

**ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL
USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF**



**Nicolás Córdoba Valdés
Giovanny Andrés Muñoz Castro**

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
GNTT – Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones
Popayán, 2015**

**ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL
USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF**



Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones

Nicolás Córdoba Valdés
Giovanny Andrés Muñoz Castro

Director
Mag. Alejandro Toledo Tovar

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
GNTT – Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones
Popayán, 2015

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS



TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE REDES DWDM, EFECTO RAMAN, DEGRADACIONES ÓPTICAS Y PARÁMETROS DE MONITOREO ÓPTICO	1
1.1 Sistema WDM	1
1.1.1 Sistema DWDM.....	2
1.1.2 Componentes de las redes DWDM	7
1.2 Efecto de Dispersión Raman o SRS (<i>Stimulated Raman Scattering</i>).....	10
1.3 Degradaciones ópticas.....	13
1.3.1 Efectos lineales	14
1.3.1.1 Efectos de dispersión.....	15
1.3.1.2 Efectos de pérdidas.....	18
1.3.2 Efectos no lineales	18
1.3.2.1 Efecto Scattering.....	19
1.3.2.2 Dependencia del índice de refracción no lineal.....	21
1.4 Parámetros de Monitoreo Óptico	23
CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps PARA CONFIGURACIONES RAMAN	28
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	37
3.1 Metodología de simulación	37
3.1.1 Generación del escenario de simulación.....	37
3.1.1.1 Escenario de simulación	38
3.1.1.2 Casos de estudio.....	38
3.1.2 Identificación de los parámetros técnicos del escenario de simulación.....	39
3.1.3 Ejecución de la simulación.....	40
3.1.3.1 Plan de pruebas	41
3.1.4 Análisis de los resultados de simulación	41
3.2 Herramienta de simulación	42
CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN, PRUEBAS, ANÁLISIS DE RESULTADOS Y SELECCIÓN DE LA MEJOR CONFIGURACIÓN TENIENDO EN CUENTA LOS EFECTOS LINEALES Y NO LINEALES	44
4.1 Escenario de simulación	44
4.1.1 Distancia máxima alcanzable por un segmento de red.....	45
4.2 Caso de estudio 1: Amplificación EDFA sin inyección Raman.	49
4.2.1 Análisis de efectos lineales.....	55



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

4.2.1.1	Ruido y Pérdidas	55
4.2.1.2	Dispersión cromática (CD)	57
4.2.1.3	Dispersión por modo de polarización (PMD)	62
4.2.2	Análisis de efectos no lineales	64
4.2.2.1	Automodulación de fase (SPM)	64
4.2.2.2	Modulación de fase cruzada (XPM)	66
4.2.2.3	Mezcla de cuatro ondas (FWM)	69
4.3	Caso de estudio 2: Inyección Raman sin amplificación EDFA	72
4.3.1	Análisis de efectos lineales	78
4.3.1.1	Ruido y Pérdidas	78
4.3.1.2	Dispersión cromática (CD)	80
4.3.1.3	Dispersión por modo de polarización (PMD)	84
4.3.2	Análisis de efectos no lineales	87
4.3.2.1	Automodulación de fase (SPM)	87
4.3.2.2	Modulación de fase cruzada (XPM)	88
4.3.2.3	Mezcla de cuatro ondas (FWM)	91
4.4	Caso de estudio 3: Inyección Raman con amplificación EDFA.	94
4.4.1	Análisis de efectos lineales	102
4.4.1.1	Ruido y Pérdidas	102
4.4.1.2	Dispersión cromática (CD)	104
4.4.1.3	Dispersión por modo de polarización (PMD)	109
4.4.2	Análisis de efectos no lineales	112
4.4.2.1	Automodulación de fase (SPM)	112
4.4.2.2	Modulación de fase cruzada (XPM)	114
4.4.2.3	Mezcla de cuatro ondas (FWM)	116
4.5	Análisis comparativo en el desempeño de una red DWDM a 10 Gbps, al usar configuraciones Raman con fibras DCF.	120
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....		124
5.1	Conclusiones	124
5.2	Recomendaciones	125
5.3	Trabajos futuros	125
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		126



LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema de un sistema DWDM..	2
Figura 1.2 Distribución de los canales DWDM en el espectro óptico.	3
Figura 1.3 Atenuación vs Longitud de onda.	4
Figura 1.4 Diferencia de la utilización de longitud de onda entre WDM y DWDM.....	5
Figura 1.5 Esquema de un sistema DWDM.....	7
Figura 1.6 Modulación (a) Directa y (b) Externa.	8
Figura 1.7 Proceso SRS (a) Onda Stokes y (b) Onda Anti-Stokes.....	11
Figura 1.8 Efecto SRS en sistemas WDM.	11
Figura 1.9 Diagrama de un amplificador Raman.....	12
Figura 1.10 Esquema: (a) Co-bombardeo (b) Contra-bombardeo y (c) Bombardeo Bidireccional.	12
Figura 1.11 Degradaciones ópticas.	14
Figura 1.12 Clasificación de los efectos lineales.	14
Figura 1.13 Dispersión como función de la longitud de onda para los tipos de fibras más comunes usados en comunicaciones ópticas.	16
Figura 1.14 Técnicas de compensación ópticas para la CD.....	16
Figura 1.15 Clasificación de los efectos no lineales.....	19
Figura 1.16 Coeficiente de ganancia Raman	20
Figura 1.17 Generación de frecuencias adicionales debido a FWM.....	22
Figura 1.18 Relación entre la función de densidad de probabilidad y la BER..	25
Figura 1.19 Parámetros del Diagrama del Ojo.....	25
Figura 2.1 Esquema para una configuración con amplificación EDFA sin inyección Raman....	33
Figura 2.2 Esquema para una configuración de Inyección Raman sin amplificación EDFA.	33
Figura 2.3 Esquema para una configuración de Inyección Raman con amplificación EDFA. ...	33
Figura 3.1 Escenarios de simulación y casos de estudio.....	37
Figura 3.2 Escenario de simulación.....	38
Figura 3.3 Caso de estudio 1: Amplificación EDFA sin inyección Raman.....	38
Figura 3.4 Caso de estudio 2: Inyección Raman sin amplificación EDFA.....	39
Figura 3.5 Caso de estudio 3: Inyección Raman con amplificación EDFA.....	39
Figura 3.6 Diagrama de flujo de la simulación.	42
Figura 4.1 Escenario general.....	44
Figura 4.2 Diagrama del ojo (a) y Espectro óptico (b) de la señal en el receptor Back to back.	45
Figura 4.9 Distancia máxima alcanzable al realizar variaciones en la potencia de transmisión.	46
Figura 4.10 Parámetros de monitoreo óptico en un tramo de fibra SSMF-28 para diferentes porcentajes de compensación de DCF en post-compensación.	47
Figura 4.11 Distancia máxima vs rango adecuado de compensación de DCF para $P_{tx} = 0, 5$ y 10 dBm.....	48
Figura 4.12 Caso de estudio 1: Amplificación EDFA sin inyección Raman.....	49
Figura 4.13 Caso 1: Amplificación EDFA sin inyección Raman.....	49
Figura 4.14 Parámetros ópticos frente a variaciones del porcentaje de compensación de la DCF para una distancia máxima de 84 Km.....	51



Figura 4.15 Parámetros ópticos al realizar compensación a menos del 50% con amplificación EDFA, en configuración Inline..... 52

Figura 4.16 Diagrama del ojo para: a) Un span de 150 Km y b) Dos span de 150 Km..... 52

Figura 4.17 Diagrama del ojo para: a) Un span de 70 Km, b) Tres span de 70 Km, c) Seis span de 70 Km y d) Ocho span de 70 Km..... 53

Figura 4.18 Diagrama del ojo para: a) Un span de 70 Km b) Cinco span de 70 Km, c) Ocho span de 70 Km y d) Once span de 70 Km..... 54

Figura 4.19 Número de span alcanzado con amplificación EDFA, en configuración Booster e Inline y configuración Inline únicamente..... 55

Figura 4.20 a) BER vs Distancia y b) Factor Q vs Distancia para diferentes coeficientes de atenuación de la DCF..... 56

Figura 4.21 Desempeño del enlace ante variaciones del coeficiente de atenuación de la DCF. 57

Figura 4.22 Diagrama de ojo para un tramo de 150 Km: a) En presencia de todas las degradaciones, b) Sin CD y c) Solo con CD..... 58

Figura 4.23 Pulso eléctrico de la señal: a) Transmitido, b) Sin CD, c) Solo con CD y d) Después de compensar la CD..... 59

Figura 4.24 Comportamiento de la red ante la variación de diferentes valores del coeficiente de dispersión de la DCF..... 61

Figura 4.25 Comportamiento de la red ante la variación de diferentes longitudes de la DCF con diferentes coeficientes de dispersión..... 61

Figura 4.26 Diagrama de ojo para un tramo de 150 Km: a) En presencia de todas las degradaciones, b) Sin PMD y c) Solo con PMD..... 62

Figura 4.27 Diagrama de ojo debido a variaciones de PMD..... 64

Figura 4.28 Diagrama del ojo con: a) Potencia EDFA=0dBm y b) Potencia EDFA=23dBm..... 65

Figura 4.29 Desempeño de la red al realizar variaciones en la potencia de los dispositivos de amplificación EDFA para diferentes potencias de transmisión..... 65

Figura 4.30 Desempeño del enlace en el canal 1: a), b) y c) Frente a las variaciones de las potencias de transmisión de los canales 2, 3 y 4 y d) Espectro óptico en recepción para valores de potencia de transmisión de 5 dBm (verde) y 15 dBm (rojo)..... 66

Figura 4.31 Comportamiento del canal 1 y 4, ante la variación de la potencia de transmisión de los canales 2 y 3..... 67

Figura 4.32 Espectro óptico a la salida del canal 1, para valores de potencia de transmisión de 0 dBm (Morado), 5 dBm (Azul) y 15 dBm (Rojo). 67

Figura 4.33 Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de salida (rojo) debido a XPM. 68

Figura 4.34 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de XPM mediante la variación del coeficiente de dispersión cromática. 68

Figura 4.35 Comportamiento del canal 1, ante la variación de la potencia de los canales 2, 3 y 4. 69

Figura 4.36 Espectro óptico de: (a) Entrada y (b) Salida debido a FWM..... 70

Figura 4.37 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de FWM mediante la variación del coeficiente de dispersión cromática. 70

Figura 4.38 Caso de estudio 2: Inyección Raman sin amplificación EDFA..... 72

Figura 4.39 Caso 2: Inyección Raman sin amplificación EDFA. 72



Figura 4.40 Parámetros ópticos ante variaciones en la potencia de bombeo a diferentes porcentajes de compensación.	73
Figura 4.41 a) Espectro de: a) Ganancia Raman y b) Figura de ruido.....	74
Figura 4.42 Parámetros ópticos al realizar compensación a menos del 50% con amplificación Raman.	75
Figura 4.43 Diagrama del ojo para: a) Un span de 153 Km y b) Dos span de 153 Km.....	76
Figura 4.44 Diagrama del ojo para: a) Un span de 70 Km b) Ocho span de 70 Km, c) Doce span de 70 Km y d) Dieciocho span de 70 Km.	77
Figura 4.45 Número de span alcanzado con inyección Raman solamente.....	77
Figura 4.46 a) BER vs Distancia y b) Factor Q vs Distancia para diferentes coeficientes de atenuación de la DCF.....	78
Figura 4.47 Desempeño del enlace ante variaciones del coeficiente de atenuación de la DCF	79
Figura 4.48 Diagrama de ojo para un tramo de 153 Km: a) En presencia de todas las degradaciones, b) Sin CD y c) Solo con CD.....	80
Figura 4.49 Pulso eléctrico de la señal: a) Transmitido, b) Sin CD, c) Solo con CD y d) Después de compensar la CD.....	82
Figura 4.50 Comportamiento de la red ante la variación de diferentes valores del coeficiente de dispersión de la DCF.	83
Figura 4.51 Comportamiento de la red ante la variación de diferentes longitudes de la DCF con diferentes coeficientes de dispersión.....	84
Figura 4.52 Diagrama de ojo para un tramo de 153 Km: a) En presencia de todas las degradaciones, b) Sin PMD y c) Solo con PMD.....	85
Figura 4.53 Diagrama de ojo debido a variaciones de PMD.....	87
Figura 4.54 Desempeño del enlace en el canal 1: a), b) y c) Frente a las variaciones de las potencias de transmisión de los canales 2, 3 y 4 y d) Espectro óptico en recepción para valores de potencia de transmisión de 5 dBm (verde) y 15 dBm (rojo).....	88
Figura 4.55 Comportamiento del canal 1 y 4, ante la variación de la potencia de transmisión de los canales 2 y 3.....	89
Figura 4.56 Espectro óptico a la salida del canal 1, para valores de potencia de transmisión de 0 dBm (Morado), 5 dBm (Azul) y 15 dBm (Rojo).	89
Figura 4.57 Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de salida (rojo) debido a XPM.	89
Figura 4.58 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto XPM mediante la variación del coeficiente de dispersión cromática.	90
Figura 4.59 Comportamiento del canal 1, ante la variación de la potencia de los canales 2, 3 y 4.....	91
Figura 4.60 Espectro óptico de: (a) Entrada y (b) Salida debido a FWM.....	92
Figura 4.61 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de FWM mediante la variación del coeficiente de dispersión cromática.	93
Figura 4.62 Caso de estudio 3: Inyección Raman con amplificación EDFA.....	95
Figura 4.63 Caso de estudio 3: Inyección Raman con amplificación EDFA.....	95
Figura 4.64 Parámetros ópticos ante variaciones en la potencia de bombeo a diferentes porcentajes de compensación.	96
Figura 4.65 Espectro de: a) Ganancia Raman y b) Figura de ruido.	97



Figura 4.66 Parámetros ópticos al realizar compensación a menos del 50% con amplificación Raman y etapas de amplificación EDFA..... 98

Figura 4.67 Diagrama del ojo para: a) Un span de 160 Km y b) Dos span de 160 Km..... 99

Figura 4.68 Diagrama del ojo para: a) Un span de 70 Km b) Catorce span's de 70 Km, c) Veintiocho span's de 70 Km y d) Treinta y seis span's de 70 Km..... 100

Figura 4.69 Diagrama del ojo para: a) Un span de 70 Km b) Siete span's de 70 Km, c) Veinte span's de 70 Km y d) Veintiocho span's de 70 Km. 101

Figura 4.70 Número de span alcanzado con amplificación Raman y etapas de amplificación EDFA, en configuración Booster e Inline y configuración Inline únicamente. 102

Figura 4.71 a) BER vs Distancia y b) Factor Q vs Distancia para diferentes coeficientes de atenuación de la DCF..... 103

Figura 4.72 Desempeño del enlace ante variaciones del coeficiente de atenuación de la DCF. 104

Figura 4.73 Diagrama de ojo para un tramo de 160 Km: a) En presencia de todas las degradaciones, b) Sin CD y c) Solo con CD..... 105

Figura 4.74 Pulso eléctrico de la señal: a) Transmitido, b) Sin CD, c) Solo con CD y d) Después de compensar la CD..... 106

Figura 4.75 Comportamiento de la red ante la variación de diferentes valores del coeficiente de dispersión de la DCF. 108

Figura 4.76 Comportamiento de la red ante la variación de diferentes longitudes de la DCF con diferentes coeficientes de dispersión..... 108

Figura 4.77 Diagrama de ojo para un tramo de 160 Km: a) En presencia de todas las degradaciones, b) Sin PMD y c) Solo con PMD..... 110

Figura 4.78 Diagrama de ojo debido a variaciones de PMD..... 111

Figura 4.79 Diagrama de ojo con: a) Potencia EDFA= 0dBm y b) Potencia EDFA= 23dBm. . 112

Figura 4.80 Desempeño de la red al realizar variaciones en la potencia de los dispositivos de amplificación EDFA para diferentes potencias de transmisión..... 112

Figura 4.81 Desempeño del enlace en el canal 1: a), b) y c) Frente a las variaciones de las potencias de transmisión de los canales 2,3 y 4 y d) Espectro óptico en recepción para valores de potencia de transmisión de 5 dBm (verde) y 15 dBm (rojo)..... 113

Figura 4.82 Comportamiento del canal 1 y 4, ante la variación de la potencia de transmisión de los canales 2 y 3..... 114

Figura 4.83 Espectro óptico a la salida del canal 1, para valores de potencia de transmisión de 0 dBm (Morado), 5 dBm (Azul) y 15 dBm (Rojo). 115

Figura 4.84 Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de salida (rojo) debido a XPM. 115

Figura 4.85 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de XPM mediante la variación del coeficiente de dispersión cromática. 116

Figura 4.86 Comportamiento del canal 1, ante la variación de la potencia de los canales 2, 3 y 4. 117

Figura 4.87 Espectro óptico de: (a) Entrada y (b) Salida debido a FWM..... 117

Figura 4.88 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto FWM mediante la variación del coeficiente de dispersión cromática. 118



LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Parámetros típicos de los sistemas CWDM y DWDM.....	6
Tabla 1.2	Efectos no lineales y su relación con algunos parámetros de diseño del sistema. ...	23
Tabla 2.1	Parámetros técnicos de la tarjeta STM-64 Equipos HUAWEI Optix Metro 6040.....	30
Tabla 2.2	Especificaciones de la fibra óptica SMF-28 Corning.. ..	31
Tabla 2.3	Plan de frecuencias para 4 canales a 100 GHz.	32
Tabla 2.4	Parámetros para diferentes tipos de DCF.....	32
Tabla 2.5	Especificaciones de la fuente Raman de Bombeo Cisco ONS 15454.....	35
Tabla 2.6	Parámetros y características del Modelo Simplificado de Red.	36
Tabla 3.1	Características y parámetros del escenario de simulación.	39
Tabla 4.1	Distancia máxima alcanzada frente a variaciones de potencia de transmisión para diferentes porcentajes de compensación de la DCF.....	48
Tabla 4.2	Distancia máxima alcanzada para 0, 1 y 2 etapas de amplificación EDFA.	51
Tabla 4.3	Parámetros de monitoreo para segmentos de red concatenados en configuración Inline.....	53
Tabla 4.4	Parámetros de monitoreo para segmentos de red concatenados en configuración Booster e Inline.....	54
Tabla 4.5	Variación del coeficiente de atenuación de la DCF.	55
Tabla 4.6	Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de CD en la red.....	58
Tabla 4.7	Variación del coeficiente de dispersión de la DCF.....	60
Tabla 4.8	Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de PMD en la red.....	63
Tabla 4.9	Parámetros de monitoreo para diferentes valores de PMD.....	63
Tabla 4.10	Distancia máxima alcanzada al usar configuración de inyección Raman sin amplificación EDFA en comparación con la del caso general.	75
Tabla 4.11	Parámetros de monitoreo para segmentos de red concatenados con amplificación Raman.	76
Tabla 4.12	Variación del coeficiente de atenuación de la DCF.	78
Tabla 4.13	Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de CD en la red.	81
Tabla 4.14	Variación del coeficiente de dispersión de la DCF.	83
Tabla 4.15	Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de PMD en la red.	85
Tabla 4.16	Parámetros de monitoreo para diferentes valores de PMD.	86
Tabla 4.17	Distancia máxima alcanzada al usar configuración híbrida en comparación con el caso general.	98
Tabla 4.18	Parámetros de monitoreo óptico para segmentos de red concatenados con amplificación Raman y una etapa de amplificación EDFA, en configuración Inline.	99
Tabla 4.19	Parámetros de monitoreo óptico para segmentos de red concatenados con amplificación Raman y dos etapas de amplificación EDFA.	100
Tabla 4.20	Variación del coeficiente de atenuación de la DCF.	102
Tabla 4.21	Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de CD en la red.	105
Tabla 4.22	Variación del coeficiente de dispersión de la DCF.	107
Tabla 4.23	Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de PMD en la red.	110
Tabla 4.24	Parámetros de monitoreo para diferentes valores de PMD.	110
Tabla 4.25	Análisis comparativo de las configuraciones Raman con fibras DCF sobre el desempeño de una red DWDM a 10 Gbps.....	122



ACRÓNIMOS

AO	<i>Optical Amplifier</i> , Amplificador Óptico.
APD	<i>Avalanche Photodiode</i> , Fotodiodo Avalancha.
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i> , Modo de Transferencia Asíncrona.
BER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit.
CD	<i>Chromatic Dispersion</i> , Dispersión Cromática.
CW	<i>Continuous Wave</i> , Onda Continua.
CWDM	<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación Dispersa por División de Longitud de Onda.
DCF	<i>Dispersion Compensating Fibers</i> , Fibras Compensadoras de Dispersión.
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación Densa por División de Longitud de Onda.
DPSK	<i>Differential Phase Shift Keying</i> , Modulación por desplazamiento diferencial de fase DPSK.
DQPSK	<i>Dual-Polarization Quadrature Phase Shift Keying</i> , Modulación por desplazamiento diferencial de cuadratura DQPSK
DSF	<i>Dispersion Shift Fiber</i> , Fibra de dispersión desplazada.
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> , Amplificador de fibra dopado de Erbio.
FOM	<i>Figure of Merit</i> , Figura de Mérito.
FWM	<i>Four Wave Mixing</i> , Mezcla de Cuarta Onda.
ISI	<i>Intersymbol Interference</i> , Interferencia Intersimbólica.
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> , Unión Internacional de Telecomunicaciones.
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> , Amplificación de luz por emisión estimulada de radiación.
LED	<i>Light Emitting Diode</i> , Diodo emisor de luz.
MFD	<i>Mode Field Diameter</i> , Diámetro del campo modal.
MZ	<i>Mach-Zehnder</i> .
NRZ	<i>Non Return to zero</i> , No Retorno a Cero.
NZ-DSF	<i>Nearly Zero Dispersion Shifted Fiber</i> , Fibra de dispersión desplazada no nula.
OEO	<i>Optical – Electric – Optical</i> , Óptico - Eléctrico - Óptico.



OPM	<i>Optical Performance Monitoring</i> , Monitoreo de desempeño óptico.
OOK	<i>On-Off Keying</i> , Modulación por Encendido y apagado.
OSNR	<i>Optical Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido Óptico.
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i> , Dispersión por Modo de Polarización.
RZ	<i>Return to Zero</i> , Retorno a Cero.
SBS	<i>Stimulated Brillouin Scattering</i> , Dispersión Estimulada de Brillouin.
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i> , Jerarquía Digital Síncrona.
SOA	<i>Semiconductor Optical Amplifiers</i> , Amplificadores Ópticos Semiconductores.
SPM	<i>Self Phase Modulation</i> , Modulación de Fase Inducida.
SPT	<i>Spectral Propagation Technique</i> , Técnica de Propagación Espectral.
SRS	<i>Stimulated Raman Scattering</i> , Dispersión Estimulada de Raman.
SSMF	<i>Standar Single Mode Fiber</i> , Fibra Monomodo Estándar.
STM	<i>Synchronous Transport Module</i> , Módulo de Transporte Síncrono.
VBS	<i>Variable Bandwidth Simulation</i> , Ancho de Banda Variable de Simulación.
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda.
XPM	<i>Cross Phase Modulation</i> , Modulación de Fase Cruzada.



INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las redes de transporte de datos deben ser capaces de ofrecer elevados niveles de ancho de banda, debido, a la aparición de numerosas aplicaciones como videoconferencias, creciente tráfico de internet, operaciones en tiempo real, servicios de alta velocidad etc. Dicha demanda cada vez mayor ha llevado a tecnologías existentes a sus límites, situación que conlleva a requerir nuevos conceptos e innovaciones que permitan implementar redes más robustas, de mayor capacidad y de más altas velocidades de transmisión. Estas necesidades surgidas como consecuencia del desarrollo tecnológico, han hecho de la fibra óptica un medio atractivo y de gran proyección para soportar los recursos demandados por los servicios de los usuarios, capacidad y alcance [1].

Dado que la transmisión efectiva de señales por fibra óptica no se despliega recientemente a velocidades considerables puesto que la electrónica empleada en su tratamiento incrementaría el costo del sistema. Los sistemas de comunicaciones ópticos, aun así, han experimentado un crecimiento considerable, debido a características que le dan una gran ventaja frente a otros sistemas, mayor capacidad para el transporte de datos, tamaño y peso reducido, robustez, e inmunidad a interferencias electromagnéticas hacen de la fibra óptica un medio fiable para la transmisión.

Las redes ópticas para incrementar la capacidad de enviar información se basan en técnicas de Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*). El costo de una red que utiliza multiplexación es mucho menor al de una red que no utiliza esta técnica, esto debido a la minimización de enlaces de comunicación entre dos puntos. Sin embargo, los sistemas WDM diseñados para largas distancias y altas velocidades de transmisión, se ven afectados por degradaciones ópticas que influyen a una modificación no deseada de la señal original hasta el punto de no ser posible la identificación clara en recepción, limitando así el rendimiento y la distancia máxima de transmisión [2].

Los requerimientos de caracterización de los nuevos sistemas se han multiplicado de forma considerable. Los sistemas de transmisión de Multiplexación Densa por División de Longitud de Onda (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*) diseñados principalmente para alcanzar transmisiones a distancias mayores han dado lugar a incorporar nuevas tecnologías, dispositivos y mecanismos que permitan un mejor equilibrio de los efectos lineales y no lineales más influyentes en sistemas ópticos. Los amplificadores de distribución Raman son una tecnología prometedora, ya que, reduce la potencia de la señal de entrada sin sacrificar la relación señal a ruido óptica (OSNR)¹ después de la transmisión [3]. Las Fibras Compensadoras de Dispersión (DCF, *Dispersion Compensation Fiber*), es una de las técnicas más utilizadas para contrarrestar las degradaciones

¹ OSNR, Parámetro de desempeño, que mide que tanto se degrada la señal óptica que es transportada dentro del sistema.



generadas por la dispersión cromática, gracias a la contribución de sus propiedades, tales como el índice de dispersión negativo, atenuación, figura de mérito, entre otras [4].

Debido a las ventajas potenciales que proporciona tanto la compensación como la amplificación, los amplificadores Raman de compensación de dispersión se han convertido en el centro de estudio de varias investigaciones dirigidas principalmente a aplicaciones long-haul en las bandas C y L dentro del rango de 1530 a 1610 nm, por el hecho de que la pérdida de la señal es la más baja en estas bandas. Adicional los rangos de longitudes de onda como la banda U (ultra long), S (short) y O (original) se están estudiando y experimentando. En ese contexto, un candidato natural para actuar como un amplificador de banda ancha eficiente en sistemas de comunicación de alta capacidad es el amplificador de distribución Raman, el cual compensa la dispersión y atenuación. Sin embargo, la implementación de amplificadores Raman requiere múltiples láseres de bombeo de alta potencia. Como consecuencia del aumento de potencia se puede conducir a la aparición de efectos no lineales indeseables [5].

Este proyecto de grado aborda el estudio y análisis del comportamiento de la amplificación Raman y sus configuraciones, además de la distinción de las principales propiedades de la DCF, a fin de realizar una comparativa a nivel de simulación en el desempeño de una red DWDM, a 10 Gbps. Este trabajo se organiza en 5 capítulos que se distribuyen de la siguiente manera.

Capítulo 1. Generalidades de redes DWDM, efecto Raman, degradaciones ópticas y parámetros de monitoreo óptico.

En este capítulo se describen las características de una red WDM, con especial énfasis en redes DWDM, seguido de una explicación de los componentes de un sistema de comunicaciones ópticas. Posteriormente se hace una descripción del fenómeno Raman, se detallan los efectos lineales y no lineales que los afecta y genera, se identifican las principales propiedades de una DCF y finalmente se presentan los parámetros de monitoreo óptico primordiales para el diseño de una red de comunicaciones óptica.

Capítulo 2. Caracterización de una red DWDM a 10 Gbps para configuraciones Raman.

Se seleccionan los dispositivos, el formato de modulación, tipo de modulación, número de canales, espaciamiento, fibra óptica, banda de operación, y parámetros generales del sistema como: velocidad, potencia de transmisión, sensibilidad, entre otros, que conformarán a la red DWDM. Así mismo, se identifican cuáles serán los parámetros fijos o variables que determinen modificaciones significativas en el desempeño del sistema. Por último se especificarán las configuraciones Raman.

Capítulo 3. Metodología y escenarios de simulación

Se define la metodología de simulación que permite definir los escenarios y casos de estudio en el que se realizan las pruebas, además se establece como herramienta de simulación OptSim® de Rsoft.



Capítulo 4. Simulación, pruebas, análisis de resultados y selección de la mejor configuración teniendo en cuenta los efectos lineales y no lineales.

Se desarrolla el proceso de simulación que permitirá evaluar el desempeño de la red DWDM, frente al uso de las configuraciones Raman con fibras DCF. Por último, a partir de los resultados obtenidos en simulación, se selecciona la configuración Raman que permita obtener una mejora en el desempeño de una red DWDM al considerar la presencia de las degradaciones ópticas.

Capítulo 5. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

Se presenta las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros a desarrollar en esta área, resultado del estudio del trabajo de grado.



CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE REDES DWDM, EFECTO RAMAN, DEGRADACIONES ÓPTICAS Y PARÁMETROS DE MONITOREO ÓPTICO

1.1 Sistema WDM

WDM es una técnica de multiplexación para redes ópticas que permite multiplicar la capacidad de cada enlace al transmitir información de manera simultánea en una única fibra utilizando diferentes longitudes de onda (canales)², cada uno a velocidades de alrededor de 100 Gbps alcanzando tasas de transferencia de los Terabyte por segundo (TB/s) y con una separación de 0.8 -1.6 nm por canal, logrando así la optimización del ancho de banda de la fibra y mayores tasas de transmisión [6]. Como consecuencia de esta alta disponibilidad de ancho de banda, actualmente las redes WDM se encuentran exitosamente instaladas en todo el mundo y se convierten en una alternativa fuerte para suplir las necesidades de recursos de red [7].

Sin embargo, una de las debilidades de WDM es principalmente que sus canales no se encuentran estrechamente unidos en el dominio de la frecuencia, lo cual, reduce la eficiencia en el medio de transmisión, además de presentar algunas dificultades para responder a diferentes degradaciones ópticas tales como los efectos lineales y no lineales, los cuales se convierten en un limitante de la distancia del enlace y velocidad del sistema [8].

Cuando se requiere incrementar la capacidad de un sistema óptico hay varias alternativas, primero aumentar la capacidad del canal o (λ_s), la segunda transmitir nuevos canales (λ_s) por nuevos segmentos de fibra y la tercera constituye a las tecnologías WDM que transmiten varios canales por una misma fibra, siendo esta última la de mayor facilidad a la hora de aumentar la capacidad en una red; en efecto, la mejor tecnología para aprovechar todo el ancho de banda capaz de proporcionar una fibra óptica, sin necesidad de cambiar equipos y enlaces, es la multiplexación por división de longitud de onda (WDM) [9].

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunication Union*) en las recomendaciones G.694.1 [10] y G694.2 [11] clasifica los sistemas WDM en: Multiplexación Densa por División de Longitud de Onda (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*) que a su vez, puede ser de ultra larga distancia, larga distancia, o metropolitana y en Multiplexación Dispersa por División de Longitud de Onda (CWDM, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*), siendo esta última la menos costosa de las dos [12].

Los sistemas CWDM permiten la combinación y separación de hasta 18 longitudes de onda (canales), trabajando entre 1270 y 1610 nm, se emplean tanto para fibras monomodo como para fibras multimodo, utiliza espaciamiento entre canales de 2000 GHz (~20 nm) para

² En este trabajo de grado, los términos de longitud de onda y canal serán manejados indistintamente.

alcanzar distancias de hasta 80 Km y con capacidades típicas de los 50 Mbps a los 2.5 Gbps [13] [14].

Los sistemas CWDM en comparación a los sistemas DWDM resultan mucho más eficientes en materia de costos y para tráfico de redes de acceso, por lo cual se implementan principalmente en redes empresariales y redes metropolitanas de corta distancia, donde van desde las instalaciones de las empresas al troncal metropolitano de los proveedores de servicio [15]. Sin embargo, debido al gran auge que se está experimentando en los servicios de telecomunicaciones, las redes actuales que se caracterizan por un mayor transporte y largas distancias requieren el uso de técnicas con menor espaciamiento y distancia de transmisión más grande que las que ofrece CWDM, de esta manera, las limitaciones presentadas por CWDM, se mejoran con la implementación de sistemas DWDM caracterizados principalmente por brindar un espaciamiento entre longitudes de onda menor, aumentando de forma considerable su capacidad de transporte [10].

A continuación se describen con más detalle las características generales de una red DWDM, ya que son parte fundamental en el desarrollo del trabajo de grado.

1.1.1 Sistema DWDM

Debido a la evolución y a la oferta comercial de servicios informáticos, tales como videoconferencias, aplicaciones multimedia, telemedicina, entre otros. La Multiplexación Densa por División de Longitud de Onda, DWDM, proporciona una eficaz alternativa para aumentar el ancho de banda, ya que permiten acomodar en una única fibra alrededor de un centenar de longitudes de onda sin interferencia mutua, cada longitud de onda representa un canal óptico, sobre el cual se transporta un servicio (Figura 1.1). A diferencia, de cualquier otra variación de WDM, el espaciamiento entre lambdas es menor, y por ende, permiten que se realice multiplexación de un mayor número de ellas sobre la fibra óptica, lo cual incrementa la capacidad de transporte en la red y se hace un mejor uso del espectro, así como también, facilita las comunicaciones bidireccionales. Generalmente esta tecnología es empleada en redes ópticas de área metropolitana y amplia (MAN, WAN) [6] [8] [16].

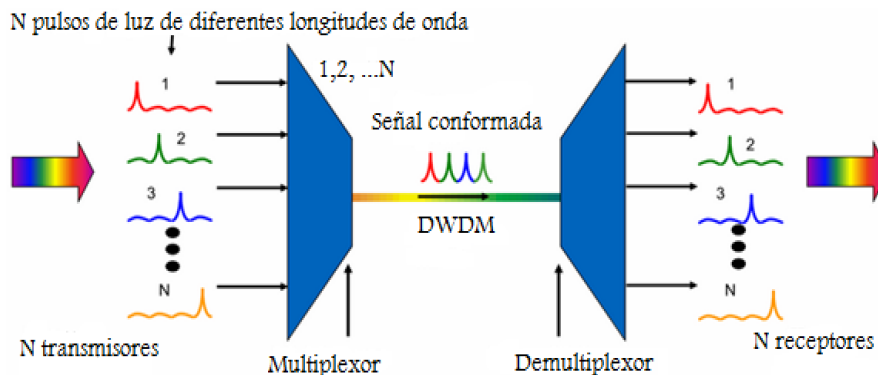


Figura 1.1 Esquema de un sistema DWDM. Fuente: [17].



La Figura 1.1 muestra el esquema simplificado de un sistema DWDM, constituido básicamente por transmisores, un multiplexor, el medio de transmisión, un demultiplexor y los receptores correspondientes de cada longitud de onda. Los transmisores están conformados principalmente por una fuente de datos, un codificador, un modulador y una fuente de luz, ésta última constituida por lo general por láseres monomodo, cada uno modulando una longitud de onda diferente, las cuales se combinan (Multiplexan) antes de transmitirse a través del medio de transmisión (fibra óptica). Cada longitud de onda lleva su propia información. Esta combinación es útil para aumentar el ancho de banda de un sistema de fibra óptica; finalmente en recepción, el demultiplexor capta las longitudes de onda multiplexadas, las separa (Demultiplexa) y las envía hacia las líneas de salida respectivas [17].

En la Figura 1.2, se aprecia la distribución de los canales a través del espectro óptico. La recomendación ITU-T G694.1 [10], define la utilización de las ventanas desde los 1525 a los 1565 nm, así como espaciamientos típicos entre canales de 50 GHz (0.4 nm), 100 GHz (0.8 nm), y 200 GHz (1.6 nm) [18].

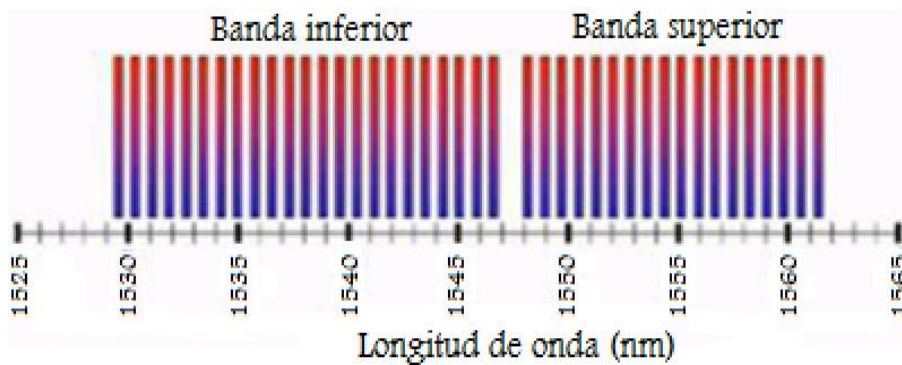


Figura 1.2 Distribución de los canales DWDM en el espectro óptico. Fuente: [18].

DWDM, pertenece a la categoría WDM de banda angosta estandarizada por la Unión Internacional de Telecomunicaciones, (ITU, *International Telecommunication Union*). Se dice que esta técnica es densa porque el espacio utilizado es igual o menor a 200 GHz, es decir, las longitudes de onda (canales) están separadas entre sí por distancias muy pequeñas. Modernamente existen redes basadas en DWDM con espaciamiento entre canales del orden de los 25 GHz y 12,5 GHz (0.2 nm) y (0.1 nm) respectivamente [14] [16].

Las funciones de DWDM son múltiples como por ejemplo, amplificar todas las longitudes de onda sin tener que convertir a señales eléctricas, tener independencia entre protocolos y capacidades, transportar señales con diferentes velocidades, pero, una de las principales características de DWDM es que puede llegar a enviar 32/40/64/80/96 canales virtuales multiplexados en una sola fibra óptica, con tendencia a aumentar por las diversas técnicas modernas que usan los proveedores [19]. Actualmente se pueden conseguir hasta 320 canales ópticos transportando cualquier formato de transmisión, así es posible, utilizar diferentes longitudes de onda para enviar información analógica o digital [20].



Uno de los principales problemas a evaluar cuando se utiliza tecnología DWDM en redes ópticas es la atenuación (dB/Km) que se presenta en el medio de transmisión, fenómeno lineal que reduce la amplitud de la señal que está siendo propagada, depende en la mayoría de los casos de la misma construcción de la fibra. De esta manera, un parámetro importante en la transmisión de la fibra óptica es su ventana de operación, la cual muestra la pérdida por kilómetro que sufrirá la fibra durante la transmisión [21].

