia aproximada de 7 km para una potencia de 25 dBm, comparado con los 3 km que se alcanzan a una potencia de entrada de 30 dBm, tabla 3.15.

Para determinar el valor de potencia donde los efectos no lineales empiezan a generar degradaciones considerables se lleva a cabo una prueba donde se varía la potencia de transmisión de 0 dBm a 35 dBm y se deja una distancia constante de 5 km, la cual es la distancia en la que el sistema mantiene los parámetros de calidad definidos en la sección 2.4, cuando es configurado con los parámetros típicos de transmisión.

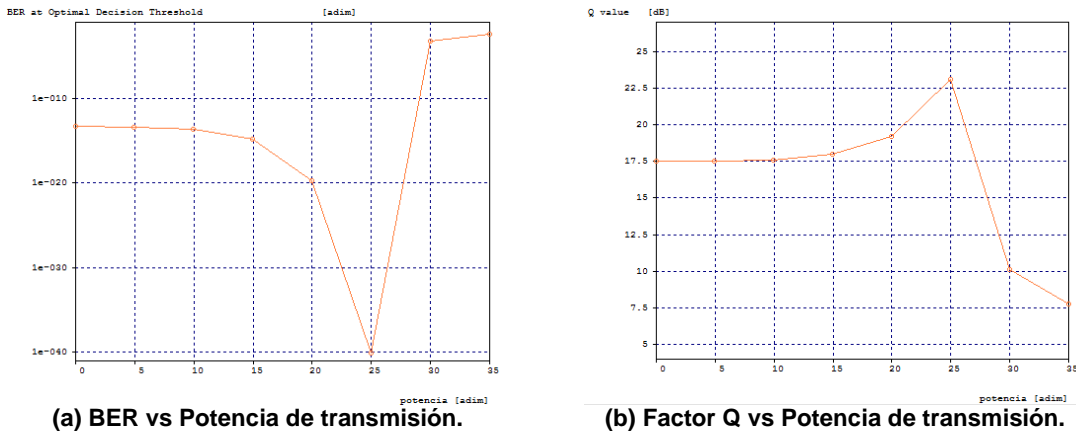


Figura 3.34. Diagramas de correlación (a) BER vs Potencia de transmisión, (b) Factor Q vs Potencia de transmisión, para distancia 5 km, variando potencia de transmisión.

Tabla 3.16. Valor de potencia donde el efecto no lineal SPM empiezan a generar degradaciones considerables, para una distancia de 5 km.

Distancia [km]	Potencia en dBm para un BER=1e-15	Potencia para un factor Q=18 dB
5	28,35	26,98

El límite de potencia en el que se obtienen los niveles aceptables de calidad a la velocidad de 40 Gb/s con el formato de modulación NRZ-OOK es aproximadamente 27 dBm, a los 25 dBm de potencia el sistema se comporta de la mejor manera, ya que se obtienen los valores más altos de calidad y se alcanza una distancia de aproximadamente 7 km, figuras 3.34 (a), 3.34 (b) y tabla 3.16.

Con el fin de observar el ensanchamiento de la señal causado por el efecto no lineal SPM en el espectro óptico, se apagan las pérdidas de la fibra para que las señales de entrada y salida se muestren a un nivel similar de potencia.

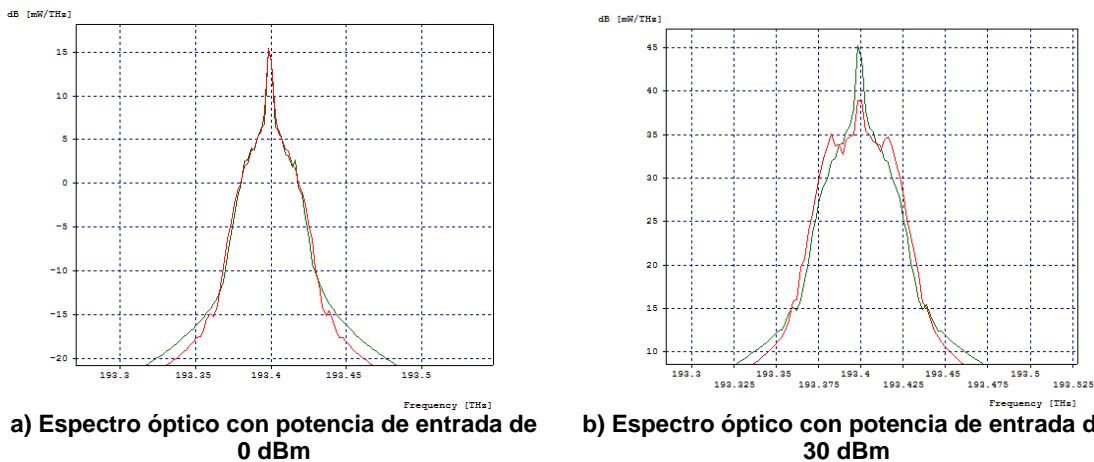


Figura 3.35. Espectros ópticos de entrada y salida para potencias de transmisión a) 0 dBm y b) 30 dBm y distancia 5 km.

Las figuras 3.35 (a) y 3.35 (b) son tomadas a los niveles de potencia de 0 dBm y 30 dBm respectivamente y a una distancia de 5 km, para cada una de ellas la señal de entrada es de color verde y la señal en recepción es la señal de color rojo, en estas se puede observar como al incrementar la potencia de transmisión se presenta un mayor ensanchamiento de la señal enviada, de esta forma se observa la presencia del efecto no lineal SPM y se comprueba la fuerte dependencia de su impacto a medida que se incrementa la potencia de transmisión.

Otro parámetro de transmisión que influye en el impacto que SPM genera en el sistema, es el coeficiente de dispersión de la fibra, ya que si el $CD > 0$ ps/nm/km (régimen de dispersión anómalo), SPM reduce el ensanchamiento que se genera debido a la dispersión ya que tienen signos opuestos, pero si $CD < 0$ ps/nm/km (régimen de dispersión normal), se genera un mayor ensanchamiento de la señal debido a SPM y a la dispersión de la fibra [10]. Esta prueba se realiza solo con el fin de mostrar el impacto que se genera en el sistema al variar este parámetro de transmisión, ya que la fibra Corning SMF 28 tiene una dispersión de 16 ps/nm/km. Para esto se envía una señal en un enlace de 5 km con una potencia de 25 dBm, la cual es considerable para que haya presencia de no linealidades y se varia el parámetro dispersión de la fibra entre -10 ps/nm/km y 16 ps/nm/km.

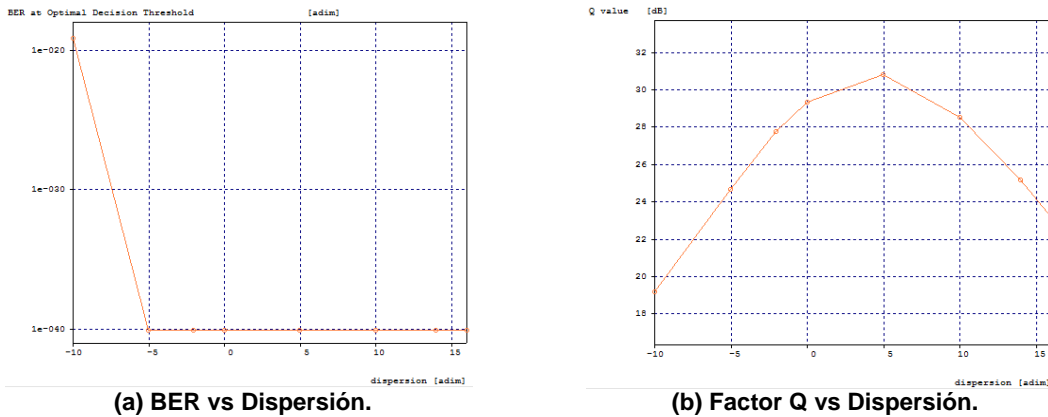


Figura 3.36. Diagramas de correlación a) BER vs Dispersión, b) Factor Q vs Dispersión, distancia 5 km, potencia 25 dBm.

El valor de dispersión que más favorece la transmisión es 5 ps/nm/km ya que se obtienen los valores más altos de calidad y en el que se tienen las condiciones menos favorables es -10 ps/nm/km, figuras 3.36 (a) y 3.36 (b), a continuación se compara el espectro de la señal para estos valores de dispersión.

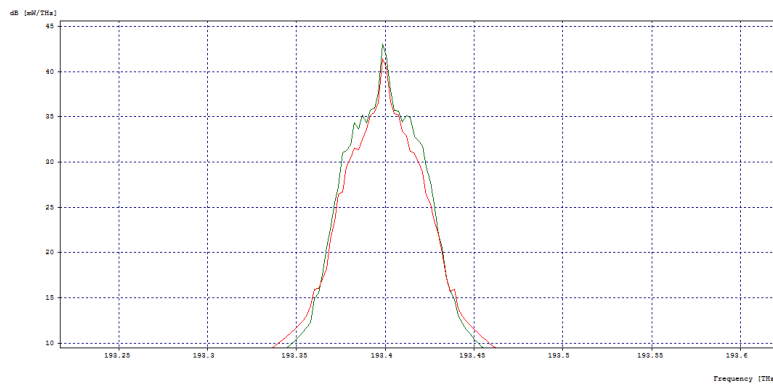


Figura 3.37. Espectro de señal para una $CD=-10$ ps/nm/km (verde) y $CD=5$ ps/nm/km (rojo), potencia de transmisión 30 dBm, distancia 5 km.

En la figura 3.37 se tiene la señal de salida con una dispersión de -10 ps/nm/km (color verde) y una señal de salida con dispersión de 5 ps/nm/km (color rojo), se puede observar que con un valor de dispersión de 5 ps/nm/km se reduce el ensanchamiento debido al efecto no lineal SPM.

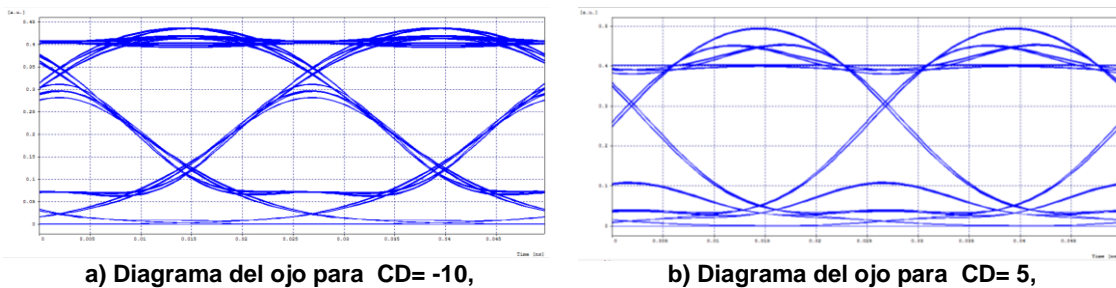


Figura 3.38. Diagramas de ojo para a) $DC=-10$ ps/nm/km y b) $DC=5$ ps/nm/km, distancia 5 km, potencia 30 dBm.

El parámetro de transmisión dispersión cromática influye en el comportamiento del efecto no lineal SPM, y se observa como mejora el comportamiento del sistema con valores específicos en este parámetro de transmisión figuras 3.38 (a) y 3.38 (b).

3.2.2 Análisis del efecto no lineal XPM.

Para el caso de estudio 2 de XPM se tiene el escenario de simulación a 40 Gb/s con el formato de modulación NRZ-OOK. Sobre este caso de estudio se realizan las mismas variaciones realizadas para el caso de estudio 1 de XPM, el cual trabajaba el mismo formato de modulación pero a una tasa de transmisión de 40 Gb/s.

El espaciamiento entre canales es de 100 GHz. Al igual que en el caso de estudio 1 para XPM la potencia del canal 1 se deja constante con el fin de evitar la presencia de SPM sobre este canal y poder así, evaluar el impacto de XPM debido a las altas potencias del canal 2. Por lo tanto el canal 1 se deja fijo con una potencia de 0 dBm mientras se realizan variaciones sobre el canal 2 (canal de bombeo). Como se observó en el caso de estudio 1 para XPM se espera observar la degradación y el ensanchamiento del espectro.

Debido a que la velocidad se ha incrementado a 40 Gb/s, la distancia se disminuye a tan solo 5 km, para una potencia de 0 dBm, como se mostró anteriormente.

La tabla 3.17 presenta las distancia máximas alcanzadas para diferentes variaciones de potencia sobre el canal 2, manteniendo la potencia del canal 1 constante a 0 dBm manteniendo los valores mínimos de calidad de los parámetros ópticos de medida.

Tabla 3.17. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1, manteniendo la potencia constante, para diferentes valores de potencia del canal 2.

Potencia de transmisión del canal 2 [dBm]	Distancia máxima [km] para un BER=1e-15	Distancia máxima [km] para un factor Q=18 dB
0	5,24	5,22
5	5,28	5,21
10	5,27	5,21
15	5,27	5,15
20	4,99	5,05
25	3,65	3,56

Se aprecia que las distancias máximas alcanzadas tanto para BER como para el factor Q son muy similares, por lo que para posteriores análisis se tomará el BER. Se tiene que para los cambios de potencia entre los 0 y 25 dBm la variación en la distancia máxima alcanzada es mínima. Esto supone una disminución de la presencia de XPM para una tasa de 40 Gb/s. En el caso de la transmisión a 10 Gb/s, la degradación debido a XPM se comenzaba a notar desde los 10 dBm de potencia transmitidos a través de canal 2, manteniendo la potencia del canal 1 constante, al igual que en este caso.

En la figura 3.39 se presentan los diagramas de correlación entre potencia y los parámetros ópticos de medida, para determinar la potencia máxima a la cual se puede transmitir sin superar los valores de BER y factor Q definidos anteriormente. La distancia que se ha tomado es de 5 km, realizando una aproximación de la distancia máxima alcanzada a 0 dBm. Las variaciones de potencia se realizan sobre el canal 2 mientras el canal 1 permanece constante a 0 dBm.

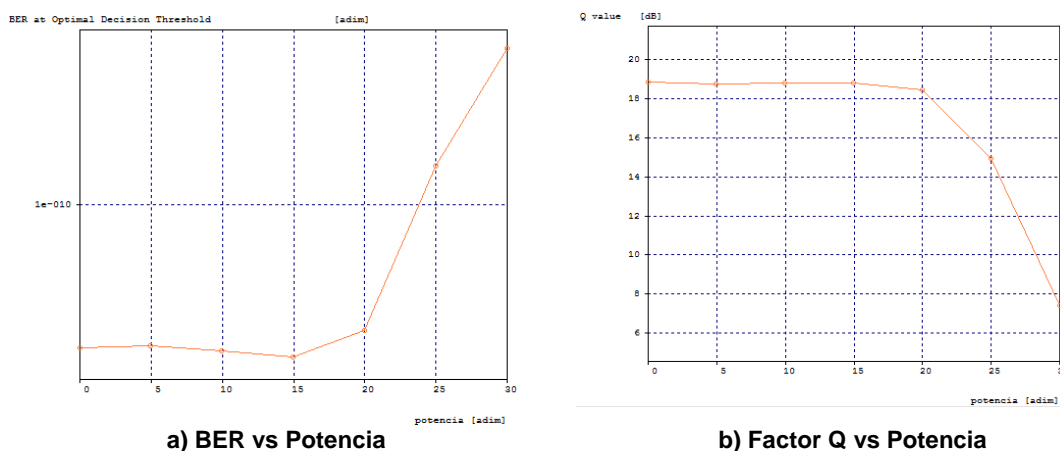


Figura 3.39. a) BER y b) factor Q del canal 1, para diferentes valores en la potencia de transmisión del canal 2 a una distancia de 5 km manteniendo la potencia del canal 1 en 0 dBm.

A través de los diagramas de correlación se obtiene la tabla 3.18, con la cual se determina que la potencia máxima con la cual se puede transmitir a una distancia de 5 km manteniendo los valores mínimos de los parámetros ópticos de medida es de 20,66 dBm.

Tabla 3.18. Potencia máxima de transmisión para alcanzar valores mínimos requerido de los parámetros ópticos de medida.

Distancia [km]	Potencia en dBm para un BER=1e-15	Potencia en dBm para un factor Q=18 dB
5	20,84	20,66

En la figura 3.40 se presenta la superposición de los espectros transmitido y recibido para una potencia de 0 y 20 dBm, y en la figura 3.41 los correspondientes diagramas de ojo. Para esto se apagan las pérdidas de la fibra, con la finalidad de poder comparar los espectros en transmisión y recepción.

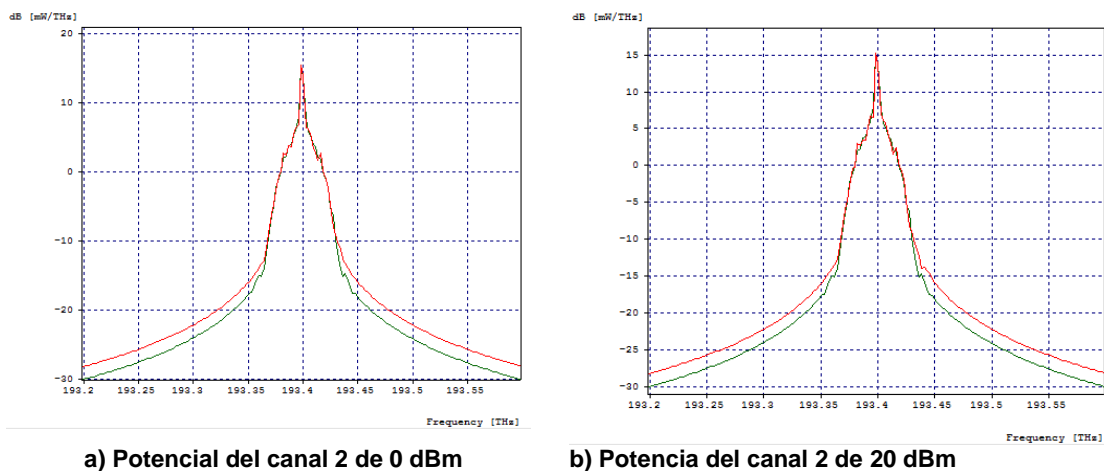


Figura 3.40. Espectro de la señal, en el back to back (verde) y en recepción (rojo), del canal 1 para diferentes valores de potencia en el canal 2.

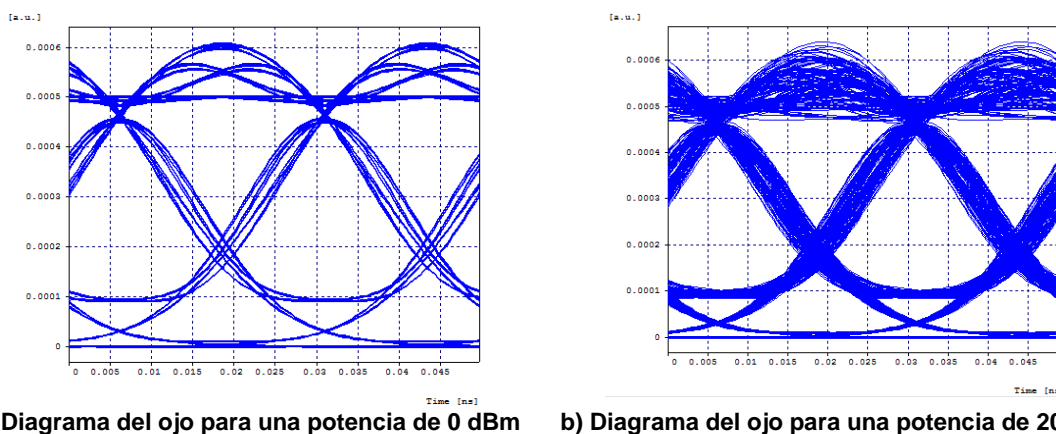


Figura 3.41. Diagrama del ojo en recepción sobre el canal 1 para potencias de a) 0 dBm y b) 20 dBm en el canal 2, manteniendo la potencia del canal 1 a 0 dBm a una distancia de 78 kilómetros.

Aunque los valores de los parámetros ópticos de medida se han degradado, el espectro no muestra un claro ensanchamiento debido a XPM, figura 3.40, y el diagrama del ojo no presenta una degradación tan alta, figura 3.41. Como se realizó anteriormente, se incrementa la potencia sobre el canal 2 para tratar de observar un ensanchamiento sobre la señal debido a XPM. La potencia de transmisión del canal 2 se aumenta a 24 dBm, es necesario aclarar que debido a la tasa de transmisión a la cual se está trabajando, la cual presenta un espectro de la señal mucho más ancho, se hace necesario reducir el ancho de banda del filtro de recepción a 70 GHz para mantener baja la interferencia entre canales. A pesar de este incremento en la potencia de transmisión el ensanchamiento del espectro, debido a XPM, es mínimo y solo se aprecia en la parte superior del espectro, figura 3.42.

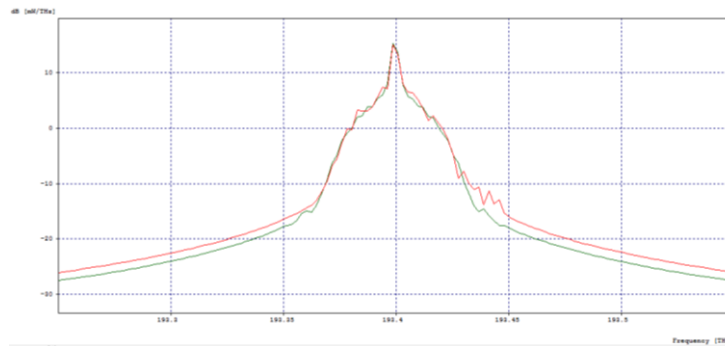


Figura 3.42. Espectro de la señal transmitida (verde) y señal en recepción (rojo) para una potencia de 24 dBm en el canal 2.

Con estos nuevos resultados y analizando los espectros se puede determinar que las degradaciones que se presentan para potencias superiores a 20 dBm se deben más a la interferencia que se presenta entre los canales que a la presencia de XPM, ya que a una potencia de 24 dBm el ensanchamiento del espectro es mínimo, como lo muestra la figura anterior. A través del diagrama del ojo en recepción se observa que no existe una degradación tan alta para grandes potencia como la que se presentaba cuando se transmitía a 10 Gb/s, figura 3.43.

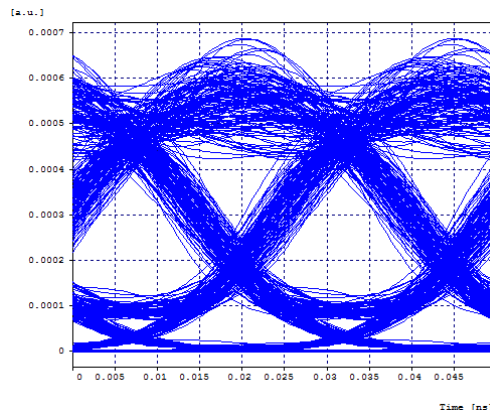


Figura 3.43. Diagrama del ojo en recepción del canal 1 para una potencia en el canal 2 de 24 dBm.

Aunque, como se mencionó en el caso de estudio 1 para XPM, el incremento del espaciado entre los canales disminuye el impacto de XPM, se realiza una prueba con un espaciado de 200 Ghz, pero con una potencia superior a 24 dBm, para tratar de determinar si se presenta ensanchamiento, ya que hasta el momento no se ha podido observar claramente.

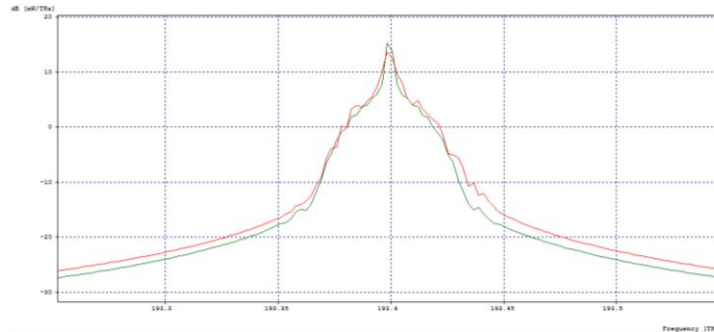


Figura 3.44. Espectro del back to back (verde) y la señal en recepción para una potencia transmitida por el canal 2 de 29 dBm, con un espaciado de 200 Ghz.

Aunque la potencia transmitida a través del canal 2 sea muy alta (29 dBm), el ensanchamiento del espectro es apenas perceptible, figura 3.44, lo cual demuestra que el impacto de XPM para esta tasa de transmisión es mínimo. No se toman potencias más elevadas ya que se genera una alta interferencia entre los canales.

Ya para el caso de estudio 1 de XPM se demostró que la distancia no es un parámetro que incremente la degradación debido a XPM, en cambio, si lo es la dispersión de la fibra. La figura 3.45 presenta el espectro de la señal del canal 1, cuando se transmite una potencia de 20 dBm sobre el canal 2, para un valor de dispersión de 4 y 16 ps/nm/km con un espaciado entre canales de 100 Ghz.

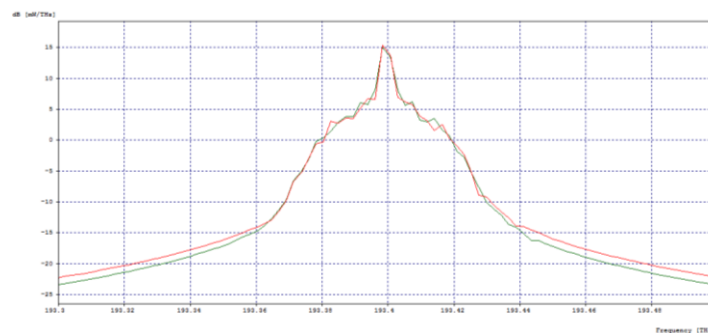


Figura 3.45. Ensanchamiento del espectro para una dispersión de 4 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo) debido a XPM.

Se nota que el espectro que es transmitido a través de la fibra con un valor de dispersión de 4 ps/nm/km no difiere considerablemente del transmitido a través de la fibra con 16 ps/nm/km, figura 3.45. Esto se debe a que el impacto de XPM es muy bajo y no genera degradación en el sistema a 40 Gb/s. La figura 3.46 presenta un gráfico de espectro similar al anterior pero para valores de dispersión de 2 ps/nm/km y 18 ps/nm/km.

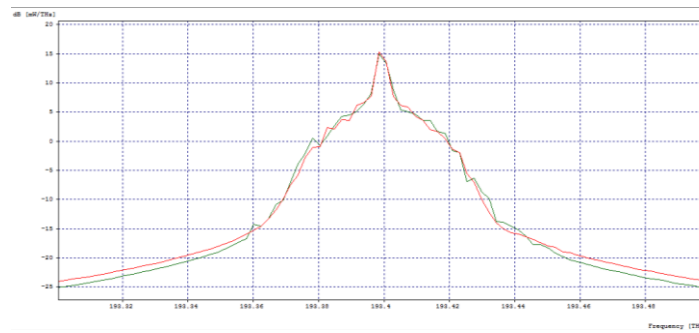


Figura 3.46. Ensanchamiento del espectro para una dispersión de 2 ps/nm/km (verde) y 18 ps/nm/km (rojo) debido a XPM.

Aún para estas variaciones no se observa la presencia de XPM a través del ensanchamiento del espectro. La figura 3.47 muestra la superposición de los espectros para una dispersión de 0 y 16 ps/nm/km, donde se nota un mínimo ensanchamiento del espectro para el mínimo valor de dispersión. Sin embargo, el impacto de XPM sigue siendo muy bajo para el caso de estudio 2, que transmite a 40 Gb/s.

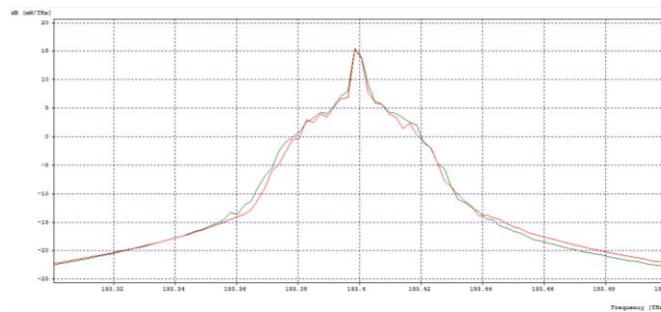


Figura 3.47. Ensanchamiento del espectro para una dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo) debido a XPM.

De igual manera que en los casos anteriores, a medida que se incrementa el valor de dispersión el sistema se degrada, al igual que para valores cercanos a 0 ps/nm/km, siendo este último un valor crítico para el desempeño del sistema, figura 3.48.

