

**DEFINICIÓN DE CRITERIOS Y PROCEDIMIENTOS QUE PERMITAN EL DIMENSIONAMIENTO
DE REDES ÓPTICAS WDM MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LOS PRINCIPALES EFECTOS DE
TRANSMISIÓN ÓPTICA**



Trabajo de Grado

**CAROLINA JIMÉNEZ ZAPATA
DONI DANIEL CONSTAÍN PRADO**

Director: Alejandro Toledo Tovar

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones – GNTT
Popayán, 2008**

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	i
LISTA DE FIGURAS.....	ii
GLOSARIO DE ACRÓNIMOS.....	v
INTRODUCCIÓN	1
1. INTRODUCCIÓN A LAS REDES WDM.....	2
1.1. VENTANAS DE OPERACIÓN.....	2
1.2. CLASIFICACIÓN DE LAS REDES WDM.....	3
1.2.1. Clasificación Según el Área de Cobertura	3
1.2.2. Clasificación Según el Patrón de Longitud de Onda.....	4
1.3. PRINCIPALES COMPONENTES DE UNA RED WDM	5
1.4. PROBLEMAS DE TRANSMISIÓN	6
2. PRINCIPALES CONCEPTOS Y PARÁMETROS EN EL DIMENSIONAMIENTO DE REDES WDM.....	7
2.1. DISTANCIA DE TRANSMISIÓN.....	7
2.2. TRANSMISORES	8
2.3. MULTIPLEXORES Y DEMULTIPLEXORES ÓPTICOS.....	8
2.4. FIBRA ÓPTICA.....	9
2.5. RECEPTORES	9
2.6. LONGITUDES DE ONDA	10
2.7. EFECTOS NO LINEALES	10
2.8. RELACIÓN SEÑAL/RUIDO ÓPTICA (OSNR- Optical Signal to Noise Ratio)	11
2.9. FACTOR Q	11
2.10. BIT ERROR RATE (BER) DEL SISTEMA.....	12
2.11. DIAGRAMA DEL OJO	13
2.12. PÉRDIDAS.....	15
2.13. DISPERSIÓN.....	15
2.14. CONSTANTE DE PROPAGACIÓN.....	16
3. EFECTOS DE TRANSMISIÓN A CONSIDERAR EN EL DIMENSIONAMIENTO DE REDES WDM.....	17
3.1. EFECTOS LINEALES.....	17
3.1.1. Atenuación.....	17
3.1.2. Dispersión.....	18
3.2. EFECTOS NO LINEALES	30
3.2.1. Dispersión Estimulada.....	31
3.2.2. Índices De Fluctuaciones Refractivas	33
4. CRITERIOS Y PROCEDIMIENTOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE REDES WDM.....	37
4.1. CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE REDES WDM	37
4.2. PROCEDIMIENTOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE REDES WDM	45
4.3. EJEMPLO DE DISEÑO	48

5. VALIDACIÓN DE LOS CRITERIOS PROPUESTOS MEDIANTE SIMULACIÓN.....	52
5.1. ELECCIÓN HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN.....	52
5.2. RESULTADOS SIMULACIÓN DE LOS CRITERIOS.....	52
5.3. RESULTADOS SIMULACIÓN DEL EJEMPLO DE DISEÑO	110
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	114
6.1. CONCLUSIONES	114
6.2. RECOMENDACIONES.....	115
6.3. TRABAJOS FUTUROS.....	116
REFERENCIAS.....	117

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tecnología DWDM [15].....	5
Tabla 2. Pérdidas por inserción y otras pérdidas para la ventana de 1550nm [11]	15
Tabla 3. Distancias de transmisión para diferentes valores de PMD [25]	25
Tabla 4. Principales especificaciones de la ITU para la fibra monomodo [10]	26
Tabla 5. Productos FWM generados en un sistema WDM de tres canales.	35
Tabla 6. ITU Grid [35].....	44
Tabla 7. Márgenes requeridos [11]	45
Tabla 8. Rango dinámico receptores ópticos a 2.5Gb/s	52
Tabla 9. Rango dinámico receptores ópticos a 10Gb/s	53
Tabla 10. Sensibilidad y ancho de banda para diferentes receptores ópticos	53
Tabla 11. BER y Factor Q, sensibilidad -17dBm	55
Tabla 12. BER y Factor Q, sensibilidad -34dBm	55
Tabla 13. BER y Factor Q, receptor con diferente condición de ruido	57
Tabla 14. Parámetros de rendimiento para BER de 10^{-9} y 10^{-12}	58
Tabla 15. Relación entre el factor Q y la OSNR.	60
Tabla 16. Datos de BER para todos los canales.	61
Tabla 17. Valores de atenuación con respecto a la BER y la potencia en el receptor.....	62
Tabla 18. Factor Q vs abertura del ojo.....	64
Tabla 19. Dispersión vs potencia óptica en el receptor.	64
Tabla 20. Relación entre dispersión, BER, factor Q y diagrama de ojo.	66
Tabla 21. Área efectiva para los diferentes valores del parámetro $aEff$	71
Tabla 22. Efecto SPM vs potencia de transmisión, datos obtenidos.....	74
Tabla 23. Efecto SPM vs dispersión, datos obtenidos.....	76
Tabla 24. Resultados simulación efecto XPM	78
Tabla 25. Frecuencia canales transmitidos	81
Tabla 26. Productos FWM separación igual de canales.....	82
Tabla 27. Parámetros de rendimiento separación igual	82
Tabla 28. Productos FWM separación desigual de canales.....	83
Tabla 29. Parámetros de rendimiento caso separación desigual.....	83
Tabla 30. Productos FWM	85
Tabla 31. Potencia vs polarización	85
Tabla 32. Ganancia Raman	89
Tabla 33. Tilt inducido por la SRS Pin=20dBm.....	90
Tabla 34. Tilt inducido por la SRS Pin = 18dBm.....	90
Tabla 35. Pérdida de potencia inducida por SRS	92
Tabla 36. Parámetros de rendimiento para el sistema sin amplificación.....	93
Tabla 37. Parámetros de rendimiento para el sistema con 2 amplificadores de línea	94
Tabla 38. Parámetros de rendimiento para el sistema con 3 amplificadores de línea	96
Tabla 39. Comportamiento del sistema para las diferentes separaciones a las velocidades de 2.5 y 10 Gb/s.....	98
Tabla 40. Valores de los canales para diferentes separaciones.	101
Tabla 41. Parámetros de rendimiento para las diferentes separaciones.	102
Tabla 42. Canales para las diferentes separaciones.....	103
Tabla 43. Parámetros de rendimiento para el canal de prueba.....	103
Tabla 44. Parámetros de rendimiento Compensación DCF	105
Tabla 45. Parámetros de rendimiento sin considerar no linealidades en la fibra	111
Tabla 46. Parámetros de rendimiento considerando no linealidades en la fibra.....	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ventanas de operación [9].....	3
Figura 2. Espaciado entre canales para DWDM y CWDM [13].	4
Figura 3. Componentes de una red óptica [3].....	6
Figura 4. Sensibilidad en función de la velocidad de transmisión, para diferentes receptores [21].	10
Figura 5. BER vs potencia recibida, para diferentes velocidades de transmisión [21].	10
Figura 6. BER vs Factor Q [20].	12
Figura 7. Posibles ternas de bits enviadas para el registro de un diagrama de ojo [21].	13
Figura 8. Diagrama del ojo correspondiente a la figura 7 [21].	14
Figura 9. Diagrama del ojo ideal (izquierda) y degradado (derecha) para el formato NRZ [20].....	15
Figura 10. Curva de atenuación en una fibra de silicio [21].	17
Figura 11. Dispersión Rayleigh [8]	18
Figura 12. Resultado del ensanchamiento de los pulsos en el dominio del tiempo a causa de la dispersión [7].	19
Figura 13. Propagación de la luz en una fibra multimodo [22]	19
Figura 14. Trayectoria de un rayo de luz en una fibra de índice gradual [22]	19
Figura 15. Ancho Espectral de un diodo LED y un diodo laser [7]	21
Figura 16. Dispersión de guía de onda y dispersión del material en una fibra SMF de índice escalonado [9].	22
Figura 17. Efecto de SPM en un pulso [13]	22
Figura 18. Régimen de dispersión para fibras monomodo estándar [10].	22
Figura 19. Chirp debido a dispersión positiva [23].....	23
Figura 20. Chirp debido a dispersión negativa [23]	24
Figura 21. PMD en una Fibra monomodo [9].....	24
Figura 22. Desplazamiento de la dispersión [26].....	25
Figura 23. Fibras de dispersión negativa [26].....	27
Figura 24. Eliminación del pico de agua utilizando fibras LWPf [21].	27
Figura 25. Técnicas de compensación de la dispersión mediante DCF [21].	29
Figura 26. Esquema de un dispositivo de compensación de PMD [21]	30
Figura 27. Efecto del SRS [26].....	32
Figura 28. Resultado de los productos cruzados de las longitudes de onda [9]	35
Figura 29. Efecto de “walk-off” [23]	36
Figura 30. Curvas de sensibilidad para diferentes receptores, BER 10^{-9} y longitud de onda 1550nm [3].	37
Figura 31. Ancho de banda ocupado por un canal en un sistema WDM.	43
Figura 32. Comparación entre distintos canales WDM para velocidades de transmisión de 2,5Gb/s y 10Gb/s	43
Figura 33. Diagrama de Flujo de un caso de diseño WDM general [3].....	47
Figura 34. Ubicación amplificadores y DCUs en el sistema diseñado	49
Figura 35. Esquema para estudio de los parámetros del receptor	54
Figura 36. Diagramas de ojo sensibilidad -17dBm	54
Figura 37. Diagramas de ojo sensibilidad -34dBm	55
Figura 38. BER y Factor Q vs Potencia de entrada al receptor.....	56
Figura 39. Diagramas de ojo $P_r=-17$ dBm (a) Receptor con bajo Ruido, (b) Receptor con mayor ruido	56
Figura 40. Diagramas de ojo $P_r=-13$ dBm (a) Receptor con bajo Ruido, (b) Receptor con mayor ruido	57
Figura 41. Esquema para simulación del análisis de BER.	58
Figura 42. Diagramas de ojo para BER de: (a) 10^{-9} y (b) 10^{-12}	58
Figura 43. Esquema para el análisis de la OSNR.	59
Figura 44. Mapa de potencia para: (a) 7 amplificadores y (b) 14 amplificadores.....	59
Figura 45. Sistema WDM punto a punto de 8 canales.	60
Figura 46. Diagrama del ojo para el peor canal	61
Figura 47. Sistema óptico monocanal punto a punto.....	62
Figura 48. Atenuación vs potencia en el receptor.....	62

Figura 49. Diagramas de ojo para atenuación: (a) 28dBm, (b) 30dBm, (c) 32dBm, (d) 34dBm (e) 36dBm.....	63
Figura 50. Sistema óptico monocanal punto a punto para análisis de dispersión.....	64
Figura 51. Dispersión vs potencia óptica en recepción.....	65
Figura 52. Dispersión vs potencia eléctrica en recepción.....	65
Figura 53. Diagramas de ojo para dispersión: (a) 4.3 ps/nm/km, (b) 7 ps/nm/km, (c) 8 ps/nm/km, (d) 16 ps/nm/km, (e) 18 ps/nm/km, (f) 18.5 ps/nm/km, (g) 20.5 ps/nm/km.....	66
Figura 54. Sistema óptico monocanal para análisis de PMD.....	67
Figura 55. Señal de salida del transmisor.....	68
Figura 56. Señal en recepción para un coeficiente de PMD de 0.1 ps/km ^{1/2}	68
Figura 57. Señal en recepción para un coeficiente de PMD de 1 ps/km ^{1/2}	69
Figura 58. DGD para los diferentes valores de <i>seed</i> y para los dos coeficientes de PMD.....	69
Figura 59. Esquema para analizar la pérdida de potencia debido a la PMD.....	70
Figura 60. Esquema de un sistema óptico para el análisis del SBS.....	70
Figura 61. Relación de potencias para una fibra sin SBS y con SBS.....	71
Figura 62. Comportamiento de la SBS con respecto al área efectiva.....	72
Figura 63. Comportamiento de la SBS para un área efectiva mínima y máxima.....	72
Figura 64. Diferencia entre potencias de transmisión y recepción debido a la influencia del SBS.....	73
Figura 65. Esquema simulación efecto SPM.....	73
Figura 66. SPM vs Potencia (a) Factor Q vs Potencia transmisión.....	74
Figura 67. Diagramas de ojo efecto SPM.....	75
Figura 68. Espectro óptico efecto SPM.....	76
Figura 69. Factor Q vs Dispersión en la fibra.....	77
Figura 70. Espectro óptico señal recibida para dispersión -17ps/nm/km (rojo) y dispersión 17ps/nm/km (verde).....	77
Figura 71. Diagramas de ojo en recepción para diferentes valores de dispersión.....	77
Figura 72. Esquema simulación efecto XPM.....	78
Figura 73. Diagramas de ojo efecto XPM para distintos valores de dispersión.....	79
Figura 74. Espectro óptico de la señal de prueba en transmisión (rojo) y recepción para dispersión de 0ps/nm/km (verde) y para dispersión de 4ps/nm/km (café).....	80
Figura 75. Esquema simulación efecto FWM vs. Separación desigual de Canales.....	80
Figura 76. Espectro óptico en transmisión (a) Separación Igual, (b) Separación Desigual.....	81
Figura 77. Espectro óptico en recepción, caso separación igual.....	82
Figura 78. Diagramas de ojo en recepción, caso separación igual.....	83
Figura 79. Espectro óptico en recepción, caso separación desigual.....	84
Figura 80. Diagramas de ojo en recepción, caso separación desigual.....	84
Figura 81. Esquema simulación FWM vs Polarización.....	85
Figura 82. Espectro óptico (a) Transmisión (b) Rotación 0 (c) Rotación 45 (d) Rotación 90.....	86
Figura 83. Productos FWM para diferentes estados de polarización.....	86
Figura 84. Esquema FWM vs Dispersión.....	87
Figura 85. Espectro óptico: (a) señal transmitida, señal en recepción para (b) D = 0,.....	88
Figura 86. Nivel de potencia de los productos FWM vs Dispersión.....	88
Figura 87. Esquema simulación efecto SRS.....	88
Figura 88. Espectro óptico en transmisión Pin = 20dBm.....	89
Figura 89. Espectro óptico de la señal recibida Pin=20dBm (a) Raman_constant=0,.....	90
Figura 90. Espectro óptico en transmisión Pin = 18dBm.....	91
Figura 91. Espectro óptico de la señal recibida Pin=20dBm (a)Raman_constant=0, (b)Raman_constant=0.1, (c)Raman_constant=0.5, (d)Raman_constant=1.....	91
Figura 92. Sistema WDM punto a punto multicanal sin amplificación.....	92
Figura 93. Diagramas de ojo para distancias de 106 y 110 km.....	93
Figura 94. Sistema multicanal WDM con dos amplificadores de línea.....	94
Figura 95. Diagrama de ojo para el peor canal.....	95
Figura 96. Espectro óptico y OSNR.....	95
Figura 97. Sistema multicanal WDM con tres amplificadores de línea.....	95
Figura 98. Diagrama de ojo para el peor canal.....	96
Figura 99. Espectro óptico y OSNR.....	96

Figura 100. Sistema WDM punto a punto de cuatro canales.	97
Figura 101. Espectro óptico para una separación de canales de 25 GHz.	99
Figura 102. Espectro óptico para una separación de canales de 100 GHz.	99
Figura 103. BER y factor Q para el canal 1.	99
Figura 104. Diagramas de ojo para el canal 1 a una separación de 25 GHz.	100
Figura 105. Diagramas de ojo para el canal 1 a una separación de 100 GHz.	100
Figura 106. Sistema WDM de tres canales.	100
Figura 107. Espectro óptico para las diferentes separaciones.	101
Figura 108. Diagramas de ojo para las separaciones entre canales de 25 y 100 GHz.	102
Figura 109. Diagramas de ojo para el canal de prueba a las diferentes separaciones.	103
Figura 110. Esquema pre y post compensación.	104
Figura 111. Enlace óptico (a) pre-compensación, (b) post-compensación	104
Figura 112. Esquema Compensación Simétrica.	105
Figura 113. Esquema Compensación Simétrica Diagramas de ojo e histograma (a) Transmisión, (b) Sin compensación, (c) Pre-compensación, (d) Post-compensación, (e) compensación simétrica.	106
Figura 114. Esquema simulación redes de difracción Bragg	107
Figura 115. Diagrama de Ojo e Histograma Transmisión, (b) Sin compensación, (c) Con Compensación FBG	107
Figura 116. Esquema simulación Inversión Espectral.	108
Figura 117. Espectro óptico (a) antes del conjugador (b) después del conjugador	108
Figura 118. Desviación de Fase Antes (rojo) Después (verde) del conjugador	109
Figura 119. Señal en Transmisión (a) Diagrama de ojo (b) Histograma	109
Figura 120. Diagramas de ojo e histograma (a) Después de 100km, (b) Recepción.	110
Figura 121. Esquema para simulación del ejemplo de diseño	110
Figura 122. Espectro óptico en recepción sin considerar no linealidades.	111
Figura 123. Diagrama del ojo para el peor canal (Canal 8) sin considerar no linealidades	111
Figura 124. Espectro óptico en recepción considerando no linealidades.	112
Figura 125. Diagrama del ojo para el peor canal (Canal 7) considerando las no linealidades	113

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

- APD:** Avalanche PhotoDiode (Fotodiodo de Avalancha)
- ASE:** (Emisión Espontánea Amplificada)
- BER:** Bit Error Rate (Tasa de Error de Bit)
- CD:** Chromatic Dispersion (Dispersión Cromática)
- CPM:** Cross Phase Modulation (Modulación de Fase Cruzada)
- CWDM:** Coarse Wavelength Division Multiplexing (Multiplexación por División de Longitud de Onda Espaciada)
- DCF:** Dispersion Compensation Fiber (Fibra Compensadora de Dispersión)
- DCU:** Dispersion Compensating Units (Unidades de Compensación de Dispersión)
- DSF:** Dispersion Shift Fiber (Fibra de Dispersión Desplazada)
- DWDM:** Dense Wavelength Division Multiplexing (Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa)
- EDFA:** Erbium Doped Fibre Amplifier (Amplificadores de Fibra Dopados con Erbio)
- FBG:** Fiber Bragg Gratings (Fibras de Difracción de Bragg)
- FWM:** Four Wave Mixing (Mezcla de Cuarta Onda)
- GVD:** Group Velocity Dispersion (Dispersión de Velocidad de Grupo)
- IDF:** Inverse Dispersion Fiber (Fibras de Dispersión Inversa)
- ISI:** Inter-Symbol Interference (Interferencia Inter-Símbolos)
- ITU:** International Telecommunication Union (Unión Internacional de Telecomunicaciones)
- LASER:** Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación)
- LEAF:** Large Effective Area Fiber (Fibras de Área Efectiva Grande)
- LED:** Light-Emitting Diode (Diodo Emisor de Luz)
- LWPF:** Low-water-peak (Fibra de Pico de Agua Bajo)
- NDF:** Non Dispersion Fiber (Fibras sin Dispersión)
- NZDSF:** Non Zero Dispersion-Shift Fiber (Fibra de Dispersión Desplazada con valor No-Cero)
- OSNR:** Optical Signal to Noise Ratio (Relación Señal/Ruido Óptica)
- PIN:** Positive – Intrinsic – Negative (Positivo – Intrínseco - Negativo)
- PMD:** Polarization Mode Dispersion (Dispersión por Modo de Polarización)
- QoS:** Quality of Service (Calidad de Servicio)
- SBS:** Stimulated Brillouin Scattering (Dispersión de Brillouin Estimulada)
- SMF:** Single Mode Fiber (Fibra Monomodo Estándar)
- SNR:** Signal-to-Noise Ratio (Relación Señal-a-Ruido)
- SOA:** Silicon Optical Amplifier (Amplificadores de Silicio)
- SPM:** Self-Phase Modulation (Modulación de Auto-fase)
- SRS:** Stimulated Raman Scattering (Dispersión Raman Estimulada)

SSMF: Standard Single Mode Fiber (Fibras Monomodo Estándar)

UDWDM: Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing (Multiplexación por Longitud de Onda Ultra Densa)

WDM: Wavelength Division Multiplexing (Multiplexación por Longitud de Onda)

XPM – Cross Phase Modulation (Modulación de Fase Cruzada)

INTRODUCCIÓN

Desde hace algunas décadas la fibra óptica se viene empleando cada vez más en las comunicaciones debido a que las ondas luminosas tienen una frecuencia alta y la capacidad de una señal para transportar información aumenta con la frecuencia. Esta característica de la fibra junto con los avances y desarrollos logrados dio origen a las denominadas redes ópticas que a su vez han propiciado una evolución en los servicios ofrecidos.

Actualmente, la creciente demanda por parte de los usuarios, de nuevos y mejores servicios de telecomunicaciones los cuales requieren una mayor capacidad de red, tanto en ancho de banda como en velocidad de transmisión, ha evidenciado la necesidad de desarrollar y aplicar nuevas tecnologías que permitan optimizar el uso y desempeño de las redes de comunicaciones existentes para poder transportar las grandes cantidades y distintos tipos de tráfico (voz, datos, video, etc.) generados por los servicios de banda ancha asegurando una adecuada Calidad de Servicio (QoS - Quality of Service) [1].

En este contexto, las redes ópticas basadas en Multiplexación por Longitud de Onda (WDM - Wavelength Division Multiplexing), se presentan como la posibilidad tecnológica más apta para transportar grandes cantidades de información y satisfacer los requerimientos de los usuarios sin afectar significativamente el costo por bit transmitido, ya que permiten mejorar el desempeño de las infraestructuras de red instaladas mediante la optimización del uso del ancho de banda ofrecido por la fibra, aumentando su capacidad de transmisión y evitando la necesidad de instalar nuevos cables de fibra lo cual implicaría grandes costos, riesgos de retrasos y dificultades de construcción [2].

Aunque en sus inicios se consideró la fibra óptica como un medio de transmisión con ancho de banda infinito, la evolución de los sistemas de comunicaciones ópticos basados en WDM los cuales han avanzado de una velocidad de 2.5Gb/s hasta 100Gb/s, ha mostrado que el ancho de banda real está limitado ya que para los sistemas de 10Gb/s y superiores se presentan efectos que no eran apreciables en los sistemas de 2.5Gb/s, lo cual limita las velocidades de transmisión y el alcance de los enlaces de fibra óptica [1]. Entre estos efectos se encuentran la Dispersión Cromática (CD - Chromatic Dispersion), la Dispersión por Modo de Polarización (PMD - Polarization Mode Dispersion) y algunos efectos debidos a las no linealidades de la fibra, tales como: la Dispersión de Brillouin Estimulada (SBS - Stimulated Brillouin Scattering), la Dispersión Raman Estimulada (SRS - Stimulated Raman Scattering), la Modulación de Autofase (SPM - Self-Phase Modulation), la Modulación de Fase Cruzada (XPM - Cross Phase Modulation) y la Mezcla de Cuarta Onda (FWM - Four Wave Mixing) [3].

A pesar de estas limitaciones y gracias a las ventajas y beneficios ofrecidos por la tecnología de multiplexación WDM, ésta ha tenido gran acogida por parte de los operadores de redes impulsando la realización de numerosos estudios con el fin de optimizar el desempeño y rendimiento de estos sistemas en respuesta a los efectos de transmisión.

En el capítulo uno se presenta una introducción a las redes WDM donde se describe las ventanas de operación para las redes ópticas, las posibles clasificaciones para estas redes, los principales componentes de una red WDM y por último, en forma muy breve los problemas de transmisión óptica, los cuales se retoman con mayor profundidad en el capítulo tres. En el capítulo dos se describen los principales conceptos y parámetros que influyen en el dimensionamiento de redes WDM. En el capítulo tres se analizan los efectos lineales y no lineales que influyen en el rendimiento de las redes ópticas. Es importante aclarar que no se realizó un estudio del comportamiento físico de estos efectos. Con base en los capítulos anteriores, en el capítulo cuatro se proponen criterios y procedimientos para el dimensionamiento de redes ópticas WDM, los cuales son validados mediante simulación en el capítulo cinco sobre la herramienta software de simulación OptSim de la empresa Rsoft Design Group. Por último, en el capítulo seis se plantea las conclusiones, recomendaciones y posibles trabajos futuros a realizar en proyectos de grado [4].

1. INTRODUCCIÓN A LAS REDES WDM

La Multiplexación por división de Longitud de Onda - WDM (Wavelength Division Multiplexing) es una tecnología óptica que utiliza diferentes longitudes de onda para multiplexar múltiples señales en una sola fibra. Los primeros sistemas WDM aparecieron alrededor de 1980 y combinaban tan sólo dos señales, mientras que los sistemas modernos pueden soportar hasta 160 señales y expandir un sistema de fibra de 10 Gb/s hasta una capacidad teórica total de 25,6 Tb/s sobre un solo par de fibra [5].

Este capítulo, en complemento con el anexo A, presenta las principales generalidades de las redes WDM (Definición, Clasificación y Componentes) como introducción al estudio de las consideraciones técnicas y tecnológicas que se deben tener en cuenta para el dimensionamiento de estas redes.

Entre las ventajas que brinda WDM está la posibilidad de transportar cada señal a una velocidad y formato diferente, lo cual permite aumentar la capacidad de las redes existentes sin necesidad de instalar nuevas fibras; reduciendo el costo de expansión de infraestructura de red, ya que el costo asociado con la instalación de fibra óptica comúnmente es mayor que el costo de instalar un sistema de transmisión. Además, esta característica de WDM permite explotar el enorme ancho de banda optoelectrónico, ya que en una misma fibra se pueden multiplexar varios canales WDM de diferentes usuarios finales cuyos equipos sólo necesitan operar a la velocidad de un canal WDM, la cual corresponde a una velocidad electrónica que puede ser elegida arbitrariamente. De esta forma, en WDM el espectro óptico de transmisión se transforma en un número de bandas de longitud de onda (o frecuencias) no solapadas, donde cada λ soporta un único canal de comunicación operando a la velocidad que se desee [3] [6].

Las bandas de frecuencia utilizadas por los sistemas WDM son:

- O-band (original)— Desde 1260 nm a 1360 nm
- E-band (extended)— Desde 1360 nm a 1460 nm
- S-band (short wavelength)— Desde 1460 nm a 1530 nm
- C-band (conventional)— Desde 1530 nm a 1565 nm
- L-band (long wavelength)— Desde 1565 nm a 1625 nm
- U-band (ultra-long wavelength)— Desde 1625 nm a 1675 nm

La fibra *monomodo estándar* (SMF-Single Mode Fiber) (ITU G.652) se recomienda para utilizarse con los sistemas WDM en la banda O. La fibra de reducido pico de agua (LWPF¹ - Low-Water-Peak Fiber) (ITU G.652.C) se recomienda para la banda E, y la fibra de dispersión desplazada con valor no-cero (NZDSF: Non-Zero Dispersión-Shift Fiber) (ITU G.655) se recomienda para utilizar con los sistemas WDM en las bandas S, C, y L [3].

1.1. VENTANAS DE OPERACIÓN

Cuando se diseña un sistema es muy importante obtener una atenuación lo más baja posible. Las ventanas de operación son regiones en las cuales la fibra óptica presenta comportamientos de atenuación diferentes.

La ventana de 850nm (primera ventana) fue utilizada porque la tecnología LED operaba en esta banda y fue combinada con sistemas multimodo de longitud de onda corta. La ventana de 1310nm (segunda ventana) presenta baja dispersión y fue utilizada en sistemas de transmisión multimodo y monomodo de longitud de onda larga. La ventana de 1550nm (tercera ventana), también llamada

¹ Estas fibras son fabricadas casi exclusivamente por un único fabricante que les ha dado un nombre propio. En ocasiones son conocidas como LWPF, por Low-Water Peak Fiber (Fibras de reducido pico de agua).

banda C, apareció como una longitud de onda ideal para sistemas de larga distancia, aunque la relativamente nueva banda L ha disfrutado un poco de éxito como la próxima ventana de operaciones eficaz [7] [8].

La figura 1 muestra las ventanas de operación.

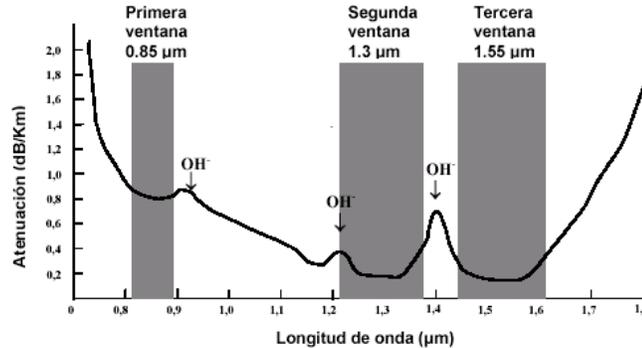


Figura 1. Ventanas de operación [9]

El ancho de la segunda ventana es aproximadamente de 100nm y un rango entre 1250nm y 1350nm, con pérdidas de alrededor de 0.4dB/Km. El ancho de la tercera ventana es de aproximadamente 150nm y un rango entre 1450nm y 1600nm, con pérdidas de alrededor de 0.2dB/Km.

Expresado en términos de ancho de banda, en 1nm, la ventana de 1550nm, tiene un ancho de banda de aproximadamente 133GHz. En 1nm, la ventana de 1300nm, tiene un ancho de banda de aproximadamente 177GHz. En total esto da un rango utilizable de cerca de 30THz [10].

Dado que la dispersión es minimizada en fibras monomodo tradicionales a 1310nm y la atenuación es minimizada a 1550nm, surgió la pregunta de qué era indispensable minimizar: dispersión o atenuación, para elegir la banda de operación. Sin embargo, gracias a la creación de las fibras de dispersión desplazada (DSF - Dispersion Shifted Fiber) ya no es necesario hacer esta elección, ya que modificando el proceso de fabricación de las fibras, se logró cambiar el punto en el cual ocurría la dispersión mínima (1310nm) a 1550nm; de manera que con las fibras DSF, la mínima atenuación y dispersión ocurren en la misma longitud de onda (1550nm). Desafortunadamente, aunque esto arregló un problema, creó uno nuevo potencialmente serio. Cuando DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) es desplegado sobre la fibra de dispersión desplazada serían no linealidades que ocurren en el punto de dispersión cero, que efectivamente destruyen la señal DWDM. Específicamente, un problema llamado mezcla de cuarta onda (FWM) aparece para interferir con los canales DWDM. En respuesta a esto, se fabricaron las fibras de dispersión desplazada con valor no cero (NZDSF) [8].

1.2. CLASIFICACIÓN DE LAS REDES WDM

1.2.1. Clasificación Según el Área de Cobertura

En las redes WDM a medida que aumentan la distancia de transmisión y las tasas de bit también se incrementan los problemas y efectos de transmisión haciendo necesaria la instalación de equipos de compensación y amplificadores ópticos, razón por la cual se considera la distancia de transmisión como un factor determinante del costo total de la red; es por ello que las redes ópticas se han clasificado en cuatro principales categorías según su área de cobertura y funcionalidad: Redes de Acceso (metro access networks), Redes metropolitanas ó de área regional (metropolitan or regional area networks), Redes de larga distancia (long-haul networks) y Redes de Ultra-larga distancia (Ultra-long-haul networks).

En el caso de las redes WDM esta clasificación se realiza así (ver anexo A.1) [11]:

- WDM metro: <100 km
- WDM regional: 100 km a 300 km
- WDM de larga distancia: 300 km a 2000 km
- WDM de Ultra-larga distancia: >2000 km (redes submarinas e intercontinentales)

1.2.2. Clasificación Según el Patrón de Longitud de Onda

Los sistemas WDM están divididos en diferentes patrones de longitud de onda: Convencional (convencional WDM), Denso (DWDM – ITU-T G.694.1) y Espaciado (CWDM – ITU-T G.694.2). Los sistemas WDM convencionales proporcionan hasta 16 canales en la banda C alrededor de 1550nm, con un espaciado entre canales de 100GHz. DWDM utiliza la misma ventana de transmisión pero con un espaciado menor habilitando hasta 31 canales espaciados 50GHz (1.6nm) o 62 canales espaciados 25GHz (0.8nm) y puede ser utilizado en áreas metropolitanas, de larga distancia y ultra larga distancia.

CWDM a diferencia de los sistemas WDM convencional y denso utiliza un mayor espaciado entre los canales (18 longitudes de onda, definidas en el intervalo de 1270 a 1610nm) permitiendo el uso de láser de gran ancho espectral y componentes ópticos menos complejos, lo que hace que los sistemas CWDM sean menos costosos que los DWDM. Sin embargo, dadas sus características CWDM presenta limitaciones en cuanto a capacidad y distancia de transmisión, por lo cual sólo es competitivo a corta distancia [12].

La figura 2 muestra el espaciado entre canales definida por la ITU para las tecnologías DWDM y CWDM.

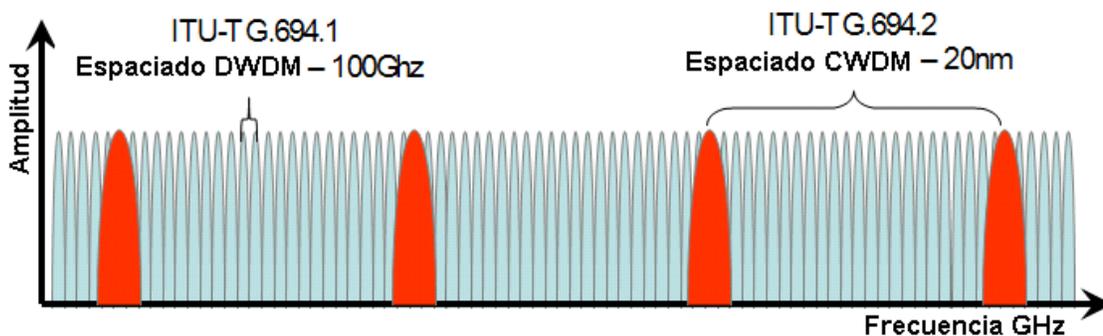


Figura 2. Espaciado entre canales para DWDM y CWDM [13].

A. CWDM- Coarse Wavelength Division Multiplexing:

Los sistemas CWDM admiten distancias de 50Km sin amplificadores ópticos y diversas topologías tales como anillos con distribuidor (hubbed ring), punto a punto y redes ópticas pasivas. Se puede ver como una opción en aplicaciones tales como acceso metropolitano 10 GbE, CATV, FTTH-PON, y otros sistemas de corto alcance punto a punto con servicios transparentes. Los sistemas CWDM son más rentables para las aplicaciones de redes metropolitanas (por ejemplo, anillos locales CWDM que conectan oficinas centrales con los principales anillos exprés metropolitanos DWDM) [14].

CWDM tiene un espaciado de canales de 20nm, permitiendo el uso de láseres de gran ancho espectral los cuales son más económicos que los requeridos por DWDM. Con el fin de transportar numerosos canales en cada fibra, el plan de longitudes de onda acordado abarca la mayoría de las bandas de menos de 1.300nm a más de 1.600nm del espectro de fibras ópticas monomodo [14].

B. DWDM- Dense Wavelength Division Multiplexing:

En contrapartida a CWDM los sistemas DWDM presentan la ventaja de aumentar la capacidad de la fibra óptica existente en varios órdenes de magnitud. Pero como desventaja aparece el alto costo de los equipos de medida necesarios para el proceso de puesta en marcha y mantenimiento de la red, ya que los emisores deben ser mucho más finos para poder diferenciar las señales a transmitir. Además no se permiten variaciones significativas ya que pueden causar la pérdida de información debido al acople de las señales [9] [14].

En la tabla 1 se presentan las principales características para la tecnología DWDM a diferentes velocidades.

Tabla 1. Tecnología DWDM [15]

Tecnología y Capacidad	Tecnología Actual vs Tecnología Futura
DWDM en OC-192 ² y 40λ	Capaz de portar 40 longitudes de onda diferentes (100GHz de separación) a 10Gb/s por cada λ, ósea 400Gb/s. Actualmente la industria ha conseguido 320Gb/s, con tasas de 400Gb/s disponibles en un futuro muy cercano.
DWDM en OC-192 y 80λ	Actualmente se conserva el espaciado de 100GHz especificado por la ITU. En un futuro cercano se mantiene la promesa de doblar el número de longitudes de onda utilizando un espaciado de 50GHz. Con lo anterior se consigue portar 80 longitudes de onda operando cada una a 10Gb/s.
DWDM en OC-768 y 40λ	Hasta 40Gb/s por longitud de onda y 40 longitudes de onda o un total aproximado de 1.6Tbps.
DWDM en OC-768 y 80λ	Utiliza 80 longitudes de onda o 3.2Tbps de rendimiento sobre la fibra.

1.3. PRINCIPALES COMPONENTES DE UNA RED WDM

Una red óptica WDM está compuesta principalmente por los siguientes elementos (ver anexo A.2) [3]:

- Transmisores:
- Multiplexores y demultiplexores ópticos
- Amplificadores ópticos
- Fibra óptica
- Receptores
- Acopladores ópticos
- Filtros ópticos

² La terminología OC-*n* especifica tasas de bit electrónicas (SONET), "OC" hace referencia a canal óptico (Optical Channel); OC-*n* representa una tasa de bit de $n * 51.84\text{Mbps}$ aproximadamente. Entonces, OC-48, OC-192 y OC-768 corresponden aproximadamente a las velocidades de 2.5Gb/s, 10Gb/s y 40Gb/s, respectivamente.

La figura 3 ilustra un esquema de los principales componentes de una red óptica WDM.

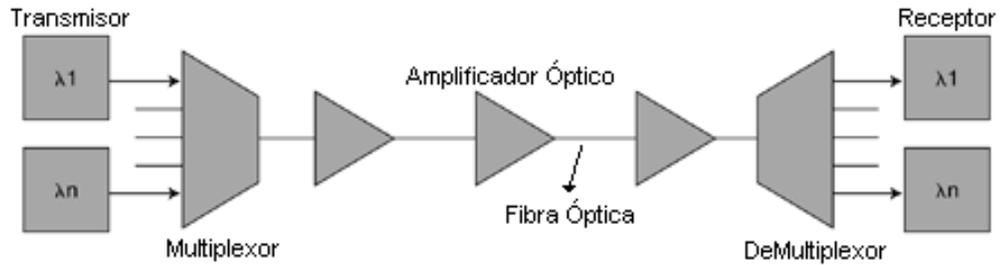


Figura 3. Componentes de una red óptica [3]

1.4. PROBLEMAS DE TRANSMISIÓN

La transmisión de luz en fibra óptica presenta varios retos que deben tratarse. Estos se clasifican dentro de tres categorías: atenuación, dispersión y no linealidades.

Estos conceptos se profundizan en el capítulo tres.

- *Atenuación*: Caída de la fuerza de la señal, o pérdida de la potencia de luz, a medida que la señal se propaga por la fibra.
- *Dispersión*: Ampliación de los pulsos de luz a medida que viaja por la fibra.
- *No linealidades*: Efectos acumulativos de la interacción de la luz con el material a medida que viaja por la fibra, cuyos resultados son cambios de la longitud de onda e interacciones entre longitudes de onda.

2. PRINCIPALES CONCEPTOS Y PARÁMETROS EN EL DIMENSIONAMIENTO DE REDES WDM

El objetivo común de las redes ópticas es conseguir alta velocidad, alta capacidad y eficiencia en cuanto a errores en el transporte de señales a través de la capa óptica. La tecnología WDM nace con el objetivo de optimizar la utilización de la fibra óptica mediante la multiplexación de longitud de onda, sin embargo, esto sólo es posible si se realiza un adecuado dimensionamiento de la red.

Particularmente, el dimensionamiento de redes ópticas implica un cuidado especial ya que se debe considerar y enfrentar las barreras físicas que presenta la fibra óptica, al igual que los efectos de transmisión al trabajar a velocidades elevadas, siendo necesario aprovechar al máximo el ancho de banda ofrecido por la fibra bajo condiciones físicas determinadas.

Anteriormente se consideraba el enlace de fibra óptica como un medio de transmisión con ancho de banda infinito, y por lo tanto sólo se tenía en cuenta las medidas de atenuación y/o pérdidas de retorno para certificar los enlaces; así, asegurando que estos parámetros no excedieran los límites permitidos, cualquier señal podía ser transmitida por la fibra, independientemente de la velocidad de modulación [1].

Esta situación se mantuvo hasta sistemas de 2,5 Gb/s. Sin embargo, cuando comenzaron a aparecer sistemas a 10 Gb/s y mayores, se encontraron efectos que no eran apreciables a velocidades de transmisión de 2,5 Gb/s. El ancho de banda de las fibras ópticas resultó no ser infinito y a pesar de seguir siendo el medio de transmisión más rápido disponible los efectos de transmisión pusieron límites a las velocidades de transmisión alcanzables en los enlaces de fibra óptica.

En general, WDM requiere del desarrollo de nueva tecnología, tal como amplificadores de ancho de banda de alta ganancia, filtros y multiplexores, fuentes laser WDM como laser de realimentación distribuida (DFB) que proveen un control espectral, moduladores de alta velocidad, etc. También requiere nuevos sistemas y técnicas en la fibra como compensación de la dispersión para contrarrestar efectos no lineales causados por la alta potencia óptica debido a la presencia de múltiples canales en la fibra [16].

En este capítulo se tratan los conceptos y parámetros que permiten evaluar y determinar las principales consideraciones técnicas y tecnológicas para realizar el dimensionamiento de redes WDM.

2.1. DISTANCIA DE TRANSMISIÓN

La distancia de transmisión es un aspecto fundamental para el dimensionamiento de una red de comunicaciones y particularmente cuando se trata de redes WDM ya que, como se mencionó anteriormente, a medida que ésta aumenta se incrementa el deterioro de la señal óptica debido a las pérdidas y los problemas de dispersión, requiriendo la implementación de bloques de amplificación y compensación con el fin de tener en el extremo final una señal de calidad y que pueda ser correctamente tratada por el equipo receptor. Estas implicaciones en el diseño de red hacen de la distancia de transmisión un factor determinante del costo total de la red.

Examinando el nivel de potencia del transmisor, el nivel de sensibilidad del receptor y nivel de atenuación de la fibra, acopladores y conectores, se puede determinar la posible distancia de transmisión antes de la amplificación (en caso de que sea necesaria).

Por lo tanto, la distancia de transmisión es un factor importante para determinar el número de amplificaciones requeridas en un enlace de larga distancia.

La distancia de transmisión L (en una etapa sin amplificación) está dada por la ecuación 1 [11]:

$$L = \frac{P_{in} - P_r}{\alpha} \quad (1)$$

L: Distancia de transmisión
P_m: Potencia máxima de entrada
P_r: Potencia mínima en el receptor
 α : Atenuación (del enlace)

Por otro lado, problemas como la dispersión, las no linealidades de la fibra, la polarización, el ensanchamiento espectral, el *chirp* (ensanchamiento del rango de la fuente) y las pérdidas (conectores, acoples, fibra) reducen aun más la distancia de transmisión; es por ello que se emplean repetidores y amplificadores dentro de los sistemas WDM para mejorar las distancias de transmisión alcanzables.

2.2. TRANSMISORES

DWDM requiere que los láser de transmisión tengan una tolerancia muy estrecha de la longitud de onda, de modo que las señales no se interfieran entre sí. Después de todo, los sistemas llevan 16 o 32 diversas longitudes de onda en una sola fibra. Es imprescindible que las tolerancias se cumplan para prevenir la destrucción total de las señales de datos que son generadas en las fibras. La unión internacional de telecomunicaciones (ITU- International Telecommunications Union) ha especificado, en su recomendación G.692, el espaciado estándar de 100 GHz entre las longitudes de onda, y la mayor parte de proveedores ahora está fabricando los láser basados en longitudes de onda estándar para la combinación en DWDM [15].

Para tasas de bit de 2.5Gb/s se utilizan láser de encendido y apagado, representando el uno (1) y el cero (0) digital. En tasas de datos más altos una modulación compuesta por una guía de onda de cristal de litio (*Lithium niobate*) es utilizada comúnmente con el láser. Es posible aplicar o remover un voltaje más rápidamente de un cristal de litio que conmutar entre encendido y apagado en un laser. Este tipo de modulador brinda el potencial de romper la barrera de velocidad presente para transmitir sobre una fibra óptica.

POTENCIA MÁXIMA DE ENTRADA: Este valor está limitado ya que las potencias de transmisión muy altas se ven afectadas por las no-linealidades de la fibra. La potencia máxima de entrada está dada por la ecuación 2 [11].

$$P_{in}(dB) = \alpha L + P_r(dB) \quad (2)$$

L: Distancia de transmisión
P_m: Potencia máxima de entrada
P_r: Potencia mínima en el receptor
 α : Atenuación (del enlace)

2.3. MULTIPLEXORES Y DEMULTIPLEXORES ÓPTICOS

Para utilizar la capacidad completa del sistema, es necesario transmitir muchos canales simultáneamente, y esto se logra mediante la multiplexación. La demultiplexación requiere de dispositivos selectivos de longitud de onda, los cuales se clasifican en dos categorías. Los demultiplexores basados en difracción utilizan un elemento dispersivo en forma angular, como una rejilla de difracción, la cual dispersa la luz en varios componentes de diferentes longitudes de onda. Los demultiplexores basados en interferencia utilizan dispositivos como filtros ópticos y acopladores direccionales. Los mismos dispositivos pueden ser usados tanto en la multiplexación como en la demultiplexación [20].

Existe otro aspecto a considerar en un enlace WDM y es la pérdida asociada con la multiplexación y demultiplexación. Esta pérdida es dependiente del número de canales, pero puede ser disminuida con el uso de amplificadores ópticos, amplificando todas las longitudes de onda directamente, sin conversión eléctrica. Si se tiene un sistema de pocos canales, entonces se puede utilizar simples acopladores, pero si el sistema involucra un número grande de canales se hace necesario utilizar un amplificador antes del multiplexor [10], [19].

2.4. FIBRA ÓPTICA

Las características más importantes de cualquier sistema de transmisión de fibra son:

1. Las características de la fibra misma: grosor, índice de refracción, espectro de absorción y geometría.
2. La longitud de onda de la luz utilizada.
3. Las características del dispositivo utilizado para crear la luz (rayo láser o LED). Lo más importante aquí es el rango de frecuencias (o la "Anchura espectral") de la luz producida.
4. El tipo y las características del dispositivo utilizados para detectar la luz (fotodetector).

El diseño de un sistema de transmisión de fibra óptica es dominado principalmente por dos factores:

1. Nivel de la señal (o fuerza de la señal). Los aspectos importantes aquí son la potencia del transmisor, la atenuación en el sistema de transmisión y la sensibilidad del receptor.
2. Control de la dispersión.

Existe un tercer factor, el ruido. El ruido puede volverse importante en muchos contextos del sistema, pero en enlaces simples punto a punto raramente es un problema, ya que una de las grandes ventajas de las comunicaciones ópticas es que las fibras no recogen ruido de sistemas externos.

Otro aspecto a tener en cuenta es la apertura numérica (NA) de la fibra óptica, la cual provee una medición de la capacidad de unión de la luz en la fibra. Cuando el valor de NA aumenta, la fibra óptica permite que más luz sea transmitida a través de ella (ver anexo A.2).

2.5. RECEPTORES

Un receptor óptico está compuesto generalmente por un acoplador, un fotodetector y un demodulador. El acoplador enfoca la señal óptica recibida sobre el fotodetector, el cual está formado básicamente por fotodiodos de semiconductor. El diseño del demodulador depende del formato de modulación utilizado [20].

Un parámetro importante para cualquier receptor es su sensibilidad y es usualmente entendida como la mínima potencia óptica requerida para recibir una BER de 10^{-9} . Otro de los parámetros relevantes es el ancho de banda; los receptores utilizados en sistemas multicanales CWDM y DWDM requieren anchos de banda grandes para poder soportar todas las tasas de bits y protocolos específicos [3], [11].

El tipo de detector, la velocidad de transmisión y la BER requerida van a determinar el nivel de la señal que ha de llegar al extremo final de la fibra. La figura 4 muestra la sensibilidad del receptor en función del tipo de detector empleado y de la velocidad de transmisión. La figura 5 muestra la potencia recibida en función de la BER requerida y la velocidad a la que se transmiten los datos.

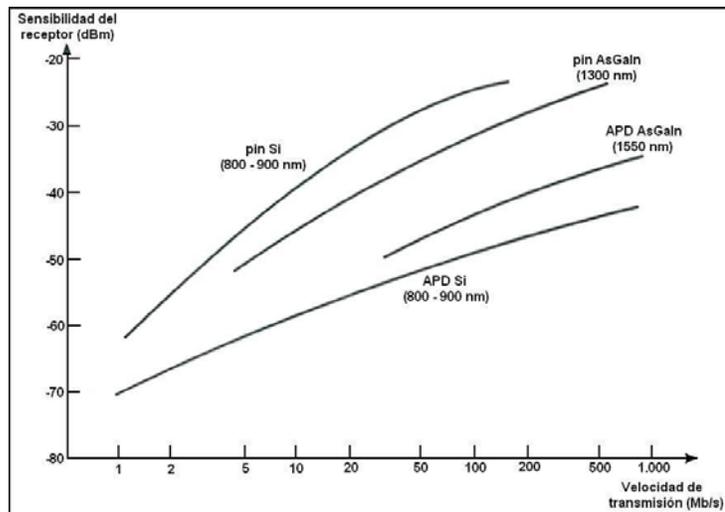


Figura 4. Sensibilidad en función de la velocidad de transmisión, para diferentes receptores [21].

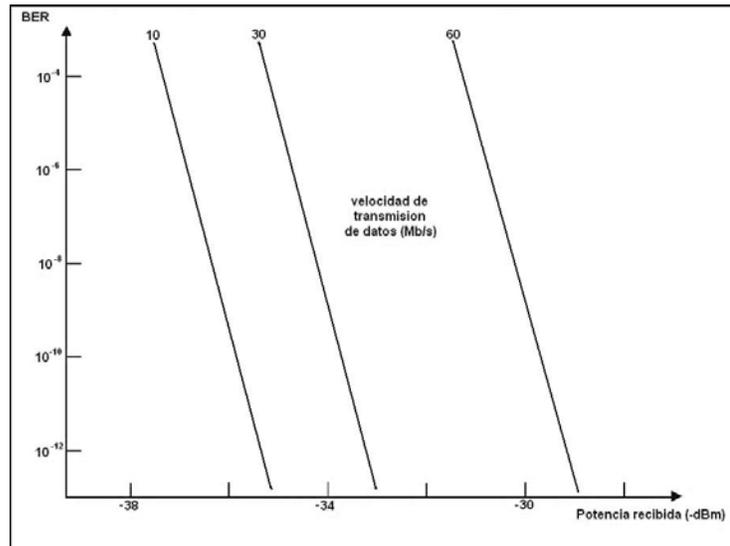


Figura 5. BER vs potencia recibida, para diferentes velocidades de transmisión [21].

2.6. LONGITUDES DE ONDA

El número máximo de longitudes de onda a utilizar en sistemas WDM es limitado por la tecnología de los dispositivos ópticos y es afectado principalmente por el total de ancho de banda disponible o el rango espectral de los componentes (incluyendo la fibra) y el espacio entre canales.

Por otro lado, la separación entre canales es afectada por varios factores tales como la tasa de bit del canal, la potencia óptica, no linealidades en la fibra y la resolución del transmisor y del receptor [18].

2.7. EFECTOS NO LINEALES

Para los sistemas de transmisión DWDM los efectos no lineales como la mezcla de cuarta onda (FWM), la modulación de auto-fase (SPM), la modulación de fase cruzada (XPM) y el esparcimiento estimulado de Raman (SRS) en las fibras son aspectos que deben tenerse en cuenta al realizar el dimensionamiento de la red.

Con el fin de mitigar estos efectos se plantean las siguientes consideraciones:

- Evitar la región de longitud de onda de dispersión cero y colocar todos los canales a un lado de esta región (no a ambos lados), donde tienen casi la misma velocidad de grupo y el “walk-off” (*escape*) es pequeño entre canales
- Si es necesario utilizar simultáneamente ambos lados de la región de longitud de onda de dispersión cero, entonces se debe emplear una transmisión bidireccional banda por banda. Esto asegura un “walk-off” muy grande entre canales y da como resultado fases opuestas entre la FWM y el promedio de la XPM y el SRS sobre los bits [18].
- Si el espaciado de canal óptico es reducido enormemente (por ejemplo: UDWDM), las frecuencias ópticas de los rayos láser deben ser monitoreadas cuidadosamente.
- Los efectos de *crosstalk* y degradación de señal óptica o pérdida pueden ser minimizados controlando algunas variables, tales como: espaciamiento de canales, tolerancia de longitudes de onda y niveles de potencia del láser [19].

2.8. RELACIÓN SEÑAL/RUIDO ÓPTICA (OSNR- Optical Signal to Noise Ratio)

La OSNR es una consideración fundamental en el diseño de redes ópticas ya que es el principal parámetro asociado a una señal y especifica la relación de la potencia neta de la señal con la potencia neta del ruido, determinando la calidad de la señal óptica. Además, por ser una relación de dos potencias, si la señal y el ruido son amplificadas, la OSNR del sistema sigue brindando la calidad de la señal mediante el cálculo de esta relación.

La OSNR es una cantidad medible en una red y se puede calcular a partir de los parámetros del sistema; esta relación se expresa en decibeles y resulta más sencilla de medir que el factor Q. Sin embargo, la relación entre estos dos indicadores no es directa, al depender de las características del receptor así como de la forma de los pulsos ópticos.

2.9. FACTOR Q

Otro parámetro considerado en el dimensionamiento de redes ópticas es el factor Q el cual brinda una descripción cualitativa del rendimiento del receptor porque es una función de la OSNR. El factor Q indica la mínima relación señal a ruido (SNR: signal-to-noise ratio) requerida para obtener una tasa de error de bit (BER: Bit Error Rate) específica para una señal dada. El factor Q está relacionado con la OSNR mediante la ecuación [11]:

$$Q_{dB} = OSNR + 10 \log \frac{B_0}{B_c} \quad (3)$$

B_0 : Ancho de banda óptico del equipo receptor (fotodetector)

B_c : Ancho de banda eléctrico del filtro del receptor

El factor Q también es considerado como una medida de que tan ruidoso es un pulso para propósitos de diagnóstico o pruebas [3]. Sin embargo, el uso del factor Q tiene un inconveniente, ya que proporciona solamente una estimación del comportamiento del sistema, lo cual sólo permite determinar la BER de manera sencilla si se asume solamente la existencia de ruido gaussiano, lo que no es cierto en general, debido a la interferencia inter-simbólica (Inter-Symbol Interference ISI) [17].

2.10. BIT ERROR RATE (BER) DEL SISTEMA

Durante la transmisión de datos el receptor debe poder detectar correctamente los bits transmitidos para evitar la pérdida de información. Sin embargo, algunas veces se presentan errores (el receptor detecta un 1 cuando se ha transmitido un cero ó viceversa) debido a los problemas asociados con el canal de transmisión o a que el receptor es sensible a la velocidad de bit (para diferentes tasas de bit, el receptor tiene diferentes magnitudes de error).

Un parámetro clave en el diseño de una red óptica es la tasa de error de bit (BER) del sistema ya que determina el número de bits erróneos recibidos en una transmisión como una proporción de los bits correctos. La BER generalmente se expresa con un número como 10^{-15} lo cual significa un error en 10^{15} bits, esto equivale a un error en 11.6 días para una señal a 10Gps. Esta tasa de error tan pequeña hace imposible una evaluación teórica del BER directamente, debido a la inmensa cantidad de tiempo de computación que sería necesario. Por ejemplo, si se pretende estimar correctamente una tasa de error de menos de 10^{-9} mediante simulaciones numéricas, es necesario considerar más de 10^{10} bits. Esto hace inviable cualquier medida directa de la BER, de forma que es necesario algún tipo de medida indirecta [17].

La BER está determinada por la velocidad del enlace, potencia, distancia, cantidad de ruido, etc. Por ejemplo, entre mayor sea la velocidad del enlace se necesita que la BER sea menor, pero se hace más difícil obtener valores pequeños ya que la probabilidad de error aumenta al incrementar la tasa de bit.

La BER se considera como la medida básica del rendimiento de la transmisión de señales digitales pues especifica la frecuencia esperada de errores. La BER está afectada por los siguientes fenómenos:

1. Ruido.
2. Interferencia intersímbolos (ISI).
3. Interferencia intercanal (*crosstalk*).
4. Efectos no lineales.

La figura 6, muestra como la BER varía con respecto al parámetro Q. La BER mejora a medida que el factor Q aumenta, y llega a ser menor que 10^{-12} para Q mayor que 7.