La Figura 1.3 muestra que tanto se afecta una señal por la atenuación dependiendo de la longitud de onda y en la banda que se transmita. La ventana de operación está definida por la longitud de onda central de la fuente que se utiliza para el envío de datos. La atenuación que sufre la señal es menor si se trabaja en la tercera ventana, y mayor si se trabaja en la primera ventana, Sin embargo, los equipos generadores de luz en la tercera ventana tienen un costo más elevado debido a su complejidad en la fabricación.

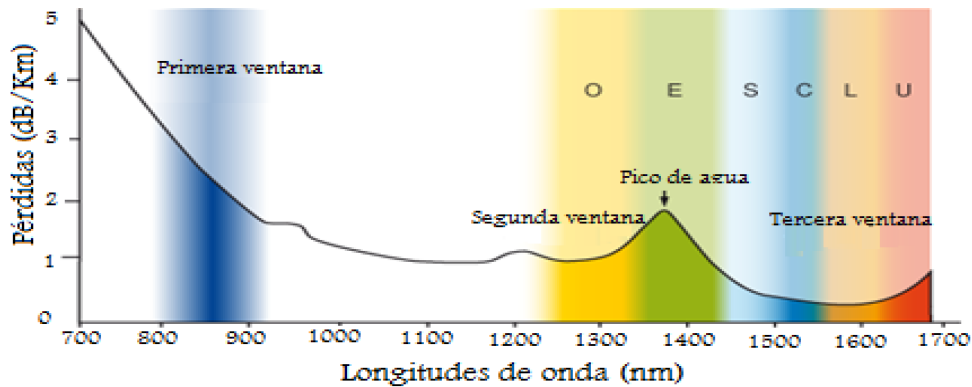


Figura 1.3 Atenuación vs Longitud de onda. Fuente: [21].

En las comunicaciones por fibra óptica se trabaja con radiaciones electromagnéticas con longitudes de onda comprendidas entre 850 y 1650 nm, las radiaciones visibles al ojo humano están comprendidas entre 400 y 750 nm. El potencial de DWDM depende en la ventana en la cual se está trabajando, y es por esto que la UIT G.694.1 recomienda utilizar la tercera ventana que va desde los 1500 a los 1600 nm la cual abarca parte de las bandas S y L y toda la banda C. Sin embargo, dentro de las bandas ópticas O, E, S, C y L, la Convencional (C) es la banda con mayor aceptación por la menor cantidad de pérdida por kilómetro que se presenta en este rango, de esta manera, se obtendrá las mejores prestaciones de la fibra sin ser notablemente afectada por atenuación. Los amplificadores EDFA son eficientes en estas bandas, por lo cual son muy utilizados para este tipo de sistemas [22].

Aunque DWDM se ha convertido en una técnica importante en el transporte de información en sistemas ópticos, se debe tener en cuenta ciertos condicionantes, en primer lugar, es una tecnología que se encuentra en un punto intermedio de su desarrollo y es muy dependiente de las características de las fibras, lo cual puede limitar o aumentar el número de lambdas, cuanto mayor sea la pureza de la fibra mayor será el número de canales o

longitudes de onda que se podrá transportar, en caso contrario el número de lambdas reduce. En segundo lugar se requieren componentes ópticos de gran calidad, como láseres con control de temperatura y sistemas de refrigeración, multiplexores y demultiplexores más desarrollados que implican un aumento en el costo total de la red a instalar [7].

Los sistemas DWDM exigen una precisión de longitud de onda y rendimiento de filtrado superior a los sistemas WDM convencionales, esto se debe a que una pequeña desviación en el centro de la longitud de la onda de uno de los láseres puede distorsionar la señal del canal adyacente, de ese modo, la estabilidad de las lambdas o canales es de suma importancia [23].

En resumen la principal característica de esta tecnología es el hecho de que cada longitud de onda trabaja en una frecuencia diferente, lo cual equivale a realizarles un tratado por separado a cada una de ellas, sin interferir con las otras longitudes de onda, pudiendo trabajar cada una de ellas a su propia velocidad, lo cual permite incrementar considerablemente la capacidad de la red, Así mismo, la transmisión de voz, correo electrónico, video, datos, multimedia, y formatos como IP, ATM, SONET, SDH, entre otros son algunos ejemplos de los que se pueden transmitir simultáneamente por DWDM.

La diferencia fundamental entre WDM y DWDM es el espaciamiento entre canales, en DWDM son más cerrados, por tanto tiene más capacidad y hace uso de un mayor margen del espectro [20]. La Figura 1.4 (a) muestra el principio de WDM, donde dos canales se transmiten en la misma fibra, uno en cada ventana doblando la capacidad de la fibra, mientras que en DWDM, Figura 1.4 (b) la capacidad del medio óptico se multiplica por el número de canales que se transmitan simultáneamente a través de la fibra dentro de la tercera ventana (recomendada por la ITU para DWDM). Cada canal se transmite a un color diferente de luz.

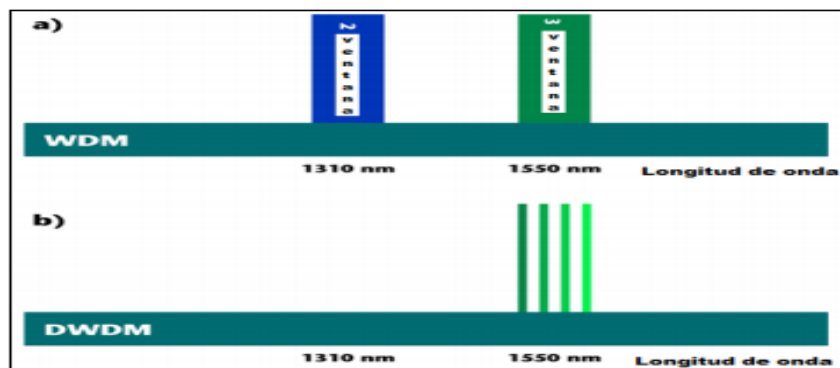


Figura 1.4 Diferencia de la utilización de longitud de onda entre WDM y DWDM. Fuente: [23].

El desarrollo del presente trabajo de grado se realiza en una red DWDM en un entorno MAN a una velocidad de transmisión de 10 Gbps. Este modelo de red DWDM permite que cada canal transporte 10 Gbps, es decir, 10000 millones de bits por segundo y se tiene la posibilidad de utilizar actualmente hasta 160 canales ópticos diferentes, lo que significa,



que si hay un uso de todos ellos, se obtendría una transmisión total de 1600 Gbps por segundo, pero, por simplicidad se establece una red de 4 canales, equivalente a una velocidad de transmisión de hasta 40 Gbps.

En el documento “Anexos”, se describe con mayor detalle los componentes de una red DWDM, funciones, parámetros del sistema, y su arquitectura básica.

En la Tabla 1.1 se resume los parámetros típicos de sistemas CWDM y DWDM.

Tabla 1.1 Parámetros típicos de los sistemas CWDM y DWDM. Fuente: [2].

CARACTERÍSTICAS	CWDM	DWDM MAN / WAN	DWDM Long-Haul
Espaciamiento entre Canales	20 nm (2500GHz)	0.8nm (100GHz)	0.4nm (50GHz)
Bandas Utilizadas	O,E,S,C, L	C, L	C, L, S
Canales por Fibra	4 – 16	32 – 80	80 – 160
Capacidad por Canal	2,5 Gbps	10 Gbps	10Gbps – 40Gbps
Distancias Típicas	Hasta 80 Km	Cientos de Km	Miles de Km
Costos	Bajo	Medio	Alto

La mayoría de los enlaces de comunicación por fibra óptica dentro de las redes DWDM de área metropolitana y amplia, siguen una conexión punto-a-punto o en anillo independientemente de las topologías físicas que se definan. En redes WAN por ejemplo la topología punto-a-punto es la más usada para interconectar puntos de empresas y la topología en anillo para interconectar oficinas. La topología en anillo se caracteriza por su uso en áreas metropolitanas, donde las estaciones están interconectadas entre sí, formando un anillo. Cuando se envía la información, ésta viaja de estación en estación hasta llegar a su destino. Generalmente su arquitectura debe proveer de un esquema de protección, de no ser así, cualquier falencia en la vía de comunicación incomunicará a la red. Usualmente su protección es provista mediante un esquema 1+1, es decir, se tiene dos líneas de conexión, sin embargo, sólo se usa una línea para la transferencia de la información, la otra línea juega el papel de respaldo en caso de fallas, de esta manera, se logra seguridad para la transmisión continua de los datos [13] [19].

La topología punto-a-punto se caracteriza por velocidades de canales ultra rápidos (10-40 Gbps), presentan alta integridad, confiabilidad de la señal, facilidad de operación e instalación y rápida restauración de trayectoria. Ésta arquitectura es usualmente usada para interconectar únicamente dos nodos de la red, en donde, cada dispositivo puede tomar el papel de esclavo o de maestro. Por tales razones es la topología a usar en el presente trabajo de grado, agregando además, que la conexión punto-a-punto es la topología mayormente utilizada en enlaces actuales de fibra óptica [24].

Los elementos básicos en las conexiones punto a punto en redes DWDM son: el transmisor, el medio de transmisión y el receptor. En seguida, se describen los componentes y parámetros que caracterizan estos elementos.

1.1.2 Componentes de las redes DWDM

A continuación se presenta un diagrama de bloques de los componentes más importantes en una red óptica punto-a-punto.

La Figura 1.5 muestra el esquema básico de una red DWDM, el cual consta fundamentalmente de un transmisor y un receptor que se comunican por medio de fibra óptica, haciendo uso de diferentes elementos, tales como: codificadores, moduladores, amplificadores, demoduladores, decodificadores y fotodetectores.

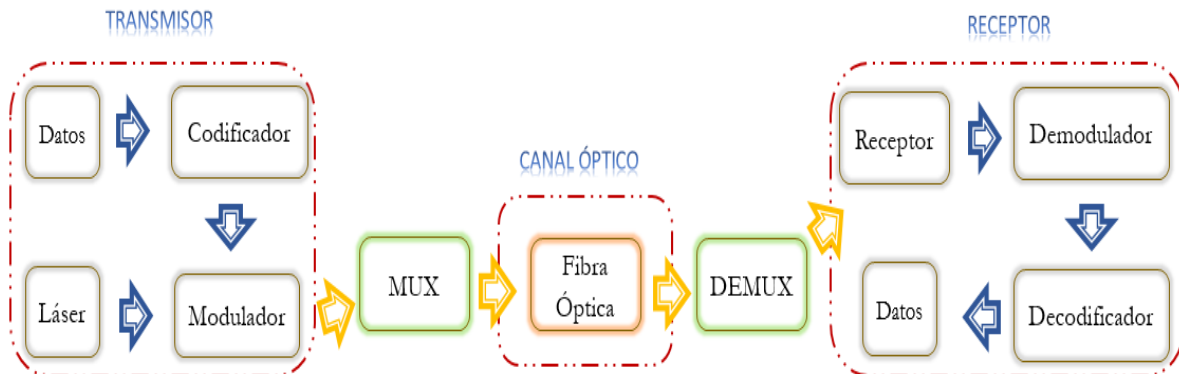


Figura 1.5 Esquema de un sistema DWDM.

Para realizar una comunicación óptica usando tecnología DWDM desde el transmisor a través de la fibra y llegar hasta el receptor, el sistema óptico cuenta con los siguientes elementos:

A. Transmisor

Es un dispositivo electrónico encargado de transformar la señal eléctrica de entrada en una señal de salida óptica. Los componentes generales de este módulo son los siguientes:

- **Codificador:** En sistemas de comunicaciones es muy importante emplear técnicas de codificación (códigos de línea), las cuales surgen de la necesidad de transmitir señales digitales a través de diversos medios de transmisión; fundamentalmente la codificación de línea es el proceso de convertir información binaria representada en niveles lógicos a un formato de señal que sea adecuado para su transporte, es decir, una cadena de dígitos binarios se convierten en una forma de onda de código de línea, para que la información pueda ser transmitida a través de la fibra óptica. Básicamente es el encargado de transformar la señal eléctrica en señal óptica en forma de secuencia de bits [25] [26].
- **Modulador:** El proceso de modulación consiste en variar una o más características de una señal portadora. En sistemas de fibra óptica es posible aplicar esquemas de modulación tanto digitales como analógicos. En modulación digital se utilizan dos estados y en la modulación analógica, la intensidad o la frecuencia de la portadora varían sobre un rango continuo. Para lograr transportar información por medio de una señal

luminosa se hace necesario generar variaciones sistemáticas en su frecuencia, fase o amplitud que representen la información que se desea transmitir, esa variación sistematizada que se le hace a una señal llamada portadora, con relación a la información que se desea transmitir. En resumen, la modulación es un proceso de manipular de manera controlada las propiedades de una portadora para que contenga la información que va a transmitirse [19] [25].

Existen dos tipos de moduladores, modulador directo y modulador indirecto; la modulación directa es la modulación más sencilla, en la cual se controla directamente la alimentación de la fuente de luz. En cambio, la modulación externa hace uso de un dispositivo propio de modulación, que reúne la fuente de datos y la fuente óptica para llevar a cabo la modulación [27]. La Figura 1.6, muestra estos dos métodos.

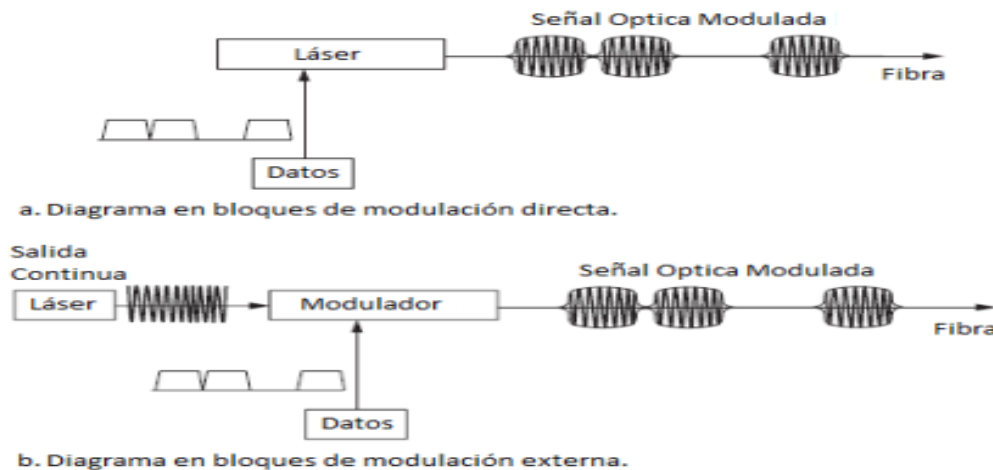


Figura 1.6 Modulación (a) Directa y (b) Externa. Fuente: [4].

En sistemas ópticos es más usada la modulación externa. Dentro de los moduladores indirectos se encuentran el modulador Mach Zehnder (MZ) y el Electro Absorption (EA). La modulación externa posee ventajas importantes sobre la modulación directa como por ejemplo hacer un mejor control del chirp (efecto donde la frecuencia portadora de un pulso varía con el tiempo, lo cual ocasiona ensanchamiento) [27].

- Fuentes de luz: Son dispositivos activos que convierten las señales eléctricas en pulsos de luz. Las fuentes de luz se diferencian principalmente por la longitud de onda de la luz que emiten y su tecnología. Pueden ser, fuentes tipo LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) o tipo LED (*Light Emitting Diode*) [28]. Para la transmisión en sistemas WDM de altas velocidades se utiliza principalmente la fuente de luz láser, ya que concentran más la luz que las fuentes Led, lo que significa que con el láser se puede transmitir datos a mayores distancias. Dentro de éste tipo de emisión, se encuentran láseres sintonizables y láseres de onda continua. Los de onda continua son ampliamente utilizados en redes ópticas, manejan altas velocidades y una mayor vida útil, razones por las cuales es seleccionado el láser de onda continua para el desarrollo del presente trabajo [29].



B. Medio de transmisión

Medio que va a utilizar la señal modulada para ser transmitida. Básicamente el canal de transmisión para los sistemas WDM es la fibra óptica. No obstante, cuando se requieren alcanzar mayores distancias, elementos como amplificadores y regeneradores se deben emplear en el enlace.

- Fibra óptica: Es un filamento delgado y flexible de vidrio, plástico, u otro material, su tamaño se puede asimilar al de un cabello humano y posee un gran ancho de banda para transmitir información. La principal función de la fibra óptica es guiar ondas luminosas con un mínimo de atenuación. La transmisión de la luz de la fibra óptica es explicada usando el principio de reflexión total interna³. Existen básicamente dos tipos de fibra, multimodo y monomodo. Los sistemas DWDM usan principalmente las fibras monomodo, en las cuales solo se propaga un modo de luz, lo cual resulta ventajoso para potenciar la capacidad de transporte [27] [30].

Existen tres tipos de fibra monomodo, la principal forma de diferenciarlas es por la dispersión cromática. Para una fibra monomodo estándar SMF (*Single-Mode-Fiber*), el punto de dispersión cero se presenta en la segunda ventana en 1310 nm, en una DSF (*Dispersion Shift Fiber*) se desplaza el punto de dispersión cero a la región de los 1550 nm, por último se tiene la fibra de dispersión no nula NZ-DSF (*NonZero Dispersion Shift Fiber*), la cual presenta pequeñas cantidades de dispersión, que reducen los efectos no lineales.

Dado que las fibras ópticas atenúan la luz cuando se propaga en su interior, la amplificación resulta una parte crucial en las comunicaciones ópticas, aún más, para sistemas de largo recorrido, que superan los cientos o miles de kilómetros. Un sistema de comunicaciones basado en fibra óptica utiliza amplificadores a lo largo de la fibra para regenerar la señal luminosa, que va perdiendo potencia cuando se trasmite por la fibra. Antes de la aparición de los amplificadores ópticos (AO) se debía tener un repetidor por cada longitud de onda transmitida, lo cual era ineficiente y costoso [2] [14] [31].

- Amplificadores: Componente pasivo indispensable en el medio transmisión no sólo por aumentar la potencia de la señal y permitir compensar las pérdidas que introduce los diferentes componentes, sino también, por amplificar todas las longitudes de onda a la vez y sin conversión OEO (*Optical – Electric – Optical*) eliminando así la necesidad de ancho de banda adicional, es decir, los AO operan haciendo uso sólo de fotones, sin necesitar la interacción con electrones, lo cual evita colocar dispositivos de conversión optoelectrónica entre tramos de fibra que originen nuevas pérdidas, lo cual mejora la capacidad global de la red y la transmisión a mayores distancias [31]. Existen distintos tipos de amplificadores ópticos tales como: Amplificador de Fibra Dopado de Erbium (EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifier*), Amplificador Óptico de Semiconductor (SOA,

³ Se presenta reflexión interna cuando se cumple las siguientes condiciones: el rayo pasa de un material más denso a uno menos denso, el ángulo de incidencia es menor que el ángulo crítico, el índice de refracción del núcleo es mayor que el del recubrimiento.



Semiconductor Optical Amplifier) y Amplificador RAMAN [32]. Para el presente trabajo de grado se hace especial énfasis en amplificadores Raman, puesto que es un elemento trascendental en el desarrollo del mismo.

C. Receptor

Los receptores en fibra óptica son también llamados detectores ópticos, dispositivos activos, cuya misión consiste en transformar una señal luminosa en eléctrica, similar a la señal original y recuperar los datos que son transmitidos a través del sistema de comunicaciones ópticas. El receptor realiza este proceso mediante un semiconductor llamado fotodetector. Dado que la señal óptica generalmente está debilitada y distorsionada cuando llega a recepción por las degradaciones ópticas presentes en la fibra, el fotodetector debe cumplir con requisitos como alta sensibilidad en el rango de emisión de la longitud de onda de la señal de luz recibida, adiciones mínimas de ruido, insensible a variaciones de temperatura, larga vida útil y velocidad de respuesta rápida y oportuna [14] [23] [33].

Dos tipos utilizados en la comunicación por fibra óptica son el fotodiodo PIN y el fotodiodo de avalancha APD. Ambos tipos son eficientes y responden con gran rapidez, aunque, el fotodiodo de avalancha ofrece una mayor sensibilidad y exactitud que el fotodiodo PIN, mientras que este último es más rápido, de fácil fabricación y de menor costo que los APD [34].

1.2 Efecto de Dispersión Raman o SRS (*Stimulated Raman Scattering*)

El origen del efecto Raman se presenta cuando un haz de luz monocromático de alta intensidad incide sobre las vibraciones que tienen las moléculas y los átomos del material que conforma una fibra óptica, estas vibraciones, características del medio material, reciben el nombre de fonones ópticos, el resultado de la interacción provoca que parte de la energía va a quedar absorbida por el medio y se va a presentar como un fonón que queda dentro del sistema, el resto de la energía sale generalmente como un nuevo fotón de menor energía (menor frecuencia y por ende, mayor longitud de onda) que la que presenta el fotón incidente, al fotón resultante se lo llama Stokes que puede viajar en el mismo sentido del haz incidente (Co-propagación) o en dirección contraria (Contra-propagación). Por el contrario si la energía es mayor (mayor frecuencia) se produce la dispersión Anti-Stokes [20] [33] [35]. La representación del proceso SRS en cuanto a niveles electrónicos se muestra en la Figura 1.7.

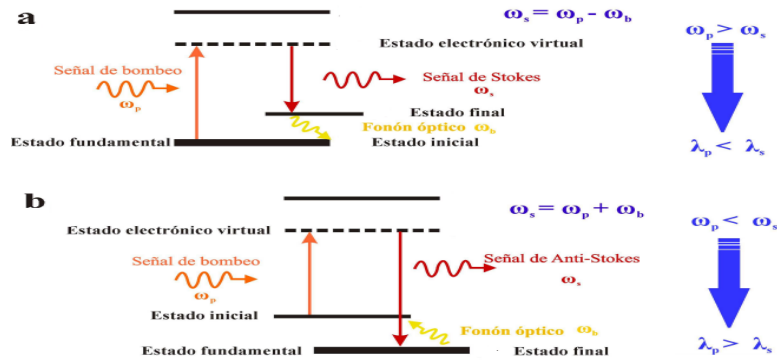


Figura 1.7 Proceso SRS (a) Onda Stokes y (b) Onda Anti-Stokes. Fuente: [36].

La Figura 1.7 indica que un fotón con energía W_p (señal naranja) es absorbido por el medio, y realiza una transición desde el estado fundamental a un estado virtual de energía excitado, tras un tiempo, parte de esa energía es cedida y la restante da origen a un nuevo fotón de energía W_s (señal rojo). Si el estado final de la energía cedida está ubicado un nivel superior que el estado inicial, la emisión del fotón se produce a una menor frecuencia (mayor longitud de onda) que el fotón incidente, en este caso los fotones emitidos producen la onda de Stokes. Si por el contrario el estado final de la energía cedida está ubicado un nivel inferior que el estado inicial, la emisión del fotón se produce a una mayor frecuencia (menor longitud de onda) que el fotón incidente, en este caso la onda que forma los fotones emitidos es una onda Anti-Stokes [35] [36].

Como consecuencia de este proceso, el fotón inicial deja de existir, de manera que, los amplificadores Raman deben ser bombardeados ópticamente para producir ganancia.

El principal impacto de este efecto no lineal es que las frecuencias nuevas que aparecen pueden encontrarse dentro de las bandas de los canales WDM adyacentes, lo cual puede generar diafonía⁴ en banda, difícil de eliminarla mediante filtrado. En sistemas WDM este efecto permite una transferencia de energía (potencia) de frecuencias muy elevadas (λ_s cortas) a frecuencias bajas (λ_s altas), como se muestra en la Figura 1.8 [32] [37].

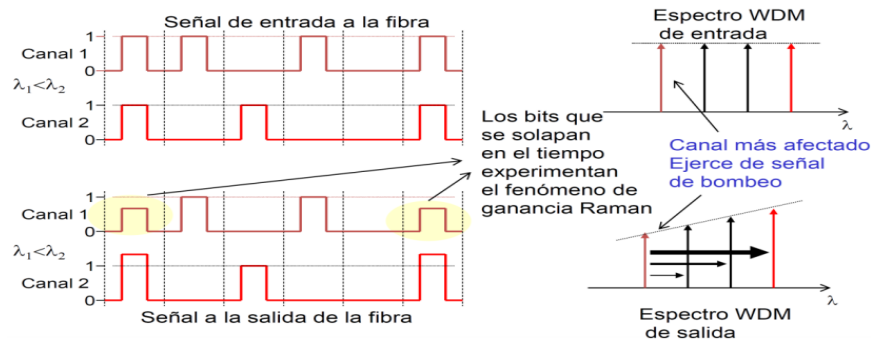


Figura 1.8 Efecto SRS en sistemas WDM. Fuente: [37].

⁴ En telecomunicaciones se dice que entre dos canales existe diafonía cuando parte de la señal presente en uno de ellos, aparece en el otro, es decir, hay una interacción ente señales cercanas. Tiene un efecto perjudicial sobre el rendimiento del sistema.

Si por la fibra se transmite más de un canal, cada uno dará lugar al efecto Raman en su propia frecuencia, produciéndose la amplificación, siempre que estas frecuencias estén dentro del rango de frecuencias características del material. La señal que provoca la amplificación será la propia señal que transmite la información.

La amplificación Raman usa el SRS como mecanismo de ganancia del amplificador [38]. Para conseguir un amplificador Raman utilizando la fibra óptica como medio de ganancia, la señal de bombeo y la señal útil deben transmitirse en la misma fibra, sin importar la dirección de propagación, para así producir la SRS. La Figura 1.9 muestra como una fibra puede ser usada como amplificador Raman, donde el bombeo y la señal se inyectan en la fibra a través de un acoplador de fibra. La energía se transfiere del bombeo a la señal mediante el proceso Raman estimulado mientras ambas radiaciones se van propagando por la fibra [33].

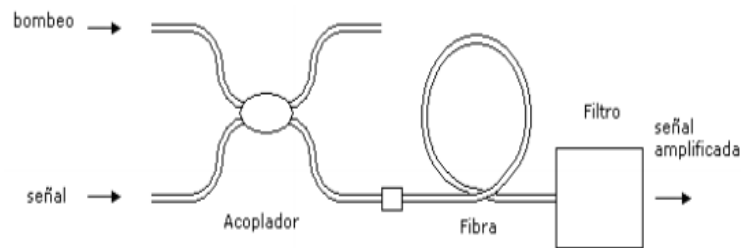


Figura 1.9 Diagrama de un amplificador Raman. Fuente: [33].

El esquema de un amplificador Raman es mostrado en la Figura 1.10, la luz de bombeo se inyecta ya sea en la misma dirección de la señal (Co-bombardeo) como se muestra en la Figura 1.10 (a), o se inyecta en la dirección contraria a la señal (Contra-bombardeo) como se muestra en la Figura 1.10 (b), o la inyección es en ambas direcciones, como se muestra en la Figura 1.10 (c).

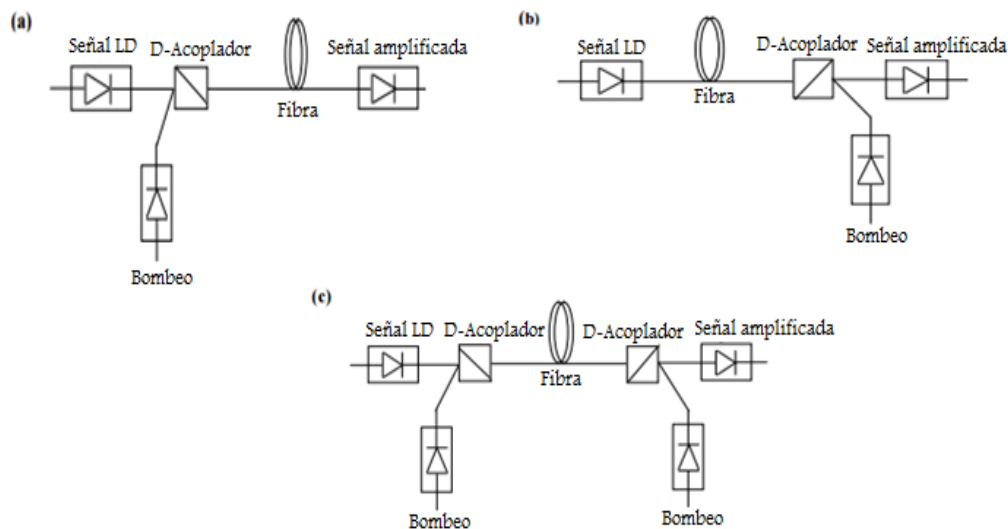


Figura 1.10 Esquema: (a) Co-bombardeo (b) Contra-bombardeo y (c) Bombardeo Bidireccional. Fuente: [39].



Existen tres puntos principales que hacen SRS un excelente candidato para ser utilizado como un amplificador. El primero de ellos subraya que su efecto toma lugar en cualquier fibra. Segundo, que la ganancia Raman puede surgir en cualquier frecuencia de la señal eligiendo la frecuencia de bombeo adecuada. Tercero, el fenómeno de ganancia Raman es extremadamente rápido [38].

La característica más importante de los amplificadores Raman es que comprende un margen de longitudes no cubierto por los EDFA, no requieren ningún tipo de dopante, su rango de ancho de banda se extiende desde los 1300 a 1630 nm, lo que le permite amplificar en cualquier banda, el principal inconveniente de los amplificadores Raman es la necesidad de una alta potencia de bombeo, cercana al vatio o watt [32] [33]. Los amplificadores Raman pueden ser distribuidos y discretos, dependiendo de su diseño. Cuando la fibra que se bombea es el tramo de transmisión real que une dos puntos, esta configuración se conoce como amplificador Raman distribuido⁵. Si el amplificador está contenido en una caja en el extremo transmisor o receptor del sistema se le llama un amplificador discreto. Otra característica distintiva entre amplificadores Raman distribuidos y discretos es la longitud de la fibra utilizada, normalmente los amplificadores Raman discretos tienen longitudes de varias decenas de kilómetros, mientras que los amplificadores Raman distribuidos tienen longitudes de cientos de decenas de kilómetros [40] [41].

Los amplificadores Raman distribuidos que consiguen el efecto de amplificación a través de una porción de fibra óptica utilizada para la transmisión, es decir, hacen uso de la línea de transmisión como un medio de ganancia Raman, son una tecnología prometedora disponible para los sistemas de comunicación de larga distancia, especialmente para sistemas DWDM. Por tal razón, y por permitir mayores distancias, es el amplificador Raman distribuido el que se usará en presente trabajo [40].

La amplificación Raman se ha estudiado activamente como una de las tecnologías claves para redes basadas en WDM de gran capacidad y se ha demostrado para proporcionar mejor relación señal a ruido, ancho de banda más amplio, y perfil de ganancia más plana que la amplificación basada en amplificadores de fibra dopada de Erblio. Por tal razón el presente trabajo de grado está orientado a la investigación de su uso en redes DWDM [3] [42].

1.3 Degradaciones ópticas

Son factores que influyen a una modificación no deseada de la señal original, afectando considerablemente el desempeño de los sistemas de comunicaciones ópticos. Son degradaciones ópticas: los efectos lineales y no lineales, como efectos lineales, se conoce a las degradaciones ópticas que no dependen de la potencia de transmisión y a los efectos no lineales, como degradaciones que ocurren principalmente por las altas potencias y por cambios en el índice de refracción del medio con referencia a la intensidad óptica y a los

⁵ El término amplificación distribuida se refiere al método de cancelación de las pérdidas intrínsecas de la fibra.

fenómenos de dispersión [43] [44]. La clasificación general de las degradaciones ópticas presentes en las transmisiones sobre la fibra se muestran en la Figura 1.11.

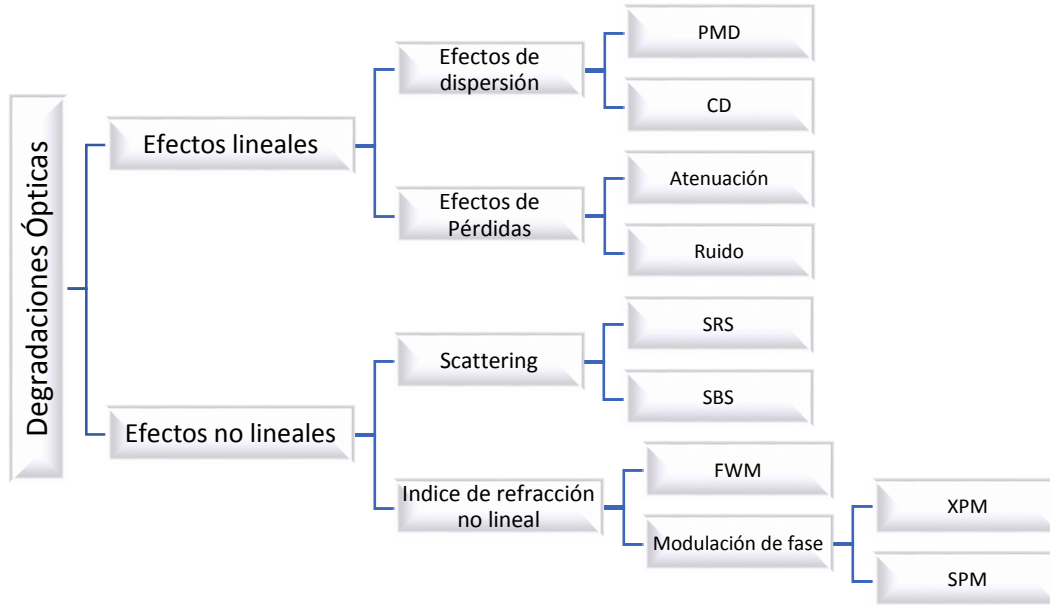


Figura 1.11 Degradaciones ópticas.

Las degradaciones ópticas se agrupan en dos categorías: efectos lineales y no lineales. A continuación se hará una descripción de cada uno de ellos.

1.3.1 Efectos lineales

Dentro de los efectos lineales se encuentran las pérdidas que pueden ser causadas por la atenuación y el ruido, la dispersión que puede ser de dos tipos: PMD y CD [44]. En la Figura 1.12 se muestra la clasificación de los efectos lineales presentes en las transmisiones sobre fibra óptica, de los cuales posteriormente se realiza una descripción donde la información puede ser ampliada en las múltiples referencias nombradas a lo largo del documento.

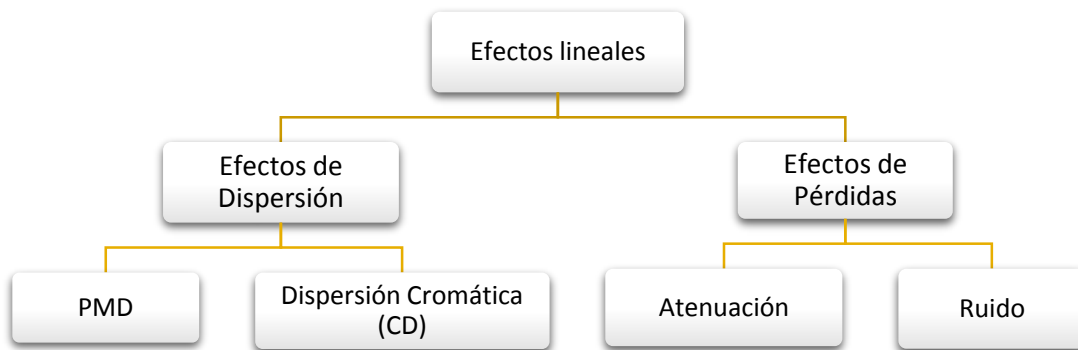


Figura 1.12 Clasificación de los efectos lineales.



1.3.1.1 Efectos de dispersión

La dispersión se mide en ps/nm*Km y está relacionada con el ensanchamiento del pulso al propagarse por la fibra. Existen dos tipos de dispersión: la Dispersión Cromática (CD, *Chromatic Dispersion*), la cual produce un ensanchamiento de los pulsos transmitidos según la longitud de onda y la Dispersión por Modo de Polarización (PMD, *Polarization Mode Dispersion*) que produce un ensanchamiento de los pulsos transmitidos según el modo de polarización. A continuación se presenta una breve explicación de estos dos tipos de dispersión.

▪ Dispersión Cromática

Se produce debido a que los pulsos de luz emitidos están constituidos de varias longitudes de onda que viajan por la fibra a velocidades relativamente distintas, a tal punto que cuando llegan al receptor, modifican la forma del pulso, ensanchándolo, si este es excesivo se manifestará en errores en la decodificación y degradaciones considerables en el sistema óptico. Este fenómeno lineal restringe los sistemas de alta velocidad, por lo cual la CD debe ser controlada por técnicas de compensación de dispersión, las cuales contrarrestan esta limitación [4] [27] [45].

En comunicaciones ópticas, existe una estrecha relación entre la CD y la velocidad de transmisión, matemáticamente se representa así [29]:

$$BR < \frac{1}{4\Delta t} \quad (1.1)$$

Dónde: BR es la tasa de transmisión del sistema y Δt es la máxima dispersión permitida, calculada a partir de la ecuación (1.2).

$$\Delta t = DL \quad (1.2)$$

Dónde: D es la dispersión de la fibra con unidades [ps/km], y L es la longitud de la fibra en [Km].

La dispersión cromática es dependiente de la longitud de onda, a mayor longitud de onda mayor dispersión. En la Figura 1.13 se muestra la dispersión en función de la longitud de onda para los tipos de fibras más usados. Por otro lado, se observa que en la banda C, la dispersión cromática de la Fibra Estándar Monomodo (SSMF, *Single Standar Mode Fiber*) es típicamente 17 ps/nm*Km. Un CD bajo incrementa el deterioro no lineal entre canales, incrementando los efectos no lineales, en consecuencia, las fibras de dispersión desplazadas, DSF son inadecuadas para sistemas WDM [4] [18] [46].

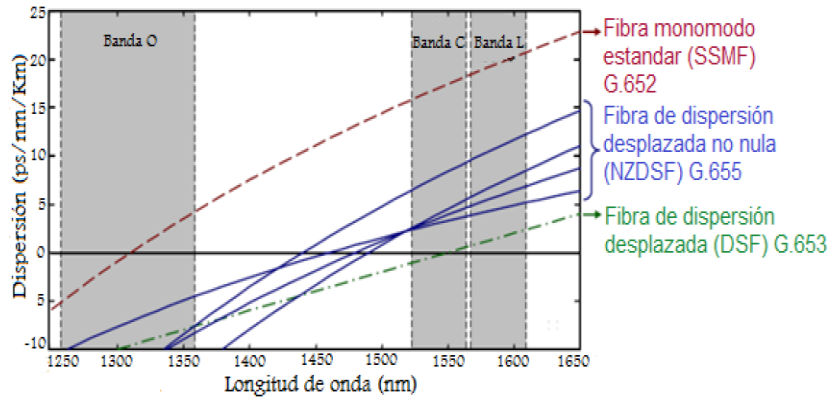


Figura 1.13 Dispersión como función de la longitud de onda para los tipos de fibras más comunes usados en comunicaciones ópticas. Fuente: [22].