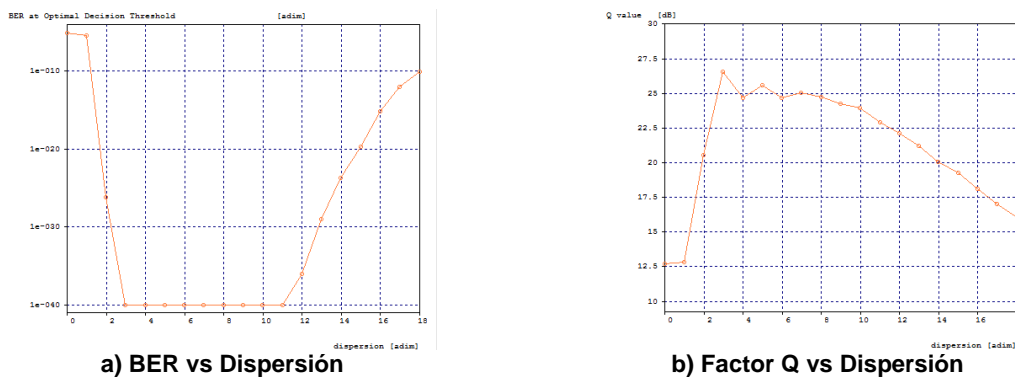


Figura 3.48. Factor Q y BER para diferentes valores de dispersión de la fibra a una distancia de 5 km, para potencias de 0 dBm y 20 dBm para el canal 1 y 2 respectivamente.

Debido a que el ancho del espectro de la señal cuando se transmite a 40 Gb/s es aproximadamente de 80 Ghz no se realizan pruebas con espaciamentos inferiores a 100 Ghz ya que esto implicaría una alta interferencia entre los canales.

3.2.3 Análisis del efecto no lineal FWM.

A diferencia del caso de estudio 1 para FWM, aquí la transmisión se realiza a una velocidad de transmisión de 40 Gb/s, sin embargo, las otras características del sistema, como tipo de fibra, permanecen constantes y corresponden al caso de estudio 1 para FWM. Las variaciones de potencia para este caso de estudio se realizan al tiempo, primero sobre 3 canales y posteriormente sobre los 4 canales, a diferencia de los presentados para XPM donde los incrementos de potencia se realizaban para un solo canal.

Con el fin de comparar el impacto de este efecto con el de XPM se deja constante la potencia sobre el canal 1 a 0 dBm mientras se realizan variaciones en la potencia de transmisión de los canales 2, 3 y 4. Al incrementar la potencia sobre estos canales al tiempo se pretende generar FWM ya que la potencia que incide sobre la fibra es mayor. En la tabla 3.19 se presentan las variaciones de potencia realizadas sobre los canales 2, 3 y 4 mientras la potencia del canal 1 se mantiene constante a 0 dBm, y la distancia que logra alcanzar el canal 1 cuando se incrementa la potencia de los otros canales. Los resultados obtenidos en esta tabla se comparan con los de la tabla 3.17 generada para XPM, para tener un punto de comparación entre las degradaciones generadas por estos dos efectos. Se toma el BER ya que como se ha mencionado y demostrado anteriormente, los valores para el factor Q y BER son muy similares.

Tabla 3.19. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1, para diferentes valores de potencia de los otros canales.

Potencia de transmisión canal 1 [dBm]	Potencia de transmisión canales 2, 3 y 4 [dBm]	Distancia máxima [km] para un BER=1e-15
0	0	5,24
0	5	5,28
0	10	5,25
0	15	5,09
0	20	3,65
0	25	-

La figura 3.49 presenta una comparación de la distancia máxima alcanzada por el canal 1, realizando las variaciones de potencia mencionadas anteriormente para FWM, y las variaciones de potencia generadas en el caso de estudio 2 para XPM.

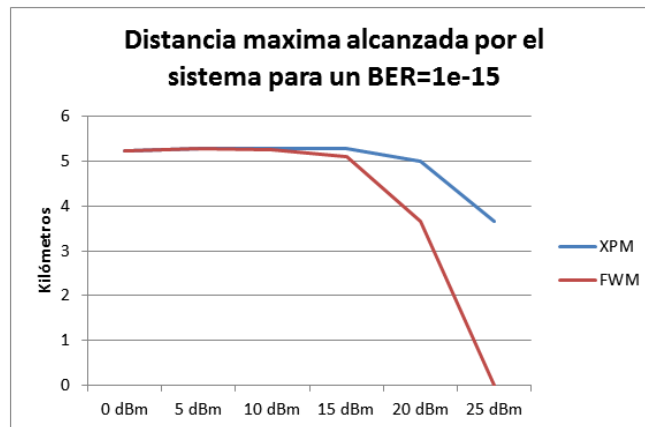


Figura 3.49. Distancia máxima alcanzada por el canal 1 para degradaciones generadas por FWM (rojo) y XPM (azul).

FWM genera una mayor degradación del sistema, más aún teniendo en cuenta que la degradación que se obtuvo para XPM era mínima, y se debía en parte a la interferencia que se generaba, figura 3.49. En las pruebas de XPM el ensanchamiento del espectro no era evidente para las diferentes pruebas realizadas. Además el incremento de la velocidad de transmisión genera una disminución del impacto de XPM, comparado con el sistema de 10 Gb/s (figura 3.20), donde XPM degradaba más el sistema para niveles de potencia entre los 10 y 15 dBm. Para este caso de estudio a 40 Gb/s, y como se aprecia en la anterior gráfica, la degradación debido a FWM es más alta que la generada por XPM limitando el alcance del sistema. La figura 3.50 muestra las componentes generadas por FWM para una potencia de transmisión de 25 dBm.

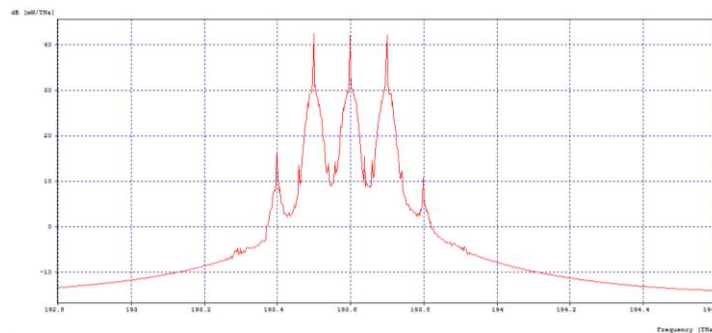


Figura 3.50. Componentes generadas por FWM para una potencia del canal 1 de 0 dBm y 25 dBm para los canales 2, 3 y 4.

El espectro muestra las componentes generadas debido a FWM, sin embargo, el nivel de potencia de dichas componentes es bajo, exceptuando la componente generada después del cuarto canal a 193.8 THz, la cual tiene una potencia considerable que genera interferencia si se transmite un canal a esta longitud de onda, figura 3.50. Teniendo en cuenta que FWM tienen un comportamiento “simétrico” en el cual la componente que se genera a 193.8 THz también va a estar presente en los 193.4 THz, donde se está transmitiendo el canal 1, y esta va a generar degradación de este canal lo que se comprueba en la tabla 3.19. La Figura 3.50 también muestra que el solapamiento entre

el canal 1 y el canal 2 no es tan elevado, sin embargo la componente que se genera sobre ese canal debido a FWM presenta un nivel de potencia suficiente para degradar el canal.

Para incrementar la degradación generada por FWM se aumenta la potencia de los cuatro canales al tiempo, causando que la potencia incidente sobre la fibra sea mayor y se generen componentes debido a FWM con un nivel de potencia más alto. En la tabla 3.20 se presentan las distancias máximas alcanzadas por el canal 1 para diferentes valores de potencia, cumpliendo con los mínimos valores de los parámetros ópticos de medida (BER).

Tabla 3.20. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1, para diferentes valores de potencia en todo el sistema.

Potencia de transmisión [dBm]	Distancia máxima [km] para un BER=1e-15
0	5,24
5	5,26
10	5,32
15	5,47
20	5,64
25	4,31

De la tabla anterior se determina que la degradación es evidente para potencias de transmisión superiores a 20 dBm, donde los niveles de potencia de las componentes generadas por FWM son más altos y generan interferencia a los canales contiguos. A diferencia de lo obtenido en el caso de estudio 1 para FWM, el incremento de potencia no degrada tan rápidamente el sistema, ya que para 10 Gb/s el impacto de FWM en la disminución del alcance del sistema era evidente desde los 15 dBm.

Con base en los anteriores resultados, y con el fin de realizar comparaciones, se toma una distancia de 5 km para el enlace. La figura 3.51 muestra los diagramas de correlación entre potencia y los parámetros de medida óptica BER y factor Q a medida que la potencia de los canales se incrementa desde los 0 hasta los 25 dBm.

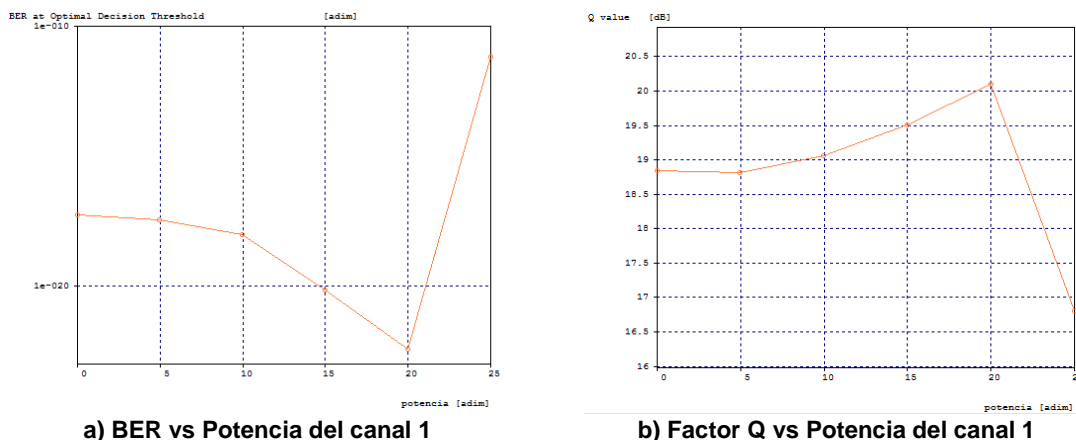


Figura 3.51. Parámetros ópticos de medida del canal 1, para diferentes valores en la potencia de transmisión a una distancia de 5 km.

Para una velocidad de transmisión de 40 Gb/s se puede transmitir con mayor potencia antes de que la señal se comience a degradar, figura 3.51, mientras que a 10 Gb/s la

potencia era más baja. A través de los anteriores diagramas de correlación y de la tabla 3.21 se determina que la potencia máxima con la cual se puede transmitir a 5 km es de 23 dBm.

Tabla 3.21. Potencia máxima de transmisión para alcanzar valores mínimos requerido en los parámetros ópticos de medida.

Distancia [km]	Potencia en dBm para un BER=1e-15	Potencia en dBm para un factor Q=18 dB
5	23,30	23,28

Aunque una potencia de 23 dBm es bastante alta, el nivel de las componentes generadas no es tan alto, y no se observan claramente, figura 3.52. Esto se debe a que FWM también disminuye su impacto para una tasa de transmisión de 40 Gb/s. Debido a que el valor de potencia de las componentes no es tan alto las degradaciones que se observan podrían atribuirse a otro efecto no lineal, sin embargo, ya se demostró que el impacto de XPM es mínimo cuando se trabaja a esta tasa de transmisión. En cuanto a SPM se tenía que el valor de potencia máximo era de 27 dBm, el cual está por encima del valor que se acaba de encontrar para FWM.

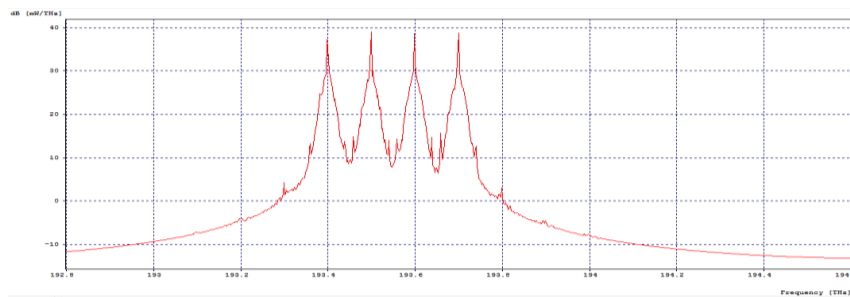


Figura 3.52. Componentes generadas por FWM para una potencia de transmisión de 23 dBm a una distancia de 5 km.

Para una potencia de 25 dBm es evidente que las componentes generadas debido a FWM no aumentan considerablemente el nivel de potencia, figura 3.53, y valores de potencia más altos generan interferencias altas entre los canales.

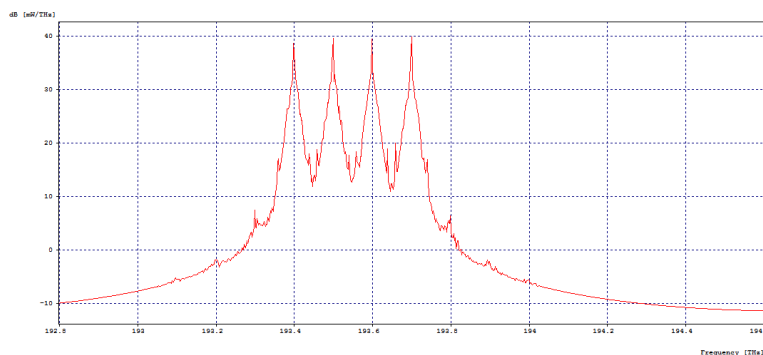


Figura 3.53. Componentes generadas por FWM para una potencia de transmisión de 25 dBm a una distancia de 5 km.

Aunque se nota la degradación del sistema y la aparición de componentes debido a FWM, como se muestra en la figura anterior, FWM no degrada tanto el sistema como ocurría a 10 Gb/s. Esto también se puede apreciar mediante el diagrama del ojo, figura 3.54, el cual no se encuentra tan altamente degradado.

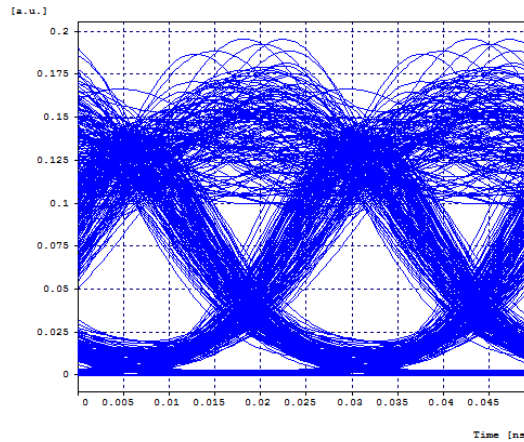


Figura 3.54. Diagrama del ojo en recepción sobre el canal 1 para una potencia de 25 dBm a una distancia de 5 kilómetros.

La distancia no genera una variación en el impacto de FWM, figura 3.55. Ya anteriormente se había realizado el análisis de la distancia en el cual se obtuvo que el impacto de la distancia no era importante para 10 Gb/s. La figura permite deducir la misma conclusión ya que no se presentan variaciones significativas de los niveles de potencia de las componentes, además, FWM tiene un impacto más bajo a 40 Gb/s.

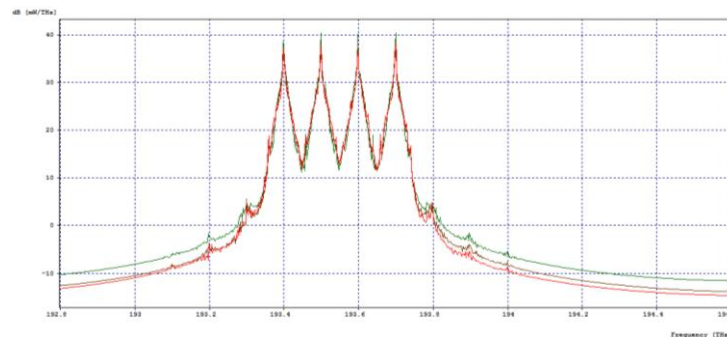


Figura 3.55. Espectro del sistema para una potencia de 23 dBm a los 40 (verde) y 80 (café) y 100 (rojo) km.

Del caso de estudio 1 para FWM se determinó que la dispersión es uno de los parámetros que más impacta sobre el comportamiento de FWM. La figura 3.56 muestra el espectro del sistema para un valor de dispersión de 4 y 16 ps/nm/km. Se transmite a una potencia de 20 dBm y la distancia se fija en 5 km.

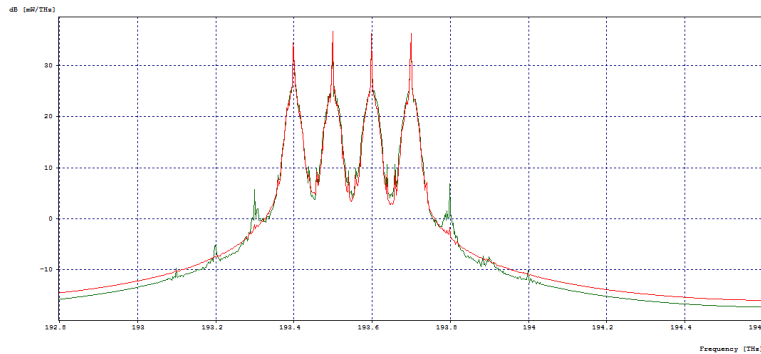


Figura 3.56. Componentes generadas por FWM para una dispersión de 4 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo) para una potencia de 20 dBm y una distancia de 5 km.

En la anterior figura se observa que un incremento del valor de dispersión de la fibra mitiga un poco el impacto de FWM sobre el sistema, reduciendo el nivel de potencia de las componentes, como sucede con el espectro rojo (16 ps/nm/km), donde se mitigan las componentes que aparecen en el espectro en verde (4 ps/nm/km). La figura 3.57 presenta el espectro para un valor de dispersión de 0 (rojo) y 1 (verde) ps/nm/km.

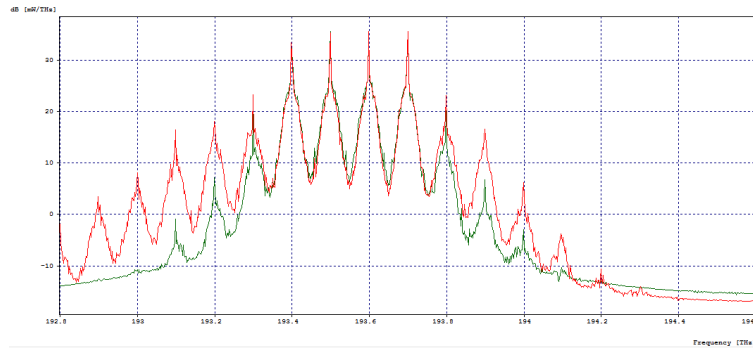


Figura 3.57. Componentes generadas por FWM para una dispersión de 1 ps/nm/km (verde) y 0 ps/nm/km (rojo).

El resultado muestra que las fibras DSF también son inadecuadas para compensar efectos no lineales para tasas de transmisión de 40 Gb/s. De igual manera, se observa que un valor de dispersión de la fibra de 4 ps/nm/km ayuda a mitigar el nivel de potencia de las componentes generadas por FWM, sin embargo, las mejoras obtenidas para valores superiores a este valor de dispersión no son tan importantes. Adicional a esto los valores altos, como ya se ha tratado anteriormente, generan degradación del sistema, figura 3.58, donde se presentan el BER y facto Q del sistema.

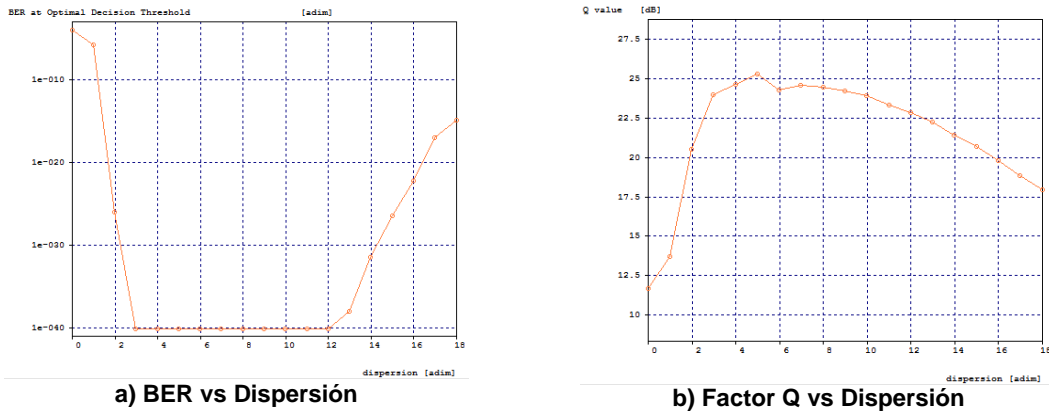
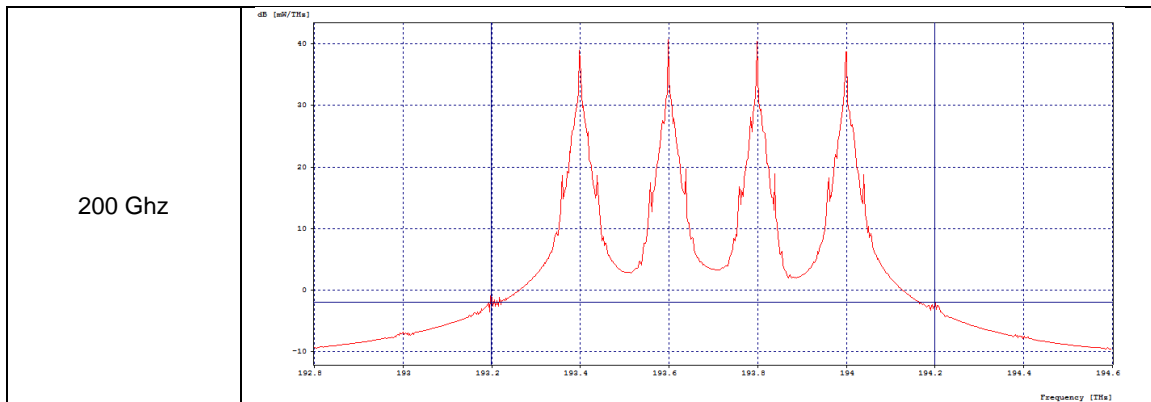


Figura 3.58. a) Factor Q y b) BER para diferentes valores de dispersión de la fibra a una distancia de 5 km, para una potencia de transmisión de 20 dBm.

La tabla 3.22 presenta los espectros para diferentes espaciamientos entre los canales, factor que incrementa el impacto de FWM sobre el sistema. La potencia a las cual se transmiten los canales es de 25 dBm a una distancia de 5 km.

Tabla 3.22. Espectro del sistema para espaciamientos de 50, 100 y 200 Ghz entre los canales.

Espaciamiento entre canales [GHZ]	Espectro de las señales
50 Ghz	
100 Ghz	



Cuando el espaciamiento entre los canales es de 50 Ghz se presenta una alta interferencia entre ellos, debido al solapamiento que existe, y no se alcanzan a diferenciar las componentes generadas por FWM. Cuando el espaciamiento se incrementa a 100 Ghz se pueden apreciar las componentes, las cuales alcanzan los 2 dBm, mientras que para los 200 Ghz el pico de potencia alcanza los -2 dBm. Esto muestra que el incremento del espaciamiento genera una disminución en la potencia de las componentes generadas debido a FWM. Con un espaciamiento de 50 Ghz no es posible alcanzar los valores mínimos de los parámetros ópticos de medida, ya que el nivel de interferencia entre los canales es muy alto, debido a esta razón solo se realiza la comparación entre los sistemas con 100 y 200 Ghz de espaciamientos. La tabla 3.23 muestra la distancia máxima alcanzada para diferentes potencias con un espaciamiento de 200 Ghz.

Tabla 3.23. Distancia máxima alcanzada para diferentes potencias, con un espaciamiento de 200 Ghz.

Potencia de transmisión [dBm]	Distancia máxima [km] para un BER=1e-15
0	5,25
5	5,28
10	5,34
15	5,47
20	5,87
25	5,71

De las tablas 3.20 y 3.23 se toman los valores de distancia máxima alcanzados para diferentes potencias para generar la figura 3.59, en la cual se compara la distancia máxima alcanzada por el sistema para espaciamientos entre canales de 100 y 200 Ghz.

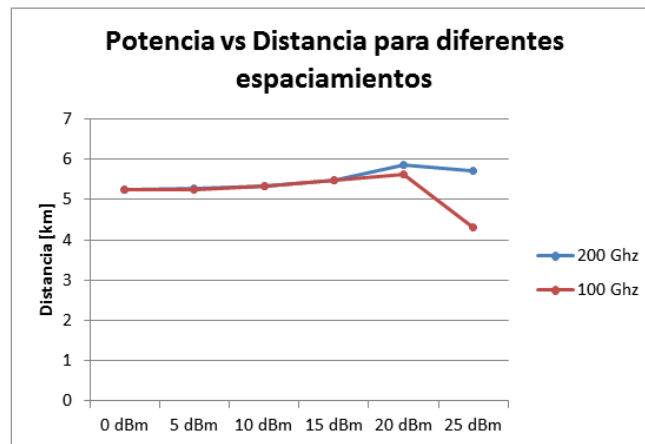


Figura 3.59. Potencia de entrada sobre el canal 1 vs Distancia máxima alcanzada para un BER de $1e-15$ para espaciamientos de 100 y 200 Ghz.

Debido a que el impacto de FWM para una velocidad de transmisión de 40 Gb/s se reduce, no se tiene una degradación tan marcada en la distancia máxima alcanzada como sucedía para 10 Gb/s. Se tiene que para un espaciamiento entre canales de 200 Ghz la limitación de la distancia debida a FWM es mínima ya que el nivel de potencia de las componentes generadas es muy bajo. Con un espaciamiento de 100 Ghz se observa una mayor degradación debido a FWM.

En este caso de estudio, el impacto de los efectos no lineales no fue tan marcado como en el caso de estudio 1, ya que como se esperaba debido al incremento en la velocidad de transmisión de 10 Gb/s a 40 Gb/s, se genera una reducción en el impacto de las no linealidades en el sistema, pero trae como consecuencia una considerable disminución en la distancia del enlace (aproximadamente 5 km).

En este caso de estudio se evidenció la aparición de los efectos no lineales, debido a que se trabajó con un formato de modulación que no es muy robusto frente a este tipo de degradaciones, sin embargo, el impacto que estos tienen sobre el sistema es menos degradante que cuando se trabajaba a 10 Gb/s.

Principalmente a través del espectro óptico de la señal se notó de forma clara la presencia de los efectos no lineales y que los principales parámetros de transmisión que rigen el comportamiento de la mayoría de estos, son la potencia de transmisión y el coeficiente de dispersión de la fibra.

3.3 Caso de estudio 3, formato de modulación RZ-DPSK y velocidad de transmisión de 10 Gb/s.

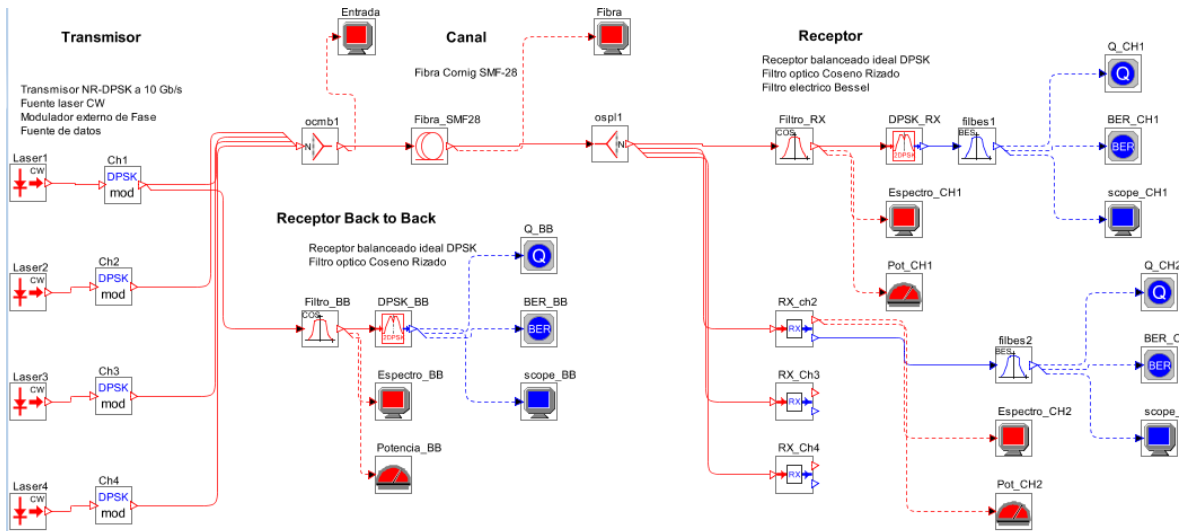


Figura 3.60. Escenario de simulación para el formato de modulación RZ-DPSK y velocidad de transmisión de 10Gb/s.