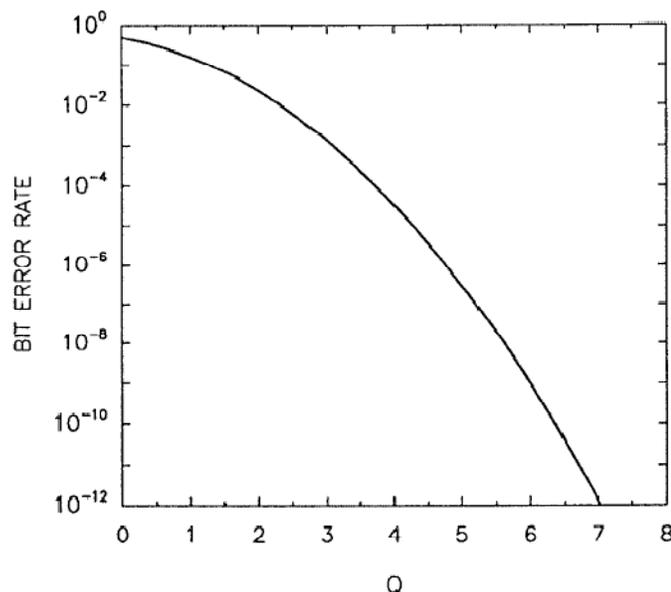


Figura 6. BER vs Factor Q [20].

2.11. DIAGRAMA DEL OJO

La señal de transmisión en su viaje a través de la fibra experimenta un gran número de degradaciones, razón por la cual se hace necesario determinar su calidad en el extremo receptor. La BER es un parámetro cuantitativo para medir la calidad del sistema, mientras que el diagrama del ojo es un parámetro cualitativo empleado para verificar rápidamente si una señal cumple ciertas especificaciones, permitiendo obtener de una manera más inmediata, información acerca del rendimiento general del sistema, razón por la cual es considerado importante en el diseño de redes.

Esta técnica se basa en el envío de una secuencia aleatoria de pulsos a través del sistema, para posteriormente ser recogidos en el extremo receptor y analizados en una pantalla de un osciloscopio. Debido a que la señal es aleatoria, tomando tres bits de la misma y suponiendo que el código utilizado es NRZ, las posibles secuencias a observar en el osciloscopio se muestran en la figura 7. El resultado de superponer estas secuencias es el denominado diagrama del ojo y se puede observar en la figura 8. Las características típicas en un diagrama así, son entre otras, las distorsiones en la amplitud de la señal y los tiempos de subida y bajada de la misma [21].

Además del diagrama del ojo, el muestreo del osciloscopio habitualmente genera un reporte mostrando en qué medida el factor Q del sistema difiere del factor Q ideal. Un valor alto en el factor Q significa que el pulso está relativamente libre de ruido, lo cual corresponde a un diagrama del ojo abierto tanto como sea posible e indica que los datos pueden ser recuperados fácilmente con bajos efectos de ruido. Por el contrario, un valor pequeño en el factor Q, corresponde a un diagrama del ojo cerrado indicando distorsión en el pulso [3].

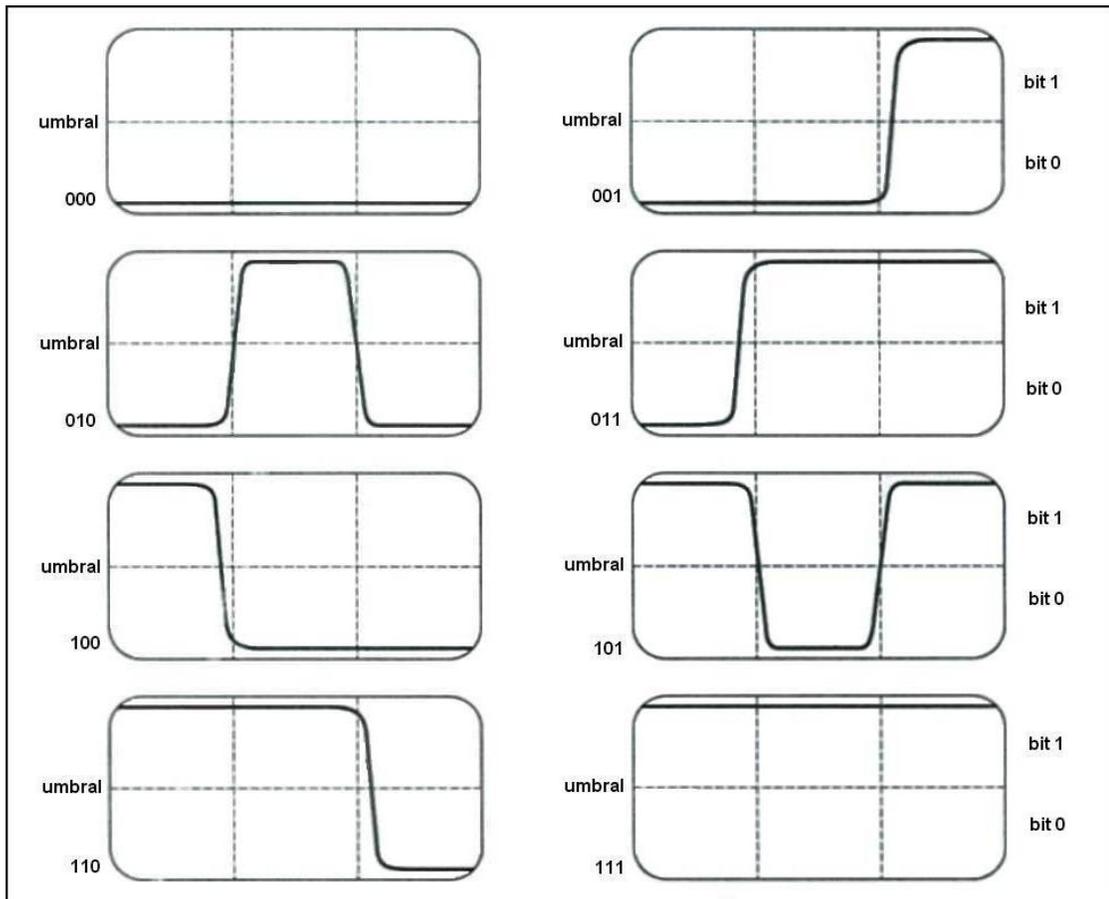


Figura 7. Posibles ternas de bits enviadas para el registro de un diagrama de ojo [21].

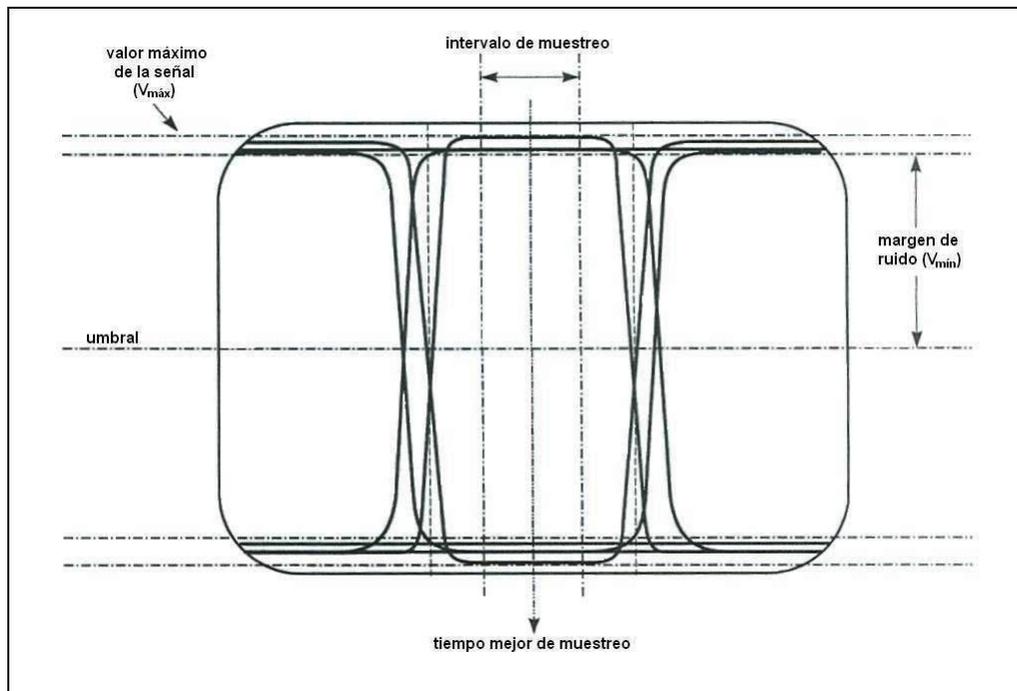


Figura 8. Diagrama del ojo correspondiente a la figura 7 [21].

Del diagrama del ojo pueden determinarse los siguientes parámetros:

- Interferencia entre símbolos (ISI): La anchura del ojo determina el intervalo de tiempo en el que podría realizarse el muestreo de la señal sin que existiera posibilidad de interferencia entre símbolos (ISI), el mejor instante, en este caso, se da cuando la altura del diagrama es la máxima.
- Distorsión: La distorsión máxima se ve representada entre la máxima apertura del ojo y el máximo nivel de la señal, lo cual quiere decir que en cuanto más cerrado este el ojo, más difícil será diferenciar entre ceros y unos.
- Margen de ruido: su valor viene representado por el porcentaje de la relación entre la amplitud mínima que tiene el valor de un bit uno y su valor máximo. La ecuación 4 expresa lo anterior:

$$\text{Margen de ruido} = \frac{V_{min}}{V_{max}} * 100\% \quad (4)$$

- *Jitter*: Variaciones temporales que pueden surgir en la señal entre las posiciones de los inicios y finales de cada bit. Este tiempo que debería ser fijo a lo largo del tiempo, puede tener pequeñas variaciones por causas muy diversas. Su aparición afecta la anchura de las líneas de subida y bajada de los bits uno [21].

Como se cita en [21], "En condiciones normales, la secuencia de bits transmitidos para obtener un diagrama de ojo satisfactorio contiene $2^n - 1$ bits, con $n = 7, 10, 15, 20, 23$ y 31 , dependiendo del destino que va a tener el sistema".

La figura 9 presenta un diagrama del ojo ideal junto con un diagrama degradado en el cual el ruido y la distorsión implican el cierre parcial del ojo. La mejor muestra corresponde a la máxima apertura del ojo.

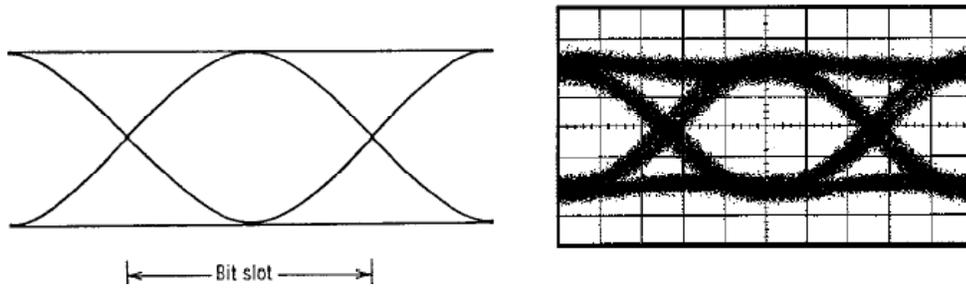


Figura 9. Diagrama del ojo ideal (izquierda) y degradado (derecha) para el formato NRZ [20].

2.12. PÉRDIDAS

En un enlace WDM multinodo, el principal componente de las pérdidas del sistema son las pérdidas asociadas a los diferentes subsistemas (nodos); ya que las pérdidas en cada nodo pueden ser superiores en comparación con las pérdidas de transmisión. Esto afecta el diseño y la OSNR del sistema.

La tabla 2 indica las pérdidas que se pueden presentar en un sistema WDM operando en la tercera ventana (1550nm).

Tabla 2. Pérdidas por inserción y otras pérdidas para la ventana de 1550nm [11]

COMPONENTE	PÉRDIDAS POR INSERCIÓN	PÉRDIDAS DEPENDIENTES DE LA LONGITUD DE ONDA	PERDIDAS DEPENDIENTES DE LA POLARIZACIÓN	FIGURA DE RUIDO DE CROSSTALK
Multiplexor Demultiplexor (AWG)	5dB	< 1dB	0.1dB	-40dB
Switch óptico de inserción – extracción 2 x 2	1.2dB	< 0.2dB	0.1dB	-40dBm
Acoplador pasivo (2 x 2)	3 dB	-	-	-
Filtro <i>thin-film</i>	1 dB	0.1 dB	-	-40dBm
Filtro – AOTF/MZI	1 dB	0.1 dB	-	-35dBm
<i>Interleaver</i>	2-3 dB	-	-	-
Croscconector óptico (OXC) Puerto a puerto	Típicamente 3dB sin pérdidas AWG	< 0.4 dB	0.1dB	-40dBm

2.13. DISPERSIÓN

Cuando se diseña un enlace WDM a una alta tasa de bit (donde la dispersión se puede considerar como el principal problema de diseño), se deben utilizar mapas de dispersión para diseñar eficazmente el sistema.

Los mapas de dispersión son mapas en dos dimensiones que presentan la dispersión acumulada versus la longitud de transmisión. Estos son mapas particularmente útiles que ayudan a los diseñadores a ubicar compensadores de dispersión en una red. La dispersión acumulada se calcula multiplicando las especificaciones de dispersión de la fibra y del láser para una determinada tasa de bit con respecto a la longitud de la fibra.

Es importante resaltar que a medida que la señal viaja una mayor distancia, la dispersión acumulada aumenta. Para una determinada tasa de bit y en una determinada banda de operación, la dispersión máxima acumulada permitida está dada por una especificación estándar.

Los parámetros de dispersión dependen de muchos factores; los principales factores son la tasa de bit (la cual da el ancho del pulso), la longitud de la fibra, el parámetro básico de dispersión, y el ancho espectral del láser, el cual proporciona cualitativamente la cantidad de dispersión inducida (GVD- Group Velocity Dispersion) [11].

2.14. CONSTANTE DE PROPAGACIÓN

La constante de propagación (a veces llamada coeficiente de propagación) se utiliza para expresar la atenuación (pérdida de la señal) y el desplazamiento de fase por unidad de longitud. Este parámetro depende de la intensidad de la señal, las pérdidas que se ocasionan en la fibra y de la frecuencia de operación debido a la dispersión [11].

La constante de propagación modela el fenómeno de dispersión cromática.

3. EFECTOS DE TRANSMISIÓN A CONSIDERAR EN EL DIMENSIONAMIENTO DE REDES WDM

La implementación de los sistemas ópticos de alta velocidad (superiores o iguales a 10Gb/s) trajo consigo una serie de consideraciones negativas que afectan su desempeño. En este capítulo se describen los principales efectos de transmisión que afectan el dimensionamiento de las redes WDM. Posteriormente, en el capítulo 4 se proponen algunos criterios y procedimientos para mitigar o minimizar su impacto en estas redes.

Los efectos de transmisión en la fibra se clasifican en lineales y no lineales. Los efectos lineales reciben este nombre porque son proporcionales a la longitud de la fibra. Los efectos no lineales pueden ser atribuidos a la dependencia del índice refractivo sobre la intensidad del campo eléctrico aplicado. Los efectos no lineales reciben este nombre porque cuando ocurren, la respuesta de un medio como el silicio, es una función no lineal de la amplitud de campo eléctrico y magnético aplicado [22].

3.1. EFECTOS LINEALES

3.1.1. Atenuación

La atenuación varía con la longitud de onda y se presenta por razones como: absorción, dispersión Rayleigh, picos de agua y reflexiones debido a empalmes y conectores [22].

- Absorción: Se debe a impurezas en el silicio. Estas impurezas tienden a absorber la energía de la señal transmitida y a convertirla en calor, resultando en un completo deterioro de la señal. La luz es absorbida en la región ultravioleta (UV), llegando a un valor prácticamente nulo a longitudes de onda por encima de 1 μm y adquiriendo de nuevo un valor significativo en la región lejana del infrarrojo (FIR), como se puede apreciar en la figura 10, donde también se muestra las pérdidas típicas para una fibra monomodo de silicio en función de la longitud de onda [8], [21], [22].

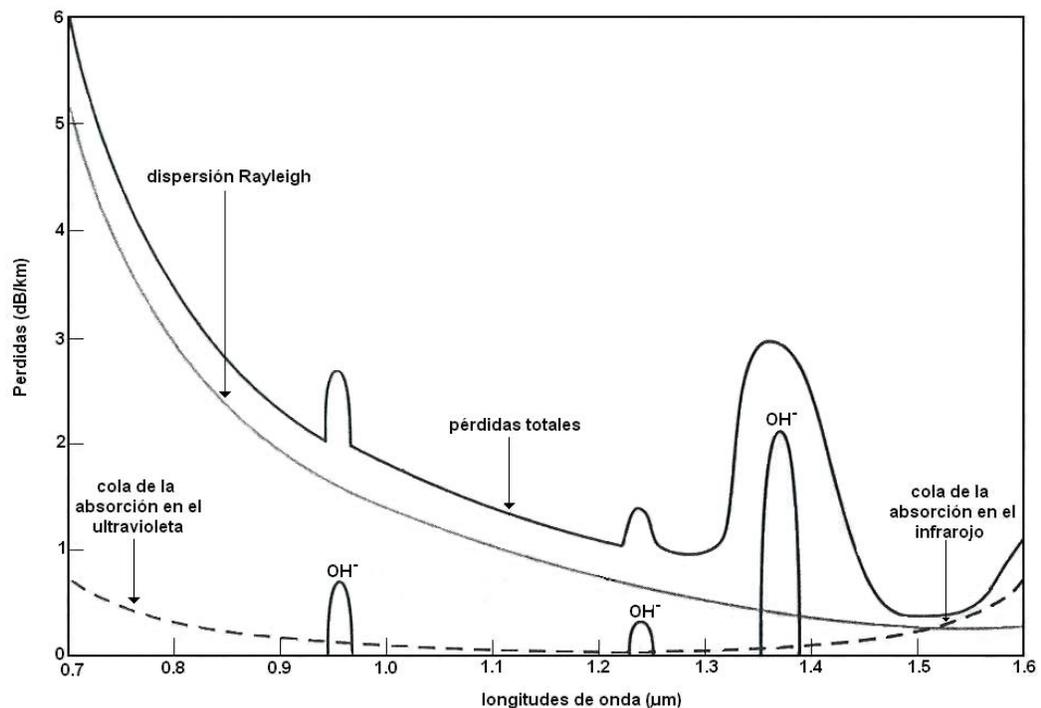


Figura 10. Curva de atenuación en una fibra de silicio [21].

- **Dispersión Rayleigh:** La densidad de las partículas en el núcleo no es siempre la misma debido a las imperfecciones de la fibra. Esto causa un efecto dispersivo entre los fotones y los átomos del silicio. La figura 11 indica como los rayos de luz son dispersados por los átomos de silicio [18] [25].

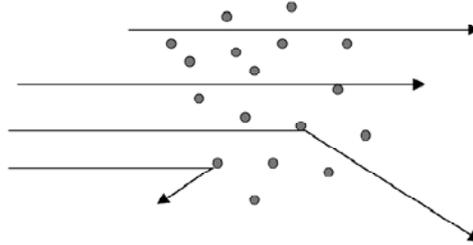


Figura 11. Dispersión Rayleigh [8]

Puede decirse, en general, que la importancia de la dispersión Rayleigh es fuerte por debajo de 1000 nm, y que, a partir de ahí, se hace cada vez menos significativa, como lo indica la figura 10. Este fenómeno es responsable de aproximadamente el 90 por ciento de la atenuación total en sistemas ópticos modernos. Éste ocurre cuando las longitudes de onda de la luz transmitida son aproximadamente del mismo tamaño de las estructuras moleculares físicas dentro del silicio, por lo tanto las longitudes de onda cortas son afectadas por los efectos del esparcimiento Rayleigh más que las longitudes de onda largas. Las longitudes de onda más cortas de la luz (color azul) son esparcidas más que las longitudes de onda más largas de la luz (color rojo) [8].

- **Picos de agua:** En una fibra estándar las impurezas de ion OH no son eliminadas completamente y esto da como resultado dos picos de adsorción cerca de los 1230nm y los 1380nm [23].
- Tanto conectores como empalmes reflejan un poco la luz en dirección opuesta a su trayectoria, reduciendo así la potencia de la misma [22].

La potencia óptica $P(L)$ está dada por la ecuación 5 [6]:

$$P(L) = 10^{-\frac{AL}{10}}P(0) \quad (5)$$

Donde A es el coeficiente de atenuación y $P(0)$ es la potencia óptica en el transmisor.

La distancia máxima que se puede alcanzar esta dada por la ecuación 6 [6]:

$$L_{max} = \frac{10}{A} \log \frac{P(0)}{P_r} \quad (6)$$

Donde P_r es la sensibilidad del receptor.

3.1.2. Dispersión

La dispersión varía con la longitud de onda y tiene como consecuencia el ensanchamiento del pulso mientras este viaja a través de la fibra. La figura 12 muestra la influencia de la dispersión sobre los pulsos ópticos.

Existen tres tipos de dispersión: dispersión modal, dispersión cromática y dispersión por modo de polarización.



Figura 12. Resultado del ensanchamiento de los pulsos en el dominio del tiempo a causa de la dispersión [7]

3.1.2.1. Dispersión modal: Está asociada con las fibras multimodo. Debido a los diferentes ángulos en los que los rayos ingresan al núcleo de estas fibras, algunos modos recorren una distancia más larga para llegar al final de la fibra que otros como se indica en la figura 13. En vista de esto, los modos tienen diferentes retardos, lo cual causa un esparcimiento del pulso de salida ocasionando problemas de detección en el receptor. Las fibras de índice gradual minimizan este efecto. Esto se da porque en las fibras de índice gradual, los rayos se desplazan más cerca del centro del núcleo debido al índice refractivo parabólico, como se ve en la figura 14. Por consiguiente, los modos no tienen una diferencia de retardo importante [22].

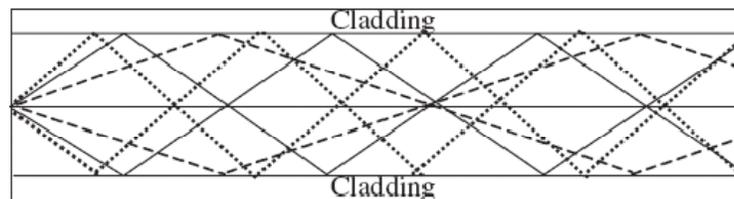


Figura 13. Propagación de la luz en una fibra multimodo [22]

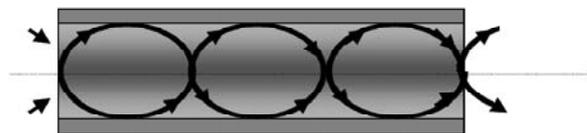


Figura 14. Trayectoria de un rayo de luz en una fibra de índice gradual [22]

El parámetro que determina el número de modos que pueden propagarse en una fibra es la frecuencia normalizada V , que se define mediante la ecuación (7) [17]:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (7)$$

donde, a es el radio del núcleo de la fibra, y n_{co} y n_{cl} son los índices de refracción del núcleo y del revestimiento, respectivamente. Para tener propagación monomodo se ha de cumplir que $V < 2.405$ [17].

Para las fibras multimodo el número de modos (N) puede ser calculado mediante la ecuación 8, para fibras de índice en escalón y la ecuación 9, para fibras de índice gradual [10]:

$$N = \frac{V^2}{2} \quad (8)$$

$$N = \frac{V^2}{4} \quad (9)$$

Las siguientes son algunas formas de mitigar la dispersión modal:

- Utilización de fibras de índice gradual, en las cuales la región entre el revestimiento y el núcleo de la fibra consiste en una serie de cambios graduales del índice de refracción.
- Reducir el número de modos, lo cual se logra reduciendo el diámetro del núcleo, para reducir la apertura numérica, o para incrementar la longitud de onda de la luz [5].

3.1.2.2. Dispersión cromática: Supongamos que se toma solamente un pequeño fragmento de senoide a modo de impulso breve, la cual a su vez está compuesta por infinidad de sinusoides completas que difieren en amplitud y en frecuencia. Por consiguiente este impulso está compuesto por componentes suplementarias que difieren en longitudes de onda a la original, lo cual ocasiona cambios sucesivos en el índice de refracción, ya que éste es dependiente de la longitud de onda. Y cuanto más breve es el impulso, más extenso es el intervalo de frecuencias representado.

El efecto de la dispersión causa que las componentes viajen a velocidades diferentes, dependiendo de la longitud de onda de cada una, logrando así el ensanchamiento de los impulsos, provocando interferencia con los impulsos vecinos y errores de detección. La dispersión cromática afecta en gran medida a tasas de bit altas, ya que entre más alta sea la tasa de bit, más breves son los impulsos y más juntos están entre ellos. Por lo tanto la dispersión cromática limita la tasa de bit.

La dispersión cromática es medida en $ps/nm/km$, donde ps hace referencia a la extensión de tiempo del pulso, nm es el ancho espectral del pulso, y km corresponde a la longitud de la fibra. A su vez, la dispersión cromática la conforman dos componentes: la dispersión inherente al material y la dispersión originada por la estructura de la guía de onda, estos componentes pueden tener signos diferentes dependiendo del incremento o disminución de la velocidad de la luz con la longitud de onda [9], [22], [24].

Dispersión por el Material

Se podía llegar a pensar de que el índice de refracción es constante tanto en el núcleo como en la cubierta, pero esto no es así, debido a que la constitución del material y los átomos que lo componen, presentan ciertas propiedades que dependen fuertemente de la longitud de onda de la señal que pase por él. Por lo tanto, el índice de refracción es función de la longitud de onda [21].

La dispersión del material es una característica inherente del material, que no puede ser fácilmente cambiada sin alterar la composición del vidrio y aumentar la atenuación. Resulta de la relación no lineal entre la frecuencia y el índice de refracción en el núcleo de la fibra. Sin embargo, es posible desplazar la dispersión modificando la dispersión de guía de onda [9].

Existen dos factores a gestionar para minimizar la dispersión del material, el primero es las longitudes de onda que conforman la señal transmitida. Los tipos de dispersión que dependen de la longitud de onda pueden ser minimizados estrechando el ancho espectral de la fuente de luz. Todas las fuentes de luz producen un rango o banda de longitudes de onda en vez de una sola. Este rango es llamado el "Ancho espectral" de la fuente de luz, como se indica en la figura 15.

Un simple rayo laser de semiconductor típicamente transmite un rango de longitudes de onda entre 1nm y 5nm de ancho. Rayos laser más sofisticados pueden tener un ancho espectral de 0.01nm. Un LED típicamente tiene un ancho espectral de 30nm y 150nm. Por

lo tanto, la salida de un rayo láser es menos afectada por la dispersión de material que la señal de un LED [8].

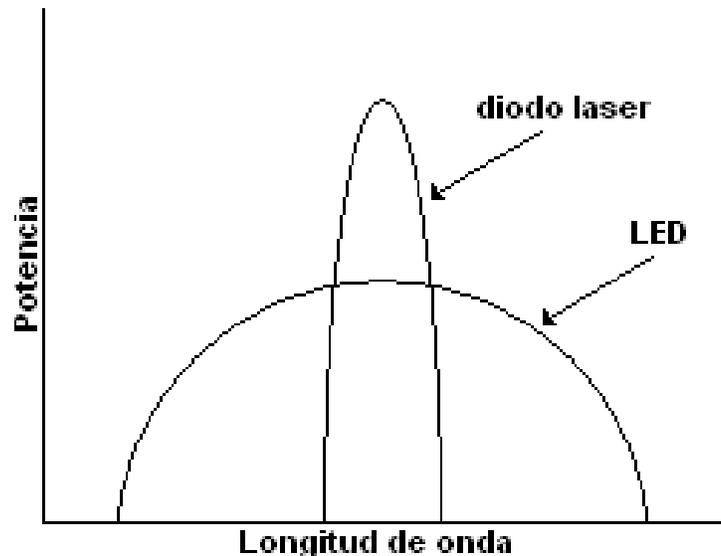


Figura 15. Ancho Espectral de un diodo LED y un diodo laser [7]

El segundo factor que afecta el grado de la dispersión de material es la longitud de onda central de operación de la señal de la fuente. En los 1310nm, las longitudes de onda largas (rojas) y sus homólogos las cortas (azules) cubren y comparten un nivel de dispersión mínimo común; este punto se conoce como la longitud de onda de cero dispersión.

La dispersión de material es un problema molesto particularmente en fibras monomodo” [8].

Dispersión de guía de onda

La dispersión de guía de onda se origina debido a que la propagación de la luz en una guía de onda depende de la longitud de onda así como de las dimensiones de la guía.

La distribución de la luz en la guía cambia con la longitud de onda afectando la velocidad de transmisión a través de la fibra. *“Ya que la luz permanece un tiempo tanto en el núcleo como en la cubierta, su velocidad efectiva a través de toda la fibra es un promedio que depende de la distribución de la luz entre ambos. Un cambio en la longitud de onda cambiará la distribución de la luz, y así mismo la velocidad promedio, causando una dispersión de guía de onda”* [9].

Este efecto de dispersión puede ser corregido transmitiendo en las longitudes de onda específicas donde la dispersión de material y guía de onda se cancelan entre sí. Como se indica en la figura 16, esto ocurre en un punto cercano a 1310nm en una fibra monomodo estándar del tipo índice escalonado (step-index). Esta es una longitud de onda útil pues los efectos de dispersión son minimizados aquí; pero no es ideal, ya que la fibra presenta una menor atenuación a 1550nm, y los amplificadores dopados de Erblio operan en este rango.

En términos generales, la dispersión puede ser corregida utilizando fibras compensadoras de dispersión (DCF- Dispersion Compensation Fiber). La longitud de estas fibras es proporcional a la dispersión de la fibra de transmisión. Aproximadamente un tramo de 15 Km de fibra compensadora de dispersión es colocada por cada 80 Km de fibra de transmisión. Las fibras compensadoras de dispersión introducen una atenuación de alrededor de 0.5dB/Km [22].

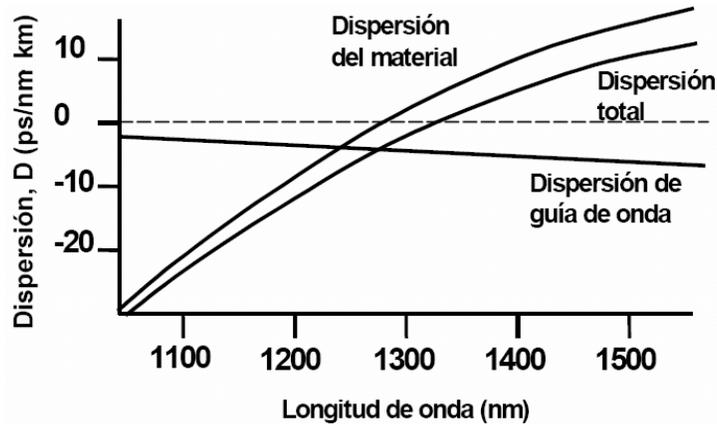


Figura 16. Dispersión de guía de onda y dispersión del material en una fibra SMF de índice escalonado [9]

Chirp: Como se cita en [13], “Mientras un pulso óptico viaja por la fibra, el borde creciente del pulso causa que el índice refractivo de la fibra aumente, resultando en el cambio azul (blue shift). El borde decreciente del pulso decreta el índice refractivo de la fibra resultando en el cambio rojo (red shift). Estos cambios azul y rojo introducen en la frecuencia pequeños saltos (“frequency chirps”) en cada borde del pulso que interactúan con la dispersión de la fibra para ensanchar el pulso como se ve en la figura 17”.



Figura 17. Efecto de SPM en un pulso [13]

En la figura 18 se puede observar que el régimen de dispersión normal comprende valores de dispersión negativos, mientras que el régimen de dispersión anómala comprende valores de dispersión positivos.

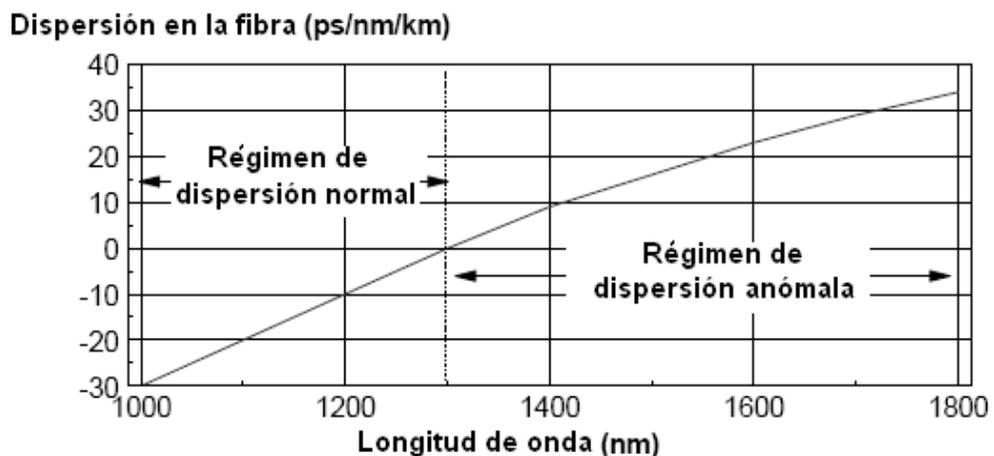
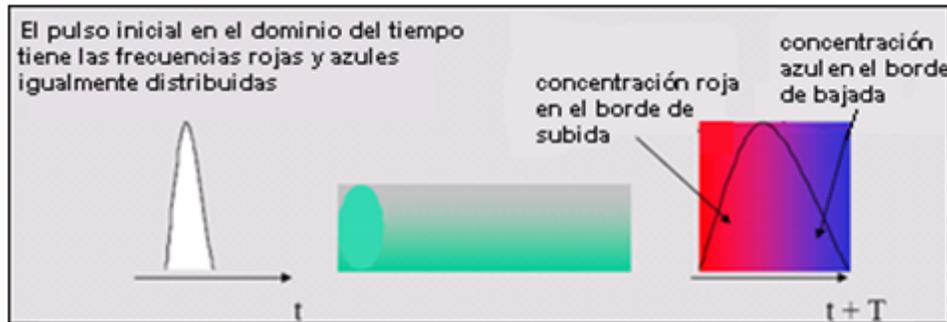


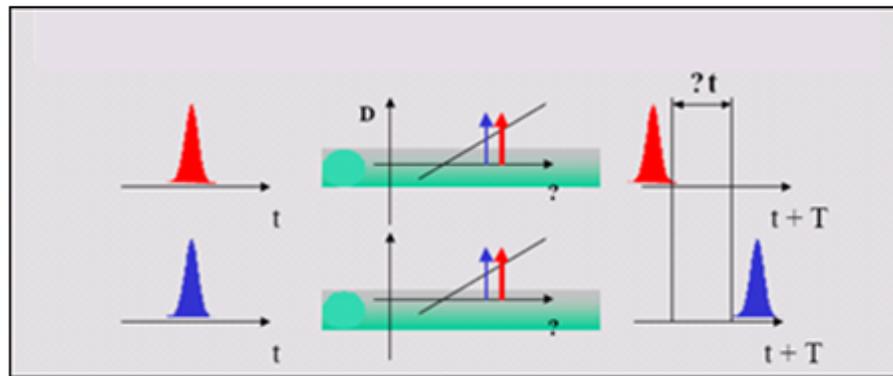
Figura 18. Régimen de dispersión para fibras monomodo estándar [10].

- Cuando la dispersión es positiva en la fibra, introduce un chirp positivo en el pulso óptico como se observa en la figura 19.

La figura 19 (a) muestra que mientras el pulso está viajando, un cambio de frecuencia (Chirp) ocurre dentro de él. Inicialmente (en el pulso blanco) las componentes rojas y azules están igualmente distribuidas. Después del pulso propagarse a través de la fibra, en el tiempo $t+T$, el borde de subida del pulso tiene más componentes rojas, mientras que el borde de bajada tiene más componentes azules, debido a que, la fibra introduce "chirp", o cambio de frecuencia, en los bordes de subida y bajada del pulso [23].



(a)



(b)

Figura 19. Chirp debido a dispersión positiva [23]

Como se ve en la figura 19 (b), imaginando por separado la longitud de onda azul (corta) de la roja (larga) y observando su velocidad en la fibra. En el régimen de dispersión positiva, también llamada régimen de dispersión anómala, las longitudes de ondas cortas (las azules) viajan más rápido que las longitudes de ondas largas (las rojas). El pulso azul llega primero que el rojo lo cual ocasiona el ensanchamiento del pulso [23].

- En la dispersión negativa, o régimen de dispersión normal, la fibra introduce exactamente los efectos opuestos de chirp.

Como se observa en la figura 20, el componente rojo viaja más rápidamente que el azul. (Notándose una vez más un efecto de ensanchamiento causado por la diferencia de velocidad). En este caso el borde de subida tiene más componentes azules y el borde de bajada tiene más componentes rojos [23].

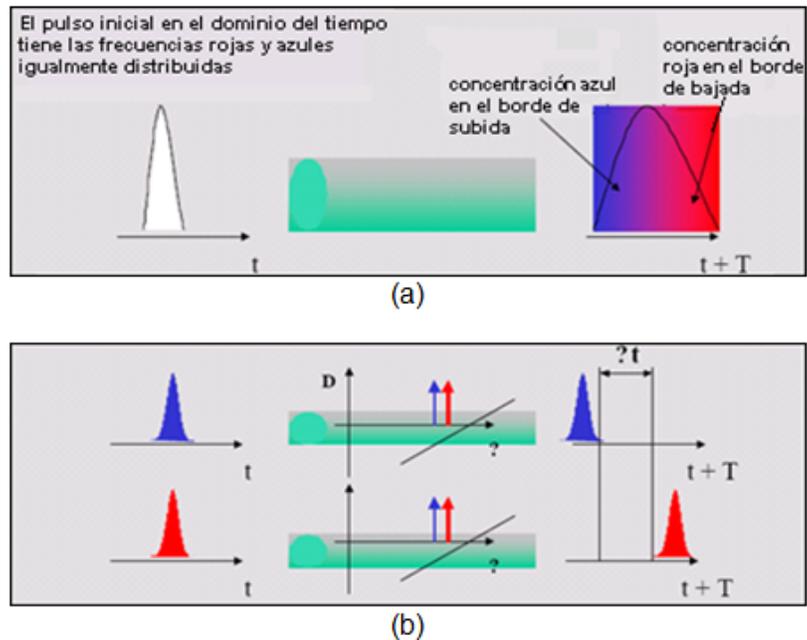


Figura 20. Chirp debido a dispersión negativa [23]

3.1.2.3. Dispersión de modo de polarización (PMD): Se debe a que el núcleo de la fibra no es perfectamente redondo. Cuando la luz se desplaza en una fibra mono-modo se polariza y viaja a través de dos planos de polarización perpendiculares entre sí, debido a la birrefringencia³. En una fibra ideal, circularmente simétrica, la luz viajando en un plano polarizado tiene la misma velocidad de la luz viajando en el otro plano. Sin embargo, cuando el núcleo de la fibra no es redondo, la luz viajando a lo largo de un plano podría también viajar más despacio o más rápido que la luz viajando a lo largo del otro plano polarizado, como consecuencia de que ven diferentes índices de refracción. Esta diferencia de velocidad ocasionará que el pulso termine ensanchándose. La figura 21 muestra dos modos principales en una fibra, uno se desplaza más lento que el otro ocasionando tiempos de llegada diferentes [22].

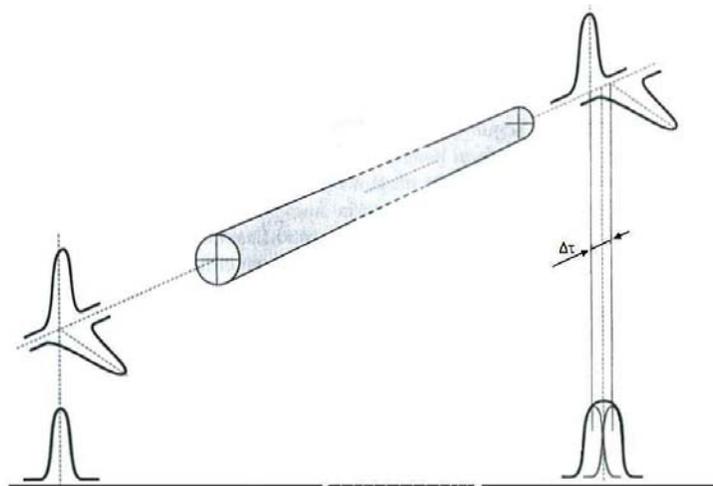


Figura 21. PMD en una Fibra monomodo [9]

³ La birrefringencia es la propiedad que presentan algunos cristales, como la calcita, por el cual cuando se ve una determinada imagen a su través, esta imagen aparece como desdoblada en dos.

Anteriormente, la PMD no presentaba gran importancia comparada con los otros tipos de dispersión, pero esta situación cambio en el momento de la aparición de sistemas ópticos con velocidades de transmisión superiores a los 2.5 Gb/s, siendo ya un verdadero problema a velocidades de 10 Gb/s [21].

La ecuación 10, indica como la PMD limita la distancia de transmisión, ya que a mayor distancia del enlace, mayor será la diferencia de tiempos de llegada entre las dos polarizaciones.

$$\Delta\tau_{PMD} = D_{PMD}\sqrt{L} \quad (10)$$

Donde, L es la distancia de transmisión, D_{PMD} es el parámetro de PMD, medido en $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ y cuyos valores se encuentran entre 0.1 y 1.0 $\text{ps}/\text{km}^{1/2}$, y $\Delta\tau_{PMD}$ es la diferencia de tiempos de llegadas entre las dos polarizaciones. El resultado de la ecuación es el valor medio del tiempo de dispersión resultante en largas distancias de transmisión. Esta expresión se aplica, usualmente, para longitudes del enlace superiores a 100 km [21].

La tabla 3 ilustra las distancias de transmisión para diferentes valores de PMD y diferentes tasas de bit.

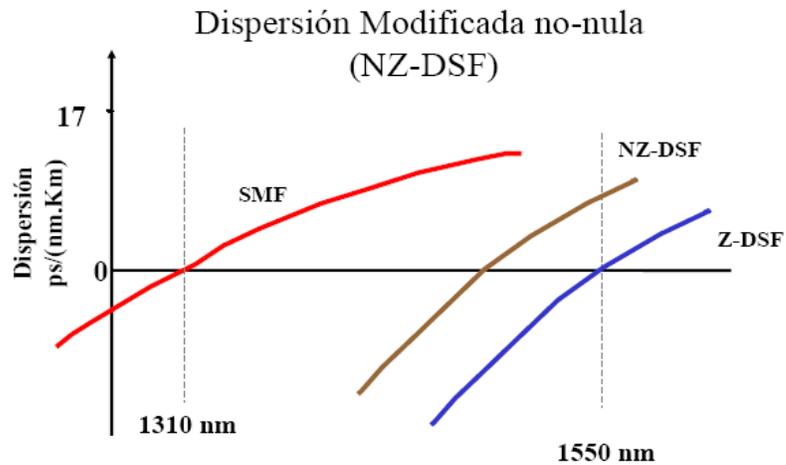
Tabla 3. Distancias de transmisión para diferentes valores de PMD [25]

Tasa de bit (Gb/s)	$\Delta\tau_{PMD}$ (ps)	Distancia (km) $D_{PMD} = 0.5\text{ps}/\text{km}^{1/2}$	Distancia (km) $D_{PMD} = 0.2\text{ps}/\text{km}^{1/2}$	Distancia (km) $D_{PMD} = 0.08\text{ps}/\text{km}^{1/2}$
2.5	40	6400	40000	250000
10	10	400	2500	15625
40	2.5	25	156.25	976

Los fabricantes de fibra dan valores de PMD, pero estos no son tan reales debido al carácter aleatorio de este efecto. La norma ITU-T G.663, sección II.4.1.2, requiere que el retardo de tiempo entre los dos estados de polarización sea de un valor típico de $\Delta\tau_{PMD} = 0.1\text{ps}$ [21].

DESPLAZAMIENTO DE LA DISPERSIÓN

La figura 22 muestra el desplazamiento de la dispersión para obtener un valor de dispersión deseado en algunas longitudes de onda de operación.



Dispersión Modificada con $\lambda_0 \neq 1550 \text{ nm}$ → Non-Zero Dispersion-Shifted
Figura 22. Desplazamiento de la dispersión [26]

Especificaciones de la ITU-T para fibras monomodo:

- G.652. Fibras monomodo estándar (SSMF) o fibras de dispersión no desplazada (NDSF): Diseñadas para operar en la segunda ventana (1310nm), la dispersión para estas fibras puede caer a cero en esta longitud de onda, ofreciendo gran ancho de banda y bajas pérdidas. *“Cuando la demanda para el transporte de gran ancho de banda creció, una tercera ventana fue descubierta en 1550nm para transmisión de fibra monomodo. Suministró unos niveles de atenuación que fueron inferiores a la mitad de los que se midieron en la ventana de 1310nm, pero desgraciadamente presentaba un grado de dispersión importante. Puesto que la mayor parte de toda la fibra instalada era NDSF, la única solución asequible a los diseñadores era estrechar el ancho de línea de los rayos láser empleados en estos sistemas y hacerlos más potentes. Infortunadamente, incrementar la potencia y reducir el ancho de línea del rayo láser es un proceso costoso, así que otra solución apareció”* con la especificación G.653 de la ITU [8].

En 1980 la ITU planteó las características para las fibras monomodo. La tabla 4 muestra las principales especificaciones para estas fibras.

Tabla 4. Principales especificaciones de la ITU para la fibra monomodo [10]

Parámetro	Especificación
Diámetro del revestimiento	125micras
Diámetro del Modo	9 – 10 micras para la longitud de onda de 1300nm
Longitud de onda de corte	1100 – 1280nm
Curva de pérdida (a 1550 nm)	Menor que 1dB
Dispersión en la banda de 1300nm	Menor que 3.5ps/nm/km
Dispersión en la banda de 1550nm	Menor que 20ps/nm/km
Tasa de cambio de la dispersión con la longitud de onda	Menor que 0.095ps/nm/km

- G.653. Fibras de dispersión desplazada (DSF): En una fibra con dispersión desplazada, el núcleo y el revestimiento son diseñados de tal forma que la dispersión de guía de onda es negativa con respecto a la dispersión de material, de esta manera se cancela la dispersión total. Esta fibra también es referida como fibra de dispersión desplazada con valor cero (zero *dispersion-shifted fiber* Z-DSF). Con la DSF, el punto de mínima dispersión es mecánicamente cambiado de 1310nm a 1550nm a fin de disminuir el grado de dispersión en esta ventana [6] [8].
- G.655. Fibras de dispersión desplazada con valor no cero (NZ-DSF): El hecho de presentar dispersión cero en la región de los 1550nm es una condición negativa para aplicaciones DWDM: La falta de dispersión cromática aumenta las deficiencias no lineales como la mezcla de cuarta onda (FWM) y la modulación de fase cruzada (XPM) básicamente, limitando el rendimiento final del sistema. A consecuencia de esto se crearon las fibras de dispersión desplazada con valor no cero (NZ-DSF), las cuales combaten los efectos no lineales con una reducida dispersión (alrededor de +/- 3ps/nm/km) en la región de los 1550nm. Para los sistemas DWDM, es preferible valores de dispersión positivos ya que éstos son más fáciles de compensar que los valores negativos, y además, la zona de dispersión positiva corresponde con una zona relativamente plana de la curva de ganancia de los amplificadores ópticos [21] [23].
- Fibras de dispersión negativa (NDF) o fibras compensadoras de la dispersión (DCF): como lo indica la figura 23, estas fibras presentan valores de dispersión negativa, lo

que las hace idóneas para ser utilizadas en las técnicas de compensación de la dispersión.

Las fibras DCF tienen un núcleo mucho más estrecho que las fibras monomodo estándar, lo cual ocasiona problemas de efectos no lineales. Además es típicamente birrefringente y presenta dispersión de modo de polarización. También presentan valores de atenuación (0.5 – 0.8 dB/km) superiores a los de las fibras monomodo estándar (0.2 dB/km) en la banda de 1550 nm [11].

Para utilizar las fibras de dispersión negativa en sistemas WDM es importante que su coeficiente de dispersión sea lo más constante posible en todo el rango de frecuencias del sistema con el fin de introducir un valor similar de dispersión en todas las longitudes de onda [26].

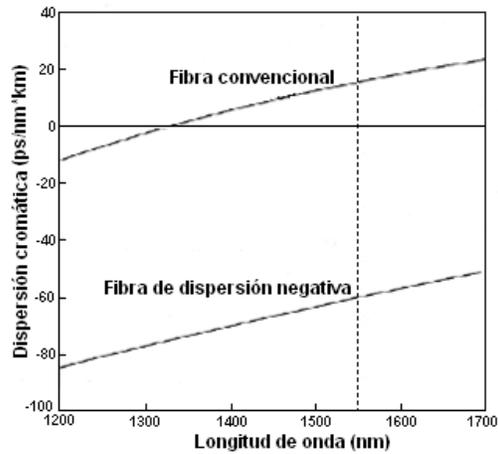


Figura 23. Fibras de dispersión negativa [26]

- G.652.C. Fibras de reducido pico de agua (LWPF): En la curva de atenuación de las fibras monomodo estándar se presenta un pico conocido como “pico de agua”, el cual es una región de longitud de onda de aproximadamente 80nm centrada sobre 1383nm donde la atenuación en la fibra es incrementada gracias a la unión de átomos de hidrogeno con oxigeno en el vidrio. Los átomos de hidrogeno pueden atacar los sitios con oxigeno disponible para formar iones de hidroxilo OH- causando absorción e incrementando la atenuación en la fibra. Las fibras de pico de agua reducido eliminan el pico en la curva de atenuación a los 1383nm, como se puede apreciar en la figura 24, permitiendo utilizar el rango de longitudes de onda de 1360 a 1480 nm. Así, el nuevo rango espectral disponible va desde 1270 a 1610 nm [27].

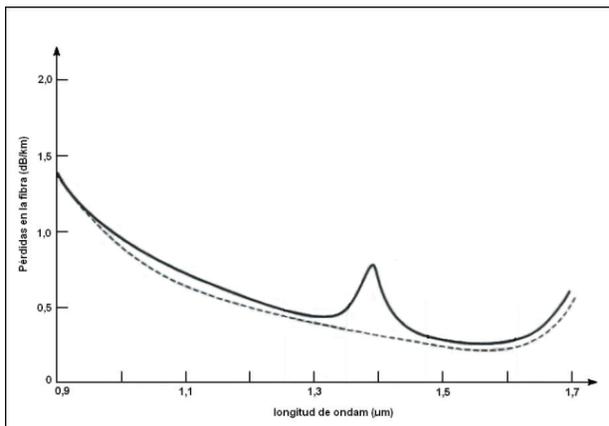


Figura 24. Eliminación del pico de agua utilizando fibras LWPF [21].

Como se cita en [7], “La distorsión de la señal que resulta de la dispersión puede ser limitada seleccionando fibras más puras tanto como utilizando dispositivos de compensación con una polaridad contraria a la de la fibra de transmisión. Aunque tales técnicas reducen la dispersión, no reducen el efecto de los fenómenos no lineales que pueden afectar el rendimiento de un sistema de transmisión óptico adversamente”.

En un esfuerzo de contrarrestar los efectos de la dispersión y los fenómenos no lineales, algunos fabricantes de fibra óptica desarrollaron nuevos productos. Tales productos fueron así llamados fibra de área efectiva grande (LEAF) desarrollado por Corning, las cuales se clasifican dentro de las DSF. Diseñadas para sistemas de larga distancia y gran ancho de banda utilizando sistemas multicanal DWDM. El área efectiva representa el área media de la fibra en la cual la potencia óptica es transmitida. Por ejemplo, cuando utilizamos una fibra monomodo, el área efectiva es aproximadamente equivalente al área del núcleo de la fibra. Entre más grande sea el área efectiva, más grande será la potencia óptica que una fibra es capaz de soportar sin volverse susceptible a los efectos no lineales. Por lo tanto, un área grande de la fibra LEAF provee la capacidad de manejar una potencia más alta, así como un grado de inmunidad a los efectos no lineales. Por esta razón, las LEAFs y fibras similares permiten extender las distancias de transmisión antes de que la amplificación de la señal óptica sea requerida. Debido a que las LEAFs reducen los efectos no lineales antes mencionados, también proveen un medio más propicio para el desarrollo de canales adicionales sobre un sistema DWDM. Está diseñada para trabajar en la banda de 1550nm, en la cual se encuentra DWDM y los EDFAs. De acuerdo con las mediciones de la industria, el área efectiva de una LEAF es un 30% más grande que los productos de NZDSF, por consiguiente brinda una atenuación y dispersión más baja [7] [8].

COMPENSACIÓN DE LA DISPERSIÓN

Consideraremos dos técnicas compensadoras de la dispersión:

- Compensación de la dispersión de segundo orden mediante fibra compensadora de la dispersión.
- Compensación de la dispersión de tercer orden mediante redes de difracción de Bragg (Fiber Bragg Gratings, FBG).

El primer caso se basa en la instalación de pequeños tramos de fibras compensadoras de la dispersión o DCF (dispersión-compensating fiber) en diferentes partes del enlace. Estas fibras presentan valores de dispersión negativos de tal forma que en un corto intervalo de espacio compensen la dispersión que se haya acumulado hasta el momento. Así por ejemplo, para un enlace que trabaje con una fibra convencional de 2.3 ps/nm/km de dispersión, una fibra DCF puede llegar a alcanzar una dispersión de -16ps/nm/km, con esto se puede conseguir que la dispersión total del enlace sea nula, aunque en un punto particular del sistema no lo sea. Una desventaja de estas fibras es que introducen unas pérdidas adicionales al sistema ya que la atenuación es mayor a las convencionales debido a las propiedades que la conforman [21].

Existen dos formas de compensación mediante fibras DCF denominadas *precompensación* y *postcompensación* mostradas en la figura 25a y 25b respectivamente. En el caso de la precompensación la compensación se realiza al inicio de cada tramo. En su comienzo la señal presenta cero dispersión y un adecuado nivel de amplitud. Tras su paso por la DCF, la dispersión adquiere un valor negativo y la amplitud disminuye en un valor significativo. La fibra posterior, sigue reduciendo la amplitud, pero de una forma menos drástica y debido a su valor de dispersión positivo incrementa el valor de esta hasta alcanzar de nuevo cero dispersión. El siguiente amplificador eleva de nuevo la amplitud de la señal. En el caso de la postcompensación la compensación se realiza al final de cada tramo y su análisis es análogo al anterior [21].

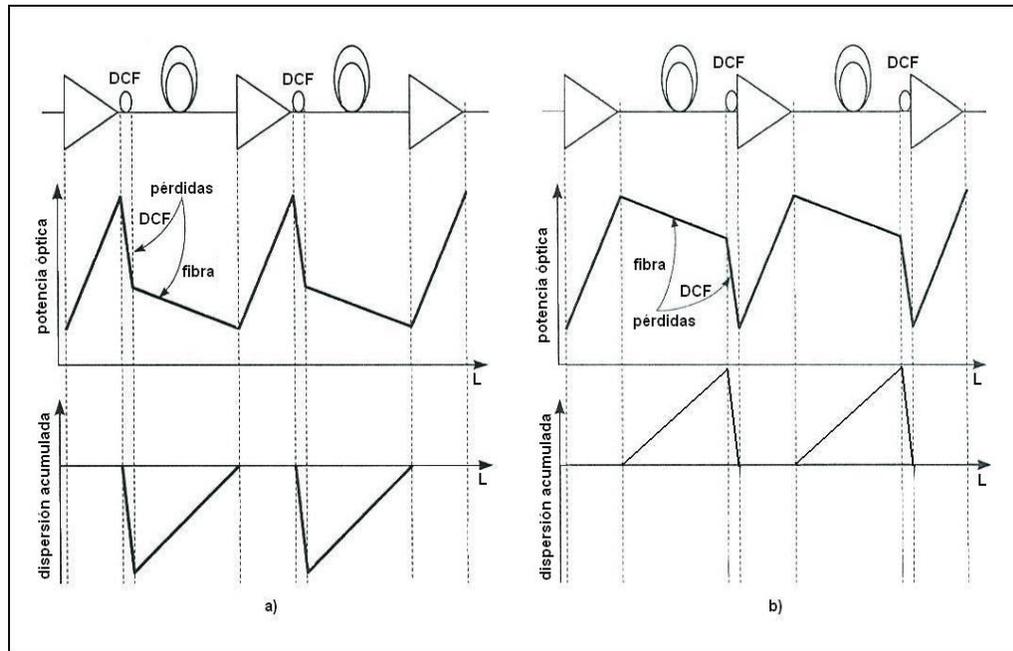


Figura 25. Técnicas de compensación de la dispersión mediante DCF [21].

Esta solución también se conoce con el nombre de *compensación pasiva de la dispersión* debido a que cada tramo y cada segmento DCF poseen características distintas y además las longitudes de cada tramo son diferentes por varias razones (facilidad para situar los amplificadores, accesos intermedios de nuevas señales, etc.). De lo anterior se deduce que la fibra básica puede presentar variaciones de dispersión a lo largo del enlace. Finalmente para velocidades de 40 Gb/s, mínimas variaciones de la dispersión, incluso debido a cambios en la temperatura, pueden afectar el comportamiento del sistema. Por tal razón, esta solución estática sólo podrá ser implementada en situaciones muy controladas y donde se conozca que no van a surgir alteraciones futuras. Por eso se recomiendan soluciones dinámicas con esquemas de compensación que puedan ser ajustados en cada momento [21].