Para combatir la CD, fenómeno lineal que produce ensanchamiento de los pulsos transmitidos, se han desarrollado las fibras compensadoras de dispersión (DCF), las cuales son ampliamente usadas en los modernos enlaces ópticos. Su característica principal es presentar una alta dispersión negativa con valores que oscilan entre -100 y -300 ps/nm.km (siendo el primero el de mayor uso comercial), lo que resulta una pendiente negativa para compensar la dispersión positiva de la fibra en las bandas C y L; funcionan empleando pequeños tramos de fibras de dispersión cromática elevada y de signo contrario a la que ha introducido la fibra principal, con ello, de tramo en tramo, se espera que la dispersión cromática total sea prácticamente nula, así se evita la excesiva deformación de los pulsos de luz y distorsión de la señal [4] [13] [27]

Existen tres esquemas básicos de compensar la CD: Esquema Pre-compensación, en donde se compensa la CD antes del tramo de la fibra de transmisión; esquema Post-compensación, en donde se compensa la CD después de la fibra; y el esquema de compensación simétrica, en el cual se colocan tramos de DCF's, antes y después de las fibras de transmisión. La Figura 1.14 muestra estos tres esquemas.

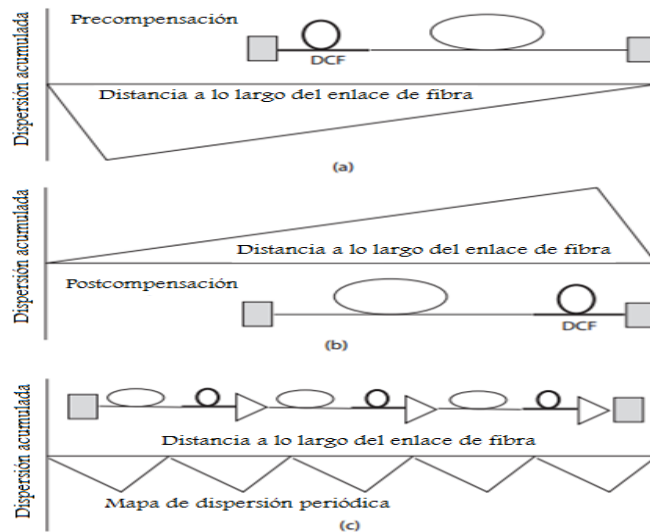


Figura 1.14 Técnicas de compensación óptica para la CD. Fuente: [47].



A pesar de que las fibras compensadoras de dispersión compensan de manera adecuada la CD, su principal desventaja, es la atenuación introducida por este tipo de fibras, aproximadamente tres veces mayor (0,5 dB/km aprox.) que una fibra estándar (0,2 dB/km), lo cual aminora la calidad de la señal recibida. Para contrarrestar esto se hace necesario aumentar el nivel de potencia desde la fuente óptica o con el uso de amplificadores. Sin embargo, la solución no es completamente satisfactoria, por el hecho de que se introducen componentes de más al sistema, que generan pérdidas adicionales, degradan la SNR y adicionan costo [4] [13].

Las propiedades más relevantes de la DCF son: la atenuación, el coeficiente de dispersión, la figura de ruido y el área efectiva [4].

- Atenuación: Pérdida del nivel de potencia de la señal, cambia linealmente con la distancia del enlace, es decir, a mayor longitud de la fibra mayor atenuación y viceversa.
- Coeficiente de Dispersión: Como ha sido mencionado, la dispersión es un fenómeno lineal que deforma los pulsos transmitidos. Si es excesivo se manifestará en la superposición de 1s y 0s, los cuales generan distorsión y errores en decodificación. Este valor se caracteriza por ser negativo y por ser uno de los parámetros más importantes ya que permite contrarrestar la dispersión total acumulada en el enlace de la fibra convencional.
- Figura de Merito: Define la relación que existe entre la dispersión y la atenuación de la DCF.

$$FOM = -\frac{D_{DCF}}{\alpha_{DCF}} \quad (1.3)$$

- Área efectiva: Es la sección del núcleo de la fibra por la cual atraviesa toda la potencia lumínica [34].

Para transmisiones DWDM de largo alcance se hace necesario mitigar la dispersión cromática, razón por la cual se requiere un método de compensación de dispersión para mitigar dicho fenómeno. Para este trabajo de grado, se enfoca el estudio en el método de compensación por DCF.

▪ Dispersión por modo de polarización

Cuando los modos de polarización viajan a distinta velocidad, con diferentes tiempos de llegada se produce ensanchamiento y distorsión en los pulsos ópticos que se transmiten por la fibra, generando un retardo diferencial de grupo (DGD, *Differential Group Delay*), el cual ocasiona interferencia entre símbolos y con esto un aumento en la Tasa de Error por Bit (BER, *Bit Error Rate*) [22] [48].

La causa principal de PMD se debe a la asimetría del hilo de fibra óptica, dicha asimetría puede ser originada debido a un mal proceso de fabricación de la fibra o puede resultar de la tensión mecánica en la fibra desplegada [49].

La fibra óptica G.652 tiene un valor de PMD máximo de $0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$, dicho valor cambia de forma aleatoria con respecto al tiempo y longitud de onda, por ello los diseñadores de



los sistemas se enfatizan en realizar predicciones de los efectos de las PMD ya que en muchas ocasiones resulta imposible su compensación, de esta manera, se hace más difícil prever y compensar que la dispersión cromática [18].

1.3.1.2 Efectos de pérdidas

Son las pérdidas que se generan cuando se propaga la señal a través de la fibra, se presentan exclusivamente por propiedades químicas y físicas de la misma fabricación de la fibra óptica.

- **Atenuación**

La atenuación de la señal óptica representa la disminución de la energía de la señal cuando pasa por el medio de transmisión, los factores que provocan atenuación, pueden ser causas intrínsecas a la propia fibra (constitución física) o factores externos a la misma (como procesos de fabricación, tendido, envejecimiento, etc.). Dentro de los factores intrínsecos, específicamente se encuentra la absorción y la dispersión y dentro de los factores extrínsecos, los defectos en el proceso de fabricación [45].

Con respecto al impacto de la atenuación en redes DWDM, se han desarrollado fibras que manejan coeficientes de atenuación por debajo de los 0,2 dB/Km a través de grandes anchos de banda. No obstante, la atenuación reduce el nivel de potencia con la distancia, hasta el punto de no ser posible la detección de la información, ya que la potencia de la señal estaría por debajo de los umbrales detectables por los receptores ópticos, de esta manera, la atenuación se convierte en un limitante al momento de calcular la distancia de un enlace.

- **Ruido**

La propagación de ondas electromagnéticas en forma de luz hacen que la fibra óptica no necesite de voltajes ni corrientes, lo cual la convierte en un medio insensible a la interferencia eléctrica, ventaja importante cuando se desea aprovechar el tendido de redes eléctricas para montar fibra óptica sobre ellas. Sin embargo, existe la presencia de ruido en el sistema, pero, el ruido introducido en redes ópticas no es el mismo ruido que se adiciona a una fuente de transmisión, sino es un ruido causado por la conversión del sistema fotónico al sistema eléctrico. Los tipos de ruido presentes específicamente en el fotodetector son: Ruido cuántico o de impacto de fotocorriente generada, Ruido de impacto de la corriente de oscuridad y Ruido térmico o Johnson [50].

1.3.2 Efectos no lineales

Cuando la velocidad de transmisión supera los 10 Gbps y/o potencia de transmisión se incrementa, es necesario considerar los efectos no lineales y su impacto en el desempeño de las redes ópticas. Los efectos no lineales ocurren debido a la dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo aplicado y por el fenómeno de dispersión inelástica (Scattering) [44]. En la Figura 1.15 se muestra la clasificación de los efectos no lineales

presentes en las transmisiones sobre fibra óptica, a continuación se realiza una breve explicación de cada uno de dichos efectos.

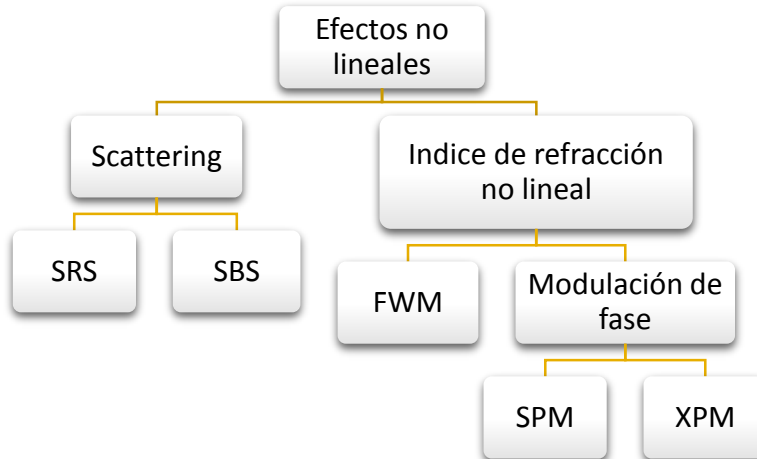


Figura 1.15 Clasificación de los efectos no lineales.

Existen dos parámetros que es importante definir antes de estudiar los efectos no lineales, ya que su variación impacta positiva o negativamente en desempeño del sistema [48].

- Longitud efectiva: longitud que requiere recorrer la luz para que ocurran los efectos no lineales. Esta está dada por la ecuación 1.4.

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

Dónde: α es la atenuación de la fibra y L la longitud total del enlace.

Para fibras con atenuación pequeñas, la ecuación 1.5 puede ser aproximada a:

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

- Área efectiva: Es un parámetro estrechamente relacionado con las no linealidades de la fibra óptica, las cuales degradan la claridad con la distancia y velocidad. El área efectiva se hace importante en los enlaces de largo alcance. Un valor estimado de área efectiva viene dado por la ecuación 1.6.

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

Dónde: w_0 es el diámetro del campo modal (MFD).

1.3.2.1 Efecto Scattering

Se presenta por altos niveles de potencia, incluye efectos estimulados como: Dispersión Estimulada de Raman (SRS, *Stimulated Raman Scattering*) y Dispersión Estimulada de Brillouin (SBS, *Stimulated Brillouin Scattering*).

▪ Dispersión Estimulada de Raman (SRS)

Es un efecto de banda ancha que genera transferencia de energía de los canales de mayor frecuencia (λ s cortas) a los canales de menor frecuencia (λ s grandes), cuando en una misma fibra se introducen dos o más señales. Se le conoce onda Stokes a la onda que se le transfiere la energía [44] [48].

Como ha sido mencionado en la sección 1.2 el fotón resultante de la interacción del haz de luz con los átomos del material que conforman la fibra óptica se le llama fotón de Stokes, el cual puede resultar con menor energía al fotón incidente produciendo la onda Stokes, o en caso contrario, resulte con mayor energía produciendo la onda Anti-Stokes. En el caso de SRS, la onda Stokes puede ser generada tanto en la misma dirección como en dirección opuesta a la onda incidente. En cambio, en el caso de SBS, esta onda se propaga únicamente en dirección opuesta a la onda incidente [14] [28] [51].

De los parámetros fundamentales a evaluar en la dispersión estimulada Raman son: El coeficiente de ganancia Raman, la frecuencia Raman y la potencia umbral Raman. Sin embargo, el parámetro más importante para describir la SRS es el coeficiente de ganancia Raman. Éste ha sido medido experimentalmente y depende de la composición del núcleo de la fibra y puede variar con el uso de dopantes. La característica más importante del coeficiente de ganancia Raman, en fibras ópticas de silicio es que se extiende en un rango de frecuencias de poco más de 35 THz, con un valor máximo localizado cerca de los 13 THz (~ 100 nm), valor conocido como frecuencia Raman, el cual representa el valor central del espectro de ganancia Raman [34] [48] [52].

De manera experimental en fibras monomodo de silicio se tiene una ganancia Raman de $g_R = 6.95 \times 10^{-14}$ m/w para longitudes cercanas a 1550 nm. Un perfil espectral aproximado de la ganancia se muestra en la Figura 1.16.

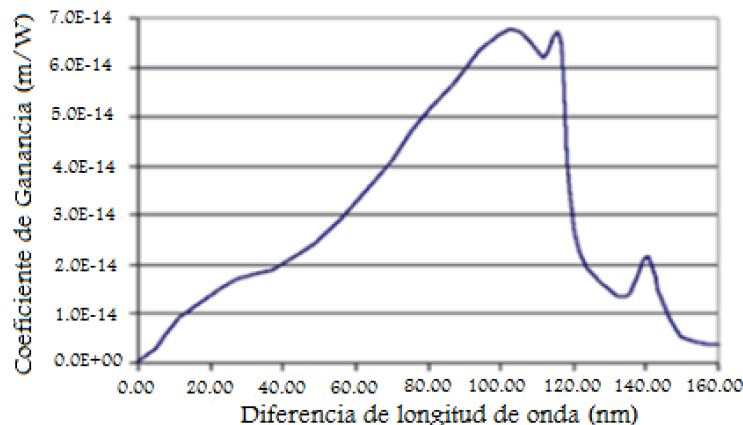


Figura 1.16 Coeficiente de ganancia Raman. Fuente: [53].

Para la dispersión estimulada Raman existe una potencia límite o de umbral Raman. El límite de potencia debido a SRS, es el nivel crítico en el cual la potencia incidente y la potencia dispersada son iguales [48] [52] [54] [55]. La potencia umbral Raman depende



de: la polarizabilidad de la molécula, la intensidad de la fuente, el tipo de material y otros factores, está dada por la ecuación 1.7 [52].

$$P_{Limite}(SRS) = f_{th} \frac{A_{ef}}{g_R L_{ef}} \quad (1.7)$$

Donde, f_{th} es el factor Raman para la potencia umbral, A_{ef} es el área efectiva de la fibra, L_{ef} es la longitud efectiva de la fibra y g_R la ganancia Raman. El factor Raman f_{th} toma dos valores dependiendo de la dirección resultante del fotón de Stokes, si viaja en la misma dirección de la señal (Co-propagación) el valor es 16, si por el contrario, viaja en la dirección opuesta de la señal (Contra-propagación) el valor es 20; sin embargo, la literatura [34], [36], [44], [46], [55], recomienda un valor de 16 indistintamente de la dirección de bombeo de la señal, razón por la cual se establece dicho valor para el factor Raman (f_{th}).

▪ **Dispersión Estimulada de Brillouin (SBS)**

Se genera por la interacción de la señal óptica con las ondas acústicas en la fibra. La interacción fotón-fonón acústico genera una onda llamada onda Stokes que se propaga por el núcleo en sentido contrario a la dirección de propagación de la onda incidente [37]. En el caso de fibras estándar operando en 1550 nm la onda dispersada se encuentra desplazada con respecto a la onda incidente una frecuencia de 11,2 GHz, valor mucho menor que la frecuencia del efecto SRS que es aproximadamente 13 THz [34]. Al igual que en SRS, existe una potencia límite SBS [52], la cual está dada por la ecuación (1.8).

$$P_{Limite}(SBS) = \frac{21A_{ef}}{g_B L_{ef}} \quad (1.8)$$

Donde, A_{ef} es el área efectiva de la fibra, L_{ef} es la longitud efectiva de la fibra y g_B la ganancia de Brillouin. El valor de ganancia de Brillouin en fibras ópticas monomodo es aproximadamente de $g_B = 5 \times 10^{-11}$ m/w [34].

Los niveles de potencia a los que se produce SBS son muchos menores que los que se necesitan para generar SRS. La dispersión estimulada de Brillouin es independiente del número de canales que se estén empleando [34] [48].

1.3.2.2 Dependencia del índice de refracción no lineal

Algunos efectos no lineales causados por la dependencia existente entre el índice de refracción y la intensidad de campo aplicado son: Mezcla de cuatro ondas (FWM, *Four Wave Mixing*), Automodulación de Fase (SPM, *Self Phase Modulation*) y Modulación de Fase Cruzada (XPM, *Cross Phase Modulation*) [44]. A continuación se realiza una breve explicación de dichos efectos no lineales.

▪ **Mezcla de Cuatro Ondas (FWM)**

FWM, es un proceso no lineal que se genera cuando dos o más longitudes de onda se transmiten simultáneamente a través de una fibra óptica, lo que puede ocasionar una

mezcla de señales y generar nuevas componentes de frecuencia, esto debido a la dependencia que existe entre el índice de refracción y la potencia de transmisión [14] [22]. La Figura 1.17 muestra la aparición de nuevas componentes de frecuencia sobre la señal debido a la mezcla de señales.

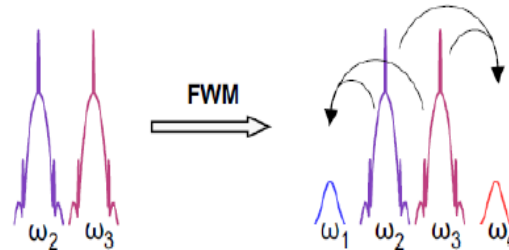


Figura 1.17 Generación de frecuencias adicionales debido a FWM. Fuente: [18].

Este efecto no lineal ocurre cuando se presenta la condición de coincidencia de fase “*phase-matching*”. FWM depende de la potencia de la señal, dispersión y del espaciado de canales WDM [48]. El número de posibles componentes creadas por FWM se incrementa casi exponencialmente con el número de señales que se propagan en la fibra y estas pueden interferir con señales adyacentes.

Para lograr minimizar las consecuencias generadas debido al efecto FWM se sugiere utilizar canales de transmisión con separaciones grandes en frecuencia, como también controlar la posición de los canales en frecuencia para evitar la aparición de componentes ópticas indeseables [56].

▪ **Automodulación de fase (SPM)**

Se produce debido a que el índice de refracción de la fibra tiene una componente dependiente de la intensidad de la señal, el cual induce un desplazamiento de fase que es proporcional a la intensidad del pulso. Es por esto que distintas partes del pulso tienen una intensidad diferente y se ven sometidas a diferentes cambios de fase, esto resulta en un chirp⁶ introducido por SPM, lo cual causa un ensanchamiento del pulso. Básicamente en SPM, el pulso que pasa por la fibra cambia de fase debido a un cambio en el índice de refracción de la fibra con la intensidad del mismo y como consecuencia se produce un ensanchamiento espectral del pulso [32] [51] [57].

Este efecto no lineal se debe al efecto kerr⁷, y es más pronunciado en sistemas que utilizan altas potencias de transmisión o en sistemas con alta tasa de transmisión de bits (sistemas operando a 10 Gbps o más), de este modo, SPM es un efecto no lineal que limita el desempeño en redes ópticas a altas velocidades [37] [48].

▪ **Modulación de fase cruzada (XPM)**

Al igual que el efecto SPM, la modulación de fase cruzada XPM, se produce como consecuencia de la dependencia del índice de refracción con la intensidad de la señal

⁶ Chirp, hace referencia a una variación de la amplitud y frecuencia de la señal emitida por el láser [18].

⁷ Efecto Kerr, tipo de no linealidad dominante en las fibras ópticas que se manifiesta mediante un desplazamiento no lineal de la fase [31].



que atraviesa la fibra. La diferencia entre ambos efectos se centra precisamente en que XPM no solo depende de la intensidad de la señal, sino que también depende de la intensidad de otras señales que se propagan dentro de la misma fibra. En efecto, dentro de un sistema WDM, XPM se produce entre los diferentes canales transmitidos, de manera que la potencia de un canal puede afectar a la fase de otro canal, provocando efectos de ensanchamiento de pulsos cruzados [40] [55].

El cambio de fase no lineal inducido por XPM, es más perjudicial que SPM cuando dos pulsos a diferente longitud están parcialmente solapados en el tiempo. En XPM no hay transferencia de energía y siempre va acompañada de SPM. En sistemas a 10 Gbps, dominan los efectos producidos por la XPM para espaciamientos de 25 GHz y los efectos de SPM para espaciamientos de 100 GHz, es decir, XPM es más perjudicial para canales con espaciamiento estrecho [18].

En general, los efectos no lineales provocan un deterioro en la calidad de la señal transmitida y obligan a limitar la potencia de transmisión, el número de canales, la distancia del enlace, la tasa de transmisión, entre otros. Así mismo, el impacto que genera cada uno de estos efectos en la señal no tiene la misma influencia [57]. La Tabla 1.2 muestra la dependencia de dichos fenómenos con respecto a los principales parámetros de diseño en redes DWDM.

Tabla 1.2 Efectos no lineales y su relación con algunos parámetros de diseño del sistema. Fuente: [58].

PRINCIPALES PARÁMETROS DE DISEÑO	Penalidad SRS	Penalidad SBS	Penalidad FWM	Penalidad SPM	Penalidad XPM
Menor espaciamiento de canales	--	ee	↑	--	↑
Mayor número de canales	↑	--	↑	--	↑
Mayor potencia de los canales	↑	↑	↑	↑	↑
Mayor número de tramos	↑	↑	↑	↑	↑
Mayor velocidad binaria de canal	ee	↓	--	↑	↓
Tasa de transmisión (> 10 Gbps)			--	↑	--

↑ Aumenta la penalidad
 ↓ Disminuye la penalidad
 -- La penalidad no se ve afectada
 ee Penalidad en estudio

1.4 Parámetros de Monitoreo Óptico

El monitoreo de desempeño óptico (OPM, *Optical Performance Monitoring*) se refiere al monitoreo a nivel físico de la calidad de la señal, para obtener un buen rendimiento de ésta en el dominio óptico [43]. Para el análisis y evaluación del desempeño de la señal óptica de un enlace de transmisión por fibra óptica, existen una serie de parámetros y técnicas que proveen información sobre el desempeño de la red, como son la BER, el Factor Q, el diagrama de ojo, entre otros. A continuación se realiza una descripción de los parámetros



de monitoreo óptico a ser considerados para el desarrollo del presente trabajo. Estos parámetros se encuentran definidos en el estándar ITU-T G.697 [59].

▪ Factor Q

Se define como la Relación Señal a ruido Eléctrica (ESNR, *Electrical Signal to Noise*) en la entrada de un circuito de decisión de un receptor, este circuito de decisión tras realizar una comparación de señales eléctricas, muestra que tanta calidad ha tenido el enlace para lograr identificar el “1” del “0”. Entre mayor sea el valor de Q, significa que se reconoce con más claridad los niveles lógicos transmitidos. El Factor Q se mide en dB, un valor aceptable para sistemas convencionales de comunicaciones es 15.56 dB [4]. El Factor Q es considerado como un indicador cualitativo de la BER real, ya que efectúa mediciones tanto de la parte superior como inferior del “ojo” para así conocer la calidad de la señal [60]; suele expresarse así [56]:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad (1.9)$$

Donde, $I_{1,0}$ son los niveles lógicos y $\sigma_{1,0}$ corresponden a la distribución de ruido Gaussiano en torno a los niveles “1” y “0”.

▪ Tasa de Error de Bit (BER)

Es el parámetro de medida más importante en comunicaciones ópticas para medir el desempeño del sistema, representa el número de bits que se han transmitido erróneamente respecto a los transmitidos, medido en recepción. Según la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-T, *International Telecommunication Union*) establece para el diseño de los sistemas ópticos de 10 Gbps un valor de BER de 10^{-12} (1 bit erróneo por cada billón de bits transmitidos) [60].

Es muy difícil que valores de 10^{-40} se den en la práctica, porque, primero las pérdidas deben ser muy bajas, y segundo el enlace debe ser muy corto. Cuando el BER es más alto es más difícil de cumplir, es decir, si se aumenta la BER, significa que se está tolerando mayormente los errores y eso implicaría mayores prestaciones de calidad de la señal, sin embargo en los sistemas convencionales de fibra óptica la BER es un limitante para el diseño de sistemas ópticos. La BER se ve afectada por el ruido, la dispersión y los efectos no lineales. Degradaciones que es posible contrarrestar con compensadores de dispersión, empleando amplificadores, incrementando la potencia de transmisión, reduciendo pérdidas, entre otros parámetros y elementos que contribuyan a mantener un BER objetivo [4]. Matemáticamente la BER se expresa así [47]:

$$BER = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{I_1 - I_D}{\sigma_1 \sqrt{2}} \right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{I_D - I_0}{\sigma_0 \sqrt{2}} \right) \quad (1.10)$$

Donde $I_{1,0}$ son los niveles de tensión y $\sigma_{1,0}$ corresponden a la distribución de ruido Gaussiano en torno a los niveles “1” y “0”, en la Figura 1.18 se aprecia la relación entre la función densidad de probabilidad y la BER.

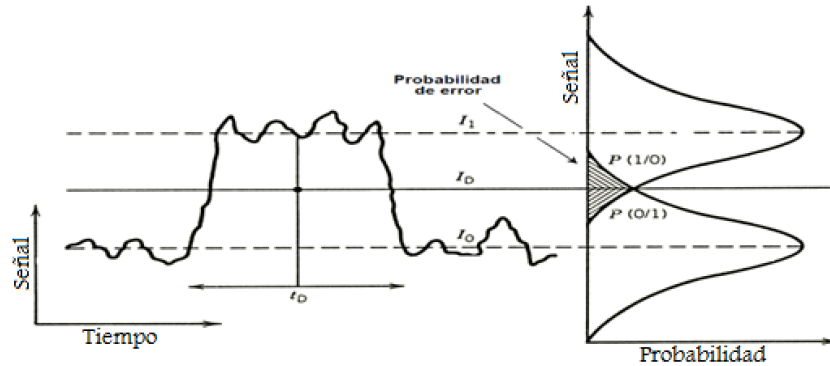


Figura 1.18 Relación entre la función de densidad de probabilidad y la BER. Fuente: [47].

La Tasa de Error de Bit se relaciona con el Factor Q de la siguiente manera [22] [47]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad (1.11)$$

Donde, $\operatorname{erfc}(x)$ es la función complementaria de error. Debido a la complejidad de $\operatorname{erfc}(x)$ comúnmente se utiliza la siguiente aproximación [29] [47]:

$$BER \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Q^2}{2}} \quad (1.12)$$

▪ Diagrama del ojo

Para estudiar el comportamiento de los enlaces de transmisión, el uso del diagrama de ojo es muy utilizado, ya que permite el análisis de las formas de onda de los pulsos que se propagan en el canal de transmisión y del cual se pueden deducir parámetros de medición como la BER y el Factor Q. Representa la superposición de las distintas combinaciones de unos y ceros en un rango de tiempo determinado. El diagrama de ojo permite observar parámetros que determinan la calidad de la señal, a través de dos tipos de cruces: cruce de tiempo, donde se produce la apertura y cierre del ojo, y cruce de amplitud el cual consiste en el nivel de voltaje que produce la apertura y cierre del ojo definiéndose en un periodo de bit [61] [62].

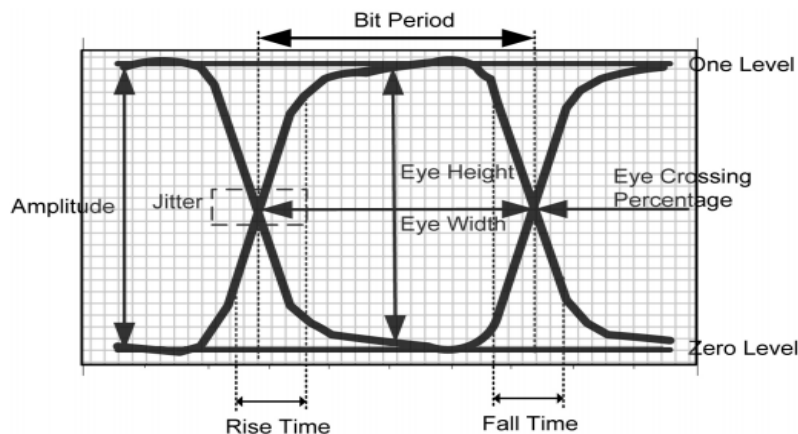


Figura 1.19 Parámetros del Diagrama del Ojo. Fuente: [62].



En la Figura 1.19 se muestra las medidas típicas de un Diagrama de Ojo. A continuación se realiza una breve descripción de dichas medidas [61] [62].

- Amplitud del Ojo (Eye Amplitude): Es la diferencia entre los niveles “One level” y “Zero level”. Representa la potencia de la señal y no tiene en cuenta ningún efecto de degradación.
- One level: Corresponde al valor de un uno lógico.
- Zero level: Corresponde al valor de un cero lógico.
- Altura del Ojo (Eye Height): Es la apertura vertical del ojo. Define el margen de ruido del sistema, interferencia Intersimbólica (ISI, *Intersymbol Interference*) y atenuación de la señal. Una medida ideal de “Eye Height” sería igual a la medición de la Amplitud del Ojo.
- Ancho del Ojo (Eye Width): Es la apertura horizontal del ojo. Intervalo de tiempo en el cual la señal recibida puede ser muestreada sin error. Se calcula mediante la medición de la diferencia entre la medida estadística de los puntos de cruce del ojo.
- Porcentaje de Cruce de Ojo (Eye Crossing Porcentaje): Es la ubicación del nivel de cruce como un porcentaje de las aperturas del ojo, consiste de dos partes: Crossing Time (tiempo en el cual se produce la apertura y posterior cierre del ojo) y Crossing Amplitud (nivel de voltaje en el que se produce la apertura y posterior cierre del ojo). Este parámetro da una indicación de la distorsión del ciclo duty o problemas en la simetría del pulso, así mismo es una medida valiosa para medir las distorsiones de amplitud causadas por las diferencias en la duración del “One level” y “Zero level”.
- Jitter: Es la desviación de tiempo de una señal de su posición ideal y es quizás uno de los parámetros más importante de una señal de alta velocidad, sus unidades normalmente están en picosegundos.
- Tiempo de subida (Rise Time): Se puede entender como la medida del tiempo de transición de los datos en la pendiente ascendente de un diagrama de ojo. La medición se realiza típicamente a los 20 y 80% o 10 y 90% de los niveles de la pendiente.
- Tiempo de caída (Fall Time): Se puede entender como la medida del tiempo de transición de los datos en la pendiente descendente de un diagrama de ojo. La medición se realiza típicamente a los 20 y 80% o 10 y 90% de los niveles de la pendiente.
- Periodo del Bit (Bit Period): Es una medida de la apertura horizontal del ojo con los puntos de cruce.

Mediante el desarrollo de este primer capítulo, se describe la base teórica para el diseño de una red DWDM, así mismo, se describe de forma general el fenómeno Raman para dar entendimiento a la amplificación Raman, objeto de estudio del presente trabajo de grado, para su posterior análisis de desempeño.

Por otro lado se describe efectos lineales y no lineales de mayor importancia, permitiendo comprender cuales de estas degradaciones afectan el desempeño en redes DWDM. Dentro de las degradaciones más significativas a tener en cuenta para el desarrollo de la presente investigación a 10 Gbps es la dispersión cromática, la atenuación y como efecto



no lineal principal SPM, así mismo la dependencia de la potencia toma un rol trascendental en el estudio del mismo.

Finalmente, se establece los parámetros de monitoreo a usar en el presente trabajo de grado para analizar el desempeño de la red DWDM con amplificación Raman, estos son: BER, Factor Q y Diagrama de ojo.

Una vez estudiada la base teórica acerca de las redes DWDM, la amplificación Raman, degradaciones ópticas y el monitoreo de desempeño óptico, en el siguiente capítulo, se procede a caracterizar la red, definiendo sus principales características y parámetros de diseño. Así mismo, se describe las configuraciones Raman a evaluar a nivel de simulación; esto con el fin de plasmar un escenario de simulación que permita analizar la amplificación Raman y sus distintas configuraciones con el uso de DCF's.



CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps PARA CONFIGURACIONES RAMAN

Partiendo de la base teórica descrita en el capítulo anterior, en el presente capítulo se procede a caracterizar una red DWDM, a 10 Gbps y un modelo simplificado de la red, teniendo en cuenta parámetros de desempeño y monitoreo suministrados por la ITU, como también, equipos comerciales del mercado, lo cual permitirá generar y analizar mediante un escenario de simulación y diferentes casos de estudio el desempeño de la red a caracterizar. La caracterización de la red se fundamenta en:

- Topología punto a punto que se caracteriza por alcanzar altas velocidades, entre 10 y 40 Gbps, presentar alta integridad, confiabilidad de la señal, rápida restauración de trayectoria y simplificación del esquema de red. Utilizada para redes Long-Haul [24] [63].
- Velocidad estándar a nivel nacional 10 Gbps. Sin embargo, dentro de las velocidades de trabajo a nivel nacional utilizadas por algunos operadores se puede constatar que 2.5 Gbps es la más usada, pero dado los nuevos requerimientos de demanda por la multiplicación de servicios multimedia e incremento de suscriptores la velocidad de transmisión migra a 10 Gbps, velocidad aún aceptable para los actuales sistemas de comunicaciones ópticos [18]. Al seleccionar la velocidad de 10 Gbps, el tiempo de duración del bit (T_d) es calculado a partir de la ecuación 2.1 [46]:

$$T_d = \frac{1}{R} = \frac{1}{10 \text{ Gbps}} = 0.1 \text{ ns} \quad (2.1)$$

- Formato de modulación NRZ-OOK. Se selecciona el formato de modulación que presente un mejor equilibrio no solo frente a degradaciones ópticas, sino también a otros factores tales como: complejidad, costo, equipos, etc, para una velocidad de 10 Gbps. Esta selección se realiza con respecto a las siguientes investigaciones, entre otras:
 - **Análisis del desempeño de formatos de modulación en comunicaciones ópticas sobre redes DWDM [18]:** Se detallan y comparan diferentes formatos de modulación para sistemas WDM a velocidades de transmisión de datos a 2,5 Gbps, realizando especial énfasis a los formatos NRZ-OOK, RZ-DQPSK y RZ-DPSK, donde se concluye que debido a la relación costo-eficiencia para los operadores nacionales el formato NRZ-OOK continua siendo una solución viable en los sistemas WDM actuales.
 - **Impacto de la fibra óptica sobre el desempeño de una red WDM a 10 Gbps [29]:** Se analiza y se muestra la repercusión de los efectos lineales utilizando distintos tipos de fibra óptica en un sistema WDM, en el cual el formato de modulación es NRZ-OOK y se concluye que a pesar de la variación de diferentes tipos de fibras, el formato de modulación resulta adecuado para dicho sistema, debido a que presenta fácil implementación, baja complejidad y costo reducido.



- **Análisis del desempeño de redes WDM frente a variaciones en los parámetros de transmisión y su incidencia en los efectos no lineales [46]:** Se detallan y comparan diferentes formatos de modulación para sistemas WDM a velocidades de transmisión de datos a 10 y 40 Gbps, en el cual se realiza especial énfasis a los formatos NRZ-OOK y RZ-DPSK, donde se concluye que la robustez del formato RZ-DPSK frente a NRZ-OOK reduce el impacto de las no linealidades, sin embargo, se observa que sin adicionar técnicas o métodos de compensación de dispersión la distancia alcanzada por ambos formatos de modulación resultaron similares.

El formato de modulación No Retorno a Cero (NRZ, *Non Return to Zero*) ha sido el formato de modulación dominante en los sistemas de comunicaciones ópticas, debido a razones favorables como requerir menor ancho de banda en comparación a otros sistemas, lo cual, en la mayoría de los casos es beneficioso sabiendo que el ancho de banda es un recurso limitado, no es sensible al ruido de fase, menor demanda de número de componentes electrónicos y ópticos para generar y detectar señales ópticas y cuenta con una configuración simple en el transmisor y receptor [64]. En general, las señales ópticas moduladas mediante NRZ poseen el espectro más compacto comparado con otros formatos de modulación. Sin embargo, no significa que presente mayor tolerancia a CD o a efectos no lineales [22].

Para los sistemas futuros de comunicaciones con uso de Raman y con velocidades y distancias más grandes, NRZ puede no ser la mejor opción de formato de modulación [65], debido a que formatos como DPSK se proyectan como nuevas alternativas para lograr un mayor alcance y/o capacidad, sin embargo su viabilidad comercial no ha sido demostrada [66]. Acorde a lo mencionado y documentación anteriormente descrita, se elige NRZ como formato de modulación para el presente trabajo, debido a su fácil configuración, costo, eficiencia y su continuidad, ya que sigue siendo implementado actualmente por operadores nacionales para velocidades de transmisión de 10 Gbps. Así mismo, sirve como una buena referencia para propósitos de comparación con respecto a otros formatos de modulación, a la hora de inyectar Raman a la red para trabajos futuros.

- Tecnología DWDM unidireccional. En los sistemas unidireccionales todas las longitudes de onda viajan en la misma dirección dentro de la fibra. Esta técnica resulta útil debido a una utilización más eficiente de la capacidad disponible, generalmente es más fácil para diseñar e instalar.
- En cuanto a los valores de potencia de transmisión y sensibilidad del receptor para sistemas DWDM se tiene en cuenta equipos utilizados por operadores nacionales. En el actual mercado de telecomunicaciones sobresalen diversas marcas que se diferencian por la manera de ofrecer el mismo funcionamiento con características distintas. Debido a que se requiere una velocidad de 10 Gbps los equipos a utilizar deben realizar la transmisión con tarjeta STM-64, los equipos proporcionados por Huawei son los más utilizados dentro de las configuraciones de las redes DWDM (Anexo A.4, Tabla A4.1). La Tabla 2.1 muestra las especificaciones del equipo elegido para el actual desarrollo del trabajo de grado.



Tabla 2.1 Parámetros técnicos de la tarjeta STM-64 Equipos HUAWEI Optix Metro 6040.
Fuente: [67].

EQUIPO: OPTIX METRO 6040	
Modo de Codificación	NRZ
TRANSMISOR	
Potencia de Operación [dBm]	5 a 10
Frecuencia Central Nominal [THz]	192,1 – 196
Máxima Dispersión [ps/nm]	800 -1650
RECEPTOR	
Tipo de Receptor	PIN / APD
Sensibilidad [dBm]	-16 a -26

- Tipo de modulación externa. Existen dos métodos mediante los cuales puede ser modulada una fuente de luz: directa y externa, para el presente trabajo de grado se utiliza el método de modulación externa que hace un mejor control del chirp, y se elige moduladores con Interferómetro Mach-Zehnder (MZI, *Mach-Zehnder Interferometre*) que son usados actualmente en sistemas de altas velocidades de transmisión por su simplicidad de fabricación y presentar excelentes características para detectar cambios de índice de refracción y variaciones en temperatura [34] [68].
- Láser de onda continua lorentziano (especificado en la sección 1.1.2).
- Banda de operación: C. Dentro de las bandas ópticas O, E, S, C y L, la convencional (C) es la banda con mayor aceptación por la menor cantidad de pérdida por kilómetro que se presenta en este rango. Así mismo, el estándar ITU G.694.1 [10] recomienda las bandas L y C para los sistemas DWDM, sin embargo debido a la atenuación de la fibra óptica la banda C es la más usada, esta banda comprende la región que va desde los 1530 a los 1560 nm.
- Tipo de Fibra: Monomodo Estándar (SSMF). Los sistemas DWDM usan principalmente las fibras monomodo, las cuales permiten alcanzar mayores distancias y transmitir elevadas tasas de bits. La SSMF está definida por la recomendación UIT-T G.652 [69], la cual, presenta cuatro variantes: G.652.A, G.652.B, G.652.C y G.652.D [29].