En la figura 3.60 está implementado el sistema para el formato de modulación RZ-DPSK y una velocidad de transmisión de 10 Gb/s.

A continuación se muestra la señal de entrada a una velocidad de transmisión de 10 Gb/s y formato de modulación RZ-DPSK, tomada en el receptor Back to Back, figura 3.61, con el fin de establecer una comparación entre la señal a la entrada del sistema y su comportamiento al final del enlace.

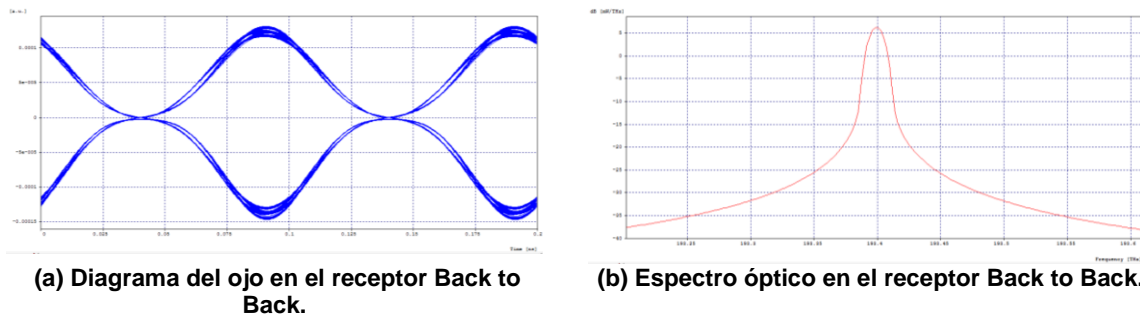


Figura 3.61. (a) Diagrama del ojo y (b) Espectro óptico en el receptor Back to back.

Tanto para el diagrama del ojo como para el espectro óptico la señal de entrada medida en el receptor back to back no presenta degradaciones significativas, figura 3.61.

Para llevar a cabo la comparación entre la señal de entrada y la señal al final del enlace, se procede a encontrar la distancia máxima en la que el sistema cuenta con los valores

aceptables en los factores de calidad $BER=1e-15$, factor $Q=18$ dB, sensibilidad del receptor = -32 dBm.

- **Distancia máxima que alcanza el sistema configurado con los parámetros típicos de transmisión para velocidad de transmisión de 10 Gb/s y formato de modulación RZ-DPSK**

Para determinar la distancia máxima en la que el sistema cuenta con los valores aceptables en los parámetros de calidad, se configura el sistema con valores típicos en los parámetros de transmisión, los cuales son: 4 canales, espaciamiento entre canales de 100 GHz, potencia de transmisión de 0 dBm por canal, formato de modulación RZ-DPSK y se varía la distancia del enlace, posteriormente se llevan a cabo diferentes medidas sobre el canal a 1550.12 nm y se obtienen los siguientes resultados.

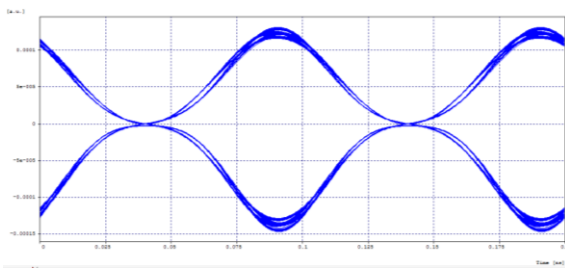
Tabla 3.24. Distancia Máxima que se alcanza a una potencia de 0 dBm, espaciamiento entre canales de 0.8nm y velocidad de 10 Gb/s con el formato de modulación RZ-DPSK.

Potencia de transmisión [dBm]	Distancia máxima [km] para un $BER=1e-15$	Distancia máxima [km] para un factor $Q=18$ dB	Potencia en recepción [dBm]
0	53,93	53,04	-21.19

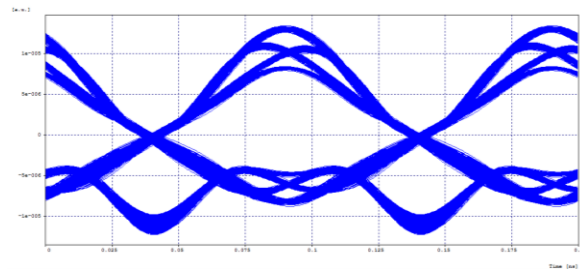
Para una potencia de transmisión de 0 dBm en los cuatro canales y una separación entre canales de 100 GHz (0.8 nm), se alcanza una distancia máxima de aproximadamente 53 km manteniendo los valores de los parámetros de calidad definidos anteriormente, tabla 3.24.

A continuación se muestra el comportamiento del sistema, medido en el receptor back to back y a una distancia de 5 km, distancia en la cual se evidencian ciertas degradaciones, figura 3.62 (a), (b), (f). También se observa la degradación generada en el sistema al incrementar la distancia del enlace figura 3.62 (c), (d), (e).

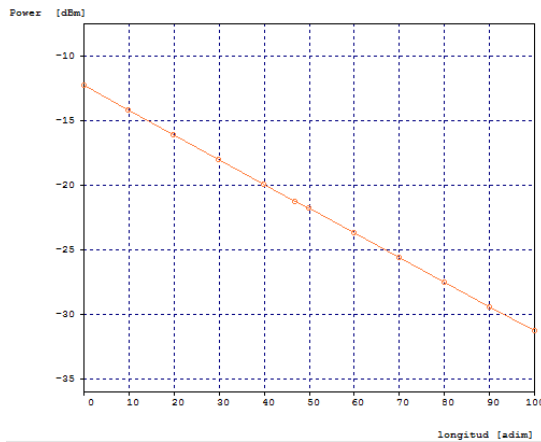
Para una potencia de transmisión de 0 dBm en los cuatro canales, se alcanza una distancia máxima de aproximadamente 53 km con los parámetros de calidad aceptables.



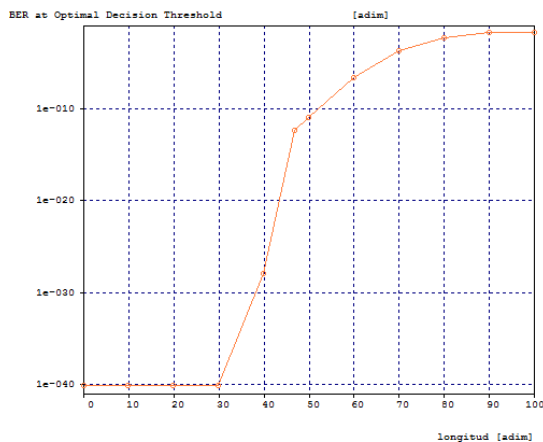
(a) Diagrama del ojo en el receptor Back to Back.



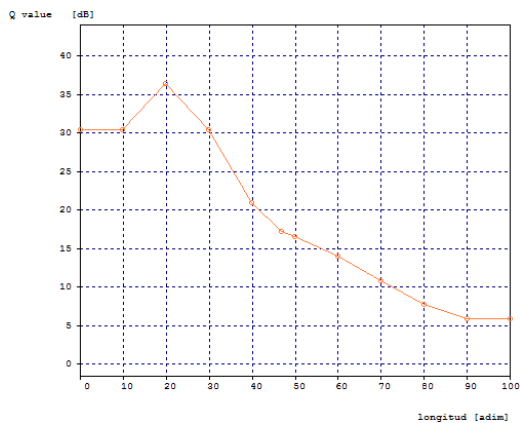
(b) Diagrama del ojo a una distancia de 53 km



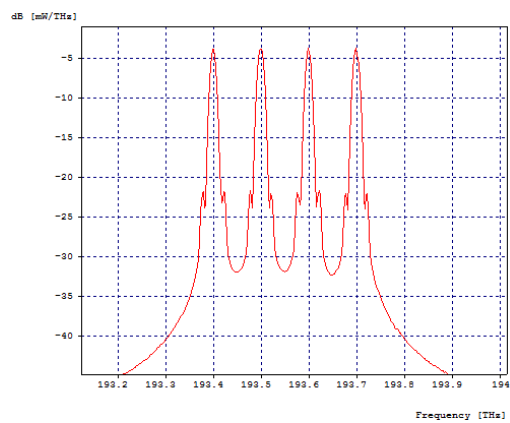
(c) Potencia en recepción vs Distancia de transmisión



(d) BER vs Distancia de transmisión



(e) Factor Q vs Distancia de transmisión



(f) Espectro óptico en recepción a una distancia de 53 km

Figura 3.62. Diagramas de correlación y de ojo para el canal a 1550.12nm, receptor back to back y distancia 78 km, 0 dBm de potencia en los cuatro canales.

3.3.1 Análisis del efecto no lineal SPM.

Para el análisis del efecto no lineal SPM se monitorea un solo canal (1550.12nm), y se configura el sistema con un espaciado considerable entre canales (200 GHz), se dejan constantes las potencias de transmisión de los 3 canales restantes a una potencia

de 0 dBm con el fin de evitar la presencia de otros efectos no lineales como FWM o XPM sobre este canal.

Se aísla el efecto no lineal SPM para observar su impacto en un solo canal, debido a que este produce un efecto de auto modulación de fase, el cual no depende del número de canales que tenga el sistema ni de la separación entre ellos.

Para este análisis se evalúa el comportamiento de los factores de calidad del canal a diferentes potencias de transmisión, con el fin de encontrar las distancias máximas que se pueden alcanzar sin sobrepasar dichos límites establecidos en la sección 2.4, esto se hace ya que la potencia de transmisión es uno de los parámetros de transmisión más influyentes en el impacto de los efectos no lineales en los sistemas de comunicaciones ópticas, causando importantes limitaciones en su diseño.

Para llevar a cabo estas mediciones se evaluaron los parámetros de calidad, BER Y Factor Q dejando fijas las diferentes potencias de transmisión (5, 10, 15, 20 y 25 dBm) y variando la longitud del enlace de 10 km hasta 100 km, con incrementos de 10 km, en una fibra Corning SMF 28 la cual viene predefinida en el simulador y cuenta con diversos parámetros intrínsecos de este tipo de fibra, como coeficiente de dispersión, área efectiva, entre otros.

Tabla 3.25. Distancia máxima que se alcanza a diferentes potencias de transmisión a una velocidad de 10 Gb/s con el formato de modulación RZ-DPSK.

Potencia en transmisión [dBm]	Distancia máxima [km] para un BER=1e-015	Distancia máxima [km] para un factor Q=18 dB
0	53,93	53,04
5	54,13	53,30
10	54,35	53,37
15	54,84	53,99
20	57,43	56,53
25	67,13	66,35
30	79,55	79,55
31	63,49	62,25
32	50,49	50,37

A medida que se incrementa la potencia de transmisión, la distancia en la que se obtienen los niveles aceptables de calidad también aumenta, pero después de sobrepasar un nivel de potencia, esta distancia disminuye considerablemente, alcanzando una distancia aproximada de 80 km para una potencia de 30 dBm, comparado con los 50 km que se alcanzan a una potencia de entrada de 32 dBm, tabla 3.25.

Con el fin de llevar a cabo una comparación entre el funcionamiento del sistema con los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-DPSK, las pruebas para este último también se realizan en un enlace de 78 km, para SPM.

Para determinar el valor de potencia donde los efectos no lineales empiezan a generar degradaciones considerables se lleva a cabo una prueba donde se varía la potencia de transmisión de 0 dBm a 35 dBm y se configura una distancia constante de 78 km. En la figura 3.63 se observa que para valores superiores a 30 dBm de potencia se presentan

degradaciones considerables en el sistema y por esta razón, al aumentar la potencia de transmisión, la distancia que se alcanza con niveles aceptables en los parámetros de calidad disminuye.

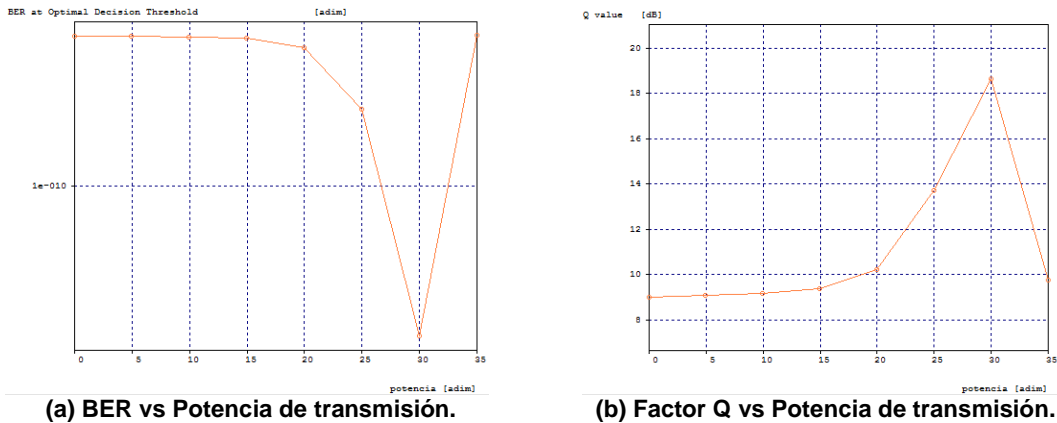


Figura 3.63. Diagramas de correlación (a) BER vs Potencia de transmisión, (b) Factor Q vs Potencia de transmisión, para distancia 78 km, variando potencia de transmisión.

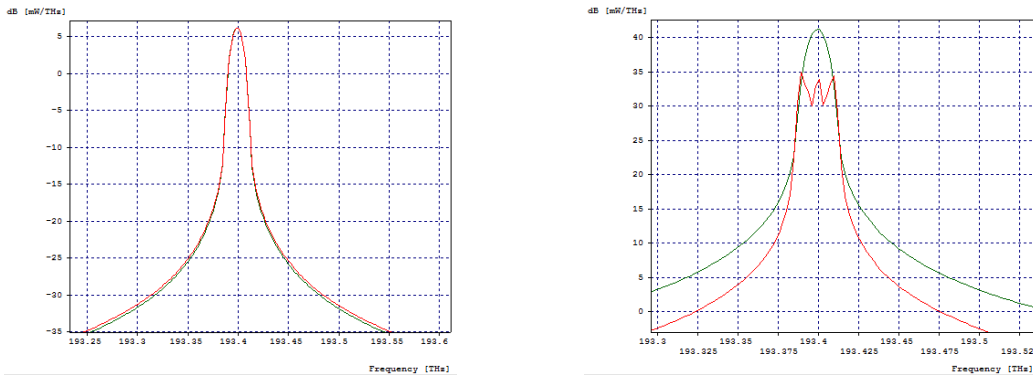
Tabla 3.26 Valor de potencia donde los efectos no lineales empiezan a generar degradaciones considerables, para una distancia de 78 km.

Distancia [km]	Potencia en dBm para un BER=1e-15	Potencia para un factor Q=18 dB
78	30,77	30,36

El límite de potencia en el que se obtienen los niveles aceptables de calidad a la velocidad de 10 Gb/s con el formato de modulación RZ-DPSK es aproximadamente 31 dBm, a los 30 dBm de potencia el sistema se comporta de la mejor manera, ya que se obtienen los valores más altos de calidad y se alcanza una distancia de aproximadamente 80 km, figura 3,63 (a) y 3.63 (b).

El rendimiento del sistema mejora al ser implementado el formato de modulación RZ-DPSK, ya que se pueden lograr enlaces hasta de aproximadamente 80 km, también según la tabla 3.25 se evidencia que este formato de modulación trabaja mejor a altas potencias y presenta una mayor inmunidad a las no linealidades en comparación al formato de modulación NRZ-OOK.

Con el fin de observar el ensanchamiento de la señal causado por el efecto no lineal SPM en el espectro óptico, se apagan las pérdidas de la fibra para que las señales de entrada y salida se muestren a un nivel similar de potencia.

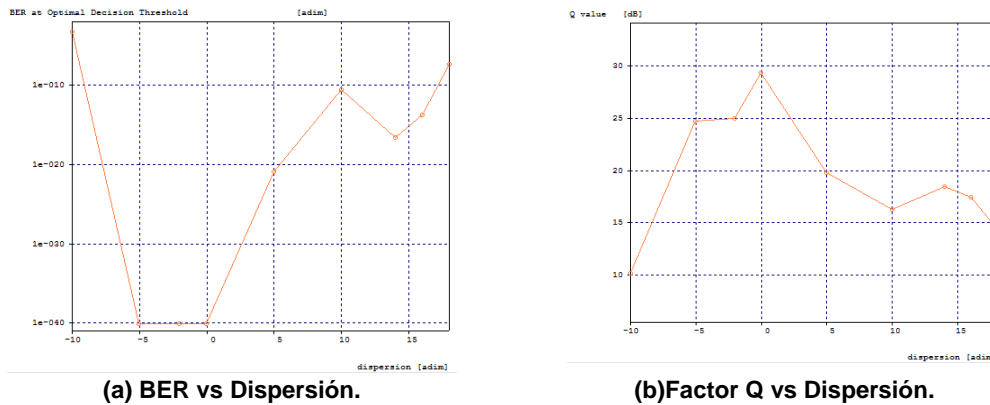


(a) Espectro óptico con potencia de entrada de 0 dBm (b) Espectro óptico a la salida con potencia de entrada de 35 dBm

Figura 3.64. Espectros ópticos de entrada y salida para potencias de transmisión a) 0dBm y b) 35 dBm y distancia 78 km.

Las figuras 3.64 (a) y 3.64 (b) son tomadas a los niveles de potencia de 0 dBm y 35 dBm respectivamente y a una distancia de 78 km, para cada una de ellas la señal de entrada es de color verde y la señal en recepción es la señal de color rojo, en estas se puede observar que al incrementar la potencia de transmisión no se presenta un ensanchamiento de la señal enviada, por lo que no se genera degradación debido a SPM lo cual demuestra la robustez de este formato de modulación frente a esta degradación.

Otro parámetro de transmisión que influye en el impacto que SPM genera en el sistema, es el coeficiente de dispersión de la fibra, ya que si el $CD > 0$ (régimen de dispersión anómalo), SPM reduce el ensanchamiento que se genera debido a la dispersión ya que tienen signos opuestos, pero si $CD < 0$ (régimen de dispersión normal), se genera un mayor ensanchamiento de la señal debido a SPM y a la dispersión de la fibra [10]. Esta prueba se realiza solo con el fin de mostrar el impacto que se genera en el sistema al variar este parámetro de transmisión, ya que la fibra Corning SMF 28 tiene una dispersión de 16 ps/nm/km. Para esto se envía una señal en un enlace de 78 km con una potencia de 30 dBm, la cual es considerable para que haya presencia de no linealidades y se varía el parámetro dispersión de la fibra entre -10 ps/nm/km y 16 ps/nm/km.



(a) BER vs Dispersión.

(b) Factor Q vs Dispersión.

Figura 3.65. Diagramas de correlación a) BER vs Dispersión, b) Factor Q vs Dispersión, distancia 78 km, potencia 30 dBm.

El valor de dispersión que más favorece la transmisión es 0 ps/nm/km ya que se obtienen los valores más altos de calidad y en el que se tienen las condiciones menos favorables es -10 ps/nm/km, figuras 3.65 (a) y 3.65 (b), pero debido a que un coeficiente de dispersión cromática bajo incrementa el deterioro no lineal entre canales [10], se obvia este resultado, a continuación se compara el espectro de la señal para valores de dispersión de -10 ps/nm/km y 16 ps/nm/km este último es el valor de dispersión que la herramienta de simulación tiene definido para la fibra Corning SMF-28.

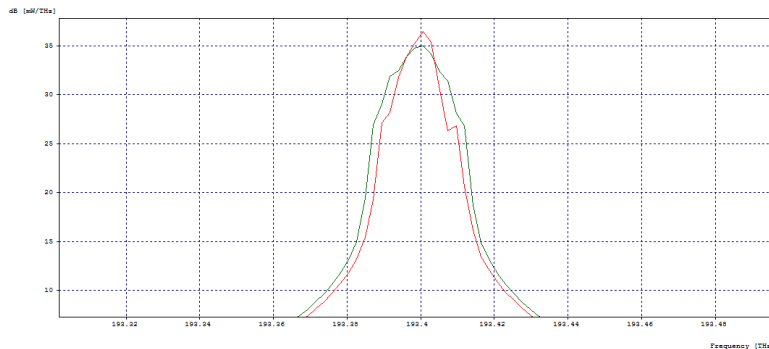


Figura 3.66. Espectro de señal para una CD=-10 ps/nm/km (verde) y CD=16 ps/nm/km (rojo), potencia de transmisión 30 dBm, distancia 78 km.

En la figura 3.66 se tiene la señal de salida con una dispersión de -10 ps/nm/km (color verde) y una señal de salida con dispersión de 16 ps/nm/km (color rojo), se puede observar que con un valor de dispersión de 16 ps/nm/km el ensanchamiento debido al efecto no lineal SPM se reduce notablemente.

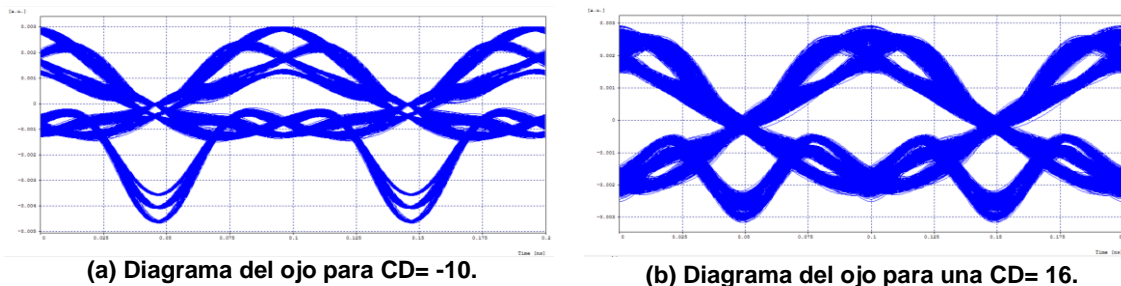


Figura 3.67. Diagramas de ojo para a) DC=-10 ps/nm/km y b) DC=16 ps/nm/km, distancia 78 km, potencia 30 dBm.

El parámetro de transmisión dispersión cromática influye en el comportamiento del efecto no lineal SPM, para una señal modulada con el formato RZ-DPSK, en los diagramas de ojo de la figura 3.67 se observa que al tener una dispersión positiva se mejora notablemente la calidad de la señal.

3.3.2 Análisis del efecto no lineal XPM.

Se realizan las mismas variaciones especificadas para el caso de estudio 2 para XPM, en el cual se varía la potencia del canal 2 para determinar el impacto sobre el canal 1.

La tabla 3.27 presenta la distancia máxima que se alcanza manteniendo los valores mínimos definidos para los parámetros ópticos de medida ($BER=1e-15$ y factor $Q=18$) ante variaciones en la potencia de transmisión del canal 2. Las medidas se realizan sobre el canal 1, el cual es el que sufre las degradaciones generadas por XPM. En la tabla 3.27 solo se presenta la distancia para el BER requerido, ya que la distancia para satisfacer el valor de factor Q es muy similar.

Tabla 3.27. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1, manteniendo la potencia constante a 0 dBm, para diferentes valores de potencia del canal 2.

Potencia de transmisión del canal 2 [dBm]	Distancia máxima [km] para un $BER=1e-15$
0	53,90
5	54,02
10	53,84
15	52,94
20	53,41
25	53,59
30	56,30
35	41,00

La tabla anterior (tabla 3.27) permite determinar que el sistema implementado con este formato de modulación se degrada para potencias superiores a los 30 dBm, a diferencia del formato NRZ-OOK, donde a potencias superiores a los 12 dBm ya comenzaban las degradaciones y a potencias de 30 dBm la señal ya se encontraba altamente degradada. Esto demuestra que el formato RZ-DPSK es más robusto frente a altas potencias de transmisión, sin embargo, este formato también requiere de una potencia elevada para alcanzar mayores distancias, en este caso 30 dBm para los 56 km. Al tolerar estas potencias tan elevadas sobre el canal contiguo, puede que estas degradaciones se presenten por interferencia que genera el solapamiento entre canales, y no por la presencia de XPM. Sin embargo, hasta que no se realice el análisis del espectro no se puede concluir que el formato de modulación RZ-DPSK mitigue completamente el impacto de XPM, a pesar de esto se prevé una mitigación de este efecto no lineal debido a la robustez del formato de modulación. La tabla anterior muestra que con este formato se pueden tener diferencias de potencia entre los canales próximos (en este caso canal 2) de 30 dBm antes de que se comience a degradar el sistema. La distancia máxima es de 54 km, sin embargo esta se aproxima a 53 km para poder realizar comparación con otros efectos no lineales de este caso de estudio, además, tener un punto de referencia para posteriormente determinar efecto conjunto de los efectos no lineales. A los 30 dBm se aumenta la distancia máxima alcanzada por el sistema, esto puede deberse a que debido a que se inyecta una mayor potencia sobre la fibra y a que este formato de modulación requiere una potencia más alta para obtener mejores resultados, se genere un efecto de bombeo de potencia.

La figura 3.68 muestra los diagramas de correlación entre potencia y los parámetros de medida óptica BER y factor Q , donde la potencia sobre el canal medido (canal 1) permanece constante en 0 dBm mientras se realizan variaciones de potencia en el canal 2.

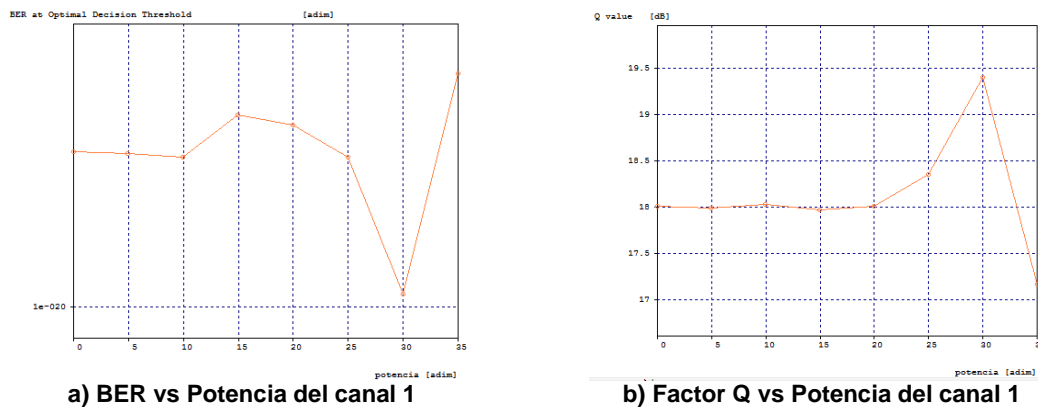


Figura 3.68. Parámetros ópticos de medida del canal 1, para diferentes valores en la potencia de transmisión del canal 2 con una distancia de 53 km.

De los diagramas de correlación presentados en la figura anterior se determina la potencia máxima a la cual se puede transmitir. El resultado de estos valores se presenta en la tabla 3.28, la cual muestra el valor máximo de potencia para cumplir con los valores mínimos de BER y factor Q. Así se determina que la potencia máxima que se puede transmitir sobre el canal adyacente es de 33 dBm.

Tabla 3.28. Potencia máxima de transmisión para alcanzar valores mínimos requerido de los parámetros ópticos de medida.

Distancia [km]	Potencia en dBm para un BER=1e-15	Potencia en dBm para un factor Q=18 dB
53	33,26	33,13

Ahora se determina si el espectro sufre algún ensanchamiento debido a XPM. En la figura 3.69 se tiene la superposición de los espectros del back to back y el de recepción del canal 1 para una potencia de 0 y 30 dBm sobre el canal 2, y en la figura 3.70 los correspondientes diagramas de ojo. Se toma una potencia inferior a la máxima encontrada en la tabla 3.28 para reducir un poco la interferencia generada por el canal 2 sobre el canal de medida (canal 1). Para esto se apagan las pérdidas de la fibra, con la finalidad de poder comparar los espectros en transmisión y recepción.