El segundo caso de compensación de la dispersión se hace mediante un ajuste dinámico por cambios en el periodo de la red. *“Este cambio puede hacerse de dos formas diferentes: por tensiones mecánicas, a través de un dispositivo piezoeléctrico, que altera la geometría de la red, o con un gradiente térmico aplicado a la misma que realiza idéntica función”*. Estos ajustes se pueden hacer en el interior de los amplificadores ópticos. De igual forma que se puede alterar la amplificación deseada, también se puede variar la dispersión, según sean las necesidades [21].

Un problema que se presenta para esta técnica de compensación es que para velocidades de transmisión superiores a los 40 Gb/s los órdenes en la constante de fase que empiezan a tener influencia por la dispersión son los superiores al tercero, con lo cual se ve afectada la distancia máxima de transmisión. La solución a esto es la implementación de nuevo de fibras DCF de manera que la dispersión tanto de segundo como de tercer orden tengan signo contrario a la de las fibras básicas. Pero surge un nuevo problema, que implica que el ancho de banda donde se puede conseguir lo anterior es bastante reducido, con lo cual se limita el número de canales a utilizar [21].

COMPENSACIÓN DE PMD

Las técnicas de compensación de PMD son de dos tipos: ópticas y eléctricas. Las ópticas se basan en introducir retardos ópticos que compensen los adelantos entre las

polarizaciones. La figura 26 muestra el esquema más sencillo para este caso. Mediante la utilización de un polarizador/divisor se separa los dos estados de polarización (EP_1 y EP_2) de la radiación en dos caminos distintos. EP_2 que se supone que se ha adelantado recorre el camino indicado en la figura. Este desplazamiento introduce un retardo en la señal, que si es el adecuado, cuando incida de nuevo sobre EA_1 coincidirá con la EP_1 . El desplazamiento de EP_2 depende de una señal de realimentación que compara el estado de las dos señales que llegan al receptor y ajusta el camino del EA_2 [21].

En la técnica eléctrica, filtros transversales en el interior del receptor dividen la señal eléctrica en un cierto número de ramas introduciendo a cada una de ellas un retardo y un peso diferentes. El resultado se mezcla a la salida y, de acuerdo con lo obtenido, se reajusta pesos y retardos hasta alcanzar el comportamiento deseado [21].

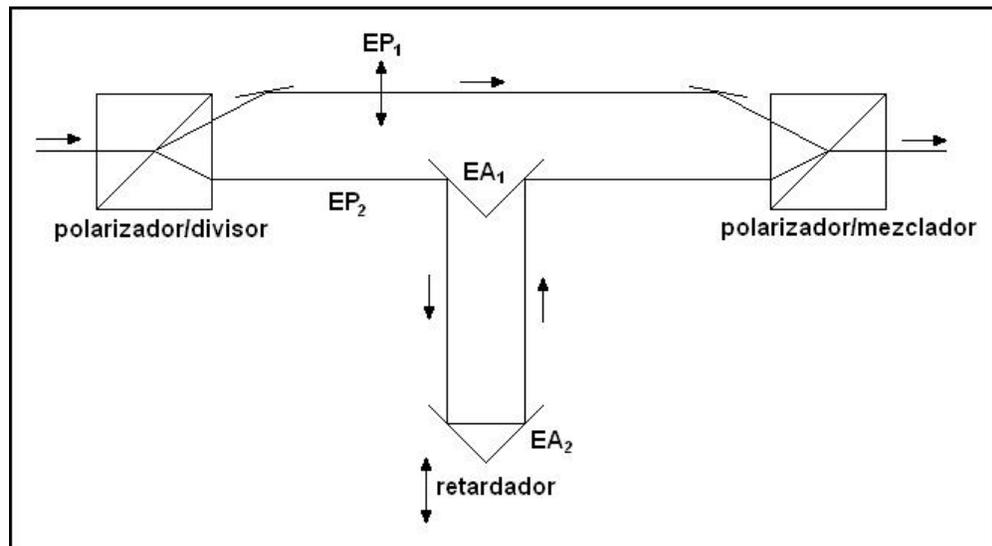


Figura 26. Esquema de un dispositivo de compensación de PMD [21]

3.2. EFECTOS NO LINEALES

Los sistemas de transmisión WDM que utilizan altas tasas de bit requieren de una potencia de transmisión alta, lo cual introduce efectos no lineales que tienen lugar sobre el espaciado entre canales adyacentes de longitudes de onda, limitando la potencia óptica por canal y la tasa de bit máxima, afectando la calidad de las formas de onda de las señales. Estos efectos no lineales son: los fenómenos de esparcimiento estimulado inelástico (SRS: *Stimulated Raman Scattering* y SBS: *Stimulated Brillouin Scattering*), modulación de auto-fase (SPM: *Self Phase Modulation*), modulación de fase cruzada (XPM: *Cross Phase Modulation*) y mezcla de cuatro ondas (FWM: *Four Wave Mixing*) [6], [19], [28].

Parámetros relacionados con los efectos no lineales:

- Potencia crítica
- Longitud efectiva
- Área efectiva.

Limitaciones de las no linealidades:

- Limita la potencia óptica de un canal individual.

- Limita la potencia óptica dentro de la fibra.
- Restricción del espaciamiento mínimo entre canales.

Limitación del número de Canales WDM por Efectos no-lineales [26]:

- Para determinar un límite máximo de potencia por canal, se tiene como criterio que la SNR del canal se degrade máximo 1dB en recepción debido a la no-linealidad examinada.
- El umbral de potencia para la aparición de SRS es de aproximadamente 500mW. En los sistemas WDM debido a la potencia empleada se puede introducir intermodulación; lo cual limita el número de canales a transmitir. A diferencia del caso de un único canal donde la potencia típica transmitida es de 10mW y por lo tanto no se presenta este problema.
- La XPM es otro efecto no lineal que se debe considerar ya que también restringe el número de canales posibles y la potencia óptica de cada uno de ellos.
- Como se cita en [26], *“En contraste con el SRS y la XPM, el límite de potencia impuesto por los fenómenos de FWM y SBS es independiente del número de canales. Sin embargo son los efectos críticos en sistemas con un número de canales pequeño. La potencia umbral necesaria para producir SBS (≈ 6 dBm) es mucho más pequeña que la de SRS”*.

Las no linealidades de la fibra caen dentro de dos categorías: dispersión estimulada e índices de fluctuaciones refractivos.

3.2.1. Dispersión Estimulada.

El SRS y el SBS son fenómenos de “dispersión” que producen pérdidas de la señal transmitida. En las comunicaciones más elementales presentan poca importancia, debido a que la potencia utilizada es de un valor muy reducido. Caso contrario a los sistemas de comunicaciones más avanzados, como los que utilizan transmisión multicanal o en los que, por razones concretas, hay que elevar la potencia óptica [21].

Esparcimiento Estimulado de Raman (SRS):

El esparcimiento de Raman estimulado (SRS) es un problema de *crosstalk* (diafonía) dependiente de la potencia. En SRS, los canales de longitud de onda corta de gran potencia, donan potencia a los canales de longitud de onda más larga, canales de menor potencia. Este proceso de ganancia se conoce como esparcimiento estimulado Raman (SRS) y constituye la base para la fabricación de los amplificadores ópticos de Raman. SRS ocurre cuando un pulso de luz que se mueve a través de la fibra interactúa con la matriz cristalina del silicio, causando que la luz se esparza hacia atrás y cambie la longitud de onda del pulso ligeramente. Mientras que SBS es un fenómeno de esparcimiento hacia atrás, SRS es un fenómeno de dos sentidos, causando tanto esparcimiento hacia atrás como un cambio de longitud de onda. El resultado es *crosstalk* entre canales, sin embargo, el SRS puede ser eficazmente reducido a través de la utilización de fibras de área efectiva grande [8] [29].

En el caso de un sistema óptico monoportadora puede generarse dispersión espontánea de Raman que posteriormente sea amplificada. No obstante, para que se produzca una degradación significativa son necesarias potencias ópticas del orden de 1 W. En cambio, en sistemas WDM la situación es bastante diferente, dado que existen multitud de canales y las señales situadas a longitudes de onda superiores serán amplificadas por los canales situados a longitudes de onda inferiores. En la región de 1550nm, el perfil de ganancia Raman del silicio

acoplará canales separados hasta 100nm, por lo que la degradación se producirá para potencias ópticas bastante inferiores. Recientes estudios teóricos y experimentales han demostrado que en un sistema WDM el SRS conduce a una distribución de potencia exponencial en los canales que aumenta con la distancia [29].

La eficiencia del proceso no lineal es directamente proporcional a la potencia de bombeo, la longitud efectiva de la fibra y un coeficiente de ganancia que depende del material, e inversamente proporcional al área efectiva de la fibra [29].

La figura 27 indica cómo debido a que en la red se presentan vibraciones moleculares y cuando estas interactúan con la luz se produce una absorción de energía generando una onda de mayor longitud de onda que la de la señal [26].

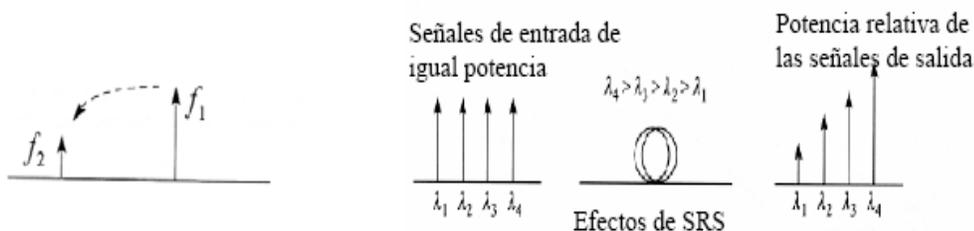


Figura 27. Efecto del SRS [26]

Esparcimiento estimulado de Brillouin (SBS):

Como se cita en [8], “El SBS es un fenómeno relacionado con la potencia. El nivel de potencia de una señal óptica transmitida permanece dentro de cierto umbral, generalmente sobre el orden de los 3 mW. El umbral es directamente proporcional al área efectiva de la fibra, y debido a que las fibras de dispersión desplazada tienen áreas efectivas más pequeñas, también tienen umbrales más bajos. El umbral es también proporcional al ancho del pulso de rayo láser de origen: cuando el pulso se amplía, el umbral aumenta. Por lo tanto, a menudo se toman medidas a través de una variedad de técnicas para ampliar el pulso del rayo láser artificialmente. Esto puede levantar el umbral significativamente, haciéndolo tan grande como 40 mW”.

Este proceso no lineal es similar al SRS, salvo que el SBS depende de ondas sonoras en lugar de vibraciones moleculares. Cuando la luz interactúa con las ondas sonoras en el medio, se producen vibraciones las cuales a su vez producen una variación en el índice de refracción equivalente a las variaciones de intensidad de la onda, causando que un poco de la señal sea reflejado hacia atrás, hacia la fuente de la señal, resultando en ruido, la degradación de la señal y una reducción en la tasa de bit del sistema. Cuando la potencia de la señal aumenta más allá del umbral, mayor cantidad de la señal es reflejada, resultando en una multiplicación del problema inicial.

En resumen: debido al esparcimiento hacia atrás, SBS reduce la cantidad de la luz que en realidad alcanza el receptor y causa deficiencias de ruido. El problema aumenta rápidamente encima del umbral de potencia, y tiene un impacto más nocivo sobre las longitudes de onda más largas. Por otro lado, los amplificadores ópticos de línea aumentan el problema significativamente; por ejemplo, si cuatro amplificadores ópticos aparecen a lo largo de un espacio óptico, el umbral caerá por un factor de cuatro.

Existen importantes diferencias entre el SBS y el SRS que conducen a consecuencias distintas en el sistema de comunicaciones ópticas. En primer lugar, el valor pico del coeficiente de ganancia en fibras ópticas monomodo es dos órdenes de magnitud superior ($4e^{-9}$ cm/W) que el coeficiente de ganancia para el SRS y aproximadamente independiente de la longitud de onda. Como consecuencia de ello, bajo determinadas condiciones el SBS será el proceso no lineal

dominante. En segundo lugar, el ancho de banda de ganancia óptica del SRS es del orden de 6 THz. Por lo tanto, no existe prácticamente reducción en la ganancia Raman para láser de bombeo de gran ancho de línea [29].

El ancho de banda del SBS en fibras de silicio, es de unos 20-100 MHz a 1550nm y varía inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda. En este caso, la máxima ganancia del SBS se producirá para láser con anchos de línea inferiores a 20 MHz. Adicionalmente y a diferencia del SRS, el cual puede actuar en ambas direcciones, el SBS se produce únicamente en la dirección de propagación opuesta a la del bombeo, generando una onda reflejada hacia el transmisor y provocando la atenuación de la potencia óptica inyectada. El efecto del SBS es menor en la banda de 1550nm que en la de 1310nm debido a que la atenuación es mayor en esta última. En el caso de fibras estándar operando a 1550nm la onda dispersada se encuentra desplazada con respecto a la onda incidente una frecuencia de unos 11GHz. Con respecto al nivel de potencia óptica crítico para el cual el SBS degrada la calidad del sistema, éste se encuentra en torno a los 5-10mW para una longitud efectiva de unos 25 km [29].

En sistemas multicanal WDM puede demostrarse que cada canal óptico interactúa con la fibra independientemente de los otros, por lo que la potencia crítica se mantiene constante aumentando el número de canales del sistema. Por último, conviene indicar que el SBS es bastante sensible al formato de modulación empleado. Velocidades de modulación elevadas producen espectros ópticos anchos y una reducción de la amplificación estimulada por Brillouin. De este modo, el empleo de modulaciones PSK permite reducciones mayores que utilizando modulaciones ASK o FSK [29].

En un sistema de un solo canal el umbral SRS es cerca de tres órdenes de magnitud mayor que el umbral del SBS [26].

3.2.2. Índices De Fluctuaciones Refractivas

Aunque el índice de refracción de una fibra óptica de silicio presenta una constante a bajos niveles de potencia óptica, las altas potencias relacionadas con los amplificadores ópticos pueden modular el índice variando la intensidad óptica de la señal de transmisión [9].

La relación existente entre la potencia de transmisión y el índice de refracción del medio da lugar a cuatro no linealidades ópticas que afectan el rendimiento: la modulación de auto-fase (SPM), modulación de fase cruzada (XPM), la mezcla de la cuarta onda (FWM), y la intermodulación [8].

Los efectos no lineales SPM y XPM se caracterizan por una modulación de fase de la señal óptica inducida por la potencia óptica de la propia señal (SPM) o de otra portadora óptica o canal vecino (XPM) ensanchando el espectro. La dependencia del índice de refracción con la intensidad de las señales ópticas (efecto Kerr) es la responsable de la aparición de estos efectos. Se presentan principalmente en fibras ópticas monomodo y el efecto de la XPM es el doble de la SPM.

La Modulación de fase cruzada (XPM) es muy similar a la SPM sólo que involucra dos pulsos de luz, considerando que la SPM necesita sólo un pulso. En la XPM, dos pulsos viajan en la fibra, cada uno cambia el índice refractivo así como la potencia óptica. Si estos dos pulsos se solapan, introducirán distorsión en los otros pulsos. Aumentando el área efectiva de la fibra se puede reducir la XPM y todas las no linealidades de la fibra [9].

La mezcla de cuatro ondas (FWM) es un proceso no lineal que se presenta en sistemas de múltiples longitudes de onda, como DWDM y se caracteriza por batidos de tercer orden entre las portadoras ópticas que dan lugar a la aparición de nuevas frecuencias o armónicos a la

salida del dispositivo, típicamente fibras ópticas o amplificadores de semiconductor. Considerando que se propagan dos portadoras a frecuencias ópticas f_1 y f_2 por una misma fibra, el proceso no lineal generará dos nuevas bandas laterales a frecuencias $2f_1 - f_2$ y $2f_2 - f_1$. Estas bandas laterales se propagarán junto con las dos ondas iniciales aumentando su amplitud a expensas de la energía de las originales. Este fenómeno es similar a la distorsión por intermodulación de los sistemas eléctricos [29].

La cantidad de armónicos depende de la ecuación 11 [8]:

$$\frac{1}{2}(N^3 - N^2) \quad (11)$$

Donde N es el número de señales. Así si un sistema DWDM está transportando 16 canales, el número total de armónicos creados potencialmente destructivos es de 1920.

Si los canales se encuentran igualmente espaciados, algunas de las nuevas ondas generadas tendrán frecuencias coincidentes con las de los canales inyectados en la fibra. Los efectos inmediatos serán una atenuación adicional de la potencia de los canales y fenómenos de diafonía. La eficiencia del proceso no lineal de FWM depende del espaciado de los canales y de la dispersión de la fibra. Al aumentar el espacio entre canales se minimiza el efecto de la FWM en los sistemas DWDM. Esto, por supuesto, reduce la eficiencia de la fibra reduciendo el número total de canales disponibles, y por lo tanto no es una solución óptima, particularmente porque la tendencia en la industria es reducir el espaciado entre canales como una manera de incrementar el número total de canales disponibles.

Las velocidades de grupo de las ondas iniciales y generadas son distintas como consecuencia de la dispersión cromática. Esto provoca la destrucción de la condición de adaptación de fases del proceso de la FWM y reduce la eficiencia de potencia en la generación de nuevas ondas. La eficiencia de la FWM decrece cuando aumenta la diferencia entre las velocidades de grupo, por lo que valores de dispersión o separaciones entre canales mayores conducen a menores eficiencias. Por este motivo, la FWM es más eficiente en fibras de dispersión desplazada DSF que en fibras estándar operando a 1550nm ($D = 17$ ps/km·nm) [8], [29].

La relación de la FWM con la potencia de la señal es no lineal. Así, si la potencia de la señal se incrementa el efecto de la FWM crece exponencialmente. Por esta razón las fibras de área efectiva grande se ven menos afectadas por los efectos de la FWM ya que la potencia de la señal se distribuye mejor.

Para tres señales propagándose a través de una fibra óptica con frecuencias de f_i , f_j y f_k , las nuevas frecuencias generadas por la FWM quedan expresadas por la ecuación 12:

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k, \quad i, j, k \in [1, N], \quad k \neq \{i, j\} \quad (12)$$

Donde N el número de canales, en este caso $N=3$ [30].

Un ejemplo de la FWM sería el siguiente: considere tres longitudes de onda (λ_1 , λ_2 , y λ_3) en un sistema que está experimentando distorsión de FWM. En este sistema simple, se generan nueve productos cruzados a partir de estas longitudes de onda. Asumiendo como ejemplo que las longitudes de onda de entrada son $\lambda_1 = 1551.72$ nm, $\lambda_2 = 1552.52$ nm, y $\lambda_3 = 1553.32$ nm. Las longitudes de onda interfiriendo que son de mayor preocupación en este sistema, se presentan en la tabla 5.

En la figura 28 se nota que hay productos adicionales generados que caen fuera de las longitudes de onda originales, pero también hay productos que caen sobre los canales transmitidos; esto se debe a la separación igual de canales.

Tabla 5. Productos FWM generados en un sistema WDM de tres canales.

Sep = 0,8 nm	λ (nm)	F (THz)
$2\lambda_1 - \lambda_2$	1550,92	193,299461
$2\lambda_2 - \lambda_1$	1553,32	193,000798
$2\lambda_2 - \lambda_3$	1551,72	193,199804
$2\lambda_3 - \lambda_2$	1554,12	192,901449
$\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3$	1550,92	193,299461
$\lambda_3 + \lambda_2 - \lambda_1$	1554,12	192,901449
$\lambda_1 + \lambda_3 - \lambda_2$	1552,52	193,10025
$2\lambda_1 - \lambda_3$	1550,12	193,399221
$2\lambda_3 - \lambda_1$	1554,92	192,802202

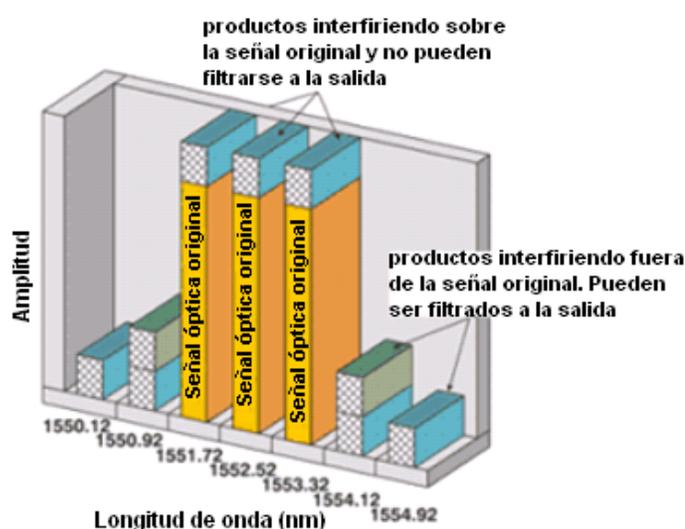


Figura 28. Resultado de los productos cruzados de las longitudes de onda [9]

La FWM representa una limitante para el número de canales introducidos en el sistema, ya que a mayor número de canales mayor número de productos cruzados [9].

A causa de que el índice de refracción del núcleo de una fibra óptica es directamente dependiente de la potencia de la señal óptica, dos acciones pueden ser tomadas para minimizar este problema relacionado con la potencia. El primero obviamente es minimizar la potencia de la señal transmitida. Sin embargo, esto limita la distancia de transmisión y por ello es la opción menos deseable. La segunda opción es mucho más aceptable, consiste en maximizar el área efectiva de la fibra. El área efectiva es una medida del área local transversal de la base de la fibra que lleva la señal transmitida. Ensanchando el área efectiva de la fibra, se recolecta más la señal transmitida y se reduce así la necesidad de una señal excesivamente fuerte [8].

Del mismo modo que la XPM resulta como interferencia entre múltiples señales simultáneas, la intermodulación causa frecuencias secundarias creando productos cruzados de las señales originales transmitidas. Las fibras de área efectiva grande pueden aliviar los síntomas de la intermodulación [8].

En general, los efectos no lineales son mucho más eficientes en regiones de dispersión nula. Evidentemente, a mayor potencia de bombeo se consigue una mejor eficiencia del FWM. Un método para reducir las degradaciones introducidas por el FWM en sistemas multicanal WDM

consiste en emplear fibras dispersivas. Sin embargo, dado que valores elevados de dispersión cromática conducen a otro tipo de degradaciones como el incremento de la SPM, suelen emplearse las llamadas NZDSFs (non zero dispersion-shifted fibers). Este tipo de fibras se caracterizan por valores de dispersión suficientemente reducidos, pero no nulos, para evitar simultáneamente los efectos dispersivos y no lineales. La explicación de este comportamiento puede ser encontrado en el llamado Efecto de “walk-off” explicado en la figura 29 [27].

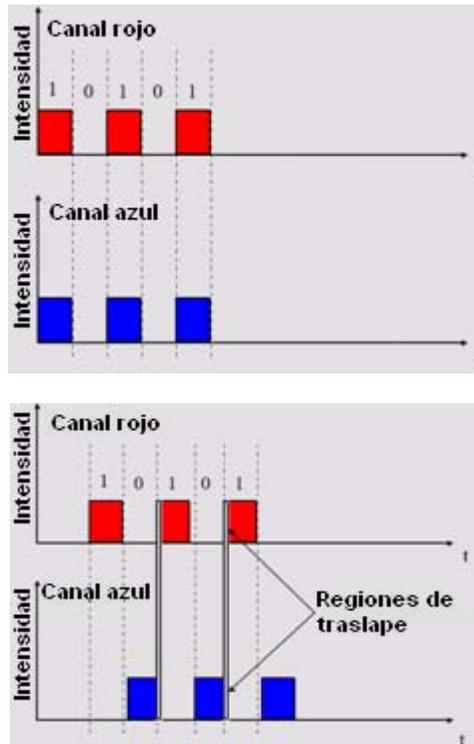


Figura 29. Efecto de “walk-off” [23]

Los efectos no lineales de canal cruzado (cross-channel) (FWM y XPM) ocurren cuando los bits rojos y azules están sincronizados, o en otras palabras, cuando su potencia está traslapada en el dominio del tiempo. Debido a la dispersión cromática los canales rojos y azules se propagan a diferentes velocidades y después de un tiempo la secuencia de bits rojos tienden a alejarse (walk-off) de la secuencia de bits azules [23].

Cuando los bits rojos y azules no están en la misma fase, solo una porción de su potencia está traslapada y los efectos no lineales son minimizados. En una fibra DSF, cerca de los 1550nm, las velocidades de las señales azules y rojas son casi iguales, guardando los bits azules un cierto sincronismo con los bits rojos, y aumentando los efectos no lineales. En una fibra NZDSF (G.655), una cantidad de dispersión en la región de 1550nm ayuda a reducir el impacto de FWM y XPM significativamente [23].

4. CRITERIOS Y PROCEDIMIENTOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE REDES WDM

A continuación se establecen los criterios y procedimientos que corresponden a las consideraciones técnicas y tecnológicas para el dimensionamiento de redes WDM. Estos se definieron teniendo en cuenta los conceptos teóricos acerca de redes ópticas, en particular redes WDM y los resultados obtenidos por estudios y desarrollos anteriores. En el capítulo cinco, se presentarán los resultados de las simulaciones realizadas para validar los criterios y procedimientos.

4.1. CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE REDES WDM

Criterio 1: La potencia de la señal debe estar dentro del rango dinámico del receptor.

Se debe garantizar un adecuado nivel de señal a lo largo del canal de comunicación a pesar de la atenuación y las demás pérdidas que se puedan presentar, de tal forma que al ser recibida la señal su nivel de potencia esté dentro del rango dinámico del receptor para que éste pueda detectar correctamente la señal transmitida. Este rango limita la potencia óptica de la señal recibida, ya que si el nivel de potencia supera el máximo permitido puede dañar el equipo y si por el contrario está por debajo del valor mínimo el receptor no podrá diferenciar entre unos (1) y ceros (0), incrementando la tasa de error de bit.

El rango dinámico está limitado por la sensibilidad (potencia mínima) y la potencia máxima permitida por el receptor; estos valores son especificados por el fabricante en el *data sheet* del dispositivo.

Criterio 2: Se deben emplear receptores que tengan una alta sensibilidad, gran ancho de banda o tiempo de respuesta rápido y bajo ruido [3].

El receptor debe tener una alta sensibilidad para que pueda detectar señales ópticas de bajo nivel, ya que entre mayor sea la sensibilidad del receptor, éste podrá detectar señales más atenuadas. La curva de sensibilidad indica la potencia óptica mínima que el receptor puede detectar comparada con la tasa de bit, para alcanzar una BER determinada, como se muestra en la figura 30.

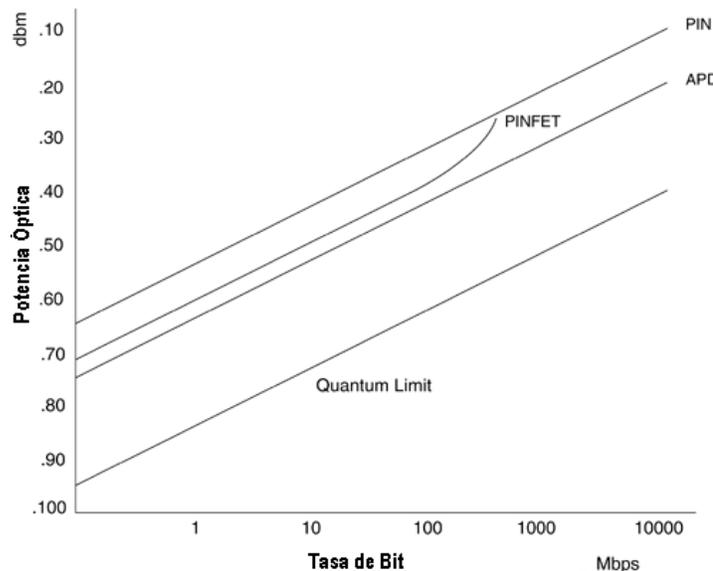


Figura 30. Curvas de sensibilidad para diferentes receptores, BER 10^{-9} y longitud de onda 1550nm [3]

Además, el receptor debe tener gran ancho de banda o un tiempo de respuesta pequeño para que pueda responder lo suficientemente rápido a las variaciones de la señal de entrada y demodular datos a alta velocidad.

El ruido en el receptor es un problema serio en la detección de señales ópticas, ya que este ruido eléctrico ocasionado por fluctuaciones de corriente afecta el desempeño del receptor. Las dos principales contribuciones de ruido son: el ruido de disparo (shot noise) y el ruido térmico (thermal noise). Por lo tanto el receptor debe tener bajo ruido de tal forma que no afecte significativamente la BER del enlace y contrarreste la interferencia del medio de transmisión [11].

Criterio 3: Los sistemas WDM deben utilizar fibras monomodo.

Según el modo de propagación (diferentes trayectorias que puede seguir un haz de luz) se tienen dos tipos de fibra óptica: multimodo y monomodo. Las fibras multimodo son aquellas que pueden propagar más de un modo de luz. Estas fibras se usan comúnmente en enlaces menores a 1km de distancia (máximo 2km), son sencillas de diseñar y económicas. Al contrario, las fibras monomodo solo permiten la propagación de un modo de luz, para lograr esto el diámetro del núcleo de la fibra es reducido hasta 8,3 a 10 micrones, logrando una transmisión en línea recta. Con estas fibras se pueden alcanzar distancias que van desde los 2.3 a 100km y además, permiten la transmisión de tasas de bit elevadas [31].

Debido a las características y exigencias de los sistemas WDM, se hace necesario utilizar un medio de transmisión que presente baja atenuación, es por ello que se opta por las fibras monomodo ya que en comparación con las multimodo tienen un mayor ancho de banda y gracias a su diseño es posible eliminar los problemas de dispersión intermodal, atenuando menos la señal, permitiendo alcanzar mayores distancias y velocidades de transmisión.

Criterio 4: La BER de una red WDM debe ser de por lo menos 10^{-12}

Entre menor sea la BER, menor es la atenuación que experimenta el rayo de luz al propagarse en el núcleo de la fibra lo que indica una mayor eficiencia y rendimiento del sistema.

La BER suele encontrarse entorno a valores de 10^{-9} para los sistemas más usuales de comunicaciones ópticas, llegando a valores de 10^{-12} en el caso de los sistemas de transmisión de datos [21]. Los operadores públicos de redes WDM consideran por cuestiones de disponibilidad como mínimo aceptable una BER de 10^{-12} , lo que significa que máximo 1 de 10^{12} bits puede dañarse durante la transmisión. Sin embargo, en diversos informes y artículos de investigación (basados en simulación) se citan tasas de error de bit de 10^{-9} ; debido a que una BER de 10^{-9} requiere la simulación de al menos 10^{10} bits para alcanzar una exactitud razonable, y en consecuencia necesita un gran tiempo de procesamiento, incluso en el caso de configuraciones muy sencillas.

Criterio 5: El número de amplificadores está limitado por la OSNR del sistema.

La OSNR especifica la relación entre la potencia de la señal óptica y la potencia del ruido, razón por la cual el diseño basado en la OSNR se considera como una herramienta muy importante.

En el diseño de sistemas WDM, el ruido introducido por los amplificadores ópticos se considera como la principal fuente de degradación que afecta la OSNR del sistema, a pesar de que existen otras fuentes como por ejemplo dispositivos activos como los láser ó dispositivos pasivos como los acopladores y la fibra quienes también introducen componentes de ruido.

Cuando el sistema está limitado por la OSNR se debe optimizar la ubicación de los amplificadores y si es necesario agregar regeneración [11].

Criterio 6: El factor Q debe ser menor que la OSNR por lo menos en 2dB.

En la práctica, se considera $OSNR(dB) > Q(dB)$, por lo menos en 1–2 dB. Generalmente, cuando se diseña un sistema de una alta tasa de bit, el margen en el receptor es de 2dB, de tal forma que el Factor Q sea menor que la OSNR en 2dB [11].

Criterio 7: El diagrama del ojo de la señal en recepción debe corresponder a un diagrama abierto.

Un diagrama del ojo abierto corresponde a una distorsión mínima de la señal, mientras que un diagrama cerrado representa una distorsión en la forma de onda de la señal, la cual puede ser causada por interferencia inter-símbolos o por el ruido.

El diagrama del ojo proporciona una manera visual para monitorear el rendimiento del sistema.

Criterio 8: La penalización de potencia debida a la dispersión no debe sobrepasar los 2 dB.

Se conoce como *penalización de potencia* a la pérdida en la potencia de la señal debida a la dispersión durante la transmisión; ésta también se considera como la potencia extra requerida en la señal de transmisión para que la señal llegue al receptor cumpliendo con la BER mínima del sistema.

El ensanchamiento del pulso debido a la dispersión, además de limitar la velocidad de transmisión, también ocasiona interferencia entre símbolos (ISI) y que la energía que antes se encontraba concentrada en un pulso más angosto, pase a distribirse en uno más ancho llevando a la disminución de la amplitud máxima que éste antes alcanzaba, lo cual conduce al deterioro de la relación señal/ruido en el receptor. Para poder mantener la SNR a un valor aceptable, es necesario aumentar la potencia de transmisión, pero hasta cierto límite, ya que esto puede ser un aliado para los efectos no lineales.

El parámetro δ_D , da la penalización de potencia y representa el incremento necesario, en dB, en la potencia recibida para compensar la reducción en el pico de potencia. Su valor viene dado por la ecuación 13:

$$\delta_D = 10 \log f_e \quad (13)$$

siendo f_e el factor de ensanchamiento del pulso y que se representa por la ecuación 14:

$$f_e = \frac{\sigma}{\sigma_{ent}} = \sqrt{1 + \left(\frac{DL\sigma_\lambda}{\sigma_{ent}}\right)^2} \quad (14)$$

con D como el parámetro de dispersión, L la longitud del enlace, σ_{ent} la anchura eficaz del pulso de entrada y σ_λ la del espectro del emisor [21].

La especificación ITU G.957 establece que la penalización de potencia no debe ser mayor que 2 dB [11].

Criterio 9: El margen típico del sistema recomendado para la PMD es de 1dB

A pesar de que actualmente existen fibras diseñadas para tener una baja PMD, este fenómeno sigue siendo un factor limitante para los sistemas WDM diseñados para operar sobre largas distancias y altas tasas de bit (mayores a 10Gb/s), lo que ha llevado al diseño de numerosos esquemas para compensar sus efectos [20].

Aunque el impacto de la PMD depende de parámetros tales como la tasa de bit y la distancia de transmisión, sus efectos se deben considerar durante el diseño del sistema, recomendándose un margen típico para la PMD de 1dB [11] [20].

Los compensadores de PMD ayudan a reducir la degradación de la señal inducida por la PMD.

Criterio 10: Para contrarrestar el SBS se debe utilizar rayos láser de pulso más amplio y fibras de área efectiva grande.

El SBS presenta un margen de ganancia de 20MHz por lo que si no hay canales tan próximos entre sí como este margen, y en la actualidad no los hay, no existirá interferencia entre ellos. En consecuencia a lo anterior, este efecto queda restringido a cada canal individual y por lo tanto no se convierte en un efecto de diafonía. El mayor problema de este efecto es que su sentido de propagación es contrario al de la señal de transmisión. Este hecho obliga a la inserción de dispositivos que aislen esta radiación para que no incidan sobre otros componentes previos [21].

Como se cita [8], “Las soluciones para SBS incluyen el uso de rayos láser de pulso más amplio y fibras de área efectiva grande”.

Criterio 11: Para reducir los efectos de la modulación de autofase (SPM) se debe limitar la potencia de la señal transmitida y utilizar fibras con bajo nivel de dispersión.

Al ser la SPM un efecto no lineal, la potencia de la señal transmitida influye sobre su comportamiento. La potencia pico a la entrada de la fibra está limitada por la ecuación 15.

$$P_{in} < 0.1\alpha/(\gamma N_A) \quad (15)$$

donde α son las pérdidas en la fibra, γ es un parámetro no lineal con valores entre 1 y 5 W^{-1}/km y N_A es el número de amplificadores. Por ejemplo, para $\gamma = 2 W^{-1}/km$, $N_A = 10$ y $\alpha = 0.2$ dB/km, el límite de potencia pico de entrada está por debajo de 5.2 mW [20].

La SPM introduce un *chirp* que es una especie de modulación gradual de frecuencia que hace que cada parte del pulso tenga frecuencias diferentes afectando su forma. Este *chirp* se debe a que la propia intensidad del pulso óptico posee valores diferentes en las regiones de subida o bajada que en su máximo, lo cual se traduce en que la intensidad del campo tendrá diferentes amplitudes en cada zona del pulso, percibiendo un valor diferente de índice de refracción y por ello sus características de transmisión serán diferentes en cada zona. Estas condiciones originan una variación diferente de fase para cada parte del pulso y en consecuencia, diferentes frecuencias. El comportamiento de la SPM en el régimen de dispersión normal es diferente que el régimen de dispersión anómala [21].

Debido a los cambios de frecuencia en el pulso, el efecto de la SPM se incrementa con la dispersión ya que ésta causa que cada componente del pulso viaje a una velocidad diferente. En general, el espectro óptico del pulso es ensanchado incrementando el ancho de banda de la señal considerablemente y limitando el rendimiento del sistema [20].

Criterio 12: Utilizar fibras con cierto valor de dispersión para contrarrestar los efectos causados por la XPM.

El cambio de fase inducido por la XPM sólo tiene efecto cuando dos pulsos se traslapan en el dominio del tiempo. La dispersión ocasiona que los canales viajen a diferentes velocidades, con lo cual el traslape entre ellos se dará por un tiempo corto haciendo que el efecto de la XPM sea insignificante. Al incrementar la dispersión, la diferencia de velocidad entre los canales aumenta y

la XPM disminuye, pero el incremento de dispersión debe ser limitado ya que si no pasaría a predominar su efecto sobre el rendimiento del sistema.

Criterio 13: Es necesario emplear alguna técnica para contrarrestar los efectos de la FWM y el SRS.

La FWM y el SRS causan una degradación en el rendimiento del sistema de dos maneras: primero, la generación de nuevos componentes a frecuencias diferentes representa pérdidas en la energía de la señal y por lo tanto un incremento en la tasa de error de bit (BER); segundo, en sistemas con un número grande de canales igualmente espaciados los nuevos componentes pueden caer sobre frecuencias destinadas a otros canales, causando un *crosstalk* grave.

La teoría indica que, para un sistema de cuatro longitudes de onda separadas a 4nm, una potencia por canal de 0dB y un coeficiente de dispersión de 2 ps/nm/km, la máxima distancia que se puede recorrer antes de un *crosstalk* significativo es de 500km. Esto es obviamente una limitante para redes de larga distancia [32].

Existe una variedad de técnicas que actúan sobre estas limitantes, entre ellas:

- Separación desigual de canales a través de la banda: Se busca que las nuevas componentes no caigan sobre las señales existentes. En el artículo *Optical Multiplexing in Fiber Network: Progress in WDM and OTDM* [32] se hace referencia a un estudio sobre la transmisión de 8 canales a 10Gb/s sobre 137Km de fibra de dispersión desplazada, en el que, utilizando espaciamiento desigual de canales se consiguió que la potencia disponible fuera incrementada en 7dB, representando una distancia adicional de 30Km con respecto al espaciado igual de canales.

En el artículo *Simulación de un Sistema Óptico de 40 Canales Obedeciendo al Estándar ITU-T G.692 con Separación Desigual de Longitudes de Onda* [33], se realiza la simulación de un sistema óptico de 40 canales utilizando un intercalamiento de longitudes de onda en forma desigual para reducir el Esparcimiento Estimulado de Ramman (SRS) y la Mezcla de Cuatro Ondas (FWM). Con esta técnica se consiguió alcanzar una distancia de hasta 580 km obteniendo un muy buen desempeño en la etapa de recepción, cumpliendo con la BER requerida para este tipo de sistemas de alta velocidad; además, se aumentó también el número de canales de 32 a 40.

Pero un inconveniente de esta técnica es que hace ineficiente la utilización del ancho de banda disponible y no elimina la reducción de energía ocasionada por la presencia de nuevos componentes. Con el fin de contrarrestar este inconveniente, actualmente se están realizando estudios que proponen una optimización en el proceso de ubicación de canales de tal forma que se cumpla con el requerimiento de separación desigual manteniendo la eficiencia del ancho de banda [30].

- Polarización ortogonal de los canales: En el artículo *Polarization Effect on Four-Wave Mixing Efficiency in a Single-Mode Fiber* [34], se presenta un estudio del comportamiento de FWM en una fibra monomodo para estados generales de polarización de la luz propagada; los resultados obtenidos muestran que la eficiencia de FWM es mucho mejor cuando los canales están polarizados ortogonalmente que cuando tienen estados de polarización paralelos.
- Utilización de fibras con bajos niveles de dispersión: Considerada como la técnica más práctica, se basa en que se puede conseguir un alto rendimiento del sistema combinando secciones de fibra estándar con secciones de fibra compensadora de dispersión. Esta técnica reduce significativamente la generación y acumulación de componentes FWM. Con esta técnica se demostró exitosamente la transmisión de 16 canales a 10Gb/s sobre 1000km [32].

En el artículo *Optical Multiplexing in Fiber Network: Progress in WDM and OTDM* [32] se hace referencia a un reporte experimental de la transmisión de 8 canales igualmente espaciados (a 0.53nm) a una tasa de 5Gb/s sobre 8000km. Utilizan fibras de dispersión desplazada con un coeficiente de dispersión de -2ps/nm/km con fibra estándar como técnica de compensación de dispersión. Teniendo en cuenta el trayecto y con el fin de evitar el SRS se restringió la potencia por canal a aproximadamente 90pW y mediante la gestión de dispersión se consigue eliminar la presencia de componentes FWM.

Cuando se diseñan enlaces WDM, típicamente se mantienen 0.5dB de margen de potencia tanto para la FWM como para el SRS.

Criterio 14: Determinar el número de amplificadores a utilizar y su adecuada ubicación, de tal forma que se optimice el rendimiento del sistema y la distancia de transmisión.

Los amplificadores ópticos son dispositivos fundamentales ya que aumentan el nivel de la señal contrarrestando las pérdidas y atenuaciones que esta sufre; además, al ser ubicados en cascada permiten incrementar las distancias de transmisión.

Sin embargo, una consideración que se debe tener presente al dimensionar redes WDM es el número de amplificadores a utilizar y su ubicación, ya que estos dispositivos además de aumentar el nivel de la señal deseada, al mismo tiempo introducen y amplifican una componente de ruido que se acumula al pasar por cada etapa de amplificación, lo cual puede llegar a afectar la recepción de la señal.

Criterio 15: La separación de canales debe ser de 100 GHz o 50 GHz según lo especifica la ITU-T, en su recomendación G.692.

La frecuencia de la señal portadora determina la región del espectro en la que se sitúa la emisión y la señal de información determina el ancho del espectro a ocupar. Entre mayor sea la frecuencia de la señal del canal, mayor será el ancho espectral utilizado. La figura 31 muestra tres canales espaciados entre sí a 100 GHz y el ancho de banda de uno de ellos, determinado por la anchura de la portadora más las bandas laterales que aparecen por la información que ésta lleva consigo.

Los efectos no lineales como la FWM y la XPM ocasionan interferencia entre canales y entre mas juntos estén entre sí mayor será la influencia de estos efectos sobre el deterioro del sistema. La velocidad de transmisión también influye sobre la separación entre canales. La figura 32 muestra la separación entre canales para dos velocidades de transmisión, para la velocidad de 10 Gb/s, en el caso b), se presenta traslape entre los canales, lo cual obliga a dejar libres las frecuencias intermedias entre las portadoras utilizadas. Pero si la velocidad de transmisión fuera de 2.5 Gb/s, el ancho de banda empleado por los canales sería menor y de esta forma se podrían utilizar todas las portadoras que aparecen en la figura. Algunos sistemas adoptan una separación entre canales de 25 GHz y en algunas experiencias de laboratorio se han transmitido señales de 1 Gb/s sobre canales separados tan solo 1 GHz [21].

La XPM adquiere importancia cuando a través de una misma fibra viajan un gran número de canales, y al mismo tiempo, presentan una mediana separación entre ellos. Por esta razón la forma más sencilla de evitarla es utilizar una separación de canal de 100 GHz. La razón de ser de este criterio es que con este intervalo de separación las constantes de propagación son lo suficientemente diferentes como para que se desplacen a diferentes velocidades y el solape que pueda haber entre pulsos desaparezca al cabo de una distancia no muy grande con lo que la XPM es eliminada. Este hecho suele conocerse como la huida de uno con respecto al otro y tiene lugar si la diferencia en la dispersión cromática entre uno y otro canal es de aproximadamente 2 ps/nm*km. Esta diferencia ocurre para el espaciado mencionado anteriormente, siempre que estos canales no se encuentren próximos a la zona de dispersión cero, en fibras SMF convencionales.

Cuando se trabaja con fibras de dispersión desplazada, y las longitudes de onda están en el entorno de 1550 nm, este efecto puede ser un problema para velocidades por encima de los 10 Gb/s [21].

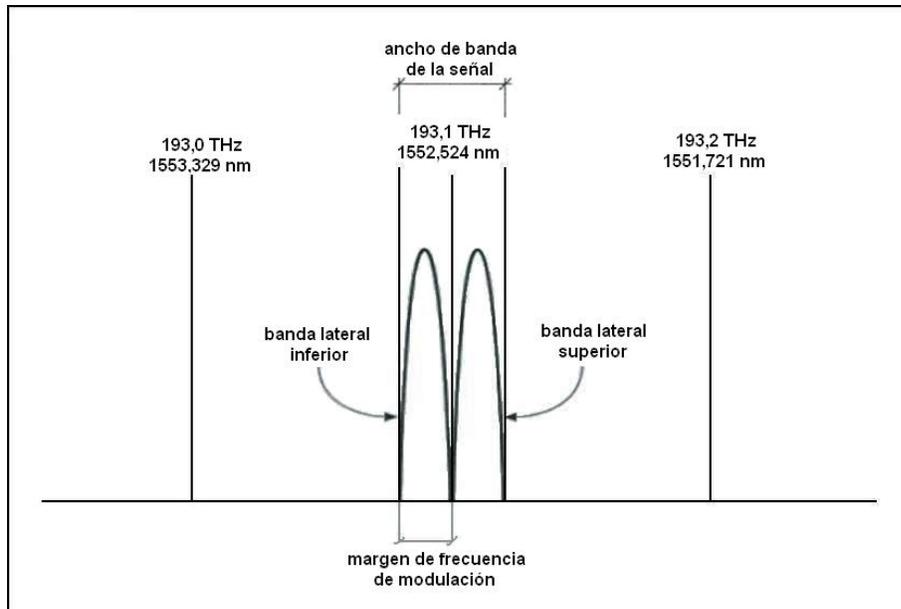


Figura 31. Ancho de banda ocupado por un canal en un sistema WDM.

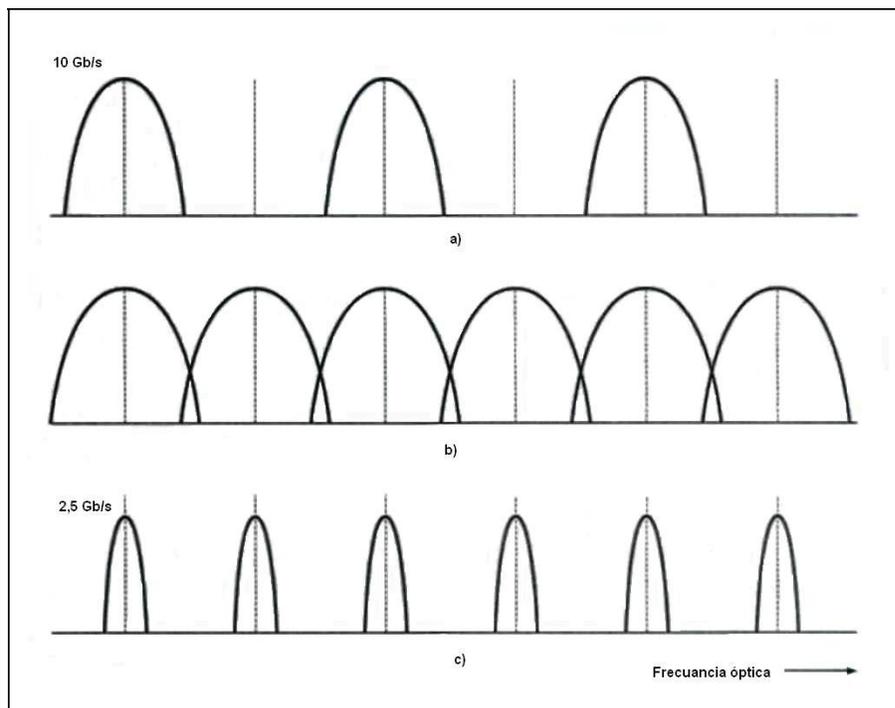


Figura 32. Comparación entre distintos canales WDM para velocidades de transmisión de 2,5Gb/s y 10Gb/s

La tabla 6 muestra la grilla para los láser definida por el borrador del estándar G.692 de la ITU para sistemas WDM punto a punto basados en un espaciado de 100GHz por longitud de onda con una longitud de onda central de 1552,52nm.

Tabla 6. ITU Grid [35]

Frecuencia (THz)	Longitud de onda (nm)	Frecuencia (THz)	Longitud de onda (nm)	Frecuencia (THz)	Longitud de onda (nm)
196.1	1528.77	164.6	1540.56	193.1	1552.52
196.0	1529.55	194.5	1541.35	193.0	1553.33
195.9	1530.33	194.4	1542.14	192.9	1554.13
195.8	1531.12	194.3	1542.94	192.8	1554.94
195.7	1531.9	194.2	1543.73	192.7	1555.75
195.6	1532.68	194.1	1544.53	192.6	1556.56
195.5	1533.47	194.0	1545.32	192.5	1557.36
195.4	1534.25	193.9	1546.12	192.4	1558.17
195.3	1535.04	193.8	1546.92	192.3	1558.98
195.2	1535.82	193.7	1547.72	192.2	1559.79
195.1	1536.61	193.6	1548.51	192.1	1560.61
195.0	1537.40	193.5	1549.32	192.0	1561.42
194.9	1538.19	193.4	1550.12	191.9	1562.23
194.8	1538.98	193.3	1550.92	191.8	1563.05
194.7	1539.77	193.2	1551.72	191.7	1563.86

Criterio 16: Utilizar compensación de la dispersión con el fin de combatirla en el enlace total.

Como se explicó en el capítulo 3, la compensación de la dispersión se logra básicamente de dos maneras mediante la utilización de pequeños tramos de fibra DCF o con redes de difracción de Bragg. En el primer caso las fibras DCF presentan valores negativos de dispersión con el objetivo de compensarse con los valores positivos de las fibras convencionales. Con esto se logra que la dispersión total del sistema sea nula, pero no en puntos particulares. En ellos presenta valores de dispersión diferentes de cero, con lo cual se logra que aparezcan desajustes de fase entre cada una de las longitudes de onda presentes, evitando así la aparición de efectos de mezcla de ondas. En el segundo caso, la compensación se hace de una forma dinámica, para ajustar la dispersión en cada tramo a los valores que sean necesarios para mantenerla nula en el enlace total.

La elección de una u otra técnica de compensación depende del contexto en el que se vaya a implementar el enlace. Para velocidades inferiores a 40 Gb/s se puede utilizar compensación de la dispersión mediante fibras DCF. Pero si las velocidades son próximas a los 40 Gb/s no se recomienda esta técnica ya que como se explicó anteriormente, se van a presentar pequeñas variaciones de dispersión las cuales a estas velocidades pueden afectar el desempeño del sistema, por tal razón se debe utilizar las redes de difracción de Bragg. Por otro lado si las velocidades se elevan por encima de los 40 Gb/s, las redes de difracción de Bragg presentan problemas ya que las dispersiones influyentes son las superiores al tercer orden, por tal razón se acude de nuevo a las fibras DCF, pero teniendo en cuenta que va a haber una limitante tanto en la distancia de transmisión como en el número de canales.

Otra técnica de compensación de dispersión es la Inversión espectral. Esta técnica conocida también como OPC (optical phase conjugation) consiste en situar un elemento conjugador óptico en la mitad del enlace de fibra, para que la señal del extremo final del sistema sea idéntica a la señal transmitida. Los amplificadores ópticos de rayo láser de semiconductor (SLAs) pueden ser utilizados para conseguir la conjugación de fase, y tales sistemas han sido demostrados en laboratorio; sin embargo, la inversión es difícil de conseguir en una red.

La tabla 7 presenta un resumen de los márgenes requeridos para un correcto dimensionamiento.

Tabla 7. Márgenes requeridos [11]

Problema	Margen de pérdidas
Dispersión de la fibra	1.0 dB
Margen SPM	0.5 dB
Margen XPM	0.5 dB
Compensación DCU	6.0 dB
FWM	0.5 dB
SRS/SBS	0.5 dB
PDL	0.3 dB
PMD	0.5 dB
Tilt ⁴ de ganancia del amplificador (debido a una ganancia espectral no plana)	3.0 dB
Tilt de sensibilidad del receptor	0.5 dB
Chirp del transmisor	0.5 dB
AWG cross-talk	0.2 dB
Conectores de la fibra	0.5 dB

CONSIDERACIONES COMPLEMENTARIAS

- **Considerar 0.5dB como margen de diseño para contrarrestar la pérdida de potencia debida al chirp.**

Se conoce como *chirp* a la variación de la frecuencia de la señal óptica transmitida con respecto al tiempo. Cuando los pulsos son generados en el transmisor, la modulación de intensidad (IM: Intensity Modulation) causa modulación de fase debido al cambio inducido en el índice de refracción. Dicho cambio se debe esencialmente al ancho espectral del láser. Como consecuencia del chirp el espectro óptico es ensanchado.

Teóricamente, es difícil calcular la pérdida de potencia inducida por el *chirp*, pero se puede aproximar a 0.5dB como margen para el diseño del sistema [11].

- **Emplear filtros y switches que cumplan con características de crosstalk mejorado.**

El *crosstalk* también proviene de filtros no ideales o de *switches* imperfectos donde parte de la energía de canales adyacentes está también presente en el detector y es un factor influyente en el espaciado entre canales. Por otro lado, en algunos casos el *crosstalk* se acumula a medida que va atravesando los nodos, por tal razón puede ser un limitante para el número de nodos posibles en un trayecto. El *crosstalk* también es llamado *crosstalk* inter-banda ya que su energía proviene de fuentes a diferentes longitudes de onda. Esto afecta más a una red que a un sistema punto a punto. Una característica clave del *crosstalk* inter-banda es que no puede ser removido una vez presente y acumulado en un número de nodos, razón por la cual la industria se ha visto obligada a construir filtros y *switches* con características de *crosstalk* mejorado.

4.2. PROCEDIMIENTOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE REDES WDM

Ya que el estudio realizado en este trabajo de grado se enfoca en el nivel físico del modelo OSI, es posible afrontar el dimensionamiento de redes WDM considerando cada enlace individualmente (conexión punto a punto). Para ello se proponen una serie de procedimientos los cuales permiten realizar un diseño preliminar para posteriormente ser analizado mediante simulación.

⁴ Tilt: Inclinación.

1. DEFINIR DATOS INICIALES: Especificar la distancia de transmisión del enlace, OSNR requerida, dispersión máxima permitida, tasa de bit (velocidad del enlace), número de canales y características del peor canal⁵.
2. DETERMINAR SI EL SISTEMA ESTÁ LIMITADO POR PÉRDIDAS: Calcular las pérdidas de cada tramo y de ser necesario agregar etapas de amplificación. (criterios 1, 2, 7 y 14).
3. CALCULAR LA OSNR TOTAL DEL SISTEMA: Calcular el número de tramos y la figura de ruido (NF) de cada tramo; a partir de esto, calcular la OSNR total para el peor canal.
4. VERIFICAR QUE EL SISTEMA NO ESTÉ LIMITADO POR PÉRDIDAS. (criterios 1, 2, 7 y 14).
5. DETERMINAR SI EL SISTEMA ESTÁ LIMITADO POR LA OSNR: De ser necesario emplear regeneración. (criterios 5, 6 y 14).
6. ASEGURAR UNA ADECUADA OSNR: Optimizar la ubicación de los amplificadores para asegurar la calidad de la OSNR. (criterio 5).
7. DETERMINAR SI EL SISTEMA ESTÁ LIMITADO POR DISPERSIÓN: Emplear unidades de compensación de dispersión y optimizar su ubicación para contrarrestar los problemas de dispersión. (criterios 8 y 16)
8. CALCULAR SI EL SISTEMA ESTÁ LIMITADO POR PMD: Utilizar técnicas de compensación de la PMD. (criterio 9)
9. DETERMINAR SI EL SISTEMA ESTÁ LIMITADO POR NO LINEALIDADES: Utilizar algunas de las siguientes técnicas (criterios 7, 10, 11, 12, 13 y 15):
 - Controlarlos mediante gestión de la dispersión.
 - Limitar la potencia a un mínimo permisible sin deteriorar el rendimiento del sistema.
 - Utilizar fibras de área efectiva grande.
 - Utilizar conjuntamente amplificadores RAMAN y EDFAs, y diferentes arreglos de fibras basados en implementación SSMF/DCF (Fibras Monomodo Estándar/Fibras Compensadoras de dispersión) y SLA/IDF (Fibras de Área Súper Grande/Fibras de Dispersión Inversa).
10. DETERMINAR SI EL SISTEMA ESTÁ LIMITADO O DEPENDE DEL *TILT*: Optimizar la ubicación de los canales para evitar interferencias. (criterio 15)

La figura 33 muestra el diagrama de flujo de los procedimientos propuestos para el dimensionamiento de redes WDM.