De acuerdo a la recomendación ITU-T G.652 y a los requerimientos la red a caracterizar, se utiliza una tarjeta STM-64 que proporcione características similares a G.652.D para garantizar así una tasa de 10 Gbps y adaptabilidad para trabajar en la banda de operación C.

Se utiliza la fibra SSMF-28 de Corning, una de las más utilizadas a nivel comercial en sistemas WDM y que cumple con lo estipulado en la recomendación ITU-T G.652 [69]. Esta fibra ha sido escogida por ser compatible con la tecnología DWDM, poseer un diámetro de núcleo muy pequeño que garantiza transmisiones más extensas y por ser una de las fibras más vendidas en el mundo (desplegada en más de 45 países) [70]. La Tabla 2.2 muestra las características más específicas para dicho tipo de fibra.



Tabla 2.2 Especificaciones de la fibra óptica SMF-28 Corning. Fuente: [70].

Características (valores para $\lambda=1550\text{nm}$)	SSMF-28
Diámetro del campo modal	$9.2\mu\text{m} \pm 0.4\mu\text{m}$
Diámetro del revestimiento	$245\mu\text{m} \pm 5\mu\text{m}$
Atenuación (dB/Km)	≤ 0.235
Dispersión (ps/(nm x km))	≤ 18
PMD (ps/km ^{1/2}) Valor de diseño para enlace	≤ 0.1

Una vez seleccionado el tipo de fibra SSMF-28 Corning, se procede a calcular valores de L_{ef} y A_{ef} de la siguiente manera:

La fibra SSMF-28 Corning tiene un coeficiente de atenuación (α) $\leq 0,235$ dB/Km. Para calcular la L_{ef} de la fibra, se toma una atenuación de 0,235 dB/Km y se convierte dicho valor a unidades lineales (1/Km) [46] [70].

$$\alpha \left(\frac{\text{dB}}{\text{Km}} \right) = 4.343 \alpha \left(\frac{1}{\text{Km}} \right) \quad (2.2)$$

$$\alpha = \frac{0.23}{4.343} = 0.05295 \left(\frac{1}{\text{Km}} \right)$$

Teniendo el valor lineal de atenuación, se calcula la longitud efectiva de la fibra (L_{ef}) como lo indica la ecuación 1.6 mencionada en la sección 1.3.2.1

$$L_{ef} = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{0.05295 \left(\frac{1}{\text{Km}} \right)} = 18,88 \text{ Km}$$

Para el cálculo del A_{ef} de la fibra, se encuentra el radio del diámetro de campo modal (W_0) que se puede aproximar al radio del núcleo de la fibra [34], teniendo en cuenta que la fibra SSMF-28 Corning tiene un diámetro de campo modal (MFD, *Mode Field Diameter*) de 8.8 μm [70].

$$W_0 = \frac{\text{MFD}}{2} = \frac{8.8 \mu\text{m}}{2} = 4.4 \mu\text{m}$$

Finalmente se calcula el área efectiva (A_{ef}), así:

$$A_{ef} = \pi W_0^2 = \pi (4.4\mu\text{m})^2 = 60.82 \mu^2\text{m}^2$$

- Espaciamiento entre canales de 100 GHz (0.8 nm). El espacio que existe entre las longitudes de onda central de canales adyacentes es conocida como espaciamiento de canales. Se selecciona el espaciamiento de 100 GHz debido a que corresponde al espaciamiento típico para sistemas DWDM, a 10 Gbps. Para definir el espaciamiento entre canal se emplea el estándar ITU-T G.694.1 [10], las frecuencias (en THz) centrales nominales para sistemas con DWDM para espaciamiento de 100 GHz se definen de la siguiente manera.

$$193,1 + (n \times 0.1) \quad (2.3)$$



Teniendo en cuenta el plan de frecuencias de la recomendación ITU-T G.694.1, algunos equipos comerciales y simplificación del esquema de red, se opta por trabajar en los siguientes canales como se puede observar en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Plan de frecuencias para 4 canales a 100 GHz. Fuente: [10].

Número de señales	Frecuencia Central Nominal [THz]	Longitud de Onda [nm]
Canal 1	195.2 THz	1535.82
Canal 2	195.3 THz	1535.04
Canal 3	195.4 THz	1534.25
Canal 4	195.5 THz	1533.47

- Método de compensación: DCF. Debido a su alta dispersión negativa, las fibras compensadoras de dispersión producen una pendiente negativa con valores nominales grandes, lo cual permite compensar la dispersión positiva de la fibra de transmisión en las bandas C y L [24]. La Tabla 2.4 resume algunas propiedades y valores típicos de las DCF.

Tabla 2.4 Parámetros para diferentes tipos de DCF. Fuente: [4].

Principales parámetros de una DCF	Tipos DCF / Algunos Valores Típicos					
	Convencional	Alta FOM	Bajas Pérdidas	Estándar	Banda Ancha	Alta Pendiente
Dispersión [ps/nm.Km]	-120	-250	-170	-100	-95	-100
Atenuación [dB/Km]	0.43	0.58	0.46	0.55	0.50	0.68
Dispersión Residual	±0.02	±0.2	±0.1	N/A	N/A	N/A
FOM [ps/nm.dB]	280	430	370	182	190	150
Pérdidas de Empalme [dB]	0.35	0.2	0.3	N/A	N/A	N/A

Las propiedades de la DCF generan un impacto importante sobre el desempeño del enlace, como por ejemplo, un alto valor de Figura de Merito (FOM, *Figure of Merit*), permite diseñar enlaces de grandes distancias [4]; para el actual proyecto de grado se utiliza una fibra DCF con valores estándar de atenuación y coeficiente de dispersión.

- Esquema de compensación: Post-Compensación. Dependiendo del lugar donde se ubique la DCF en el trayecto principal, el desempeño de la red puede variar. En el desarrollo del presente trabajo se tiene en cuenta la técnica de Post-compensación con el fin de reducir la BER y presenciar más significativamente los efectos no lineales, debido a un menor decremento del nivel de potencia en comparación con la técnica de pre-compensación [4] [29]. De igual manera, la impulsión que debe tener la señal para ser amplificada mediante Raman requiere que no existan empalmes que generen pérdidas considerables entre el transmisor y la fibra óptica que va a ser usada como medio de amplificación.
- Tipo de amplificación: EDFA y Raman. Los amplificadores tipo EDFA pueden ser configurados de tres maneras: la primera configuración es Booster, en la cual el EDFA se sitúa a continuación de una fuente óptica y antes de la fibra principal; la segunda configuración es Inline, en el cual el amplificador se sitúa entre largos span de fibra óptica y la tercera es en Pre-amplificación, donde el EDFA se ubica inmediatamente antes del

receptor [20]. Se emplean amplificadores tipo EDFA para contrarrestar la pérdida del nivel de potencia por la introducción de DCF's en la red.

Los amplificadores Raman se usan cuando se requiere amplificación adicional sin que se adicione ruido representativo al enlace. Los amplificadores Raman pueden ser distribuidos y discretos como ha sido mencionado en la sección 1.2. El desarrollo del presente proyecto de grado se enfoca en el análisis del amplificador Raman distribuido.

Con el fin de visualizar, a través de los parámetros ópticos de monitoreo, la amplificación Raman y su impacto en el comportamiento del sistema, se selecciona las siguientes configuraciones Raman⁸ (ver Figura 2.1, Figura 2.2, y Figura 2.3) [5], para posteriormente evaluar a nivel de simulación su desempeño. A continuación se realiza una descripción de estas configuraciones, las cuales se consideran en el desarrollo de este trabajo de grado:

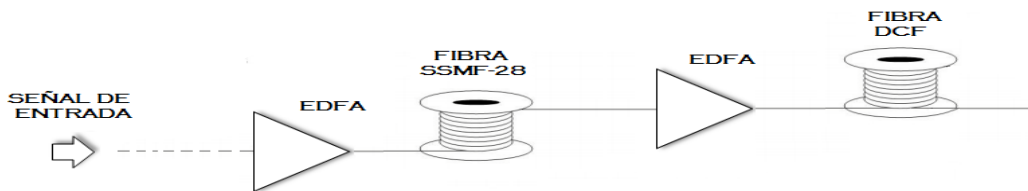


Figura 2.1 Esquema para una configuración con amplificación EDFA sin inyección Raman.

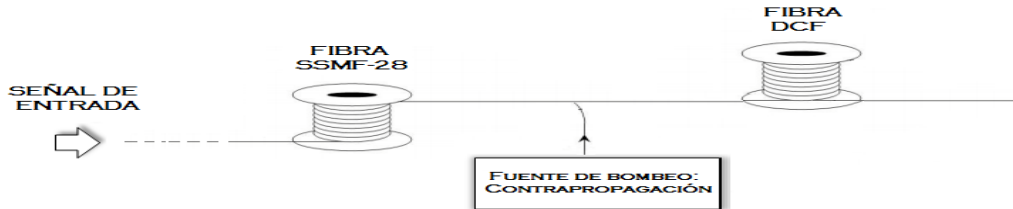


Figura 2.2 Esquema para una configuración de Inyección Raman sin amplificación EDFA.



Figura 2.3 Esquema para una configuración de Inyección Raman con amplificación EDFA.

En la Figura 2.1 se muestra una configuración tradicional en ausencia de amplificación Raman. Esta configuración presenta 2 etapas de amplificadores EDFA, una fibra DCF y una fibra principal SSMF-28. Se colocan amplificadores tipo EDFA en configuración Booster e Inline para superar la pérdida introducida por la DCF.

⁸ Las 3 configuraciones son: 1. Amplificación EDFA sin inyección Raman, 2. Inyección Raman sin amplificación EDFA y 3. Inyección Raman con amplificación EDFA.



En la Figura 2.2 se muestra una configuración “Inyección Raman en ausencia de etapas de amplificación EDFA”, en donde se suprimen ambos amplificadores tipo EDFA, lo cual permite la amplificación en cualquier banda, y menor costo, ya que la cantidad de dispositivos implementados en la red se reducen. Sin embargo, los amplificadores Raman al requerir altas potencias de bombeo adicionan costo significativo al enlace. Como ha sido mencionado en la sección 1.2, la luz de bombeo se inyecta ya sea en la misma dirección (Co-propagación) o en la dirección contraria (Contra-propagación) de la señal de entrada. Más adelante se describe los beneficios del porqué se utiliza una fuente de bombeo (Contra-propagación), en comparación con una (Co-propagación).

En la Figura 2.3 se muestra una configuración en la cual no solo se inyecta Raman a la fibra SSMF-28 a través de una alta potencia de bombeo, generalmente del orden del vatio, sino también, se utilizan etapas de amplificación EDFA. Este esquema es denominado “Esquema híbrido o Raman asistido”; empleado en sistemas de largas distancias, donde se hace indispensable el uso de DCF.

- Configuración de fuente de bombeo: Contra-propagación (Contra-propagación). Para implementar los amplificadores Raman distribuidos se puede usar 3 configuraciones de propagación Co-, Contra-, o Bi-direccional. En la configuración de Contra-propagación las longitudes de onda de bombeo Raman se introducen desde el extremo final del tramo de la fibra viajando en sentido contrario de las señales DWDM. De este modo se asegura que la mayor parte de la amplificación ocurra al final del trayecto de fibra, donde los niveles de señal son más bajos. Es el bombeo de Contra-propagación el preferido en el diseño e implementación de los sistemas de amplificadores Raman distribuidos [54], debido al menor acoplamiento de ruido inducido por el bombeo sobre la señal, así como una menor dependencia de la ganancia con la polarización comparado con los esquemas de Co-propagación [71]. De hecho el esquema de bombeo en Contra-propagación es a menudo el más usado porque la señal de transmisión es menos afectada por los efectos no lineales, como FWM. Esto es porque el amplificador Raman distribuido con configuración de Contra-propagación amplifica las señales de menor potencia cerca del final del span [72]. Así mismo, el esquema de Contra-propagación proporciona un alto nivel de ganancia de salida con la consecuencia de un mayor ruido en comparación con respecto a otras configuraciones de bombeo [5].

Para sistemas de larga extensión de propagación, en los que las no linealidades y la dispersión adquieren una notable importancia, el bombeo en Contra-propagación ofrece un mejor rendimiento debido a que la potencia de la señal es más pequeña a lo largo de longitud del enlace de fibra [31]. De esta manera, la configuración en Contra-propagación reduce un inconveniente importante en amplificadores Raman que es el Crosstalk (diafonía) entre las señales DWDM, generado por la amplificación Raman [32].

Adicional a las características descritas anteriormente, los amplificadores Raman distribuidos son frecuentemente combinados con amplificadores EDFA para extender las distancias del span [27].



Como ha sido mencionado en la sección 1.3.2.1, la potencia umbral Raman es uno de los parámetros fundamentales a evaluar en SRS, y se define mediante la ecuación 1.7.

$$P_{Limite}(SRS) \approx f_{th} \frac{A_{ef}}{g_R L_{ef}} \quad (1.7)$$

Para una fibra SSMF-28 Corning y teniendo en cuenta un esquema de Contra-propagación se tiene:

$$P_{Limite}(SRS) \approx \frac{16(60.82 \mu^2 m^2)}{\left(6.95 \times 10^{-14} \frac{m}{W}\right) (18,88 Km)} \approx 741.61 mW$$

- Fuente de bombeo Raman: Cisco ONS 15454 Raman Optical Amplifier (OPT-RAMP-C). Los equipos ONS de Cisco con sus diferentes series, son muy utilizados dentro de las configuraciones de las redes DWDM que usan amplificación Raman. A continuación, en la Tabla 2.5 se detallan las características con las que cuenta dicho módulo.

Tabla 2.5 Especificaciones de la fuente Raman de Bombeo Cisco ONS 15454. Fuente: [73].

Especificaciones	Valor
Sección Raman	
Esquema de bombeo	Contra-propagación
Rango de longitud de onda de la señal	1529 nm – 1562.5 nm
PMD	0,15
Longitudes de bombeo	1425 nm y 1452 nm (típico)
Potencia total de bombeo Raman	500 mW (máxima)
Rango de operación de la potencia bombeo Raman	100 a 450 mW
Banda de operación	C
Típica Ganancia Raman	
Fibra SSMF (G.652)	8.5 dB
Fibra E-LEAF (G.655)	10 dB
TW-RS (G.655)	13.5 dB
Sección EDFA	
Ganancia	
Nominal	14 dB
Rango ajustable	8 dB a 20 dB
Potencia de salida	
Máxima	17 dB
Mínima	-10 dB
Figura de ruido	4.5 y 5.7 dB (típicas) / 7dB Máxima

Una vez revisados los parámetros principales para una red DWDM, las especificaciones de un amplificador Raman, las propiedades de una DCF y los estándares de la ITU-T para sistemas DWDM, se sintetiza en la Tabla 2.6 los valores y/o rangos de trabajo de dichos parámetros, características y propiedades.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

Tabla 2.6 Parámetros y características del Modelo Simplificado de Red.

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
PARÁMETRO	VALORES
Topología de Red	Punto a Punto
Velocidad del sistema	10 Gbps
Tecnología de Red	DWDM unidireccional
Banda de operación	Banda C (1530 – 1560 nm)
Ventana	Alrededor de 1550 nm
Estándares empleados	G.652 G.694.1
Tipo de fibra	SSMF-28 (Corning)
Número de canales implementados	4 canales
Espaciamiento entre canales	100 GHz (0.8 nm)
Equipos de amplificación	EDFA y Raman
Método de compensación	DCF
CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR	
Formato de modulación	NRZ-OOK
Tipo de modulación	Externa con Mach-Zehnder
Potencia del transmisor del láser	0 a 25 dBm
Frecuencias centrales nominales	De acuerdo a recomendación ITU-T G.694.1
CARACTERÍSTICAS DE LA FIBRA ÓPTICA SSMF-28 (Corning)	
Coefficiente de dispersión	≤ 18 ps/nm*Km
Coefficiente de atenuación	$\leq 0,235$ dB/km
CARACTERÍSTICAS DEL DISPOSITIVO DE AMPLIFICACIÓN EDFA	
Configuración	Booster
	Inline
CARACTERÍSTICAS DEL DISPOSITIVO DE AMPLIFICACIÓN RAMAN	
Según su diseño	Distribuido
Esquema de bombeo	Contra-propagación
Longitudes de bombeo	1425 a 1452 nm
Potencia total de bombeo Raman	500 mW (máxima)
Rango de operación de la potencia bombeo Raman	100 a 450 mW
Ganancia Raman	8.5 dB
CARACTERÍSTICAS DE LA DCF	
Esquema de compensación	Post-compensación
Coefficiente de dispersión	Entre -17 y -300 ps/nm*Km
Atenuación	Entre 0,1 y 3,5 dB/km
CARACTERÍSTICAS DEL RECEPTOR	
Sensibilidad del receptor	-26 dBm
BER y Factor Q	10^{-15} y 17 dB



CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

En este capítulo se desarrolla el proceso de simulación que permite evaluar el desempeño de una red DWDM, a 10 Gbps, al usar configuraciones Raman con fibras DCF. Se sigue una metodología sistemática para generar un escenario de simulación y diferentes casos de estudio, en los que se realizan pruebas y el análisis correspondiente al comportamiento del sistema.

3.1 Metodología de simulación

Con el fin de realizar un análisis comparativo en el desempeño de una red DWDM, a 10 Gbps, al usar configuraciones Raman con fibras DCF, se adapta de [74] [75] una metodología de simulación, la cual permite por medio de un conjunto de etapas o pasos, alcanzar los objetivos propuestos en el presente proyecto. Las etapas definidas para desarrollar metodológicamente el proceso de simulación teniendo en cuenta las referencias anteriormente citadas son:

- Generación de un escenario de simulación y casos de estudio.
- Identificación de los parámetros técnicos del escenario de simulación.
- Ejecución de la simulación.
- Análisis de los resultados obtenidos en la simulación.

3.1.1 Generación del escenario de simulación

Para realizar el análisis comparativo en el desempeño de una red DWDM, a 10 Gbps, al usar configuraciones Raman con fibras DCF, se genera un escenario base de simulación con modulación NRZ-OOK del cual se desprenden múltiples casos de estudio. Para cada caso se estudia la incidencia de los efectos lineales y no lineales, degradaciones a considerar en el siguiente capítulo. Se plantea un escenario de simulación como se muestra en la Figura 3.1.

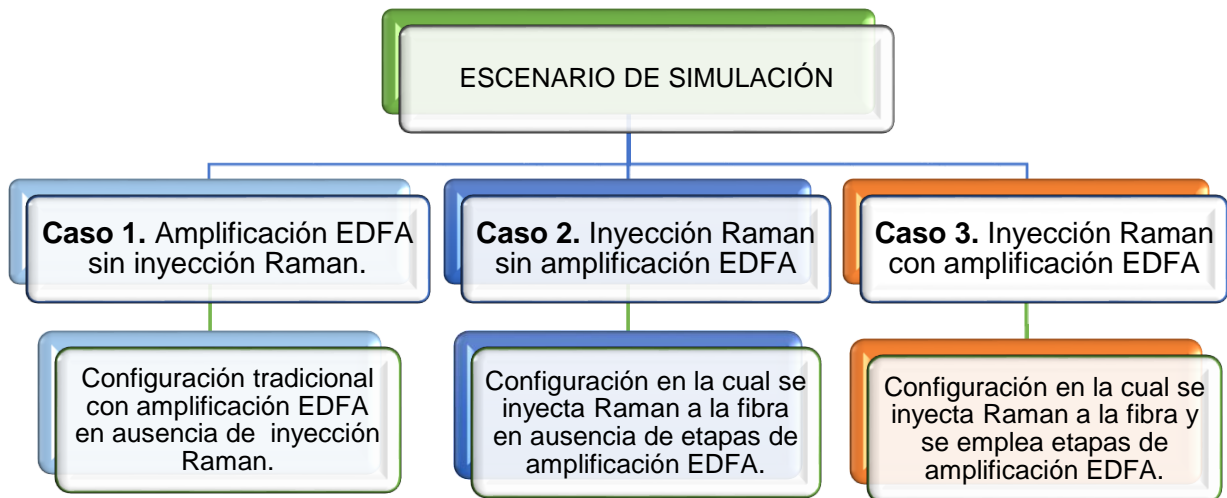


Figura 3.1 Escenarios de simulación y casos de estudio.

3.1.1.1 Escenario de simulación

El escenario de simulación DWDM presenta una topología punto a punto entre transmisor y receptor a una velocidad de 10 Gbps. Está compuesto por tres elementos básicos: un transmisor, el medio de transmisión y un receptor. La Figura 3.2 muestra el esquema de referencia para la simulación descrita, los componentes internos que se aprecian en el interior de cada bloque han sido definidos en el capítulo 1.

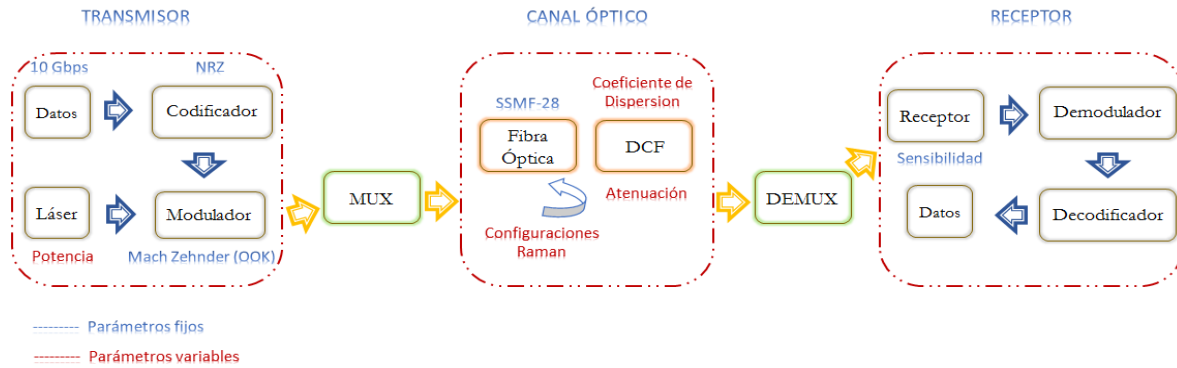


Figura 3.2 Escenario de simulación.

3.1.1.2 Casos de estudio

Se definen tres casos de estudio, descritos a continuación:

- Caso de estudio 1: Amplificación EDFA sin inyección Raman (Figura 3.3).
 - Formato de modulación: NRZ-OOK.
 - Tasa de transmisión 10 Gbps.
 - Fibra SMF-28 Corning.
 - Presencia de 2 etapas de amplificación tipo EDFA, en configuración Booster e Inline.
 - Fibra DCF.

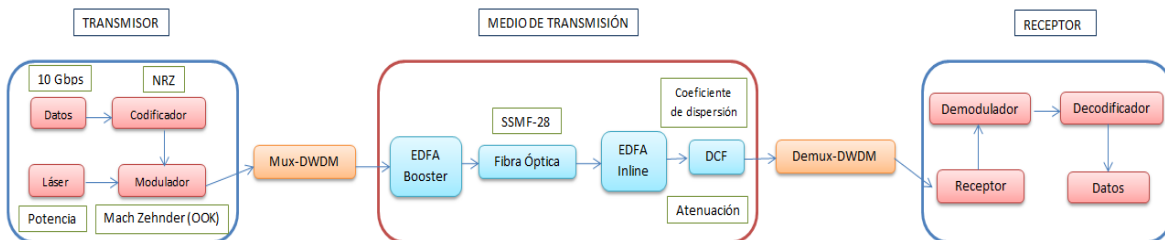


Figura 3.3 Caso de estudio 1: Amplificación EDFA sin inyección Raman.

- Caso de estudio 2: Inyección Raman sin amplificación EDFA (Figura 3.4).
 - Formato de modulación: NRZ-OOK.
 - Tasa de transmisión 10 Gbps.
 - Fibra SSMF-28 Corning.
 - Inyección Raman.
 - Fibra DCF.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

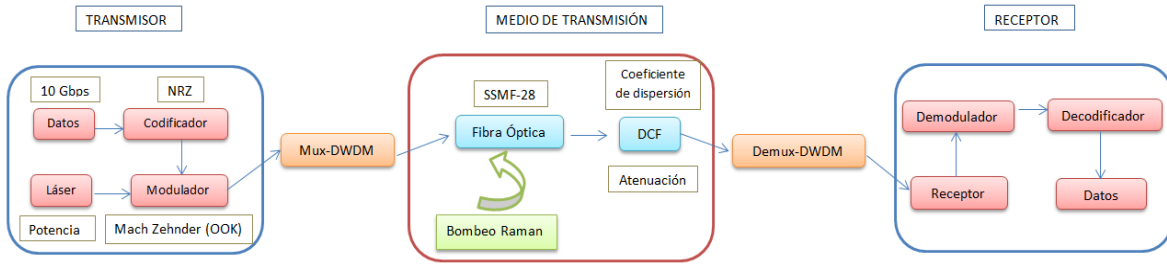


Figura 3.4 Caso de estudio 2: Inyección Raman sin amplificación EDFA.

- Caso de estudio 3: Inyección Raman con amplificación EDFA (Figura 3.5).
 - Formato de modulación: NRZ-OOK.
 - Tasa de transmisión 10 Gbps.
 - Fibra SSMF-28 Corning.
 - Inyección Raman.
 - Presencia de 2 etapas de amplificación tipo EDFA, en configuración Booster e Inline.
 - Fibra DCF.

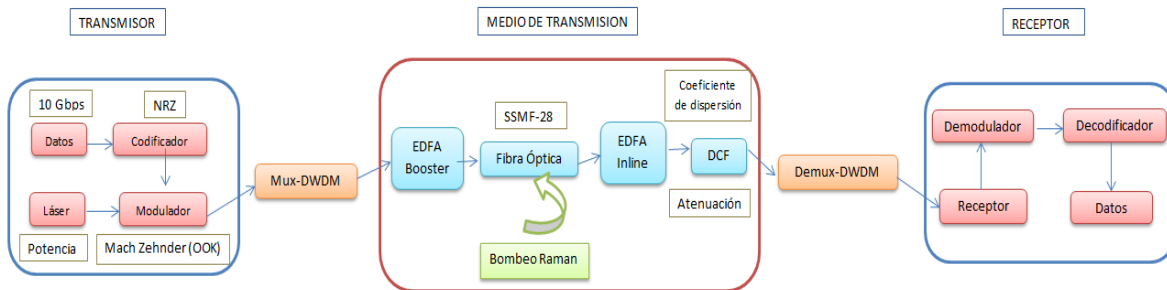


Figura 3.5 Caso de estudio 3: Inyección Raman con amplificación EDFA.

3.1.2 Identificación de los parámetros técnicos del escenario de simulación

Los escenarios de simulación se caracterizan de acuerdo a lo desarrollado en el capítulo 2. Los parámetros más importantes del escenario de simulación se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Características y parámetros del escenario de simulación.

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
PARÁMETRO	VALORES
Topología de Red	Punto a Punto
Velocidad del sistema	10 Gbps
Tecnología de Red	DWDM unidireccional
Banda de operación	Banda C (1530 – 1560 nm)
Ventana	Alrededor de 1550 nm
Estándares empleados	G.652, G.694.1
Tipo de Fibra	SSMF-28 (Corning)



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

Número de canales implementados	4 canales
Espaciamiento entre canales	100 GHz (0.8 nm)
Equipos de Amplificación	EDFA y Raman
Método de compensación	DCF
CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR	
Formato de modulación	NRZ-OOK
Tipo de modulación	Externa con Mach-Zehnder
Potencia del transmisor del láser	0 a 25 dBm
Frecuencias centrales nominales	De acuerdo a recomendación ITU-T G.694.1
CARACTERÍSTICAS DE LA FIBRA ÓPTICA SSMF-28 (Corning)	
Coefficiente de dispersión	≤ 18 ps/nm*Km
Coefficiente de atenuación	$\leq 0,235$ dB/km
CARACTERÍSTICAS DEL DISPOSITIVO DE AMPLIFICACIÓN EDFA	
Configuración	Booster Inline
CARACTERÍSTICAS DEL DISPOSITIVO DE AMPLIFICACIÓN RAMAN	
Según su diseño	Distribuido
Esquema de bombeo	Contra-propagación
Longitudes de bombeo	1425 a 1452 nm
Potencia total de bombeo Raman	500 mW (máxima)
Rango de operación de la potencia bombeo Raman	100 a 450 mW
Ganancia Raman	8.5 dB
CARACTERÍSTICAS DE LA DCF	
Esquema de compensación	Post-compensación
Coefficiente de dispersión	Entre -17 y -300 ps/nm*Km
Atenuación	Entre 0,1 y 3.5 dB/km
CARACTERÍSTICAS DEL RECEPTOR	
Sensibilidad del receptor	-26 dBm
BER y Factor Q	10^{-15} y 17 dB
Filtros de recepción ópticos	Filtro eléctrico tipo Bessel y filtro óptico Coseno Rizado

3.1.3 Ejecución de la simulación

Para la ejecución de la simulación se establece el número de muestras y el tiempo de simulación óptimo, que permita obtener resultados confiables y evitar tiempos de simulación muy extensos, para el presente trabajo de grado cada simulación se fija en 70 ns y 128 muestras. Una vez finaliza el tiempo de simulación, la herramienta OptSim de All Optics



Designs genera gráficas correspondientes al diagrama de ojo y los valores de los parámetros de desempeño, tales como la BER, el Factor Q, OSNR, entre otros. OptSim es un entorno de simulación que soporta el diseño y la evaluación de desempeño en sistemas de comunicaciones ópticas. Los tres casos de estudio descritos en la sección 3.1.1 se implementan en dicha herramienta, las facilidades de visualización de datos proporcionan una interfaz flexible para el seguimiento de la señal.

3.1.3.1 Plan de pruebas

Para realizar el proceso de simulación se tiene en cuenta los parámetros OPM, tales como: BER y Factor Q, establecidos en la recomendación [60], la cual sugiere un valor de BER= 10^{-12} y Q = 16.9 dB. Sin embargo, para el desarrollo del trabajo de grado se ha definido un valor más exigente de BER= 10^{-15} y un Factor Q de 17 dB.

3.1.4 Análisis de los resultados de simulación

Para analizar comparativamente los casos de estudio definidos en las primeras fases de la metodología se opta por trabajar de la siguiente manera:

- Distancia máxima alcanzable por un segmento de red.
- Distancia mínima de 600 Km mediante enlaces concatenados.
- Análisis de los efectos lineales: Ruido, Atenuación, CD y PMD.
- Análisis de los efectos no lineales: SPM, XPM y FWM
- Verificación de los parámetros de monitoreo óptico OPM.

En conclusión para el proceso de simulación se lleva a cabo los siguientes pasos:

- ✓ Implementación del escenario de simulación.
- ✓ Validación de los casos de estudio derivados del escenario de simulación.
- ✓ Ejecución de la simulación.
- ✓ Reunir, examinar y analizar los resultados obtenidos.

En la Figura 3.6 se puede observar de forma gráfica el algoritmo que contiene los pasos para una correcta simulación, los resultados y el respectivo análisis de estos se desarrollan posteriormente.

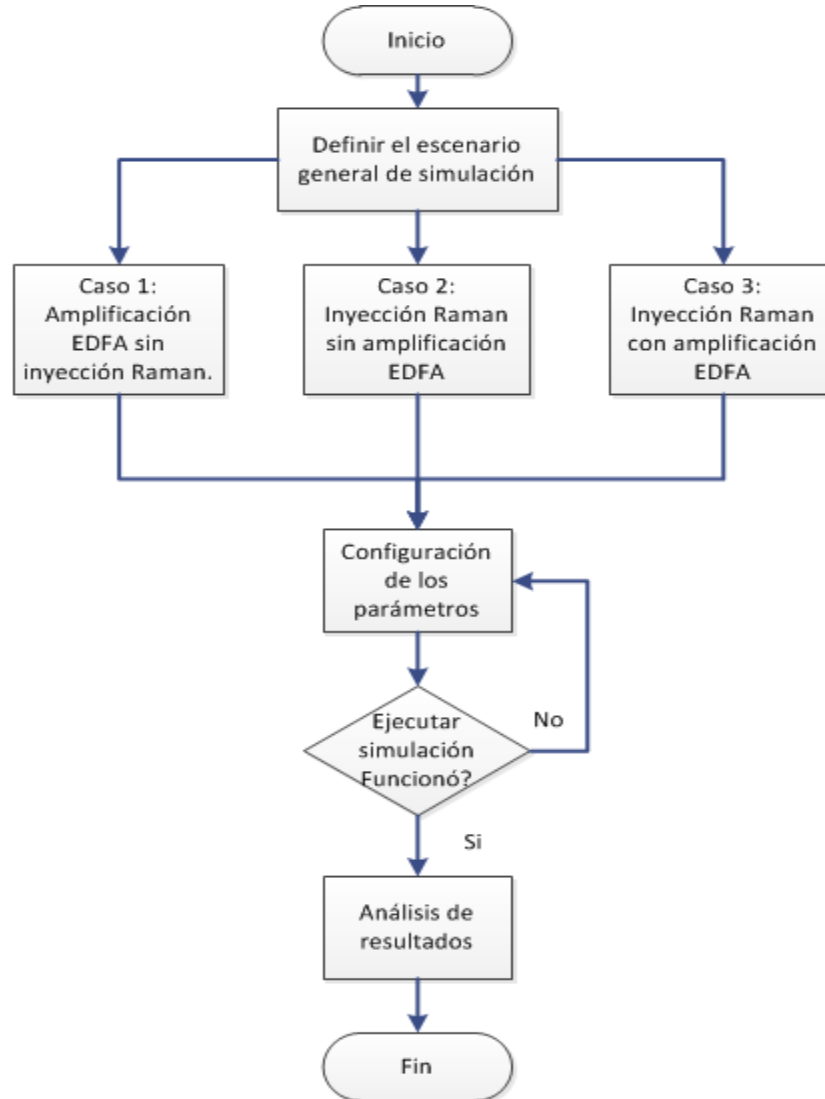


Figura 3.6 Diagrama de flujo de la simulación.

3.2 Herramienta de simulación

Para la simulación y diseño de sistemas de comunicaciones ópticas existen numerosas herramientas que permiten evaluar el desempeño de estos sistemas. OptSim de All Optics Designs es una herramienta avanzada de simulación, que permite analizar y evaluar el desempeño de la transmisión en sistemas de comunicaciones ópticas, proporcionando a sus usuarios una interfaz gráfica amigable y de medición flexible para facilidades de visualización, además de proyectar valores de simulación que construyen un diseño preliminar lo más cercano a la realidad y acordes a los valores esperados teóricamente. Debido a las ventajas nombradas anteriormente, junto con la robustez, evolución, y la adquisición de la licencia de OptSim® por parte de la Universidad del Cauca de este software, se decide utilizar dicha herramienta para el desarrollo del presente trabajo de grado.



La herramienta de simulación OptSim® presenta dos modos de simulación: modo bloque y modo muestra. La simulación en modo bloque es una técnica tradicional que se caracteriza porque la secuencia de entrada se evalúa por bloque hasta llegar al punto de salida, mientras que la simulación modo muestra se caracteriza porque la señal de datos pasa entre componentes y representa una única muestra en cada instante de tiempo. El modo muestra también provee dos tipos de simulación, con el fin de aumentar la precisión: una Técnica de propagación Espectral (SPT, *Spectral Propagation Technique*), donde las señales se propagan en la red como espectros de potencia teniendo en cuenta las pérdidas de componentes y el ruido. Además es posible verificar los parámetros de diseño que se ha configurado desde el punto del espectro óptico, como también, evaluar en cualquier punto de la red aspectos como niveles de relación señal a ruido (OSNR) y potencia óptica; y la Técnica de Ancho de Banda Variable de Simulación (VBS, *Variable Bandwidth Simulation*) donde las señales se propagan como muestras en el dominio del tiempo sobre un ancho de banda variable proporcionado por el usuario, simula el rendimiento de los sistemas en las opciones “VBS Full” en el cual se consideran tanto los lineales como los no lineales, resultando en una simulación más real “VBS Loss Only Fiber” en el cual únicamente se tiene en cuenta la atenuación; y finalmente “VBS Linear Fiber” que estima solamente los efectos lineales [76].

El presente trabajo de grado utilizara el modo de simulación muestra y la técnica VBS debido a que resulta ser la más apropiada para implementar y analizar los múltiples casos de estudio nombrados anteriormente y así obtener unos resultados más acordes con un sistema DWDM real.

CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN, PRUEBAS, ANÁLISIS DE RESULTADOS Y SELECCIÓN DE LA MEJOR CONFIGURACIÓN TENIENDO EN CUENTA LOS EFECTOS LINEALES Y NO LINEALES

El presente capítulo muestra los resultados obtenidos de los casos de simulación y su desempeño al usar configuraciones Raman con fibras DCF, enfocando el análisis en la evaluación de los efectos lineales y no lineales presentes en los sistemas ópticos, además de un análisis comparativo para determinar cuál presenta mejor desempeño frente a las degradaciones ópticas, teniendo en cuenta la recomendación ITU-T G.652 y los parámetros OPM.

4.1 Escenario de simulación

La Figura 4.1 muestra el escenario general de simulación implementado en la herramienta Optsim, y corresponde a una red DWDM, con cuatro longitudes de onda diferentes, transmitidas sobre una fibra monomodo (SSMF-28 Corning) y una fibra compensadora de dispersión (DCF), a una velocidad de 10 Gbps con un formato de modulación NRZ-OOK; en donde no se hace uso de amplificación Raman ni amplificación EDFA.