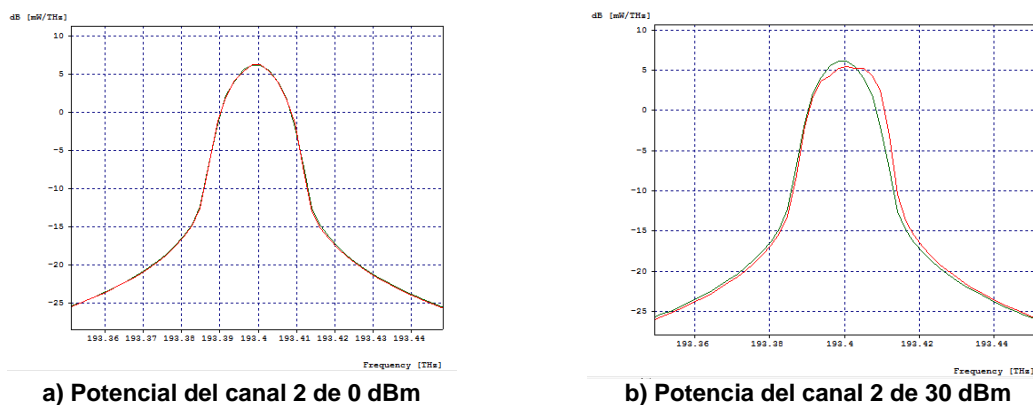


Figura 3.69. Espectro en el back to back (verde) y en recepción (rojo) del canal 1 para diferentes valores de potencia de transmisión sobre el canal 2 a una distancia de 53 km.

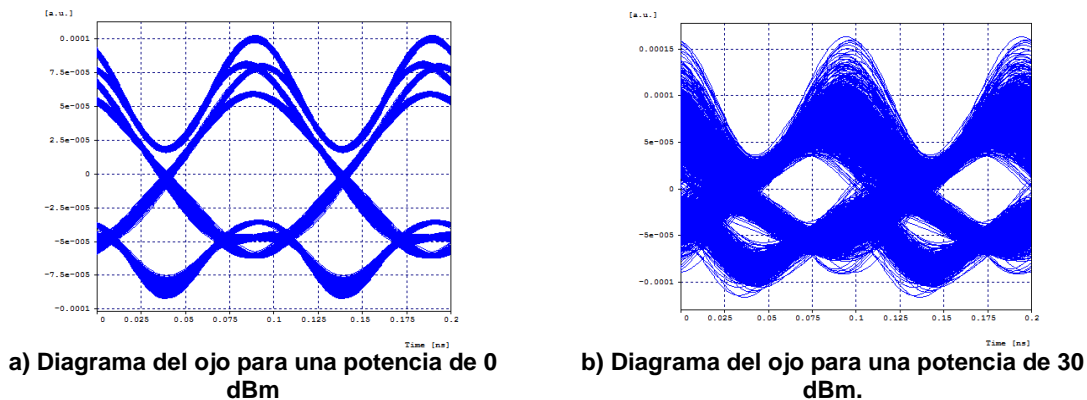


Figura 3.70. Diagrama del ojo en recepción sobre el canal 1 para potencias de a) 0 dBm y b) 30 dBm en el canal 2, manteniendo la potencia del canal 1 a 0 dBm a una distancia de 53 kilómetros.

A pesar de que la potencia sobre el canal adyacente es alta y a que los parámetros ópticos de medida ya comienzan a degradarse no se aprecia ensanchamiento del espectro debido a XPM, figura 3.69. En esta se observa un corrimiento del espectro del lado derecho, sin embargo, este se debe a la alta potencia que se transmite por el canal adyacente, lo cual generan un solapamiento y por lo tanto una distorsión que es la causante de la degradación del sistema, mientras que el lado izquierdo no presenta variación. Esto demuestra que el formato de modulación RZ-DPSK genera una alta mitigación de XPM para sistemas transmitiendo a una velocidad de 10 Gb/s, contrario a lo que sucedía para NRZ-OOK, donde se notaba el ensanchamiento del espectro debido a XPM. La degradación en el diagrama del ojo se debe en gran parte a la interferencia que genera el canal adyacente, figura 3.70. Debido a que no existe presencia de XPM no se hace necesario realizar algunas de las pruebas realizadas en el caso de estudio 1 para XPM, siendo la interferencia generada por el canal 2 sobre el canal 1 una de las causantes de la degradación del sistema. Sin embargo, uno de los parámetros que influye en la presencia de los efectos no lineales es la dispersión de la fibra, por esta razón las variaciones sobre este parámetro se realizan para ver si valores bajos de dispersión generan XPM.

La figura 3.71 presenta el espectro para un valor de dispersión de la fibra de 4 (verde) y 16 (rojo) ps/nm/km para una potencia de transmisión de 25 dBm a una distancia de 53 km. Esta potencia se toma debido a que potencias superiores generan una alta interferencia que degrada en gran medida el espectro y no permite observar si existe presencia de XPM para los diferentes valores de dispersión. Para estos valores de dispersión no se presenta ensanchamiento del espectro. Sin embargo, un valor de dispersión de 0 ps/nm/km sí genera XPM, figura 3.72, aunque valores pequeños de dispersión de la fibra son suficientes para mitigar la degradación generada por XPM.

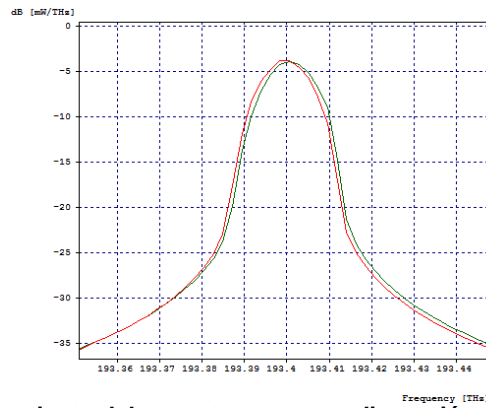


Figura 3.71. Ensanchamiento del espectro para una dispersión de 4 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo) debido a XPM, para una potencia de 25 dBm y una distancia de 53 km.

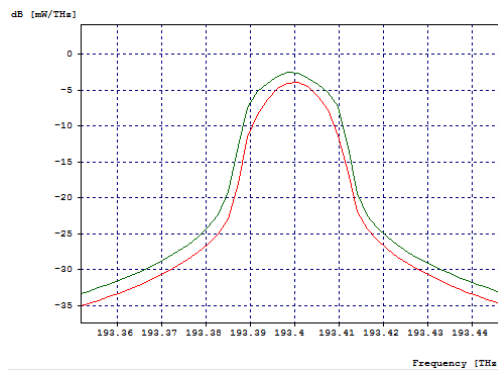


Figura 3.72. Ensanchamiento del espectro para una dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo) debido a XPM, para una potencia de 25 dBm y distancia de 53 km.

Un valor de dispersión de 0 ps/nm/km es un valor crítico ya que genera una alta degradación del sistema, sin embargo, un pequeño incremento en el valor de este parámetro genera una mejora importante. A pesar de esto, valores superiores a 6 ps/nm/km comienzan a degradar el sistema, figura 3.73.

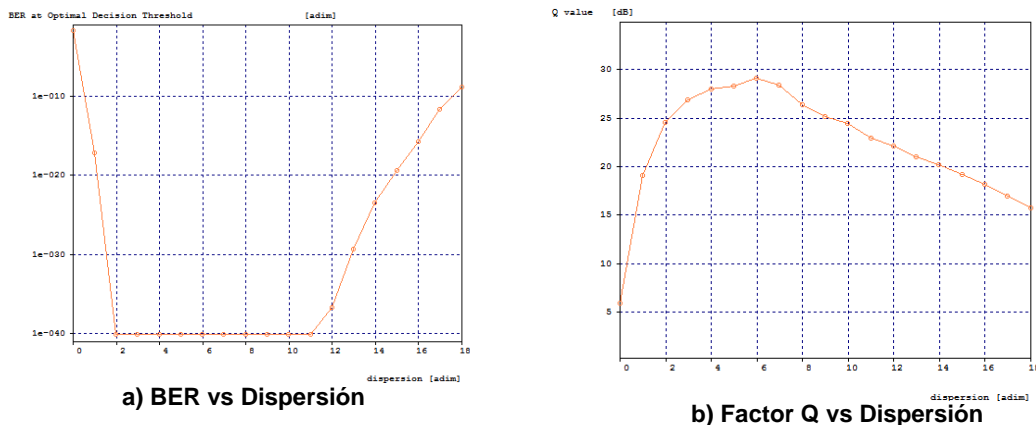


Figura 3.73. Factor Q y BER para diferentes valores de dispersión de la fibra a una distancia de 53 km, para potencias de 0 dBm en el canal 1 y 25 dBm para el canal 2.

No se realizan modificaciones sobre el espaciamiento ya que el impacto de XPM no se observa incluso para altos valores de potencia sobre el canal 2 (canal adyacente) y al trabajar a un espaciamiento entre canales de 50 Ghz se genera una alta interferencia entre los canales, lo cual degrada el sistema.

3.3.3 Análisis del efecto no lineal FWM

En los anteriores casos de estudio, el análisis de FWM se comenzaba realizando variaciones solo en tres de los canales y dejando fijo uno de ellos con el fin de comparar la degradación generada por FWM y la generada por XPM, sin embargo, como se demostró en el apartado anterior, el formato de modulación RZ-DPSK mitiga el efecto de XPM. Por esta razón no tiene sentido realizar esta prueba ya que no se podría realizar ningún tipo de comparación, que era el objetivo de dicha prueba en los caso de estudio anteriores.

Se comienza realizando la variación de potencia sobre todos los canales al tiempo y se determina la distancia máxima que se alcanza para cada una de las potencias manteniendo los valores requeridos de BER y factor Q. La tabla 3.29 muestra las distancias máximas alcanzadas para las diferentes potencias de transmisión.

Tabla 3.29. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1, para diferentes valores de potencia en todos los canales.

Potencia de transmisión [dBm]	Distancia máxima [km] para un BER=1e-15
0	53,11
5	53,14
10	53,30
15	54,37
20	58,15
25	71,02
30	72,12
35	-

Debido a que el formato de modulación que se está usando tiene un consumo más elevado de potencia, se nota como para potencias superiores a los 25 dBm se pueden alcanzar mayores distancias, lo que no sucedía con el formato NRZ-OOK, en el que potencias altas generaban degradación del sistema. Por eso también se hizo necesario incrementar el rango de potencia hasta los 35 dBm con el objetivo de encontrar la potencia a partir de la cual comienza la mayor degradación. La distancia del enlace, al igual que para el caso de estudio anterior se toma de 53 km.

La figura 3.74 muestra los diagramas de correlación entre potencia y los parámetros de medida óptica BER y factor Q, la potencia de los cuatro canales se incrementa desde los 0 dBm hasta los 35 dBm.

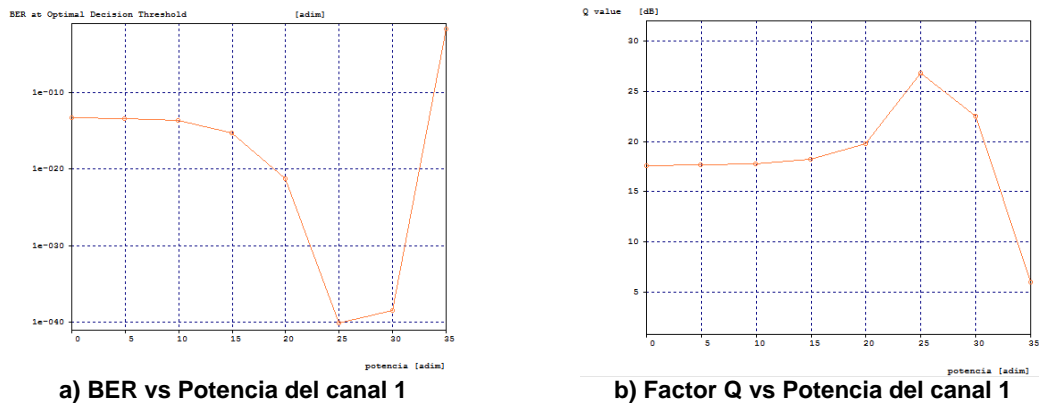


Figura 3.74. Parámetros ópticos de medida del canal 1, para diferentes valores en la potencia de transmisión a una distancia de 53 km.

A través de los anteriores diagramas de correlación se encuentra que la potencia máxima con la cual se puede transmitir a 53 km, es de aproximadamente 30 dBm, tabla 3.30. Este valor de potencia es bastante superior al obtenido con el formato de modulación NRZ-OOK, ya que como se ha mencionado, el formato RZ-DPSK presenta un mayor consumo de potencia y tolera potencias más elevadas.

Tabla 3.30. Potencia máxima de transmisión para alcanzar valores mínimos requerido en los parámetros ópticos de medida.

Distancia [km]	Potencia en dBm para un BER=1e-15	Potencia en dBm para un factor Q=18 dB
53	31,37	33,16

La figura 3.75, presenta el espectro del sistema, donde se observan las componentes que se generan debido a FWM cuando se transmite con una potencia de 30 dBm. Si bien esta es una potencia donde se consigue mejorar el alcance del sistema, también se comienzan a generar componentes FWM que degradan el sistema y ensanchamiento del espectro (SPM). El impacto de FWM se puede apreciar en el espectro desde potencias inferiores a través de la generación de componentes interferentes, aunque no se observe el impacto sobre los parámetros ópticos de medida ni sobre la distancia máxima alcanzada. La figura 3.76 muestra el espectro para una potencia de 15 dBm donde ya es evidente la presencia de las componentes generadas por FWM. El hecho de que las componentes estén presentes desde bajas potencias pero el impacto de estas sobre la degradación del sistema solo se presente para altas potencias, demuestra que este formato de modulación también incrementa la robustez del sistema frente a FWM.

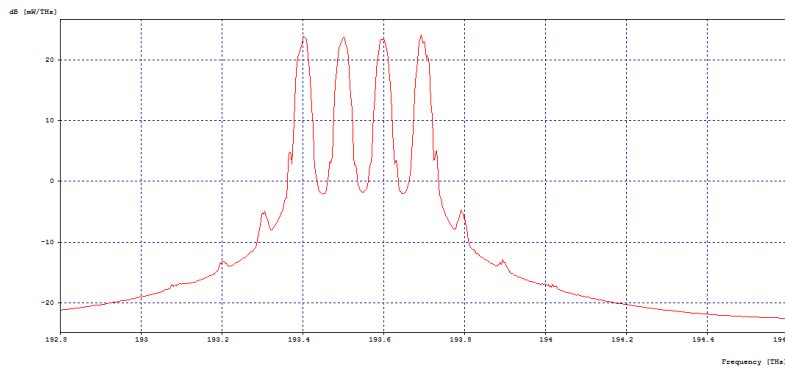


Figura 3.75. Componentes generadas por FWM para una potencia de transmisión de 30 dBm.

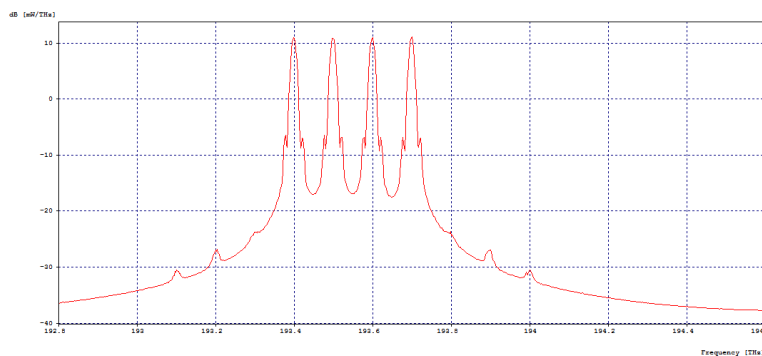
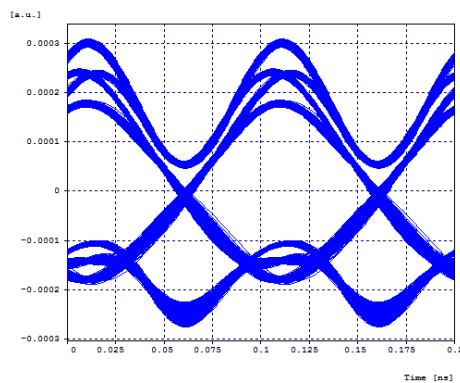
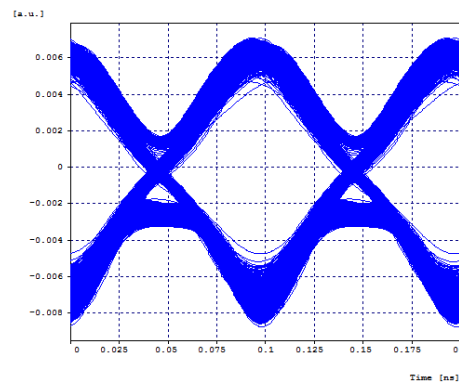


Figura 3.76. Componentes generadas por FWM para una potencia de transmisión de 15 dBm.

Para una potencia de transmisión de 15 dBm el diagrama del ojo no presenta degradaciones significativas, sin embargo, para una potencia de 30 ya se comienza a notar la degradación, figura 3.77. Se aprecia que este formato es más tolerante a potencias elevadas, ya que para 30 dBm el diagrama del ojo para el formato de modulación se encontraba altamente degradado.



a) Diagrama del ojo para una potencia de 15 dBm



b) Diagrama del ojo para una potencia de 30 dBm.

Figura 3.77. Diagrama del ojo en recepción sobre el canal 1 para potencias de a) 15 dBm y b) 30 dBm a una distancia de 78 kilómetros.

Para este caso de estudio la distancia afecta un poco más la degradación generada por FWM, a diferencia de lo que sucedía para el formato de modulación NRZ-OOK, teniendo niveles más elevados de potencia de las componentes generadas por FWM para una distancia de 40 km, las cuales se reducen para 80 y 100 km, para una potencia de transmisión de 30 dBm, figura 3.78.

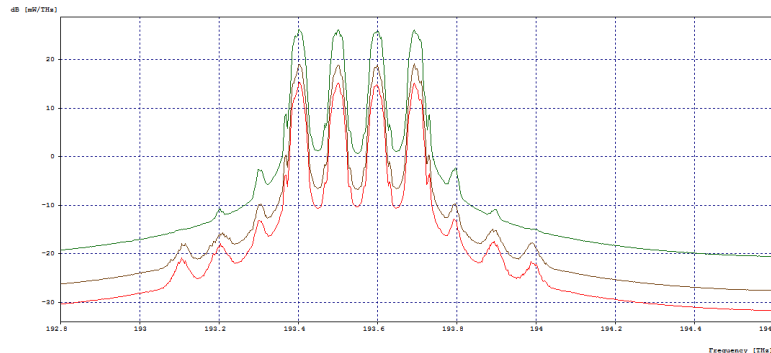


Figura 3.78. Espectro de la señal del canal 1 a los 40 (verde) y 80 (café) y 100 (rojo).

Ahora se proceden a realizar las pruebas correspondientes al valor de dispersión de la fibra, para esto se superponen los espectros para valores de dispersión de 4 y 16 ps/nm/km, figura 3.79. Se toma la misma distancia con la que se ha trabajado (53 km). Estas pruebas se realizan para una potencia de transmisión de 25 dBm ya que al tener una potencia tan alta (30 dBm) los valores bajos de dispersión generan una degradación muy elevada, que no permite diferenciar entre los canales que se transmiten, y por lo tanto no se puede determinar el impacto que tiene la variación del valor de dispersión de la fibra.

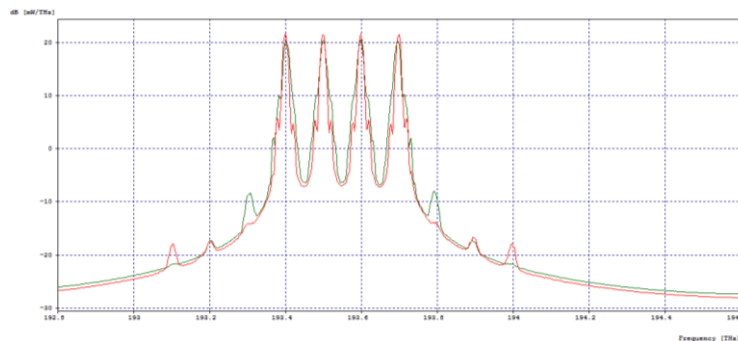


Figura 3.79. Componentes generadas por FWM para una dispersión de 4 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo).

Un valor más alto de dispersión reduce el nivel de potencia de las componentes generadas por FWM, espectro rojo (figura 3.79). De igual manera, como se mencionó anteriormente, se observa el efecto de mitigación del ensanchamiento que se presenta al incrementar el valor de la dispersión, ya que existe presencia de SPM. Para este caso de estudio al reducir el valor de dispersión a 0 ps/nm/km se genera una degradación elevada, sin embargo, un pequeño incremento en el valor de este parámetro genera mejoras importantes en la mitigación de FWM, figura 3.80.

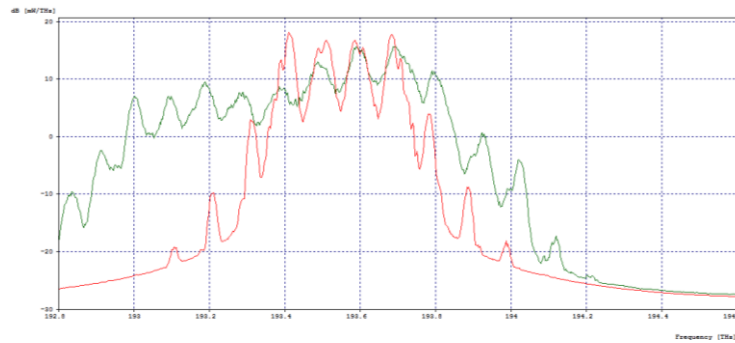


Figura 3.80. Componentes generados por FWM para una dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 1 ps/nm/km (rojo) para una potencia de 25 dBm.

El impacto en la variación del valor de la dispersión de la fibra es muy similar para los formatos RZ-DPSK (presente caso de estudio) y NRZ-OOK (caso de estudio 1), a 10 Gb/s. La figura 3.81 presenta los diagramas de correlación de los parámetros ópticos de medida contra el valor de dispersión de la fibra.

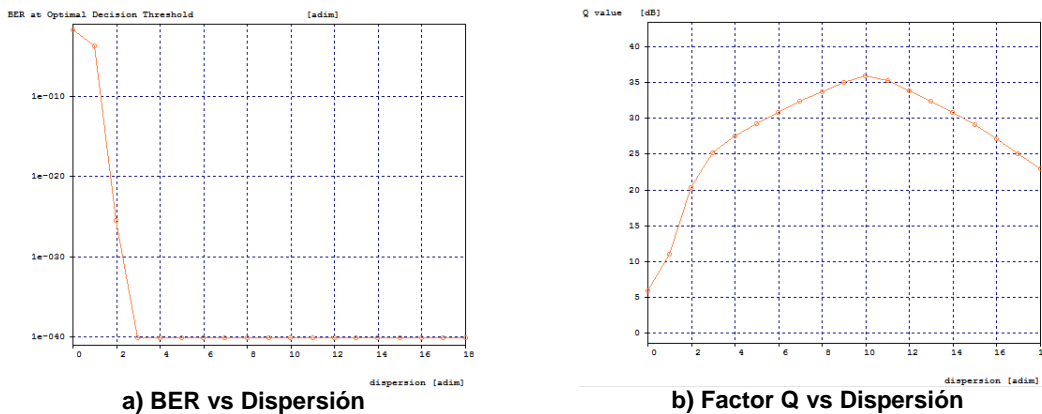
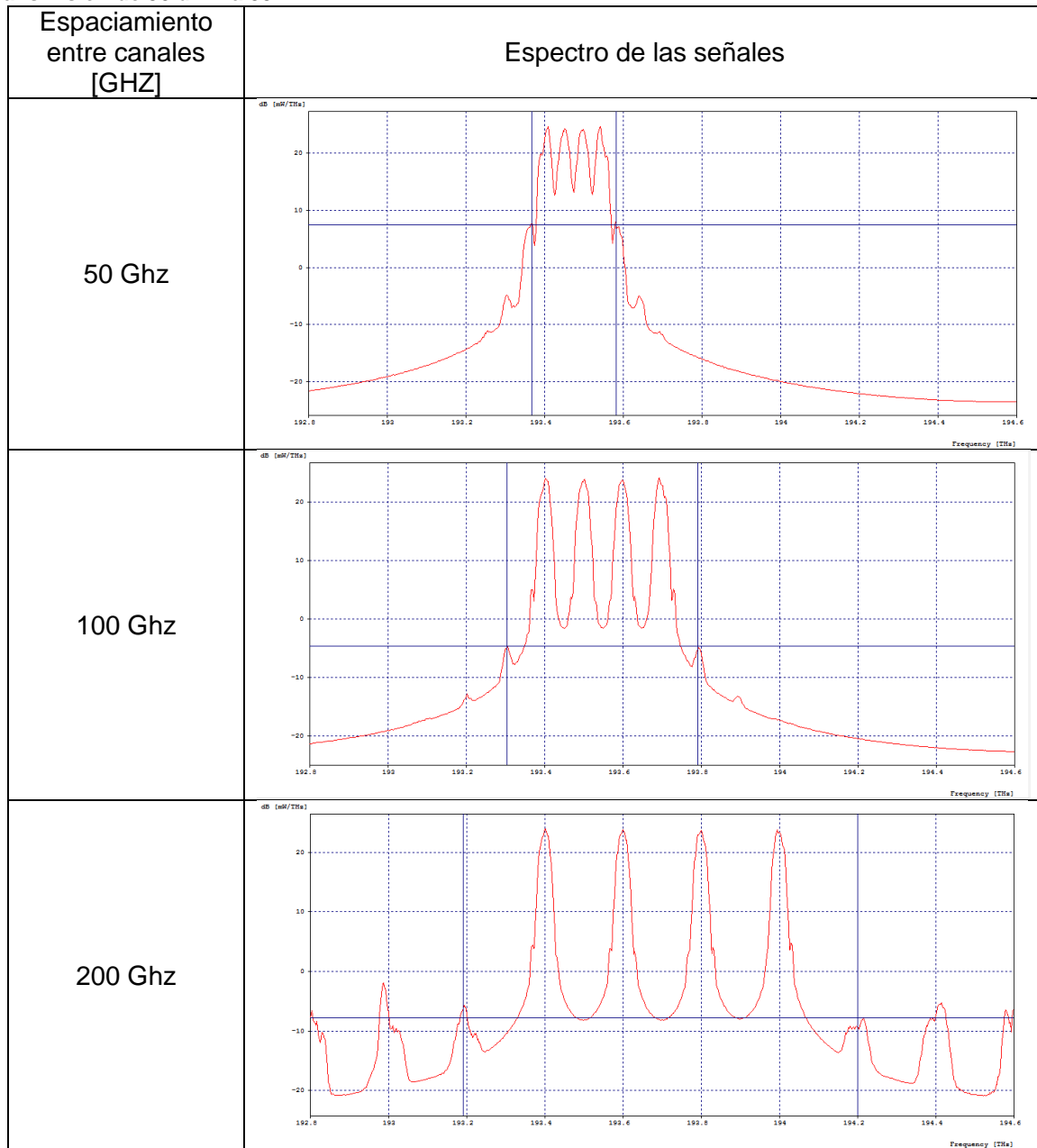


Figura 3.81. a) Factor Q y b) BER para diferentes valores de dispersión de la fibra a una distancia de 53 km, para una potencia de transmisión de 25 dBm.

Los valores elevados de dispersión generan una degradación del sistema, obteniendo un mejor resultado para un valor de 10 ps/nm/km, figura 3.81. También se aprecia que valores bajos de dispersión son suficientes para mitigar, en parte, la degradación generada por FWM.

Ahora se realizan las pruebas para determinar el impacto en la variación del espaciado entre canales. La tabla 3.31 presenta los espectros para espaciados de 50, 100 y 200 GHz entre los cuatro canales del caso de estudio, ya que se ha demostrado la dependencia de FWM respecto del espaciado.

Tabla 3.31. Espectro de las señales para diferentes espaciamentos entre canales a una potencia de transmisión de 30 dBm a 53 km.



Para este caso de estudio, que trabaja con el formato de modulación RZ-DPSK se generan componentes de mayor potencia para un espaciamento de 50 Ghz que las que se generaban con NRZ-OOK, debido a que la potencia a la que se degrada RZ-DPSK es superior a la de NRZ-OOK. Además, el formato de modulación con el que trabaja este escenario requiere un ancho de banda superior al que se requería para NRZ-OOK, y al estar los canales más próximos entre sí, aumenta la degradación generada por FWM. Sin embargo, como sucedía en los otros casos de estudio, el nivel de estas componentes disminuye a medida que se incrementa el espaciamento pasando de 7,61 dBm para 50

Ghz a -7,77 dBm para 200 Ghz. En el caso particular del espaciamiento de 200 Ghz se generan otras componentes con niveles por encima de los -7,77 dBm, sin embargo, esto se debe a que para estos valores bajos de potencia y para el nivel de resolución que fue necesario tomar en las simulaciones, para que no se generaran errores (debido a la alta carga de procesamiento), estas componentes se generan por los *artifícios numéricos falsos* (numerical spurious artifacts) inducidos por el algoritmo empleado para simular la propagación en la fibra [35]. Por esto se toma el nivel de las componentes más próximas a los canales transmitidos. En la tabla 3.32 y 3.33 se consignan las distancias máximas alcanzadas para los espaciamientos de 50 y 200 Ghz, ya que al comienzo de este caso de estudio se presentó la de 100 Ghz (tabla 3.29).