⁵ El peor canal es el canal que presenta las condiciones más limitadas durante la transmisión y sirve como caso de estudio ya que satisfaciendo sus requerimientos se asegura el buen funcionamiento de los demás canales.

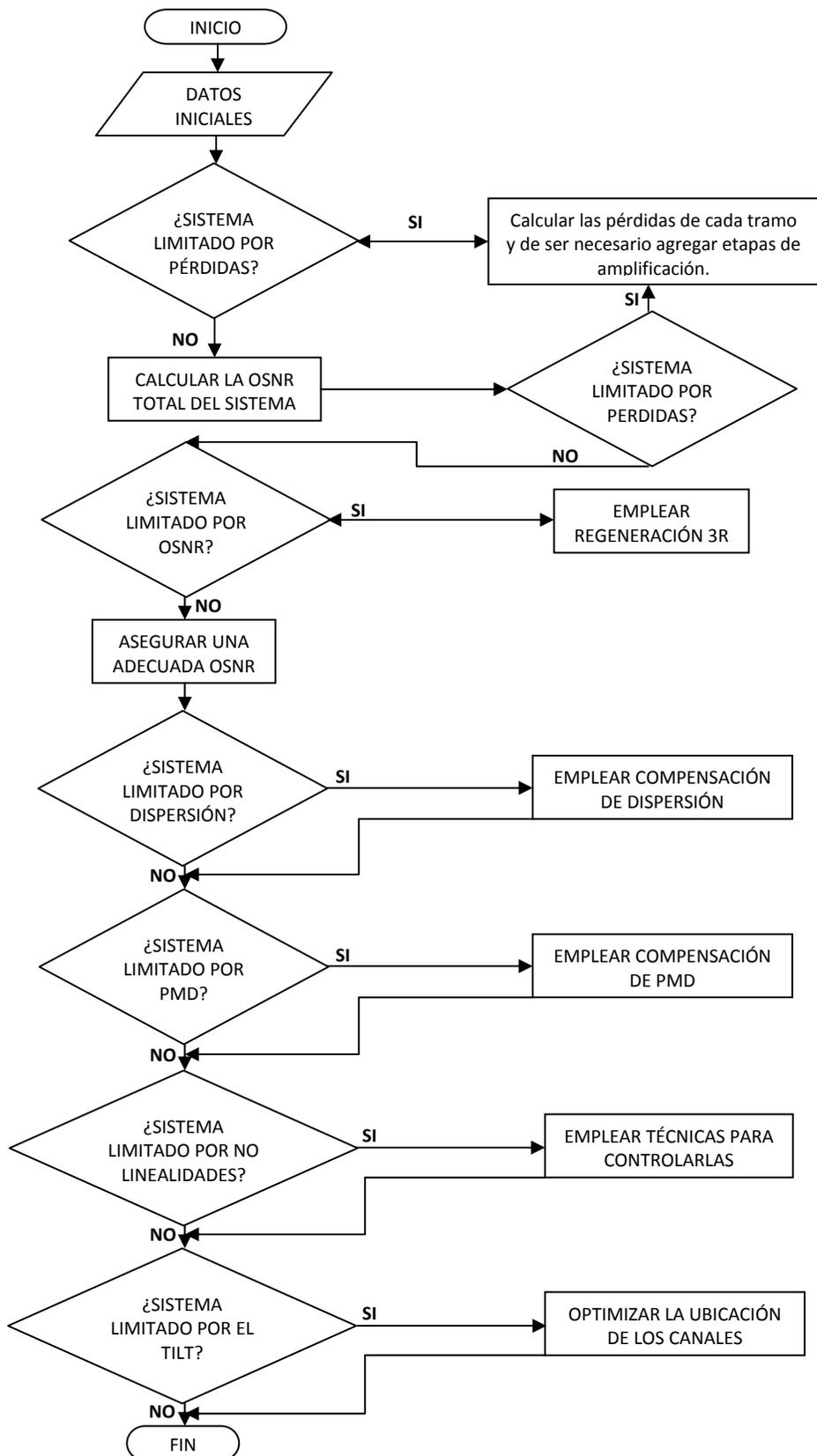


Figura 33. Diagrama de Flujo de un caso de diseño WDM general [3]

4.3. EJEMPLO DE DISEÑO

Se desea construir un enlace de 200 Km (L_T) para transportar tráfico OC-48 entre 10 usuarios. Diseñar el enlace con los siguientes parámetros:

Fibra SMF-28 con una atenuación de 0.25 dB/Km y una dispersión característica de 18 ps/nm/Km.

Sensibilidad del receptor: -18 dBm para una BER de 10^{-12} .

Sobrecarga en el receptor: -10 dBm para una BER de 10^{-12} .

Potencia de transmisión: 7 dBm.

Tolerancia de dispersión: 1500 ps/nm.

Penalización de dispersión: 1.5 dB para 1500 ps/nm.

Tolerancia de OSNR: 20 dB para resolución de ancho de banda de 0.1 nm.

EDFA

Rango de potencia de entrada: 3 a -25 dBm.

Ganancia: 20 dB.

Potencia máxima de salida: 17 dBm.

Figura de ruido: 5 dB.

DCU (Unidad compensadora de dispersión)

Longitud: 10 km

Pérdidas Totales: 6 dB.

Compensación de dispersión: -1100 ps/nm.

SOLUCIÓN:

Paso 1: Hallemos las pérdidas totales:

$L_T = 200$ Km

pérdidas totales = 200 Km*0.25 dB/Km = 50 dB

P_{rx} : Potencia en recepción.

P_{tx} : Potencia en transmisión.

$$P_{rx} = P_{tx} - \text{pérdidas totales} = 7\text{dB} - 50\text{dB} = -43\text{dB}$$

Debido a que la sensibilidad del receptor es de -18 dB y la potencia que llegaría a este sería de -43 dB, el sistema está limitado por pérdidas, por tal razón es necesario utilizar amplificadores para alcanzar la distancia requerida.

Paso 2: Analicemos si el sistema está limitado por dispersión:

Dispersión total = 200 Km*18 ps*nm/Km = 3600 ps*nm

Debido a que la tolerancia de la dispersión es 1500 ps*nm y la dispersión total es 3600 ps*nm el sistema está limitado por dispersión y se debe utilizar compensación de dispersión (DCU). La máxima distancia para ubicar las DCUs es de 83.33 Km (1500 ps*nm/18 ps*nm/km). Las DCUs presentan un valor de dispersión de -1100 ps. Si ubicamos 3 DCUs a lo largo del enlace obtendríamos una dispersión total de 300 ps*nm (3600 ps*nm – 3*1100 ps*nm), la cual es un valor dentro de los límites aceptables. De lo anterior también se deduce que es necesario utilizar 3 amplificadores con el fin de compensar las pérdidas introducidas por las DCUs. Debido a que las DCUs presentan 6 dB de pérdidas es mejor hacer precompensación de la dispersión (ubicar las DCUs antes de los amplificadores).

La ubicación de los amplificadores y de las DCUs se presenta en la figura 34:

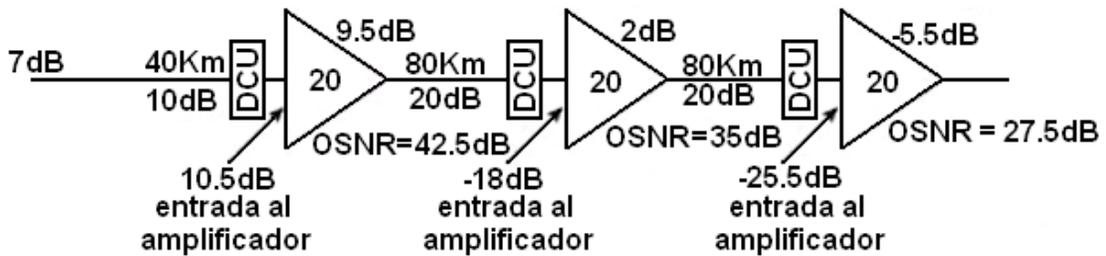


Figura 34. Ubicación amplificadores y DCUs en el sistema diseñado

Análisis del problema:

P_{tx} : Potencia de transmisión

$P_{tx} = 7 \text{ dB}$

Etapa 1:

$$\text{pérdidas del enlace} = 40 \text{ km} * 0.2 \frac{\text{dB}}{\text{km}} = 10 \text{ dB}$$

$$\text{pérdidas DCU} = 6 \text{ dB}$$

$$\text{penalización de dispersión} = 1.5 \text{ dB}$$

$$\text{pérdidas etapa 1} = 17.5 \text{ dB}$$

P_{in1} : potencia al final de la etapa 1.

$$P_{in1} = P_{tx} - \text{pérdidas etapa 1} = 7 \text{ dB} - 17.5 \text{ dB} = -10.5 \text{ dB}$$

P_{out1} : potencia a la salida del amplificador 1.

$$P_{out1} = P_{in1} + \text{ganancia amplificador} = -10.5 \text{ dB} + 20 \text{ dB} = 9.5 \text{ dB}$$

Calculo de la OSNR

$$OSNR_i = \frac{1}{\frac{1}{OSNR_{i-1}} + \frac{NF * h * v * \Delta f}{P_{in i}}}$$

Para la etapa 1, $OSNR_0 = 0$

$$OSNR_1 = \frac{P_{in1}}{NF * h * v * \Delta f}$$

$$NF_{dB} = 5dB$$

$$h = 6.6260 \times 10^{-34}$$

$$v = 1.93 \times 10^{14}$$

$$\Delta f = 12.5GHz$$

$$OSNR_1 dB = P_{in1} dB - NF dB - 10 \log(hv\Delta f)$$

$$OSNR_1 dB = -10.5dB - 5dB + 58dB = 42.5dB \approx 42dB$$

$$OSNR_1 dB = 42dB$$

Etapa 2:

$$p\u00e9rdidas del enlace = 80Km * 0.2 \frac{dB}{Km} = 20dB$$

$$p\u00e9rdidas DCU = 6dB$$

$$penalizaci\u00f3n de dispersi\u00f3n = 1.5dB$$

$$p\u00e9rdidas etapa 2 = 27.5dB$$

P_{in2} : potencia al final de la etapa 2

$$P_{in2} = P_{out1} - p\u00e9rdidas etapa 2 = 9.5dB - 27.5dB = -18dB$$

P_{out2} : potencia a la salida del amplificador 2.

$$P_{out2} = P_{in2} + ganancia amplificador = -18dB + 20dB = 2dB$$

Calculo de la OSNR

$$OSNR_2 = \frac{1}{\frac{1}{OSNR_1} + \frac{NF * h * v * \Delta f}{P_{in2}}}$$

$$OSNR_1 = 10^{4.2} = 15.8489 * 10^3$$

$$NF = 10^{\frac{NF_{dB}}{10}} = 3.1623$$

$$h * v * \Delta f = 1.60266 * 10^{-6}$$

$$P_{in2} = 10^{-1.8} = 15.8489 * 10^{-3}$$

$$OSNR_2 = \frac{1}{\frac{1}{15.8489 * 10^3} + \frac{(3.1623) * (1.60266 * 10^{-6})}{15.8489 * 10^{-3}}}$$

$$OSNR_2 = 2.6118 * 10^3$$

$$OSNR_{2\text{ dB}} = 10 * \log(2.6118 * 10^3) = 34.169 \approx 34\text{dB}$$

$$OSNR_{2\text{ dB}} = 34\text{ dB}$$

Etapla 3:

$$p\acute{e}rdidas\ del\ enlace = 80\text{Km} * 0.2 \frac{\text{dB}}{\text{Km}} = 20\text{dB}$$

$$p\acute{e}rdidas\ DCU = 6\text{dB}$$

$$penalizaci\acute{o}n\ de\ dispersi\acute{o}n = 1.5\text{dB}$$

$$p\acute{e}rdidas\ etapa\ 3 = 27.5\text{dB}$$

$P_{in\ 3}$: potencia al final de la etapa 3

$$P_{in\ 3} = P_{out\ 2} - p\acute{e}rdidas\ etapa\ 3 = 2\text{dB} - 27.5\text{dB} = -25.5\text{dB}$$

$P_{out\ 3}$: potencia a la salida del amplificador 3.

$$P_{out\ 3} = P_{in\ 3} + ganancia\ amplificador = -25.5\text{dB} + 20\text{dB} = -5.5\text{dB}$$

$P_{out\ 3}$ es la potencia que le llega el receptor y es mayor que su sensibilidad, por tal raz\o{n} en este momento el sistema ya no se encuentra limitado por p\acute{e}rdidas.

Calculo de la OSNR

$$OSNR_3 = \frac{1}{\frac{1}{OSNR_2} + \frac{NF * h * v * \Delta f}{P_{in\ 3}}}$$

$$OSNR_2 = 10^{3.4} = 2.5119 * 10^3$$

$$NF = 10^{\frac{NF_{dB}}{10}} = 3.1623$$

$$h * v * \Delta f = 1.60266 * 10^{-6}$$

$$P_{in\ 3} = 10^{-2.55} = 2.8184 * 10^{-3}$$

$$OSNR_3 = \frac{1}{\frac{1}{2.5119 * 10^3} + \frac{(3.1623) * (1.60266 * 10^{-6})}{2.8184 * 10^{-3}}}$$

$$OSNR_3 = 455.3069$$

$$OSNR_{3\text{ dB}} = 10 * \log(455.3069) = 26.5830 \approx 26\text{dB}$$

$$OSNR_{Total\text{ dB}} = 26\text{dB}$$

El sistema presenta una tolerancia de OSNR de 20 dB para resoluci\o{n} de ancho de banda de 0.1 nm, y la $OSNR_{Total}$ calculada es de 26 dB, por tal raz\o{n} el sistema no se encuentra limitado por la OSNR.

Para analizar si el sistema est\acute{a} limitado por PMD, no linealidades y/o el tilt, se deben considerar los m\acute{a}rgenes especificados en la tabla 7.

5. VALIDACIÓN DE LOS CRITERIOS PROPUESTOS MEDIANTE SIMULACIÓN

La simulación es considerada como un componente fundamental en el dimensionamiento de redes al igual que en el diseño y evaluación de nuevos dispositivos y protocolos ya que permite visualizar su comportamiento ante ciertas características particulares facilitando la detección de posibles errores o fallas para que estos puedan ser corregidos a tiempo y de esta manera poder predecir la respuesta de la red bajo condiciones determinadas.

Es por ello que la validación de los criterios y procedimientos propuestos en el capítulo anterior, se realiza mediante la simulación de la transmisión en un enlace punto a punto WDM cuya configuración se variará de acuerdo al criterio a evaluar.

Por tratarse de redes WDM, todos los criterios se simularon para sistemas en la tercera ventana (1550 nm). Además, estos se validan con base en una BER mínima de 10^{-9} o un factor Q mínimo de 16 dB⁶. Por lo tanto es posible generalizar los criterios planteados ya que se cumplirían para cualquier sistema (independientemente de su configuración) siempre y cuando se garanticen las condiciones mínimas de funcionamiento.

5.1. ELECCIÓN HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

En el mercado existen diversas herramientas diseñadas para realizar la simulación y diseño tanto de redes ópticas como de sus principales componentes, entre ellas se destacan las ofrecidas por OptiWave, Rsoft Desing Group, Lenge y VPISystems. En el anexo B se presenta una descripción de algunas de estas herramientas de simulación.

Una vez analizadas las principales características, utilidades y beneficios de estas herramientas, optamos por utilizar Optsim ya que brinda la posibilidad de analizar la respuesta de la fibra ante fenómenos lineales y no-lineales mediante la variación de sus principales parámetros, lo que permitirá la validación de los criterios propuestos.

5.2. RESULTADOS SIMULACIÓN DE LOS CRITERIOS

Criterio 1: La potencia de la señal debe estar dentro del rango dinámico del receptor.

Dado que entre los parámetros que se pueden fijar a los receptores, en la herramienta de simulación empleada, no se encuentra ninguno relacionado con el rango dinámico ni con el valor máximo de potencia permitido, no fue posible simular este criterio. Por lo tanto, su validación consiste en la presentación de las especificaciones relacionadas con el rango dinámico para receptores ópticos disponibles comercialmente y de esta manera comprobar que cada receptor tiene un rango de potencia dentro del cual su funcionamiento está garantizado por el fabricante.

Las tablas 8 y 9 presentan los valores de sensibilidad y potencia máxima permitida para diferentes receptores ópticos para las velocidades de 2.5 y 10Gbs [36] – [46].

Tabla 8. Rango dinámico receptores ópticos a 2.5Gb/s

Referencia	Tipo	Longitud de Onda (nm)	BER Referencia	Sensibilidad	Potencia máxima*	Rango Dinámico
P172-PIN	PIN	1250 -1600	10^{-10}	-24 dBm	1 dBm	25dB
P172-APD	APD	1250 -1600	10^{-10}	-33 dBm	-3 dBm	30dB
PGR203-14	APD	1250 - 1620	10^{-10}	-34 dBm	-3 dBm	31dB

⁶ Condiciones mínimas de funcionamiento para sistemas WDM

Tabla 9. Rango dinámico receptores ópticos a 10Gb/s

Referencia	Tipo	Longitud de Onda (nm)	BER Referencia	Sensibilidad	Potencia máxima*	Rango Dinámico
R195A	APD	1280 - 1610	10^{-12}	-26 dBm	-2 dBm	24dB
R197A	APD	1280 - 1610	10^{-12}	-27 dBm	-2 dBm	25dB
FRM5N143DS	APD	1250 -1600	10^{-10}	-25 dBm	-7 dBm	18dB
ERM 568XCX	PIN	1450 - 1600	10^{-12}	-17 dBm	0 dBm	17dB
PP - 10G	PIN	1280 - 1610	10^{-10}	-18 dBm	0 dBm	18dB
ERA1401GT	APD	1270 - 1620	-	-28 dBm	0 dBm	28dB
ERA1402GT	APD	1270 - 1620	-	-27.5 dBm	0 dBm	27.5dB
ERP1402GT	PIN	-	-	-20 dBm	0 dBm	20dB

* Este valor de potencia corresponde a la especificación de potencia de sobrecarga (valor proporcionado por el fabricante).

De los datos proporcionados por los fabricantes, podemos observar que los receptores tipo APD presentan mayor sensibilidad y rango dinámico que los receptores tipo PIN. Esto se debe a que en los receptores PIN, en el mejor de los casos, sólo se genera una pareja electrón-hueco por fotón incidente, mientras que en los receptores APD gracias al proceso de multiplicación de avalancha el número de parejas electrón-hueco generadas es mayor, lo cual significa que se requiere menor potencia para realizar la fotodetección, y por lo tanto estos receptores tienen mayor sensibilidad [21].

Sin embargo, al realizar el diseño de un sistema WDM se debe tener en cuenta que la recepción de las señales ópticas con fotodetectores APD es más costosa que con los fotodiodos PIN, ya que los APDs requieren de altas intensidades y son más sensibles a la temperatura.

Criterio 2: Se deben emplear receptores que tengan una alta sensibilidad, gran ancho de banda o tiempo de respuesta rápido⁷ y bajo ruido [3].

Los parámetros de sensibilidad, ancho de banda y ruido los especifica el fabricante y se pueden encontrar en el data sheet del receptor. La tabla 10 presenta estos parámetros para diferentes receptores ópticos [36] – [46].

Tabla 10. Sensibilidad y ancho de banda para diferentes receptores ópticos

Referencia	Fabricante	Sensibilidad	Ancho de Banda
P172-Tipo PIN	CyOptics	-24 dBm	2 GHz
P172-Tipo APD	CyOptics	-33 dBm	2 GHz
PGR 203 14	Ericsson	-34 dBm	1,7 GHz
R195A	CyOptics	-26 dBm	8 GHz
R197A	CyOptics	-27 dBm	8 GHz
FRM5N143DS	Fujitsu	-25 dBm	8 GHz
ERM 568XCX	JDS	-17 dBm	8 GHz
PP - 10G	Nortel	-18 dBm	11 GHz
ERA1401GT	Eudyna	-28 dBm	8 GHz
ERP1401GT	Eudyna	-20.5 dBm	9 GHz

Con el fin de estudiar el efecto de la sensibilidad del receptor óptico en el rendimiento de un sistema, se simuló la transmisión de una señal NRZ reemplazando el enlace óptico por un dispositivo normalizador de potencia óptica (OptNorm 1) que permite variar la potencia óptica de entrada al receptor. La figura 35 muestra el esquema simulado.

⁷ El ancho de banda del receptor está determinado por la velocidad (tiempo de respuesta) con que el fotodetector responde a las variaciones en la potencia óptica incidente [20].

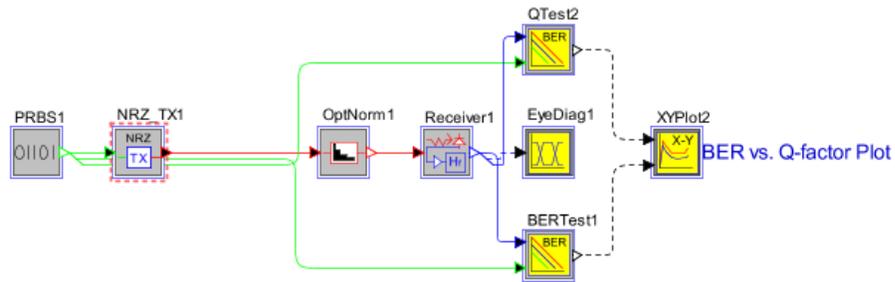


Figura 35. Esquema para estudio de los parámetros del receptor

Se simuló este sistema para dos valores de sensibilidad⁸ (-17 y -34dBm) analizando el efecto en el rendimiento de los sistemas al variar la potencia de entrada al receptor: P_r (4dB por encima y por debajo de la sensibilidad y para el valor de sensibilidad).

La figura 36 muestra los diagramas de ojo obtenidos para una sensibilidad de -17dBm y la tabla 11 presenta los valores de BER y Factor Q.

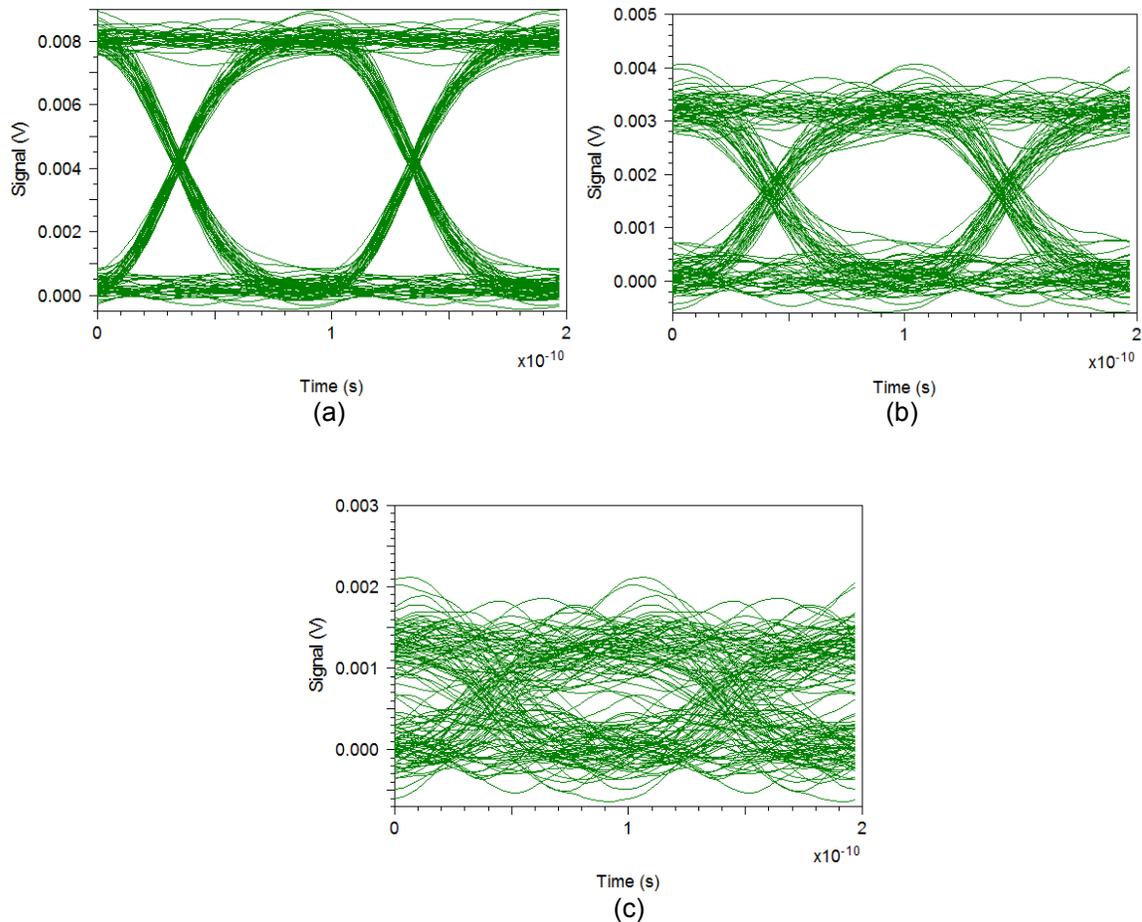


Figura 36. Diagramas de ojo sensibilidad -17dBm
 (a) $P_r = -13\text{dBm}$, (b) $P_r = -17\text{dBm}$, (c) $P_r = -21\text{dBm}$

⁸ Valores comerciales de sensibilidad para garantizar una BER de 10^{-9} .

Tabla 11. BER y Factor Q, sensibilidad -17dBm

Potencia en el receptor P_r (dBm)	BER	FACTOR Q (dB)
-13	$3,7749 \times 10^{-48}$	23,247
-17	$1,2818 \times 10^{-9}$	15,501
-21	$8,8601 \times 10^{-3}$	7,5001

La figura 37 muestra los diagramas de ojo obtenidos para una sensibilidad de -34dBm y la tabla 12 presenta los valores de BER y Factor Q.

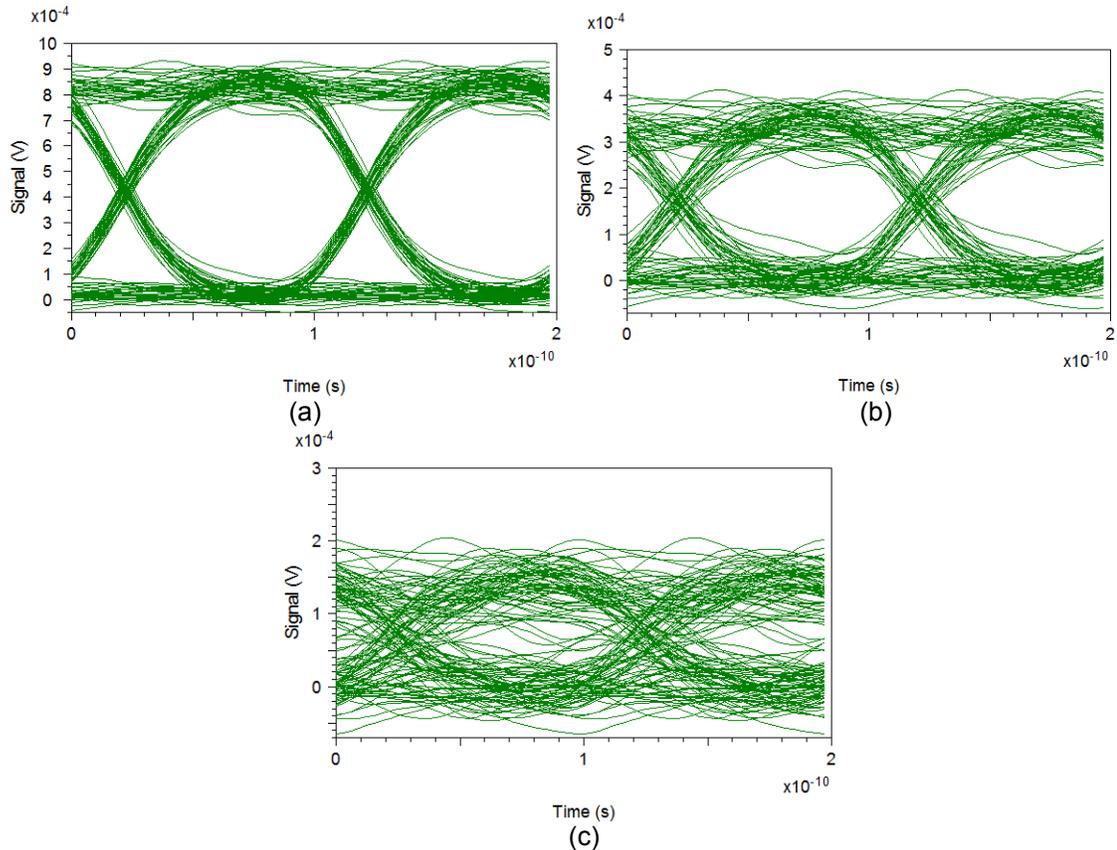


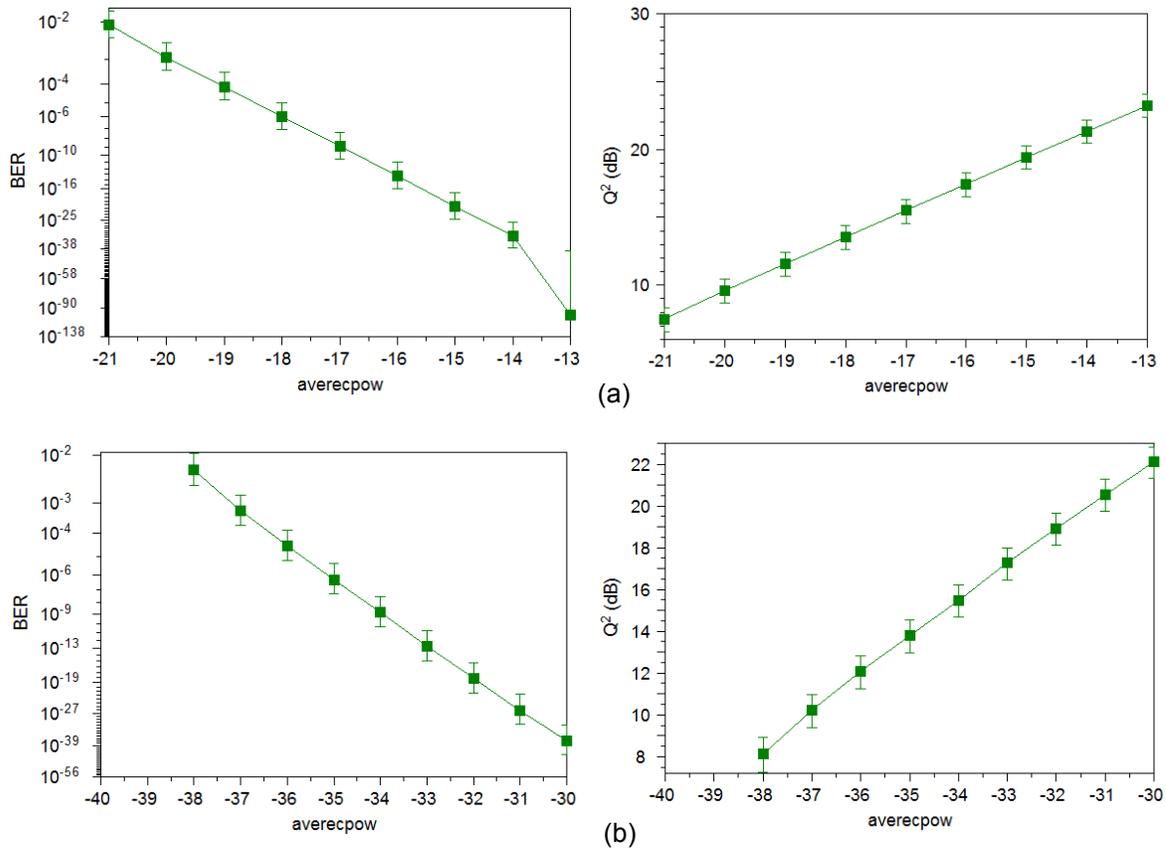
Figura 37. Diagramas de ojo sensibilidad -34dBm
(a) $P_r = -30$ dBm, (b) $P_r = -34$ dBm, (c) $P_r = -38$ dBm

Tabla 12. BER y Factor Q, sensibilidad -34dBm

Potencia en el receptor P_r (dBm)	BER	FACTOR Q (dB)
-30	$1,5214 \times 10^{-37}$	22,111
-34	$1,3216 \times 10^9$	15,494
-38	$5,4485 \times 10^{-3}$	8,1171

Como se observa en los resultados obtenidos, a mayor sensibilidad, el receptor puede detectar señales más atenuadas.

La figura 38 muestra las graficas de BER y Factor Q vs Potencia de entrada al receptor para las dos sensibilidades simuladas.



**Figura 38. BER y Factor Q vs Potencia de entrada al receptor
(a) Sensibilidad -17dBm, (b) Sensibilidad -34dBm**

En Optsim, el ruido generado en el receptor es una combinación de diferentes mecanismos de contribución de ruido los cuales pueden ser encendidos o apagados independientemente. Además, el receptor dispone de unos parámetros denominados coeficientes de ruido térmico, los cuales permiten modificar la cantidad de ruido térmico [47]. Dado que la principal contribución de ruido en los receptores es el ruido térmico, se modificaron los coeficientes de ruido del dispositivo con el fin de simular diferentes características de ruido en el receptor. Sensibilidad del receptor -17dBm para una BER de 10⁻⁹.

La figura 39 muestra los diagramas de ojo en recepción obtenidos para (a) receptor con bajo ruido y (b) receptor con mayor ruido para una potencia de entrada al receptor de -17dBm

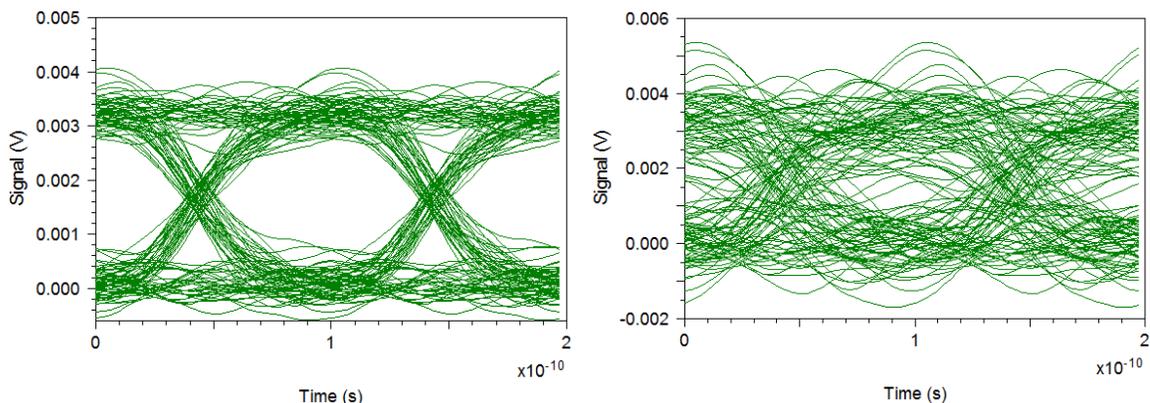


Figura 39. Diagramas de ojo Pr=-17dBm (a) Receptor con bajo Ruido, (b) Receptor con mayor ruido

La figura 40 muestra los diagramas de ojo en recepción obtenidos para receptor con bajo ruido (a) y receptor con mayor ruido (b) para una potencia de entrada al receptor de -13dBm.

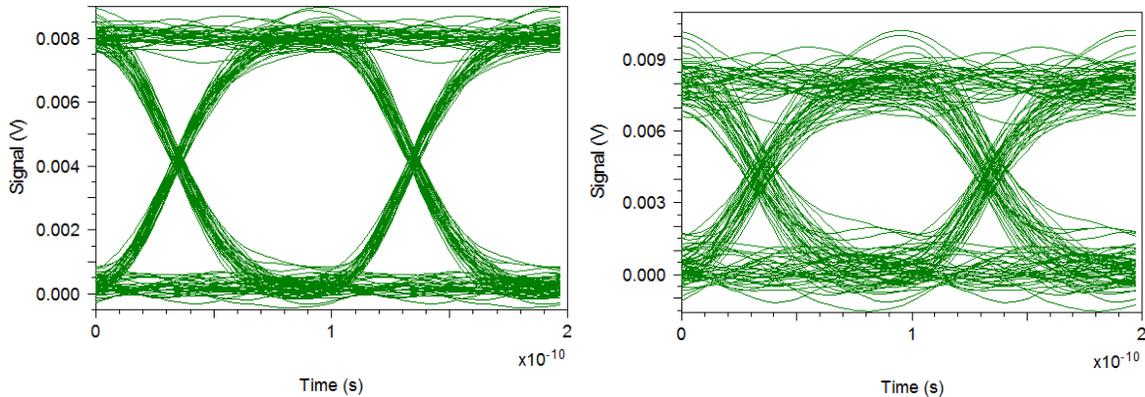


Figura 40. Diagramas de ojo $P_r=-13\text{dBm}$ (a) Receptor con bajo Ruido, (b) Receptor con mayor ruido

La tabla 13 presenta los valores de BER y Factor Q para cada caso.

Tabla 13. BER y Factor Q, receptor con diferente condición de ruido

Condición de Ruido	Potencia en el receptor P_r (dBm)	BER	FACTOR Q (dB)
Bajo	-13	3.7749×10^{-48}	23.247
	-17	1.2818×10^{-9}	15.01
Alto	-13	5.4193×10^{-9}	15.143
	-17	1.1779×10^{-2}	7.0985

De los resultados obtenidos se aprecia que al emplear receptores con bajo ruido se pueden detectar señales de menor potencia, mientras que al aumentar el ruido generado en el receptor la señal recibida se deteriora afectando la BER del sistema y se disminuye la sensibilidad del receptor.

En cuanto al ancho de banda del receptor, este parámetro hace referencia a que el receptor tenga una buena sensibilidad para un rango amplio de longitudes de onda. Este aspecto no fue posible simularlo debido a la restricción de ancho de banda de simulación de la herramienta para evitar tiempos excesivos de procesamiento y simulación.

Criterio 3: Los sistemas WDM deben utilizar fibras monomodo.

No fue posible simular sistemas con fibras multimodo porque la herramienta empleada solo considera fibras monomodo. Sin embargo, la validez de este criterio se garantiza con base a estudios realizados anteriormente. Además, se sabe que en redes públicas (a partir de redes WAN) la fibra monomodo es prácticamente la única fibra utilizada gracias a su capacidad de transportar una gran cantidad de información a través de una gran distancia.

OptSim cuenta con una lista de fibras predefinidas que incluye los tipos de fibra convencionales (SSM, DS Normal, DS Anomala y DCF) y las fibras comerciales más comunes (Corning LEAF, Corning SMF28, Corning SMF28e, Lucent TrueWave, Lucent AllWave, Alcatel SMF, Alcatel Teralight, Furukawa SMF332, Pirelli Widelight, Pirelli Freelight, Pirelli Deeplight, Sumitomo Z fiber, Sumitomo Z-PLUS fiber), (ver anexo C.2) [48].

Criterio 4: La BER de una red WDM debe ser de por lo menos 10^{-12}

La figura 41 presenta el esquema del sistema utilizado para analizar este criterio. El sistema es WDM punto a punto monocanal, con longitud de onda central de 1550 nm. El enlace lo conforman tres tramos de fibra de 50 km cada uno, con pérdidas de 0.2 dB/km, dispersión de -2 ps/nm/km, dos amplificadores ópticos de línea con potencia de salida de 6 dBm, figura de ruido de 5 dB, ganancia de 35 dB. La velocidad de transmisión es de 10 Gbps. Los transmisores son laser CW con modulación NRZ y potencia de 5 dBm. Los receptores son tipo PIN con una sensibilidad de -28 dBm.

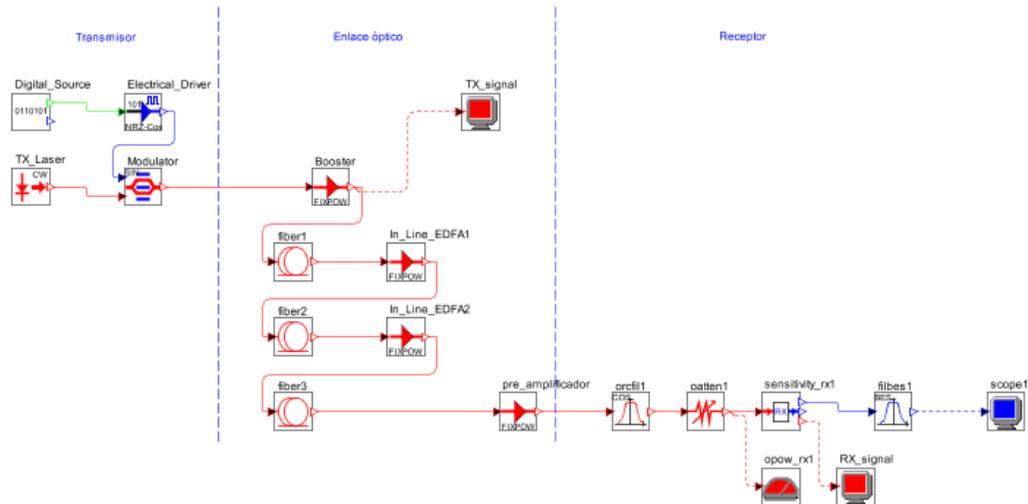


Figura 41. Esquema para simulación del análisis de BER.

Como se puede ver en la figura 41, en el sistema se colocó un dispositivo atenuador óptico (oatten1) con el fin de variar la atenuación para analizar el comportamiento del receptor a los valores de BER de 10^{-9} y 10^{-12} . La figura 42 (a) y (b) muestra los diagramas de ojo para una BER de 10^{-9} y 10^{-12} respectivamente. Como se puede apreciar en la tabla 14, el comportamiento del sistema para una BER de 10^{-12} es mejor que para una BER de 10^{-9} , presentando mejores valores de factor Q y abertura promedio del ojo.

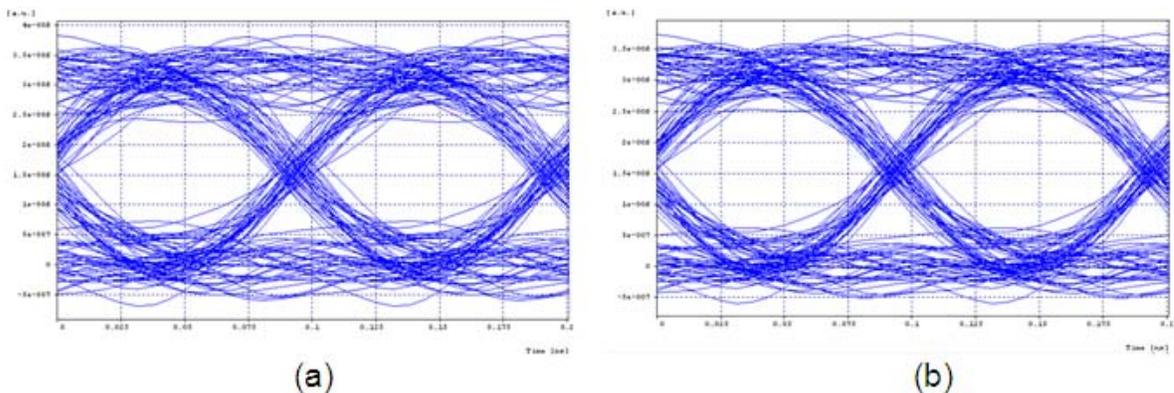


Figura 42. Diagramas de ojo para BER de: (a) 10^{-9} y (b) 10^{-12} .

Tabla 14. Parámetros de rendimiento para BER de 10^{-9} y 10^{-12} .

	BER de 10^{-9}	BER de 10^{-12}
Factor Q (dB)	15.6876637	16.957641
Abertura promedio	3.07185×10^{-6}	3.073112×10^{-6}

Actualmente se considera que una BER de 10^{-9} no es suficiente; ya que por ejemplo, para una tasa de bit de 10Gbps, una BER de 10^{-10} da lugar a un promedio de un bit errado cada segundo, lo cual no es aceptable [49].

Criterio 5: El número de amplificadores está limitado por la OSNR del sistema.

La simulación de este criterio se hizo sobre un sistema monocanal a velocidad de 10 Gb/s, longitud de onda de 1550 nm, potencia de transmisión de 1 mW, formato de modulación NRZ. El enlace de fibra se planteó para dos casos de estudio: 7 tramos de 60 km cada uno y 14 tramos a 30 km cada uno (420 km de longitud total). Cada tramo esta precedido de un amplificador óptico EDFA, cuya longitud de onda de bombeo es de 980 nm. La figura 43 muestra el esquema del sistema descrito.

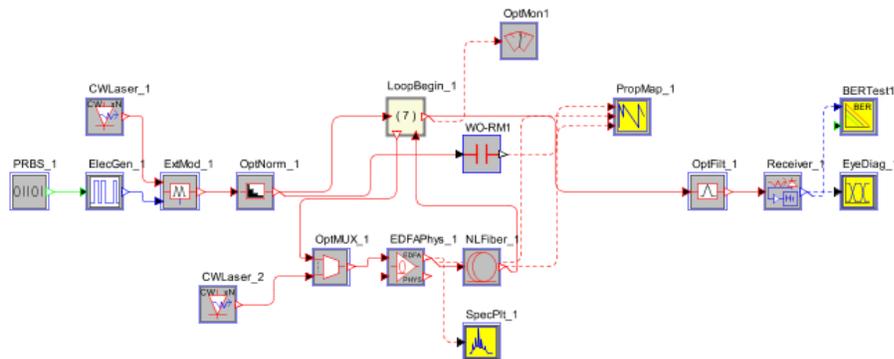


Figura 43. Esquema para el análisis de la OSNR.

Primero se hizo el análisis con 7 amplificadores para una distancia de 420 Km y luego para 14 amplificadores conservando la distancia total y la misma configuración del sistema inicial, con el objetivo de ver la influencia de los amplificadores sobre la OSNR. La figura 44 (a) y (b) muestra los mapas de potencia para el sistema con 7 y 14 amplificadores respectivamente. Cuando la cadena de amplificadores es grande la ganancia tiende a saturarse como se puede ver en la figura 44 (b) y esto se debe al aporte de ruido de cada amplificador y a la acumulación del mismo a través de cada etapa de amplificación.

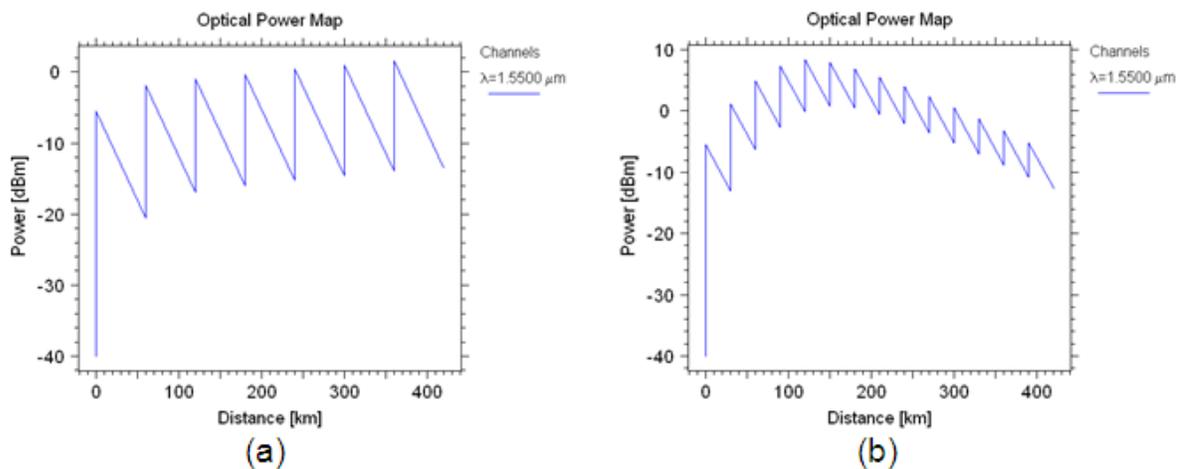


Figura 44. Mapa de potencia para: (a) 7 amplificadores y (b) 14 amplificadores.

Los resultados obtenidos comprueban que el ruido total de los amplificadores deteriora la OSNR del sistema ya que la OSNR medida para los 7 amplificadores dio de 11.353 dB mientras que para los 14 amplificadores dio de 10.669 dB.

Criterio 6: El factor Q debe ser menor que la OSNR por lo menos en 2dB.

Este criterio se validó sobre un sistema WDM punto a punto de 8 canales separados 50 GHz y longitud de onda central de 1551.12 nm, cuyo enlace óptico consta de tres tramos de fibra de 52km (enlace total de 156 km) con pérdidas de 0.2 dB/km, dispersión de 6.42 ps/nm/km y tres amplificadores ópticos de línea con una potencia de salida de 6 dBm, figura de ruido de 5 dB, ganancia de 35 dB. La velocidad de transmisión es de 10 Gb/s. El sistema se ajusto para una BER de 10^{-9} en el peor canal, con el fin de trabajar al límite del rendimiento. Los transmisores son laser CW con modulación NRZ y potencia de 0 dBm. Los receptores son tipo PIN con una sensibilidad de -27 dBm. La figura 45 presenta un esquema del sistema anteriormente descrito.

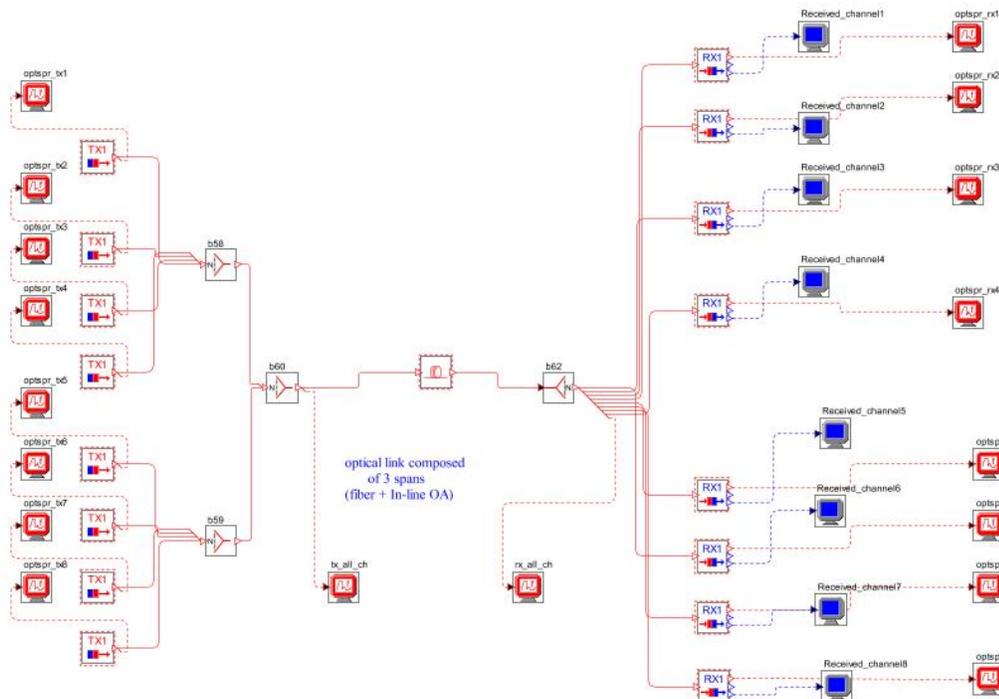


Figura 45. Sistema WDM punto a punto de 8 canales.

La tabla 15 muestra la comparación entre la OSNR y el factor Q, además de las frecuencias de los canales y sus respectivas potencias en recepción. Como se puede apreciar la OSNR es mayor que el factor Q por más de 2 dB.

Tabla 15. Relación entre el factor Q y la OSNR.

Canal	Frecuencia [THz]	Potencia [dBm]	OSNR [dB]	Factor Q (dB)
1	193.1	-3.32947	24.9353	16.0154
2	193.15	-3.34518	22.6964	16.5976
3	193.2	-3.31578	22.4402	15.9233
4	193.25	-3.24043	23.3214	16.0353
5	193.3	-3.11494	24.4128	15.5431
6	193.351	-3.37662	24.0913	15.6056
7	193.4	-3.3752	23.9058	16.7869
8	193.45	-3.20837	25.1639	16.8977

El peor canal corresponde a aquel cuya BER es de 10^{-9} . La tabla 16 presenta los valores de BER obtenidos para cada uno de los canales; de aquí se deduce que el peor canal es el 6.

La figura 46 muestra el diagrama del ojo para el peor canal.

Tabla 16. Datos de BER para todos los canales.

Canal	Frecuencia[THz]	BER
1	193.1	1.49054×10^{-10}
2	193.15	7.64704×10^{-12}
3	193.2	3.42278×10^{-10}
4	193.25	3.16458×10^{-10}
5	193.3	1.32816×10^{-9}
6	193.351	1.36002×10^{-9}
7	193.4	4.68338×10^{-12}
8	193.45	2.13188×10^{-12}

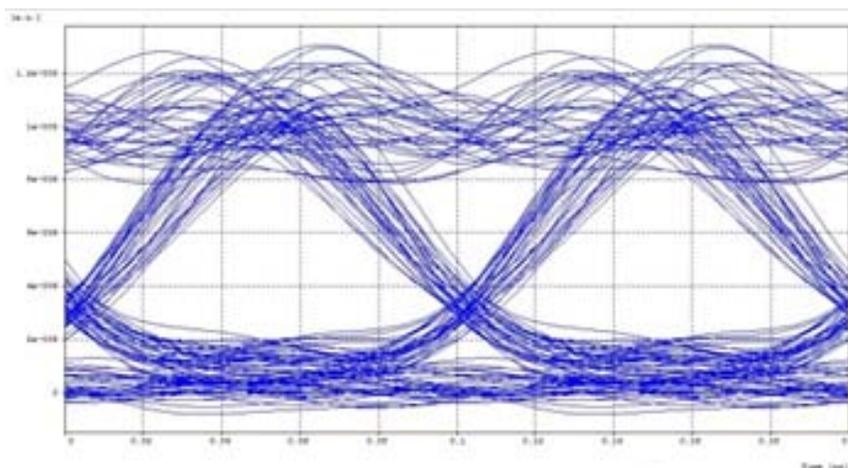


Figura 46. Diagrama del ojo para el peor canal.

Criterio 7: El diagrama del ojo de la señal en recepción debe corresponder a un diagrama abierto.

Este criterio se validó sobre un sistema WDM punto a punto de 1 canal a longitud de onda de 1550 nm. El enlace óptico lo conforman tres tramos de fibra estándar SMF-28 de 50 km (enlace total de 150 km) con pérdidas de 0.2 dB/km, dispersión de -2 ps/nm/km y tres amplificadores ópticos de línea con una potencia de salida de 6 dBm, figura de ruido de 5 dB, ganancia de 35 dB. La velocidad de transmisión es de 10 Gb/s. Los transmisores son laser CW con modulación NRZ y potencia de 5 dBm. Los receptores son tipo PIN con una sensibilidad de -28 dBm. La figura 47 presenta un esquema del sistema anteriormente descrito.

Antes del fotodetector se colocó un dispositivo atenuador (*oatten1*) con el fin de cambiar el rendimiento del sistema y así obtener diferentes diagramas de ojo para su respectivo análisis. Al atenuador se le fijó una variable de atenuación (*RX_atten*), cuyos valores se fijaron de tal forma que en un principio se obtuviera una BER buena e irla degradando hasta llegar al límite de la sensibilidad en el receptor. La tabla 17 muestra los valores de atenuación para tal variable junto con los valores de BER y potencia en el receptor, como se puede observar en la tabla para una atenuación de 34 dB se obtuvo una potencia en recepción de -28 dBm, la cual es el valor de sensibilidad del receptor.