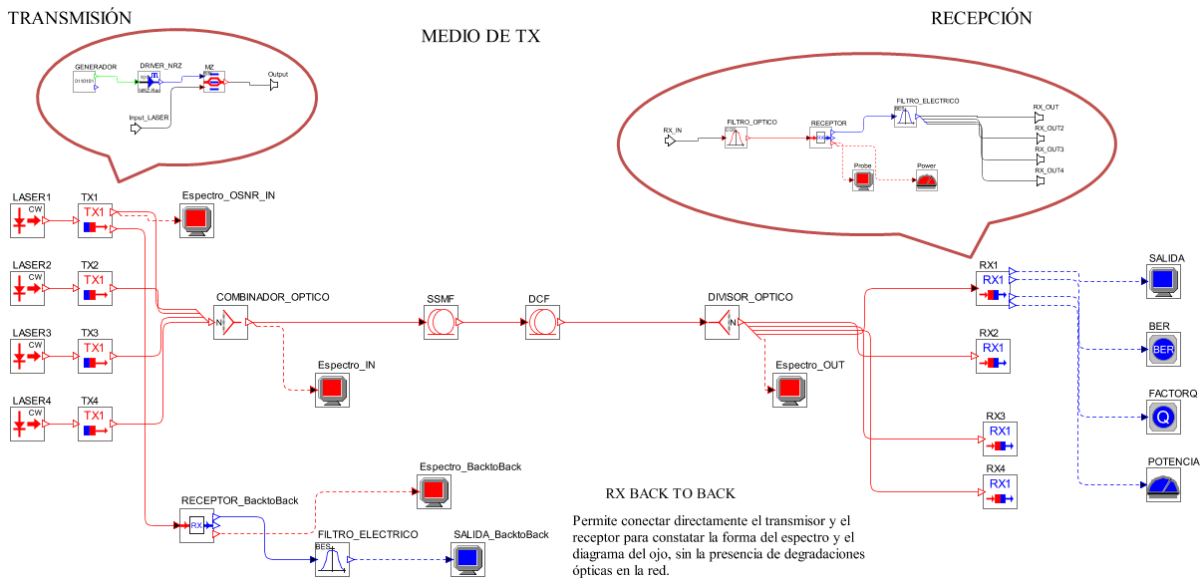


Figura 4.1 Escenario general.

Como se mencionó en la sección 3.1.1.2 los bloques transmisor y receptor se encuentran conformados de la siguiente manera:

- Transmisor: Conformado por un láser de onda continua lorentziano, un modulador externo Mach-Zehnder (MZM, Mach-Zehnder Modulator), un generador de datos y un driver NRZ rectangular, los cuales generan una forma de onda NRZ.
- Receptor: En la sección de recepción se requiere un filtro óptico coseno (centrado en la frecuencia central de cada canal), un receptor tipo PIN y un filtro eléctrico Bessel.



Para llevar a cabo la implementación de los diferentes casos de estudio anteriormente nombrados, inicialmente se efectúan medidas en el receptor Back to Back, con el fin de visualizar si la señal de entrada se moduló correctamente y se corroboró un diagrama de ojo ideal (sin degradaciones). En la Figura 4.2 (a) y Figura 4.2 (b) se aprecian las condiciones básicas del formato de modulación NRZ-OOK, con respecto al diagrama de ojo y el espectro óptico alrededor de los 195,2 THz (Canal 1).

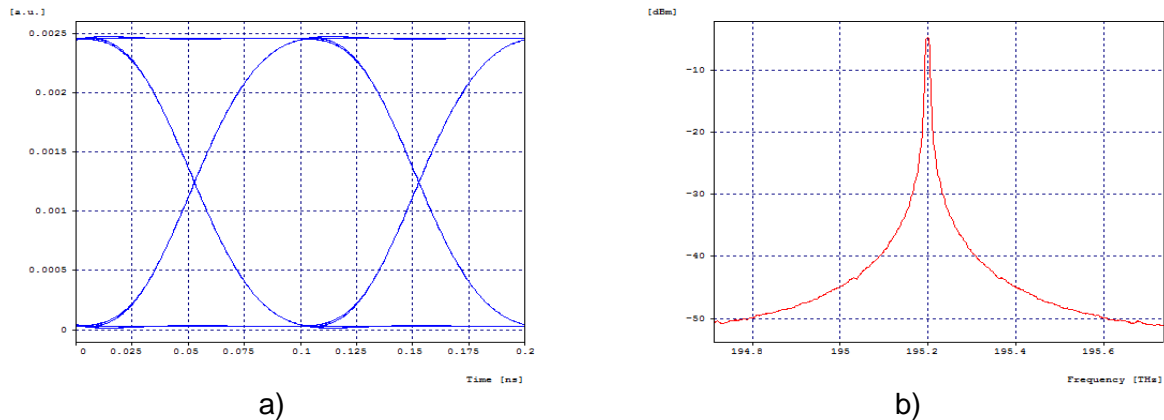


Figura 4.2 Diagrama del ojo (a) y Espectro óptico (b) de la señal en el receptor Back to back.

Garantizada la correcta modulación de la señal, se procede a determinar la distancia máxima alcanzable que cumpla la BER y Factor Q definidos.

4.1.1 Distancia máxima alcanzable por un segmento de red

A) Distancia máxima alcanzable por un segmento de red sin presencia de DCF

Para este análisis, se determina la distancia máxima alcanzable por un tramo de fibra óptica (SSMF-28 Corning) para diferentes valores de potencia de transmisión sin la asistencia de algún tipo de amplificación (EDFA y/o Raman) o de fibras de compensación de dispersión (DCF), teniendo en cuenta las características y parámetros mencionadas en la Tabla 3.1, como también, las degradaciones ópticas de los sistemas (Ruido, atenuación, CD, PMD y efectos no lineales), debido a lo anterior, la simulación se realiza en modo VBS full.

Después de realizar variaciones en los valores de potencia de transmisión y determinar la distancia máxima alcanzada para cuatro canales implementados con respecto a una $BER=10^{-15}$ y $Q=17$ dB (Anexo B, Tabla 1 a Tabla 6)⁹, se observa un comportamiento muy similar, razón necesaria para evaluar un solo canal (Canal 1=195,2THz), en las posteriores configuraciones.

La Figura 4.3 muestra la distancia máxima alcanzada al variar la potencia de transmisión sobre el canal 1 (Anexo B, Tabla 7), la gráfica con línea verde indica distancias que cumplen con los parámetros de calidad objetivo ($BER=10^{-15}$, $Q=17$ dB), mientras que la gráfica con

⁹ Algunas de las figuras presentadas en el presente trabajo de grado, son resultado de los datos tomados en las simulaciones y que se registran en las tablas de los Anexos.



línea azul corresponde a distancias que cumplen con los parámetros establecidos en la recomendación ITU-T G.652.

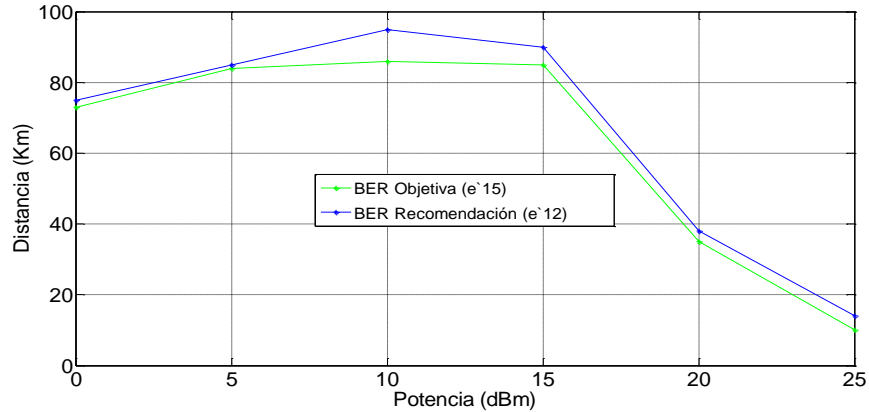


Figura 4.3 Distancia máxima alcanzable al realizar variaciones en la potencia de transmisión.

Como se puede observar en la Figura 4.3, al aumentar la potencia de transmisión de 0 a 10 dBm la distancia alcanzada por un segmento de red aumenta, pero para valores superiores de 15 dBm se aprecia un cambio adverso, debido a la excitación de efectos no lineales que se manifiestan en presencia de altas potencias, los cuales degradan el desempeño del sistema y por consiguiente, se observa una disminución en el valor de la distancia máxima que se puede alcanzar en el enlace.

La mejor configuración del sistema se obtiene para una potencia de transmisión de 10 dBm donde se alcanza una distancia de 86 Km, sin embargo, en los análisis posteriores se trabaja con una potencia de transmisión de 5 dBm con la cual se alcanza una distancia máxima de 84 km para no excitar los efectos no lineales, así como también, reducir costos de implementación de equipos.

B) Distancia máxima alcanzable por un segmento de red al usar DCF

Para este análisis, se determina la distancia máxima alcanzable por un tramo de fibra óptica (SSMF-28 Corning) para diferentes valores de potencia de transmisión en conjunto con el uso de una fibra de compensación de dispersión (DCF) en esquema Post-compensación, sin la presencia de dispositivos de amplificación (EDFA y/o Raman). Es muy importante determinar la distancia máxima con el uso de DCF, no solo para determinar el impacto de implementarla, sino, porque éste valor es el punto de referencia para los posteriores análisis en existencia de algún tipo de amplificación.

Uno de los limitantes más significativos en las comunicaciones ópticas es la CD; su estudio y compensación es fundamental para garantizar mayor claridad y calidad en el enlace, por consiguiente lograr mayores distancias. La CD se incrementa linealmente con la distancia y cuadráticamente con la velocidad, por lo que para sistemas de velocidades considerables como de 10 Gbps se hace necesario compensar dicho fenómeno lineal. Existen diferentes métodos para compensar y mitigar esta degradación, para el actual trabajo de grado se utilizan las fibras de compensación de dispersión (DCF).



Para calcular el tamaño de la longitud de la DCF, se aplica la Ecuación:

$$D_1L_1 + D_2L_2 = 0 \quad (4.1)$$

Con el fin de determinar los efectos de adicionar una DCF para la distancia máxima alcanzada por un segmento de red con los valores de potencia de transmisión 0, 5 y 10 dBm, se emplea la técnica de Post-compensación y se evalúa el porcentaje de compensación de la misma. La compensación se realiza al 100, 80, 75, 50 y 25%. En consecuencia la Figura 4.4 (Anexo B, Tabla 8) muestra la prueba referente al porcentaje de compensación de la DCF teniendo en cuenta la distancia máxima alcanzada por cada variación de potencia de transmisión.

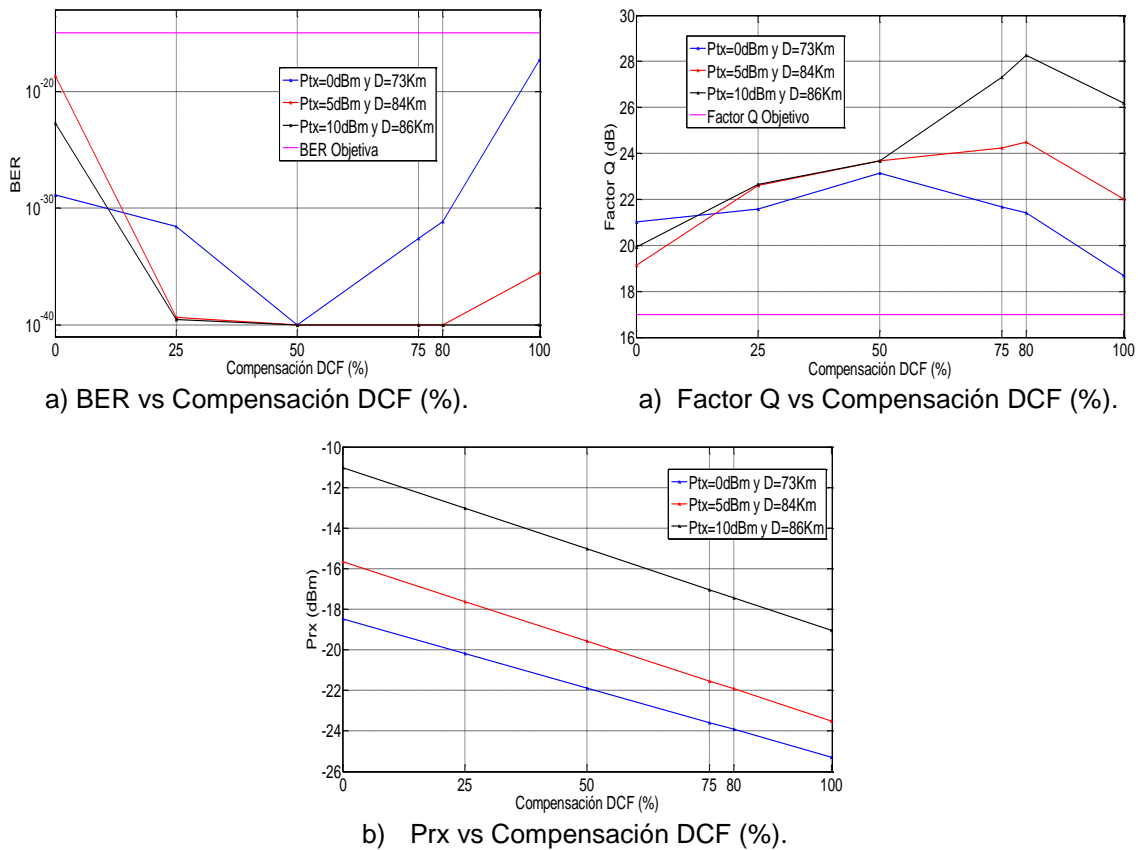


Figura 4.4 Parámetros de monitoreo óptico en un tramo de fibra SSMF-28 para diferentes porcentajes de compensación de DCF en post-compensación.

De acuerdo a la Figura 4.4 se puede observar cómo diferentes porcentajes de compensación de la DCF inciden en los parámetros de desempeño óptico, evidenciando una mejora cuando el porcentaje oscila entre 50 y 75 %, razón que respalda que no siempre compensar al 100% es la mejor alternativa, esto se debe a la relación directa con la longitud de la DCF, es decir, un mayor porcentaje de compensación requiere de una longitud de DCF más extensa, lo cual implica una mayor atenuación por Km, generando así un impacto desfavorable en el desempeño de la red; de igual manera, realizar compensación a altos porcentajes demanda elevados costos de implementación, lo cual no resulta factible para operadores comerciales.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

Conociendo que compensar entre 50 y 75 % se obtienen los mejores resultados, se decide seleccionar dicho intervalo, con el fin de determinar la distancia máxima alcanzable por un segmento de red. Las pruebas se realizan ante la variación de la potencia de transmisión (0, 5 y 10 dBm), como se puede observar en la Tabla 4.1 (Anexo B, Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 11).

Tabla 4.1 Distancia máxima alcanzada frente a variaciones de potencia de transmisión para diferentes porcentajes de compensación de la DCF.

Potencia (dBm)	Compensación (%)	Longitud DCF (Km)	Longitud SSMF-28 (Km)	BER	Factor Q (dB)
0	50	6,2	86	1,37e-18	18,90
	75	9,3	80	2,49e-17	18,72
5	50	7,14	109	3,39e-16	18,41
	55	7,854	108	1,25e-17	18,57
	60	8,568	106	9,35e-17	18,46
	65	9,282	104	4,19e-16	18,35
	70	9,996	102	7,99e-17	18,42
	75	10,71	100	2,81e-17	18,70
	80	11,424	100	2,13e-15	18,14
10	50	7,31	126	5,49e-20	19,47
	75	10,96	124	3,65e-17	18,63

En la Figura 4.5 se evidencia que al adicionar una DCF con un porcentaje de compensación apropiado (50 - 75 %), se logra obtener una mayor distancia; especificado dicho rango y con una potencia de 5 dBm, es posible alcanzar distancias entre 16 y 25 Km de más cuando no se empleaba DCF en la red (84 km). Es importante resaltar que la red se encuentra aún en ausencia de algún tipo de amplificación.

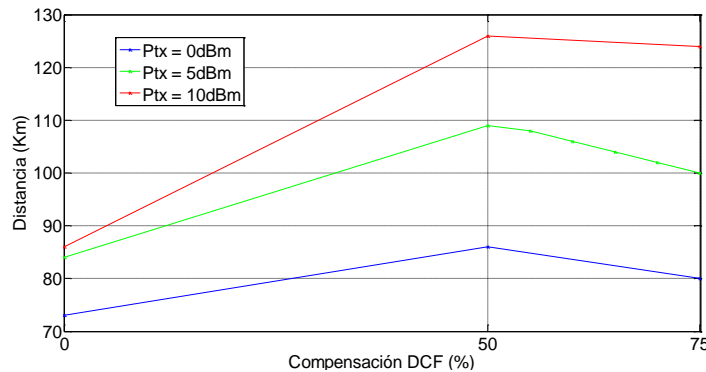


Figura 4.5 Distancia máxima vs rango adecuado de compensación de DCF para Ptx= 0, 5 y 10 dBm.

Del escenario general de simulación se concluye que: el sumar una DCF a la red implica incrementar la distancia máxima alcanzada por un segmento de red, siempre y cuando el porcentaje de compensación sea el apropiado. El escenario formado hasta el momento, resalta la importancia de la DCF en sistemas ópticos debido a su influencia en parámetros

de diseño particularmente en la distancia; más adelante se evalúa con mayor detalle la incidencia de las principales propiedades de la DCF en la red para cada caso de simulación. El desarrollo del escenario general es considerado el punto de referencia y base de comparación para los siguientes análisis a realizar en los cuales se adiciona algún tipo de amplificación.

4.2 Caso de estudio 1: Amplificación EDFA sin inyección Raman.

- Formato de modulación NRZ-OOK.
- Tasa de transmisión 10 Gbps.
- Fibra SMF-28 Corning.
- Presencia de 2 etapas de amplificadores tipo EDFA, en configuración Booster e Inline.
- Fibra DCF.

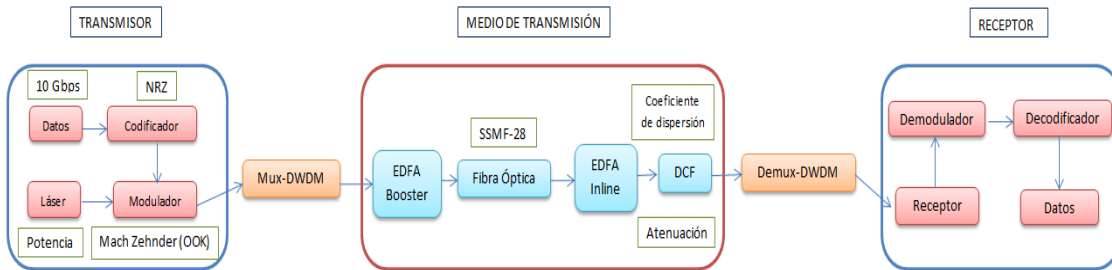


Figura 4.6 Caso de estudio 1: Amplificación EDFA sin inyección Raman.

En la Figura 4.7 se muestra el escenario de simulación implementado en la herramienta Optisim correspondiente al caso de estudio 1. En este caso, al escenario general de simulación, se agregan 2 etapas de amplificación EDFA en configuración Booster e Inline. El desarrollo correspondiente al caso de estudio sin inyección Raman se aborda teniendo en cuenta la sección 3.1.4, referente a analizar comparativamente el desempeño de los escenarios mediante la determinación de la máxima distancia alcanzada por un segmento de red, concatenación de segmentos de red y el análisis de los efectos tanto lineales como no lineales.

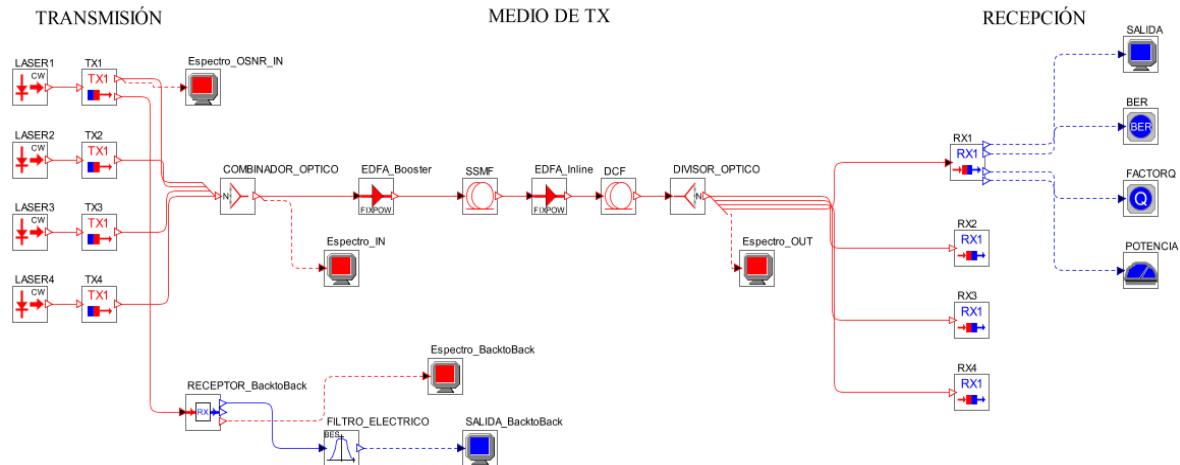


Figura 4.7 Caso 1: Amplificación EDFA sin inyección Raman.



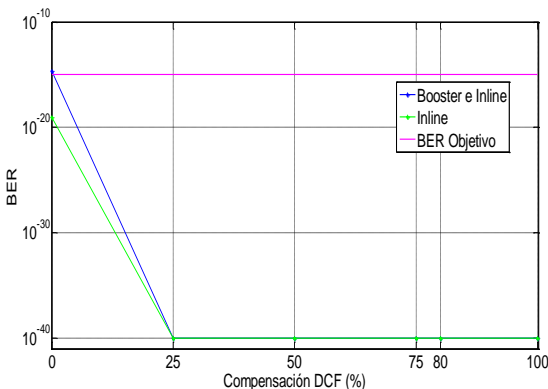
A) Distancia máxima alcanzable por un segmento de red

Para este análisis, se determina la máxima distancia alcanzada por un tramo de fibra óptica en conjunto con una DCF y con la presencia de dos amplificadores EDFA. Este estudio, se hace con el fin de analizar cómo distintas etapas de amplificación influyen en los parámetros de diseño, propiamente en la distancia máxima. A partir de estos resultados se pretende lograr un mayor valor de distancia máxima manteniendo los parámetros de desempeño objetivos; para obtenerla se simula en modo VBS Full, lo cual implica que se tiene en cuenta todas las degradaciones ópticas.

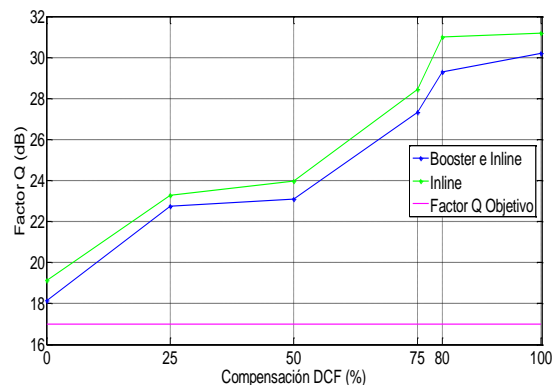
Con el propósito de conseguir la red con mayor alcance posible y desde la perspectiva de relación costo-eficiencia, se realizan dos pruebas para analizar si es posible la supresión de algún dispositivo de amplificación EDFA. En primer lugar, se introducen dos etapas de amplificación EDFA en configuración Booster e Inline y se varia el porcentaje de compensación de la DCF en un rango entre 25 y 100%, para observar si existe una mejora importante en el desempeño de la red con respecto a los parámetros de monitoreo óptico. En segundo lugar, se implementa amplificación EDFA únicamente en configuración Inline.

En Anexo C (Tabla 1), se evidencia que al realizar compensación y adicionalmente agregar amplificación EDFA, los parámetros de desempeño óptico mejoran considerablemente en comparación con el comportamiento del escenario general, debido a que elementos como los amplificadores equilibran las pérdidas presentadas en el enlace óptico.

En la Figura 4.8 (a), (b) y (c) se muestran los parámetros de desempeño óptico al utilizar etapas de amplificación EDFA, en configuración Booster e Inline (Color azul) y configuración Inline únicamente (Color Verde), encontrando que realizar amplificación a continuación de una fuente óptica (Booster), no afecta positivamente la eficiencia de la red, por lo tanto en posteriores análisis se trabaja con amplificación EDFA en configuración Inline únicamente, donde ésta no solo presenta mejor desempeño, sino también minimiza los dispositivos implementados en la red.



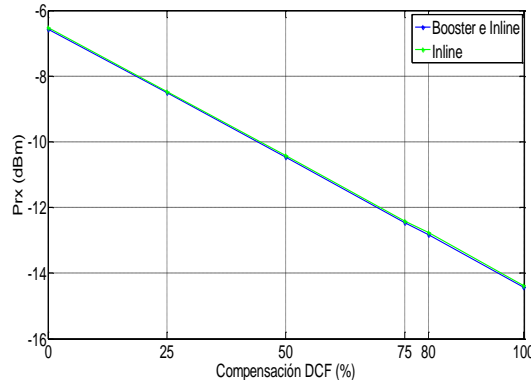
a) BER vs Compensación DCF (%).



b) Factor Q vs Compensación DCF (%).



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.



c) Prx vs Compensación DCF (%).

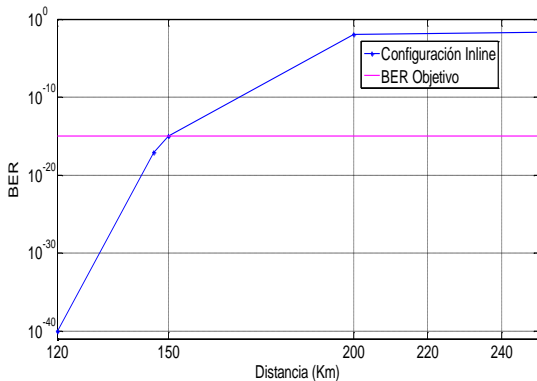
Figura 4.8 Parámetros ópticos frente a variaciones del porcentaje de compensación de la DCF para una distancia máxima de 84 Km.

La Tabla 4.2 (Anexo C, Tabla 2 y Tabla 3), resume las distancias máximas alcanzadas por un segmento de red determinadas en ausencia de amplificación EDFA y presencia de la misma con una y dos etapas. En ésta se aprecia que la máxima distancia se logra utilizando una etapa EDFA en configuración Inline.

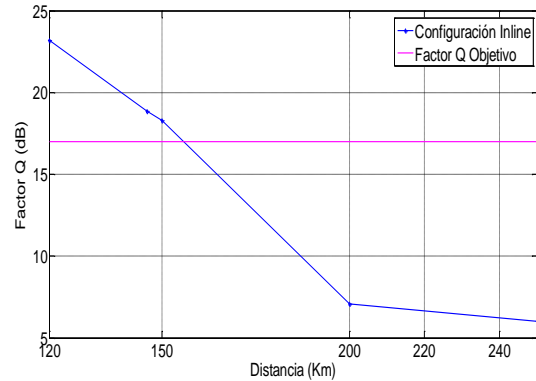
Tabla 4.2 Distancia máxima alcanzada para 0, 1 y 2 etapas de amplificación EDFA.

Potencia de trabajo (dBm)	Configuración EDFA	Longitud DCF (Km)	Distancia máxima alcanzada (Km)	BER	Factor Q (dB)
5	Ninguna	10.71	100	2,81e-17	18,70
	Booster e Inline		134	9,03e-15	17,82
	Inline		150	9,86e-16	18,28

La Figura 4.9 (a), (b), (c) y (d) muestra que para una potencia de transmisión de 5 dBm, con amplificación EDFA, en configuración Inline y 10.71 Km de DCF para compensar al 42 % la CD, se obtiene una distancia de 150 Km, valor máximo para el cual el enlace cumple con los parámetros de desempeño objetivos.



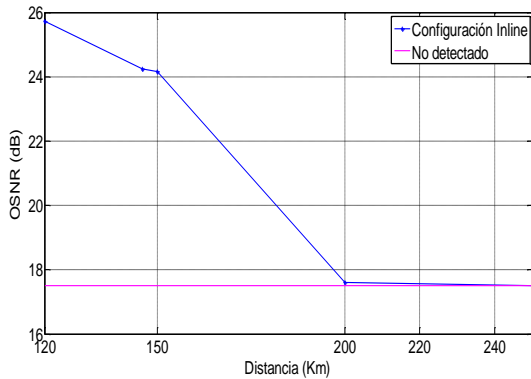
a) BER vs Distancia máxima.



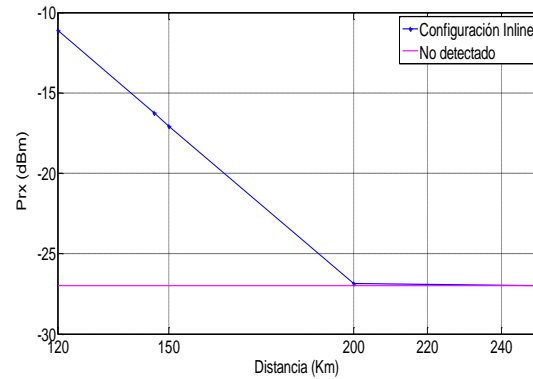
b) Factor Q vs Distancia máxima.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.



c) OSNR vs Distancia máxima.



d) Prx vs Distancia máxima.

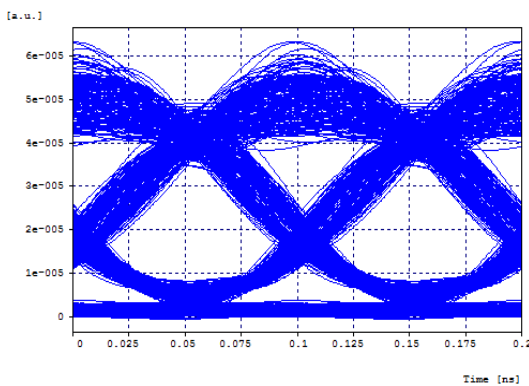
Figura 4.9 Parámetros ópticos al realizar compensación a menos del 50% con amplificación EDFA, en configuración Inline.

Finalmente la distancia máxima alcanzable por un segmento de red al usar DCF con amplificación EDFA, en configuración Inline, alcanza 50 Km de más en comparación con el caso general en ausencia de amplificación.

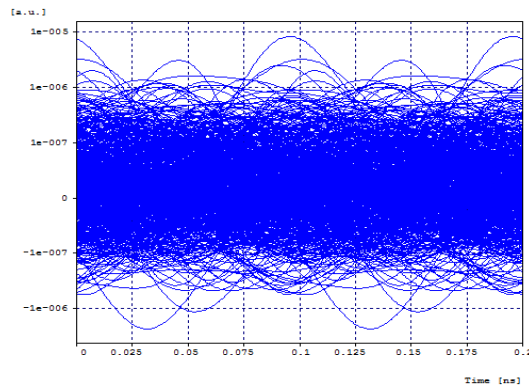
B) Distancia mínima de 600 Km mediante enlaces concatenados

Con el fin de determinar cuál es la cantidad de dispositivos de amplificación EDFA necesarios para alcanzar una distancia mínima de 600 Km, se concatenan segmentos de red del orden de los pocos Kilómetros con el objetivo de no degradar en gran medida el sistema, debido a las pérdidas introducidas por span's¹⁰ extensos.

Como primera medida, se parte de segmentos de red con distancias de los 150 Km por span, buscando la máxima longitud de tramo de fibra que permita cumplir con los parámetros de desempeño definidos. No obstante, la distancia mínima de 600 Km requerida no se alcanzó, justamente porque la atenuación se incrementa en mayor proporción cuando se aumenta la longitud del span. La Figura 4.10 muestra el diagrama de ojo al usar span's de 150 Km.



a) $BER = 9.86e^{-16}$



b) $BER = 2.27e^{-02}$

Figura 4.10 Diagrama del ojo para: a) Un span de 150 Km y b) Dos span de 150 Km.

¹⁰ Span's, secuencia de tramos de fibra.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

De la Figura 4.10 se observa que concatenar segmentos de red del orden de los 150 Km no resulta adecuado para cumplir con la distancia mínima de 600 Km, debido a que primordialmente las pérdidas introducidas por cada span degradan de manera considerable el desempeño de la red, razón por la cual se requiere disminuir la longitud de cada span a valores cercanos de 70 Km (representa el valor mínimo para que un amplificador tipo EDFA sea situado en red) para llegar a la distancia máxima deseada como se muestra en la Tabla 4.3 (Anexo C, Tabla 4).

Tabla 4.3 Parámetros de monitoreo para segmentos de red concatenados en configuración Inline.

Distancia Total (Km)	Número de span's	Longitud de span (Km)	Configuración EDFA	Factor Q (dB)	BER	OSNRout (dB)	Prx (dBm)
560	8	70	Inline	18,01	1,50e-15	22,3057	-13,98
150	1	150		18,28	9,86e-16	24,1641	-22,35

En la Figura 4.11 (a), (b) y (c) se muestra el efecto de la degradación generada a partir de la concatenación de enlaces con distancias de 70 Km utilizando amplificación EDFA en configuración Inline, encontrándose que hasta el octavo span se alcanza una distancia máxima de 560 Km manteniendo los parámetros objetivos.

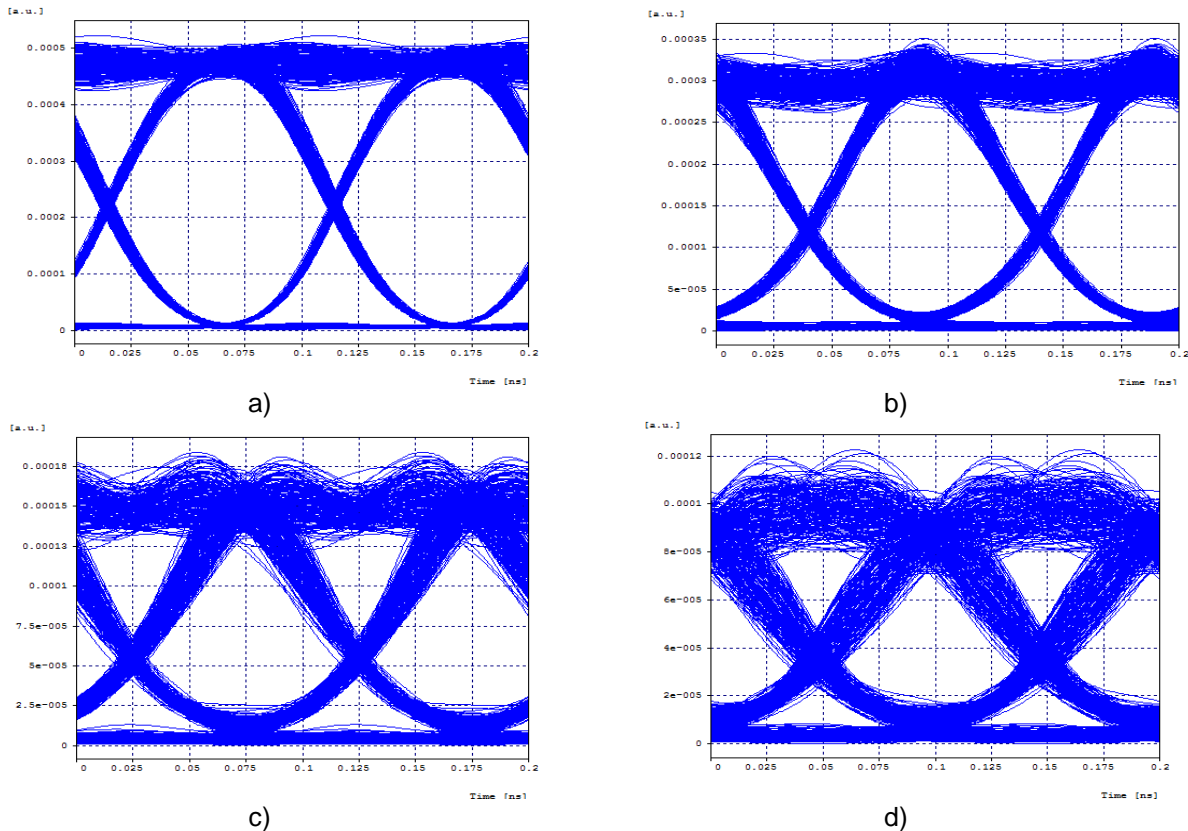


Figura 4.11 Diagrama del ojo para: a) Un span de 70 Km, b) Tres span de 70 Km, c) Seis span de 70 Km y d) Ocho span de 70 Km.

Al igual que para el estudio de un segmento de red, se analiza cómo etapas de amplificación EDFA influyen en el desempeño de enlaces concatenados. Contrario al caso analizado para



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

un segmento de red, la adición de un amplificador EDFA, en configuración Booster aporta positivamente al desempeño de la red como se observa en la Tabla 4.4, debido a que el Booster mantiene el nivel de potencia atenuado por las pérdidas de cada span, cumpliendo una función de regeneración, dando como resultado una distancia máxima de 770 Km mediante 11 span's de 70 Km (Anexo C, Tabla 5), en comparación a una distancia máxima de 560 Km lograda en configuración EDFA Inline.

Tabla 4.4 Parámetros de monitoreo para segmentos de red concatenados en configuración Booster e Inline.

Distancia Total (Km)	Número de span's	Longitud de span (Km)	Configuración EDFA	Factor Q (dB)	BER	OSNRout (dB)	Prx (dBm)
770	11	70	Booster e Inline	17,57	6,96e-15	25,0821	-6.33
150	1	150		18,20	4,24e-16	23,1090	-24.35

En la Figura 4.12 (a), (b) y (c) se muestra el efecto de la degradación generada a partir de la concatenación de enlaces con distancias de 70 Km utilizando amplificación EDFA en configuración Booster e Inline, encontrando que hasta el onceavo span se alcanza una distancia máxima de 770 Km manteniendo los parámetros objetivos.