Tabla 3.32. Distancia máxima alcanzada para diferentes potencias, con un espaciamiento de 50 Ghz.

Potencia de transmisión [dBm]	Distancia máxima [km] para un BER=1e-15
0	53,79
5	53,88
10	54,34
15	55,55
20	59,84
25	73,26
30	-

Tabla 3.33. Distancia máxima alcanzada para diferentes potencias, con un espaciamiento de 200 Ghz.

Potencia de transmisión [dBm]	Distancia máxima [km] para un BER=1e-15
0	53,92
5	54,10
10	54,20
15	54,83
20	57,48
25	68,77
30	78,53
35	32,27

De las tablas 3.29, 3.32 y 3.33 se toma la distancia a la que se alcanza un BER=1e-15 para presentar la figura 3.82 que muestra la degradación en el alcance del sistema debido a la variación del espaciamientos entre de los canales. Para este caso de estudio se observa una mayor dependencia del espaciamiento entre canales, ya que la mejora que se presenta para un espaciamiento de 200 Ghz es alta, permitiendo transmitir a potencias elevadas sin que se degraden los parámetros ópticos de medida. Esto se debe en parte a que este formato de modulación requiere un ancho de banda mayor para ser transmitido, por lo cual espaciamientos pequeños entre canales genera niveles elevados de interferencia, a diferencia de los que sucedía con NRZ-OOK que tenía un espectro más angosto y no generaba tanta interferencia ente los canales para espaciamientos pequeños.

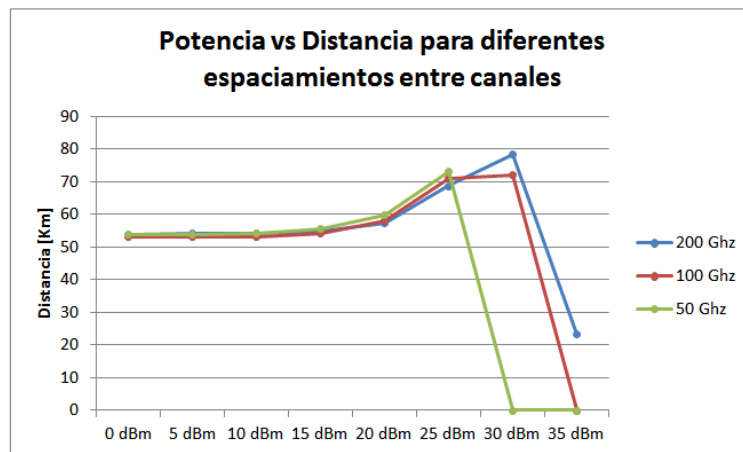


Figura 3.82. Potencia de entrada sobre el canal 1 contra distancia máxima alcanzada para un BER de $1e-15$, con espaciamientos de 50 100 y 200 Ghz.

En este caso de estudio el impacto de las no linealidades en el sistema no es tan evidente y no causa degradaciones tan considerables comparadas con las que se presentaban en el caso de estudio 1, esto debido a que se trabajó con un formato de modulación más robusto frente a las no linealidades (RZ-DPSK), este formato de modulación requiere de una mayor potencia para su óptimo funcionamiento y el rango de potencias donde se obtiene su mejor funcionamiento es muy pequeño, de tal forma que al no estar en dicho rango el desempeño del sistema disminuye considerablemente.

3.4 Caso de estudio 4, formato de modulación RZ-DPSK y velocidad de transmisión de 10 Gb/s.

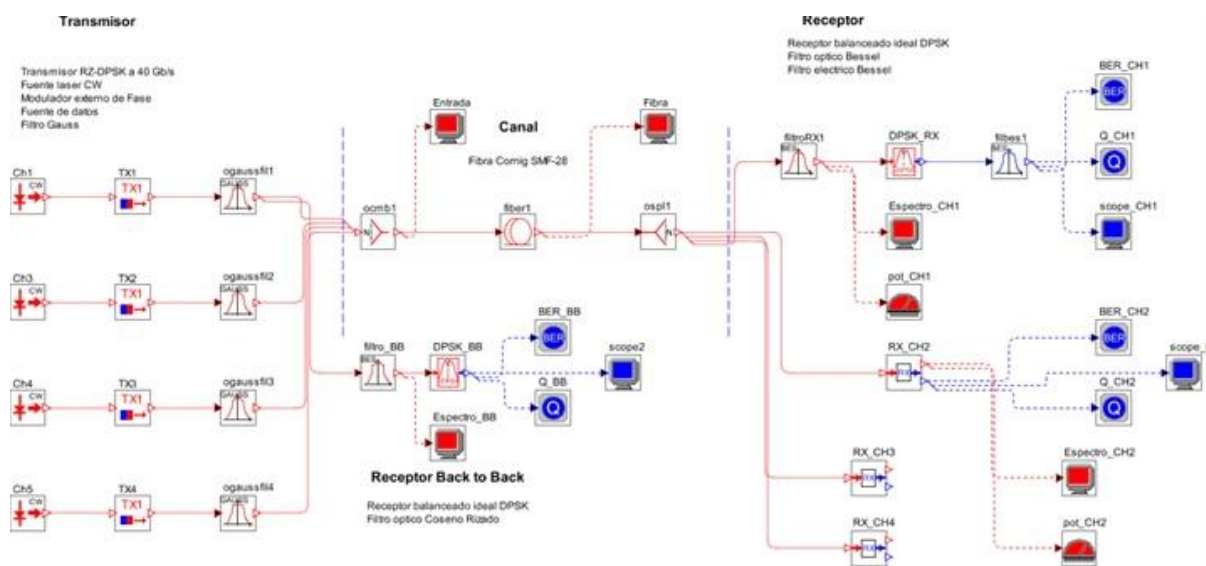


Figura 3.83. Escenario de simulación para el formato de modulación NRZ-OOK y velocidad de transmisión de 40 Gb/s.

En la figura 3.83 esta implementado el sistema para el formato de modulación RZ-DPSK y velocidad de transmisión de 40 Gb/s.

A continuación se muestra la señal de entrada a una velocidad de transmisión de 40 Gb/s y formato de modulación RZ-DPSK, tomada en el receptor Back to Back, figura 3.84, con el fin de establecer una comparación entre la señal a la entrada del sistema y su comportamiento al final del enlace.

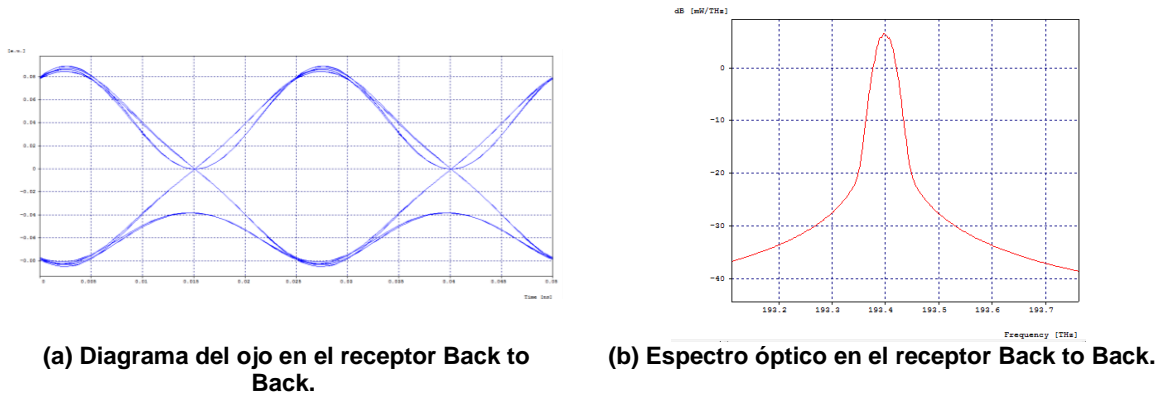


Figura 3.84. (a) Diagrama del ojo y (b) Espectro óptico en el receptor Back to back.

Tanto para el diagrama del ojo como para el espectro óptico la señal de entrada medida en el receptor back to back no presenta degradaciones significativas, figura 3.84.

Para llevar a cabo la comparación entre la señal de entrada y la señal al final del enlace, se procede a encontrar la distancia máxima en la que el sistema cuenta con los valores aceptables en los factores de calidad $BER=1e-15$, factor $Q=18$ dBm, sensibilidad del receptor = -32 dBm.

- **Distancia máxima que alcanza el sistema configurado con los parámetros típicos de transmisión para velocidad de transmisión de 40 Gb/s y modulación NRZ-OOK**

Para determinar la distancia máxima en la que el sistema cuenta con los valores aceptables en los parámetros de calidad, se configura el sistema con valores típicos en los parámetros de transmisión, los cuales son: 4 canales, espaciamiento entre canales de 100 Ghz, potencia de transmisión de 0 dBm por canal, formato de modulación NRZ-OOK y se varía la distancia del enlace, posteriormente se llevan a cabo diferentes medidas sobre el canal a 1550.12 nm y se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 3.34. Distancia Máxima que se alcanza a una potencia de 0 dBm, espaciamiento entre canales de 0.8 nm y velocidad de 40 Gb/s con el formato de modulación RZ-DPSK.

Potencia de transmisión [dBm]	Distancia máxima [km] para un $BER=1e-015$	Distancia máxima [km] para un factor $Q=18$ dB	Potencia en recepción [dBm]
0	5,35	5,31	-9,31

Para una potencia de transmisión de 0 dBm en los cuatro canales y una separación entre canales de 0.8 nm, se alcanza una distancia máxima de aproximadamente 5 km manteniendo los valores de los parámetros de calidad definidos anteriormente, tabla 3.34.

Con el fin de llevar a cabo una comparación entre el funcionamiento del sistema con los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-DPSK, las pruebas para este último también se realizan en un enlace de 5 km.

A continuación se muestra el comportamiento del sistema, medido en el receptor back to back y a una distancia de 5 km, distancia en la cual se evidencian ciertas degradaciones, figura 3.85 (a), (b), (f). También se observa la degradación generada en el sistema al incrementar la distancia del enlace figura 3.85 (c), (d), (e).

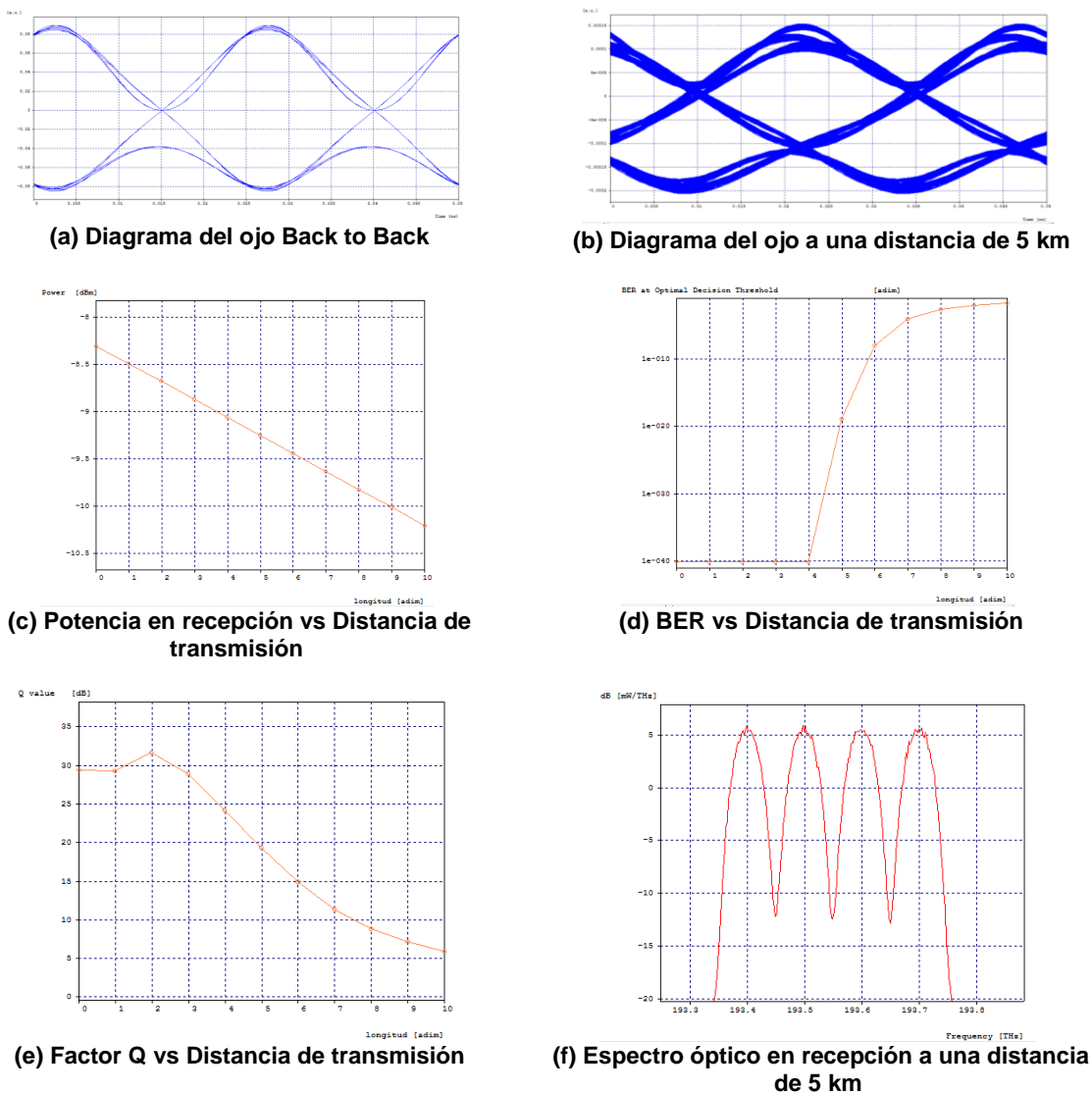


Figura 3.85. Diagramas de correlación y de ojo para el canal a 1550.12nm, receptor back to back y distancia 5 km, 0 dBm de potencia en los cuatro canales.

3.4.1 Análisis del efecto no lineal SPM.

Para el análisis del efecto no lineal SPM se monitorea un solo canal (1550.12 nm), y se configura el sistema con un espaciado considerable entre canales (200 GHz), se dejan constantes las potencias de transmisión de los 3 canales restantes a una potencia de 0 dBm con el fin de evitar la presencia de otros efectos no lineales como FWM o XPM sobre este canal.

Se aísla el efecto no lineal SPM para observar su impacto en un solo canal, debido a que este produce un efecto de auto modulación de fase, el cual no depende del número de canales que tenga el sistema ni de la separación entre ellos.

Para este análisis se evalúa el comportamiento de los factores de calidad del canal a diferentes potencias de transmisión, con el fin de encontrar las distancias máximas que se pueden alcanzar sin sobrepasar dichos límites establecidos en la sección 2.4, esto se hace ya que la potencia de transmisión es uno de los parámetros de transmisión más influyentes en el impacto de los efectos no lineales en los sistemas de comunicaciones ópticas, causando importantes limitaciones en su diseño.

Para llevar a cabo estas mediciones se evaluaron los parámetros de calidad, BER Y Factor Q dejando fijas las diferentes potencias de transmisión (5, 10, 15, 20 y 25 dBm) y variando la longitud del enlace de 0 km hasta 10 km, con incrementos de 1 km, en una fibra Corning SMF 28 la cual viene predefinida en el simulador y cuenta con diversos parámetros intrínsecos de este tipo de fibra, como coeficiente de dispersión, área efectiva, entre otros.

Tabla 3.35. Distancia máxima que se alcanza a diferentes potencias de transmisión a una velocidad de 40 Gb/s con el formato de modulación RZ-DPSK.

Potencia en transmisión [dBm]	Distancia máxima [km] para un BER=1e-15	Distancia máxima [km] para un factor Q=18 dB
0	5,35	5,31
5	5,49	5,36
10	5,49	5,38
15	5,52	5,40
20	5,60	5,48
25	5,83	5,75
30	6,82	6,73
35	5,05	5,03

A medida que se incrementa la potencia de transmisión, la distancia en la que se obtienen los niveles aceptables de calidad también aumenta, pero después de sobrepasar un nivel de potencia, esta distancia disminuye considerablemente, alcanzando una distancia aproximada de 6.8 km para una potencia de 30 dBm, comparado con los 5 km que se alcanzan a una potencia de entrada de 35 dBm, tabla 3.35.

Para determinar el valor de potencia donde los efectos no lineales empiezan a generar degradaciones considerables se lleva a cabo una prueba donde se varía la potencia de transmisión de 0 dBm a 40 dBm y se deja una distancia constante de 5 km.

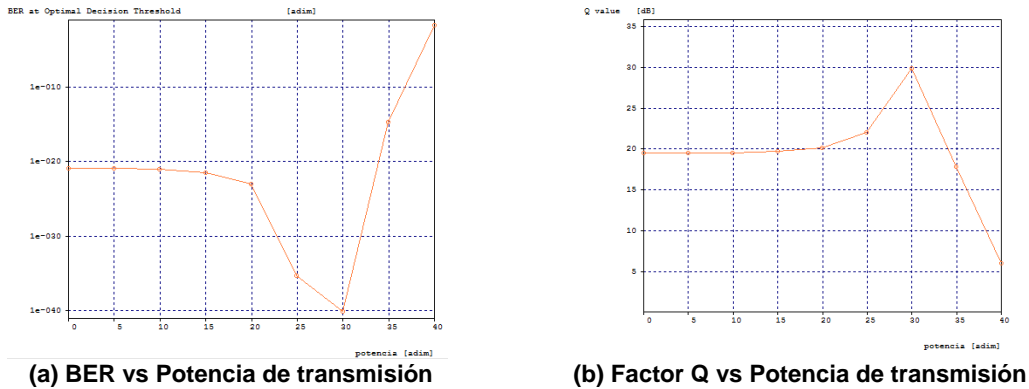


Figura 3.86. Diagramas de correlación (a) BER vs Potencia de transmisión, (b) Factor Q vs Potencia de transmisión, para distancia 5 km, variando potencia de transmisión.

Tabla 3.36. Valor de potencia donde los efectos no lineales empiezan a generar degradaciones considerables, para una distancia de 5 km

Distancia [km]	Potencia en dBm para un BER=1e-15	Potencia para un factor Q=18 dB
5	34,93	34,96

El límite de potencia en el que se obtienen los niveles aceptables de calidad a la velocidad de 40 Gb/s con el formato de modulación RZ-DPSK es aproximadamente 35 dBm, a los 30 dBm de potencia el sistema se comporta de la mejor manera, ya que se obtienen los valores más altos de calidad y se alcanza una distancia de aproximadamente 6.8 km, figuras 3.86 (a), 3.86 (b) y tabla 3.36.

El rendimiento del sistema mejora al ser implementado el formato de modulación RZ-DPSK, ya que se pueden lograr enlaces hasta de aproximadamente 6.8 km. También, según la tabla 3.35, se evidencia que este formato de modulación trabaja mejor a altas potencias y presenta una mayor inmunidad a las no linealidades en comparación al formato de modulación NRZ-OOK.

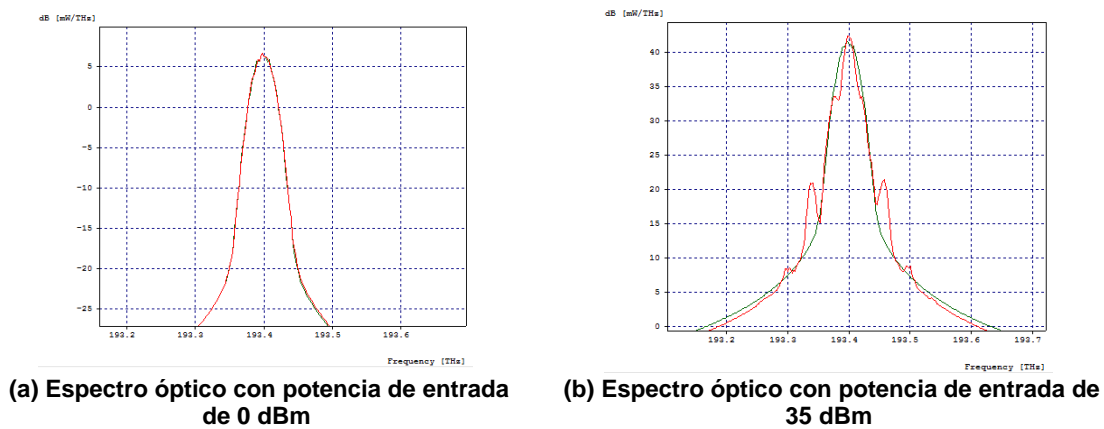


Figura 3.87. Espectros ópticos de entrada y salida para potencias de transmisión a) 0 dBm y b) 35 dBm y distancia 5 km.

Las figuras 3.87 (a) y 3.87 (b) son tomadas a los niveles de potencia de 0 dBm y 35 dBm respectivamente y a una distancia de 5 km, para cada una de ellas la señal de entrada es de color verde y la señal en recepción es la señal de color rojo, en estas se puede observar como al incrementar la potencia de transmisión no se presenta un mayor ensanchamiento de la señal enviada, sin embargo si existe algo de inestabilidad de la modulación.

Otro parámetro de transmisión que influye en el impacto que SPM genera en el sistema, es el coeficiente de dispersión de la fibra, ya que si el $CD > 0$ (régimen de dispersión anómalo), SPM reduce el ensanchamiento que se genera debido a la dispersión ya que tienen signos opuestos, pero si $CD < 0$ (régimen de dispersión normal), se genera un mayor ensanchamiento de la señal debido a SPM y a la dispersión de la fibra [10]. Esta prueba se realiza solo con el fin de mostrar el impacto que se genera en el sistema al variar este parámetro de transmisión, ya que la fibra Corning SMF 28 tiene una dispersión de 16 ps/nm/km, para esto se envía una señal con una potencia considerable para la presencia de no linealidades de 34 dBm en un enlace de 5 km y se varia el parámetro dispersión de la fibra entre -10 ps/nm/km y 16ps/n/km.

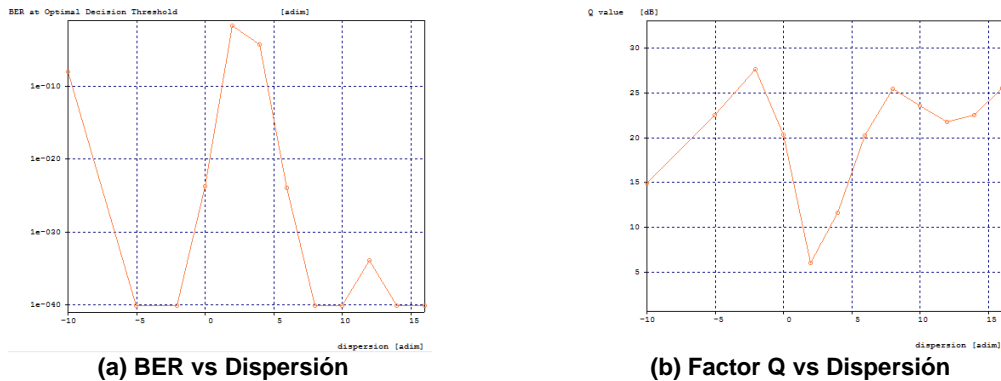


Figura 3.88. Diagramas de correlación a) BER vs Dispersión, b) Factor Q vs Dispersión, distancia 5 km, potencia 34 dBm.

El valor de dispersión que más favorece la transmisión es 16 ps/nm/km ya que se obtienen los valores más altos de calidad y en el que se tienen las condiciones menos favorables es 2 ps/nm/km, figuras 3.88 (a) y 3.88 (b), a continuación se compara el espectro de la señal para estos valores de dispersión.

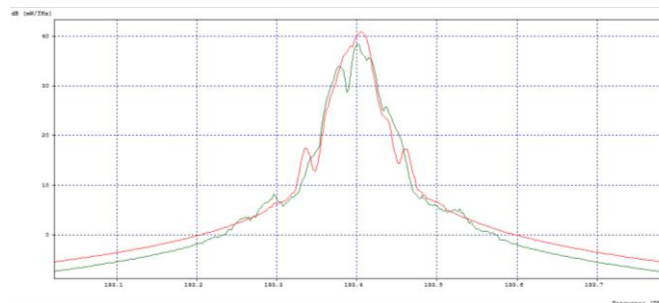


Figura 3.89. Espectro de señal para una $CD=16$ ps/nm/km (verde) y $CD=2$ ps/nm/km (rojo), potencia de transmisión 34 dBm, distancia 5 km.

En la gráfica 3.89 se observa una señal de salida con una dispersión de 2 ps/nm/km (color verde) y una señal de salida con dispersión de 16 ps/nm/km (color rojo), se puede observar que con un valor de dispersión de 16 ps/nm/km no se logran mejoras importantes ya que la degradación del sistema no se debe a SPM si no a la inestabilidad de la modulación.

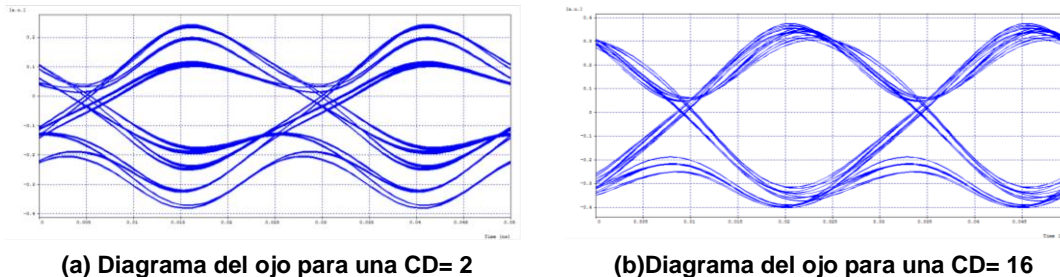


Figura 3.90. Diagramas de ojo para a) CD=2 ps/nm/km y b) CD=16 ps/nm/km, distancia 5Km, potencia 34 dBm.

Como se puede observar, en las figuras 3.90 (a) y 3.90 (b), el parámetro de transmisión dispersión cromática influye en el comportamiento del efecto no lineal SPM, y se observa como mejora el comportamiento del sistema con valores específicos en este parámetro de transmisión.

3.4.2 Análisis del efecto no lineal XPM

Para este caso de estudio se parte de dos premisas, la primera es que para 10 Gb/s con este formato de simulación no se generaba XPM y la segunda que el incremento de la velocidad hace que el impacto de XPM reduzca, lo que hace prever que XPM no impacte este caso de estudio, sin embargo, se realizan las pruebas correspondientes con el fin de corroborar este planteamiento. Las características principales de este caso de estudio son las mismas que para los otros casos de estudio de XPM, variando solamente el formato de modulación y la velocidad de transmisión.

La tabla 3.37 presenta las distancia máximas alcanzadas para diferentes variaciones de potencia sobre el canal 2, manteniendo la potencia del canal 1 constante a 0 dBm, para los factores mínimos de calidad de los parámetros ópticos de medida.

Tabla 3.37. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1, manteniendo la potencia constante en 0 dBm, para diferentes valores de potencia del canal 2.

Potencia de transmisión del canal 2 [dBm]	Distancia máxima [km] para un BER=1e-15
0	5,42
5	5,27
10	4,44
15	-
20	-
25	-
30	-

A 40 Gb/s el ancho de banda requerido para cada canal es mucho más grande que el requerido por el formato NRZ-OOK, debido a esto cuando el canal 2 presenta un

incremento de potencia comienza a generar una alta interferencia sobre el canal 1, sobre el cual se están realizando las medidas. Por esta razón la degradación comienza cuando la diferencia entre los canales es tan solo de 10 dBm. Se aproxima la distancia máxima alcanzada a 5 km según la tabla 3.37, y se procede a realizar el análisis para observar si esta degradación tan elevada se debe a XPM o a interferencia entre los canales debido al ancho de banda requerido para este formato.

En la figura 3.91 se presentan los diagramas de correlación entre potencia y los parámetros ópticos de medida, para determinar la potencia máxima a la cual se puede transmitir manteniendo los niveles óptimos de los parámetros ópticos de medida (BER y factor Q). La distancia que se ha tomado es de 5 km. Las variaciones de potencia se realizan sobre el canal 2 mientras el canal 1 permanece constante a 0 dBm.