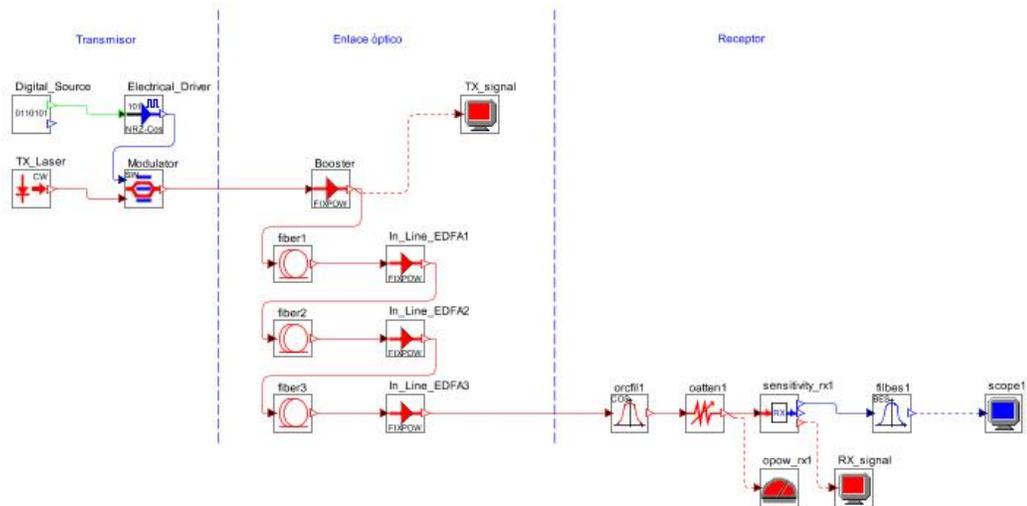


Figura 47. Sistema óptico monocanal punto a punto.

Tabla 17. Valores de atenuación con respecto a la BER y la potencia en el receptor.

Atenuación (dB)	BER ⁹	Potencia en rx (dBm)
28	1×10^{-40}	-22
30	1×10^{-40}	-24
32	$3,21548 \times 10^{-24}$	-26
34	$1,35328 \times 10^{-9}$	-28
36	$8,16703 \times 10^{-6}$	-30

La figura 48 muestra la relación entre la atenuación fijada al atenuador y la potencia en el receptor.

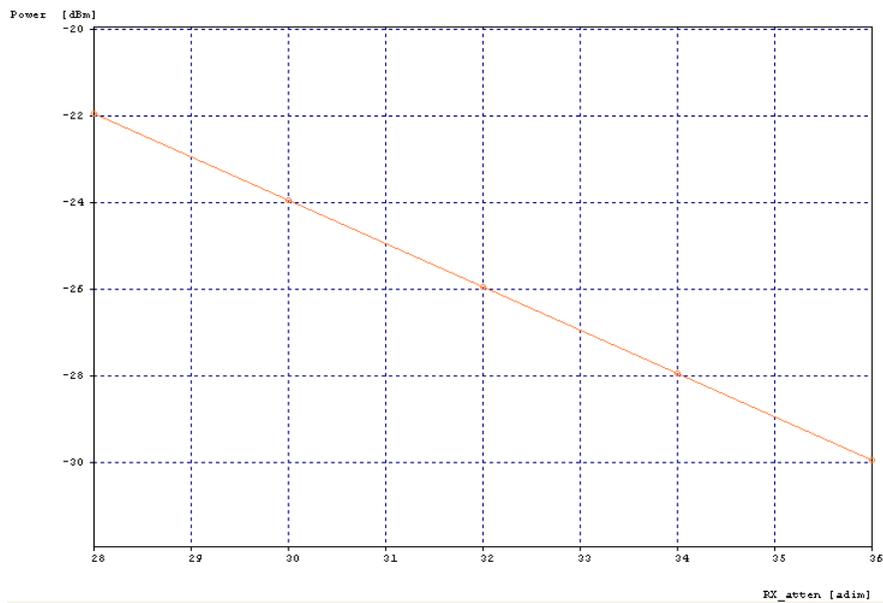


Figura 48. Atenuación vs potencia en el receptor.

⁹ El valor mínimo de BER estimado por OptSim es de 10^{-40} . Cuando se obtienen valores más pequeños estos son truncados a 10^{-40} y se muestra un mensaje de advertencia.

En la figura 49 se pueden observar los diferentes diagramas de ojo resultantes de la simulación. La figura 49 (a), (b), (c), (d) y (e) representa el diagrama de ojo para atenuación de 28, 30, 32, 34 y 36 dB respectivamente. Comparando la tabla 17 y los diagramas de ojo se puede apreciar que a medida que se va degradando el rendimiento del sistema el ojo se va cerrando. El ojo con mayor abertura se presenta para una BER de 10^{-40} y una potencia de recepción de -22 dBm y el ojo con menor abertura se presenta para una BER de 10^{-6} y una potencia de recepción de -30 dBm, el rendimiento del sistema para estos valores ya no es adecuado ya que la BER está por debajo de la mínima aceptable (10^{-9}) y la potencia en recepción está por debajo de la sensibilidad del receptor (-28 dBm). La figura 49 (d) representa el diagrama de ojo para una BER de 10^{-9} y una potencia en recepción de -28 dBm, la cual es el valor de sensibilidad del receptor.

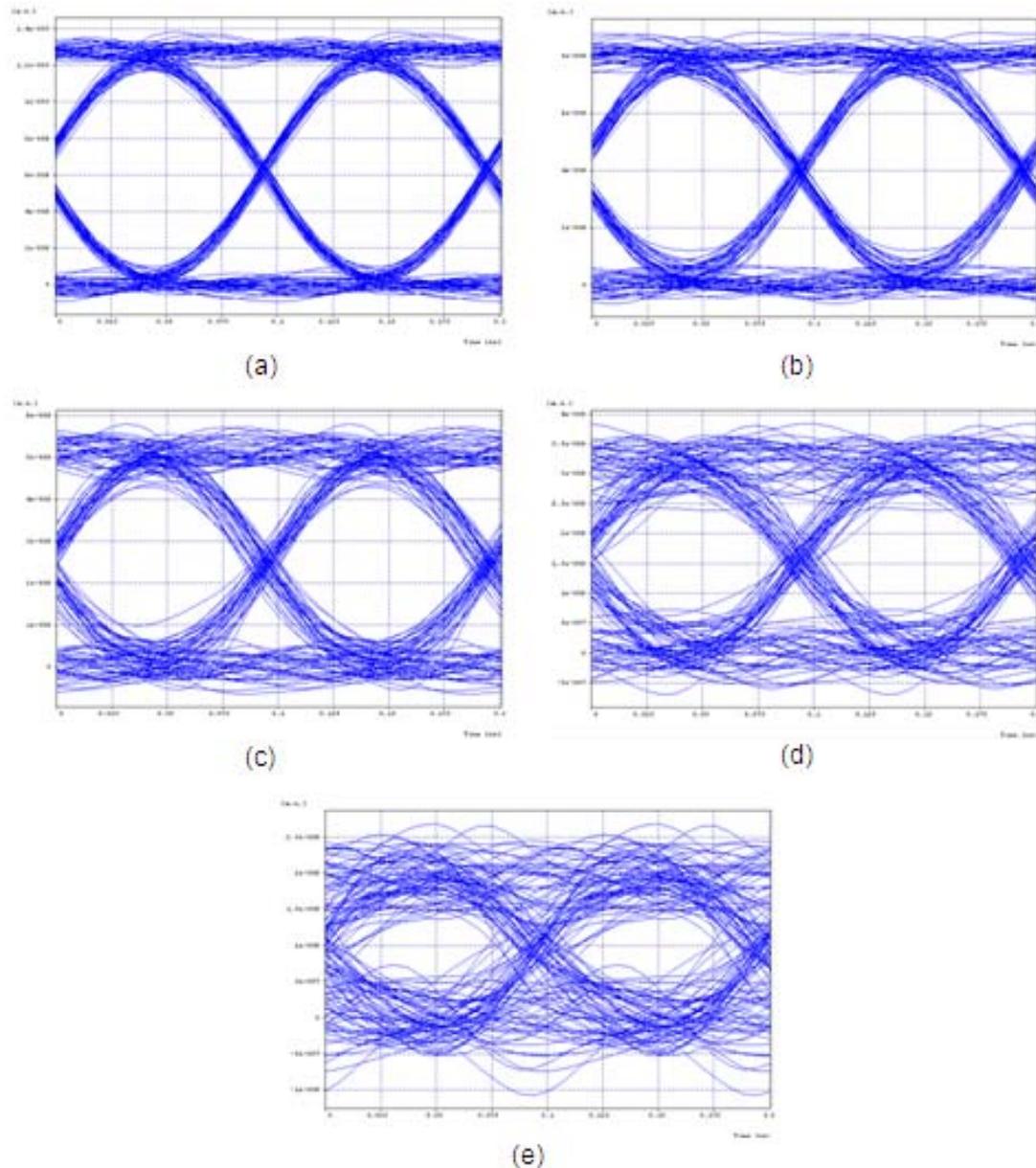


Figura 49. Diagramas de ojo para atenuación: (a) 28dBm, (b) 30dBm, (c) 32dBm, (d) 34dBm (e) 36dBm.

Como se indicó en el capítulo dos, un valor alto en el factor Q implica un pulso libre de ruido, lo cual corresponde a un diagrama del ojo abierto tanto como sea posible e indica que los datos pueden ser recuperados fácilmente. Por el contrario, un valor pequeño en el factor Q, corresponde

a un diagrama del ojo cerrado indicando distorsión en el pulso. La tabla 18 demuestra lo anterior mostrando la relación entre el factor Q y la abertura del ojo para la simulación realizada.

Tabla 18. Factor Q vs abertura del ojo.

Atenuación (dB)	Factor Q	Abertura del ojo
28	25,609372	1,2296e-5
30	22,905943	7,6449e-6
32	20,078967	4,86122e-6
34	15,687637	3,07185e-6
36	12,808615	1,96963e-6

Criterio 8: La penalización de potencia debida a la dispersión no debe sobrepasar los 2 dB.

Este criterio se validó sobre un sistema WDM punto a punto de 1 canal a longitud de onda de 1550 nm. El enlace óptico lo conforma una fibra óptica de 100 km de longitud. La velocidad de transmisión es de 10 Gb/s. Los transmisores son laser CW con modulación NRZ y potencia de 0 dBm. El receptor es tipo PIN. La figura 50 presenta un esquema del sistema anteriormente descrito.

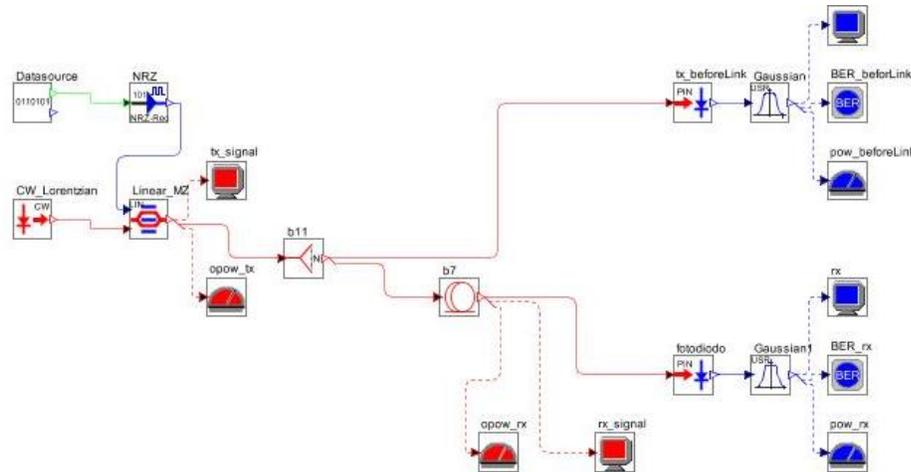


Figura 50. Sistema óptico monocanal punto a punto para análisis de dispersión.

En la simulación se utilizó el método de recepción back to back que consiste en colocar un receptor antes del enlace de transmisión para medir la potencia en el dominio eléctrico. A la fibra se le fijo una variable de dispersión a la cual se asignaron valores de dispersión para fibras disponibles comercialmente (ver anexo C.2). La tabla 19 muestra los valores de potencia óptica en recepción a medida que cambia el valor de dispersión en la fibra.

Tabla 19. Dispersión vs potencia óptica en el receptor.

Dispersión (ps/nm/km)	Potencia óptica en recepción (dBm)
4.3	-8.963
7	-8.98519
8	-8.98109
16	-8.98109
18	-8.99991
18.5	-9.01824
20.5	-9.01511

En la figura 51 se puede ver la representación gráfica de los valores expresados en la tabla 19.

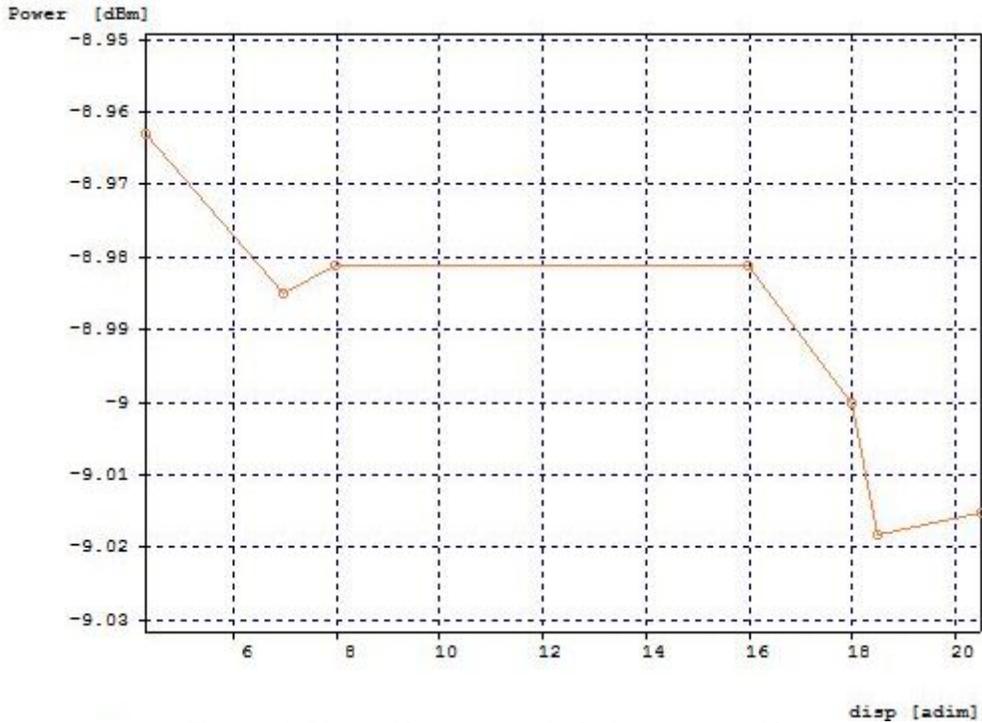


Figura 51. Dispersión vs potencia óptica en recepción.

La figura 52 presenta la relación entre la potencia eléctrica y la dispersión en la fibra.

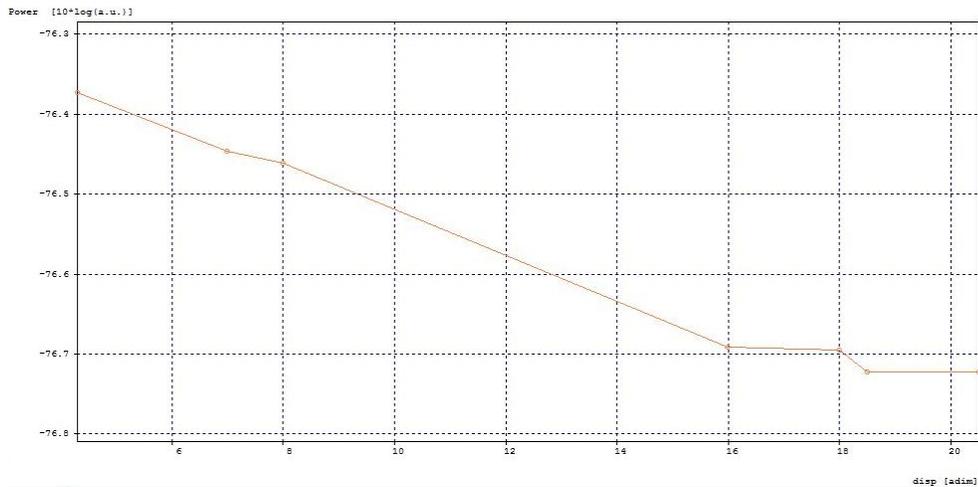


Figura 52. Dispersión vs potencia eléctrica en recepción.

El criterio plantea que la penalización de potencia debido a la dispersión no debe sobrepasar los 2 dB. La potencia en el laser se fijó a 0 dBm, pero después de la modulación la potencia óptica es de -8.965 dBm debido a las pérdidas introducidas en este proceso. A medida que se aumenta la dispersión en la fibra la potencia en el receptor disminuye. Para una dispersión de 4.3 ps/nm/km se presenta el máximo valor de potencia en recepción y es de -8.963 dBm, mientras que para una dispersión de 18.5 ps/nm/km se presenta el mínimo valor de potencia en el receptor y es de -9.01511 dBm. Comparando estos valores de potencia óptica en recepción con la potencia óptica en transmisión se puede apreciar que la penalización de potencia debido a la dispersión no sobrepasa los 2 dB.

A pesar de que la penalización de potencia no sobrepasa los 2 dB, el rendimiento del sistema si se ve afectado a medida que aumenta la dispersión. La tabla 20 muestra la relación entre la dispersión y los valores de BER y Q, y la figura 53 muestra los diagramas de ojo correspondientes. A medida que aumenta la dispersión el diagrama del ojo se va deteriorando así como la BER y el factor Q. Según los resultados de la simulación la dispersión no influye en gran medida sobre la potencia de transmisión, pero si sobre la calidad de la señal, razón por la cual se hace necesario el empleo de técnicas de compensación de dispersión.

Tabla 20. Relación entre dispersión, BER, factor Q y diagrama de ojo.

Dispersión (ps/nm/km)	BER	Factor Q	Diagrama de ojo
4.3	1×10^{-40}	23,305720	(a)
7	$3,62196 \times 10^{-10}$	15,885666	(b)
8	$3,25789 \times 10^{-9}$	15,308367	(c)
16	0,000827936	9,962126	(d)
18	0,00475517	8,311272	(e)
18.5	0,00446155	8,382485	(f)
20.5	0,00653205	8,045443	(g)

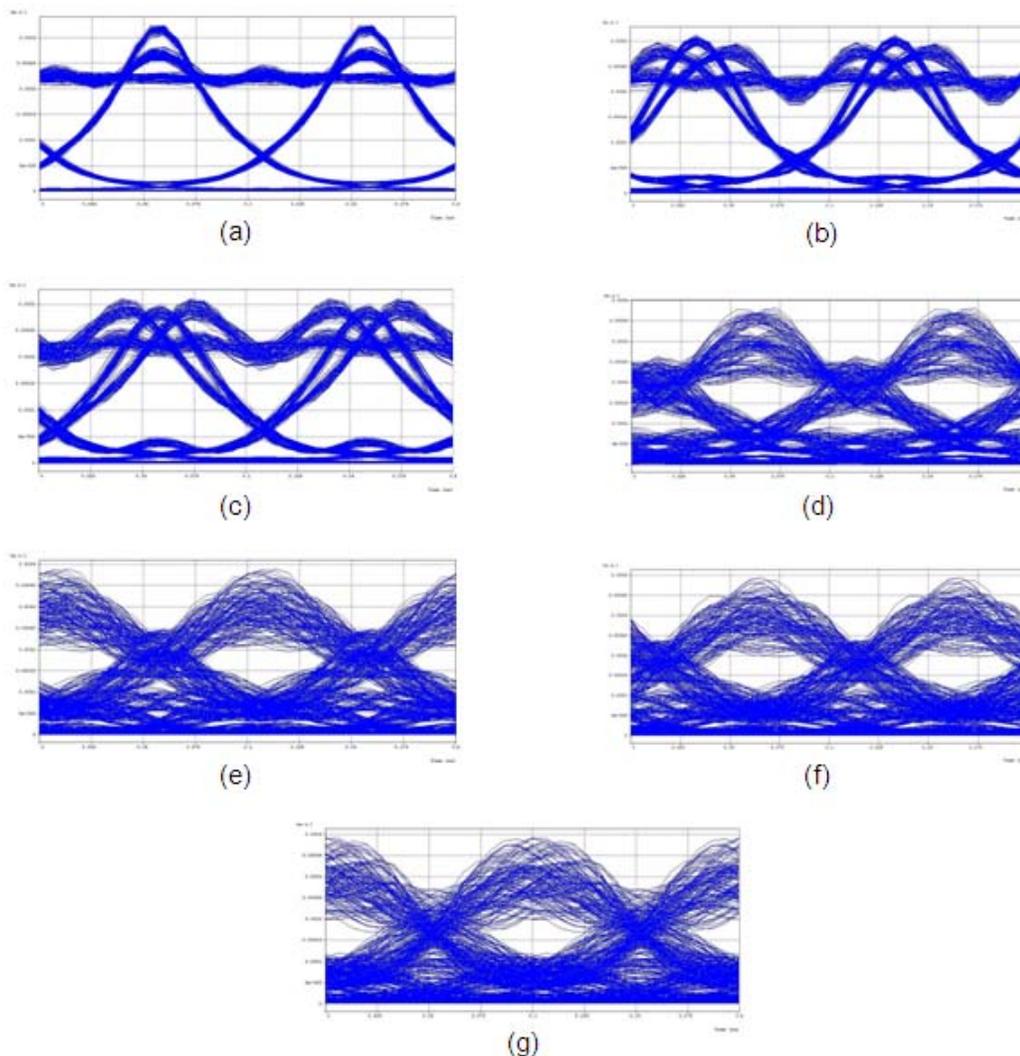


Figura 53. Diagramas de ojo para dispersión: (a) 4.3 ps/nm/km, (b) 7 ps/nm/km, (c) 8 ps/nm/km, (d) 16 ps/nm/km, (e) 18 ps/nm/km, (f) 18.5 ps/nm/km, (g) 20.5 ps/nm/km.

Criterio 9: El margen típico del sistema recomendado para la PMD es de 1dB

Este criterio se validó sobre un sistema WDM punto a punto de 1 canal a longitud de onda de 1550 nm. El enlace óptico lo conforma una fibra óptica de 100 km, con pérdidas de 0.21 dB/km. Con el fin de analizar sólo los efectos causados por la PMD, la dispersión en la fibra se fijó a cero. El transmisor lo conforma un generador PRBS de 40 Gb/s, un laser CW, un convertor eléctrico, un modulador externo y un normalizador de potencia óptica. La señal es modulada en formato RZ antes de ser introducida en la fibra. La figura 54 presenta un esquema del sistema anteriormente descrito.

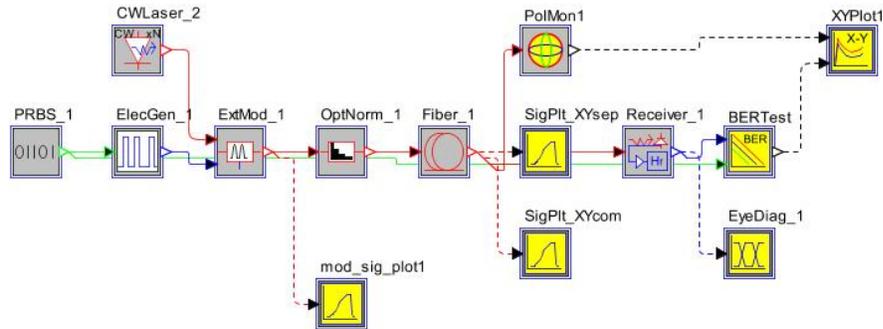


Figura 54. Sistema óptico monocanal para análisis de PMD.

Debido al efecto de la PMD, cuando el pulso es introducido en la fibra, este es polarizado y se generan dos componentes a lo largo de los eje X y Y, a causa de que estas dos componentes viajan a velocidades distintas durante la propagación, adquieren un retardo diferencial de grupo (DGD), lo cual ocasiona el ensanchamiento del pulso y por ende su distorsión. La DGD promedio puede ser calculada a partir de la siguiente ecuación 16:

$$DGD_{promedio} = PMD_{coef} * (L)^{1/2} \quad (16)$$

Como la PMD es un efecto estocástico causado por la variación aleatoria de la birrefringencia en la fibra, se debe ejecutar una simulación Montecarlo¹⁰. Por esta razón se crea una variable *seed* con el fin de obtener diferentes resultados de simulación.

El coeficiente de PMD se fijó para valores de 0.1 y 1 ps/km^{1/2}, cuyos valores corresponden al más bajo y más alto respectivamente encontrado en las fibras ópticas a nivel comercial. El valor promedio de DGD para estos dos coeficientes corresponde a 1 y 10 ps, respectivamente. De aquí se deduce que el mayor ensanchamiento y distorsión del pulso se obtendrá para el coeficiente de PMD de 1 ps/km^{1/2}.

La figura 55 muestra la señal de salida del transmisor después de ser modulada. La figura 55 (a) muestra una secuencia de pulsos, mientras que la figura 55 (b) corresponde a la ampliación de un solo pulso de dicha secuencia, como se puede apreciar en la figura, los pulsos están polarizados presentando componente en X y en Y, pero hasta el momento se encuentra prácticamente sincronizadas estas componentes. La figura 55 (c) presenta un pulso con sus dos componentes de polarización combinadas, razón por la cual presenta un nivel de magnitud superior.

A la variable *seed* se le asignaron valores de 1 a 50 con incrementos de 1. Seleccionando la ejecución correspondiente al peor caso de funcionamiento para cada coeficiente de PMD. La figura 56 muestra la señal que llega al receptor para un coeficiente de PMD de 0.1 ps/Km^{1/2}. El valor de la variable *seed* que presenta el peor comportamiento para este coeficiente es 34.

¹⁰Simulación Montecarlo: simulación estadística basada en el muestreo sistemático de variables aleatorias.

Como se puede apreciar en la figura 56 (b) los pulsos llegan al receptor en tiempos diferentes y debido a que el valor del coeficiente de PMD es pequeño el ensanchamiento no es significativo.

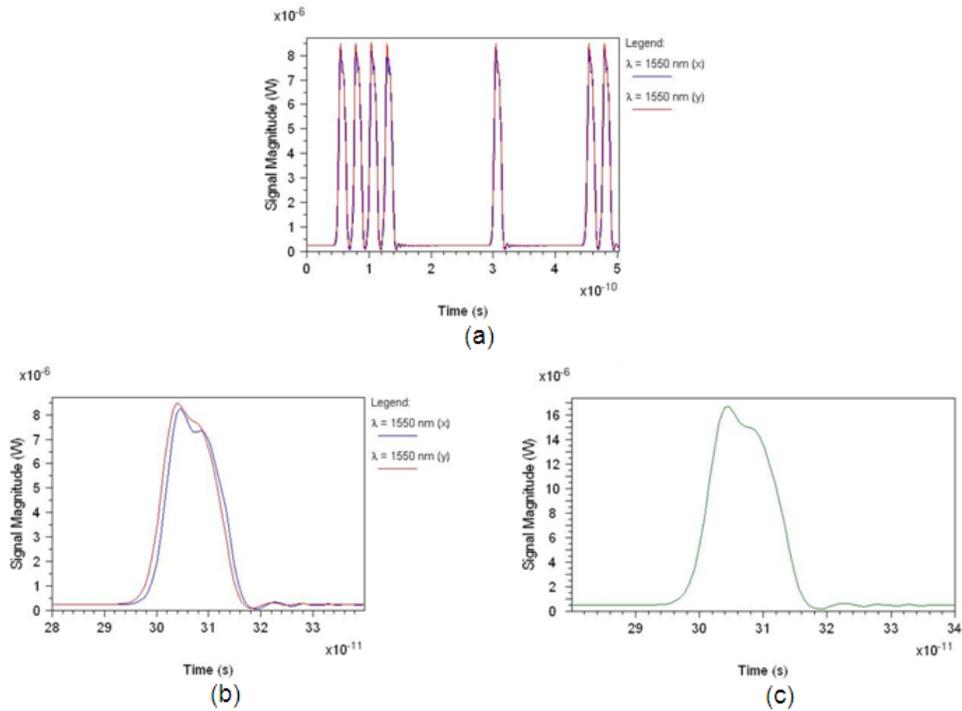


Figura 55. Señal de salida del transmisor.

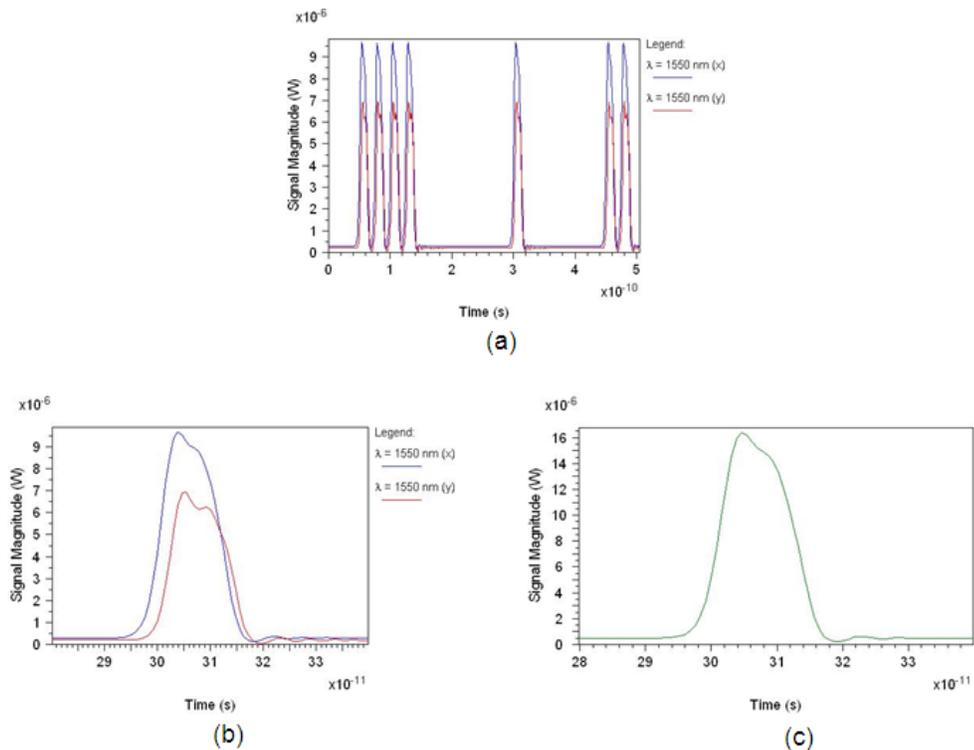


Figura 56. Señal en recepción para un coeficiente de PMD de $0.1 \text{ ps/km}^{1/2}$.

Para el caso del coeficiente de PMD de $1 \text{ ps/Km}^{1/2}$ el caso es más crítico ya que la separación en tiempo para las dos componentes es mayor, lo cual implica un mayor ensanchamiento del pulso. El valor de la variable *seed* que presenta el peor comportamiento para este caso es 13. En la figura 57 (a) y (b) se puede ver la separación de las componentes X y Y para este coeficiente, en la figura 57 (c) se puede ver el ensanchamiento del pulso, lo cual afectará el rendimiento total del sistema.

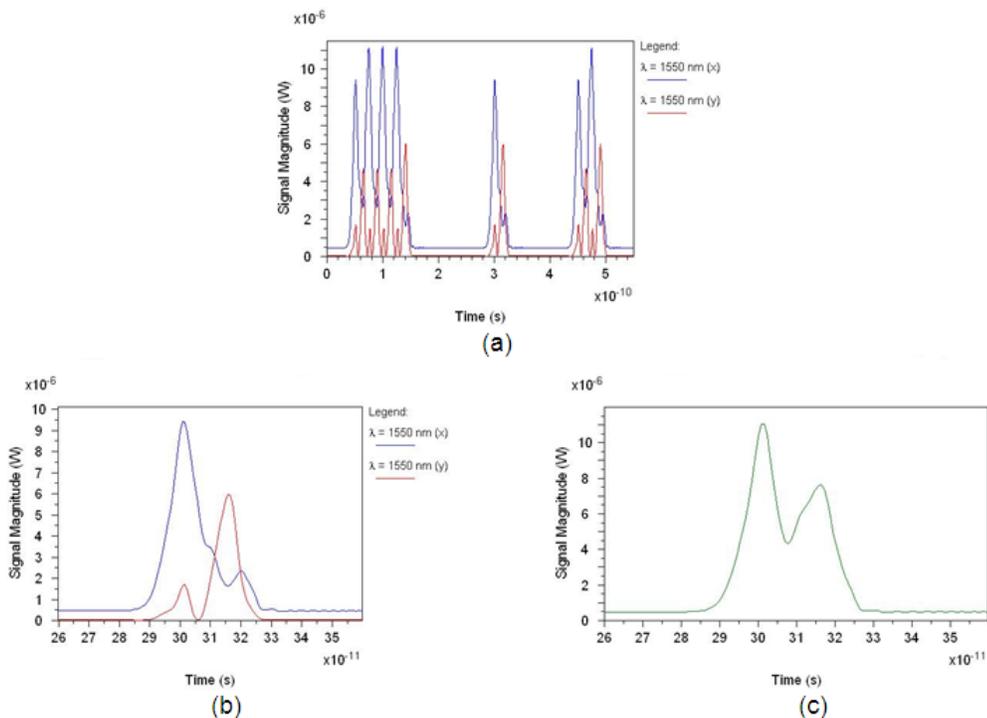


Figura 57. Señal en recepción para un coeficiente de PMD de $1 \text{ ps/km}^{1/2}$.

La figura 58 muestra los valores de DGD para los coeficientes de PMD de 0.1 y $1 \text{ ps/km}^{1/2}$ para las 50 asignaciones del parámetro *seed*. Para el coeficiente de $0.1 \text{ ps/km}^{1/2}$ y *seed* de 34 (peor caso) el DGD es de $1,7128 \text{ ps}$, mientras que para el coeficiente de $1 \text{ ps/km}^{1/2}$ y *seed* de 13 (peor caso) el DGD es de $57,031 \text{ ps}$.

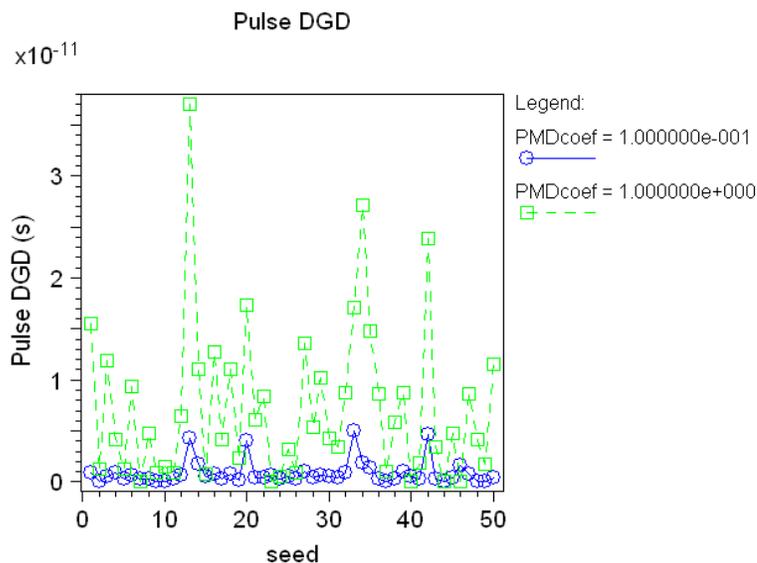


Figura 58. DGD para los diferentes valores de *seed* y para los dos coeficientes de PMD.

La disminución de potencia debido a la PMD se analizó sobre el esquema de la figura 59. El sistema es monocal con velocidad de transmisión de 10 Gb/s, modulación NRZ, distancia del enlace de 1500 km y la longitud de onda central es de 1550 nm. No se considera ni pérdidas ni dispersión con el objetivo de ver solo la influencia de la PMD sobre el sistema.

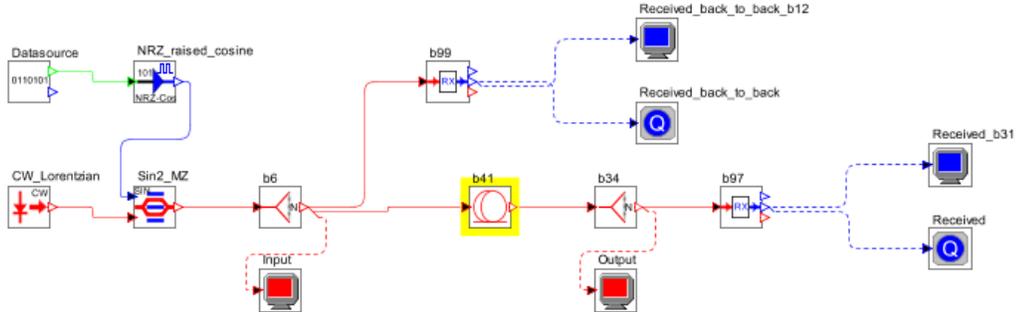


Figura 59. Esquema para analizar la pérdida de potencia debido a la PMD.

En este caso el parámetro seed se varió de 1 a 20. El coeficiente de PMD se fijo en $1\text{ps/km}^{1/2}$ ya que es el valor más alto presente en las fibras comerciales. La potencia más baja en recepción fue de -20.974 dBm y se presentó para un valor de seed de 9. La potencia medida a la entrada de la fibra fue de $-20,875\text{ dBm}$. Por lo tanto, la diferencia de potencia debido a la PMD es de 0.099 dB , con lo cual se concluye que 1 dB como margen garantiza un buen diseño respecto a la influencia de PMD sobre el sistema.

Criterio 10: Para contrarrestar el SBS se debe utilizar rayos láser de pulso más amplio y fibras de área efectiva grande.

En la figura 60 se puede ver el esquema del sistema utilizado para validar este criterio. Se utilizó dos fibras SMF-28, a una de ellas se le configuró el efecto SBS y a la otra no. Las longitudes de cada fibra son de 20 km , la longitud de onda de trabajo es de 1550 nm , velocidad de transmisión de 10 Gb/s y el área efectiva de las fibras es de $51\text{ }\mu\text{m}^2$.

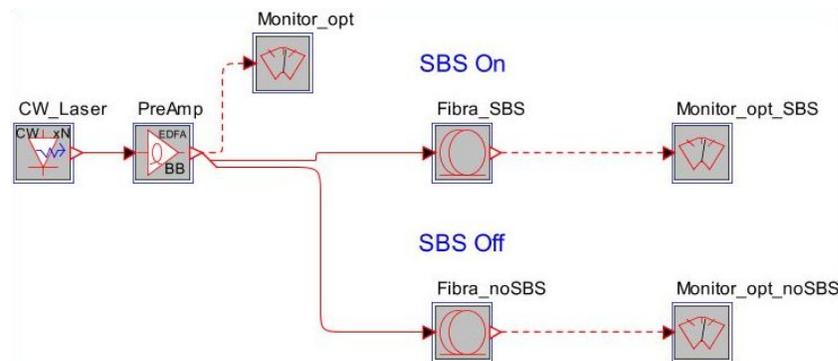


Figura 60. Esquema de un sistema óptico para el análisis del SBS.

Con el fin de ver el comportamiento del SBS con respecto a la potencia de transmisión se fijo una variable de potencia P_{o-cw} , cuyos valores oscilan entre 0 y 25 dBm con incrementos de 1 dB . La figura 61 presenta la potencia que llega al receptor (eje y) versus la potencia en el transmisor (eje x). La figura 61 (a) presenta la relación entre potencias para la fibra sin SBS mientras que la figura 61 (b) presenta la relación de potencias para la fibra con SBS. Como se puede apreciar en la figura 61 (b) la SBS presenta una limitante para la potencia en recepción y su efecto empieza a adquirir importancia a partir de aproximadamente 12 dBm .

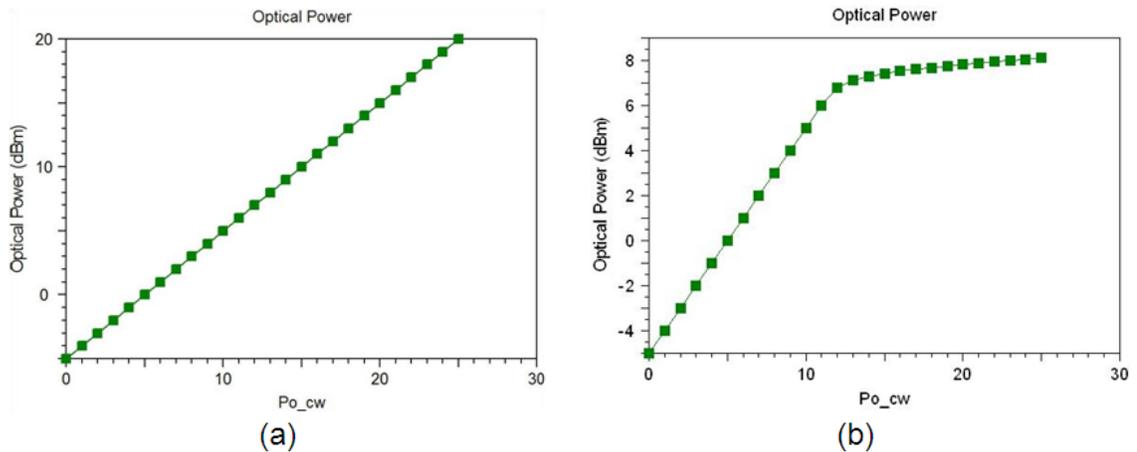


Figura 61. Relación de potencias para una fibra sin SBS y con SBS.

El SBS es un fenómeno relacionado con la potencia. El nivel de potencia de una señal óptica transmitida permanece dentro de cierto umbral, generalmente sobre el orden de los 3 mW. El umbral es directamente proporcional al área efectiva de la fibra, debido a que las fibras de área efectiva grande permiten mayor densidad de potencia en su núcleo, con lo cual se eleva dicho umbral. Por lo tanto a mayor área efectiva menor será el efecto del SBS [8].

En la herramienta de simulación OptSim el área efectiva se calcula de la ecuación 17 [48]:

$$A_{eff} = a_{Eff} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (17)$$

donde a_{Eff} es un parámetro adimensional de OptSim relacionado con el área efectiva y d es el diámetro de la fibra. En el modo de simulación¹¹ empleado para este criterio los parámetros que se pueden fijar para un área efectiva determinada son a_{Eff} y d . El mínimo y máximo valor de área efectiva encontrados para fibras comercialmente disponibles son $51 \mu\text{m}^2$ y $110 \mu\text{m}^2$ respectivamente. Se dejó el valor de d que viene por defecto ($8.2 \mu\text{m}$) y se varió a_{Eff} para obtener diferentes valores de área efectiva entre los cuales se encuentran los mencionados anteriormente.

La tabla 21 presenta los valores de área efectiva con base en el parámetro a_{Eff} .

Tabla 21. Área efectiva para los diferentes valores del parámetro a_{Eff} .

a_{Eff}	Área efectiva (μm^2)
0,9658	51,004
1,0899	57,559
1,2141	64,114
1,3382	70,669
1,4623	77,224
1,5864	83,780
1,7106	90,335
1,8347	96,890
1,9588	103,445
2,0829	110,000

¹¹ OptSim emplea dos modos de simulación: *block mode* y *sample mode*.

Se cambiaron los valores del parámetro a_{Eff} de la fibra con los datos especificados en la tabla 21, para así cambiar el área efectiva de la fibra y analizar el comportamiento del SBS a mayor área efectiva. En la figura 62 se puede apreciar que a medida que aumenta el área efectiva el efecto de la SBS se disminuye aumentando la potencia en recepción con el aumento de la potencia en transmisión. El mejor comportamiento se presenta para el máximo valor de área efectiva ($a_{Eff} = 2.0829$ y $A_{eff} = 110 \mu\text{m}^2$).

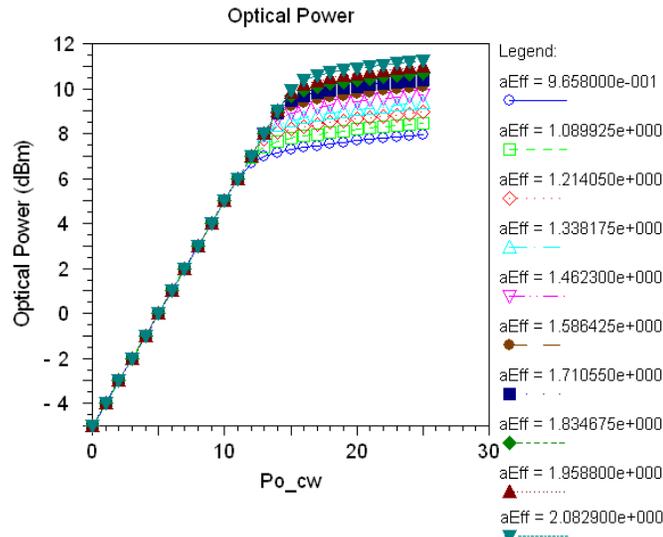


Figura 62. Comportamiento de la SBS con respecto al área efectiva.

La figura 63 presenta el comportamiento de la SBS para el mínimo y máximo valor de área efectiva. Para el área efectiva de $110 \mu\text{m}^2$ ($a_{Eff} = 2.082925$) el SBS empieza a tener efecto para una potencia de transmisión de aproximadamente 15 dBm, mientras que para el área efectiva de $51 \mu\text{m}^2$ ($a_{Eff} = 0.9658$) empieza a tener efecto para 12 dBm.

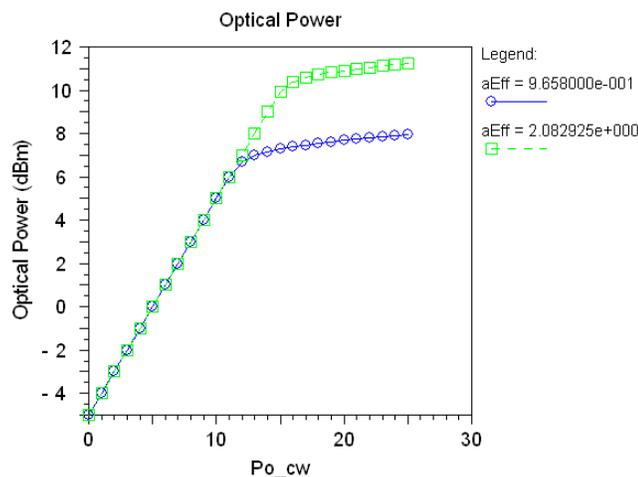


Figura 63. Comportamiento de la SBS para un área efectiva mínima y máxima.

La figura 64 presenta la diferencia entre la potencia de transmisión (color azul) y la potencia en recepción (color verde). La figura 64 (a) presenta la diferencia de potencias para el área efectiva de $51 \mu\text{m}^2$, esta diferencia se presenta a partir de una potencia de transmisión de 12 dBm. La figura 64 (b) presenta la diferencia de potencias, pero esta diferencia se presenta para el área efectiva de $110 \mu\text{m}^2$ y para una potencia de transmisión de 15 dBm. De lo anterior se concluye que a medida que se aumenta el área efectiva en la fibra se disminuye el efecto del SBS, permitiendo que al receptor lleguen señales con niveles de potencia más altos.

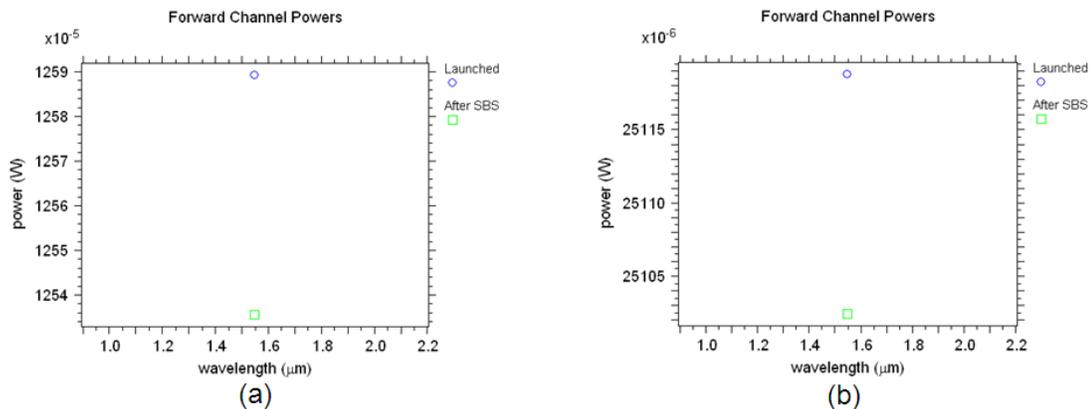


Figura 64. Diferencia entre potencias de transmisión y recepción debido a la influencia del SBS.

La compensación de la SBS con respecto a la anchura de pulso del rayo láser no se pudo simular debido a que la herramienta de simulación no trae consigo un parámetro que nos permite variar la anchura del pulso del láser. Teóricamente el umbral de la potencia de la señal óptica es también proporcional al ancho del pulso de rayo láser de origen: cuando el pulso se amplía, el umbral aumenta. Por lo tanto, las medidas para combatir la SBS son tomadas a menudo a través de una variedad de técnicas para ampliar el pulso del rayo láser artificialmente. Esto puede levantar el umbral significativamente, haciéndolo tan grande como 40 mW [8].

Criterio 11: Para reducir los efectos de la modulación de autofase (SPM) se debe limitar la potencia de la señal transmitida y utilizar fibras con bajo nivel de dispersión.

El análisis de este criterio se realizó de manera independiente para las dos consideraciones que se plantean como métodos para contrarrestar los efectos de la SPM. El esquema general empleado se muestra en la figura 65 y corresponde a un sistema WDM punto a punto monocal canal operando en la frecuencia de 193 THz, se transmite una señal NRZ a 10 Gb/s. Los parámetros del enlace óptico se modifican para cada caso de estudio.

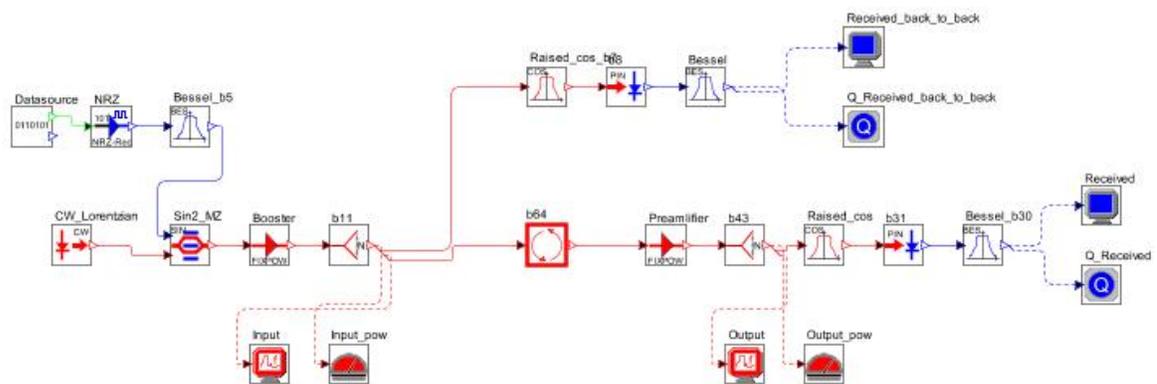


Figura 65. Esquema simulación efecto SPM

Nota: La configuración back_to_back es utilizada para comparar la señal de transmisión con la señal de recepción.

Para el análisis del comportamiento de la SPM con respecto a la potencia de la señal transmitida el enlace óptico consta de dos tramos de fibra DS ($D=0.4 \text{ ps/nm/km}$, $\alpha = 0.25 \text{ dB/km}$) de 50 km, cada uno y un amplificador EDFA. La potencia de entrada a cada tramo es variada de 16.5 a 17.5 dBm

mediante la variable Pin la cual se fija como potencia de salida tanto del booster como del amplificador de línea; esta variable se creó con el fin de analizar el límite de potencia de la señal transmitida para el efecto de la SPM.

De la ecuación 15 y teniendo en cuenta que $\alpha = 0.25$ dB/km, $N_A = 1$ y $\gamma = 1.8$ W⁻¹/km, la potencia pico de entrada permitida está por debajo de 17.7 dBm.

La tabla 22 muestra los valores de potencia recibida, abertura de ojo, BER y factor Q obtenidos para diferentes valores de potencia transmitida.

Tabla 22. Efecto SPM vs potencia de transmisión, datos obtenidos.

Potencia Transmitida Pin (dBm)	Potencia Recibida (dBm)	Abertura del Ojo	BER	Factor Q (dB)
16.5	8.63	0.014641	2.10356×10^{-24}	20.329980
16.7	8.51	0.0139566	3.64739×10^{-15}	17.801915
16.9	8.27	0.0130123	2.28707×10^{-10}	15.940139
17.1	7.95	0.0119608	1.77481×10^{-7}	14.220940
17.3	7.6	0.0108093	1.21089×10^{-5}	12.604131
17.5	7.12	0.00957529	2.00422×10^{-4}	11.052034

De los resultados obtenidos se puede observar que al aumentar la potencia de la señal transmitida, el efecto de SPM se incrementa deteriorando la señal recibida y que la potencia de la señal en recepción decrece significativamente; lo que nos permite concluir que es necesario limitar la potencia de la señal transmitida con el fin de disminuir la SPM. La figura 66 (a) muestra la relación entre el factor Q de la señal recibida y la potencia transmitida. Y la figura 66 (b) muestra la relación entre la potencia recibida (eje Y) y la potencia transmitida (eje X).

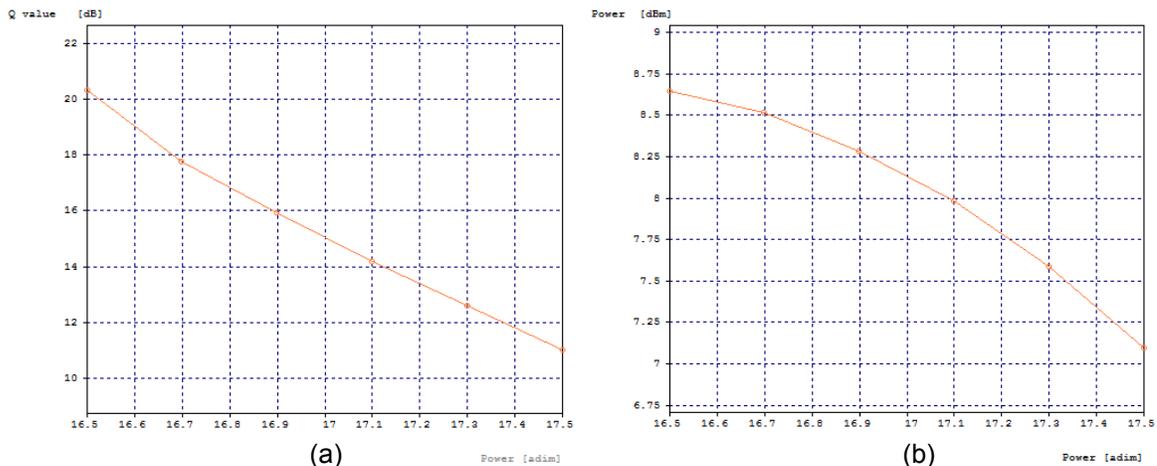


Figura 66. SPM vs Potencia (a) Factor Q vs Potencia transmisión (b) Potencia en recepción vs potencia de transmisión

Los diagramas de ojo muestran el deterioro de la señal en recepción; como se puede observar, a medida que se incrementa la potencia de la señal transmitida, la abertura del ojo disminuye. La figura 67 muestra los diagramas de ojo de back to back y recepción para diferentes valores de potencia de transmisión.