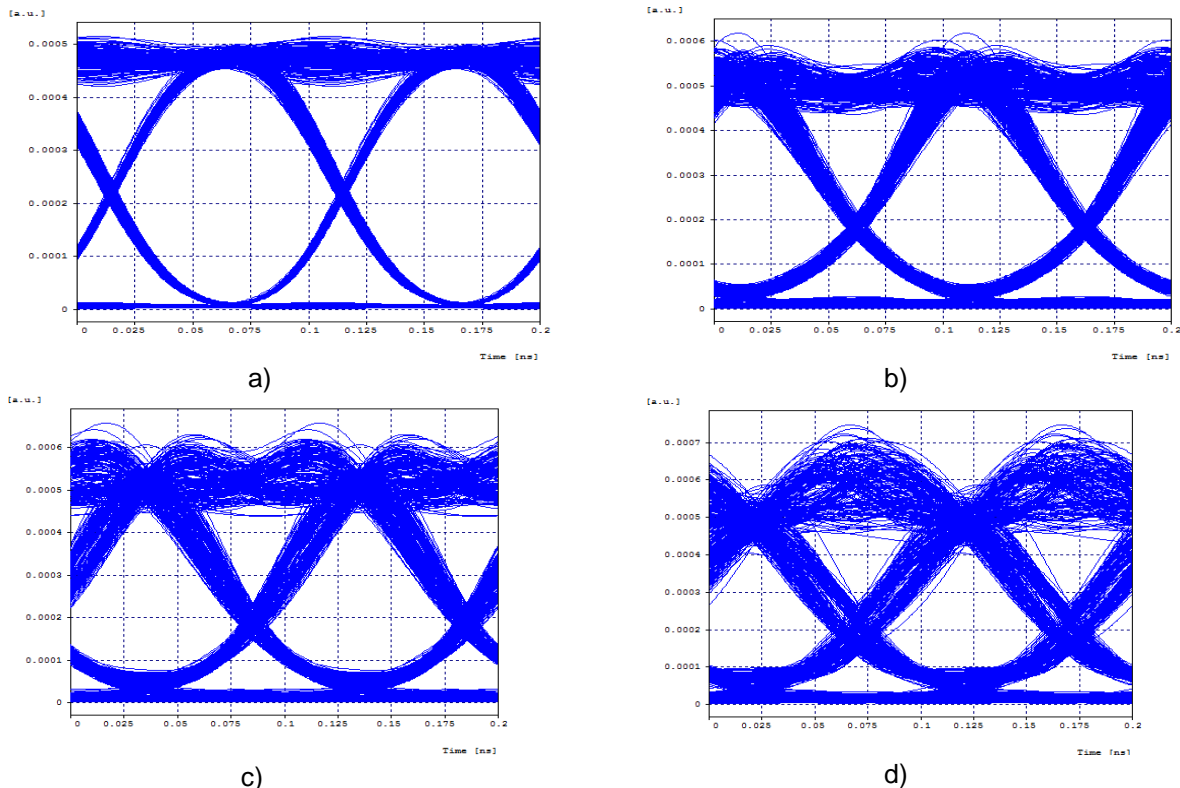


Figura 4.12 Diagrama del ojo para: a) Un span de 70 Km b) Cinco span de 70 Km, c) Ocho span de 70 Km y d) Once span de 70 Km.

En la Figura 4.13 (Anexo C, Tabla 4 y Tabla 5), se evidencia que al agregar un amplificador EDFA, la configuración Booster e Inline para enlaces concatenados presenta un mejor



desempeño, debido a su mayor distancia alcanzada (770 Km), 210 Km por encima del valor logrado en configuración Inline únicamente.

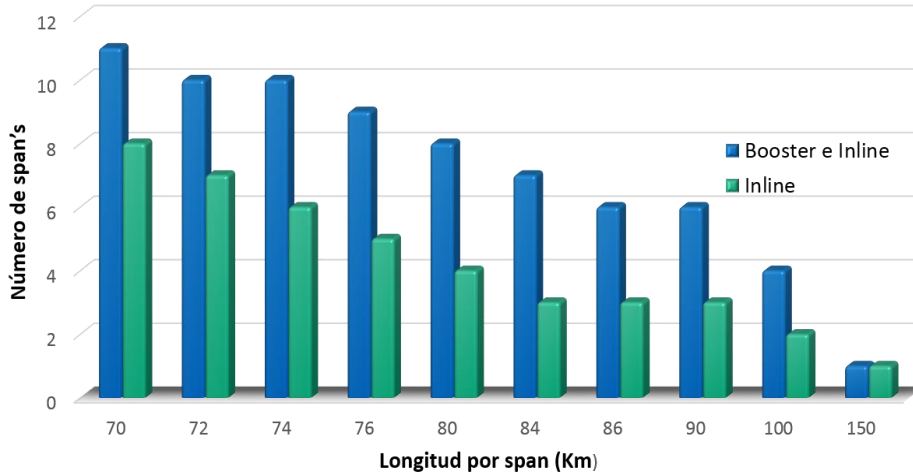


Figura 4.13 Número de span alcanzado con amplificación EDFA, en configuración Booster e Inline y configuración Inline únicamente.

4.2.1 Análisis de efectos lineales:

4.2.1.1 Ruido y Pérdidas

Para determinar el efecto de ruido y pérdidas acumuladas durante la propagación de la señal en un span de 150 Km, se analizan los parámetros de monitoreo óptico mediante el incremento de la distancia, debido a que el ruido y la atenuación son parámetros intrínsecos de la fibra, que dependen principalmente del aumento de la misma o del incremento de los dispositivos de amplificación.

Como primera medida, para verificar la degradación de la señal en la red, debido únicamente a las pérdidas introducidas por la DCF y el ruido de los dispositivos de amplificación, se trabaja con potencias mínimas de amplificación (5 dBm) con el fin de no excitar los efectos no lineales; por lo tanto para determinar la dependencia de la distancia con respecto a una de las propiedades más relevantes de la DCF, se mantiene constante la atenuación de la fibra SSMF-28 Corning (0.235 dB/Km), y se varía tanto el coeficiente de atenuación de la DCF, los cuales oscilan entre valores comerciales y no comerciales (Tabla 4.5), como también la distancia del enlace, para generar un rango de atenuación soportado por la red. Dado que la atenuación es un factor que cambia linealmente con la distancia del enlace, el aumento de pérdidas en mayor proporción introducidas en la red se presenta cuando el coeficiente de atenuación de la DCF va en incremento, lo anterior se evidencia en la Figura 4.14 (Anexo C, Tabla 6).

La Tabla 4.5, muestra los valores del coeficiente de atenuación de la DCF para la prueba.

Tabla 4.5 Variación del coeficiente de atenuación de la DCF.

Atenuación (dB/Km)	0,1	0,235	0,35	0,55	1,4	2,7	3,5
--------------------	-----	-------	------	------	-----	-----	-----



La Figura 4.14 (a) y (b) muestra los siete valores del coeficiente de atenuación de la DCF definidos para el análisis de la atenuación, con su correspondiente variación respecto a los parámetros ópticos y distancia máxima alcanzada.

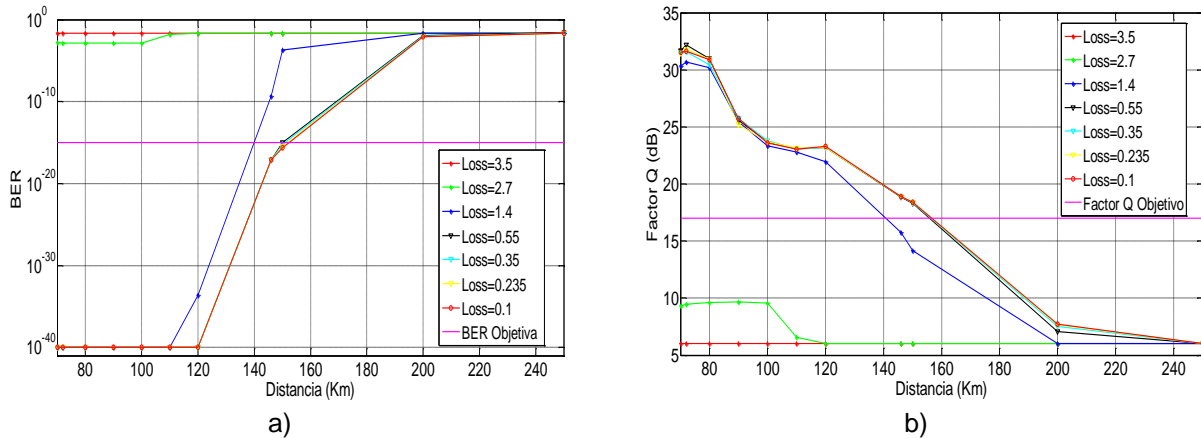
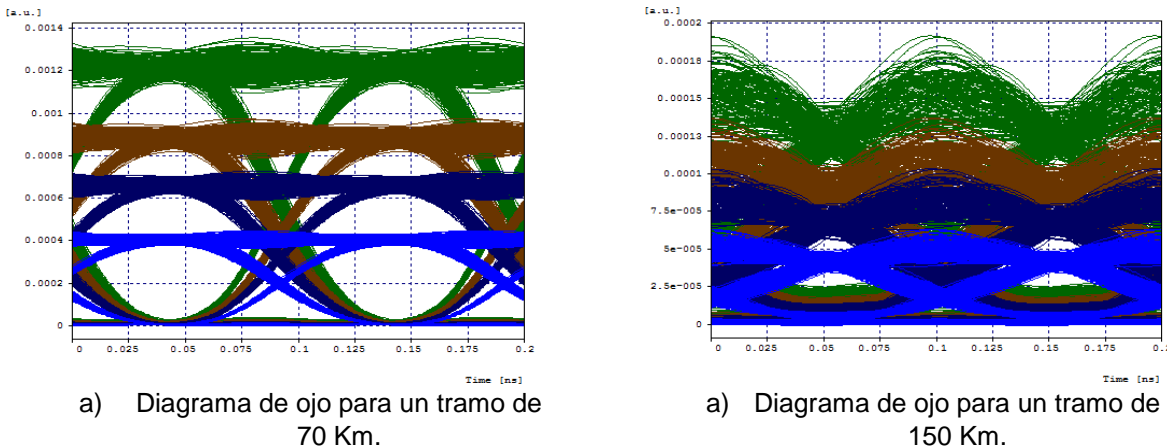


Figura 4.14 a) BER vs Distancia y b) Factor Q vs Distancia para diferentes coeficientes de atenuación de la DCF.

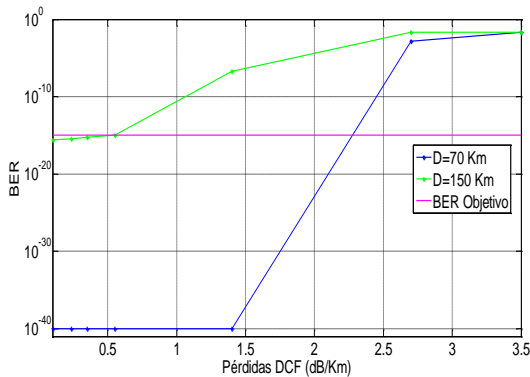
La Figura 4.14 (a) y (b), muestra el comportamiento de la red al variar el coeficiente de atenuación de la DCF en los valores mencionados. Al realizar dichas variaciones se observa el efecto de las pérdidas en la red, donde la mayor degradación se origina en valores altos de atenuación, es el caso de 3.5 dB/Km que ocasionan unas pérdidas de 37.48 dB para 10.71 Km de longitud de DCF, valor considerable para deteriorar el desempeño de la red; lo cual indica que la atenuación preferiblemente puede ser seleccionada dentro del rango de 0.1 a 0.55 dB/Km para evitar señales atenuadas y enmascaradas de ruido generadas a partir de coeficientes de atenuación mayores a 1.4 dB/Km, las cuales resultan indetectables en recepción.

La Figura 4.15 muestra el efecto de las pérdidas y ruido introducido por los elementos de la red para un tramo de fibra de 70 y 150 Km respecto a los parámetros de desempeño óptico definidos ($BER=10^{-15}$, $Q=17dB$).

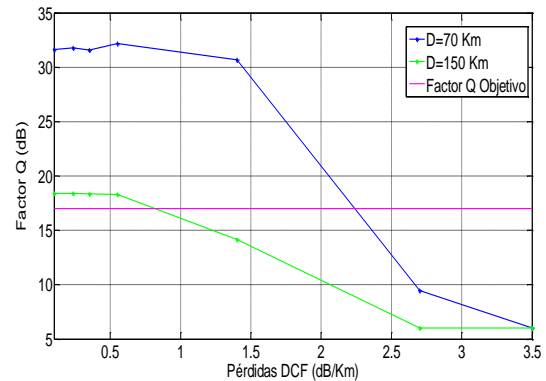


a) Diagrama de ojo para un tramo de 70 Km.

a) Diagrama de ojo para un tramo de 150 Km.



c) BER vs Pérdidas DCF.



d) Factor Q vs Pérdidas DCF.

Figura 4.15 Desempeño del enlace ante variaciones del coeficiente de atenuación de la DCF.

Como se puede observar en la Figura 4.15 (a) y (b), el efecto del ruido y atenuación introducido por los dispositivos de amplificación y la DCF respectivamente, ocasionan en el diagrama del ojo una pérdida de la intensidad de la señal, atenuando sus niveles de amplitud. Además, se aprecia que para distancias considerables (150 Km) la degradación generada por las pérdidas y ruido afectan en gran medida los parámetros ópticos, caso contrario, para distancias menos extensas (70 Km) el efecto de las pérdidas y ruido no aporta una degradación significativa en el desempeño de la red, debido a que dispositivos de amplificación logran compensar la atenuación de la señal.

4.2.1.2 Dispersión cromática (CD)

Para determinar el efecto de la dispersión cromática, se parte de la máxima distancia alcanzada por la red en presencia de todas las degradaciones ópticas, que corresponde a 150 Km. Para verificar este efecto lineal, se definen los siguientes análisis: En primer lugar, se determina el desempeño sin CD y únicamente con CD, segundo, se calcula la CD acumulada en la red, y tercero, se evalúa el coeficiente de dispersión de la DCF para determinar su impacto en el desempeño del enlace.

Determinar el desempeño de la red en presencia y ausencia de CD.

Con la finalidad de verificar el impacto de la dispersión cromática, se analiza el comportamiento de la red sin CD y solo con CD. La Figura 4.16 (a), (b) y (c), muestra los diagramas de ojo en presencia de todas las degradaciones, ausencia de CD y presencia solo de CD respectivamente.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

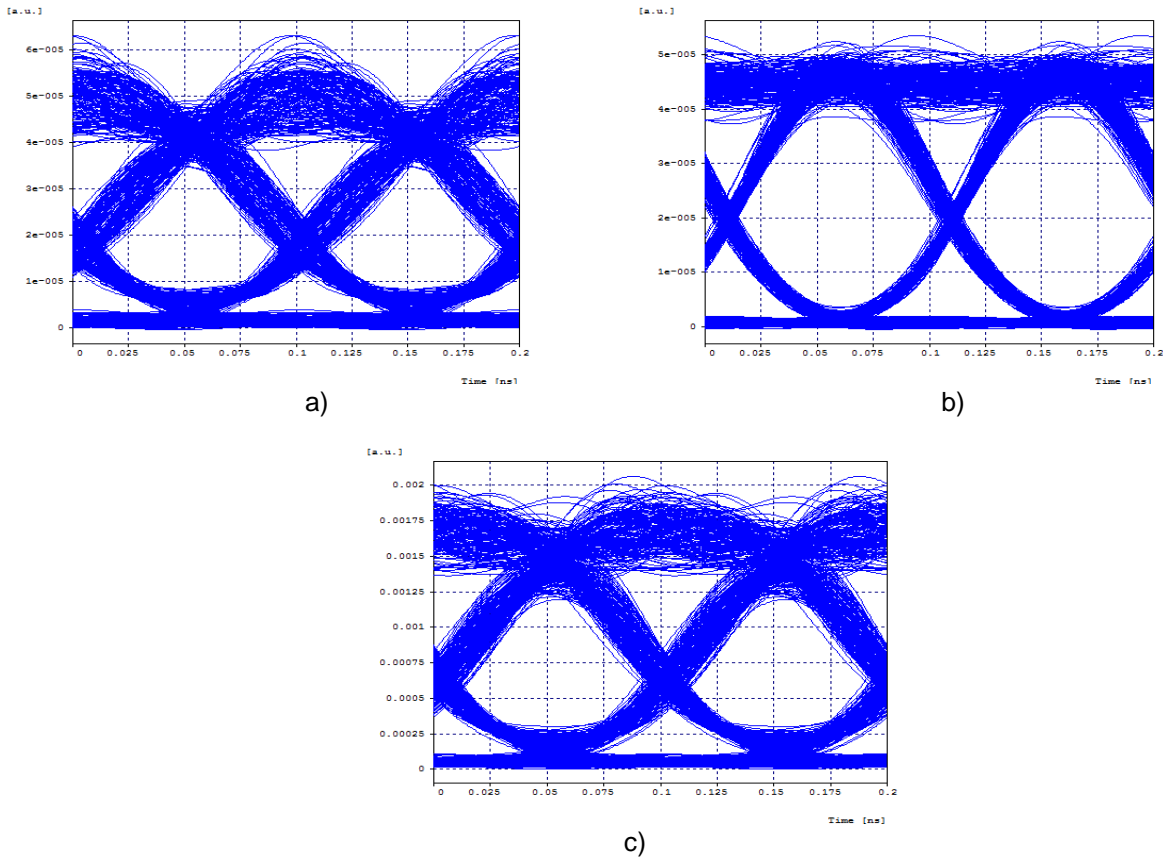


Figura 4.16 Diagrama de ojo para un tramo de 150 Km: a) En presencia de todas las degradaciones, b) Sin CD y c) Solo con CD.

En la Figura 4.16 (a), (b) y (c), se muestra la degradación generada en el diagrama del ojo tras propagarse la señal dentro de la fibra con todas las degradaciones, sin CD y solo con CD. A partir del resultado de simulación se observa que el desempeño de la red se encuentra afectado por la presencia de CD, esto se debe a que la BER y Factor Q presentan valores similares cuando la red se simula con todas las degradaciones y en presencia únicamente de CD, lo cual indica que dispersión cromática es el efecto que degrada en mayor medida los parámetros de desempeño, razón necesaria para compensar su efecto.

La Tabla 4.6 resume los parámetros de monitoreo óptico para la red en presencia de todas las degradaciones ópticas, ausencia de CD y presencia solamente de CD.

Tabla 4.6 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de CD en la red.

Simulación	Factor Q (dB)	BER
En presencia de todas las degradaciones	18,28	9,86e-16
Sin CD	24,03	1,00e-40
Solo con CD	17,68	1,02e-14



La Figura 4.17 muestra el efecto de la dispersión cromática reflejado en la señal eléctrica detectada por el receptor en ausencia de CD y solo con CD, en comparación a la señal eléctrica transmitida, donde se evidencia la variación en el tiempo de llegada de los pulsos de la señal, y en consecuencia el ensanchamiento de los mismos. El alargamiento de los pulsos se verifica cuando el Δ^{11} de un pulso recibido presenta un valor superior al Δ transmitido. Adicionalmente se observa los pulsos en recepción cuando se hace uso de la compensación, permitiendo disminuir el ensanchamiento.

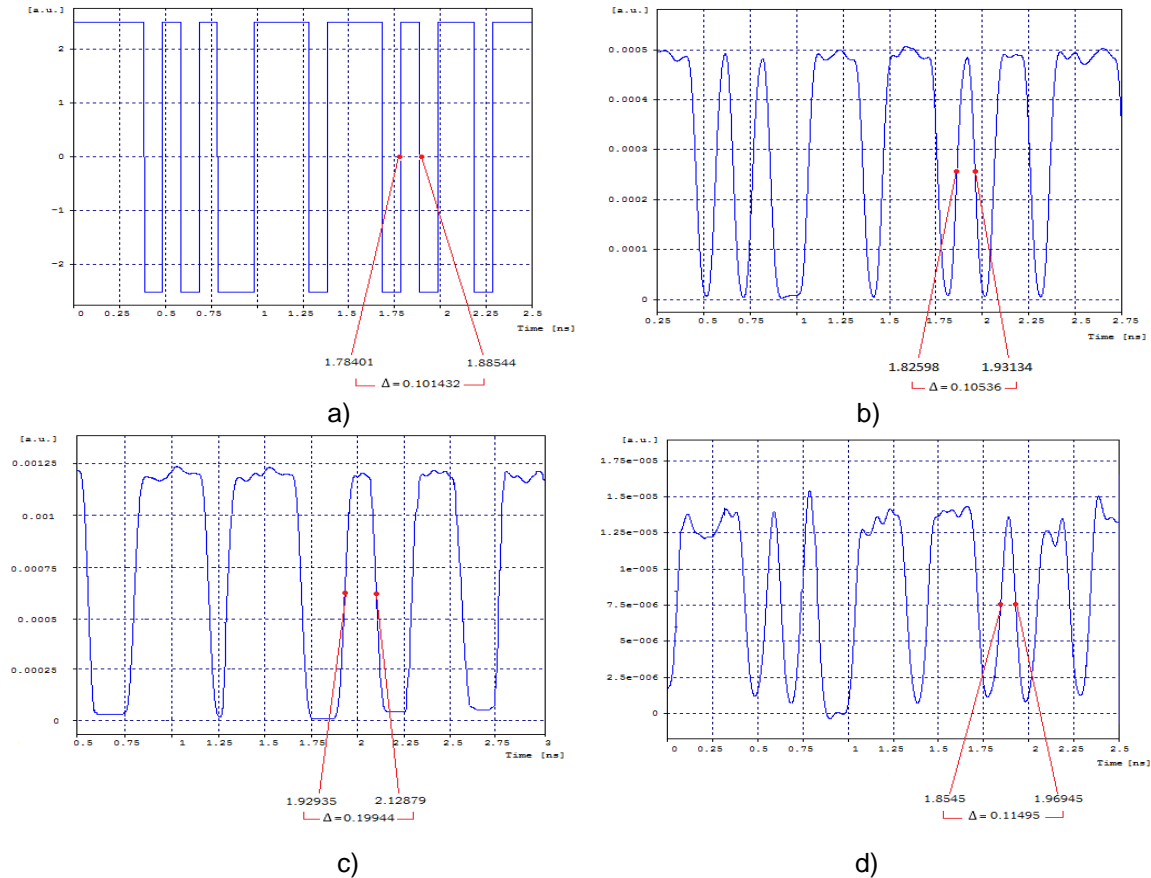


Figura 4.17 Pulso eléctrico de la señal: a) Transmitido, b) Sin CD, c) Solo con CD y d) Después de compensar la CD.

Como se observa en los resultados obtenidos en la Tabla 4.6 y en la Figura 4.17 (a), (b), (c) y (d), la señal se ve afectada por la dispersión cromática, la cual introduce un efecto de alargamiento temporal de los pulsos a lo largo de su propagación; dicho alargamiento es más pronunciado cuando la red únicamente se encuentra en presencia de CD.

Cálculo de la CD acumulada en la red.

El cálculo de la CD acumulada en la red se realiza matemáticamente mediante la ecuación 4.1 [69], donde se asocia la máxima longitud alcanzada ($L = 150$ Km), la pendiente de dispersión para longitudes de onda que trabajan en los 1550 nm ($S_0 = 0.056$ ps/nm² * Km),

¹¹ Medida para visualizar el ensanchamiento de un pulso.



la CD de la fibra SSMF-28 Corning (17 ps/nm*Km) y la longitud de onda del canal de transmisión que se asignó para evaluar (1535.82202 nm = 195.2 THz):

$$D_{link}(\lambda) = L [CD + So * (\lambda - 1550nm)] \text{ [ps/nm]} \quad (4.1)$$

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación 4.1, se obtiene el cálculo de la CD acumulada en la red:

$$D_{link}(\lambda) = 150Km \left[\frac{17ps}{nm*Km} + \frac{0,056ps}{nm^2*Km} * (1535.82202nm - 1550nm) \right] = 2430,90 \frac{ps}{nm}$$

Para lograr disminuir la CD acumulada en la red se emplea como técnica de compensación una DCF, debido a que ésta con su alta dispersión negativa permite compensar la dispersión positiva de la SSMF, el siguiente resultado muestra como la dispersión acumulada se reduce cuando se agrega una longitud de DCF de 10.71 Km.

$$D_{link}(\lambda) = 2430,90 \frac{ps}{nm} - \left(100 \frac{ps}{nm * Km} * 10.71Km \right) = 1359,9 \frac{ps}{nm}$$

Adicionar longitudes de DCF más extensas reduce en mayor proporción la dispersión acumulada en la red, sin embargo, se establece una compensación menor al 50 % (10.71 Km), debido a que operadores comerciales, por razones de costos no realizan la compensación a altos porcentajes.

Evaluar como diferentes coeficientes de dispersión de la DCF impactan el desempeño de la red, principalmente en el parámetro de distancia.

La Tabla 4.7 muestra los nueve coeficientes de dispersión de la DCF definidos para realizar el análisis de la CD en una distancia máxima de 150 Km, algunos comerciales y otros valores no comerciales, con el fin de observar en detalle el impacto de una de las propiedades más relevantes de la DCF.

Tabla 4.7 Variación del coeficiente de dispersión de la DCF.

Dispersión (ps/nm*Km)	-17	-50	-80	-95	-100	-120	-170	-250	-300
----------------------------------	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------

Con el propósito de observar si la disminución del coeficiente de dispersión de la DCF permite alcanzar mayores distancias, se realizan dos pruebas: La primera, consiste en la variación de los coeficientes de dispersión para tres longitudes de DCF fijas (10.71, 19.125 y 25.5 Km) que corresponden al 42, 75 y 100 % de compensación respectivamente; la segunda, consiste en variar la longitud de la DCF de acuerdo al porcentaje de compensación deseado (25, 42, 50, 75, 80 y 100 %), con el fin de encontrar el valor de coeficiente de dispersión de la DCF mínimo que la red necesita para cumplir con el BER y Factor Q definido, así como también, el coeficiente de dispersión máximo hasta el cual es recomendable utilizar en la red.

La Figura 4.18 (Anexo C, Tabla 7), muestra la primera prueba de cómo diferentes coeficientes de dispersión impactan los parámetros ópticos.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

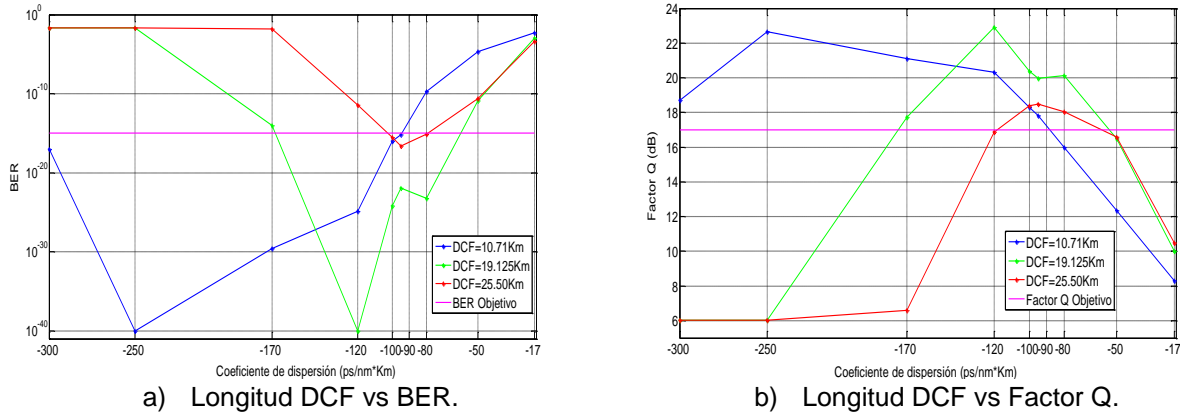


Figura 4.18 Comportamiento de la red ante la variación de diferentes valores del coeficiente de dispersión de la DCF.

Los resultados de la Figura 4.18 indican que para valores de coeficientes de dispersión altamente negativos se necesita una longitud de DCF reducida, así mismo, para redes que requieran mayor compensación, es decir, longitudes de DCF más extensas, el valor del coeficiente de dispersión debe ser mayor o igual a -100, pero a su vez, menor o igual a -80 para la red en estudio. Es importante señalar que para una longitud de DCF igual a 10.71 Km, el rango aceptable para cumplir con los parámetros objetivos comprende un intervalo más amplio que oscila entre -95 y -300 ps/nm*Km.

La Figura 4.19 (Anexo C, Tabla 8) muestra la segunda prueba de como diferentes porcentajes de compensación reflejado en diferentes longitudes de DCF impactan los parámetros ópticos.

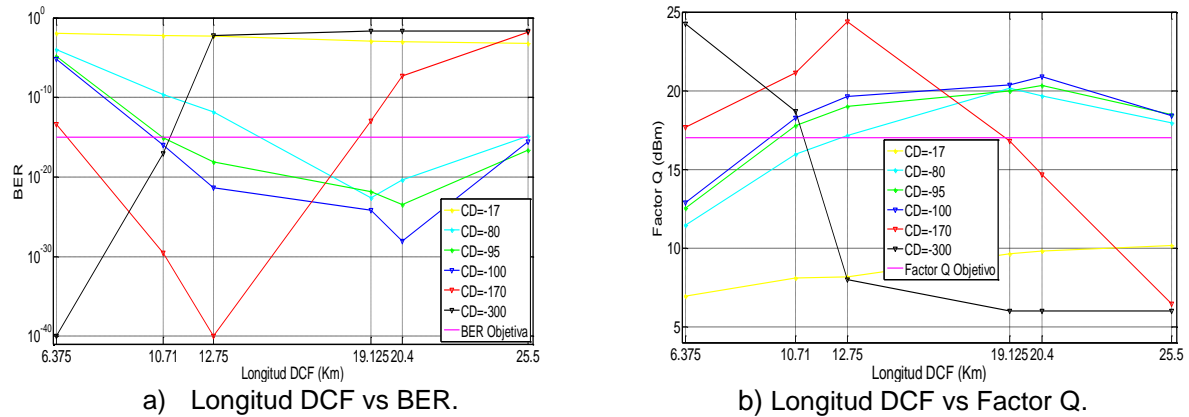


Figura 4.19 Comportamiento de la red ante la variación de diferentes longitudes de la DCF con diferentes coeficientes de dispersión.

Mediante el análisis de los resultados obtenidos en la Figura 4.19, se evidencia que el aumento en la longitud de la DCF permite la disminución del coeficiente de dispersión, debido a la relación directa que existe entre las dos, así, para valores de CD mayores (entre -170 y -300 ps/nm*Km) la longitud de la DCF debe disminuir para conservar los parámetros de desempeño.



Particularmente para una longitud de DCF de 10.71 Km, se observa que el incremento del coeficiente de dispersión debe hacerse a partir de -95 ps/nm*Km para cumplir con los parámetros objetivos definidos, lo cual significa, que un valor menor en el coeficiente de dispersión no es suficiente para compensar la dispersión en la red, de este modo, para emplear valores menores se requieren longitudes de DCF más extensas.

De acuerdo a las dos pruebas realizadas para evaluar como diferentes coeficientes de dispersión de la DCF impactan en el desempeño de la red, se concluye que el valor mínimo y máximo del coeficiente de dispersión se logra en -95 y -300 ps/nm*Km respectivamente, para cumplir con el BER y Factor Q definido, utilizando una longitud de DCF de 10.71 Km; para el desarrollo del trabajo de grado se define un valor comercial de coeficiente de dispersión de la DCF igual a -100 ps/nm*Km para posteriores análisis.

4.2.1.3 Dispersión por modo de polarización (PMD)

Para determinar el impacto de la PMD en una distancia máxima de 150 Km, se varía el parámetro PMD dentro del entorno de simulación hasta conseguir un valor límite que cumpla los parámetros de calidad definidos. Para verificar este efecto lineal se analiza el desempeño de la red en presencia de todas las degradaciones, sin PMD y únicamente con PMD. Para visualizar con mayor claridad los dos últimos análisis no se tiene en cuenta las atenuaciones ni el ruido introducido por dispositivos de amplificación. La Figura 4.20 muestra el diagrama de ojo con todas las degradaciones, sin PMD, y únicamente con PMD respectivamente.

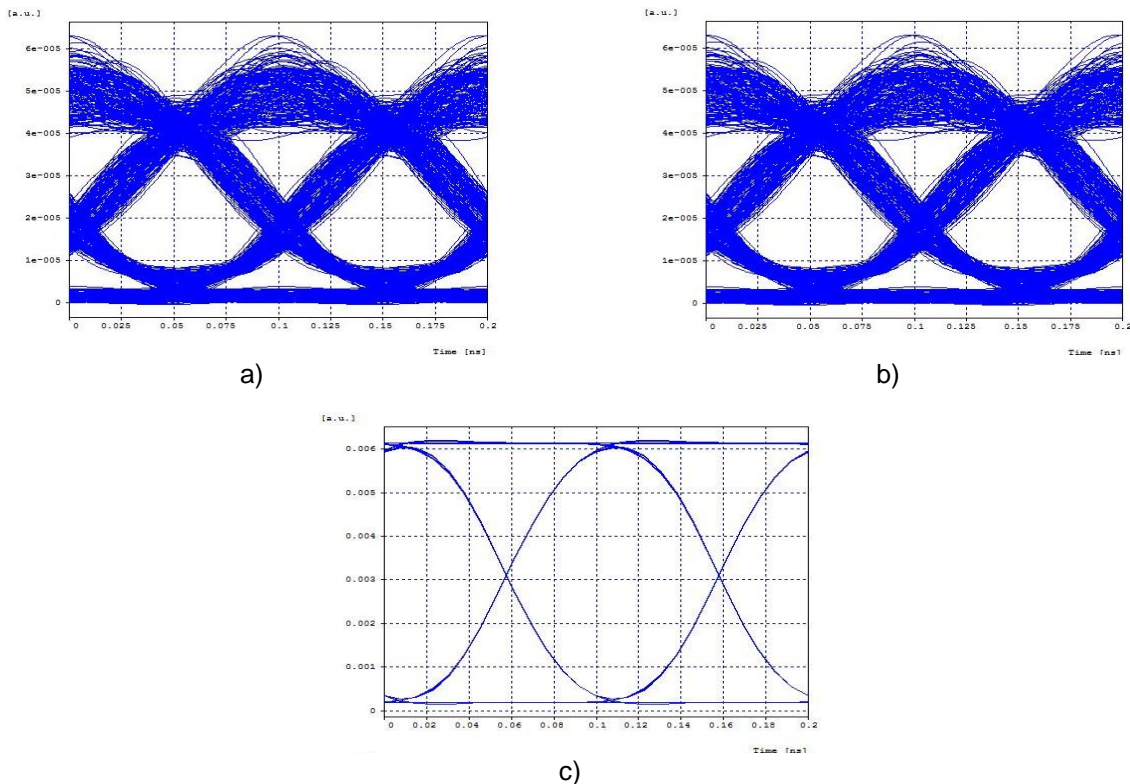


Figura 4.20 Diagrama de ojo para un tramo de 150 Km: a) En presencia de todas las degradaciones, b) Sin PMD y c) Solo con PMD.



La Tabla 4.8 resume los parámetros de monitoreo óptico para la red en presencia de todas las degradaciones, ausencia de PMD y presencia solamente de PMD.

Tabla 4.8 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de PMD en la red.

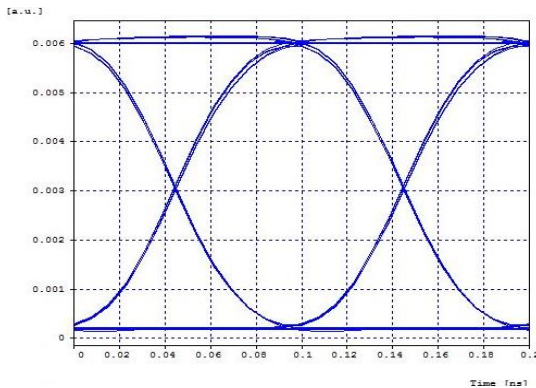
Simulación	Factor Q (dB)	BER	OSNR _{out} (dB)	Prx (dBm)
En presencia de todas las degradaciones	18,28	9,86e-16	24,16	-16,56
Sin PMD	18,28	9,86e-16	24,16	-16,56
Solo con PMD	37,82	1,00e-40	26,78	-1,35

De acuerdo a la Figura 4.20 (a) y (b) se observa que el efecto de la PMD es una degradación de bajo o nulo impacto en el desempeño de la red, dicha afirmación se comprueba en la Tabla 4.8, donde se muestra que los valores de BER, Factor Q y OSNR, en presencia de todas las degradaciones y en ausencia de PMD son exactamente iguales, debido a que el valor típico de PMD para una fibra SSMF-28 Corning es demasiado pequeño ($0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$) y por tanto, nada influyente en la degradación de los parámetros de calidad bajo la caracterización del caso 1 mencionado. Teniendo en cuenta lo anterior y con el fin de visualizar el efecto de la PMD, se generan valores de PMD superiores al tradicional para establecer la máxima tolerancia del sistema frente a dicho efecto lineal. La Tabla 4.9 muestra el comportamiento de la red ante estas variaciones.

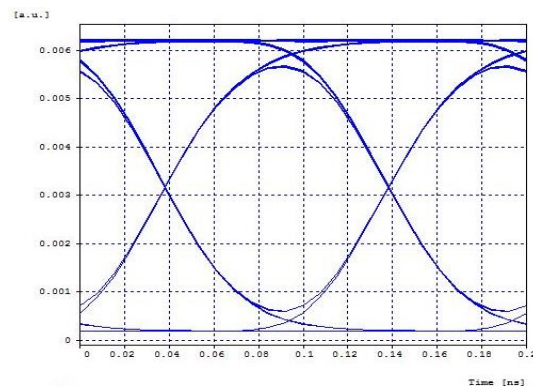
Tabla 4.9 Parámetros de monitoreo para diferentes valores de PMD.

Valor de PMD ($\text{ps}/\sqrt{\text{Km}}$)	Factor Q (dB)	BER
3	34,97	1.00e-40
4	24,55	3,25e-30
4.5	19,17	1,63e-19
5	17,89	2,19e-15

De la Figura 4.21 (a), (b), (c) y (d), la cual muestra el diagrama de ojo para diferentes valores de PMD, se observa que a medida que aumenta el coeficiente de PMD el diagrama de ojo presenta mayores ladeaciones que degradan significativamente el desempeño de la red, causando errores en recepción.



a) PMD = 3ps/√Km.



b) PMD = 4ps/√Km.

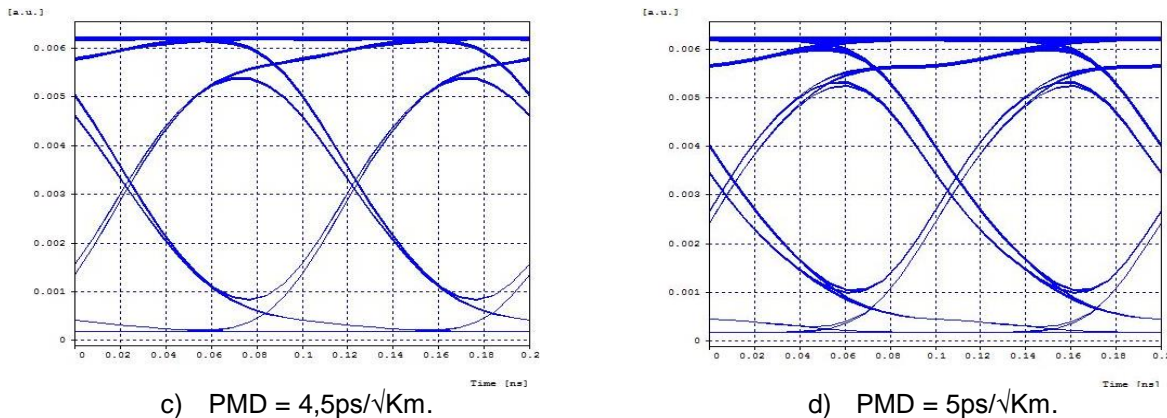


Figura 4.21 Diagrama de ojo debido a variaciones de PMD.