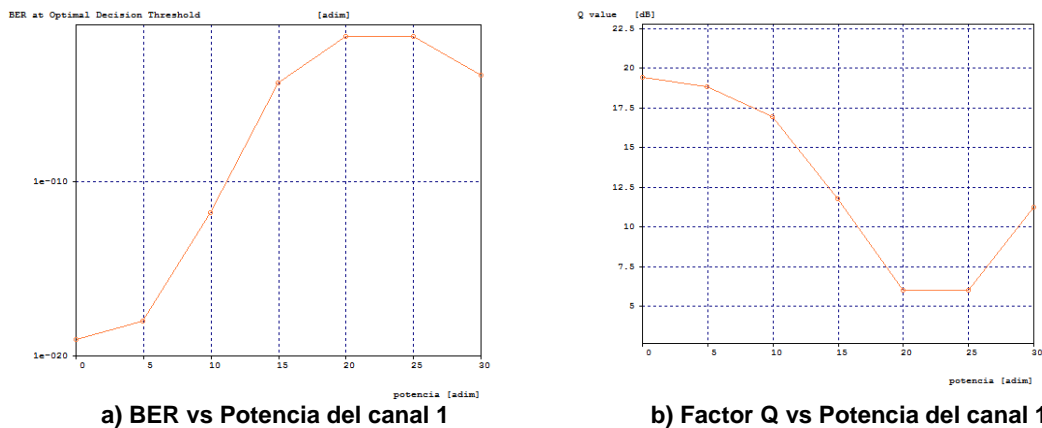


Figura 3.91. Parámetros ópticos de medida del canal 1, para diferentes valores en la potencia de transmisión del canal 2 con una distancia de 5 km.

A través de los diagramas de correlación de la figura 3.91 se obtiene la tabla 3.38, con la cual se determina que la potencia máxima a la cual se puede transmitir a una distancia de 5 km manteniendo los valores mínimos de los parámetros ópticos de medida es de 7 dBm.

Tabla 3.38. Potencia máxima de transmisión para alcanzar valores mínimos requerido de los parámetros ópticos de medida.

Distancia [km]	Potencia en dBm para un BER=1e-15	Potencia en dBm para un factor Q=18 dB
5	7,39	7,34

Ya que se conoce el valor de potencia donde se degrada este sistema, se procede a analizar el espectro del canal 1 para determinar si esta degradación se debe a XPM, lo cual debería generar un ensanchamiento del espectro. En la figura 3.92 se presenta la superposición de los espectros transmitido y recibido para una potencia de 0 y 7 dBm, y en la figura 3.93 los correspondientes diagramas de ojo. Para esto se apagan las pérdidas de la fibra, con la finalidad de poder comparar los espectros en transmisión y recepción, y determinar si se presenta ensanchamiento del espectro.

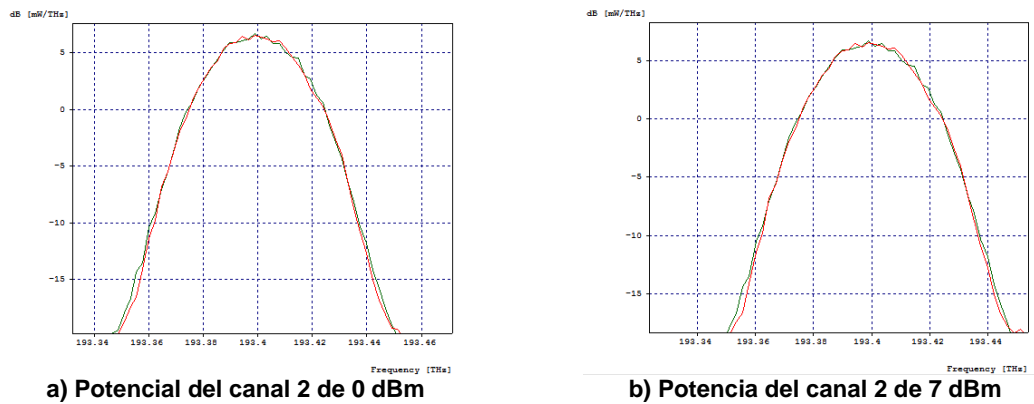


Figura 3.92. Espectro en el back to back (verde) y en recepción (rojo) del canal 1 para diferentes valores de potencia de transmisión sobre el canal 2.

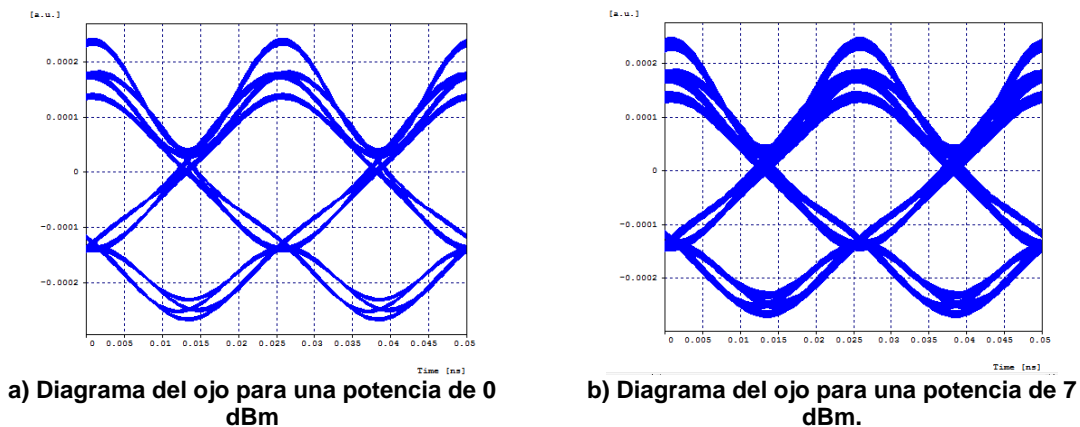


Figura 3.93. Diagrama del ojo en recepción sobre el canal 1 para potencias de a) 0 dBm y b) 7 dBm en el canal 2, manteniendo la potencia del canal 1 a 0 dBm a una distancia de 5 kilómetros.

A través de las figuras anteriores se comprueba que no existe presencia de XPM, por lo tanto la degradación se genera debido a la interferencia que se presenta por el canal adyacente. Se observa que para una tasa de transmisión de 40 Gb/s este formato no tolera una diferencia alta de potencia entre canales contiguos, debido al ancho de banda que es necesario para transmitir cada canal. Sin embargo, aún no se puede concluir que no exista presencia de XPM ya que la potencia a la cual se degrada el sistema no es muy elevada. Por esto se incrementa el espaciamiento entre los canales, con el fin de disminuir la interferencia entre los canales, pero teniendo en cuenta los resultados de los casos de estudio anteriores en los cuales se he demostrado que un espaciamiento muy grande entre los canales también mitiga la degradación generada por XPM. Por esta razón se toma un espaciamiento entre los canales de 125 Ghz (1.2 nm). Aunque este no sea un espaciamiento utilizado en redes comerciales, se elige con el fin de analizar si existe presencia de XPM para este sistema. La figura 3.94 muestra la superposición de la señal transmitida y la señal en recepción del canal 1, cuando la potencia que se transmite sobre el canal 2 es de 25 dBm.

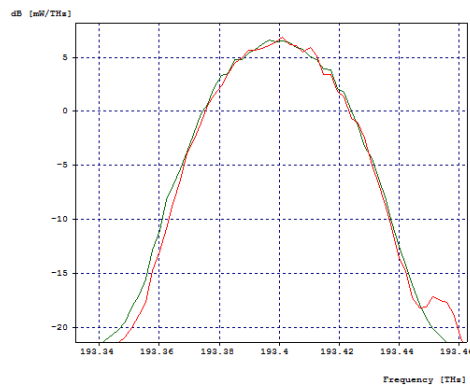


Figura 3.94. Espectro de la señal transmitida (verde) a 0 dBm y la señal recibida (rojo) sobre el canal 1, cuando la potencia del canal 2 es de 25 dBm y el espaciamiento de 125Ghz, a una distancia de 5 km.

No se presenta ensanchamiento de la señal, por el contrario, la señal en recepción se encuentra un poco más estrecha, pero esto se debe al efecto del filtro, figura 3.95. Por estas razones, y como se había anotado en las dos premisas al inicio de este caso de estudio, debido a la robustez de este formato de modulación y a la velocidad de transmisión, bajo las condiciones anteriormente mencionadas, no se presentan degradaciones debido a XPM.

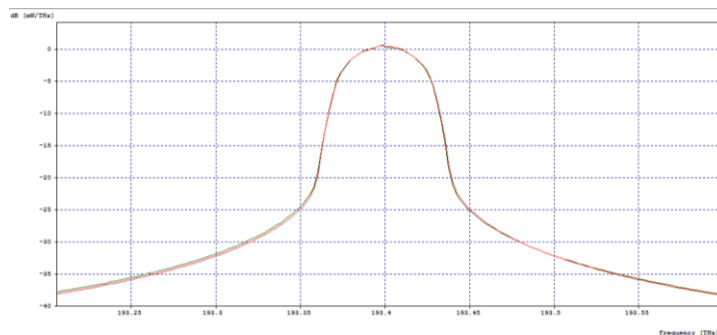


Figura 3.95. Espectro en el receptor back to back (verde) y en recepción (rojo) del canal 1 para una potencia de transmisión de 25 dBm sobre el canal 2.

Se realiza una prueba variando el valor de dispersión de la fibra, el cual ha demostrado tener un gran impacto en el comportamiento de los efectos no lineales, causando una alta degradación del sistema para valores bajos. Para esta prueba se ha dejado el espaciamiento de 125 GHz, la potencia del canal 1 en 0 dBm y la del canal 2 en 25 dBm. Se toman valores de dispersión de 0 y 16 ps/nm/km, figura 3.96. En esta se observa un pequeño ensanchamiento de la señal para un valor de dispersión de 0 ps/nm/km (verde).

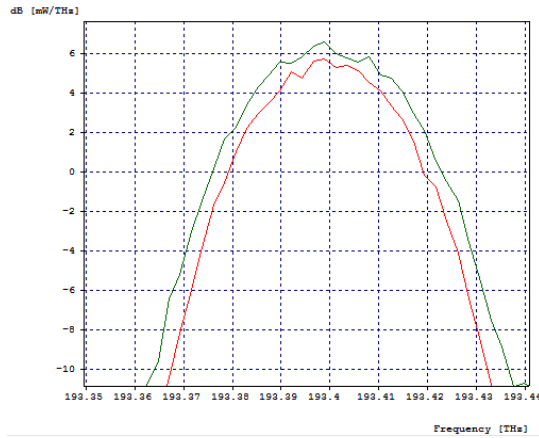


Figura 3.96. Ensanchamiento del espectro para una dispersión de 0 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo) debido a XPM.

Se nota que, aunque este formato de modulación es más robusto frente a las degradaciones, se ve afectado por un valor de dispersión de 0 ps/nm/km. Este sistema a 40 Gb/s implementando el formato de modulación RZ-DPSK, requiere un valor de dispersión superior a 4 ps/nm/km para lograr una mejora en el comportamiento del sistema, figura 3.97. Esto difiere de la mayoría de los casos de estudio tratados anteriormente donde un valor más bajo de dispersión era suficiente para mitigar en gran medida el impacto de las no linealidades. Sin embargo, para los valores altos de dispersión se mantiene el mismo comportamiento observado en las pruebas realizadas a lo largo de este capítulo.

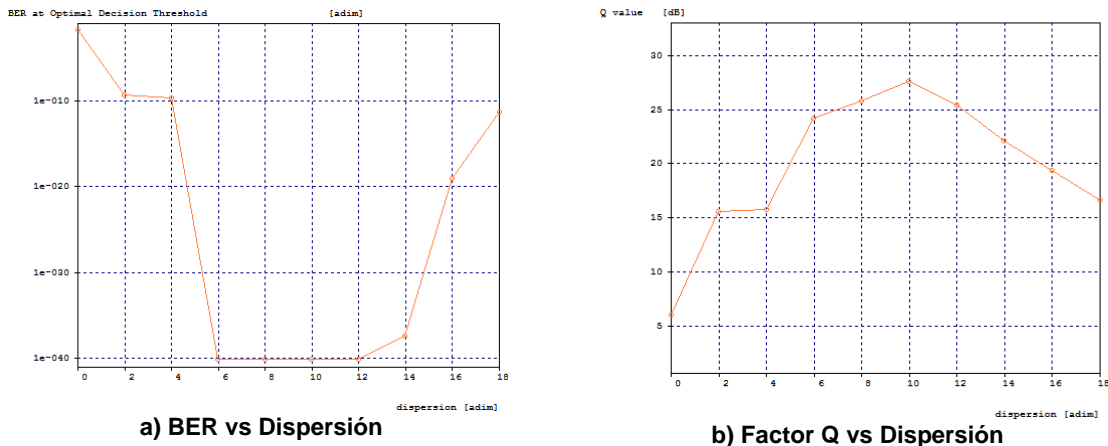


Figura 3.97. a) BER y b) factor Q en el canal 1 transmitiendo a 0 dBm para diferentes valores de dispersión de la fibra a una distancia de 5 km y una potencia de transmisión de 25 dBm sobre el canal 2.

Así, mediante las pruebas anteriormente realizadas se demuestra que el impacto de XPM solo se presenta para valores de dispersión iguales a 0 ps/nm/km.

3.4.3 Análisis del efecto no lineal FWM.

Se procede a realizar las variaciones de potencia sobre los cuatro canales de la misma forma que se ha realizado en los casos de estudio tratados anteriormente para FWM. Se determina la distancia máxima que se puede alcanzar para diferentes valores de potencia, tabla 3.39.

Tabla 3.39. Distancia máxima alcanzada por la señal del canal 1, para diferentes valores de potencia de transmisión.

Potencia de transmisión [dBm]	Distancia máxima [km] para un BER=1e-15
0	5,41
5	5,41
10	5,42
15	5,46
20	5,60
25	5,77
30	1,77
35	-

En la tabla anterior se observa que la distancia máxima se logra al transmitir a 25 dBm donde se alcanzan 5,77 km mientras que la degradación del sistema se genera a partir de una potencia de transmisión superior a los 25 dBm. Como se ha realizado a lo largo de este caso de estudio se aproxima la distancia del enlace a 5 km. La figura 3.98 presenta los diagramas de correlación entre los parámetros ópticos de medida y la potencia de transmisión a una distancia de 5 km.

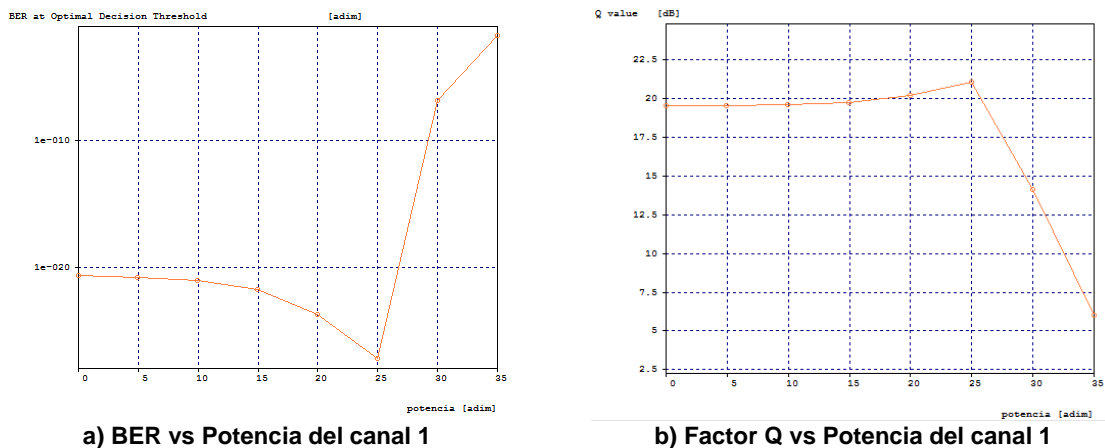


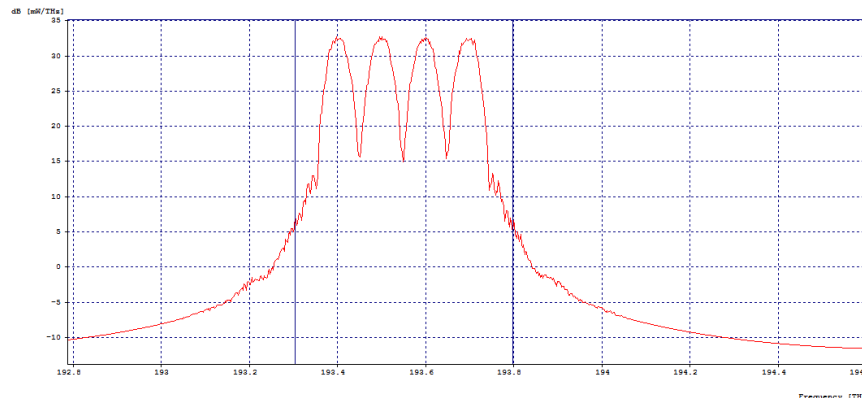
Figura 3.98. Parámetros ópticos de medida del canal 1, para diferentes valores en la potencia de transmisión a una distancia de 5 km.

A través de los anteriores diagramas de correlación, figura 3.98, se obtiene la tabla 3.40 donde se determina que la potencia máxima con la cual se puede transmitir a 5 km es aproximadamente 27 dBm, valor que es superior al obtenido con el formato de modulación NRZ-OOK, ya que como se ha mencionado, el formato RZ-DPSK es más robusto frente a las degradaciones generadas por los efectos no lineales, además de requerir un nivel de potencia más alto.

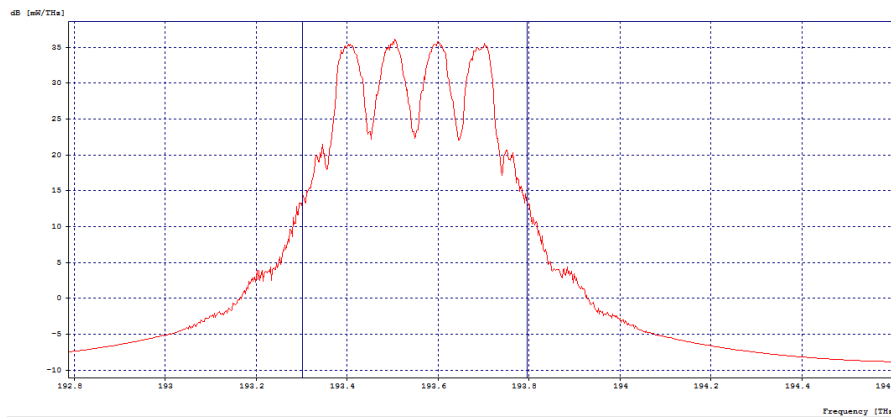
Tabla 3.40. Potencia máxima de transmisión para alcanzar valores mínimos requerido en los parámetros ópticos de medida.

Distancia [km]	Potencia en dBm para un BER=1e-15	Potencia en dBm para un factor Q=18 dB
5	27,98	27,21

Debido a que el formato de modulación RZ-DPSK, ha demostrado ser robusto frente a las degradaciones generadas por los efectos no lineales y que la tasa de transmisión reduce, también, la degradación debido a los efectos no lineales, se analiza el espectro del sistema para determinar si se presentan componentes generadas debido a FWM. La figura 3.99 presenta el espectro del sistema para una potencia de 27 dBm y 30 dBm a una distancia de 5 km. En estas se han puesto marcadores en los lugares donde deberían aparecer las componentes, generadas por FWM, de mayor nivel de potencia. Se puede apreciar que para ninguna de las dos potencias tomadas, las cuales son bastante elevadas, se generan componentes debido a FWM. Lo que se puede notar es una alta interferencia, la cual genera las degradaciones para potencias superiores a 27 dBm.



a) Espectro para una potencia de transmisión de 27 dBm a 5 km.



b) Espectro para una potencia de transmisión de 30 dBm a 5 km.

Figura 3.99. Espectro para una potencia de transmisión de a) 27 dBm y b) 30 dBm en la salida de la fibra.

A través de la anterior figura se puede determinar que no existe presencia de FWM para este caso de estudio, la degradación que se presenta se debe a la interferencia entre los canales ya que un espaciamento de 100 GHz para este formato de modulación y esta tasa de transmisión, causa una proximidad entre canales que genera solapamiento y por lo tanto interferencia.

A pesar de que no se presente FWM, hay un parámetro que puede generar degradación del sistema debido a este efecto no lineal. Este parámetro es la dispersión de la fibra, como se ha demostrado en casos de estudio anteriores. La figura 3.100 muestra el espectro para un valor de dispersión de 4 y 16 ps/nm/km, con una potencia de 33 dBm, que es a partir de la cual se comienza a generar degradación. Los marcadores se han colocado para indicar las frecuencias en las cuales deberían aparecer las componentes espectrales generadas por FWM, sin embargo no se presentan dichas componentes. La figura 3.101 muestra el espectro para un valor de dispersión de 0 ps/nm/km, pero la alta degradación no permite distinguir entre los diferentes canales.

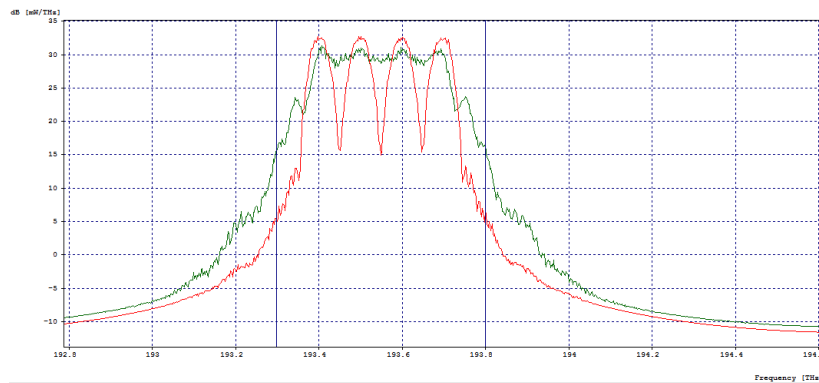


Figura 3.100. Componentes generadas por FWM para una dispersión de 4 ps/nm/km (verde) y 16 ps/nm/km (rojo) a una potencia de transmisión de 27 dBm.

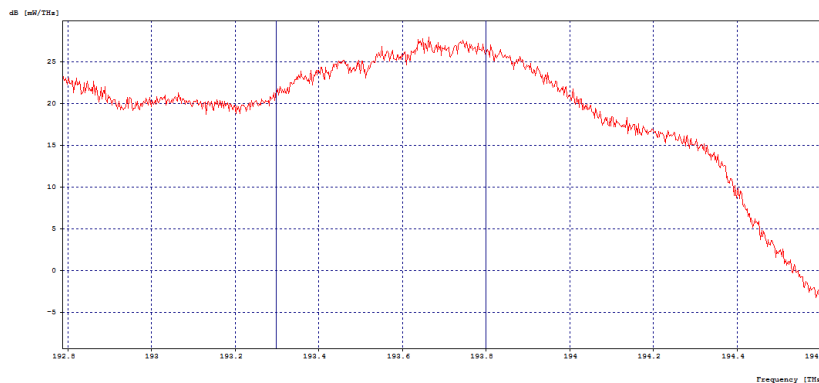


Figura 3.101. Espectro del sistema para una dispersión de 0 ps/nm/km con una potencia de transmisión de 27 dBm por canal.

De diferentes pruebas realizadas se obtiene que un valor de dispersión igual a 0 ps/nm/km y una potencia de 20 dBm, hace que se generen componentes interferentes debido a FWM, figura 3.102. Sin embargo, cave notar que este es el peor de los casos, a pesar de ello, no se genera una degradación tan elevada como para los otros casos de estudio, en los cuales el alto nivel de interferencia hacía difícil diferenciar las diferentes componentes generadas por FWM. Los marcadores de han colocado en las componentes generadas por FWM que tienen un nivel más elevado de potencia.

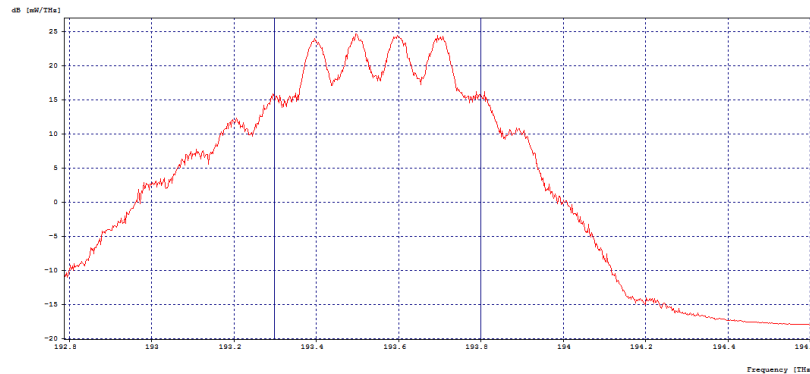


Figura 3.102. Espectro del sistema para una dispersión de 0 ps/nm/km con una potencia de transmisión de 20 dBm por canal.

La figura 3.103 presenta los diagramas de correlación de BER y factor Q contra la dispersión de la fibra para una potencia de 20 dBm, a través de esta se observa como los valores bajos de dispersión generan grandes degradaciones, al igual que valores muy altos, sin embargo, los valores bajos son los que más perjudican el comportamiento del sistema.

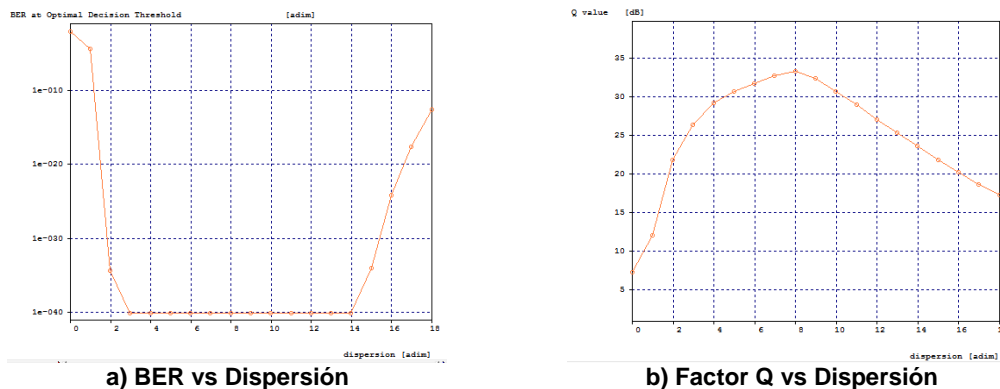


Figura 3.103. a) Factor Q y b) BER para diferentes valores de dispersión de la fibra a una distancia de 5 km, para una potencia de transmisión de 20 dBm.

Respecto al espaciado entre canales, disminuirlo a 50 Ghz implica incrementar la interferencia a niveles que degradan por completo el sistema. Para un espaciado de 200 Ghz se disminuye el impacto de FWM, y como ya se ha tratado a lo largo de este caso de estudio, dicho impacto apenas se puede notar para el peor de los casos cuando la dispersión es igual a 0 ps/nm/km, la potencia de transmisión es de 20 dBm y el

espaciamiento de 100 Ghz. Por lo tanto el impacto de FWM para un espaciamiento de 200 Ghz va a ser aún menor que el que se ha encontrado para 100 Ghz.

Para este caso de estudio fue necesario realizar cambios en el receptor debido al ancho de banda que requiere este formato para una velocidad de transmisión de 40 Gb/s. Para los casos de estudio anteriores se utilizaba un filtro óptico *Coseno Rizado*, pero para este caso de estudio fue necesario utilizar un filtro que permitiera alcanzar los valores mínimos de calidad definidos. Después de probar con diferentes filtros se escogió el filtro *Bessel* ya que gracias a su implementación se lograba una mejora en el sistema logrando alcanzar los valores de calidad.

A través de la implementación de este caso de estudio con el formato de modulación RZ-DPSK a una velocidad de transmisión de 40 Gb/s se observa una disminución importante en las degradaciones generadas por la no linealidades, hasta el punto que no se aprecian algunas de ellas, siendo el caso de estudio en el que menos impactan las no linealidades.

En este capítulo se analizó mediante la herramienta de simulación OptSim® de Rsoft el comportamiento del sistema para los diferentes casos de estudio y se evalúa el impacto de las no linealidades en cada uno de ellos, también se encontraron los valores en los parámetros de transmisión que permiten obtener un mejor desempeño del sistema según sea el efecto no lineal analizado.

En el siguiente capítulo se analiza mediante la herramienta de simulación OptSim® de Rsoft, el efecto conjunto de los efectos no lineales sobre el sistema, con el fin de encontrar la configuración en los parámetros de transmisión que permita obtener un mejor desempeño para cada caso de estudio.

Capítulo 4. Efecto conjunto de la variación de los parámetros de transmisión y su impacto en las no linealidades para cada caso de estudio.