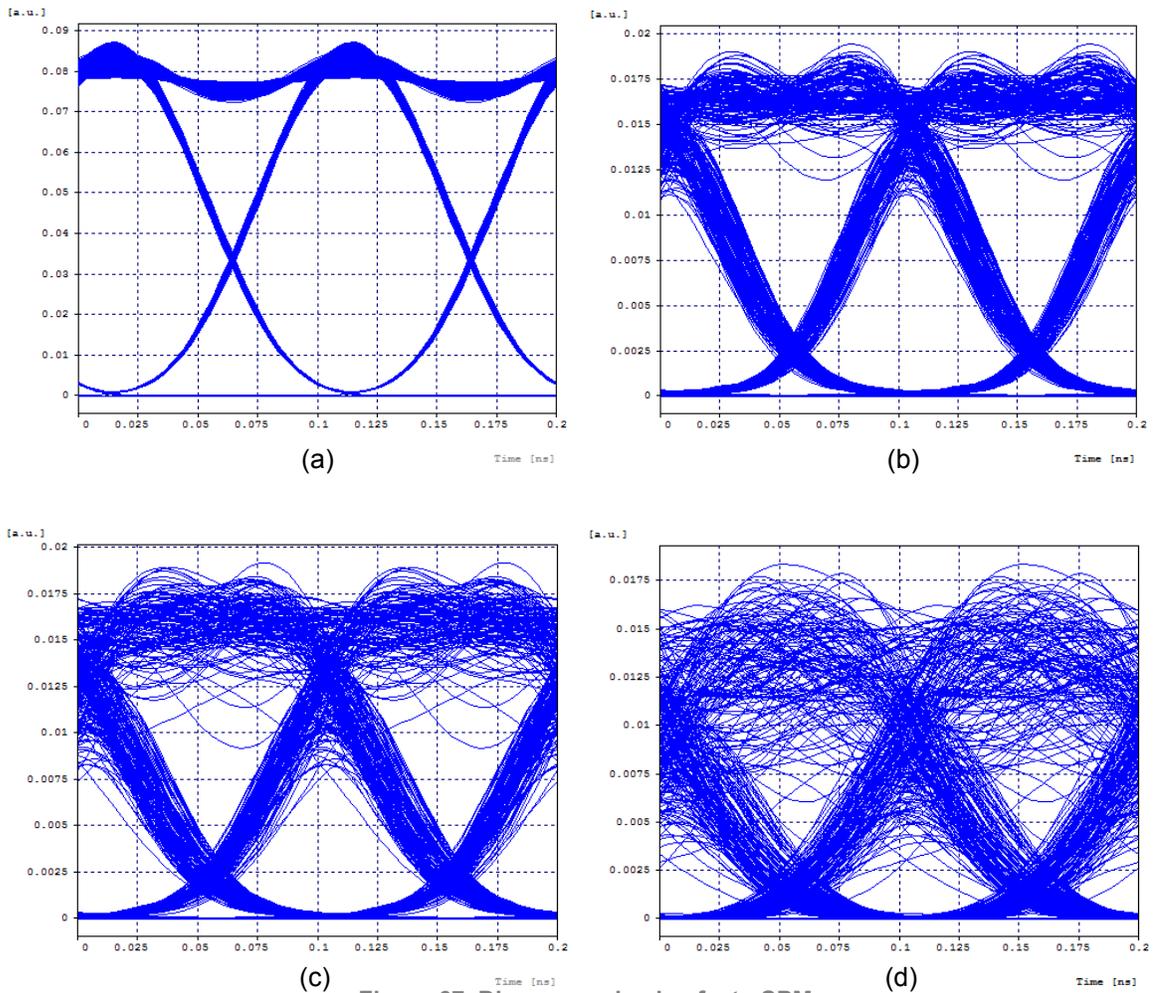
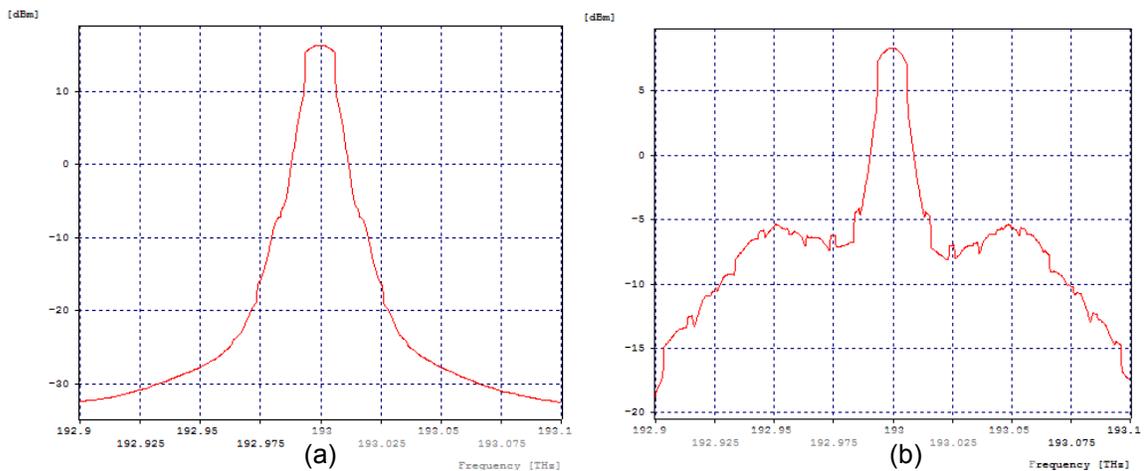


Figura 67. Diagramas de ojo efecto SPM
(a) Back to Back, (b) Pin = 16.5dBm, (c) Pin = 16.9dBm, (d) Pin = 17.5dBm

La figura 68 muestra el espectro óptico de la señal en recepción para diferentes valores de potencia de transmisión. Como se puede observar al incrementar la potencia de la señal transmitida, el espectro en recepción se deteriora generándose otras componentes debido al efecto de modulación de auto fase.



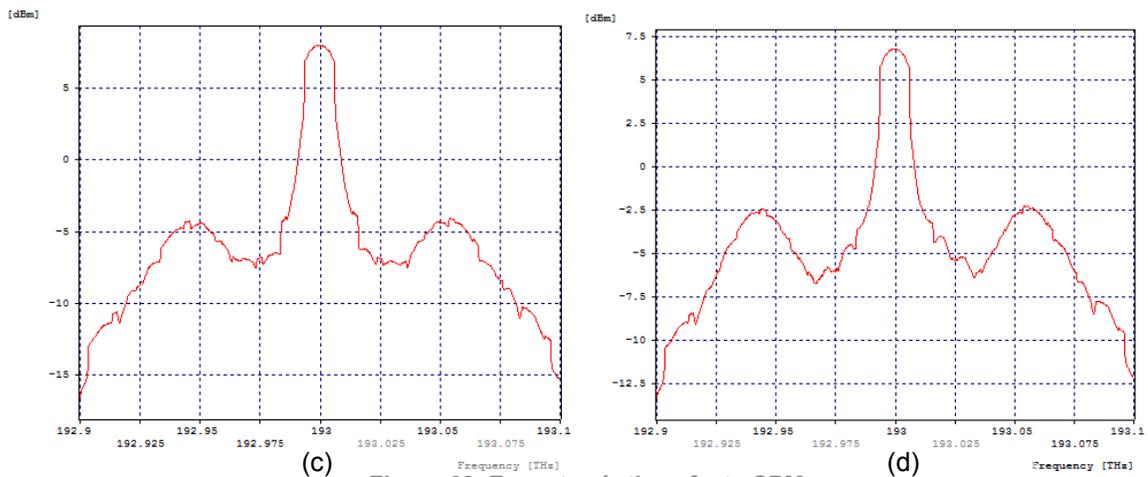


Figura 68. Espectro óptico efecto SPM
(a) Back to Back, (b) Pin = 16.5dBm, (c) Pin = 16.9, (d) Pin = 17.5

El efecto de SPM con respecto a la dispersión en la fibra, se analizó sobre un enlace óptico que consta de cuatro tramos de fibra de 100km cada uno, pérdidas en la fibra de 0.25dB/km. Se emplearon amplificadores EDFA con ganancia de 35dB, ubicados cada 100km y se les fijó una potencia de salida de 10dBm. La dispersión es completamente compensada con el fin de aislar el fenómeno de SPM. El valor de dispersión en la fibra fue variado de -17 a 17ps/nm/km, para analizar el comportamiento de la SPM tanto para valores de dispersión anómala como normal.

La tabla 23 muestra los valores de apertura de ojo, BER y factor Q obtenidos para diferentes valores de dispersión.

Tabla 23. Efecto SPM vs dispersión, datos obtenidos

Dispersión (ps/nm/km)	Apertura del Ojo	BER	Factor Q (dB)
-17	0.0164	3.32×10^{-33}	21.572
-10	0.016	1×10^{-40}	26.802
-5	0.016	1×10^{-40}	31.033
-2	0.015	1×10^{-40}	30.881
0	0.017	1×10^{-40}	40
2	0.016	1×10^{-40}	33.01
5	0.015	1×10^{-40}	29.687
10	0.012	1.69×10^{-17}	18.66
17	0.0085	8.85×10^{-6}	12.596

De los resultados obtenidos se observa que para valores pequeños de dispersión (ceranos a cero) en la fibra el efecto de SPM decrece y por lo tanto se mejora el rendimiento del sistema; mientras que para valores altos de dispersión se refuerza el efecto SPM deteriorando la señal transmitida, lo cual está de acuerdo con el criterio propuesto.

La figura 69 presenta la relación entre el factor Q de la señal recibida para diferentes valores de dispersión, mostrando que la respuesta del sistema con relación a la SPM es mejor en el régimen de dispersión normal (dispersión negativa) que en el régimen de dispersión anómala (dispersión positiva), esto se debe a que el espectro óptico de la señal se ensancha para valores positivos de dispersión y se estrecha para valores negativos, como se observa en la figura 70.

Los diagramas de ojo muestran el deterioro de la señal en recepción al incrementar la dispersión de la fibra. Las figuras 71 (a), (b) y (c) corresponden al diagrama de ojo de la señal en recepción para dispersión de -17, 0 y 17ps/nm/km, respectivamente.

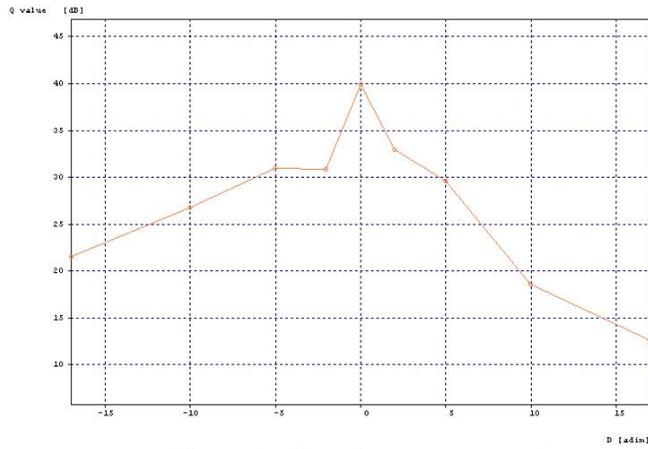


Figura 69. Factor Q vs Dispersión en la fibra

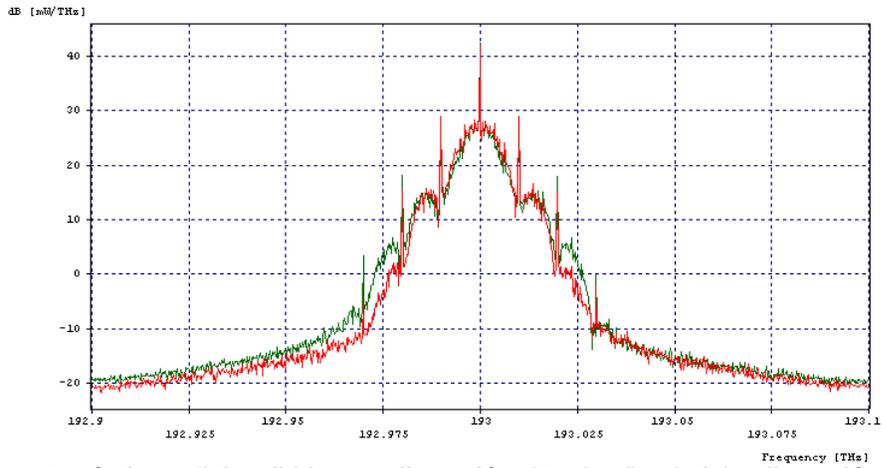


Figura 70. Espectro óptico señal recibida para dispersión -17ps/nm/km (rojo) y dispersión 17ps/nm/km (verde)

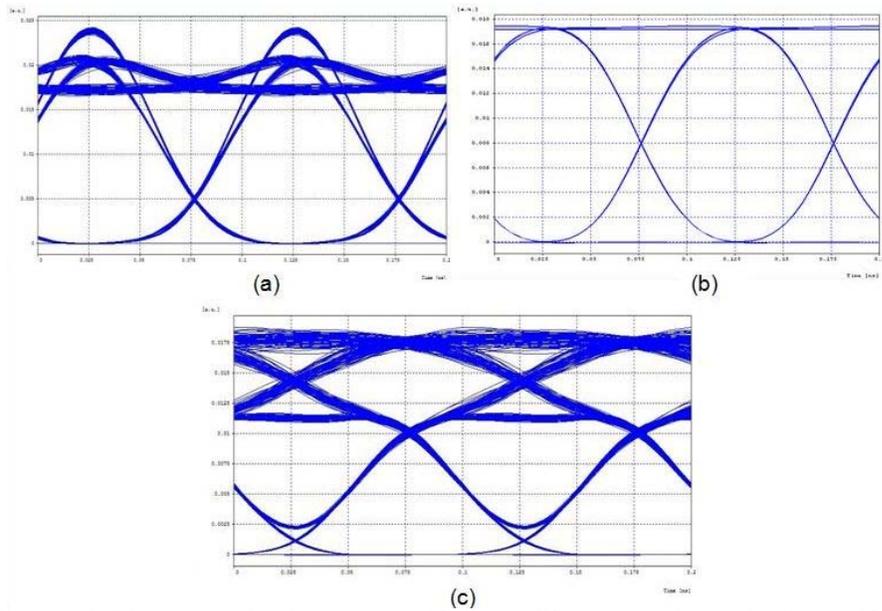


Figura 71. Diagramas de ojo en recepción para diferentes valores de dispersión (a) -17ps/nm/km , (b) 0ps/nm/km , (c) 17ps/nm/km

Criterio 12: Utilizar fibras con cierto valor de dispersión para contrarrestar los efectos causados por la XPM.

El sistema utilizado para el análisis del efecto de XPM en un sistema WDM con respecto a la dispersión de la fibra consiste en dos canales WDM transmitidos sobre dos tramos de fibra DS de 100km cada uno. La dispersión es completamente compensada en cada tramo para enfatizar en el fenómeno de la XPM. La dispersión de la fibra se varía desde 0 a 4 ps/nm/km. Con el fin de centrarse en la XPM, uno de los canales (probe) tiene una potencia baja (-30dBm) y se envía a través del enlace junto con un canal (pump) de mayor potencia (-10dBm). Ambos canales son modulados por una señal digital NRZ a 10Gb/s. La figura 72 presenta un esquema del sistema simulado.

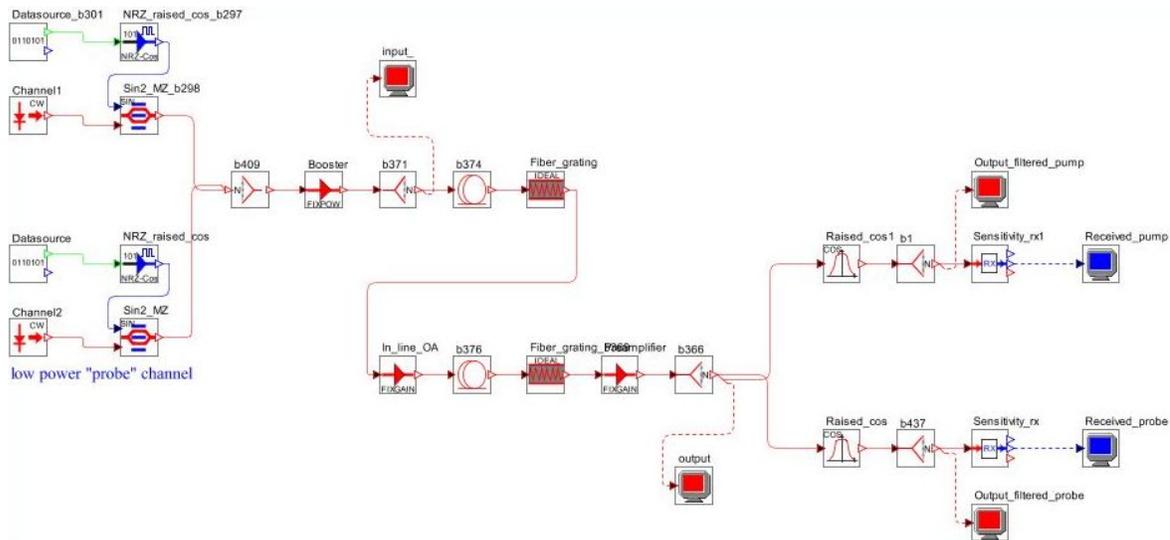


Figura 72. Esquema simulación efecto XPM

La tabla 24 muestra los valores de potencia, BER y factor Q de la señal recibida al demodular el canal de prueba, para diferentes valores de dispersión de la fibra.

Tabla 24. Resultados simulación efecto XPM

Dispersión (ps/nm/km)	Potencia Recibida (dBm)	BER	Factor Q (dB)
0	-9.625	0.0020313	8.826923
1	-11.0995	2.24963×10^{-6}	13.156699
2	-11.2802	2.09114×10^{-10}	15.875436
3	-11.2658	1.63507×10^{-18}	18.890243
4	-11.2441	3.62579×10^{-29}	21.178639

Los efectos de la XPM sobre el canal *probe* debidos a la interacción con el canal *pump* se manifiestan como un ensanchamiento del espectro recibido, una distorsión del diagrama de ojo de la señal de prueba y un incremento en la potencia recibida.

Las figuras 73 (a), (b), (c), (d) y (e) muestran los diagramas de ojo en recepción del canal de prueba para valores de dispersión de 0ps/nm/km, 1ps/nm/km, 2ps/nm/km, 3ps/nm/km y 4 ps/nm/km, respectivamente. Al aumentar el valor de dispersión en la fibra, se puede observar que el rendimiento del sistema mejora significativamente (aumenta la abertura del ojo).

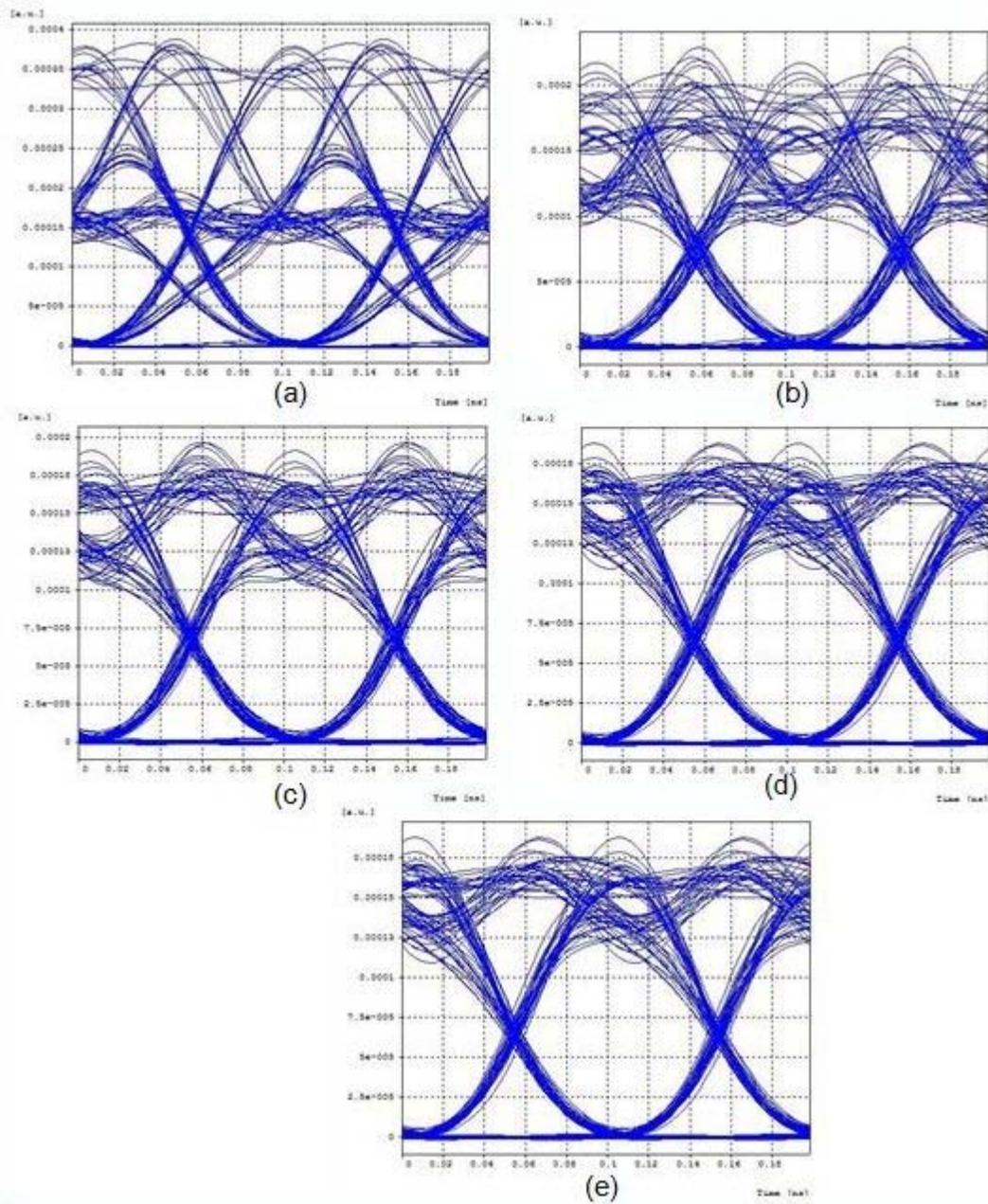


Figura 73. Diagramas de ojo efecto XPM para distintos valores de dispersión

La figura 74 muestra el espectro óptico de la señal de prueba en transmisión (curva roja) y en recepción para dispersión de 0ps/nm/km (curva verde) y para dispersión de 4ps/nm/km (curva café). Como se puede observar, el espectro óptico de la señal presenta un menor ensanchamiento para el valor mayor de dispersión.

Los resultados obtenidos demuestran que la respuesta del sistema frente a la XPM mejora al emplear fibras con cierto grado de dispersión, comprobando el criterio.

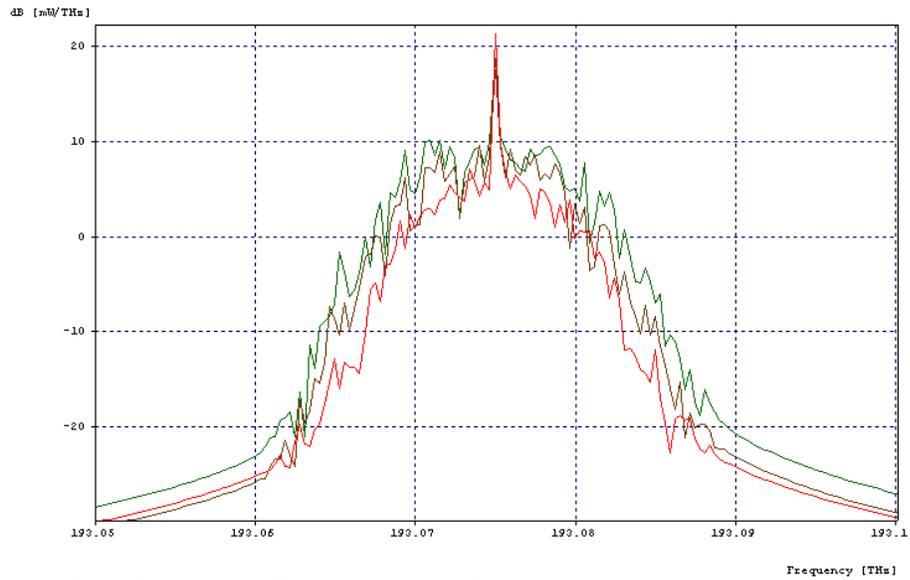


Figura 74. Espectro óptico de la señal de prueba en transmisión (rojo) y recepción para dispersión de 0ps/nm/km (verde) y para dispersión de 4ps/nm/km (café)

Criterio 13: Es necesario emplear alguna técnica para contrarrestar los efectos de la FWM y el SRS.

- Separación desigual de canales a través de la banda

Se utilizó un sistema WDM de tres canales operando a 10Gb/s sobre un enlace compuesto por dos tramos de fibra ($\alpha=0.2\text{dB/km}$) de 100km cada uno. Los dos primeros canales tienen una separación de 100GHz, mientras que la separación del tercer canal se determina mediante una variable a la cual se asignan los valores 100 y 75GHz con el fin de estudiar el comportamiento de la FWM al emplear la técnica de separación desigual de canales. La figura 75 presenta el esquema empleado para esta simulación.

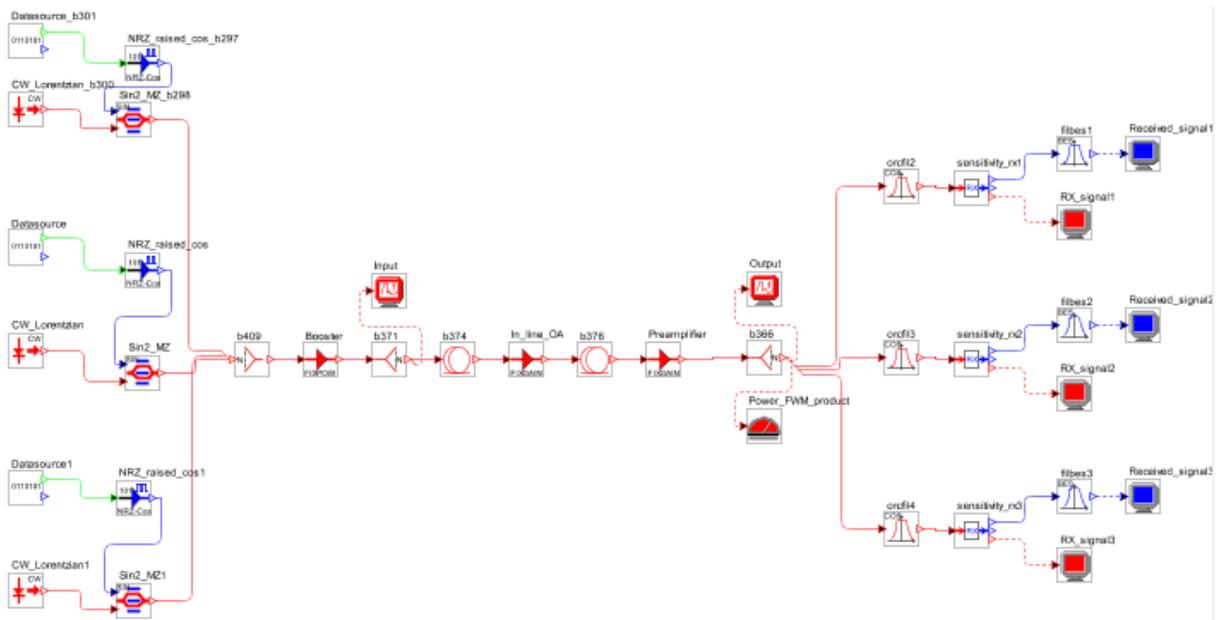


Figura 75. Esquema simulación efecto FWM vs. Separación desigual de Canales

La tabla 25 muestra la frecuencia de canal para los dos casos de estudio (separación igual y separación desigual).

Tabla 25. Frecuencia canales transmitidos

Separación	Canal	λ (nm)	Frecuencia (THz)	Potencia (dBm)
Igual (100GHz)	1	1553.32	193.0	1.401870
	2	1552.52	193.1	1.008242
	3	1551.72	193.2	1.104143
Desigual (100 y 75 GHz)	1	1553.32	193.0	1.400695
	2	1552.52	193.1	1.009353
	3	1551.92	193.175	1.105249

La figura 76 muestra el espectro óptico transmitido para separación igual (a) y para separación desigual (b) de canales.

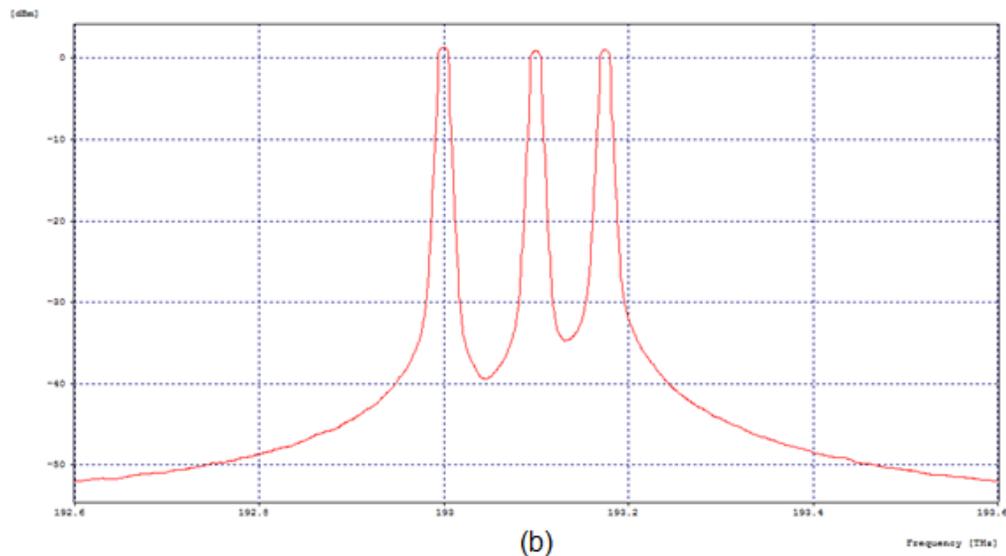
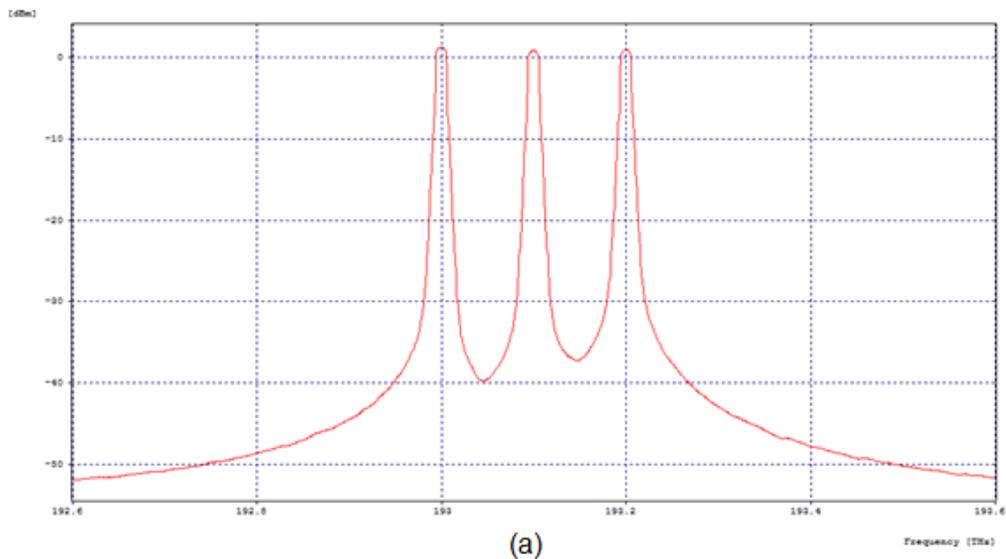


Figura 76. Espectro óptico en transmisión (a) Separación Igual, (b) Separación Desigual

A partir de la ecuación 12 (presentada en la sección 3.2.2 se determinan las frecuencias de los productos FWM generados para el sistema estudiado. La tabla 26 presenta la potencia de los productos FWM obtenidos para el caso de separación igual (0.8nm equivalente a 100GHz). Y la tabla 27 presenta los valores de BER, Factor Q y apertura del ojo, para los tres canales.

Como se observa en la tabla 26, en cada uno de los canales transmitidos cae un producto FWM; esto causa un aumento en la potencia de los canales y un deterioro de las señales transmitidas, como se aprecia en la tabla 27.

Tabla 26. Productos FWM separación igual de canales

Productos FWM	λ (nm)	F (THz)	Potencia en recepción* (dBm)
2f1 - f2	1554,12	192,901	-12,477075
2f2 - f1	1551,72	193,2	1,287216
2f2 - f3	1553,32	193,0	1,169096
2f3 - f2	1550,92	193,299	-17,599404
f1 + f2 - f3	1554,12	192,901	-12,477075
f3 + f2 - f1	1550,92	193,299	-17,599404
f1 + f3 - f2	1552,52	193,1	0,343379
2f1 - f3	1554,92	192,802	-21,055891
2f3 - f1	1550,12	193,399	-33,516260

* Datos obtenidos de la simulación.

Tabla 27. Parámetros de rendimiento separación igual

Canal	Frecuencia (THz)	BER	Factor Q (dB)	Apertura Promedio
1	193.0	1.43549×10^{-24}	20.190550	0.00250936
2	193.1	7.86572×10^{-7}	13.485747	0.00230236
3	193.2	2.46539×10^{-23}	20.084248	0.00276606

La figura 77 muestra el espectro óptico en recepción y la figura 78 muestra los Diagramas de ojo en recepción de cada uno de los canales, para el caso de separación igual.

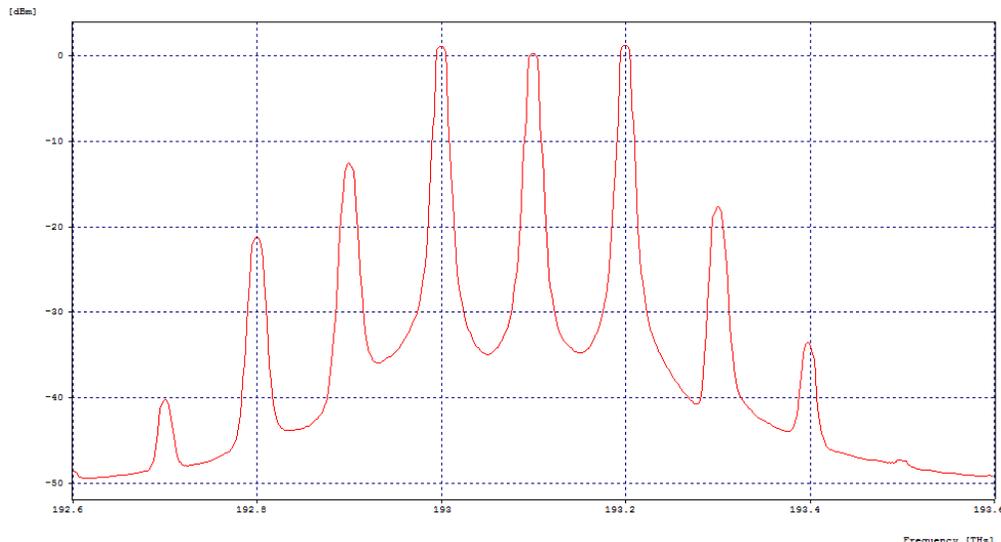


Figura 77. Espectro óptico en recepción, caso separación igual

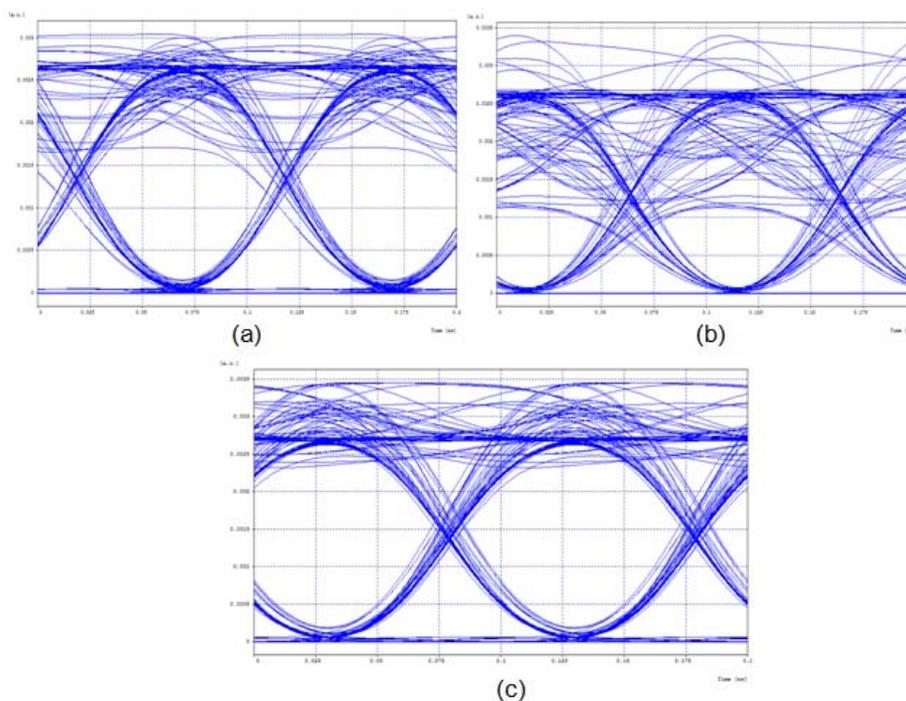


Figura 78. Diagramas de ojo en recepción, caso separación igual
(a) Canal 1, (b) Canal 2, (c) Canal 3

La tabla 28 presenta los resultados obtenidos para el caso de separación desigual (0.8nm y 0.6nm). Y la tabla 29 presenta los valores de BER, Factor Q y apertura del ojo, para los tres canales.

Tabla 28. Productos FWM separación desigual de canales

Productos FWM	λ (nm)	F (THz)	Potencia en recepción* (dBm)
$2\lambda_1 - \lambda_2$	1554,12	192,901	-20.861624
$2\lambda_2 - \lambda_1$	1551,72	193,200	-19.403398
$2\lambda_2 - \lambda_3$	1553,12	193,026	-17.750024
$2\lambda_3 - \lambda_2$	1551,32	193,250	-22.237469
$\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3$	1553,92	192,926	-15.011118
$\lambda_3 + \lambda_2 - \lambda_1$	1551,12	193,275	-25.657613
$\lambda_1 + \lambda_3 - \lambda_2$	1552,72	193,075	-14.718672
$2\lambda_1 - \lambda_3$	1554,72	192,827	-24.310041
$2\lambda_3 - \lambda_1$	1550,52	193,349	-36.869544

* Datos obtenidos de la simulación.

Tabla 29. Parámetros de rendimiento caso separación desigual

Canal	Frecuencia (THz)	Potencia en recepción* (dBm)	BER	Factor Q (dB)	Apertura Promedio
1	193.0	1.005184	1×10^{-40}	23.012838	0.00246213
2	193.1	0.692649	1×10^{-40}	31.874772	0.00255956
3	193.175	1.060707	1×10^{-40}	34.009314	0.00263555

* Datos obtenidos de la simulación.

Como se observa en la tabla 28 ninguno de los productos FWM cae en las frecuencias de los canales transmitidos, por lo tanto, el rendimiento del sistema mejora en comparación con el caso de separación igual; esto se puede apreciar en la tabla 29.

La figura 79 muestra el espectro óptico en recepción y la figura 80 muestra los Diagramas de ojo en recepción de cada uno de los canales, para el caso de separación desigual.

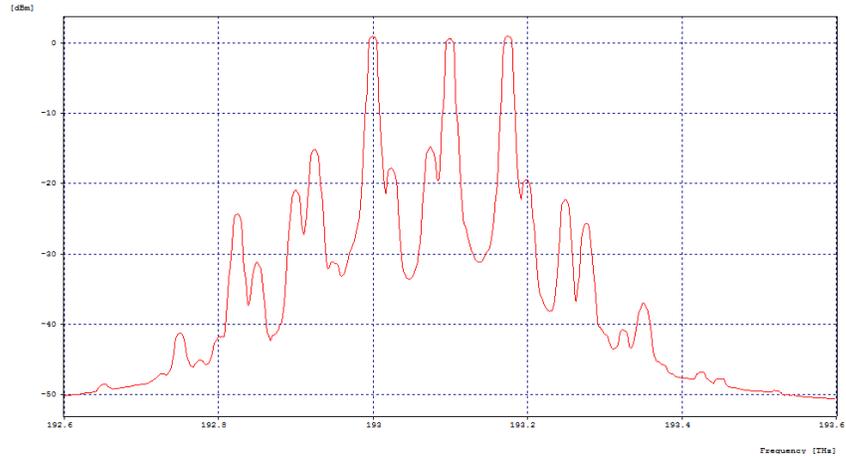
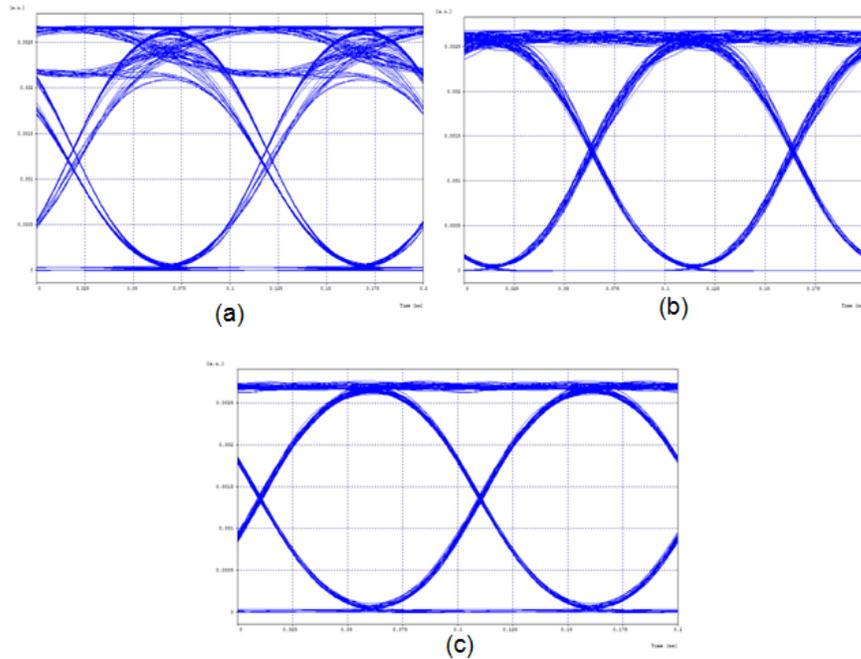


Figura 79. Espectro óptico en recepción, caso separación desigual



**Figura 80. Diagramas de ojo en recepción, caso separación desigual
(a) Canal 1, (b) Canal 2, (c) Canal 3**

- **Polarización ortogonal de los canales**

El análisis de los productos FWM en un sistema WDM con respecto a la polarización de los canales, se realizó para dos canales WDM transmitidos sobre dos tramos de fibra DS ($D=2$ ps/nm/km) de 100km cada uno. La dispersión es completamente compensada en cada tramo. Los láseres en representación de los dos canales, tienen la misma polarización inicial (a lo largo del eje X), pero la polarización de una de las fuentes se rota alrededor del

eje S2 (Y) de la esfera Poincare¹², mediante una variable fijada al dispositivo rotador de polarización (POLARIZATION_ROTATOR). La figura 81 muestra un esquema del sistema utilizado para este análisis.

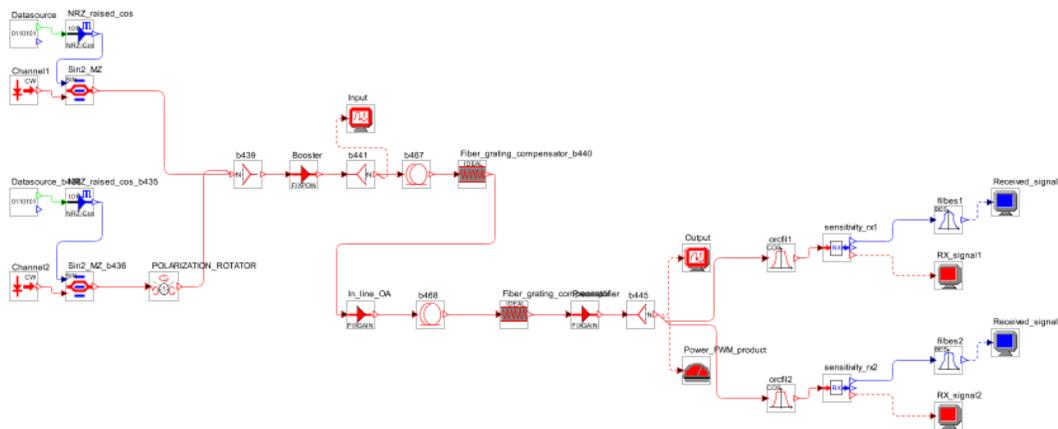


Figura 81. Esquema simulación FWM vs Polarización

Los productos FWM generados para este sistema están dados por las expresiones 18 y 19 y se presentan en la tabla 30.

$$2f_1 - f_2 \quad (18)$$

$$2f_2 - f_1 \quad (19)$$

Tabla 30. Productos FWM

Producto	Frecuencia (THz)	Potencia (dBm)				
		0 grados	45 grados	90 grados	135 grados	180 grados
2f1-f2	192.975	-13.182174	-13.628793	-16.240037	-22.059508	-28.152895
2f2-f1	193.125	-13.316062	-13.846091	-17.309051	-22.959840	-28.133668

La tabla 31 muestra la potencia de los canales en recepción para los diferentes estados de polarización.

Tabla 31. Potencia vs polarización

Canal	Frecuencia (THz)	Potencia (dBm)				
		0 grados	45 grados	90 grados	135 grados	180 grados
1	192.075	2.973249	2.991783	3.056264	3.082230	3.088046
2	193.025	2.527727	2.544270	2.597912	2.660689	2.676537

La figura 82 muestra los espectros ópticos de transmisión y recepción para diferentes estados de polarización. Se puede observar que cuando la polarización de los dos canales es ortogonal, el espectro óptico de la señal a la salida de la fibra se asemeja más al de la señal de entrada, mientras que para los otros estados de polarización dicho espectro es deteriorado debido a la presencia de las componentes generadas por FWM.

¹² Esfera de Poincare: Esfera utilizada para representar los diferentes estados de polarización de la luz.

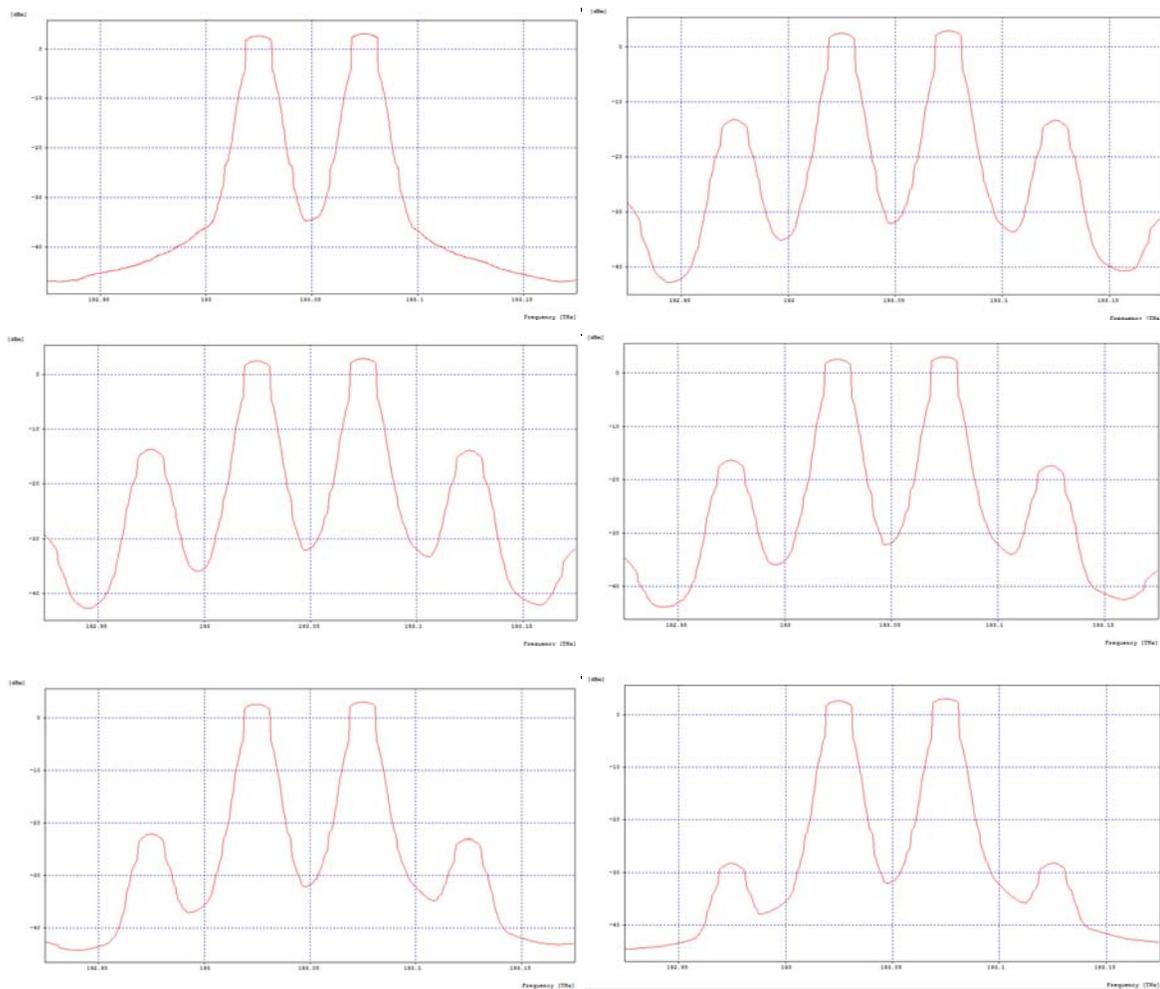


Figura 82. Espectro óptico (a) Transmisión (b) Rotación 0 (c) Rotación 45 (d) Rotación 90 (e) Rotación 135 (f) Rotación 180

La figura 83 presenta el nivel de potencia de los Productos FWM para los diferentes estados de polarización. Los resultados muestran que los productos FWM son maximizados cuando la polarización de los dos canales está alineada, y que son casi reducidos a cero cuando las dos polarizaciones son ortogonales.

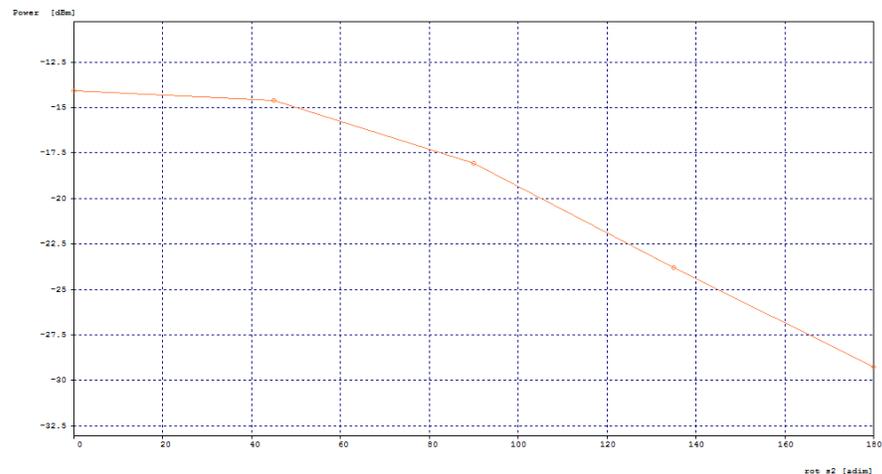


Figura 83. Productos FWM para diferentes estados de polarización

- **Utilización de fibras con bajos niveles de dispersión**

La generación de productos FWM frente a la dispersión de la fibra, se analizó para dos canales WDM transmitidos sobre dos tramos de fibra DS de 100km cada uno. La dispersión es completamente compensada en cada tramo. La dispersión de la fibra se varió de 0 a 4 ps/nm/km. La figura 84 muestra el esquema utilizado en la simulación.

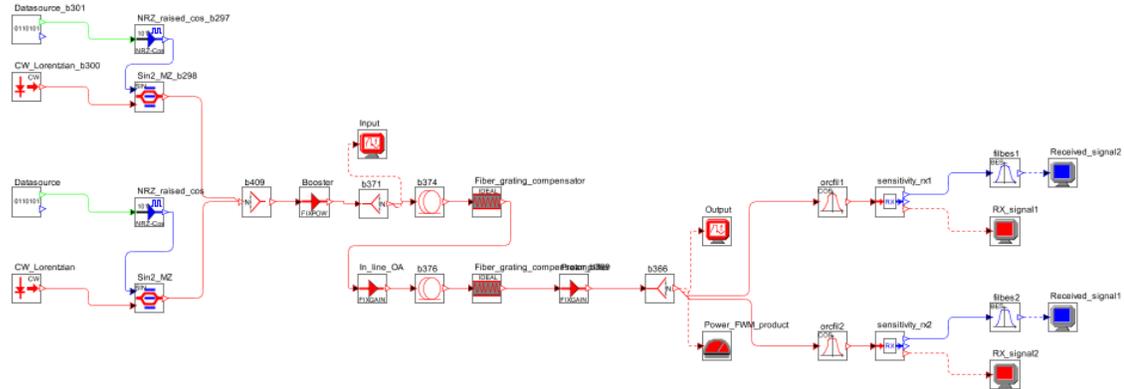
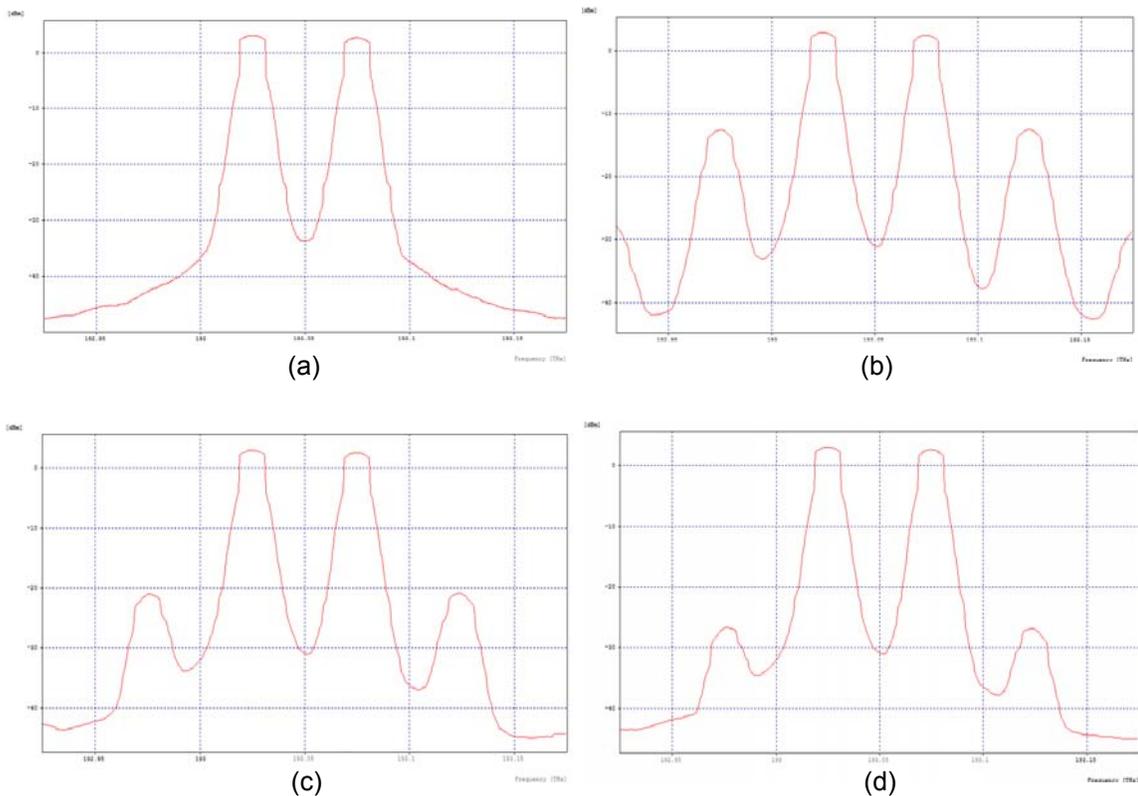


Figura 84. Esquema FWM vs Dispersión.

El espectro óptico de la señal recibida muestra que los productos FWM decrecen al aumentar la dispersión de la fibra, como se observa en la figura 85.



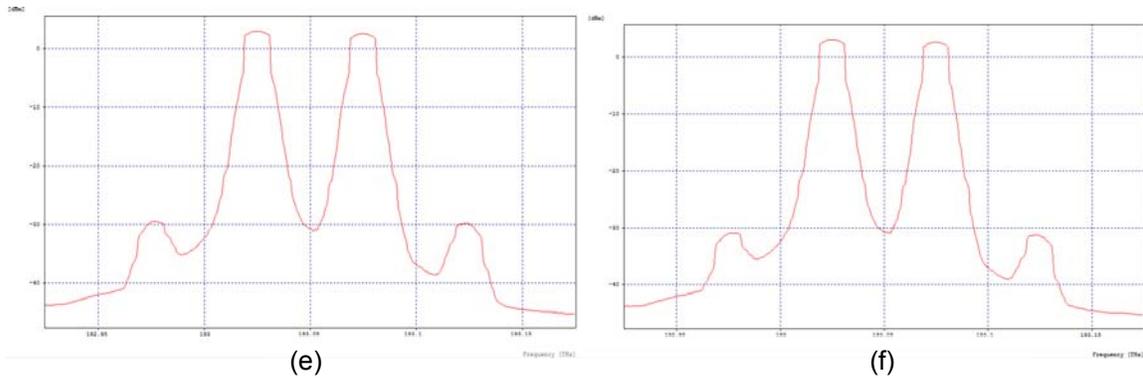


Figura 85. Espectro óptico: (a) señal transmitida, señal en recepción para (b) $D = 0$, (c) $D = 1$, (d) $D = 2$, (e) $D = 3$, (f) $D = 4$ ps/nm/km

En la figura 86 se muestra la disminución del nivel de potencia de los productos FWM a medida que se aumenta la dispersión.