Mediante el análisis de los resultados obtenidos en la Figura 4.21, se determina que la máxima tolerancia al efecto de la PMD soportada por el caso de simulación 1, se encuentra alrededor de $5 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$, valor para el cual el enlace en condiciones únicamente de evaluación de la PMD cumple los parámetros de desempeño objetivos; a partir de valores superiores, la red se ve altamente afectada por inclinaciones y desalineaciones que generan detecciones incorrectas. Finalmente, se concluye que la red es altamente tolerante al efecto de la PMD, debido a que el tipo de fibra utilizado en la red de estudio cuenta con un valor de PMD muy bajo ($0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$).

4.2.2 Análisis de efectos no lineales:

4.2.2.1 Automodulación de fase (SPM)

Para determinar el efecto SPM, se realizan dos análisis: en primer lugar, debido a que efectos no lineales como SPM, se presentan principalmente cuando se aplican altas potencias en la señal transmitida por la fibra óptica, se varía la potencia de los dispositivos de amplificación para verificar si al incrementar sus potencias se mantienen o no los parámetros de desempeño objetivos, un segundo análisis, consiste en evaluar el comportamiento de un canal variando la potencia del mismo en un rango de 0 a 25 dBm y fijando la potencia de los otros canales en valores determinados para evitar la presencia de efectos no lineales como XPM y FWM sobre el canal evaluado.

La Figura 4.22 (a) y (b), corresponde a los diagramas de ojo de la señal en variación de la potencia de los dispositivos de amplificación EDFA para 0 y 23 dBm respectivamente, con una potencia de transmisión de 5 dBm.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

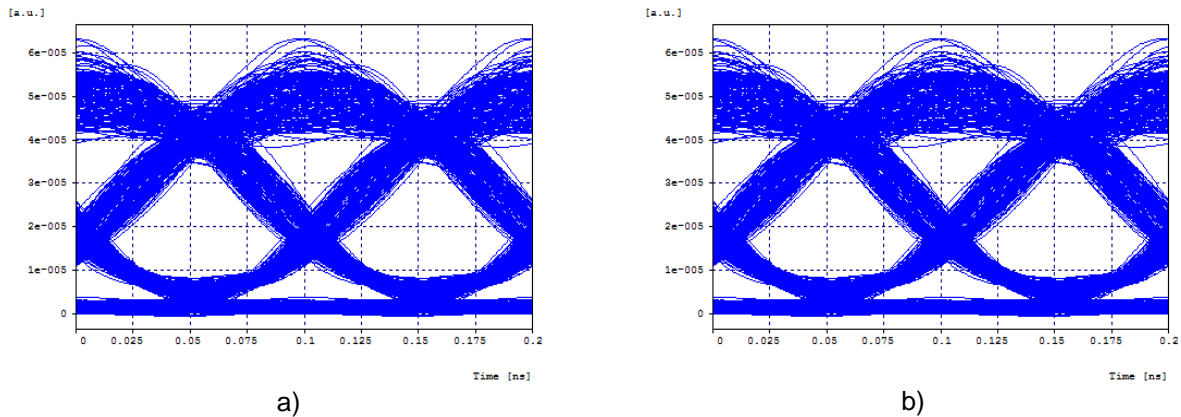
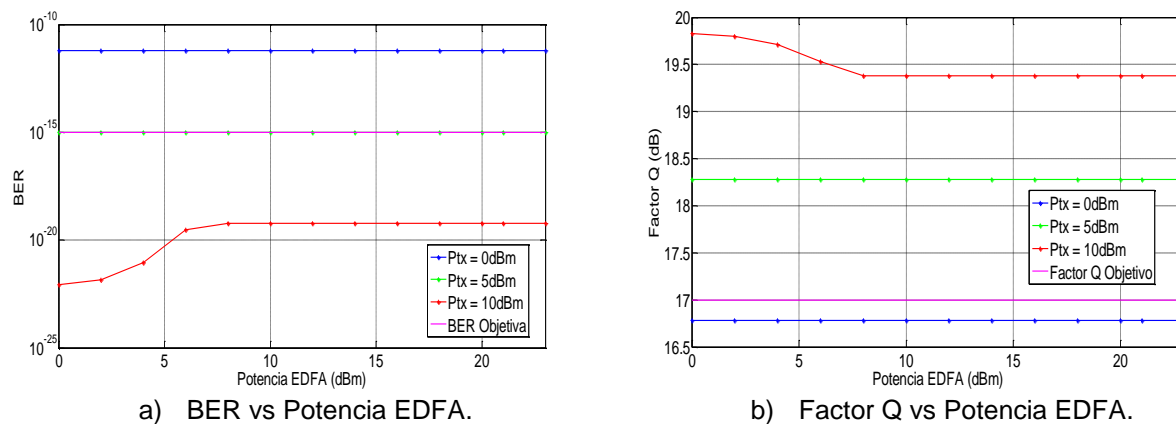


Figura 4.22 Diagrama del ojo con: a) Potencia EDFA=0dBm y b) Potencia EDFA=23dBm.

Así mismo, la Figura 4.23 (a) y (b), muestra el comportamiento de la red al incrementar la potencia de los amplificadores EDFA con variaciones en la potencia de transmisión de 0, 5 y 10 dBm (Anexo C, Tabla 9).



a) BER vs Potencia EDFA. b) Factor Q vs Potencia EDFA.
Figura 4.23 Desempeño de la red al realizar variaciones en la potencia de los dispositivos de amplificación EDFA para diferentes potencias de transmisión.

Como se observa tanto en los diagramas de ojo (Figura 4.22), como en el comportamiento de los parámetros de calidad, el realizar variaciones en la potencia del EDFA (0 a 23 dBm), con distintas potencias de transmisión (Figura 4.23), muestra un desempeño constante en el enlace de transmisión, por lo tanto, el efecto SPM no resulta significativo al incrementar la potencia del dispositivo EDFA.

Por otra parte, para la segunda prueba, se analiza el efecto de SPM en el canal 1 (195,2 THz), variando la potencia del mismo en un rango de 0 a 25 dBm y asignando a los tres canales restantes valores de potencia no elevados. La Figura 4.24 (Anexo C, Tabla 10), muestra las variaciones sobre el canal medido.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

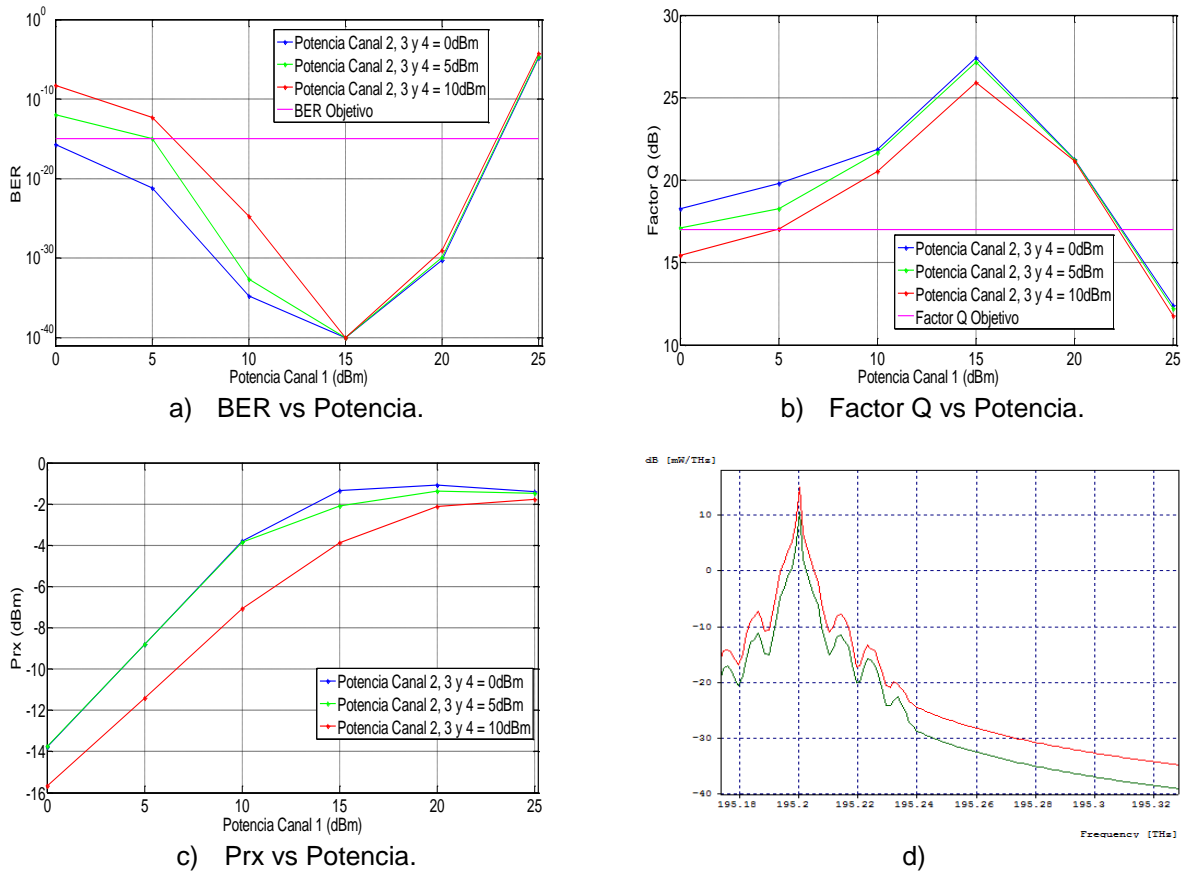


Figura 4.24 Desempeño del enlace en el canal 1: a), b) y c) Frente a las variaciones de las potencias de transmisión de los canales 2, 3 y 4 y d) Espectro óptico en recepción para valores de potencia de transmisión de 5 dBm (verde) y 15 dBm (rojo).

La Figura 4.24 (a), (b) y (c), presenta el comportamiento entre la variación de la potencia de transmisión del canal 1 y los parámetros de monitoreo óptico (BER, Factor Q y Potencia en recepción), respecto a la potencia de los demás canales; se hace evidente que a medida que aumenta la potencia de dicho canal, el desempeño empieza a mejorar hasta una potencia de transmisión de 15 dBm, luego empieza a decrecer evidenciando el ensanchamiento espectral, ocasionado por el efecto SPM tal como se observa en la Figura 4.24 (d), el cual genera cambios desfavorables en los parámetros de monitoreo óptico, volviéndose crítico para valores superiores a 20 dBm, lo que impide al enlace cumplir con los parámetros definidos.

4.2.2.2 Modulación de fase cruzada (XPM)

Para determinar el efecto XPM, se realizan dos análisis, en primer lugar, se varía la potencia de los canales 2 y 3, mientras la potencia de los canales adyacentes permanece fija. El canal 2 y 3 actúan como canales de bombeo con el fin de verificar si sus potencias afectan las fases del canal 1 y 4, generando ensanchamiento en el espectro óptico; un segundo análisis, debido a que efectos no lineales como XPM dependen de la dispersión cromática, se varía la CD dentro de la fibra para verificar su dependencia con XPM.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

La Figura 4.25 (Anexo C, Tabla 11), muestra la respuesta del canal 1 y 4 ante los efectos de propagación de diferentes potencias del canal 2 y 3 respecto a los parámetros de medida BER y Factor Q.

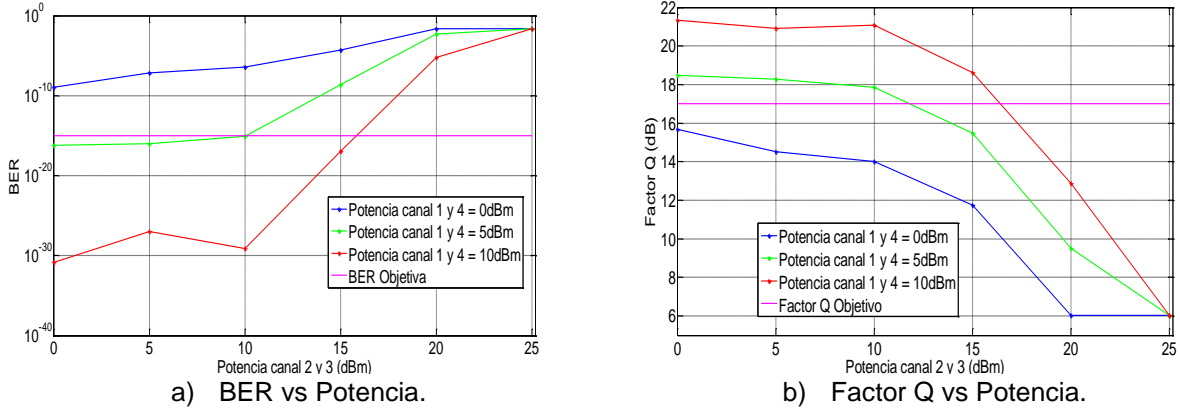


Figura 4.25 Comportamiento del canal 1 y 4, ante la variación de la potencia de transmisión de los canales 2 y 3.

De acuerdo a la Figura 4.25, se observa que para potencias de transmisión en los canales adyacentes superiores a 10 dBm, los parámetros ópticos de medida se empiezan a degradar por debajo de los niveles mínimos, esto debido al ensanchamiento que sufre la señal debido a XPM, volviéndose crítico a partir de 20 dBm. La Figura 4.26 muestra el efecto de XPM en el canal 1 mediante el análisis del espectro óptico de la señal de salida para tres niveles de potencia diferentes, donde se evidencia el mayor alargamiento en el espectro a medida que las potencias de los canales adyacentes aumentan.

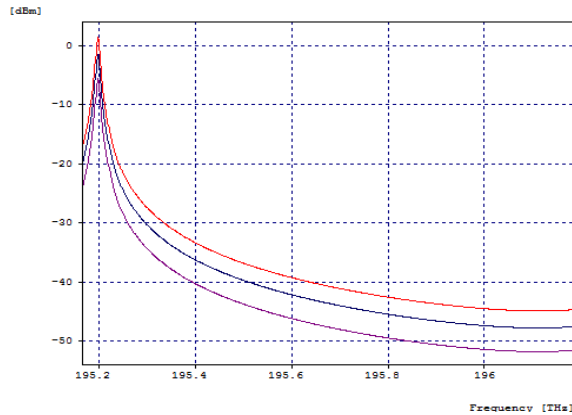


Figura 4.26 Espectro óptico a la salida del canal 1, para valores de potencia de transmisión de 0 dBm (Morado), 5 dBm (Azul) y 15 dBm (Rojo).

En la Figura 4.27, se muestra el espectro óptico de salida de la red dependiente del efecto de XPM, el cual presenta un leve alargamiento comparado con el espectro óptico de entrada.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

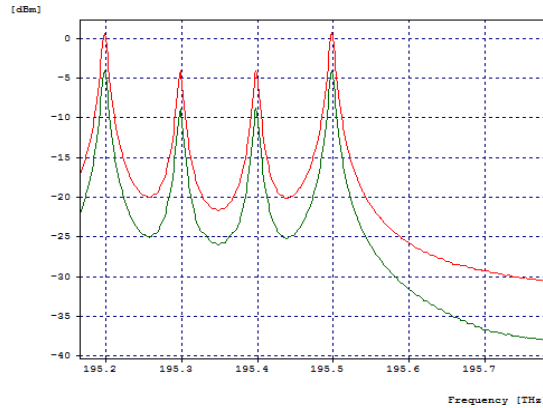
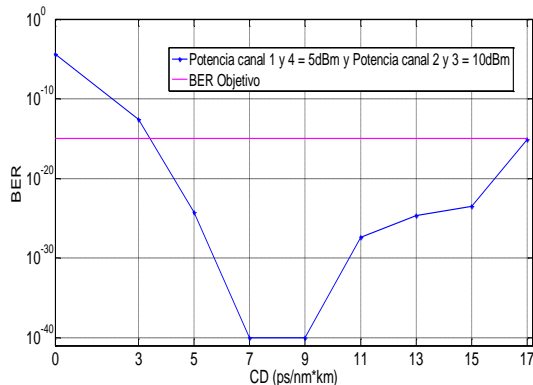


Figura 4.27 Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de salida (rojo) debido a XPM.

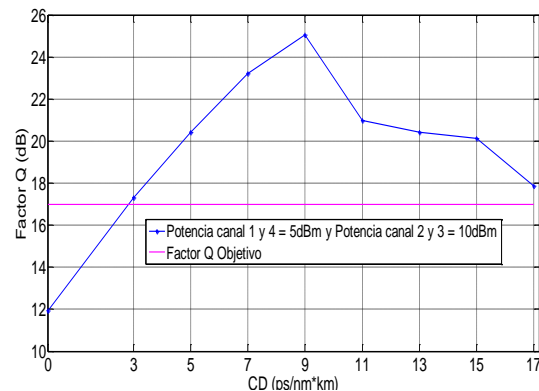
Mediante el análisis de los resultados obtenidos desde la Figura 4.25 hasta la Figura 4.27, XPM viene a ser un problema en el desempeño de la red cuando la diferencia de las potencias de entrada de los canales próximos es significativa, dado que el aumento de sus niveles de potencias generan ensanchamiento sobre el espectro óptico lo que impide al enlace cumplir con los parámetros de calidad definidos. Por lo tanto el efecto XPM no resulta mayormente perjudicial en el desempeño para valores de potencia de transmisión adyacentes menores a 15 dBm.

En la segunda prueba, se busca determinar el efecto de XPM mediante la variación de la dispersión cromática de la fibra SSMF-28 Corning; para esta prueba se define un rango de variación de CD de 0 a 17 ps/nm*Km con la finalidad de evaluar la dependencia de XPM con distintos coeficientes de dispersión cromática.

En la Figura 4.28 (Anexo C, Tabla 12), se muestra el comportamiento del enlace ante la variación del coeficiente de dispersión de la fibra SSMF Corning para una potencia de transmisión fija en los canales adyacentes 1 y 4 de 5 dBm y una potencia en los canales 2 y 3 de 10 dBm, para provocar efectos de ensanchamiento mediante la propagación de diferentes potencias con distintos valores de coeficiente de dispersión.



a) BER vs Coeficiente de dispersión.



b) Factor Q vs Coeficiente de dispersión.

Figura 4.28 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de XPM mediante la variación del coeficiente de dispersión cromática.



De la Figura 4.28, se observa que para reducir los efectos de XPM se requiere aumentar la dispersión cromática. Sin embargo, es recomendable que el coeficiente de dispersión este por debajo de 18 ps/nm*Km, con el fin de evitar las degradaciones producidas producto de la misma dispersión cromática. Además se evidencia que el efecto de XPM es de mayor penalidad cuando la CD es 0 ps/nm*Km y de bajo o nulo impacto cuando la CD es 7 y 9 ps/nm*Km, puesto que un mayor valor de dispersión cromática reduce en gran proporción el ensanchamiento del pulso debido a XPM. De esta forma, se concluye que XPM no es muy crítico en regiones con alta dispersión cromática y que las limitaciones introducidas por XPM pueden ser indudablemente serias en el contexto de la red estudiada cuando las potencias de transmisión de los canales adyacentes se incrementen y además se asigne un valor de CD bajo.

4.2.2.3 Mezcla de cuatro ondas (FWM)

Para determinar el efecto FWM, se realizan dos análisis; en primer lugar, se varía la potencia de los canales 2, 3 y 4 de forma simultánea dentro del rango de 0 a 25 dBm, mientras la potencia del canal 1 permanece fija; un segundo análisis, considera las variaciones de la dispersión cromática dentro de la fibra para verificar su dependencia con el efecto no lineal FWM.

La Figura 4.29 (Anexo C, Tabla 13), muestra la respuesta del canal 1 ante las variaciones de potencia de los canales 2, 3 y 4 respecto a los parámetros de medida BER y Factor Q.

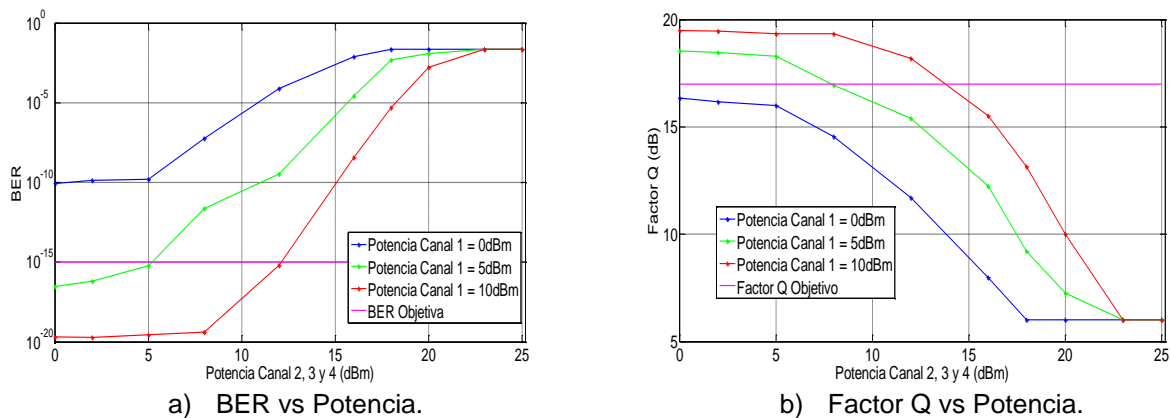


Figura 4.29 Comportamiento del canal 1, ante la variación de la potencia de los canales 2, 3 y 4.

De acuerdo a la Figura 4.29, se observa que a medida que las potencias de transmisión de los canales 2, 3 y 4 se incrementan, el rendimiento del canal evaluado empieza a descender por debajo de los niveles objetivos, a causa de la suma de otros canales en frecuencias distintas a las deseadas, las cuales generan una interferencia que impiden a la red cumplir con los parámetros de calidad del enlace de transmisión, haciéndose crítica la degradación de FWM en potencias altas de transmisión, debido a que para dichas potencias, las componentes generadas tienen mayor intensidad, dando lugar a una mayor influencia de FWM en la señal.

En la Figura 4.30, se muestra el espectro óptico de salida de la red dependiente del efecto FWM, para una potencia de transmisión del canal 1 de 5 dBm, el cual presenta la aparición



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

de nuevas componentes de frecuencia indeseadas comparado con el espectro óptico de entrada.

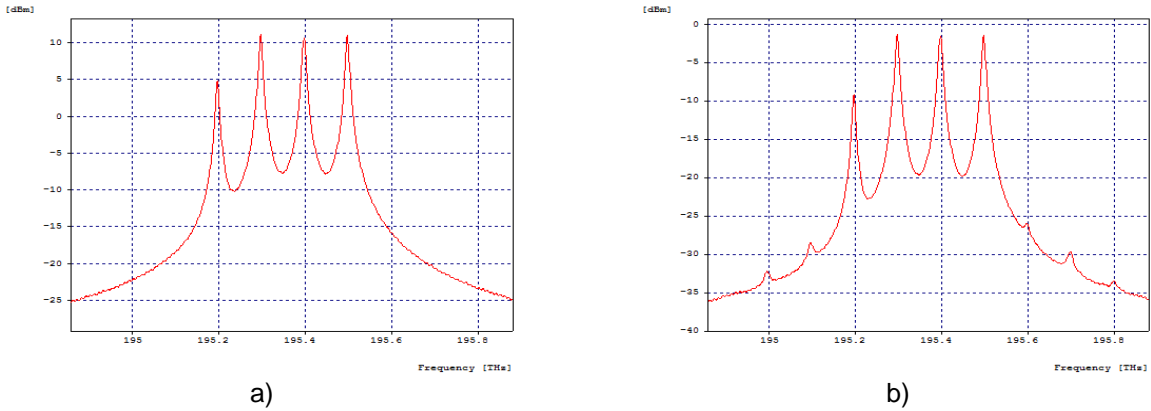
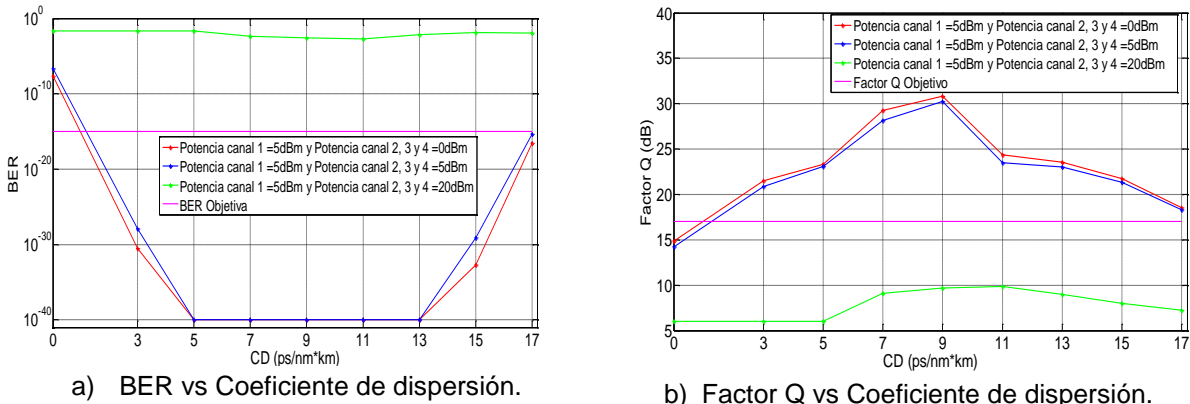


Figura 4.30 Espectro óptico de: (a) Entrada y (b) Salida debido a FWM.

Los resultados de la Figura 4.29 y Figura 4.30, indican que FWM causa nuevos productos de frecuencia en la zona espectral ocupada por las portadoras de los canales implementados, las cuales se convierten en una limitante cuando dichas componentes tienen un nivel más alto de potencia que se superponen a la señal como un nuevo ruido de intensidad. Sin embargo, para la red en estudio, el efecto FWM se manifiesta levemente, debido a que las nuevas frecuencias a la salida del medio de transmisión no han aumentado considerablemente su amplitud a expensas de la energía de las originales, razón por la cual no se considera una degradación significativa en la red.

En la segunda prueba, se busca determinar el efecto FWM mediante la variación de la dispersión cromática de la fibra SSMF-28 Corning; para esta prueba se define un rango de variación de CD de 0 a 17 ps/nm*Km, con la finalidad de evaluar la dependencia de FWM con distintos coeficientes de dispersión cromática.

En la Figura 4.31 (Anexo C, Tabla 14), se muestra el comportamiento del enlace frente a la variación del coeficiente de dispersión de la fibra SSMF-28 Corning para una potencia de transmisión fija en el canal 1 asignada en 5 dBm y una potencia variable en los canales 2, 3 y 4.



a) BER vs Coeficiente de dispersión.
 b) Factor Q vs Coeficiente de dispersión.
 Figura 4.31 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de FWM mediante la variación del coeficiente de dispersión cromática.



De acuerdo a la Figura 4.31, la degradación generada por FWM ante la variación del coeficiente de dispersión, afecta en mayor medida a valores de dispersión por debajo de los 5 ps/nm*Km y beneficia valores de dispersión altos. Sin embargo, es recomendable que el coeficiente de dispersión este por debajo de los 18 ps/nm*Km para evitar degradaciones producto de la misma dispersión cromática. Además se observa que el efecto de FWM es de menor penalidad cuando la CD está en el intervalo de 5 a 13 ps/nm*Km, debido a que cuando se usan valores altos en el coeficiente de dispersión surgen menos señales extras que afecten el ancho de banda de las señales propagadas. De esta manera, se concluye que FWM es más intensivo si la dispersión es nula y que las limitaciones introducidas por FWM pueden ser evidentemente dañinas en el contexto de la red de estudio cuando las potencias de los canales 2, 3 y 4 se incrementen por encima de los 12 dBm y se utilicen fibras en ausencia de dispersión.

Después de realizar el análisis de las diferentes degradaciones que afectan la transmisión de una red basada en amplificación EDFA sin inyección Raman, se concluye qué:

- Para obtener mayores distancias (600 km) mediante la implementación de enlaces concatenados (span's) se requiere aumentar los niveles de potencia mediante el uso de amplificadores EDFA en configuración Booster; por el contrario, para distancias menores (150 Km) sin la implementación de enlaces concatenados (span's) el emplear amplificadores EDFA en configuración Booster afectan negativamente el desempeño de la red.
- Uno de los principales problemas para la red caracterizada correspondiente al caso 1, es la degradación debido al alto nivel de atenuación que introduce enlaces de largas distancias y el ruido de dispositivos pasivos que conforman la red; razón por la cual se disminuye la longitud del span para cubrir la distancia mínima objetiva de 600 Km.
- Debido al impacto que proporcionan las propiedades más relevantes de una DCF, tanto el coeficiente de dispersión como el coeficiente de atenuación sobre el desempeño del enlace, se hace necesario definir una adecuada configuración de sus parámetros para optimizar su empleo en la red, pues de no hacerlo, la alta atenuación presente en la misma se convierte en un factor limitante en la transmisión de las señales, afectando el desempeño de la red.
- La dispersión de la fibra es uno de los parámetros de mayor impacto en el comportamiento de los efectos no lineales. Mediante los resultados obtenidos en simulación, se corrobora que un valor de dispersión crítico para excitar las no linealidades es 0 ps/nm*Km.
- En sistemas donde los trayectos alcanzan centenares de kilómetros, se requiere incrementar la potencia de los canales de transmisión, lo cual causa que los efectos no lineales se manifiesten en mayor medida; de hecho, cuando la diferencia en las potencias de los canales de transmisión son considerables, SPM y XPM son las no linealidades que limitan los parámetros de calidad de la red.

4.3 Caso de estudio 2: Inyección Raman sin amplificación EDFA.

- Formato de modulación NRZ-OOK.
- Tasa de transmisión 10 Gbps.
- Fibra SSMF-28 Corning.
- Inyección Raman.
- Fibra DCF.

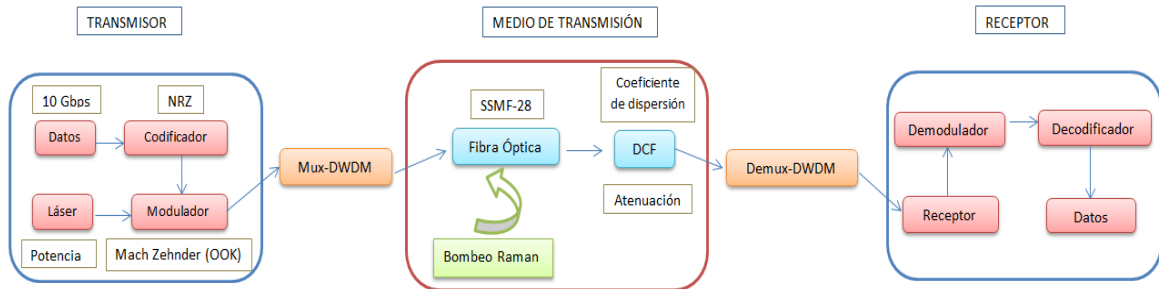


Figura 4.32 Caso de estudio 2: Inyección Raman sin amplificación EDFA.

En la Figura 4.33 se muestra el escenario de simulación implementado en la herramienta Optisim que corresponde al caso de estudio 2. En este caso, al escenario general de simulación, se le agrega inyección Raman. El desarrollo correspondiente al caso de estudio con inyección Raman en ausencia de etapas de amplificación EDFA se aborda teniendo en cuenta la sección 3.1.4, referente a analizar comparativamente el desempeño de los escenarios mediante la determinación de la máxima distancia alcanzada por un segmento de red, concatenación de segmentos de red y el análisis de los efectos tanto lineales como no lineales.

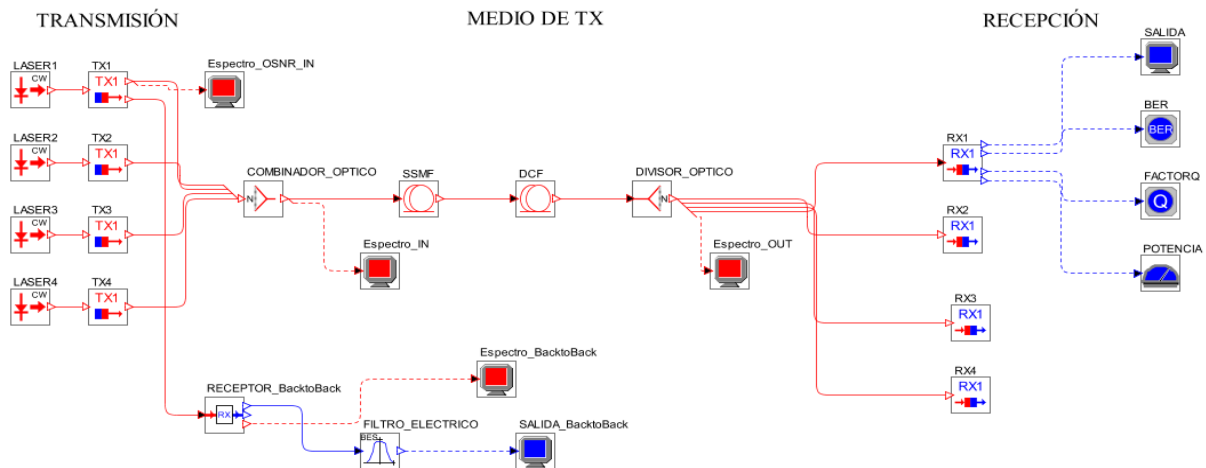


Figura 4.33 Caso 2: Inyección Raman sin amplificación EDFA.

A) Distancia máxima alcanzable por un segmento de red

Para este análisis, se determina la distancia máxima alcanzada por un tramo de fibra óptica, en conjunto con una DCF y con inyección Raman. Este estudio, se hace con el fin de analizar en una red DWDM el comportamiento de la amplificación Raman en el desempeño óptico frente a las diferentes degradaciones presentes en la red. En general, una de las



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

principales características en la amplificación Raman es cubrir grandes distancias, debido a esto, se pretende obtener un mayor valor de distancia máxima por un segmento de red manteniendo los parámetros de desempeño definidos; para obtener dicho valor se simula en modo VBS Full.

Con el propósito de conseguir la red con mayor alcance posible, y desde la perspectiva de la eficiencia referida a la fuente de bombeo, se elige la longitud de bombeo apropiada, equivalente a un rango de 90 a 100 nm menos de la longitud de la señal de transmisión y se determina la potencia umbral Raman, que define el nivel de potencia crítico límite antes de que la señal se vea afectada en la forma y desplazamiento temporal debido a efectos de dispersión y SRS. En la Figura 4.34 (Anexo D, Tabla 1), se evidencia que 26 dBm correspondiente a ≈ 398 mW es el máximo valor de potencia de bombeo para cumplir con los parámetros de calidad objetivos.

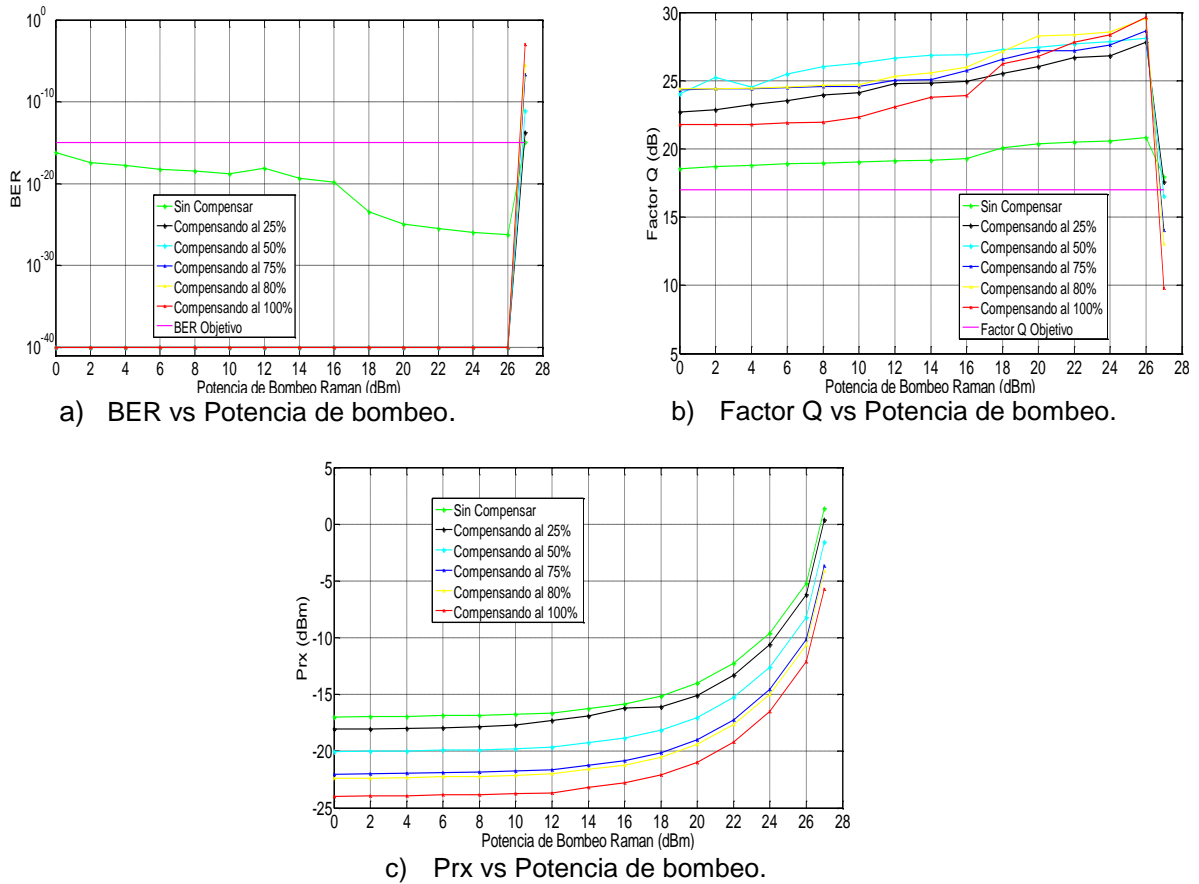


Figura 4.34 Parámetros ópticos ante variaciones en la potencia de bombeo a diferentes porcentajes de compensación.