En el desarrollo del presente capítulo se realizan una serie de pruebas en las que se evalúa el efecto conjunto de los diferentes parámetros de transmisión que impactan en el comportamiento de los efectos no lineales en los casos de estudio definidos en el capítulo 2 y se tiene como meta encontrar los valores en dichos parámetros en los que para cada caso de estudio se obtiene el mejor desempeño.

4.1 Caso de estudio 1.

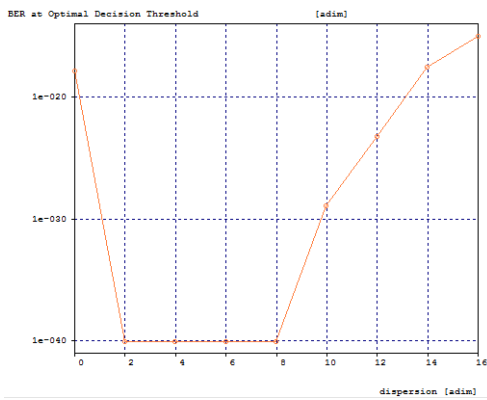
En la tabla 4.1, se encuentra el resumen de los parámetros de transmisión y los respectivos valores que determinan el desempeño del sistema para este caso de estudio, esta tabla es resultado del análisis realizado en el Capítulo 3.

Tabla 4.1. Parámetros de transmisión y sus respectivos valores los cuales determinan el desempeño del sistema.

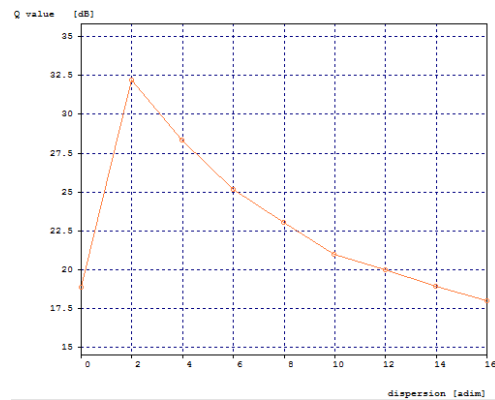
CASO DE ESTUDIO 1.	
SPM	
Distancia máxima alcanzada con 0 dBm para BER y Factor Q.	78 km
Potencia en la que se alcanzan los parámetros de calidad para 78 Km	18 dBm
Distancia máxima alcanzada con este escenario variando potencia	79 km
Potencia en la que se alcanza la distancia máxima	10 dBm
Dispersión en la que se obtienen las menores degradaciones	-2 ps/nm/km
Dispersión en la que se obtienen las mayores degradaciones	-10 ps/nm/km
XPM	
Distancia máxima alcanzada con 0 dBm para BER y Factor Q.	78 km
Potencia en la que se alcanzan los parámetros de calidad para 78 Km	12 dBm
Distancia máxima alcanzada con este escenario variando potencia	-
Potencia en la que se alcanza la distancia máxima	-
Dispersión en la que se obtienen las menores degradaciones	6 ps/nm/km
Dispersión en la que se obtienen las mayores degradaciones	0 ps/nm/km
FWM	
Distancia máxima alcanzada con 0 dBm para BER y Factor Q.	78 km
Potencia en la que se alcanzan los parámetros de calidad para 78 Km	8 dBm
Distancia máxima alcanzada con este escenario variando potencia	78 km
Potencia en la que se alcanza la distancia máxima	0 dBm
Dispersión en la que se obtienen las menores degradaciones	4 ps/nm/km
Dispersión en la que se obtienen las mayores degradaciones	0 ps/nm/km

Partiendo de la tabla 4.1, se realizan las siguientes pruebas con el fin de determinar la configuración más conveniente para transmitir a través del sistema.

Se configura el sistema con algunos parámetros de transmisión fijos como distancia de 78 km, y se varía el parámetro de dispersión de la fibra de 0 ps/nm/km a 16 ps/nm/km para cada una de las potencias (dependiendo del efecto no lineal) en las que se obtienen la distancia máxima para este caso de estudio.

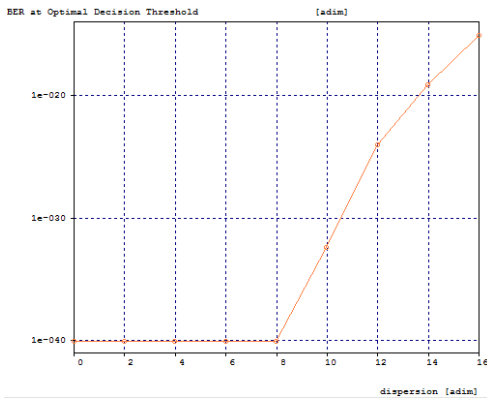


a) BER vs Dispersion, para 10 dBm, distancia 78 km.

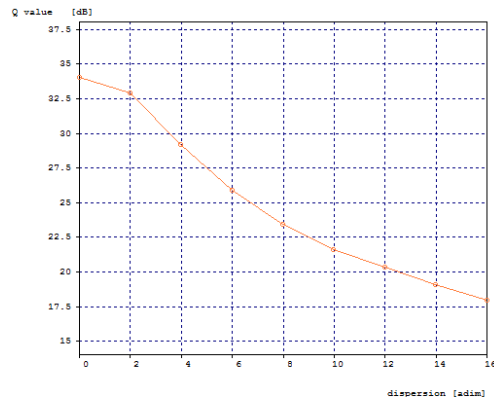


b) Factor Q vs Dispersion, para 10 dBm, distancia 78 km.

Figura 4.1 a) Factor Q vs Dispersion, b) BER vs dispersion, potencia de 10 dBm y distancia de 78 km.



a) BER vs Dispersion, para 0 dBm, distancia 78 km.



b) Factor Q vs Dispersion, para 0 dBm, distancia 78 km.

Figura 4.2. a) Factor Q vs Dispersion, b) BER vs dispersion, potencia de 0 dBm y distancia de 78 km.

El valor de dispersión en el que se mejora el desempeño del sistema es 2 ps/nm/km, otro valor posible es 0 ps/nm/km, pero no se opta por este último debido a que no es un valor recomendable en el parámetro de dispersión de la fibra para un sistema WDM, figuras 4.1 (a), 4.1 (b) y 4.2 (a), 4.2 (b).

Teniendo en cuenta este valor de dispersión, se realiza una prueba donde se deja constante la distancia de 78 km, el parámetro de dispersión de la fibra de 2 ps/nm/km y se varía la potencia de transmisión de 0 dBm a 25 dBm.

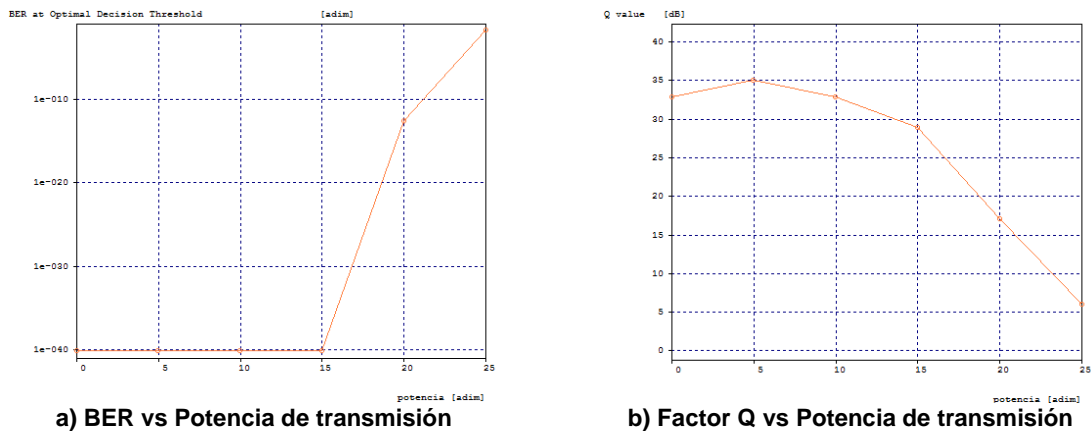


Figura 4.3. Diagramas de correlación a) BER vs potencia de transmisión, b) Factor Q vs potencia de transmisión, para una distancia de 78 km y dispersión de 2 ps/nm/km.

El valor de potencia en el que se obtienen los valores más favorables en los factores de calidad es 5 dBm, figura 4.3 (a) y 4.3 (b).

La configuración recomendada para el caso de estudio 1 es, potencia de transmisión de 5 dBm y coeficiente de dispersión de 2 ps/nm/km, en la figura 4.4 se muestra el espectro óptico y diagrama del ojo que se obtiene con esta configuración, en la tabla 4.2 se muestran los valores de BER y factor Q.

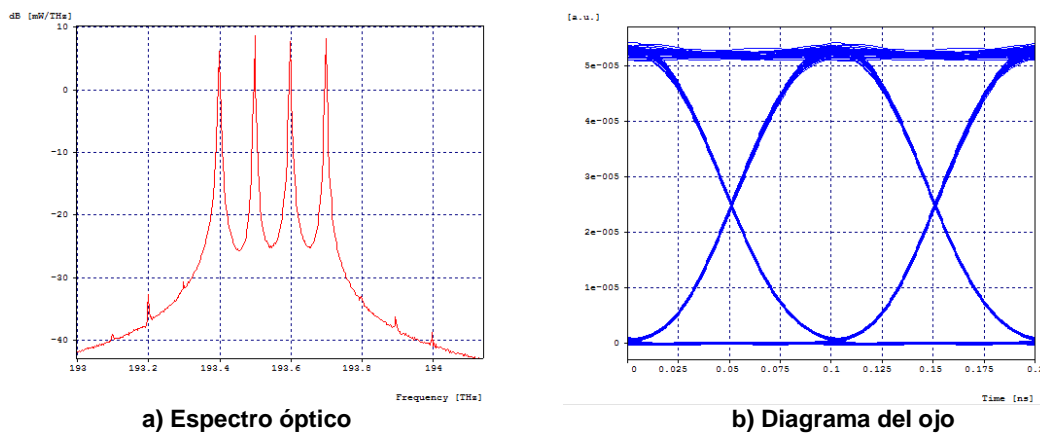


Figura 4.4. a) Espectro óptico, b) Diagrama del ojo, para potencia de 5 dBm, dispersión 2 ps/nm/km, distancia 78 km.

Tabla 4.2. Valores de BER y Factor Q, para 5 dBm, dispersión 4 ps/nm/km, distancia 78 km.

BER	Factor Q [dB]
0.99e-40	34,35

4.2 Caso de estudio 2.

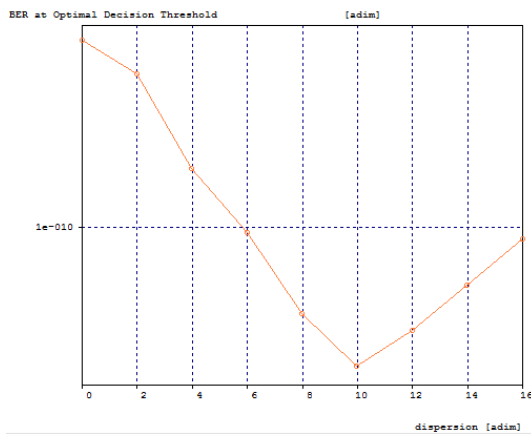
En la tabla 4.3, se encuentra el resumen de los parámetros de transmisión y los respectivos valores que determinan el desempeño del sistema para este caso de estudio, esta tabla es resultado del análisis realizado en el Capítulo 3.

Tabla 4.3. Parámetros de transmisión y sus respectivos valores los cuales determinan el desempeño del sistema

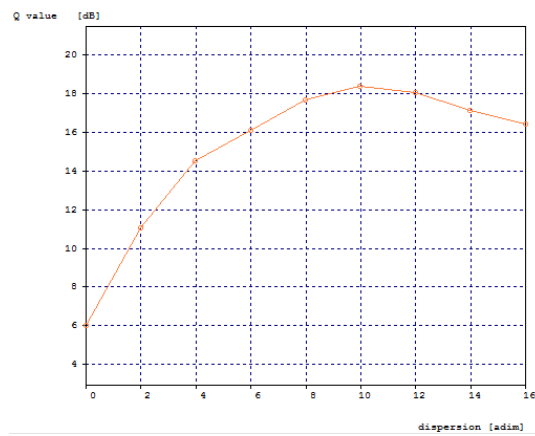
CASO DE ESTUDIO 2.	
SPM	
Distancia máxima alcanzada con 0 dBm para BER y Factor Q.	5 km
Potencia en la que se alcanzan los parámetros de calidad para 5 Km	27 dBm
Distancia máxima alcanzada con este escenario variando potencia	7 km
Potencia en la que se alcanza la distancia máxima	25 dBm
Dispersión en la que se obtienen las menores degradaciones	5 ps/nm/km
Dispersión en la que se obtienen las mayores degradaciones	-10 ps/nm/km
XPM	
Distancia máxima alcanzada con 0 dBm para BER y Factor Q.	5,24 km
Potencia en la que se alcanzan los parámetros de calidad para 5 Km	20 dBm
Distancia máxima alcanzada con este escenario variando potencia	-
Potencia en la que se alcanza la distancia máxima	-
Dispersión en la que se obtienen las menores degradaciones	3 ps/nm/km
Dispersión en la que se obtienen las mayores degradaciones	0 ps/nm/km
FWM	
Distancia máxima alcanzada con 0 dBm para BER y Factor Q.	5,24 km
Potencia en la que se alcanzan los parámetros de calidad para 5 Km	23 dBm
Distancia máxima alcanzada con este escenario variando potencia	5,64 km
Potencia en la que se alcanza la distancia máxima	20 dBm
Dispersión en la que se obtienen las menores degradaciones	5 ps/nm/km
Dispersión en la que se obtienen las mayores degradaciones	0 ps/nm/km

Partiendo de la tabla 4.3, se realizan las siguientes pruebas con el fin de determinar la configuración más conveniente para transmitir a través del sistema.

Se configura el sistema con algunos parámetros de transmisión fijos como distancia de 78 km, y se varía el parámetro de dispersión de la fibra de 0 ps/nm/km a 16 ps/nm/km para cada una de las potencias (dependiendo del efecto no lineal) en las que se obtienen la distancia máxima para este caso de estudio.

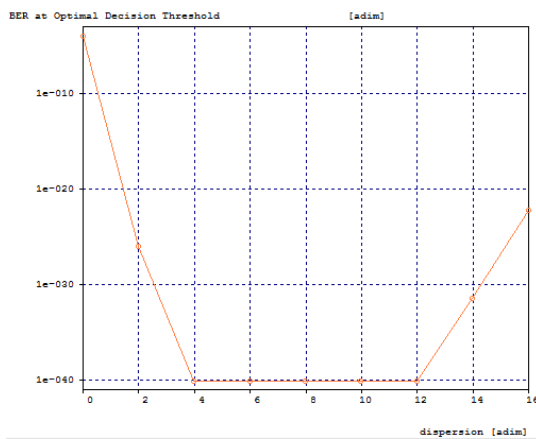


a) BER vs Dispersión, para 25 dBm, distancia 5 km.

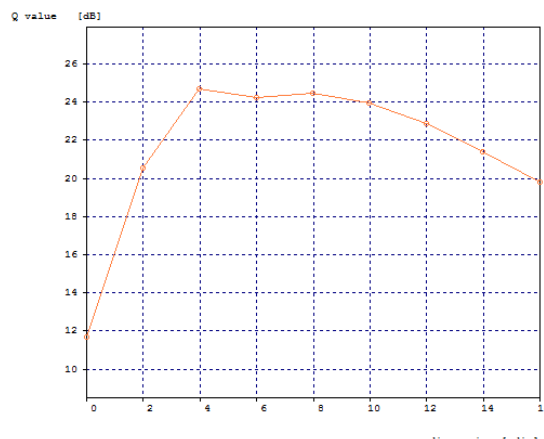


b) Factor Q vs Dispersión, para 25 dBm, distancia 5 km.

Figura 4.5. a) Factor Q contra Dispersión, b) BER contra dispersión, potencia de 25 dBm y distancia de 5km.



a) BER vs Dispersión, para 20 dBm, distancia 5 km.



b) Factor Q vs Dispersión, para 20 dBm, distancia 5 km.

Figura 4.6. a) Factor Q vs Dispersión, b) BER vs dispersión, potencia de 20 dBm y distancia de 5km.

El valor de dispersión en el que se mejora el desempeño del sistema es 10 ps/nm/km, figuras 4.5 (a), 4.5 (b) y 4.6 (a), 4.6 (b).

Teniendo en cuenta este valor de dispersión, se realiza una prueba donde se deja constante la distancia de 5km, el parámetro de dispersión de la fibra de 10 ps/nm/km y se varía la potencia de transmisión de 0 dBm a 25 dBm.

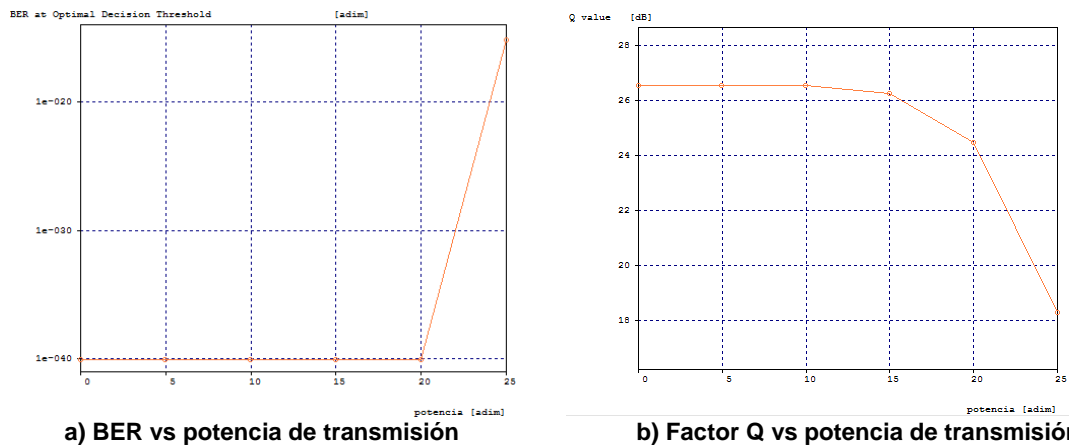


Figura 4.7. Diagramas de correlación a) BER vs potencia de transmisión, b) Factor Q vs potencia de transmisión, para una distancia de 5km y dispersión de 10 ps/nm/km.

El valor de potencia en el que se obtienen los valores más favorables en los factores de calidad es 8 dBm, figura 4.7 (a) y 4.7 (b).

La configuración recomendada para el caso de estudio 2 es, potencia de transmisión de 8 dBm y coeficiente de dispersión de 10 ps/nm/km, en la figura 4.8 se muestra el espectro óptico y diagrama del ojo que se obtiene con esta configuración, en la tabla 4.4 se muestran los valores de BER y factor Q.

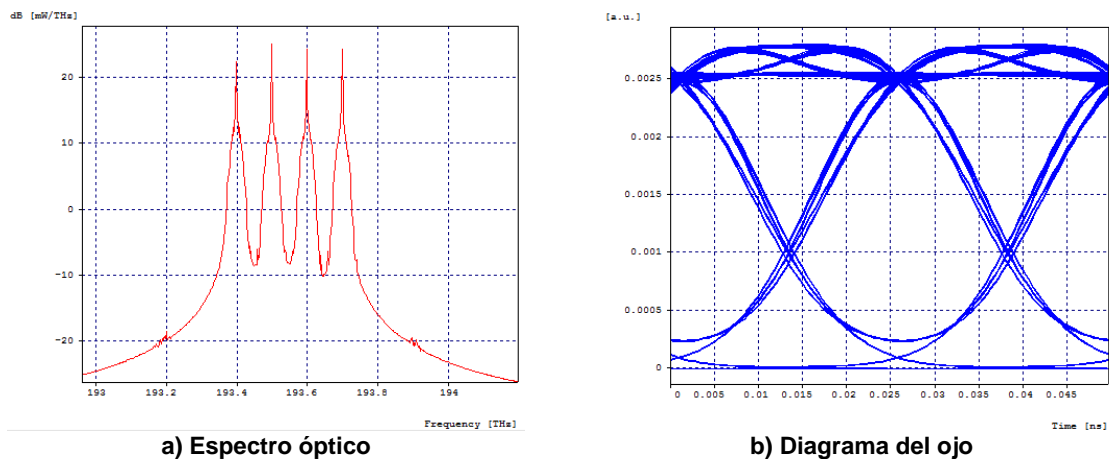


Figura 4.8. a) Espectro óptico, b) Diagrama del ojo, para potencia de 8 dBm, dispersión 10 ps/nm/km, distancia 5 km.

Tabla 4.4. Valores de BER y Factor Q, para 5 dBm, dispersión 4 ps/nm/km, distancia 78 km.

BER	Factor Q [dB]
0.99e-40	26,57

4.3 Caso de estudio 3.

En la tabla 4.5, se encuentra el resumen de los parámetros de transmisión y los respectivos valores que determinan el desempeño del sistema para este caso de estudio, esta tabla es resultado del análisis realizado en el Capítulo 3.

Tabla 4.5. Parámetros de transmisión y sus respectivos valores los cuales determinan el desempeño del sistema.

CASO DE ESTUDIO 3.	
SPM	
Distancia máxima alcanzada con 0 dBm para BER y Factor Q.	53 km
Potencia en la que se alcanzan los parámetros de calidad para 78 Km	31 dBm
Distancia máxima alcanzada con este escenario variando potencia	80 km
Potencia en la que se alcanza la distancia máxima	30 dBm
Dispersión en la que se obtienen las menores degradaciones	16 ps/nm/km
Dispersión en la que se obtienen las mayores degradaciones	-10 ps/nm/km
XPM	
Distancia máxima alcanzada con 0 dBm para BER y Factor Q.	53,90 km
Potencia en la que se alcanzan los parámetros de calidad para 78 Km	33 dBm
Distancia máxima alcanzada con este escenario variando potencia	56,60 km
Potencia en la que se alcanza la distancia máxima	30 dBm
Dispersión en la que se obtienen las menores degradaciones	6 ps/nm/km
Dispersión en la que se obtienen las mayores degradaciones	0 ps/nm/km
FWM	
Distancia máxima alcanzada con 0 dBm para BER y Factor Q.	53,11 km
Potencia en la que se alcanzan los parámetros de calidad para 78 Km	31 dBm
Distancia máxima alcanzada con este escenario variando potencia	72,12 km
Potencia en la que se alcanza la distancia máxima	30 dBm
Dispersión en la que se obtienen las menores degradaciones	10 ps/nm/km
Dispersión en la que se obtienen las mayores degradaciones	0 ps/nm/km

Partiendo de la tabla 4.5, se realizan las siguientes pruebas con el fin de determinar la configuración más conveniente para transmitir a través del sistema.

Se configura el sistema con algunos parámetros de transmisión fijos como distancia de 78 km, y se varía el parámetro de dispersión de la fibra de 0 ps/nm/km a 16 ps/nm/km para cada una de las potencias (dependiendo del efecto no lineal) en las que se obtienen la distancia máxima para este caso de estudio.

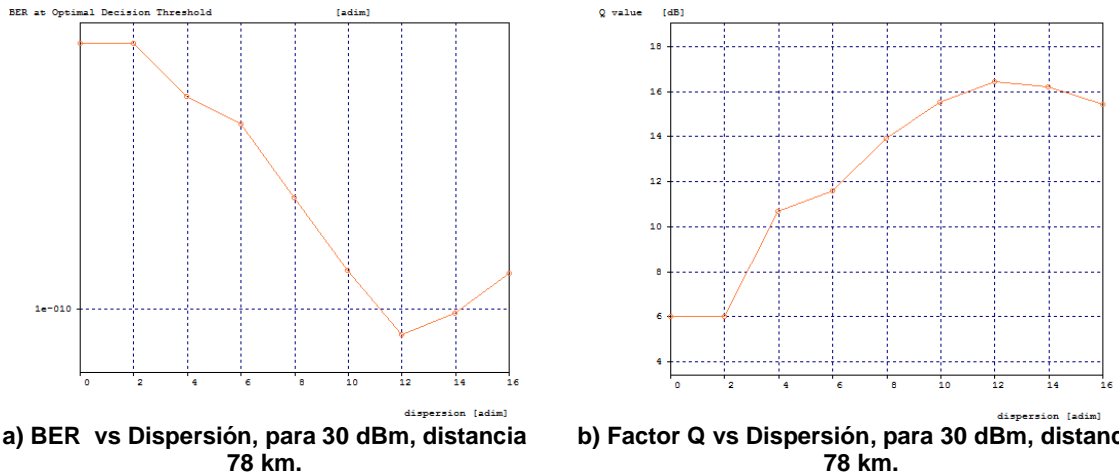


Figura 4.9. Factor Q vs Dispersión para potencia de a) 30 dBm y distancia de 78km.

El valor de dispersión en el que se mejora el desempeño del sistema es 12 ps/nm/km, figuras 4.9 (a) y 4.9 (b).

Teniendo en cuenta este valor de dispersión, se realiza una prueba donde se deja constante la distancia de 78 km, el parámetro de dispersión de la fibra de 12 ps/nm/km y se varía la potencia de transmisión de 0 dBm a 35 dBm.

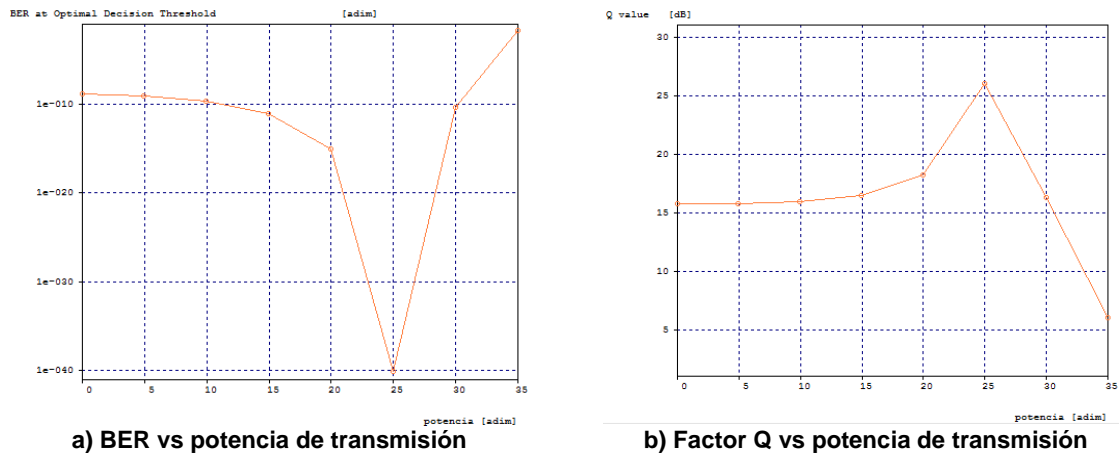


Figura 4.10. Diagramas de correlación a) BER vs potencia de transmisión, b) Factor Q vs potencia de transmisión, para una distancia de 78 km y dispersión de 12 ps/nm/km.

El valor de potencia en el que se obtienen los valores más favorables en los factores de calidad es 25 dBm, figura 4.10a y 4.10 b

La configuración recomendada para el caso de estudio 3 es, potencia de transmisión de 25 dBm y coeficiente de dispersión de 12 ps/nm/km, en la figura 4.11 se muestra el espectro óptico y diagrama del ojo que se obtiene con esta configuración, en la tabla se muestran los valores de BER y factor Q.

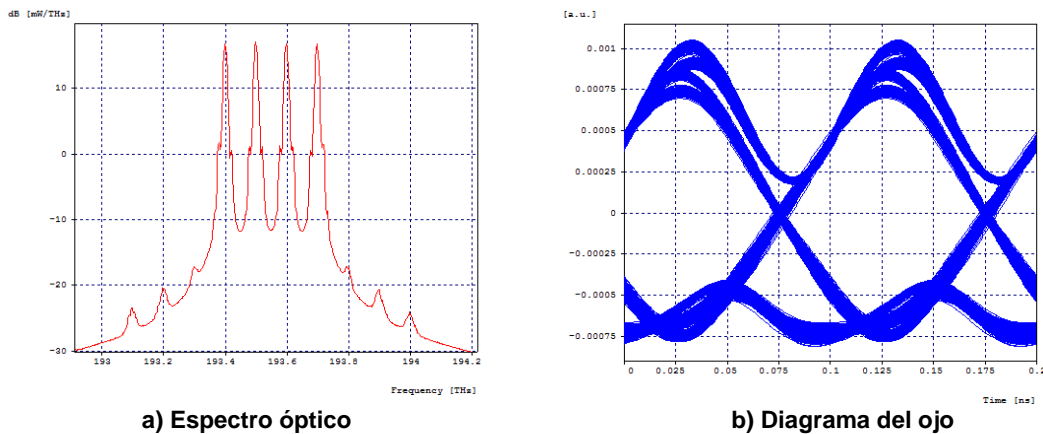


Figura 4.11. a) Espectro óptico, b) Diagrama del ojo, para potencia de 8 dBm, dispersión 10 ps/nm/km, distancia 78 km.