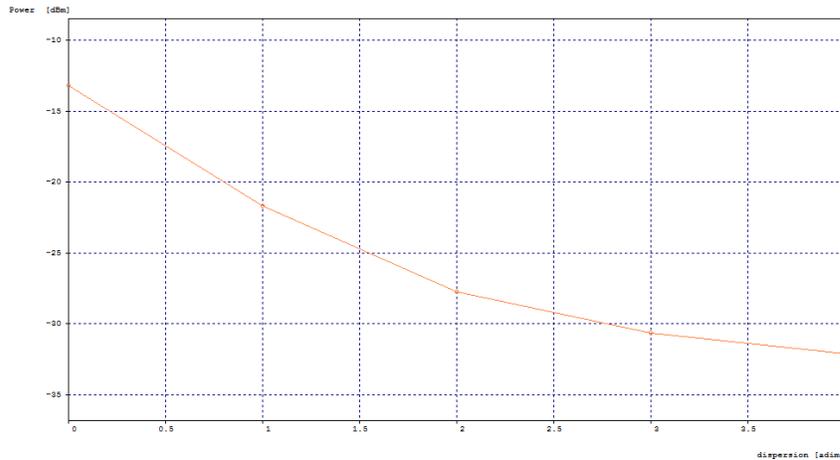


Figura 86. Nivel de potencia de los productos FWM vs Dispersión

De los resultados obtenidos se concluye que los productos FWM en un sistema WDM son más fuertes para valores bajos de dispersión, particularmente, para dispersión 0 los efectos de la FWM son maximizados debido a la adaptación de fase, mientras que al aumentar la dispersión en la fibra se incrementa la desadaptación de fase y por lo tanto disminuye el efecto FWM.

Con el fin de analizar el efecto de la SRS se simuló un sistema WDM de 16 canales transmitidos a través de una fibra mono modo de 20km con $\alpha=0$ dB/km con el fin de analizar la pérdida de potencia causada por la SRS. Todos los canales están modulados con la técnica NRZ a 10Gb/s. El espaciamiento de canales es de 100GHz. La potencia total de entrada a la fibra (P_{in}) es de 20 dBm (~ 8 dBm por canal). La figura 87 muestra el esquema empleado en la simulación. Y la figura 88 muestra el espectro óptico a la entrada de la fibra para $P_{in}=20$ dBm.

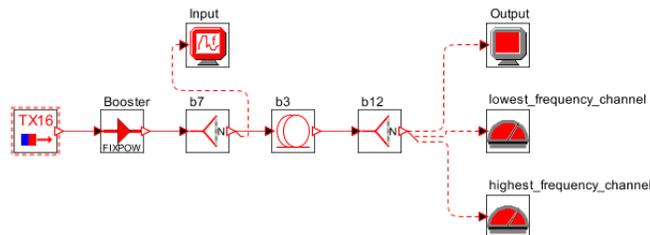


Figura 87. Esquema simulación efecto SRS

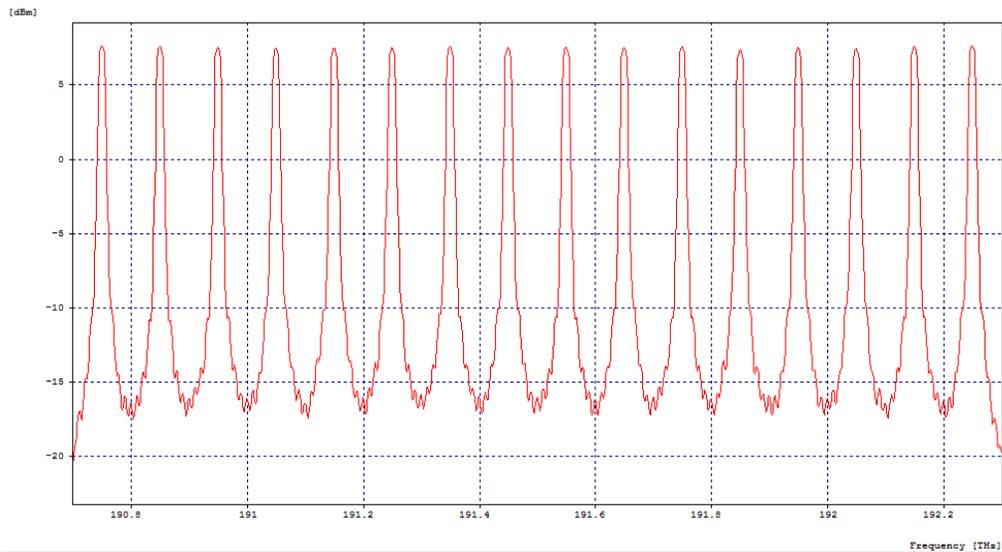


Figura 88. Espectro óptico en transmisión Pin = 20dBm

La SRS induce cross-talk en los sistemas WDM causando una redistribución de potencia entre los canales, de tal forma que para cada pareja de canales el de mayor frecuencia transfiere algo de potencia al de menor frecuencia. La magnitud de la potencia transferida depende del espaciamiento entre canales, la potencia de la señal de entrada y del coeficiente de ganancia Raman para las frecuencias involucradas [50].

Con el fin de observar el efecto de cross-talk causado por la SRS se varió el coeficiente de ganancia Raman (g_r) mediante el parámetro Raman_constant el cual se relaciona con el coeficiente de ganancia mediante la ecuación 20, donde g_r es de aproximadamente 6×10^{-13} m/w (valor de ganancia Raman para 1550nm) [50]. Se estudiaron los casos para Raman_constant igual a: 0, 0.1, 0.5 y 1. La tabla 32 presenta los valores de ganancia Raman para cada uno de los casos simulados.

$$(g_R)_{\text{new}} = (\text{Raman_constant})(g_R) \quad (20)$$

Tabla 32. Ganancia Raman

Raman_constant	Ganancia Raman
0	0
0,1	6E-14
0,5	3E-13
1	6E-13

El espectro de potencia óptica de la señal recibida muestra el *tilt* del espectro inducido por la SRS. Como se puede observar en la figura 89 el *tilt* del espectro aumenta al incrementar el coeficiente de ganancia Raman.

Se espera que para un coeficiente de ganancia 10 veces mayor se produzca un *tilt* 10 veces más grande; los resultados de la simulación muestran que el *tilt* va de ~4 dB para Raman_constant=0.1 a ~ 39dB para Raman_constant=1. Estos valores se presentan en la tabla 33.

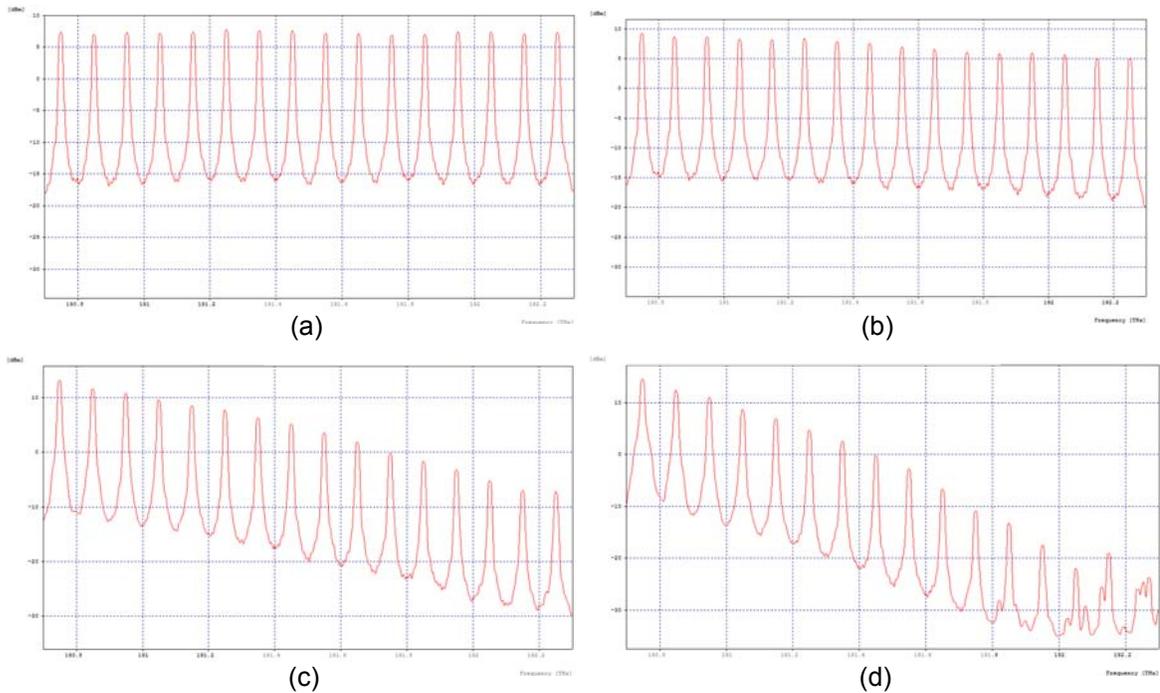


Figura 89. Espectro óptico de la señal recibida $P_{in}=20\text{dBm}$ (a) $\text{Raman_constant}=0$, (b) $\text{Raman_constant}=0.1$, (c) $\text{Raman_constant}=0.5$, (d) $\text{Raman_constant}=1$.

Tabla 33. Tilt inducido por la SRS $P_{in}=20\text{dBm}$

Raman_constant	Potencia Canal 190.75GHz (dBm)	Potencia Canal 192.25GHz (dBm)	Tilt (dB)
0	7,461932	7,380522	0,081410
0.1	9,331719	5,058839	4,272880
0.5	13,286010	-7,108011	20,394021
1	14,652645	-24,630083	39,282728

Al igual que para los demás efectos no lineales, la limitación de potencia de la señal transmitida se propone como estrategia para mitigar los efectos de la SRS. Para demostrar esto se disminuyó en 2 dB la potencia total de entrada (P_{in}) a la fibra en el sistema estudiado (conservando los demás parámetros). La figura 90 muestra el espectro óptico a la entrada de la fibra para $P_{in} = 18\text{dBm}$.

Como se aprecia en la figura 91 y la tabla 34, el *tilt* al aumentar el coeficiente de ganancia Raman es menor en comparación con los resultados obtenidos para el caso en que la potencia de entrada a la fibra es de 20dBm.

Tabla 34. Tilt inducido por la SRS $P_{in} = 18\text{dBm}$

Raman_constant	Potencia Canal 190.75GHz (dBm)	Potencia Canal 192.25GHz (dBm)	Tilt (dB)
0	5,469894	5,386279	0,083615
0.1	6,693339	3,930378	2,762961
0.5	9,999333	-3,470078	13,469411
1	11,959317	-14,062147	26,021464

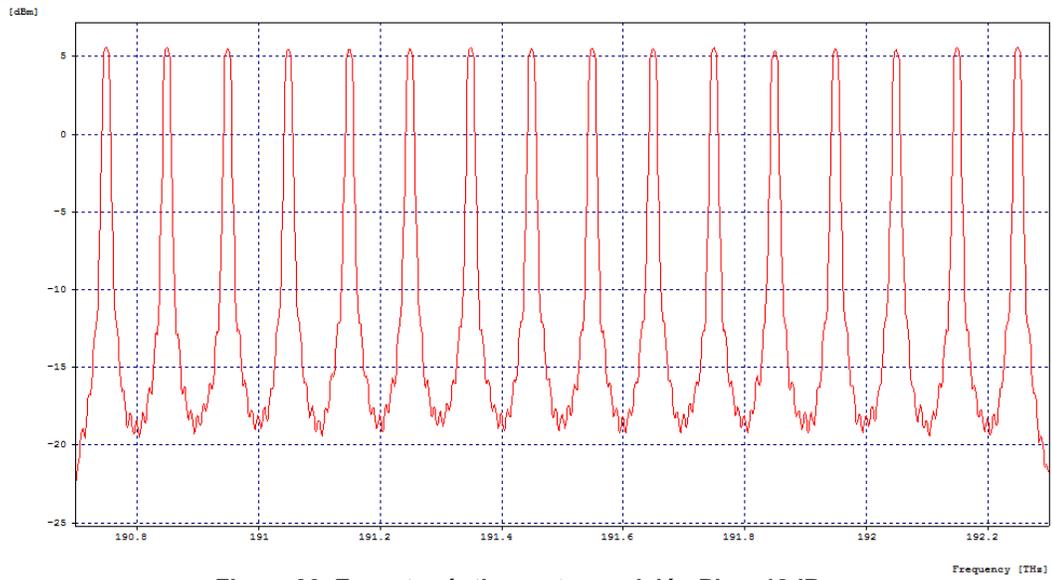


Figura 90. Espectro óptico en transmisión $P_{in} = 18\text{dBm}$

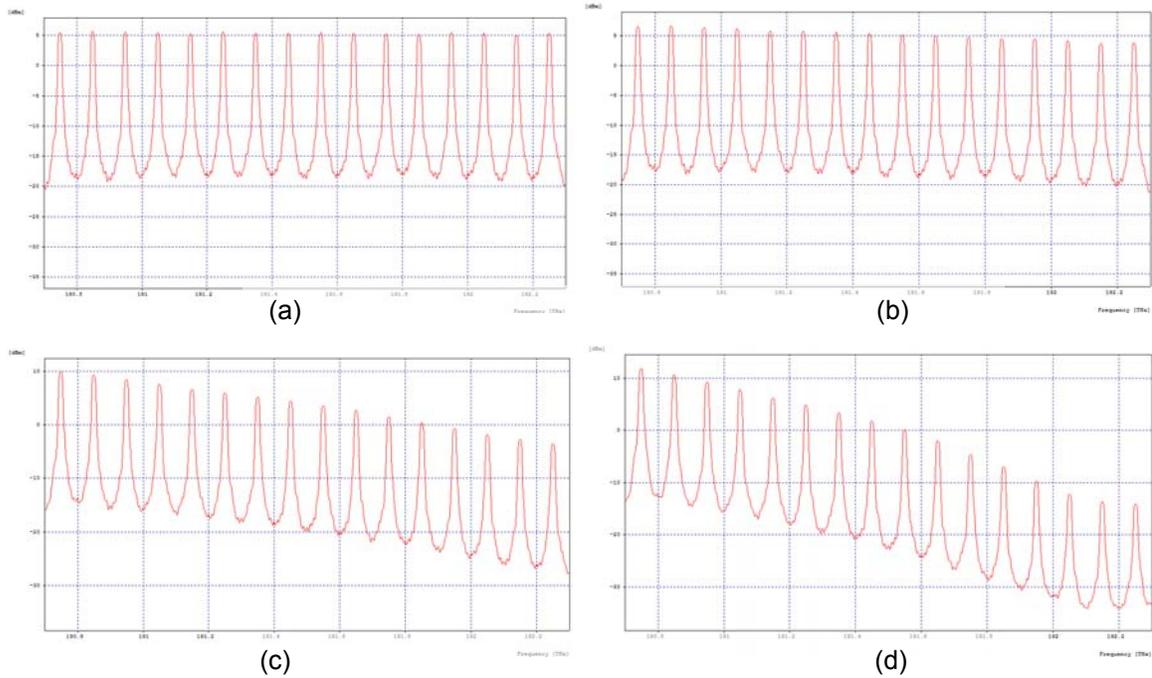


Figura 91. Espectro óptico de la señal recibida $P_{in}=20\text{dBm}$ (a) $R_{aman_constant}=0$, (b) $R_{aman_constant}=0.1$, (c) $R_{aman_constant}=0.5$, (d) $R_{aman_constant}=1$

La tabla 35 presenta los valores de potencia de entrada y salida, con el fin de determinar la pérdida de potencia de la señal transmitida para los diferentes casos simulados. De los resultados obtenidos se concluye que el margen de 0,5dB por efectos de la SRS es suficiente.

Tabla 35. Pérdida de potencia inducida por SRS

Raman_constant	Potencia Entrada (dBm)	Potencia Salida (dBm)	Pérdida de Potencia dB
0	18	17,9639	0,0343
0,1		17,9676	0,0306
0,5		17,9803	0,0179
1		17,9869	0,0113
0	20	19,9359	0,0641
0,1		19,9388	0,0612
0,5		19,9531	0,0469
1		19,9709	0,0291

Criterio 14: Determinar el número de amplificadores a utilizar y su adecuada ubicación, de tal forma que se optimice el rendimiento del sistema y la distancia de transmisión.

Este criterio se validó sobre un sistema WDM punto a punto de 10 canales separados 0.8 nm y longitud de onda central de 1550 nm, con pérdidas en la fibra de 0.23 dB/km, dispersión de 4 ps/nm/km. La velocidad de transmisión es de 10 Gb/s. Los transmisores son laser CW con modulación NRZ y potencia de -6 dBm. Los receptores son tipo PIN con una sensibilidad de -25 dBm. La figura 92 presenta un esquema del sistema anteriormente descrito.

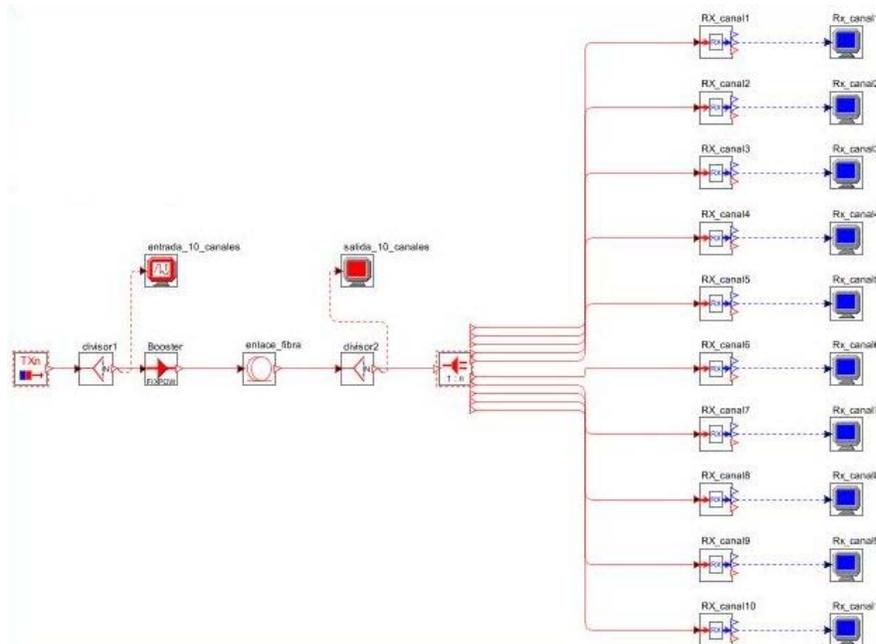


Figura 92. Sistema WDM punto a punto multicanal sin amplificación.

Se escogió como variable la distancia de transmisión con el objetivo de analizar hasta que distancia el sistema presentaba una BER adecuada (mínima de 10^{-9}). El análisis se hizo sobre el peor canal. El sistema trabaja al límite del rendimiento (BER de 10^{-9}) para una distancia de 106 km, lo cual indica que esta es la distancia máxima que se puede alcanzar sin amplificación. La tabla 36 presenta los datos de BER, Q y abertura promedio del ojo para los diez canales en esta distancia, se seleccionó como peor canal el cuatro porque presenta el factor Q y la abertura promedio más baja.

Tabla 36. Parámetros de rendimiento para el sistema sin amplificación.

Canal	BER	Factor Q (dB)	Abertura promedio del ojo
1	1,69365e-11	16,507934	6,8668e-6
2	4,05863e-9	15,378112	6,96579e-6
3	4,41485e-9	15,288132	7,06815e-6
4	4,37419e-9	15,287503	6,82058e-6
5	1,58674e-9	15,451176	6,88044e-6
6	6,73117e-10	15,660612	6,98016e-6
7	8,91462e-10	15,635596	7,02312e-6
8	2,26737e-10	15,900536	6,9466e-6
9	1,32089e-10	16,171835	6,96149e-6
10	8,67119e-11	16,314486	7,01805e-6

La figura 93 (a) y (b) presentan los diagramas de ojo para una distancia de 106 y 110 km respectivamente en el canal cuatro. Para la distancia de 110 km la BER cae a 10^{-8} , lo cual implica que el rendimiento del sistema ya no es aceptable.

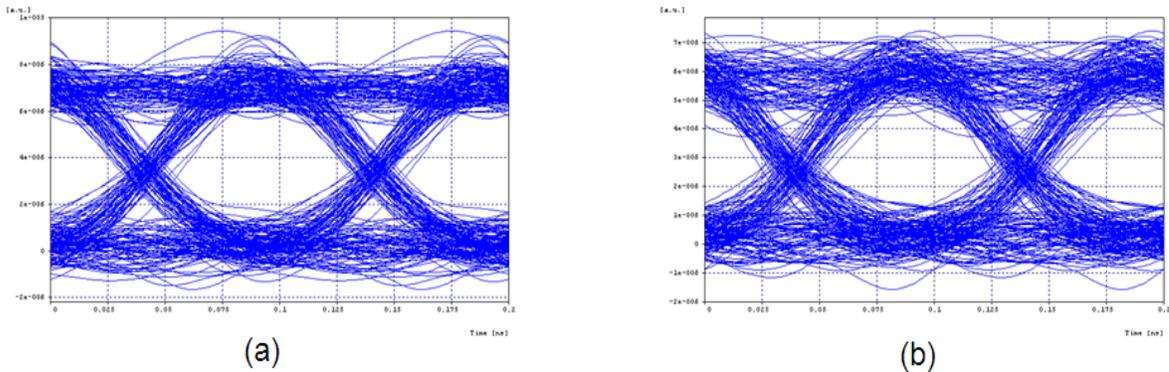


Figura 93. Diagramas de ojo para distancias de 106 y 110 km.

Para aumentar la distancia de transmisión a 300 km y mantener el rendimiento del sistema, es necesario utilizar amplificación óptica. Para determinar el número de amplificadores necesarios se emplea la ecuación 21:

$$\text{OSNR}_{\text{Final}} = P_{\text{in}} + 58 - P_s - \text{NF} - 10\log_{10}N \quad (21)$$

donde P_{in} es la potencia que entre a la fibra, P_s pérdidas de cada *span*, NF es la figura de ruido de los amplificadores que en este caso es de 5 dB y N es el número de *span*. La OSNR requerida es de 20 dB.

$$P_{\text{in}} = -6 \text{ dBm}$$

$$P_s = \frac{\text{perdidas totales}}{N} = \frac{300\text{km} * 0.23\text{dB/km}}{N} = \frac{69}{N}$$

Despejando y reemplazando valores la ecuación queda expresada de la siguiente forma:

$$\frac{69}{N} + 10\log_{10}N = 27$$

Por ensayo y error se obtiene que N es aproximadamente igual a 3.

Por lo tanto se utilizó tres tramos de fibra de 100 km y dos amplificadores con figura de ruido de 5 dB. La figura 94 presenta el esquema para este sistema. La ganancia de los amplificadores se varió entre valores de 20, 25, 30 y 35 dB y después de ver el rendimiento del sistema para estos valores se seleccionó la ganancia de 20 dB ya que presentaba el mejor funcionamiento. La tabla 37 presenta los parámetros de rendimiento del sistema (BER, factor Q, abertura promedio del ojo y OSNR) para una distancia de 300 Km. Como se puede apreciar la distancia se aumentó en un valor de 194 km y el sistema se mantuvo dentro de los límites aceptables de funcionamiento. Esto se logró gracias a la amplificación óptica. Los valores de OSNR, expresados en la tabla 37, se mantienen por encima de los 20 dB, el cual es el valor de OSNR requerida.

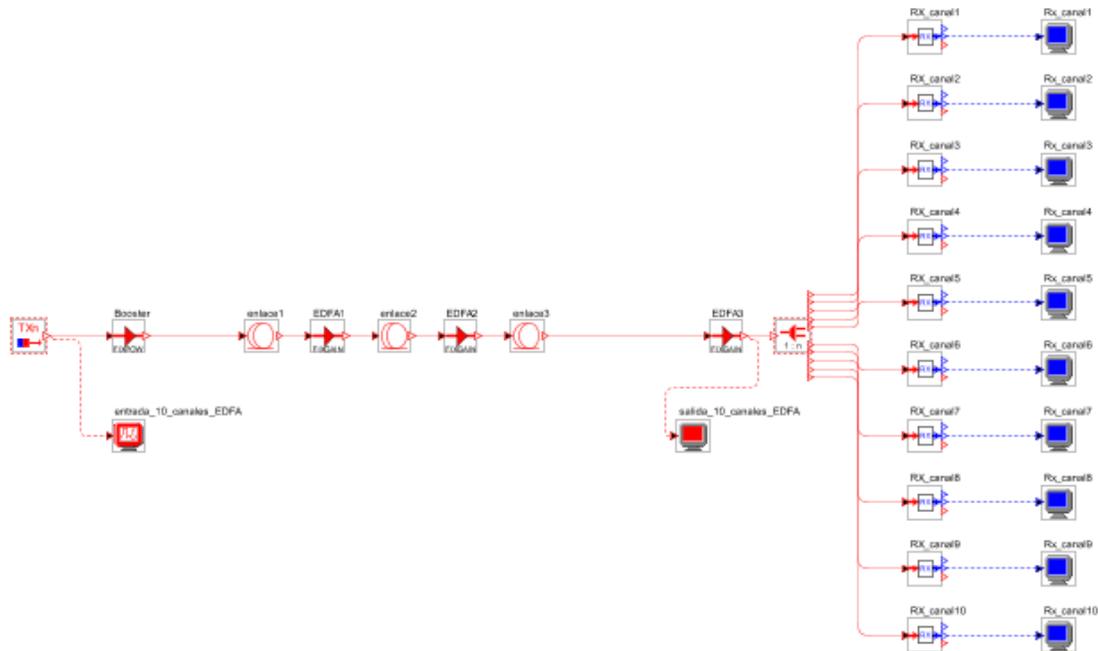


Figura 94. Sistema multicanal WDM con dos amplificadores de línea.

Tabla 37. Parámetros de rendimiento para el sistema con 2 amplificadores de línea.

Canal	BER	Q (dB)	Abertura promedio ojo	OSNR (dB)
1	1,05183e-11	16,541424	0,000236059	23,287103
2	5,81667e-12	16,832272	0,000234724	22,979781
3	6,99038e-11	16,228331	0,000238988	23,083152
4	3,95E-11	16,329012	0,00023437	22,932898
5	3,41899e-10	15,98929	0,000235932	23,512431
6	2,65273e-11	16,468646	0,000231607	23,17737
7	4,24693e-11	16,425598	0,000229531	23,339601
8	1,97987e-11	16,384908	0,000236368	23,560752
9	2,67245e-10	15,875483	0,000226294	22,794885
10	2,3549e-10	16,000897	0,000228884	22,605017

El peor canal corresponde al nueve ya que presenta el factor Q y la abertura promedio más baja. La figura 95 presenta el diagrama de ojo para el peor canal a una distancia de 300 km.

La figura 96 presenta el espectro óptico para los diez canales, los puntos indican los valores de OSNR para cada canal.

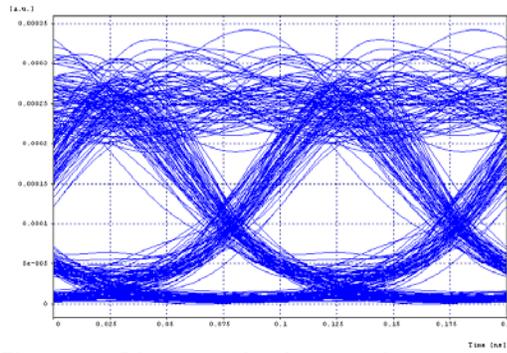


Figura 95. Diagrama de ojo para el peor canal.

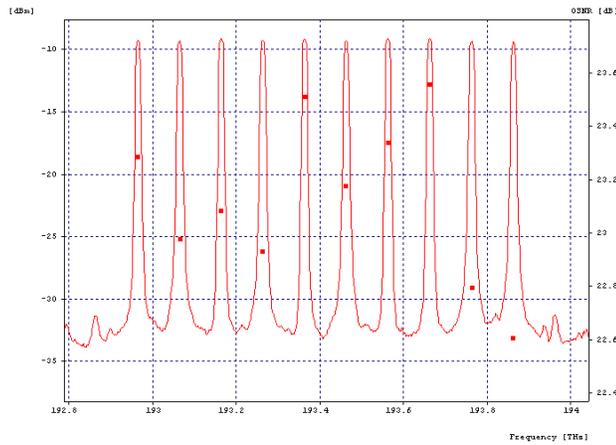


Figura 96. Espectro óptico y OSNR.

Se podría pensar que al aumentar el número de amplificadores sobre el mismo sistema se mejoraría el rendimiento, pero esto no es así ya que estos dispositivos introducen una componente de ruido y además amplifican el ruido proveniente de etapas anteriores, deteriorando la señal recibida. Esto limita el número de amplificadores a utilizar en un sistema óptico determinado. Con el objetivo de demostrar lo anterior mediante simulación agregamos otro amplificador y conservamos la configuración del sistema (potencia de transmisión de -6 dBm, distancia de transmisión de 300 km, etc.). Ahora tenemos cuatro tramos de fibra de 75 km cada uno (enlace total de 300 km) y tres amplificadores de línea. La figura 97 presenta el esquema del nuevo sistema.

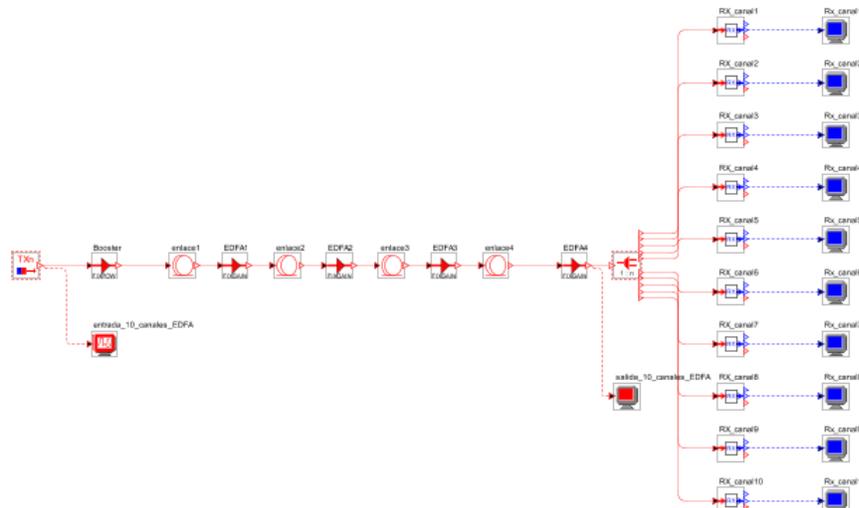


Figura 97. Sistema multicanal WDM con tres amplificadores de línea.

En la tabla 38 se puede ver los parámetros de rendimiento para este sistema. Como se puede apreciar el rendimiento del sistema cayó a límites no aceptables. El hecho de agregar otro amplificador al sistema deterioró el rendimiento ya que la amplificación de ruido se incrementó degradando la señal.

Tabla 38. Parámetros de rendimiento para el sistema con 3 amplificadores de línea.

Canal	BER	Q (dB)	Abertura promedio ojo
1	4,35675e-7	13,890321	0,0256575
2	6,42962e-6	12,93475	0,0254495
3	5,76917e-6	12,720388	0,028061
4	1,03338e-5	12,639585	0,027228
5	1,42998e-5	12,351944	0,0275266
6	3,20195e-5	12,092847	0,026926
7	2,15351e-5	12,298492	0,0266125
8	3,54595e-6	13,042963	0,026993
9	1,6934e-5	12,243852	0,0259279
10	1,18041e-5	12,527911	0,0262585

La figura 98 muestra el diagrama del ojo para el peor canal, en este caso corresponde al seis ya que presenta la peor BER y el peor factor Q.

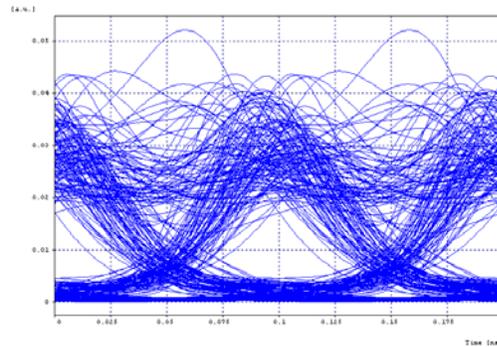


Figura 98. Diagrama de ojo para el peor canal.

La figura 99 presenta el espectro óptico para los diez canales. Los puntos indican las OSNR para los diez canales.

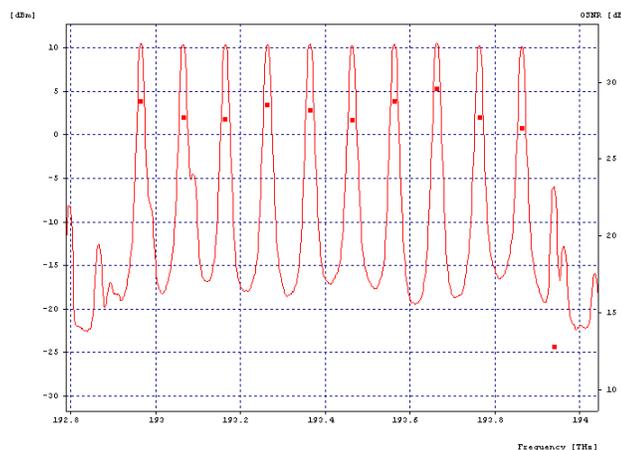


Figura 99. Espectro óptico y OSNR.

Criterio 15: La separación de canales debe ser de 100 GHz o 50 GHz según lo especifica la ITU-T, en su recomendación G.692.

Este criterio se validó sobre un sistema WDM punto a punto de 4 canales, longitud de onda central de 1550 nm, con pérdidas en la fibra de 0.23 dB/km, dispersión de 4 ps/nm/km. La velocidad de transmisión es de 10 Gb/s. Los transmisores son laser CW con modulación NRZ y potencia de -6 dBm. Los receptores son tipo PIN con una sensibilidad de -25 dBm. La figura 100 presenta un esquema del sistema anteriormente descrito.

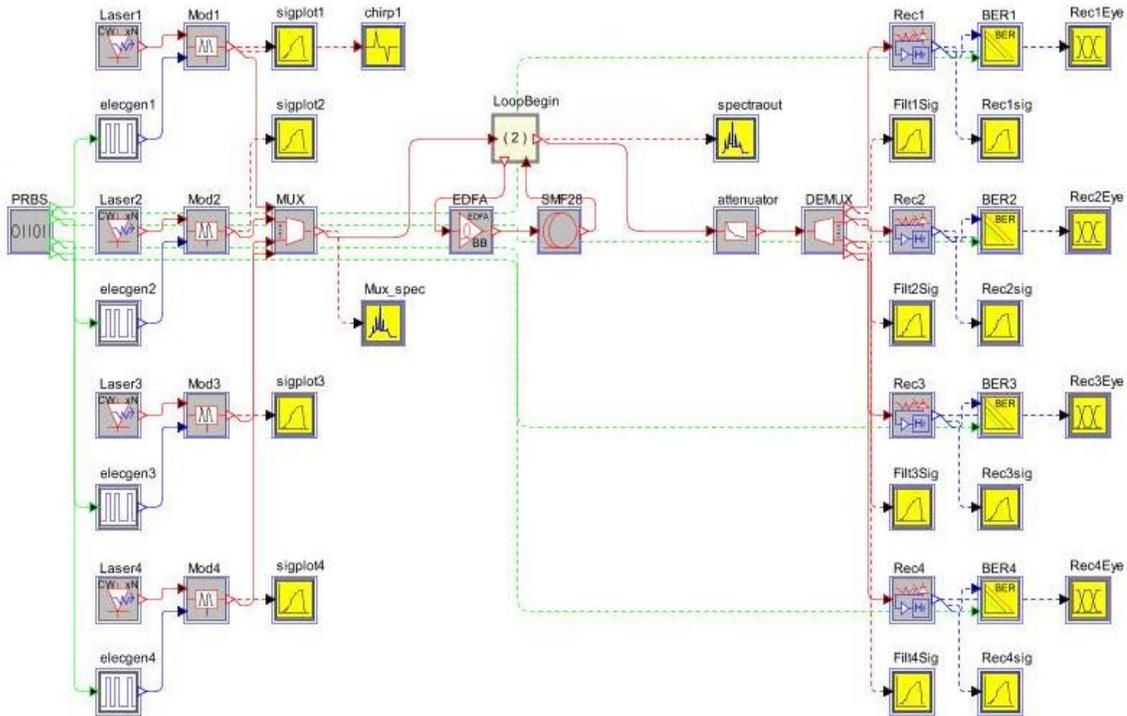


Figura 100. Sistema WDM punto a punto de cuatro canales.

Se analizó el comportamiento del sistema para separación entre los canales de 25, 50, 75 y 100 GHz para las velocidades de 2.5 y 10 Gb/s. La tabla 39 muestra los valores de BER y factor Q para las diferentes separaciones de canales y las velocidades de 2.5 y 10 Gb/s. Como se puede apreciar el comportamiento del sistema para las diferentes separaciones es mejor para la velocidad de 2.5 Gb/s que para la de 10 Gb/s. El caso más crítico se presenta para la separación de 25 GHz, ya que el sistema presenta un buen rendimiento para 2.5 Gb/s mientras que para 10 Gb/s está totalmente deteriorado. Aunque el sistema presenta un buen funcionamiento a 10 Gb/s a partir de la separación 50 GHz, el sistema siempre se comporta mejor para la velocidad de 2.5 Gbs.

De los resultados mostrados en la tabla 39, se deduce que la velocidad de transmisión es una limitante para la separación entre canales.

La figura 101 presenta los espectros ópticos para la separación de 25 GHz. La figura 101 (a) corresponde a la velocidad de 2.5 Gb/s y la figura 101 (b) a la velocidad de 10 GHz. En la figura 101 también se puede apreciar que el espectro óptico de cada canal es más amplio a 10 Gb/s que a 2.5 Gb/s.

Tabla 39. Comportamiento del sistema para las diferentes separaciones a las velocidades de 2.5 y 10 Gb/s.

Separacion canales (GHz)	Velocidad Gb/s	Canal	BER	Factor Q
25	2,5	1	6.6935e-027	1.0675e+001
		2	1.7923e-026	1.0583e+001
		3	1.0999e-026	1.0628e+001
		4	1.0258e-026	1.0635e+001
	10	1	1.0000e+000	0.0000e+000
		2	1.0000e+000	0.0000e+000
		3	1.0000e+000	0.0000e+000
		4	1.0000e+000	0.0000e+000
50	2,5	1	1.7129e-023	9.9195e+000
		2	2.8507e-023	9.8685e+000
		3	1.8078e-023	9.9141e+000
		4	1.6337e-023	9.9242e+000
	10	1	4.9575e-019	8.8361e+000
		2	3.8467e-019	8.8644e+000
		3	5.4685e-019	8.8251e+000
		4	9.9453e-019	8.7579e+000
75	2,5	1	1.4785e-025	1.0383e+001
		2	3.3116e-025	1.0306e+001
		3	1.6405e-025	1.0373e+001
		4	3.3275e-025	1.0305e+001
	10	1	2.9990e-018	8.6326e+000
		2	2.4143e-018	8.6573e+000
		3	1.2589e-018	8.7313e+000
		4	4.7302e-019	8.8413e+000
100	2,5	1	1.9940e-025	1.0355e+001
		2	3.5902e-025	1.0298e+001
		3	2.7168e-025	1.0325e+001
		4	3.2025e-025	1.0309e+001
	10	1	2.8948e-018	8.6366e+000
		2	1.3703e-018	8.7217e+000
		3	7.4241e-019	8.7908e+000
		4	9.7969e-019	8.7596e+000

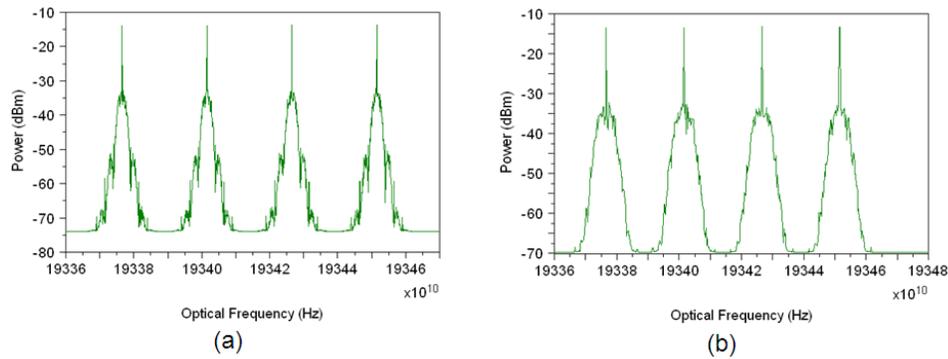


Figura 101. Espectro óptico para una separación de canales de 25 GHz.

La figura 102 presenta los espectros ópticos para la separación de 100 GHz. La figura 102 (a) corresponde a la velocidad de 2.5 Gb/s y la figura 102 (b) a la velocidad de 10 Gb/s.

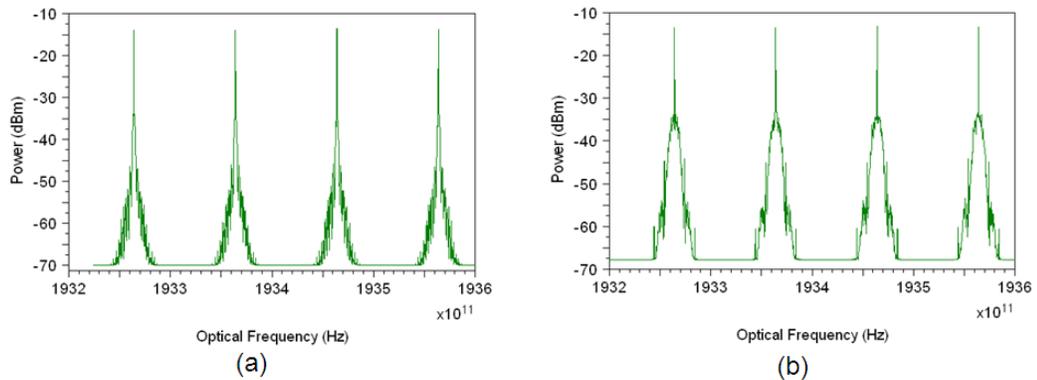


Figura 102. Espectro óptico para una separación de canales de 100 GHz.

La figura 103 muestra los datos de BER y factor Q para el canal 1 a diferentes separaciones de canal y para las dos velocidades de transmisión. El eje X lo representa la variable df que indica la separación entre canales. Los datos para la velocidad de transmisión de 2.5 Gb/s están representados por el color rojo y para la velocidad de 10 Gb/s el color azul.

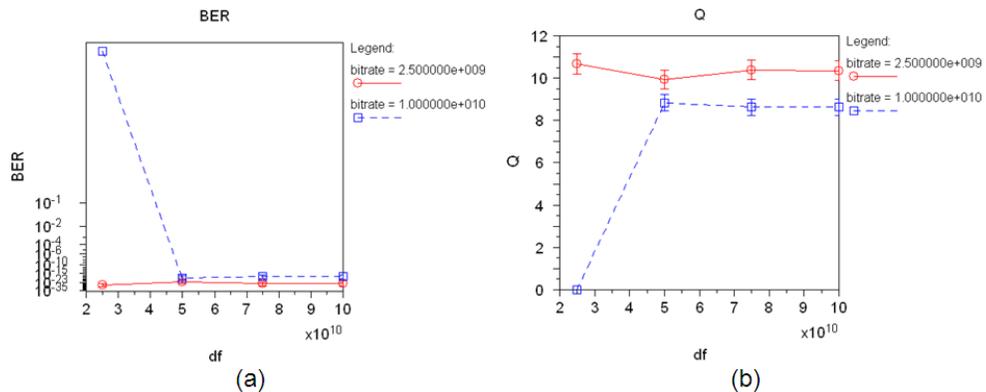


Figura 103. BER y factor Q para el canal 1.

La figura 104 muestra los diagramas de ojo para el canal 1 a una separación de 25 GHz. La figura 104 (a) representa el diagrama de ojo para la velocidad de 2.5 Gb/s y la figura 104 (b) representa el diagrama de ojo para la velocidad de 10 Gb/s.

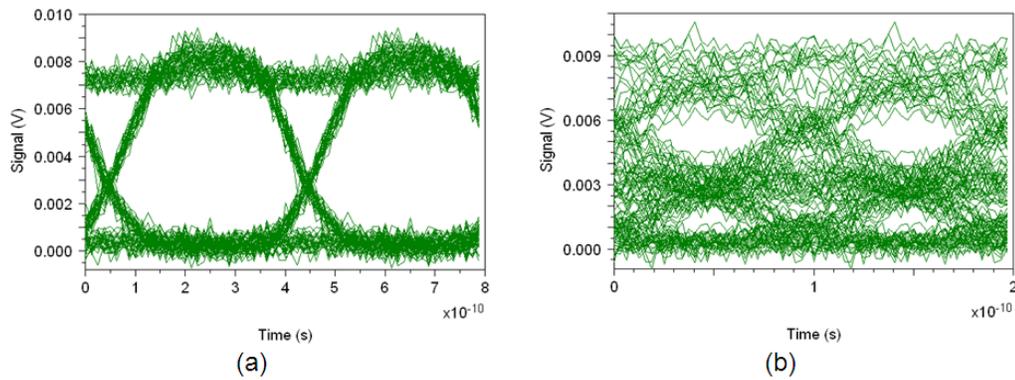


Figura 104. Diagramas de ojo para el canal 1 a una separación de 25 GHz.

La figura 105 muestra los diagramas de ojo para el canal 1 a una separación de 100 GHz. La figura 105 (a) representa el diagrama de ojo para la velocidad de 2.5 Gb/s y la figura 105 (b) representa el diagrama de ojo para la velocidad de 10 Gb/s.

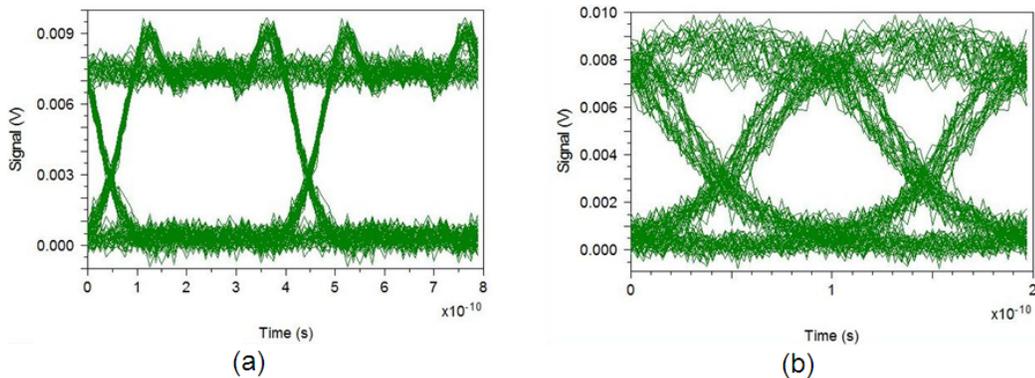


Figura 105. Diagramas de ojo para el canal 1 a una separación de 100 GHz.

Analicemos ahora el efecto de la separación de canales sobre la FWM. Este análisis se hizo para tres canales. Al canal 2 se le fijó una frecuencia de $f_1 = 193.41449$ THz ($\lambda_1 = 1550$ nm) y para los otros dos (primero y tercero) las frecuencias se varían dependiendo de las separaciones entre los canales. El enlace total de fibra óptica es de 200 km, la potencia de transmisión es de -10 dBm, el formato de modulación es NRZ y la velocidad de transmisión es de 10 Gb/s. La figura 106 representa el esquema del sistema. La tabla 40 muestra los valores de frecuencia y longitud de onda para los tres canales a las separaciones de 25, 50, 75 y 100 GHz.

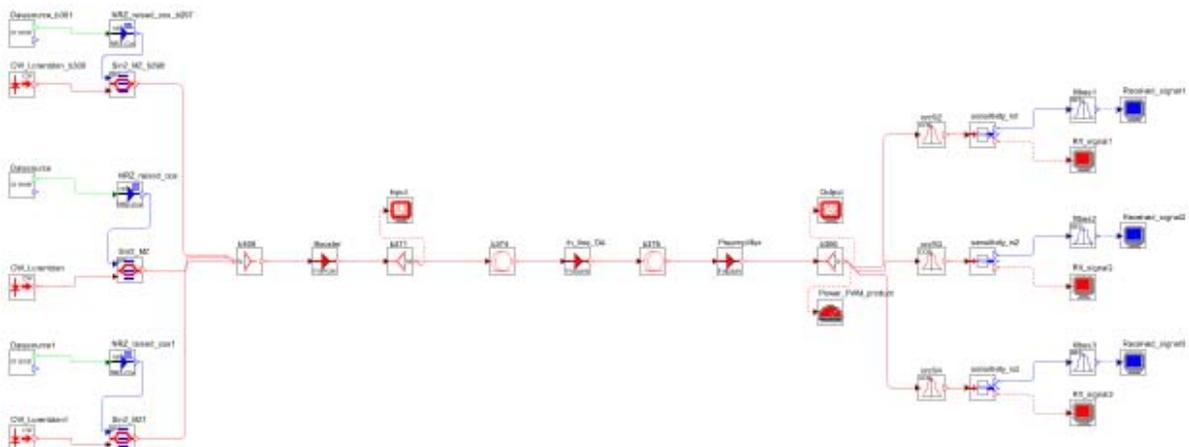


Figura 106. Sistema WDM de tres canales.

Tabla 40. Valores de los canales para diferentes separaciones.

Separación de 25 GHz		
canal	frecuencia (THz)	longitud de onda (nm)
1	193,389489	1550,2
2	193,414489	1550,0
3	193,439489	1549,8
Separación de 50 GHz		
1	193,364489	1550,4
2	193,414489	1550,0
3	193,464489	1549,6
Separación de 75 GHz		
1	193,339489	1550,6
2	193,414489	1550,0
3	193,489489	1549,4
Separación de 100 GHz		
1	193,314489	1550,8
2	193,414489	1550,0
3	193,514489	1549,2

Las figuras 107 (a), (b), (c) y (d) representan los espectros ópticos para las separaciones entre canales de 25, 50, 75 y 100 GHz. Como los canales se encuentran igualmente espaciados, algunos de los productos generados por FWM caerán sobre los canales inyectados en la fibra, los otros productos FWM a pesar de no caer en los canales de transmisión causarán problemas de *crosstalk* distorsionando los canales de interés. Como se puede apreciar en la figura 107, entre menor sea la separación entre los canales, los productos FWM caerán más cerca de los canales de transmisión y de esta manera el *crosstalk* se incrementará.

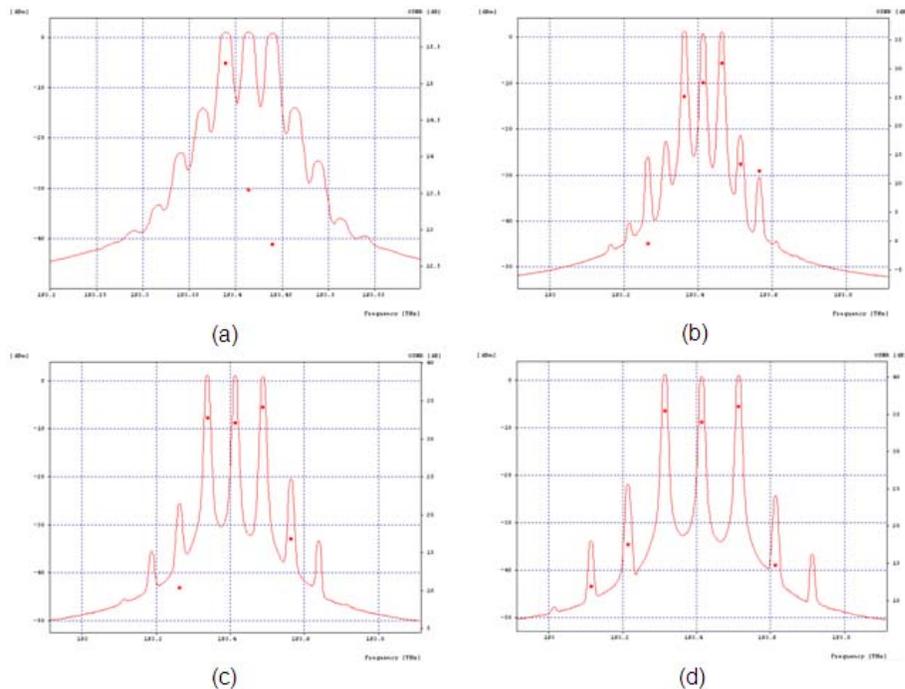


Figura 107. Espectro óptico para las diferentes separaciones.

La tabla 41 presenta los parámetros de rendimiento para los tres canales a las diferentes separaciones. Como se puede apreciar en la tabla 41, el canal 2 es el más afectado y esto se debe a que interactúa con los canales 1 y 3, los cuales tienen mayor potencia comparados con los productos FWM que afectan a estos canales. Esto se puede ver en la figura 107. De esta forma, el efecto de *crossstalk* es más perjudicial para el canal 2. Esta tabla también demuestra que el sistema presenta el mejor comportamiento para la separación de 100 GHz y el peor comportamiento para la separación de 25 GHz. La figura 108 (a) y (b) refuerza lo anterior mostrando los diagramas de ojo para las separaciones entre canales de 25 y 100 GHz respectivamente. Por lo tanto a mayor separación entre canales el efecto de la FWM cae.

Tabla 41. Parámetros de rendimiento para las diferentes separaciones.

Separación de 25 GHz				
canal	BER	Factor Q	Abertura promedio del ojo	OSNR
1	2,45503E-16	18,138265	0,00243248	15,280701
2	5,78941E-06	12,660575	0,00275941	13,551092
3	2,86506E-12	16,69493	0,00244424	12,812671
Separación de 50 GHz				
1	1E-40	27,183636	0,00262959	25,243706
2	2,29509E-22	19,679278	0,00255629	27,59932
3	1E-40	25,922105	0,00265356	30,930771
Separación de 75 GHz				
1	1E-40	23,168229	0,002563	32,803312
2	3,99429E-12	16,861759	0,00277399	32,183441
3	6,00513E-37	22,075811	0,00253544	34,172536
Separación de 100 GHz				
1	1E-40	32,900705	0,00262018	35,557906
2	1E-40	28,960028	0,00261303	34,040289
3	1E-40	32,32471	0,00264357	36,011717

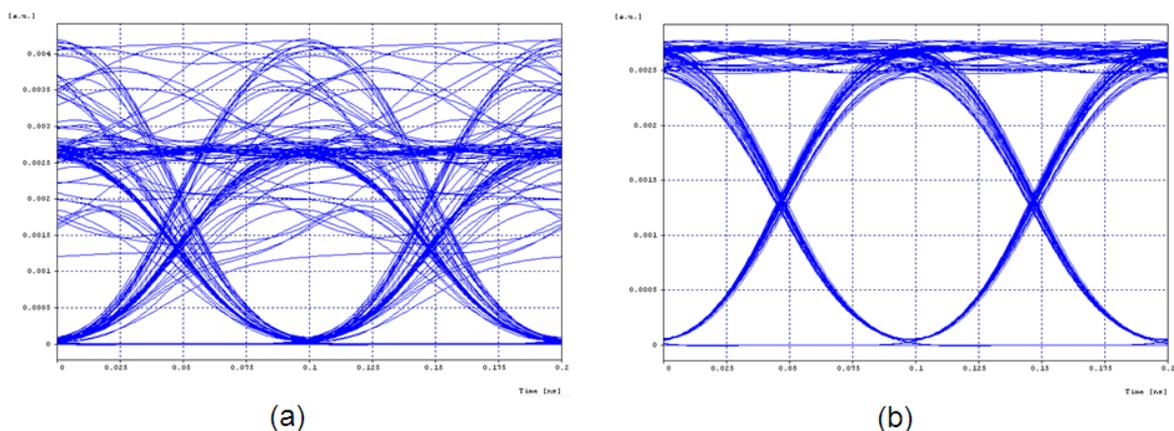


Figura 108. Diagramas de ojo para las separaciones entre canales de 25 y 100 GHz.

El análisis del efecto de la XPM con respecto a la separación de canales se realizó sobre el sistema descrito en el criterio 13. El esquema para este sistema lo muestra la figura 72. Se trabajó con dos canales cuya separación se varía entre valores de 25, 50, 75 y 100 GHz. La tabla 42 muestra los valores de frecuencia y longitud de onda para cada canal a estas separaciones.

Tabla 42. Canales para las diferentes separaciones.

Separación (GHz)	canal	frecuencia (THz)	longitud de onda (nm)
25	1	193,0125	1553,2282
	2	193,0375	1553,02704
50	1	193,025	1553,12762
	2	193,075	1552,72541
75	1	193,0375	1553,02704
	2	193,1125	1552,42389
100	1	193,05	1552,92649
	2	193,15	1552,12249

La tabla 43 muestra los parámetros de rendimiento para el canal 1 (canal de prueba) a las diferentes separaciones entre canales. A medida que se aumenta la separación entre los canales en cierta medida el rendimiento mejora, pero solo cuando llega a la separación de 100 GHz el funcionamiento es aceptable ya que presenta una BER de 10^{-10} .

Tabla 43. Parámetros de rendimiento para el canal de prueba.