Tabla 4.6. Valores de BER y Factor Q, para 5dBm, dispersión 4 ps/nm/km, distancia 78 km.

BER	Factor Q [dB]
0.99e-40	25,95

4.4 Caso de estudio 4.

En la tabla 4.7, se encuentra el resumen de los parámetros de transmisión y los respectivos valores que determinan el desempeño del sistema para este caso de estudio, esta tabla es resultado del análisis realizado en el Capítulo 3.

Tabla 4.7. Parámetros de transmisión y sus respectivos valores los cuales determinan el desempeño del sistema.

CASO DE ESTUDIO 4.	
SPM	
Distancia que se alcanza con 0 dBm	5.3 km
Potencia con los parámetros de calidad para 5 km	35 dBm
Distancia máxima que se alcanza con este escenario	7 km
Potencia en la que se alcanza la distancia máxima	30 dBm
Dispersión en la que se obtienen los mejores niveles de calidad	16 ps/nm/km
Dispersión en la que se obtienen los peores niveles de calidad	4 ps/nm/km
XPM	
Distancia que se alcanza con 0 dBm	5,42 km
Potencia con los parámetros de calidad para 5 km	7 dBm
Distancia máxima que se alcanza con este escenario	-
Potencia en la que se alcanza la distancia máxima	-
Dispersión en la que se obtienen los mejores niveles de calidad	10 ps/nm/km
Dispersión en la que se obtienen los peores niveles de calidad	0 ps/nm/km
FWM	
Distancia que se alcanza con 0 dBm	5,41 km
Potencia con los parámetros de calidad para 5 km	27 dBm
Distancia máxima que se alcanza con este escenario	5,77 km
Potencia en la que se alcanza la distancia máxima	25 dBm
Dispersión en la que se obtienen los mejores niveles de calidad	8 ps/nm/km
Dispersión en la que se obtienen los peores niveles de calidad	0 ps/nm/km

Partiendo de la tabla 4.5, se realizan las siguientes pruebas con el fin de determinar la configuración más conveniente para transmitir a través del sistema.

Se configura el sistema con algunos parámetros de transmisión fijos como distancia de 78 km, y se varía el parámetro de dispersión de la fibra de 0 ps/nm/km a 16 ps/nm/km para cada una de las potencias (dependiendo del efecto no lineal) en las que se obtienen la distancia máxima para este caso de estudio.

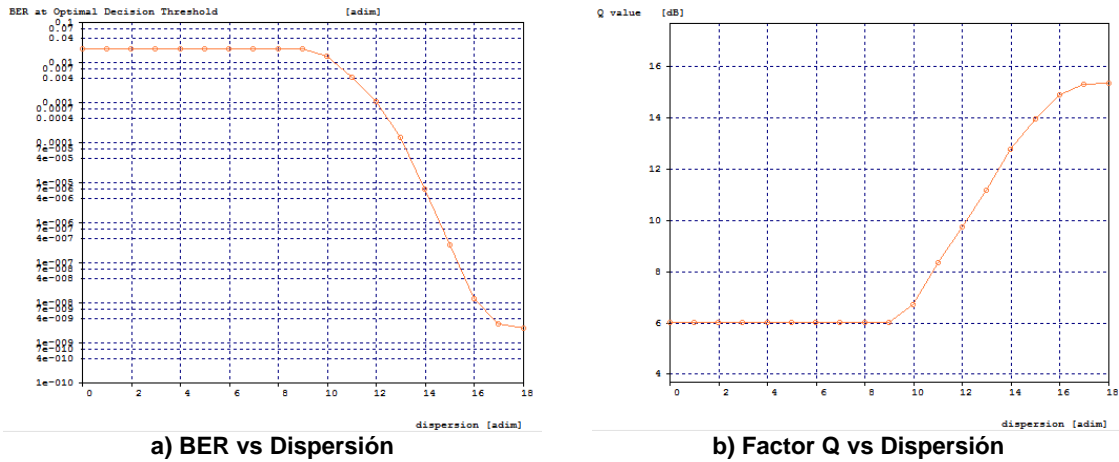


Figura 4.12. a) BER y b) factor Q contra dispersión para una potencia de 30 dBm y una distancia de 78 km.

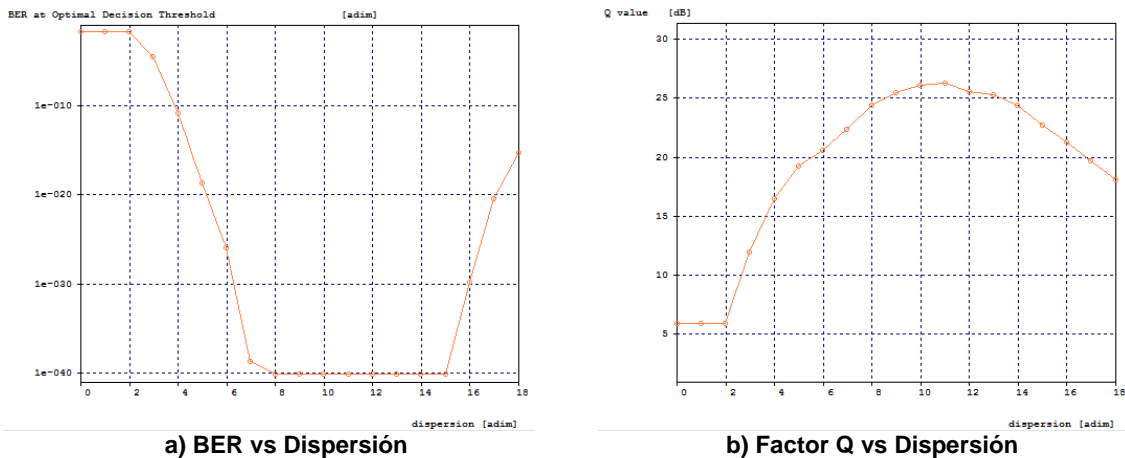


Figura 4.13. a) BER y b) factor Q vs dispersión para una potencia de 25 dBm y una distancia de 78 km.

El valor de dispersión en el que se mejora el desempeño del sistema es 11 ps/nm/km, figuras 4.12 (a), 4.12 (b) y 4.13 (a), 4.13 (b). El bajo rendimiento obtenido para una potencia de 30 dBm, figuras 4.12a, 4.12b, se debe a que este valor de potencia se tomó del caso de la prueba realizada para SPM en el cual la separación entre los canales era de 200 GHz, separación que permite aislar el comportamiento de este efecto no lineal, pero no es recomendable, ya que no se aprovecha de manera eficiente el ancho de banda que brinda la fibra óptica. La figura 4.14 muestra el diagrama de correlación de los

parámetros ópticos de medida contra potencia, para los 2 valores de dispersión, variando la potencia de 0 a 30 dBm, para encontrar el valor óptimo de potencia de transmisión para una dispersión de 11 ps/nm/km.

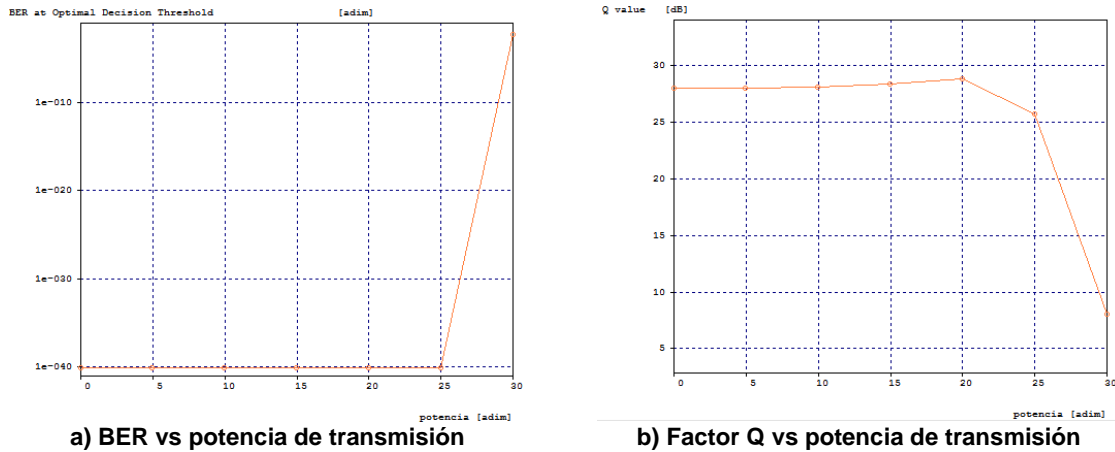


Figura 4.14. Diagramas de correlación a) BER y b) Factor Q vs potencia de transmisión, para una distancia de 5 km y dispersión de 11 ps/nm/km.

La configuración recomendada para el caso de estudio 4 es una potencia de transmisión de 20 dBm y coeficiente de dispersión de 11 ps/nm/km, en la figura 4.15 se muestra el espectro óptico y diagrama del ojo que se obtiene con esta configuración a una distancia de 5 km, en la tabla 4.8 los valores de BER y factor Q.

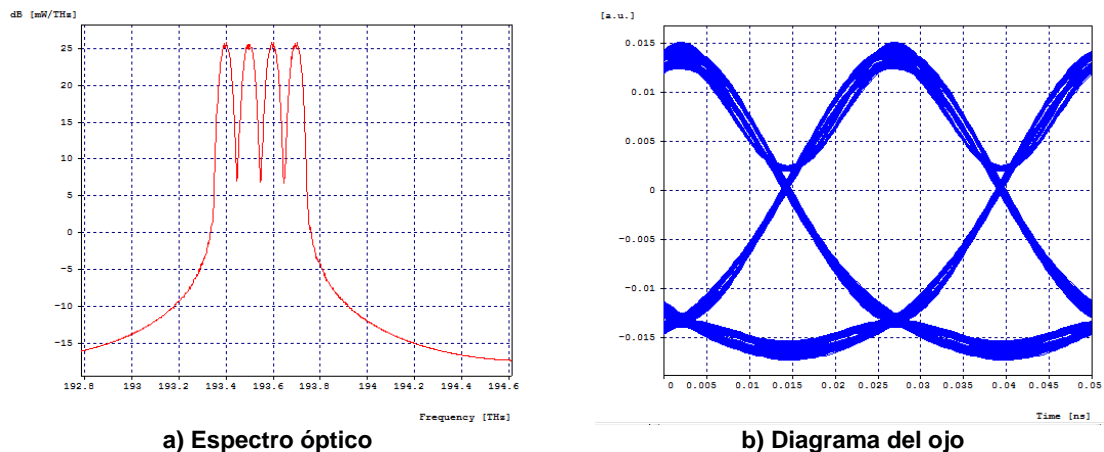


Figura 4.15. Diagrama del ojo para potencia de 5 dBm, dispersión 11 ps/nm/km, distancia 5 km.

Tabla 4.8. Valor de los parámetros ópticos de medida a 5 km, para la configuración recomendada, con potencia de transmisión de 20 dBm y dispersión de 11 ps/nm/km.

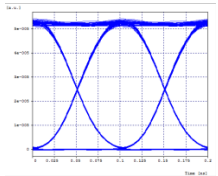
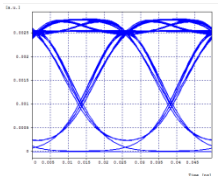
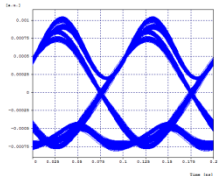
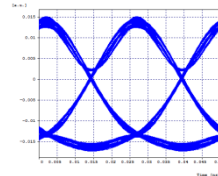
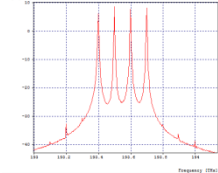
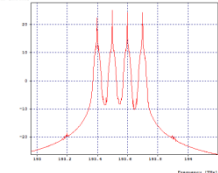
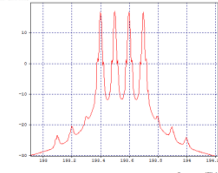
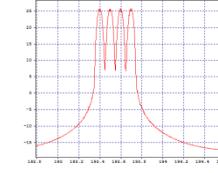
BER	Factor Q [dB]
0.99e-40	28,99

Para determinar el valor en los parámetros de transmisión para los cuales se obtiene un mejor desempeño para cada caso de estudio, fue necesario realizar simulaciones en las

cuales se determinaba los valores en que cada efecto no lineal impactaba en menor medida en el desempeño del sistema (Capítulo 3), tomando como base el anterior análisis se realizaron pruebas para determinar con que valores se logra una mitigación en el efecto conjunto de las degradaciones causadas por los efectos no lineales (Capítulo 4).

Este estudio realizado en el Capítulo 3 y 4 se consolida en la tabla 4.9, en la cual se muestra los valores óptimos en los parámetros de transmisión para cada caso de estudio y el comportamiento del sistema observado con las herramientas de OPM.

Tabla 4.9. Valores óptimos de los parámetros de transmisión para cada caso de estudio y comportamiento del sistema (OPM)

Parámetros de Transmisión	CASOS DE ESTUDIO (CE)			
	CE1 10 Gb/s NRZ- OOK	CE2 40 Gb/s NRZ- OOK	CE3-10 Gb/s-RZ- DPSK	CE4-40 Gb/s-RZ- DPSK
Potencia	5 dBm	8 dBm	25 dBm	20 dBm
Coefficiente de dispersión	2 ps/nm/km	10 ps/nm/km	12 ps/nm/km	11 ps/nm/km
Espaciamiento entre canales	100 GHz	100 GHz	100 GHz	100 GHz
Distancia	78 Km	5 Km	78 Km	5 Km
Diagrama del ojo				
Espectro Óptico				

En un contexto más cercano a la realidad y basándose en los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo de este trabajo de grado, se genera la recomendación para operadores que deseen implementar una red WDM la cual brinde una tolerancia aceptable a las no linealidades. Para ello es conveniente implementar el formato de modulación NRZ-OOK a 10 Gb/s ya que este tiene costos de implementación más bajos que los del formato de modulación RZ-DPSK y al trabajar bajo las condiciones especificadas (sin compensación de la dispersión y sin amplificación) logra alcanzar un rendimiento muy similar al formato más avanzado (RZ-DPSK). Siempre y cuando, la distancia del enlace a implementar no supere una distancia de 78 km, NRZ-OOK con los valores de potencia, dispersión y espaciamiento ente canales, especificados en la tabla 4.9, brinda niveles de calidad en los parámetros ópticos de medida favorables para su implementación.

Capítulo 5. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

El presente trabajo de grado parte de una amplia revisión bibliográfica de diferentes y reconocidos autores sobre los efectos no lineales, a través de esta se obtienen los conocimientos que permiten generar el primer aporte de este trabajo. Este aporte se consigna en la tabla 1.7 la cual presenta un compilado de las principales características de los efectos no lineales. A través de este aporte se pueden determinar con claridad los parámetros de una red WDM que impactan en los efectos no lineales. Este resultado es muy importante para trabajos futuros que se enfoquen en las degradaciones que se presentan debido a las no linealidades de la fibra óptica en un sistema de comunicaciones óptico.

Debido a la importancia del aporte anteriormente mencionado, se genera el artículo “Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM” el cual fue presentado en el “Call for Papers” para el “II Encuentro Internacional y VI Nacional de Investigación en Ingeniería de Sistemas e Informática”, siendo aprobado para participar en calidad de ponentes del 5 al 7 de Octubre de 2011, y expuesto en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, sede Tunja Boyacá el 6 de Octubre de 2011, en representación del Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT) de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.

Basándose en esta amplia revisión bibliográfica y los resultados obtenidos de las simulaciones presentadas en los Capítulos 3 y 4, se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros relacionados con la temática de este trabajo de grado que dieron cumplimiento a los objetivos propuestos.

5.1 Conclusiones

- El incremento en la tasa de transmisión del sistema hace que el impacto degradante de los efectos no lineales estudiados disminuya considerablemente, sin embargo se evidencia una gran reducción en el rendimiento del sistema ya que la distancia máxima a la cual se puede transmitir, se reduce notablemente.
- Para el formato de modulación NRZ-OOK las altas potencias en transmisión no generan una mejora significativa en el rendimiento del sistema, por el contrario, para valores elevados de potencia se generan altas degradaciones debido a los efectos no lineales.
- El formato de modulación RZ-DPSK tolera potencias más elevadas, pero estas son requeridas ya que a potencias bajas su rendimiento no es óptimo. Además, este formato es más sensible a las variaciones de potencia por encima de la potencia óptima de funcionamiento.
- Es necesario realizar la configuración del sistema, variando los diferentes parámetros de transmisión, de tal forma que se pueda aislar en mayor medida el comportamiento de cada efecto no lineal y así realizar un estudio del impacto que este genera en la degradación del sistema.

- La robustez del formato RZ-DPSK frente a NRZ-OOK se observa, principalmente en la reducción del impacto de las no linealidades, sin embargo, para la configuración del escenario implementado el cual no cuenta con compensación de dispersión ni amplificadores, la distancia máxima alcanzada por los 2 formatos fue similar.
- El formato de modulación RZ-DPSK es más robusto frente a las degradaciones que se presentan debido a los efectos no lineales, hasta el punto que XPM es mitigado casi en su totalidad. Sin embargo, requiere de una mayor potencia de transmisión para alcanzar un rendimiento óptimo.
- La dispersión de la fibra afecta en gran medida el impacto de las no linealidades sobre el sistema. Un valor de dispersión de 0 ps/nm/km es un valor crítico, donde se presenta un alto incremento de la degradación debido a las no linealidades. La dispersión ayuda a mitigar notablemente el impacto de las no linealidades, sin embargo, para altos valores de este parámetro de transmisión, se incrementa la degradación en el sistema.
- El efecto no lineal que más degrada el sistema debido a que se presenta para niveles más bajos de potencia es FWM, mientras XPM es uno de los menos degradantes ya que requiere que el canal contiguo tenga una potencia bastante superior.
- Dependiendo del espaciamiento entre los canales y el formato de modulación puede que SPM supere las degradaciones presentadas por FWM, debido a que FWM requiere de un espaciamiento inferior a 100 Ghz para degradar el sistema.
- Las principales degradaciones generadas con el formato de modulación RZ-DPSK se deben a la interferencia que se genera entre los canales debido al ancho de banda que requiere cada canal, más aun cuando se trabaja a 40 Gb/s, sin embargo los efectos no lineales no impactan en gran medida un sistema que trabaje con este formato.
- La distancia del enlace no es un parámetro del sistema que impacte en gran medida en las degradaciones causadas por los diferentes efectos no lineales.

5.2 Recomendaciones

Para realizar el estudio del desempeño de redes WDM frente a variaciones en los parámetros de transmisión y su incidencia en los efectos no lineales, se hace necesario tener en cuenta ciertas recomendaciones que facilitan la obtención y análisis de los resultados, tanto en la parte teórica como en las simulaciones.

- Se deben definir los efectos no lineales a tratar ya que cada uno de ellos se manifiesta de diferente manera y la forma de medirlos varía entre uno y otro. Es aquí donde resulta muy útil el aporte de la tabla 1.7, del Capítulo 1, la cual resume las principales características de cada uno de los efectos no lineales y los parámetros de transmisión que impactan en su comportamiento.

- Se hace necesario definir los formatos de modulación con los cuales va a trabajar el sistema ya que estos tienen una diferente tolerancia al impacto de las no linealidades, hasta el punto de lograr que el sistema no se vea afectado por algunas de ellas.
- La definición de una metodología de simulación asegura un entorno adecuado en el cual los resultados que se obtengan estén enmarcados en el contexto sobre el que se está desarrollando el proyecto.
- Para la realización de este proyecto se usó la herramienta OptSim® de Rsoft, cuya licencia fue adquirida por la Universidad del Cauca. De esta se pudo constatar que soporta un gran número de características de simulación por lo cual podría ser utilizada, no solo en el desarrollo de trabajos de grado, sino también para implementar nuevas materias electivas o laboratorios entorno a los sistemas de comunicaciones ópticas, permitiendo la simulación, estudio y comprensión de redes de nueva generación.
- Para obtener un resultado más fiable de las simulaciones realizadas en OptSim®, al trabajar con los efectos no lineales, se hace necesario trabajar con la mayor Resolución de Simulación posible (Simulation Accuracy) y la mejor Ejecución (Enforcement), aunque esto incrementa el tiempo requerido para las simulaciones, ya que de esto depende los resultados obtenidos, en especial los relacionados con FWM.
- Aunque no sea el tema principal, se debe tener en cuenta los filtros que se utilizan en el sistema ya que estos afectan el comportamiento del sistema.

5.3 Trabajos futuros

A través del desarrollo de este trabajo de grado, fue posible identificar nuevas investigaciones en el área de los efectos no lineales en comunicaciones ópticas sobre redes WDM, tales como:

- Trabajar con otros formatos de modulación, para determinar la tolerancia de dichos formatos a las no linealidades de la fibra y poder generar una amplia comparación que permita elegir el formato más adecuado según las características del sistema.
- Incrementar la velocidad de transmisión por encima de los 40 Gb/s para verificar las degradaciones generadas por las no linealidades a dichas tasas de transmisión, ya que en la actualidad ya se han comenzado a realizar estudios a 100 Gb/s.
- Analizar el impacto de los efectos no lineales intra-canal (IXPM e IFWM) para velocidades de transmisión de 40 Gb/s y superiores, ya que estos presentan un impacto altamente degradante para estas velocidades.
- Trabajar con otro tipo de fibras, que tengan otro valor de dispersión y diferente valor del parámetro de no linealidad como es el caso de las Fibras de Gran Área Efectiva (LEAF – Large Effective Area Fibers), que son fibras NZ-DSF mejoradas y que han tenido un gran auge en redes comerciales.

- Estudiar el impacto de los efectos no lineales SBS y SRS para diferentes escenarios.
- Determinar el impacto de las no linealidades de la fibra en sistemas que trabajan con un gran número de canales.
- Incrementar la complejidad del sistema de comunicación incluyendo amplificadores, regeneradores y compensadores de dispersión para determinar si estos elementos mitigan o incrementan, las degradaciones debido a las no linealidades.
- Verificar el impacto que tienen los filtros ópticos sobre las degradaciones generadas por las no linealidades de la fibra.

Bibliografía

- [1] [En línea]. Disponible: <http://www.youtube.com>
- [2] [En línea]. Disponible: <http://www.skype.com>
- [3] [En línea]. Disponible: <http://www.earth.google.es>
- [4] V. Alfredo, "Relevance of optical communications Views from Photonics", *eMobility General Assembly 6*, Septiembre 2010.
- [5] G. Omar Ivan, "Simulador de un Sistema de Comunicación Óptico Empleando Multicanalización por División de Longitudes de Onda (WDM)", Maestría en Ciencias con Especialidad en Sistemas Digitales, Instituto Politécnico Nacional, Tijuana, México, 2005.
- [6] M. Ramon Jesús, "Estudio y Diseño de Multiplexores por División en Longitud de Onda (WDM) Mediante Efectos Electroópticos", Proyecto fin de Carrera Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad de Valladolid, Valladolid, España, 1998.
- [7] A. Govind. *Fiber Optic Communications Systems*. Tercera edición. NY: Jhon Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [8] C. Bob. *Planning Fiber Optic Networks*. NY: McGraw-Hill, 2009.
- [9] E. Felipe, B. Rolando, "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", Tesis fin de carrera Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2008
- [10] V. Dirk, "Robust Optical Transmission Systems Modulation and Equalization", Tesis Doctoral, Universidad técnica de Eindhoven, Eindhoven, Holanda, 2008.
- [11] R. Rajiv, S. Kumar. *Optical Networks a Practical Perspective*. Segunda edición. San Diego: Academic Press, 2002.
- [12] S.P. Singh, "Nonlinear Effects in Optical Fibers: Origin, Management and Applications", en *Progress In Electromagnetics Research*, 2007, pp. 249–275.
- [13] G. Diego, "Sistemas de Comunicación por Fibra Óptica de Alta Velocidad", en *CSI boletín 51*, 2003, pp 22-33.
- [14] K. Ivan, L. Tingye, W. Alan. *Optical Fiber Telecommunications*. San Diego: Academic Press 2008.
- [15] W. Peter, E. Renè-Jean, "Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks", *Journal of Light Wave Technology*, Vol. 24, pp. 4711-4728, Diciembre 2006.

- [16] Grupo Comunicaciones Ópticas, “Teoría de las Telecomunicaciones Ópticas” Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática, Universidad de Valladolid. Valladolid, España 2006. [En Línea]. Disponible: <http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/index.htm>.
- [17] K. Yuhong, “Calculations and Measurements of Raman Gain Coefficients of Different Fiber Types”, Maestro de Ciencia en Ingeniería Eléctrica, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, USA, 2002.
- [18] H. Kazuo, H. Takemi, “Measurement of Brillouin Gain Spectrum Distribution along an Optical Fiber Using a Correlation Based Technique – Proposal, Experiment and Simulation”, *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E83-C, pp 405-412, Marzo 2000.
- [19] C. Calvin. *Optical Performance Monitoring*. San Diego: Academic Press, 2010.
- [20] C. Wei, “Signal Processing for Optical Performance Monitoring and Impairment Mitigation”, Doctor en Filosofía, University of Melbourne, Melbourne, Australia, 2006.
- [21] C. Lian-Kuan, C. Man-Hong, C. Chun-Kit, “From Optical Performance Monitoring to Optical Network Management: Research Progress and Challenges”. Hong Kong, China, 2004.
- [22] “Optical Signal to Noise Ratio (OSNR)”, notas de clase para el curso de Fotónica y Comunicaciones Ópticas, Spring 2005.
- [23] Z. Yinan. L. Marko, “Ultra-high quality factor optical resonators based on semiconductor nanowires”, Vol. 16, Octubre 2008.
- [24] “Análisis de Diagramas de Ojo”, notas de clase para Teoría de Comunicaciones Digitales, Departamento de Electrónica, Universidad Técnica Federico Santa María, 2002.
- [25] L. M. Bazdresch, “Tutorial de Diagramas de Ojo”. Universidad Jesuita de Guadalajara, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, Departamento de Electrónica, México, 2009.
- [26] ITU-T Rec. G.663 (2000), *Aspectos Relacionados con la Aplicación de los Dispositivos y Subsistemas de Amplificadores Ópticos*.
- [27] G. Ruben de León, R. David Nicolás. *Comunicaciones Ópticas*. Madrid: E.T.S.I.T Universidad Politecnica de Madrid, 2005.
- [28] “Wavelength Division Multiplexing”, notas de clase para Sistemas de Comunicaciones Ópticas, Escuela de Electrónica e Ingenierías de Comunicaciones, Dublin Institute of Technology, 2003.
- [29] Sección de Ingeniería Telemática de l’EPSEVG, *OPNET: Manual de usuario*, l’EPSEVG, 2004.

- [30] G. Gustavo, G. Juan Felipe, “Análisis de Desempeño de Formatos de Modulación en Comunicaciones Ópticas sobre Redes WDM”, presentado en TET 2010, Popayán, Colombia, 2010.
- [31] C. Domínguez, M. A. López, G. Martínez, B. Reyes, M. Vázquez, *Simulación Digital*, Jocotitlan: 2008.
- [32] RSoft Design Group, “Generalidades del producto OptSimTM”. [En Línea]. Disponible: <http://www.allopticdesign.com/productos/simulacion/optsim/OptSim.pdf>
- [33] RSoft Design Group, “System Network Design”. [En Línea]. Disponible: <http://www.luensoft.co.kr/>
- [34] OptSim, *User Guide*, RSoft®, 2009.
- [35] V. Bobrovs. G. Ivanovs, “Investigation of Mixed Data Rate and Format Transmission in WDM Networks”, *Electronics and Electrical Engineering*, No. 4, pp 63-66, 2008.
- [36] PI1470, Corning SMF-28 ULL Optical Fiber With Corning Ultra Low Loss Technology, Corning®, NY.
- [37] ITU-T Rec. G.652 (2009), *Characteristics of a Single-Mode Optical Fiber and Cable*.
- [38] ITU-T Rec. G.694.1 (2002), *Spectral Grids for WDM Applications: DWDM frequency grid*.
- [39] ITU-T Rec. G.691 (2006), *Interfaces Ópticas para los Sistemas Monocanal STM-64 y otros Sistemas de la Jerarquía Digital Síncrona con Amplificadores Ópticos*.
- [40] OptSim, *Application Notes and Examples*, RSoft®, 2009.