Separación (GHz)	BER	Factor Q (dB)	Abertura
25	0,0227501	6,0206	0,000231121
50	0,00404578	8,171797	0,000217914
75	0,00577833	7,4834	0,000227582
100	2,24411E-10	16,011543	0,000141614

Las figuras 109 (a), (b), (c) y (d) presentan los diagramas de ojo para el canal de prueba a las separaciones de 25, 50, 75 y 100 GHz respectivamente. A mayor separación de canales el efecto de la XPM se disminuye. Para una separación de 100 GHz este efecto se reduce a un nivel tal que permite un rendimiento aceptable (BER de 10^{-10}) del sistema, mientras que para las otras separaciones el efecto de la XPM tiene gran influencia sobre el rendimiento del sistema.

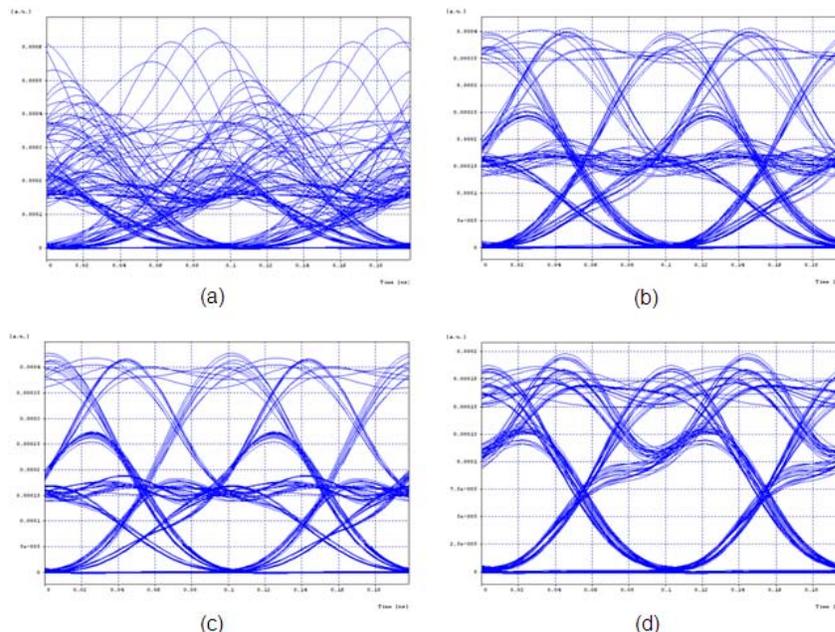


Figura 109. Diagramas de ojo para el canal de prueba a las diferentes separaciones.

Criterio 16: Utilizar compensación de la dispersión con el fin de combatirla en el enlace total.

COMPENSACIÓN DE DISPERSIÓN MEDIANTE EL USO DE FIBRAS DCF

Típicamente se utiliza una fibra DCF de 10 a 20km de longitud induciendo dispersión negativa para compensar la dispersión positiva acumulada sobre 60 a 80km de longitud de fibra SMF. Esta técnica se puede emplear en tres configuraciones distintas conocidas como Pre-compensación, Post-compensación y Compensación Simétrica.

La simulación de estas técnicas de compensación se realizó para un canal con longitud de onda 1550nm operando a 10Gb/s. La configuración del enlace óptico varía para cada técnica. La figura 110 muestra el esquema del sistema utilizado para simular las técnicas de pre- y post-compensación.

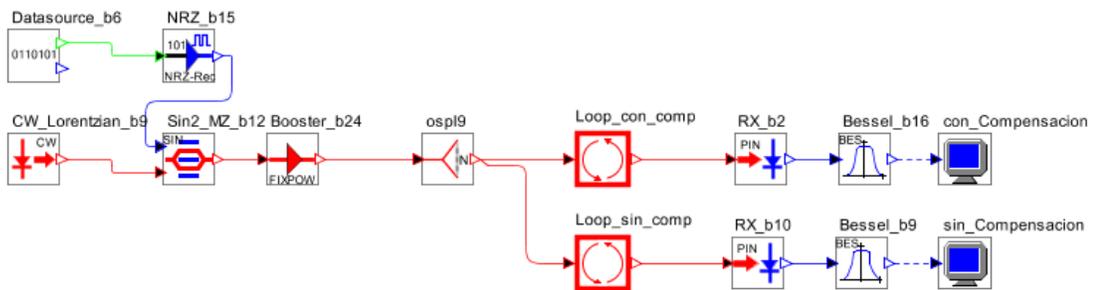


Figura 110. Esquema pre y post compensación

El enlace óptico en pre-compensación consta de dos tramos; en cada tramo 120km de fibra ($D=16$ ps/nm/km) son compensados por 24km de fibra DCF ($D=-80$ ps/nm/km) ubicados antes de los 120km (Longitud total del enlace 144km). Mientras que para post-compensación los 24km de fibra DCF se ubican después de los 120km. La figura 101 muestra el esquema de los enlaces ópticos simulados.

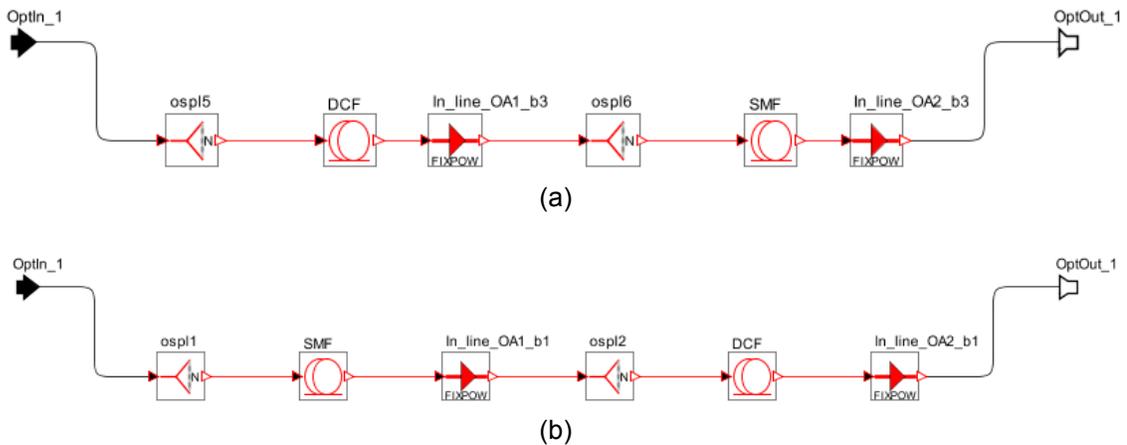


Figura 111. Enlace óptico (a) pre-compensación, (b) post-compensación

La compensación simétrica consiste en la utilización de pre-compensación y post-compensación en el enlace óptico. Esta forma de compensación DCF se simuló para el esquema presentado en la figura 112, donde en el primer tramo del enlace se emplea el enlace descrito en el estudio de pre-compensación y en el segundo tramo se emplea el de post-compensación.

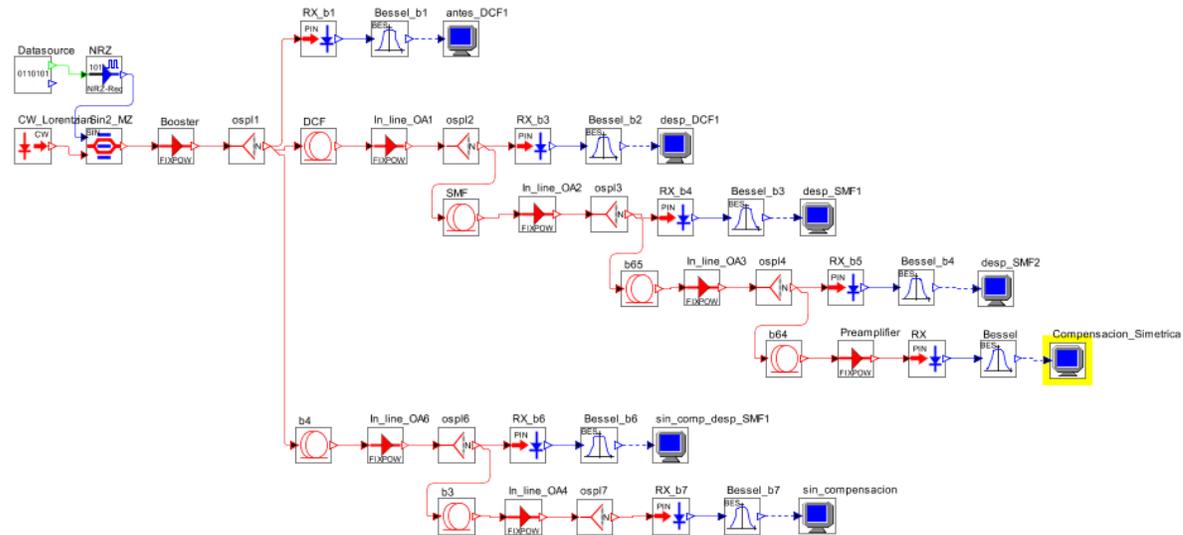


Figura 112. Esquema Compensación Simétrica

Los diagramas de ojo (y su respectivo histograma) obtenidos para el sistema sin compensación y para los casos de pre-compensación, post-compensación y compensación simétrica se muestran en la figura 113. Como se puede apreciar el rendimiento del sistema mejora considerablemente al emplear alguna de las configuraciones de compensación DCF.

La tabla 44 presenta los parámetros de rendimiento (BER, Factor Q y Abertura promedio del ojo) obtenidos para cada una de las formas de compensación DCF.

Tabla 44. Parámetros de rendimiento Compensación DCF

Compensación	BER	Factor Q (dB)	Abertura Promedio
Pre-	1×10^{-40}	32.851464	0.00549865
Post-	1×10^{-40}	31.853025	0.00539305
Simétrica	1×10^{-40}	32.563354	0.00551342

Comparando los resultados obtenidos se ve que el esquema de pre-compensación produce un leve mejoramiento en el rendimiento sobre la post-compensación, como lo evidencia la apertura del ojo y el factor Q. Esto se debe a que la pre-compensación disminuye la potencia de la señal más rápido que la post-compensación debido a la alta atenuación de la DCF, y a que la señal experimenta dispersión normal mientras su potencia es mayor, mientras que en post-compensación, la potencia de la señal decae más lentamente en la SMF y experimenta dispersión anómala mientras la potencia de la señal es mayor.

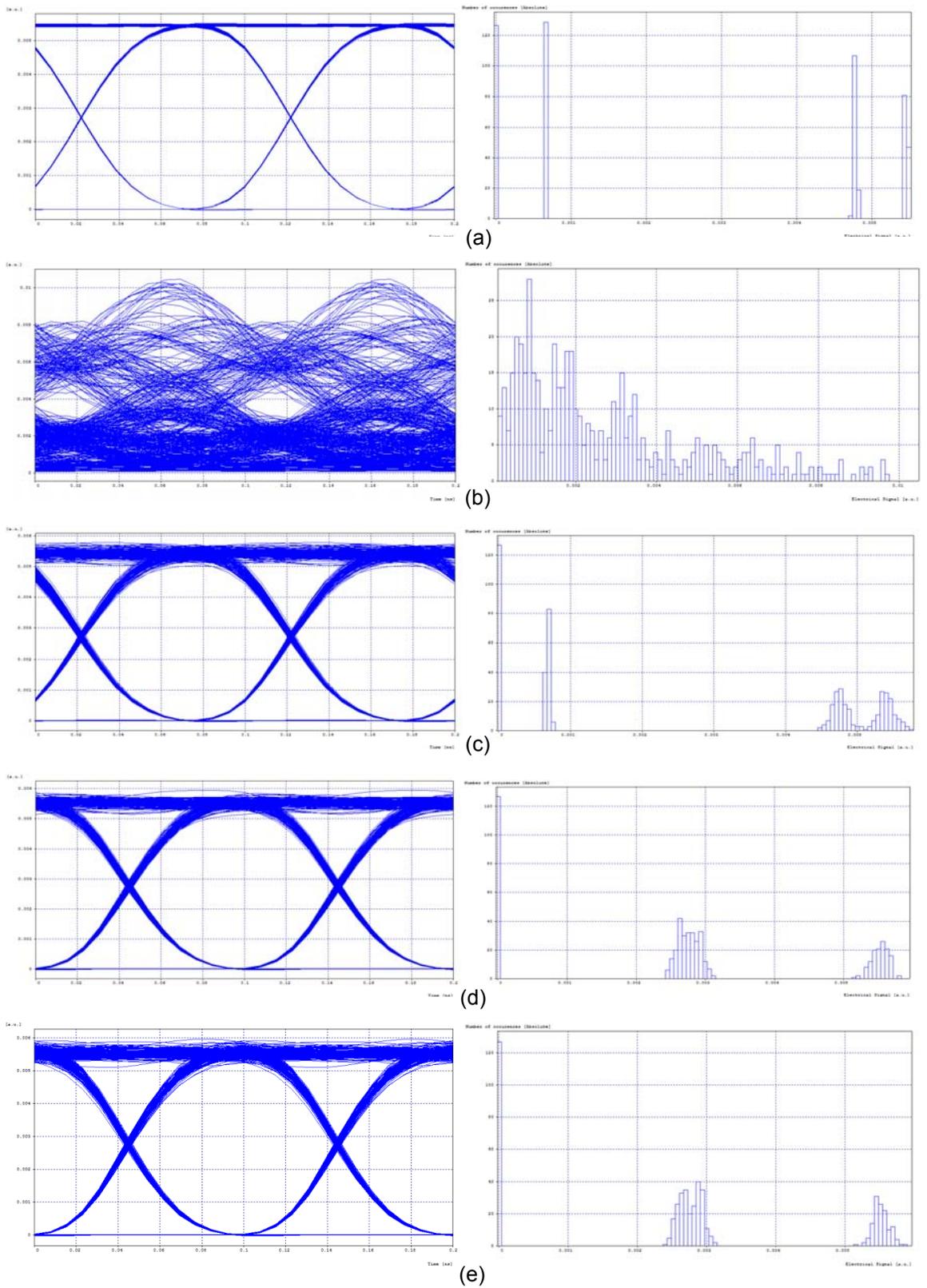
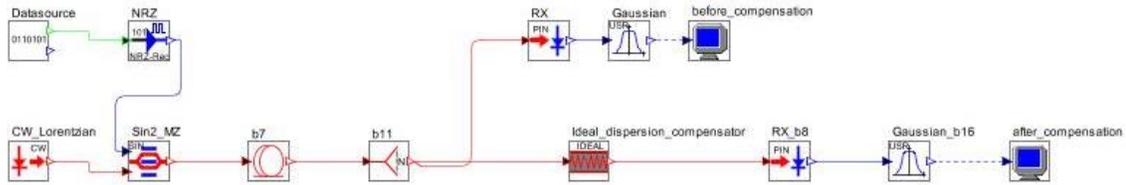


Figura 113. Esquema Compensación Simétrica Diagramas de ojo e histograma (a) Transmisión, (b) Sin compensación, (c) Pre-compensación, (d) Post-compensación, (e) compensación simétrica.

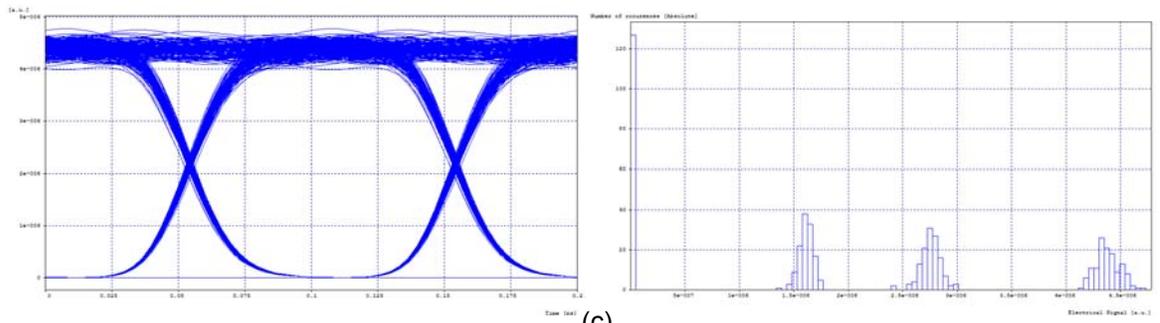
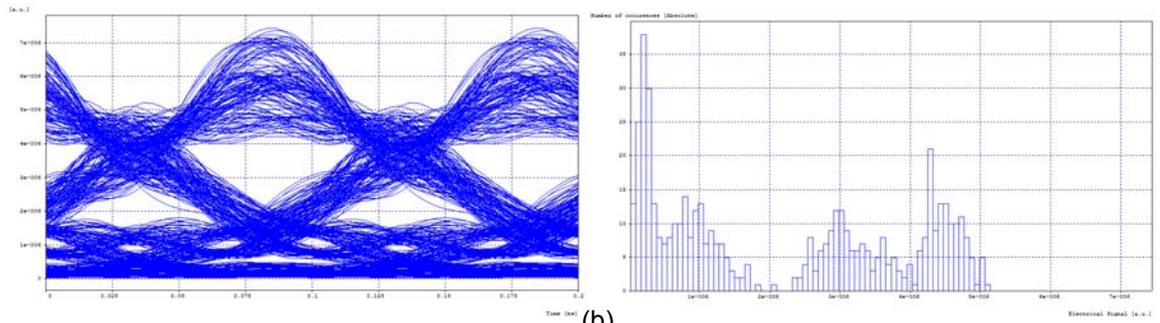
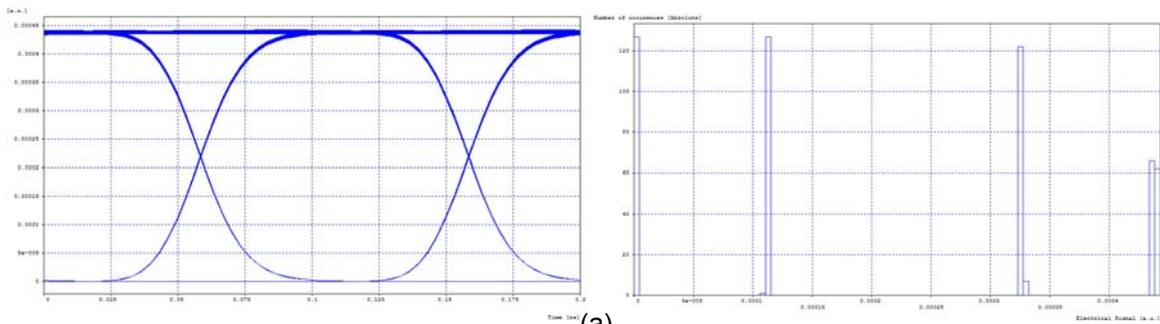
COMPENSACIÓN DE DISPERSIÓN MEDIANTE EL USO DE REDES DE DIFRACCIÓN BRAGG

OptSim cuenta con un componente de fibra de difracción (*fiber_grating*) el cual permite simular un dispositivo compensador de dispersión ideal. La figura 114 muestra el esquema simulado. En este sistema una señal NRZ a 10Gb/s es transmitida a través de 100km de fibra SSMF ($D=16\text{ps/nm/km}$, $\alpha=0.2\text{dB/km}$).



(a)
Figura 114. Esquema simulación redes de difracción Bragg

La figura 115 muestra el diagrama de ojo en transmisión y recepción y su correspondiente histograma para el sistema simulado. Como se puede observar el rendimiento del sistema tiene una gran mejoría al utilizar fibras FBG como técnica de compensación.



(a) (b) (c)
Figura 115. Diagrama de Ojo e Histograma Transmisión, (b) Sin compensación, (c) Con Compensación FBG

COMPENSACIÓN DE DISPERSIÓN MEDIANTE LA TÉCNICA DE INVERSIÓN ESPECTRAL

Otra técnica de compensación de dispersión es la inversión espectral o conjugación de fase. Para ver el desempeño de esta técnica se simuló la transmisión de una señal NRZ a 10Gb/s sobre un enlace compuesto por dos tramos de fibra de 100km ($D=16\text{ps/nm/km}$) cada uno y un conjugador óptico de fase (OPC - Optical Phase Conjugator) ubicado en la mitad del enlace. En la figura 116 se presenta el esquema del sistema simulado.

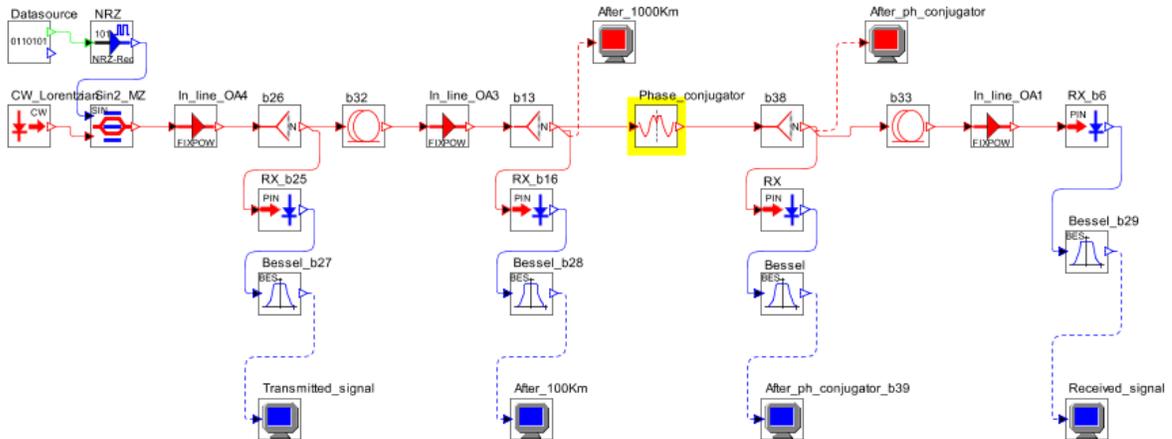
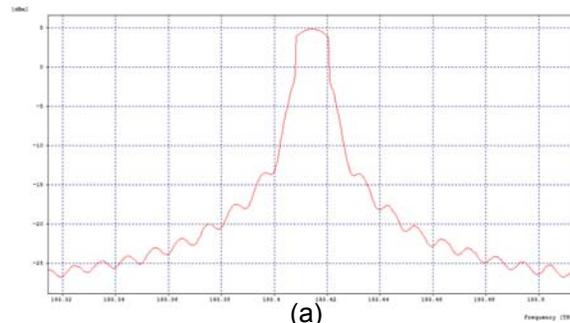
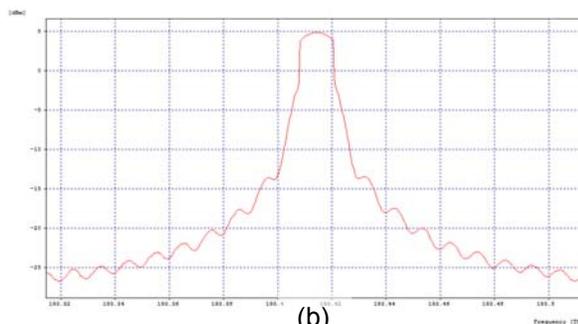


Figura 116. Esquema simulación Inversión Espectral

La figura 117 muestra el espectro óptico de la señal antes y después del conjugador, y la figura Desviación de Fase muestra las gráficas de desviación de fase instantánea de la señal antes (curva roja) y después (curva verde) del conjugador. Como se puede observar en la figura 118 la fase de la señal transmitida es completamente invertida por el conjugador y por lo tanto el espectro de la señal después del OPC corresponde a la imagen espejo del espectro de entrada; y dado que la dispersión acumulada en el segundo tramo del enlace coincide con la dispersión del primer tramo, la forma original del espectro es restaurada al final del enlace.



(a)



(b)

Figura 117. Espectro óptico (a) antes del conjugador (b) después del conjugador

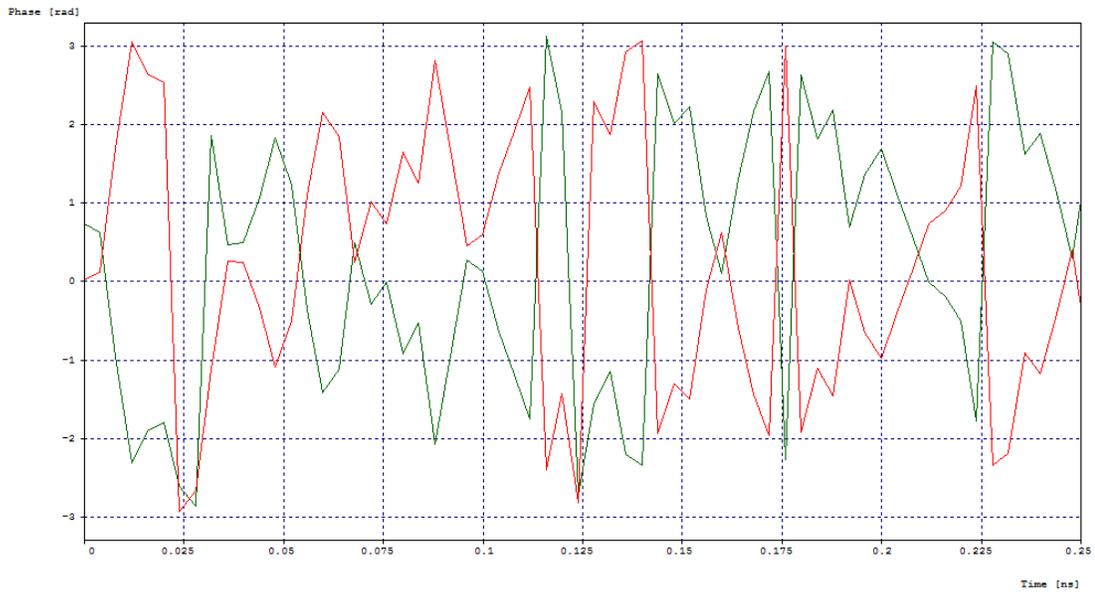


Figura 118. Desviación de Fase Antes (rojo) Después (verde) del conjugador

Después de 100km el diagrama de ojo muestra un ojo completamente cerrado, debido a la acumulación de dispersión cromática. Sin embargo, después del conjugador de fase y otro enlace de fibra como el primero, el ojo recibido está completamente abierto. Este resultado confirma la teoría que dice que un conjugador de fase ubicado entre dos tramos de fibra iguales puede compensar completamente la dispersión. La figura 119 muestra el diagrama de ojo de la señal en transmisión y su respectivo histograma.

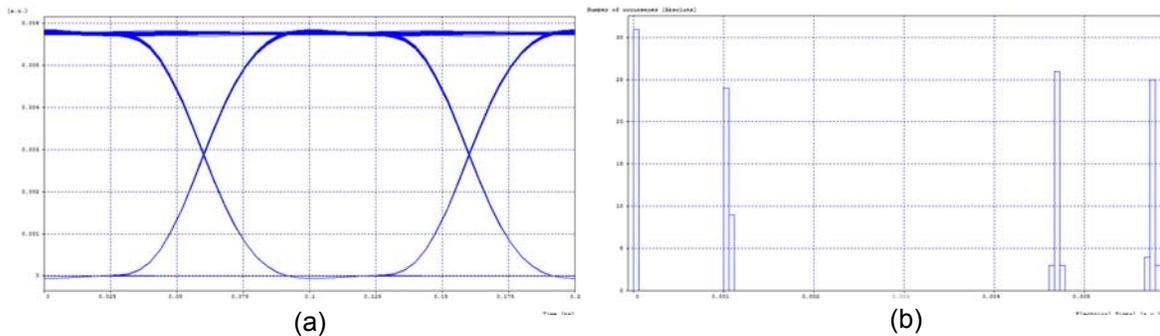
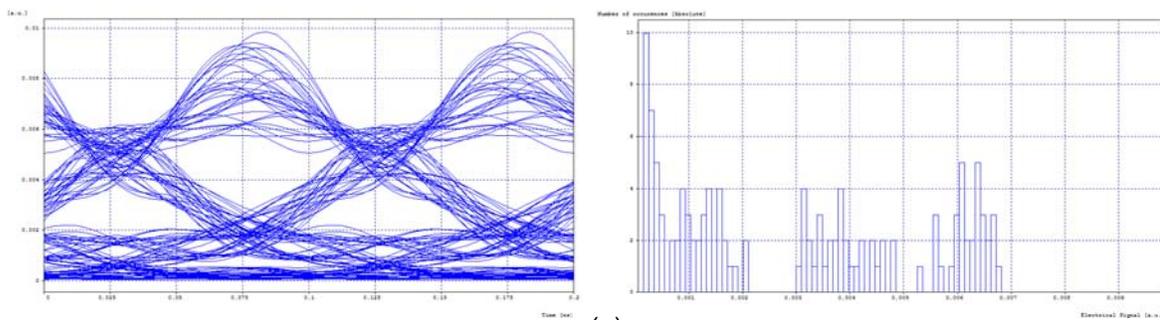


Figura 119. Señal en Transmisión (a) Diagrama de ojo (b) Histograma

La figura 120 muestra los diagramas de ojo y su respectivo histograma después de 100km y en recepción.



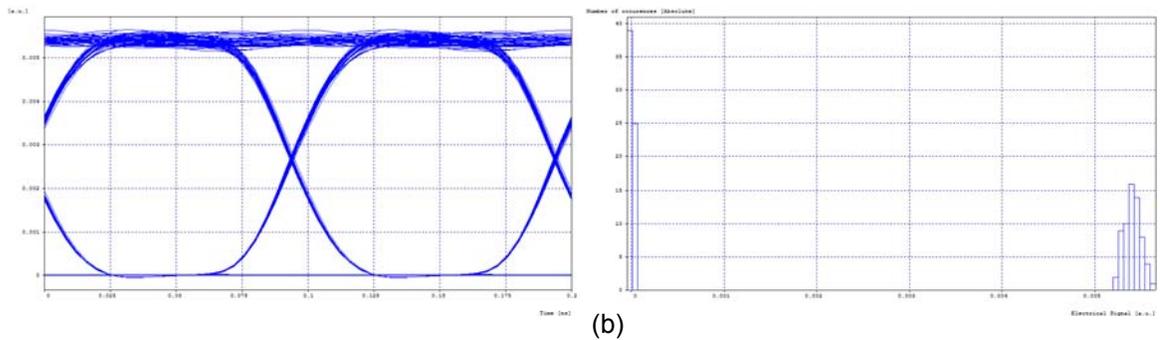


Figura 120. Diagramas de ojo e histograma (a) Después de 100km, (b) Recepción

5.3. RESULTADOS SIMULACIÓN DEL EJEMPLO DE DISEÑO

A continuación se presentarán los resultados de la simulación del ejemplo de diseño de la sección 4.3. La figura 121 presenta el esquema simulado para este caso. Como se explicó en el ejemplo, el sistema se encuentra limitado por pérdidas y por dispersión, por esta razón se hace necesario utilizar amplificadores y alguna técnica de compensación de dispersión, en este caso se optó por utilizar fibras compensadoras de dispersión (DCF) y debido a que estas introducen más pérdidas al sistema se decidió colocar un amplificador por cada DCF.

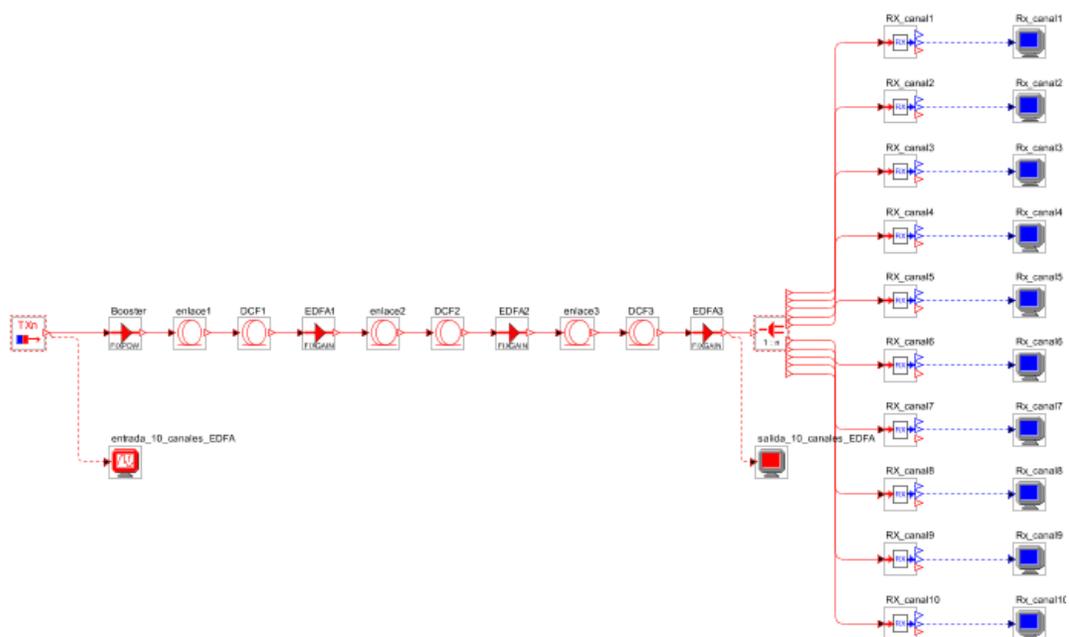


Figura 121. Esquema para simulación del ejemplo de diseño

Verifiquemos ahora que el sistema no se encuentre limitado por la OSNR. Para este caso no se consideraron las no linealidades en la fibra. La figura 122 presenta el espectro óptico en recepción para los 10 canales transmitidos y la tabla 45 muestra los parámetros de rendimiento para el sistema ya amplificado y compensado en dispersión. Como se puede apreciar los valores de OSNR están por encima de los 26 dB y el rendimiento del sistema en general es muy bueno.

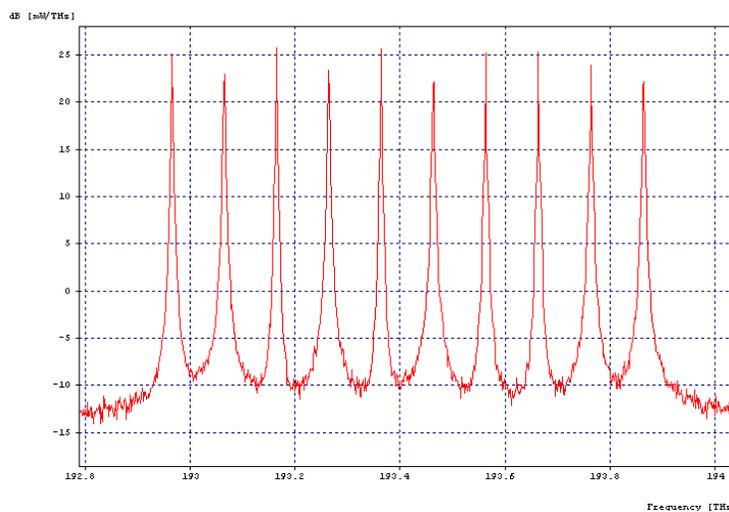


Figura 122. Espectro óptico en recepción sin considerar no linealidades

Tabla 45. Parámetros de rendimiento sin considerar no linealidades en la fibra

canal	frecuencia (THz)	OSNR (dB)	BER	Factor Q	Abertura promedio
1	192,966	27,593927	1e-40	27,223881	0,00141791
2	193,065	26,688	1e-40	28,665649	0,00143746
3	193,165	27,410384	1e-40	27,145019	0,0014598
4	193,264	27,546915	1e-40	27,323697	0,00146827
5	193,365	27,281426	1e-40	27,227557	0,00149089
6	193,465	27,122379	1e-40	27,170552	0,00150581
7	193,564	28,098718	1e-40	26,831346	0,00152094
8	193,665	28,233452	1e-40	26,386767	0,00153099
9	193,765	27,309484	1e-40	27,281098	0,00154919
10	193,864	27,204618	1e-40	26,759352	0,00156173

Aunque el rendimiento para todos los canales es óptimo, la figura 123 presenta el diagrama del ojo para el peor canal del sistema con base en el factor Q, en este caso es el canal 8.

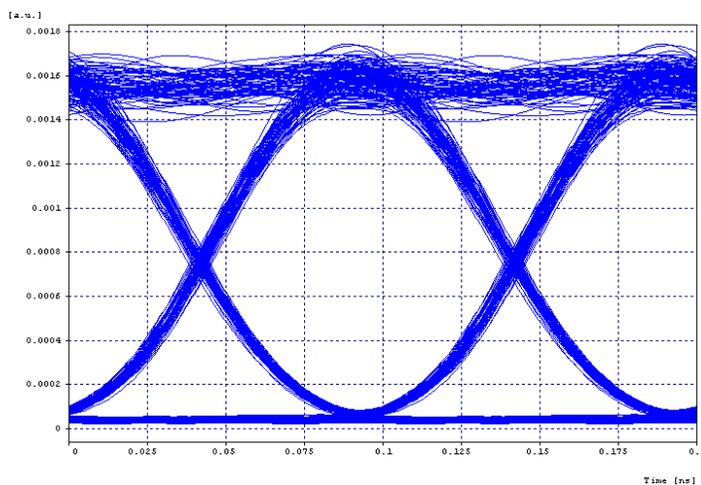


Figura 123. Diagrama del ojo para el peor canal (Canal 8) sin considerar no linealidades

Para analizar si el sistema se encuentra limitado por no linealidades activamos todas éstas en la fibra y vemos su impacto en el rendimiento. La figura 124 muestra el espectro óptico con la influencia de las no linealidades. Como se puede apreciar el espectro se encuentra un poco más degradado y presenta nuevas componentes que de cierta forma van a influir en el comportamiento del sistema.

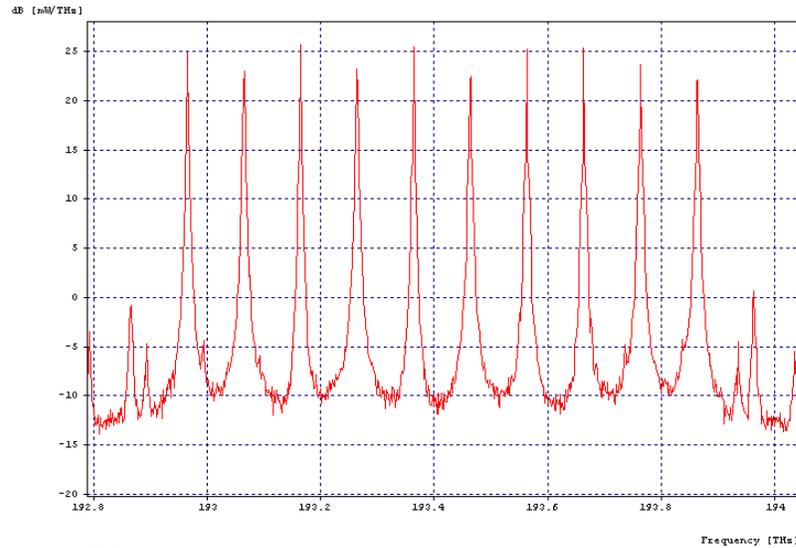


Figura 124. Espectro óptico en recepción considerando no linealidades

Los parámetros de rendimiento expresados en la tabla 46 muestran la influencia de las no linealidades en el deterioro del sistema. A pesar de la presencia de los efectos no lineales el rendimiento del sistema se encuentra dentro de los límites de funcionamiento, ya que la OSNR no se degrada y la BER está por encima de 10^{-9} .

Tabla 46. Parámetros de rendimiento considerando no linealidades en la fibra

canal	frecuencia (THz)	OSNR (dB)	BER	Factor Q	Abertura promedio
1	192,966	28,164745	4,77305e-27	20,593642	0,00138737
2	193,065	27,595019	5,64445e-21	19,567389	0,00142178
3	193,165	27,641039	2,65301e-19	19,049964	0,00143697
4	193,264	27,380997	4,38575e-20	19,344401	0,00146237
5	193,365	27,942071	2,23594e-19	19,070938	0,00148023
6	193,465	27,884019	3,00521e-15	17,884182	0,0014814
7	193,564	27,962091	4,21621e-14	17,546122	0,00154425
8	193,665	27,920574	3,64521e-20	19,447068	0,00154983
9	193,765	26,838458	1,99533e-19	18,992676	0,00154411
10	193,864	27,139786	4,06703e-20	19,178128	0,00154119

La figura 125 muestra el diagrama del ojo del peor canal para el sistema simulado considerando las no linealidades en la fibra. En este caso corresponde al canal 7.

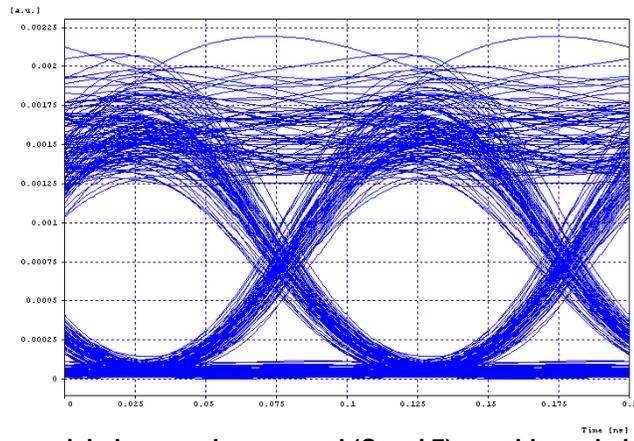


Figura 125. Diagrama del ojo para el peor canal (Canal 7) considerando las no linealidades

En el caso de que el sistema presentara limitaciones debido a las no linealidades, se debería seguir las recomendaciones especificadas en los criterios planteados.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- El dimensionamiento de redes ópticas a nivel físico implica aprovechar el ancho de banda ofrecido por la fibra óptica, pero esto se ve amenazado por las barreras físicas que presenta la fibra óptica, al igual que los efectos de transmisión al trabajar a velocidades elevadas. Por lo tanto, el ancho de banda de la fibra disponible en la transmisión es limitado; como solución a esta limitación surge la técnica de multiplexación WDM.
- El adecuado dimensionamiento de una red óptica WDM es un aspecto crítico para el operador de red que decida implementarla, ya que de este dependen factores fundamentales (ancho de banda disponible, número de canales, tipo de servicios, tecnologías y dispositivos de red) en la determinación de los costos de instalación, mantenimiento y operación de la red, además, de las posibilidades y facilidades de escalabilidad y proyección de la red para atender las necesidades y exigencias de los nuevos usuarios y servicios.
- La ventana de 1550 nm presenta un mínimo valor de atenuación, pero la dispersión era grande, mientras que la ventana de 1310 nm presenta un valor mínimo dispersión, pero el valor de atenuación es grande. Con la aparición de las fibras de dispersión desplazada (DSF) se logra modificar el punto de cero dispersión a la ventana de 1550 nm (tercera ventana). Al tener una ventana (1550 nm) que presente valores bajos de atenuación y dispersión los sistemas como WDM optan por trabajar en ella.
- Las redes ópticas WDM tienen una relación ambigua con los efectos de dispersión, ya que por un lado requieren de su presencia como medida para mitigar o evitar los efectos no lineales tales como FWM y XPM; pero por otro lado, las señales afectadas por la dispersión pueden llegar a presentar problemas de ISI incrementando la BER del sistema. Es por ello que en el dimensionamiento de redes WDM se busca obtener una dispersión nula en el enlace total pero no en puntos particulares. Mediante la utilización de fibras de dispersión desplazada con valor no cero (NZ-DSF) es posible obtener pequeños valores de dispersión en la región de 1550 nm y mediante las técnicas de compensación de dispersión se logra mitigarla en el enlace total.
- La selección de la técnica de compensación de dispersión depende de la velocidad de transmisión. Para velocidades de 40 Gb/s la técnica a utilizar es la compensación mediante redes de difracción de Bragg, mientras que para otras velocidades se debe utilizar fibras compensadoras de dispersión (DCF).
- Los sistemas a partir de 10 Gb/s se ven afectados por efectos como la PMD, por lo tanto, es necesario utilizar técnicas de compensación de PMD como retardos ópticos o filtros transversales en recepción, con el fin de reducir su impacto sobre el rendimiento del sistema.
- Los sistemas CWDM presentan ventajas económicas comparadas con los sistemas DWDM, pero solo son rentables para aplicaciones de corta distancia. Por otro lado, los sistemas DWDM permiten aumentar la capacidad de la fibra óptica existente en varios órdenes de magnitud. La diferencia en costos con los sistemas CWDM radica en que el ancho espectral de los laser para DWDM debe ser más fino con el fin de diferenciar entre las señales a transmitir lo que implica la utilización de equipos con mayores prestaciones.
- Las consideraciones más importantes a tener en cuenta en el dimensionamiento de una red óptica WDM en relación con los efectos de transmisión son:

- Para combatir las pérdidas en la fibra se debe utilizar amplificadores ópticos, pero dado que un número elevado de amplificadores en cascada afectan la OSNR del sistema, es necesario optimizar su ubicación.
- Teniendo en cuenta que las no linealidades en la fibra son los efectos más significativos en el deterioro de los sistemas WDM de alta velocidad, es importante buscar la manera de mitigarlos; las soluciones más generales para reducir su impacto sobre la señal de transmisión son: limitar la potencia de transmisión, gestionar la dispersión y utilizar fibras de área efectiva grande
- El impacto de los efectos de transmisión lineales y no lineales puede llegar a ser tan crítico hasta el punto de atenuar o deteriorar tanto las señales transmitidas de tal forma, que los receptores no puedan detectar y recuperar las señales de información. Por lo tanto es indispensable cumplir con los márgenes de diseño recomendados y emplear las diferentes técnicas y consideraciones para mitigar y contrarrestar los problemas causados por los efectos de transmisión.
- Los dispositivos totalmente ópticos ofrecen ventajas como:
 - Transparencia de procesamiento: al no ser necesaria la conversión de la señal de óptico-eléctrico-óptico hay independencia en cuanto al protocolo a utilizar.
 - Mayor velocidad: al eliminar la conversión óptico-eléctrico-óptico, la velocidad de transmisión aumenta ya que se reducen los tiempos de procesamiento.
 - Escalabilidad.
- Los sistemas ópticos que trabajan a elevadas velocidades requieren de receptores con alta sensibilidad para garantizar una BER adecuada a bajas potencias; gran ancho de banda para poder trabajar en un amplio rango de longitudes de onda, y bajo ruido para no influir en el rendimiento de la señal al detectarla.
- EL diagrama del ojo es una técnica cualitativa que permite determinar rápidamente el comportamiento del sistema.
- Por cuestiones de disponibilidad la BER de un sistema WDM debe ser de por lo menos 10^{-12} .
- El ancho de banda o rango espectral de los componentes ópticos (incluida la fibra), limitan el número total de longitudes de onda a utilizar en sistemas WDM. Otros factores que influyen en el número de canales son el espaciamiento entre ellos, la tasa de bit y los efectos no lineales.
- La simulación es un factor clave en el dimensionamiento de redes, ya que permite ver su comportamiento frente a posibles errores o fallas y de esta forma tomar medidas preventivas y correctivas. Por otro lado, permite evaluar la respuesta de la red ante determinadas características de propagación.

6.2. RECOMENDACIONES

- Al realizar la elección de la herramienta de simulación se debe analizar detalladamente sus prestaciones y limitaciones, para determinar su idoneidad en el desarrollo de los objetivos planteados.

- Estudiar la posibilidad de adquirir una herramienta de simulación de redes ópticas, con el fin de impulsar la investigación de estas redes, y evitar las limitaciones de tiempo y funcionalidad de las licencias de prueba.

6.3. TRABAJOS FUTUROS

- Estudio y análisis de la influencia de los amplificadores ópticos y el ruido ASE sobre el rendimiento de un sistema WDM: El número elevado de amplificadores en cascada puede convertirse en una fuente de deterioro para el rendimiento del sistema en vez de una solución a problemas de pérdidas, por tal razón es importante estudiar y analizar su impacto en un sistema de transmisión óptico de tal manera que no se conviertan en un factor degradante del sistema.
- Definición de criterios y procedimientos que permitan el dimensionamiento de redes ópticas WDM a niveles superiores del modelo OSI: El objetivo de este trabajo sería abarcar otras capas del modelo OSI para el dimensionamiento y en complemento con nuestro trabajo poder brindar una perspectiva de dimensionamiento más general y completa.
- Estudio de costos para la selección de componentes y tecnologías a emplear en las redes ópticas WDM: Este trabajo permitiría determinar cuáles de las técnicas recomendadas para contrarrestar los efectos de transmisión son más adecuadas o factibles económicamente para los operadores de red y definir bajo qué condiciones particulares o en que entornos se cumpliría esto.

REFERENCIAS

- [1] C. E. Pérez Valenzuela, J. León Téllez y P. Pellat-Finet, “*Tendencias en Telecomunicaciones Ópticas*”. ACCEFYN – Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 2000.
- [2] S. A. Ramírez Salinas, “*Beneficios de la nueva tecnología DWDM. El caso Internexa*”. XIX Congreso Nacional y X Andino de Telecomunicaciones Andicom 2004 Cartagena de Indias, Colombia. Octubre de 2004.
- [3] V. Alwayn. “*Optical Network Design and Implementation*”. Cisco Press. Marzo 17, 2004.
- [4] Rsoft Design Group. “*System Simulation, OptSim*”. Disponible en: http://www.rsoftdesign.com/products/system_simulation/OptSim/
- [5] J. P. Laude. “[Optical Networking & Wdm \(Standards & Protocols\) Walter Goralski](#)”. Artech House, Inc.. 2002.
- [6] K. M. Sivalingam y S. Subramaniam, “*OPTICAL WDM NETWORKS Principles and Practice*”, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [7] G. Held, “*Deploying Optical Networking Components*”. McGraw-Hill. 2001.
- [8] S. SHEPARD, “*OPTICAL NETWORKING CRASH COURSE*”. McGraw-Hill. 2001.
- [9] D. A. Montero Hidalgo, “*Ventajas de la nueva tecnología de comunicaciones UDWDM*”. Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. 2004.
- [10] H. J. R. Dutton, “*Understanding Optical Communications*”. IBM Corporation, International Technical Support Organization. Septiembre, 1998.
- [11] B. Gumaste y T. Antony, “*DWDM Network Designs and Engineering Solutions*”. Cisco Press. Diciembre 13, 2002.
- [12] C. Del Rio Campos, P. Rodriguez Horche, “*ANÁLISIS COMPARATIVO DE SISTEMAS CWDM EN FUNCIÓN DEL TIPO DE FUENTE Y FIBRA EMPLEADA*”. Universidad San Pablo CEU, Universidad Politécnica de Madrid.
- [13] “*OTC000603 WDM Network Planning and Designing*”. Huawei Technologies co., LTD.
- [14] R. Pous Grébol, “*Análisis del espectro óptico en las comunicaciones por fibra óptica*”. Laboratorio de Telecomunicación de PROMAX Electronica S.A.
- [15] R. J. Bates, “*OPTICAL SWITCHING AND NETWORKING HANDBOOK*”. McGraw-Hill. 2001.
- [16] A. K. Dutta, N. K. Dutta y M. Fujiwara, “*WDM TECHNOLOGIES: OPTICAL NETWORKS*”. Volumen III. Elsevier Academic Press. 2004.
- [17] E. J. Gualda Manzano, “*Optimización de las prestaciones en enlaces ópticos submarinos de gran capacidad y larga distancia mediante el control de la dispersión*”. Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela técnica superior de ingeniería y telecomunicaciones de Barcelona. 2005.
- [18] M. Llyas y H. T. Mouftah, “*The Handbook of OPTICAL COMUNICATION NETWORKS*”. CRC Press LLC. 2003.

- [19] A. Aponte y F. J. Cardozo, “*Concepto de IP en las nuevas redes Integradas*”. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería Eléctrica. S.C.A.D.A. CARACAS. Marzo 2006.
- [20] G. P. Agrawal. “*FIBER-OPTIC COMMUNICATION SYSTEMS*”, Tercera Edición. Wiley Interscience. 2002.
- [21] J. A. Martín Pereda, “*SISTEMAS Y REDES ÓPTICAS DE COMUNICACIONES*”. Pearson, Prentice Hall. 2003
- [22] H. G. Perros, “*Connection-oriented Networks - SONET/SDH, ATM, MPLS and OPTICAL NETWORKS*”. John Wiley & Sons Ltd. 2005.
- [23] A. Barbieri, “*A Guide to Select Single-Mode Fibers for Optical Communications Applications*”. Cisco Technology Marketing. Cisco Systems, Inc. 2002.
- [24] “*Técnicas de multiplexado y demultiplexado*”. Universidad de la Américas – Puebla. Departamento de Ingeniería electrónica y comunicación
Disponible en:
http://www.andinalink.com/es/educational/work_shops_bb/fibra_optica/tecnicasfo.asp
- [25] “OTC000602 WDM Network Technology”. Huawei Technologies co., LTD.
- [26] “*Efectos no lineales*”. Disponible en:
http://www.tfo.upm.es/DOCENCIA/2003_04/WDM_Componentes_Nolineal.pdf
- [27] Corning Incorporated. “*Full-Spectrum Fiber*”
Disponible en:
http://www.corning.com/opticalfiber/products__applications/products/full_spectrum_faq.aspx
- [28] R. Olivares V. y C. Cubillos M., “*PROPAGACIÓN DE PULSOS SOLITÓNICOS EN REDES ÓPTICAS WDM*”. Facultad de Ingeniería. Universidad Tarapacá, vol. 13 N° 3, 2005.
- [29] F. Ramos Pascual, “*Efectos no lineales en dispositivos fotónicos*”
Disponible en: <http://www.radioptica.com/Fibra/efectos.asp>
- [30] V. L. L. Thing, P. Shum y M. K. Rao, “*Bandwidth-Efficient WDM Channel Allocation for Four-Wave Mixing-Effect Minimization*”. IEEE transactions on communications, vol. 52, no. 12. Diciembre, 2004.
- [31] P. Kolesar, “*Instalando el Cableado – Lo que debe tenerse en cuenta y cómo hacerlo*”. ChannelPlanet. 2004. Disponible en: <http://www.channelplanet.com/?idcategoria=13624>
- [32] M. J. O’Mahony. “*Optical Multiplexing in Fiber Network: Progress in WDM and OTDM*”. IEEE Communications Magazine. Diciembre, 1995.
- [33] A. Echeverría Garcidueñas, E. A. Andrade González, M. Reyes Ayala y J. ROA FRANCO, “*Simulación de un Sistema Óptico de 40 Canales Obedeciendo al Estándar ITU-T G.692 con Separación Desigual de Longitudes de Onda*”. Departamento de Electrónica, UAM-Azacapatzalco México, DF, CP 02200, México.
- [34] K. Inoue, “*Polarization Effect on Four-Wave Mixing Efficiency in a Single-Mode Fiber*”. IEEE journal of quantum electronics, vol. 28, no. 4. Abril de 1992

- [35] A. Salavert. *"Introducción al DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)"*. CISCO, Text Part Number: OL-0884-01. 2001.
- [36] CYOPTICS. *"P172- PIN Type Receiver"*. Diciembre, 2006. Disponible en: <http://www.cyoptics.com/dynContentFolder/P172.pdf>
- [37] CYOPTICS. *"P172- APD Type Receiver"*. Diciembre, 2006. Disponible en: <http://www.cyoptics.com/dynContentFolder/P172.pdf>
- [38] CYOPTICS. *"P172- APD Type Receiver"*. Diciembre, 2006. Disponible en: <http://www.cyoptics.com/dynContentFolder/P172.pdf>
- [39] CYOPTICS. *"R195A 10 Gb/s Small Form-Factor Co-Planar APD-TIA Receiver"*. Marzo, 2006. Disponible en: <http://www.cyoptics.com/dynContentFolder/R195A.pdf>
- [40] CYOPTICS. *"R197A 10 Gb/s Small Form-Factor Co-Planar APD-TIA Receiver"*. Noviembre, 2007. Disponible en: <http://www.cyoptics.com/dynContentFolder/R197A.pdf>
- [41] Eudyna. *"InGaAs-APD/Preamp Receiver - FRM5N143DS"*. Julio, 2004. Disponible en: <http://www.polarbeam.com/Download/FRM5N143DS.pdf>
- [42] JDS Uniphase. *"ERM 568XCX 10 Gb/s SONET/SDH PIN-TIA High Gain Optical Receiver Modules"*. http://www.polarbeam.com/Download/erm568xcx_2001030101.pdf
- [43] Nortel Networks. *"PP-10G 10Gb/s PIN Preamp Receiver"*. Julio, 2000. Disponible en: <http://www.acronymeo.com/files/PP-10G.pdf>
- [44] Eudyna. *"10 Gbit/s High Gain, High Sensitivity APD Receivers"* Disponible en: http://www.eudyna.com/e/products_e/fiberopt_e/10gbit_high_gain13-1.html
- [45] Eudyna. *"10 Gbit/s Linear APD Receivers"*. Disponible en: http://www.eudyna.com/e/products_e/fiberopt_e/10gbit_linear_apd.html
- [46] Eudyna. *"10 Gbit/s Linear PIN Receivers"*. Disponible en: http://www.eudyna.com/e/products_e/fiberopt_e/10gbit_linear_pin.html
- [47] RSoft Design Group. *"OptSim Models Reference, Volume I Sample Mode"*. New York. 2007.
- [48] RSoft Design Group. *"OptSim Models Reference, Volume II Block Mode"*. New York. 2007
- [49] G. Bernstein, B. Rajagopalan y D. Saha, *"Optical Network Control: Architecture, Protocols and Standards"*. Addison Wesley. Julio 24, 2003.
- [50] RSoft Design Group. *"OptSim Application Notes and Examples"*. New York. 2007.