Como se observa en la Figura 4.34, el nivel de potencia para el que se produce el efecto nocivo de SRS es bastante alto de aproximadamente 27 dBm. Este hecho hace de este fenómeno un efecto no lineal de bajo impacto en la red de estudio en el caso de valores inferiores. Por consiguiente, si el bombeo es el adecuado (valores menores a 27 dBm) todos los distintos canales que puedan transmitirse por la fibra pueden amplificarse sin impedimentos debidos a SRS.



Uno de los requerimientos para la implementación de un amplificador Raman es la necesidad de fuentes de bombeo con altas potencias de salida para la amplificación de las señales. Para el actual caso de estudio el valor umbral es 26 dBm. De acuerdo a las especificaciones de la fuente de bombeo de la caracterización, la potencia de bombeo máxima de su rango de operación es 26.53 dBm, valor muy similar a los 26 dBm encontrados en simulación, esto resulta un uso eficiente de la fuente de bombeo.

Por otra parte, el porcentaje de compensación de la DCF adquiere un papel importante dentro de la potencia de bombeo, debido a que la DCF favorece la eficiencia Raman, por lo tanto, al emplear una DCF al final del span mayor será la eficiencia de bombeo, puesto que la potencia inyectada por la fuente Raman conserva un alto nivel de intensidad; sin embargo, a medida que se incrementa el porcentaje de compensación, la longitud de la DCF aumenta, por consiguiente, las pérdidas presentadas en el enlace óptico son mayores, lo que implica que para porcentajes elevados los parámetros ópticos se degraden más rápido.

La Figura 4.35 muestra la curva de ganancia Raman (On-Off) y la Figura de Ruido (NF) para una fuente de bombeo operando a 1440.82202 nm, la cual genera una ganancia a la señal aproximadamente de 1525 a 1540 nm (196.58 a 194.67 THz), rango de amplificación conveniente para las frecuencias nominales de los cuatro canales implementados (195.2, 195.3, 195.4 y 195.5 THz), valores donde se consigue la mayor ganancia Raman.

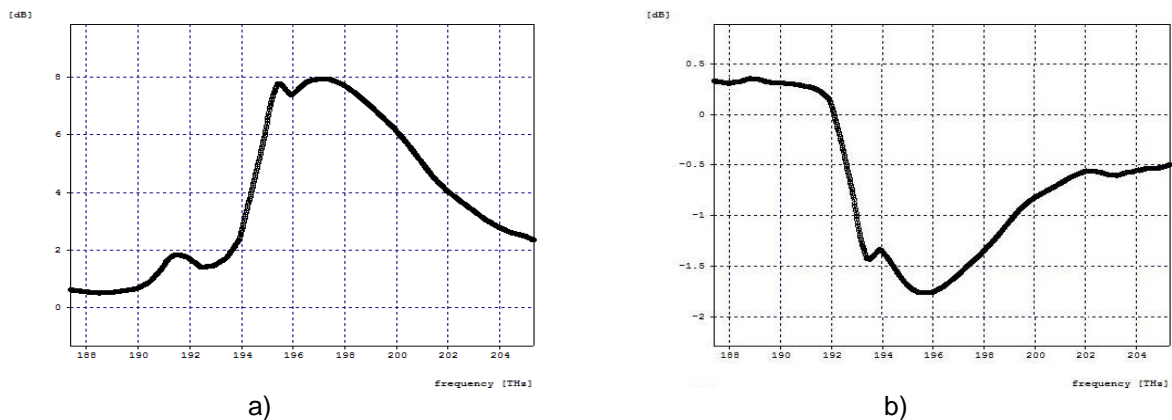


Figura 4.35 Espectro de: a) Ganancia Raman y b) Figura de ruido.

Teniendo en cuenta la fuente de bombeo definida en la caracterización, la típica ganancia Raman para una fibra SSMF es 8.5 dB, y dada la respuesta en la curva de ganancia obtenida de acuerdo al resultado de simulación, se evidencia un comportamiento similar alcanzando un valor de 8 dB. Así mismo, se corrobora que los amplificadores Raman entregan figuras de ruido negativas, valores inalcanzables al emplear amplificadores EDFA. Para el amplificador Raman se obtiene un valor negativo de -1.8 dB.

Con el fin de obtener la máxima distancia alcanzada por un segmento de red, se hace uso de la máxima potencia de bombeo que cumpla con los parámetros requeridos. En Anexo D (Tabla 2), se evidencia que al realizar compensación y adicionalmente agregar inyección Raman con una potencia de bombeo de 26 dBm, se constata una pequeña mejora en el número de kilómetros alcanzada por la red en comparación al caso de amplificación EDFA



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

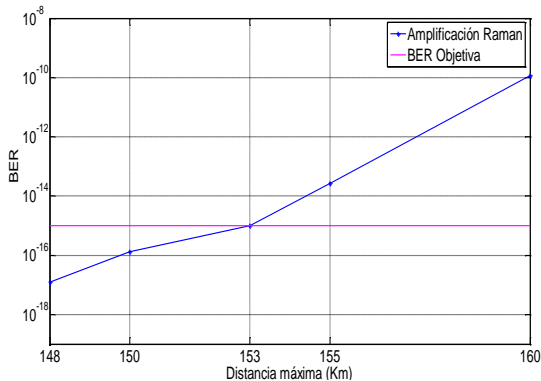
sin inyección Raman; no obstante, en simulación para alcanzar extensas distancias y hacer optima la amplificación Raman se requieren enlaces de pocos kilómetros para evitar pérdidas elevadas en la propagación de la señal.

La Tabla 4.10 (Anexo D, Tabla 3), resume las distancias máximas alcanzadas por un segmento de red cuando se inyecta Raman a la fibra en ausencia de etapas de amplificación EDFA.

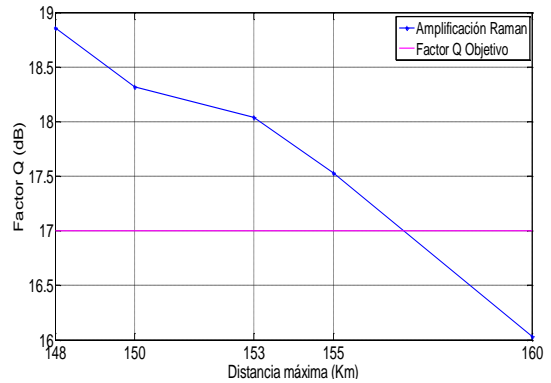
Tabla 4.10 Distancia máxima alcanzada al usar configuración de inyección Raman sin amplificación EDFA en comparación con la del caso general.

Potencia de trabajo (dBm)	Amplificación	Longitud DCF (Km)	Distancia máxima alcanzada (Km)	BER	Factor Q (dB)
5	Ninguna	10.71	100	2,81e-17	18,70
	Raman sin EDFA		153	1,80e-15	18,04

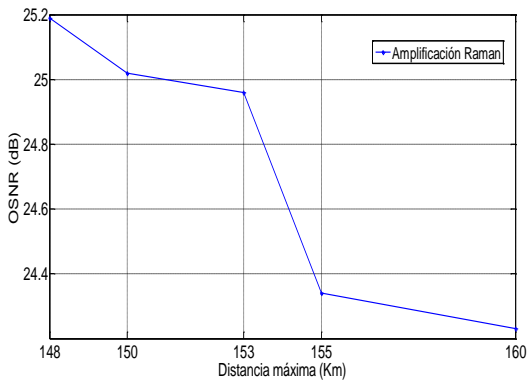
La Figura 4.36 (a), (b), (c) y (d), muestra que con una potencia de transmisión de 5 dBm, con amplificación Raman y 10.71 Km de DCF para compensar al 41 % la CD, se obtiene una distancia de 153 Km, valor maximo para el cual el enlace cumple con los parámetros de desempeño objetivos.



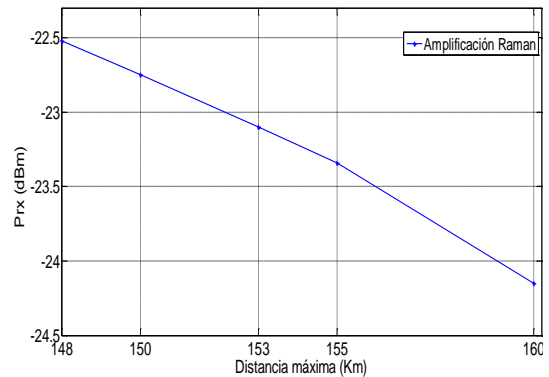
a) BER vs Distancia máxima.



b) Factor Q vs Distancia máxima.



c) OSNR vs Distancia máxima.



d) Prx vs Distancia máxima.

Figura 4.36 Parámetros ópticos al realizar compensación a menos del 50% con amplificación Raman.



Finalmente la distancia máxima alcanzada por un segmento de red al usar DCF con amplificación Raman, potencia de transmisión de 5 dBm y potencia de Bombeo de 26 dBm, alcanza 53 Km de más en comparación con el caso general en ausencia de algún tipo de amplificación.

B) Distancia mínima de 600 Km mediante enlaces concatenados

Con el fin de optimizar la amplificación Raman y crear una ganancia distribuida a lo largo de la fibra óptica sin que la señal se atenué por enlaces de larga distancia, la cual permita alcanzar una distancia mínima de 600 Km, se concatenan segmentos de red de decenas de kilómetros con el objetivo de disminuir específicamente las pérdidas acumuladas en span's de grandes longitudes.

Como primera medida, se parte de segmentos de red con distancias de los 153 Km por span, buscando la máxima longitud de tramo de fibra que permita cumplir con los parámetros de desempeño objetivos. No obstante, la distancia mínima de 600 Km requerida no se alcanzó, debido a la pérdida global del tramo de fibra. La Figura 4.37 muestra el diagrama de ojo al usar span's de 153 Km.

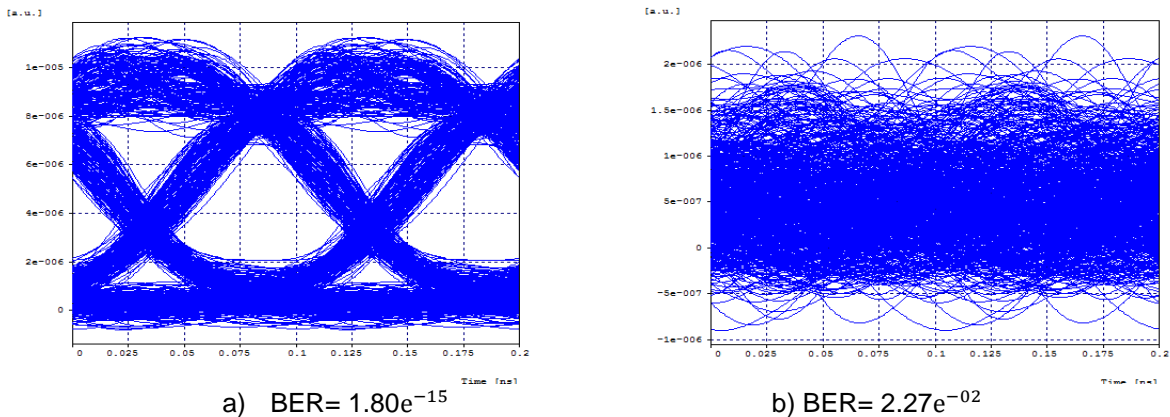


Figura 4.37 Diagrama del ojo para: a) Un span de 153 Km y b) Dos span de 153 Km.

De la Figura 4.37 se observa que concatenar segmentos de red del orden de los 153 Km no resulta adecuado para cumplir con la distancia mínima de 600 Km, debido a que primordialmente las pérdidas introducidas por cada span degradan de manera considerable el desempeño de la red, razón por la cual se requiere disminuir la longitud de cada span a valores cercanos a 70 Km para llegar a la distancia mínima deseada como se muestra en la Tabla 4.11 (Anexo D, Tabla 4).

Tabla 4.11 Parámetros de monitoreo para segmentos de red concatenados con amplificación Raman.

Distancia Total (Km)	Número de span's	Longitud de span (Km)	Amplificación	Factor Q (dB)	BER	OSNRout (dB)	Prx (dBm)
1260	18	70	Raman	18,54	3,02e-17	16,6436	-22,63
153	1	153		18,04	1,80e-15	25,3009	-16,25



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

En la Figura 4.38 (a), (b), (c) y (d) se muestra el efecto de la degradación generada a partir de la concatenación de enlaces con distancias de 70 Km utilizando amplificación Raman, encontrándose que hasta el dieciochoavo span se alcanza una distancia máxima de 1260 Km manteniendo los parámetros objetivos.

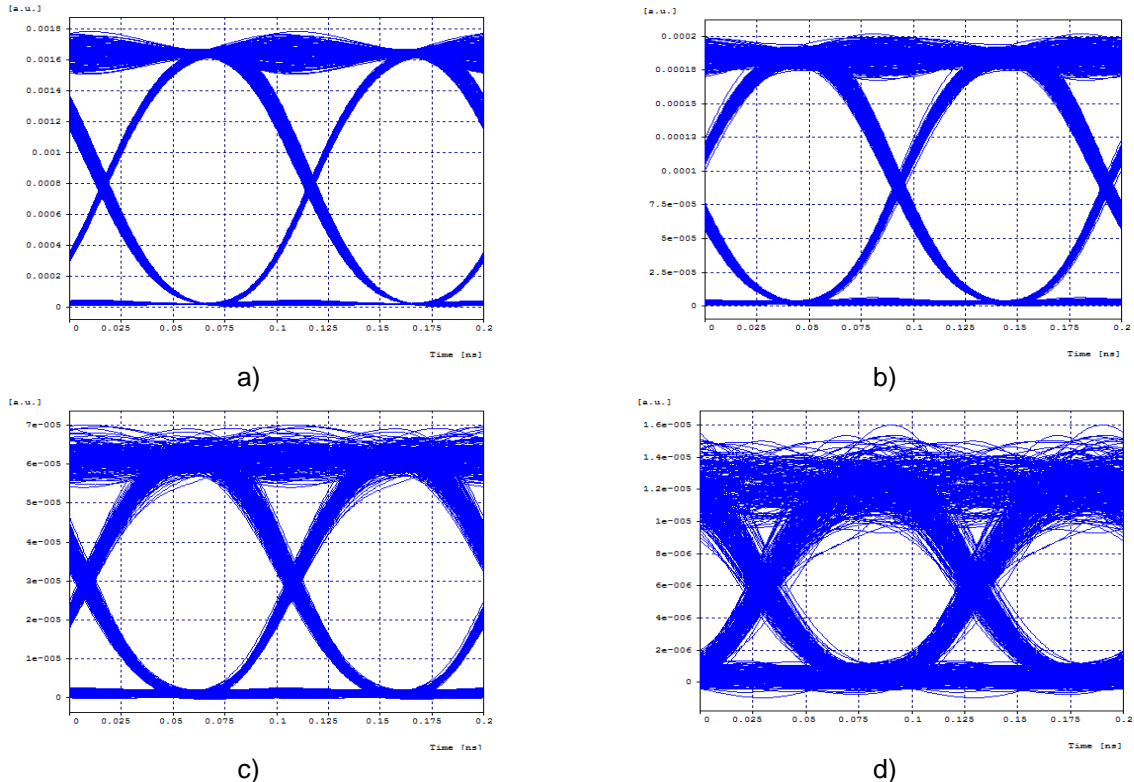


Figura 4.38 Diagrama del ojo para: a) Un span de 70 Km b) Ocho span de 70 Km, c) Doce span de 70 Km y d) Dieciocho span de 70 Km.

La Figura 4.39 (Anexo D, Tabla 4), muestra una mejora considerable en la distancia de propagación alcanzable al emplear amplificación Raman en enlaces concatenados de 70 Km; la principal razón de que la amplificación Raman permita mayores distancias, es la diferencia en la ganancia del amplificador, la cual es prácticamente plana, esto quiere decir que las señales pueden ser amplificadas sin interferencia ni distorsión entre ellas; además, la amplificación Raman se beneficia de un mejor rendimiento global por los bajos niveles de ruido que introduce.

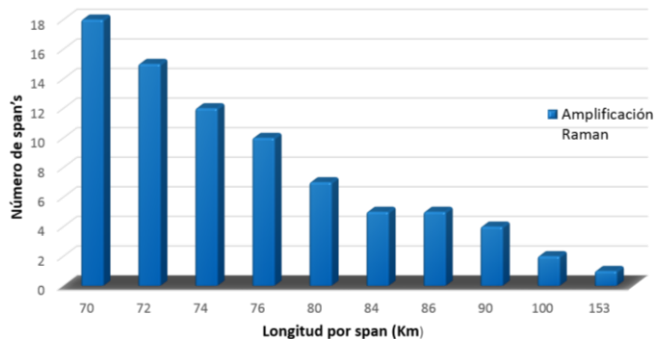


Figura 4.39 Número de span alcanzado con inyección Raman solamente.



4.3.1 Análisis de efectos lineales:

4.3.1.1 Ruido y Pérdidas

Para determinar el efecto de ruido y pérdidas acumuladas durante la propagación de la señal en un span de 153 Km, se analizan los parámetros de monitoreo óptico mediante el incremento de la distancia, debido a que la atenuación es un parámetro que se ve afectado directamente por el aumento del enlace.

Para verificar la degradación debido al ruido y pérdidas en la red, así como analizar el impacto de emplear una DCF en conjunto con amplificación Raman, se mantiene constante el coeficiente de atenuación de la fibra SSMF-28 Corning (0.235 dB/Km), y se realiza variaciones tanto en el coeficiente de atenuación de la DCF, los cuales oscilan entre valores comerciales y no comerciales (Tabla 4.12), como también en la distancia del enlace, para generar un rango de atenuación de pérdidas globales máximo para el cual la red siga cumpliendo los parámetros de desempeño objetivos y así determinar la dependencia de la distancia respecto a variaciones en el coeficiente de atenuación de la DCF (Anexo D, Tabla 5).

La Tabla 4.12 muestra los valores del coeficiente de atenuación de la DCF para la prueba.

Tabla 4.12 Variación del coeficiente de atenuación de la DCF.

Atenuación (dB/Km)	0,1	0,235	0,35	0,55	1,4	2,7	3,5
--------------------	-----	-------	------	------	-----	-----	-----

La Figura 4.40 (a) y (b) muestra los siete valores del coeficiente de atenuación de la DCF definidos para el análisis de la atenuación, con su correspondiente variación respecto a los parámetros ópticos y distancia máxima alcanzada.

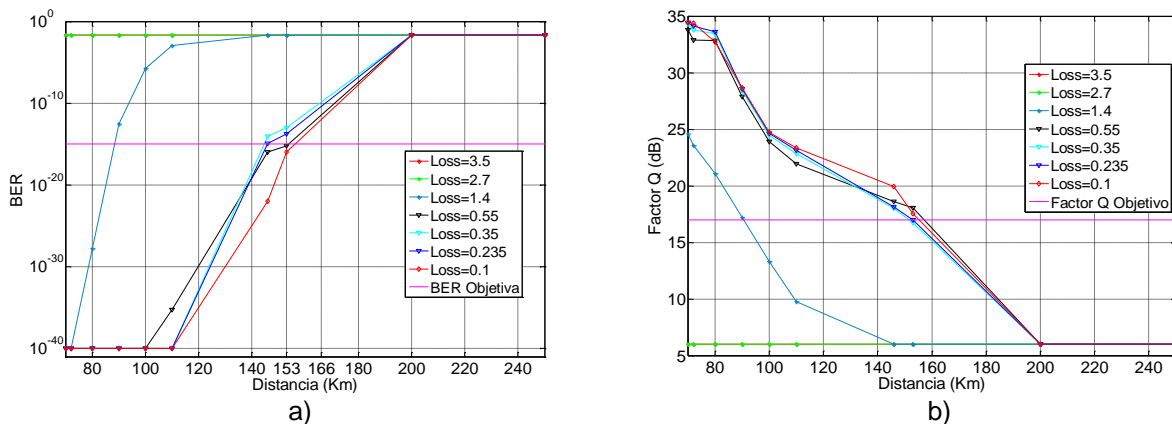


Figura 4.40 a) BER vs Distancia y b) Factor Q vs Distancia para diferentes coeficientes de atenuación de la DCF.

La Figura 4.40 (a) y (b), muestra el comportamiento de la red al variar el coeficiente de atenuación de la DCF en los valores mencionados. Al realizar dichas variaciones se observa el efecto de las pérdidas en la red, donde la mayor degradación se origina en valores altos de atenuación, es el caso de 3.5 dB/Km que ocasionan unas pérdidas de 37.48 dB para 10.71 Km de longitud de DCF, valor de atenuación para el cual la red se deteriora en gran



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

medida; no obstante, para que se produzca una degradación significativa son necesarios coeficientes de atenuación mayores o iguales a 1.4 dB/Km que hacen que la señal propagada pierda mayor potencia con la distancia recorrida. De acuerdo a los resultados obtenidos, se recomienda nuevamente al igual que en el caso de estudio 1 un rango de 0.1 a 0.55 dB/Km para evitar señales atenuadas y enmascaradas de ruido, pero sí conviene resaltar que una red basada en Raman sin etapas de amplificación EDFA, pese a que el ruido derivado de su amplificación es mínimo, las pérdidas que surgen en el enlace se hacen difícil de contrarrestar solamente con la potencia de bombeo.

La Figura 4.41 muestra el efecto de las pérdidas y ruido introducido por los elementos de la red para un tramo de fibra de 70 y 153 Km respecto a los parámetros de desempeño óptico definidos ($BER=10^{-15}$, $Q=17$ dB).

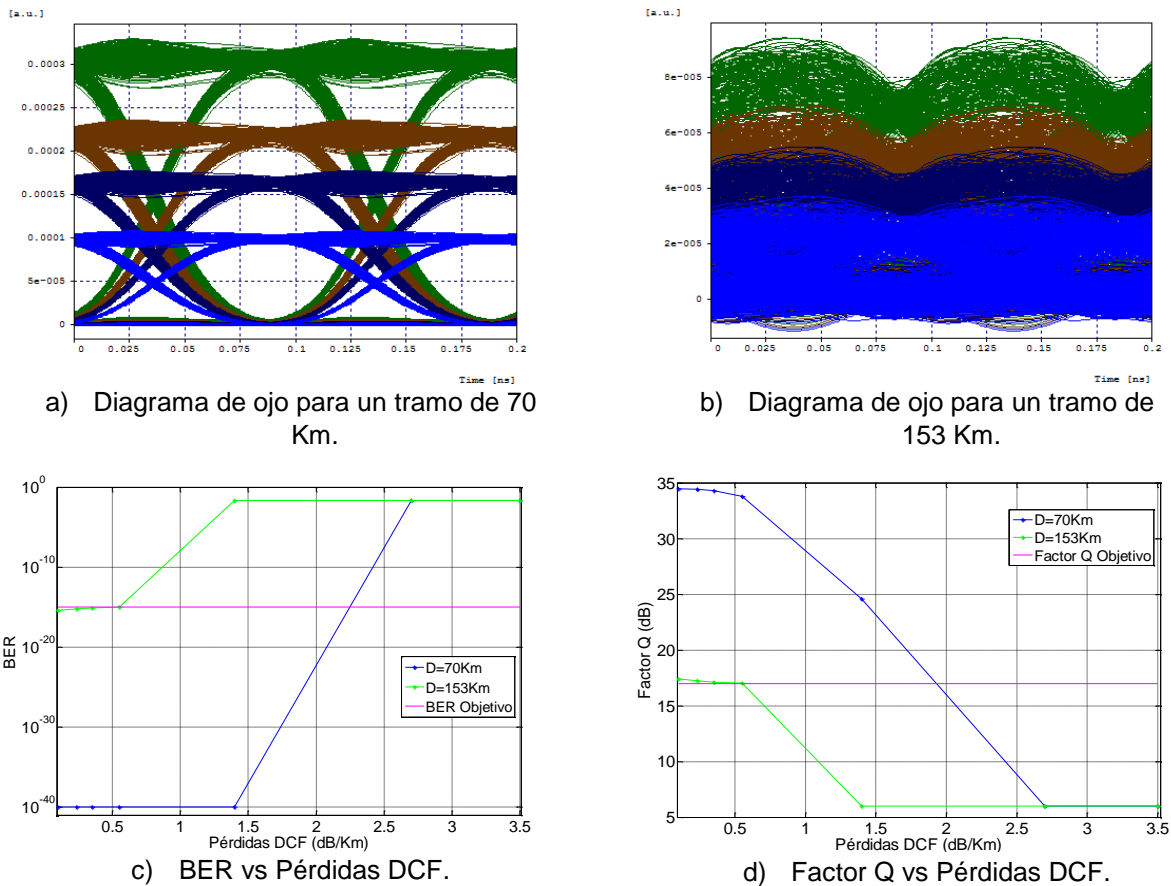


Figura 4.41 Desempeño del enlace ante variaciones del coeficiente de atenuación de la DCF.

Como se puede observar en la Figura 4.41 (a), (b), (c) y (d), la pérdida de potencia de luz que experimenta la señal debido a la atenuación de la DCF, afecta en mayor medida a distancias del orden de los cientos de kilómetros, resultando evidente la atenuación excesiva de sus señales, mientras que para distancias menos extensas (70 Km), el efecto de las pérdidas y ruido no aporta una degradación significativa al desempeño de la red. Por lo tanto, solo para entornos de larga distancia la penalización por ruido y pérdidas se hace realmente significativa. La razón principal, se debe a que la señal en trayectos considerables requiere ser amplificada periódicamente para mantener los niveles de



potencia óptimos en recepción y ser recuperada correctamente, sin embargo, en la amplificación Raman la potencia de bombeo no permanece constante a lo largo de la fibra lo que imposibilita obtener el nivel de amplitud necesario para que la señal sea detectada.

4.3.1.2 Dispersión cromática (CD)

Para determinar el efecto de la dispersión cromática, se parte de la máxima distancia alcanzada por la red en presencia de todas las degradaciones ópticas, que corresponde a 153 Km. Para verificar este efecto lineal, se definen los siguientes análisis: En primer lugar, se determina el desempeño sin CD y únicamente con CD, segundo, se calcula la CD acumulada en la red, y tercero, se evalúa el coeficiente de dispersión de la DCF para determinar su impacto en el desempeño del enlace.

Determinar el desempeño de la red en presencia CD y ausencia de CD.

Con la finalidad de verificar el impacto de la dispersión cromática, se analiza el comportamiento de la red sin CD y solo con CD. La Figura 4.42 (a), (b) y (c), muestra los diagramas de ojo en presencia de todas las degradaciones, ausencia de CD y presencia solo de CD respectivamente.

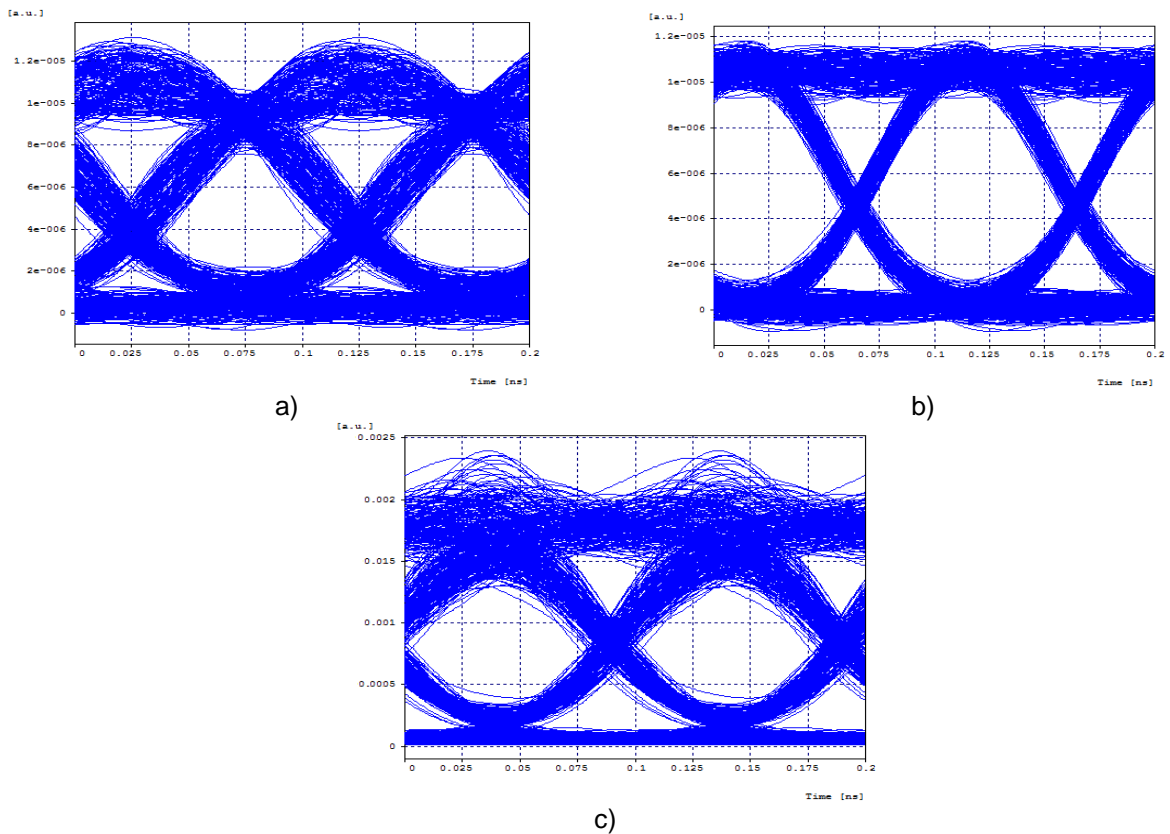


Figura 4.42 Diagrama de ojo para un tramo de 153 Km: a) En presencia de todas las degradaciones, b) Sin CD y c) Solo con CD.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

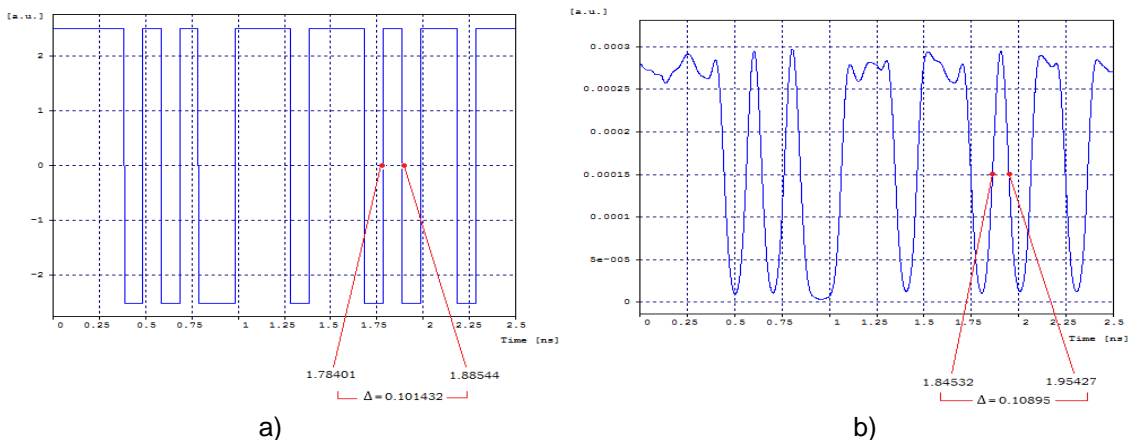
En la Figura 4.42 (a), (b) y (c), se muestra la degradación generada en el diagrama del ojo tras propagarse la señal dentro de la fibra con todas las degradaciones, sin CD y solo con CD. A partir del resultado de simulación se observa que el desempeño de la red se encuentra altamente afectado por la presencia de dispersión cromática; no obstante, aunque la red de estudio basada en amplificación Raman sin etapas de amplificación EDFA no es tolerable a efectos de CD; se corrobora la dependencia de CD con el efecto SRS, resultando que la penalidad de SRS puede intensificarse en varios ordenes de magnitud si se elimina en totalidad la dispersión cromática. De esta manera se recomienda un valor de coeficiente de dispersión diferente de cero y por debajo del valor típico de una fibra SSMF-28, con el fin de evitar la manifestación de pérdidas extras o transferencia de potencia en alguno de los canales debido al efecto SRS.

La Tabla 4.13 resume los parámetros de monitoreo óptico para la red en presencia de todas las degradaciones ópticas, ausencia de CD y presencia solamente de CD.

Tabla 4.13 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de CD en la red.

Simulación	Factor Q (dB)	BER
En presencia de todas las degradaciones	18,04	1,80e-15
Sin CD	22,26	7,30e-37
Solo con CD	14,56	5,59e-08

La Figura 4.43 muestra el efecto de la dispersión cromática reflejado en la señal eléctrica detectada por el receptor en ausencia de CD y solo con CD, en comparación a la señal eléctrica transmitida, donde se evidencia la variación en el tiempo de llegada de los pulsos de la señal, y en consecuencia el ensanchamiento de los mismos. El alargamiento de los pulsos se constata cuando el Δ de un pulso recibido presenta un valor superior al Δ transmitido. Adicionalmente se observa los pulsos en recepción cuando se hace uso de la compensación, permitiendo disminuir el ensanchamiento.



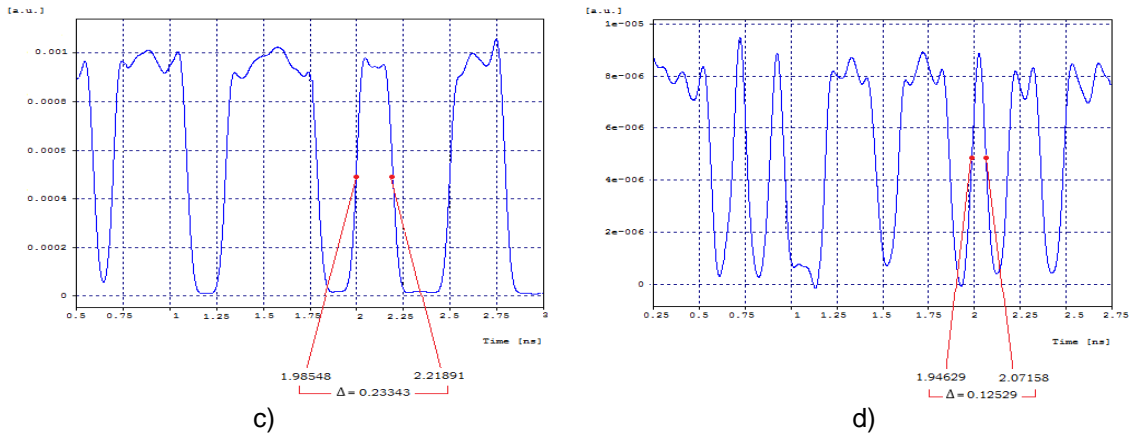


Figura 4.43 Pulso eléctrico de la señal: a) Transmitido, b) Sin CD, c) Solo con CD y d) Después de compensar la CD.

Como se observa en los resultados obtenidos en la Tabla 4.13 y en la Figura 4.43 (a), (b), (c) y (d), la señal se ve altamente afectada por la dispersión cromática, la cual introduce un efecto de alargamiento temporal de los pulsos a lo largo de su propagación; dicho alargamiento puede limitar seriamente el desempeño de la red, debido a que los pulsos pueden interferirse más rápidamente unos con otros generando ISI, la cual afecta la BER en el receptor; para este caso, el pulso se ensancha considerablemente y es más pronunciado cuando la red únicamente se encuentra en presencia de CD, sin embargo, al realizar compensación es posible mejorar la calidad del enlace, evitando que los pulsos lleguen al destino en diferentes tiempos, generando así, cumplir con los parámetros de desempeño objetivos.

Cálculo de la CD acumulada en la red.

El cálculo de la CD acumulada en la red se realiza matemáticamente, como se mostró en la ecuación 4.1, donde se asocia la máxima longitud alcanzada ($L = 153 \text{ Km}$), la pendiente de dispersión para longitudes de onda que trabajan en los 1550 nm ($S_0 = 0.056 \text{ ps/nm}^2 * \text{Km}$), la CD de la fibra SSMF-28 Corning ($17 \text{ ps/nm} * \text{Km}$) y la longitud de onda del canal de transmisión que se asignó para evaluar ($1535.82202 \text{ nm} = 195.2 \text{ THz}$) así:

$$D_{link}(\lambda) = 153\text{Km} \left[\frac{17\text{ps}}{\text{nm} * \text{Km}} + \frac{0,056\text{ps}}{\text{nm}^2 * \text{Km}} * (1535.82202\text{nm} - 1550\text{nm}) \right] = 2479,52 \frac{\text{ps}}{\text{nm}}$$

Para lograr disminuir la CD acumulada en la red se emplea como técnica de compensación una DCF, debido a que ésta con su alta dispersión negativa permite compensar la dispersión positiva de la SSMF, el siguiente resultado muestra como la dispersión acumulada se reduce cuando se agrega una longitud de DCF de 10.71 Km.

$$D_{link}(\lambda) = 2479,52 \frac{\text{ps}}{\text{nm}} - \left(100 \frac{\text{ps}}{\text{nm} * \text{Km}} * 10,71\text{Km} \right) = 1408,52 \frac{\text{ps}}{\text{nm}}$$

Adicionar longitudes de DCF más extensas reduce en mayor proporción la dispersión acumulada en la red, sin embargo, se establece una compensación menor al 50 % (10.71 Km), debido a que operadores comerciales, por razones de costos no realizan la compensación a altos porcentajes.



Evaluar como diferentes coeficientes de dispersión de la DCF impactan el desempeño de la red, principalmente en el parámetro de distancia.

La Tabla 4.14 muestra los nueve coeficientes de dispersión de la DCF definidos para realizar el análisis de la CD en una distancia máxima de 153 Km, algunos valores comerciales y otros no, con el fin de observar en detalle el impacto de una de las propiedades más relevantes de la DCF.

Tabla 4.14 Variación del coeficiente de dispersión de la DCF.

Dispersión (ps/nm*Km)	-17	-50	-80	-95	-100	-120	-170	-250	-300
-----------------------	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------

Con el propósito de observar si la disminución del coeficiente de dispersión de la DCF permite alcanzar mayores distancias, se realizan dos pruebas: La primera, consiste en la variación de los coeficientes de dispersión para cuatro longitudes de DCF fijas (10.71, 13.005, 19.50 y 26.01 Km) que corresponden al 41.17, 50, 75 y 100 % de compensación respectivamente; la segunda, consiste en variar la longitud de la DCF de acuerdo al porcentaje de compensación deseado, con el fin de encontrar el valor de coeficiente de dispersión de la DCF mínimo que la red necesita para cumplir con el BER y Factor Q definido, así como también, el coeficiente de dispersión máximo hasta el cual es recomendable utilizar en la red.

La Figura 4.44 (Anexo D, Tabla 6), muestra la primera prueba de cómo diferentes coeficientes de dispersión impactan los parámetros ópticos.

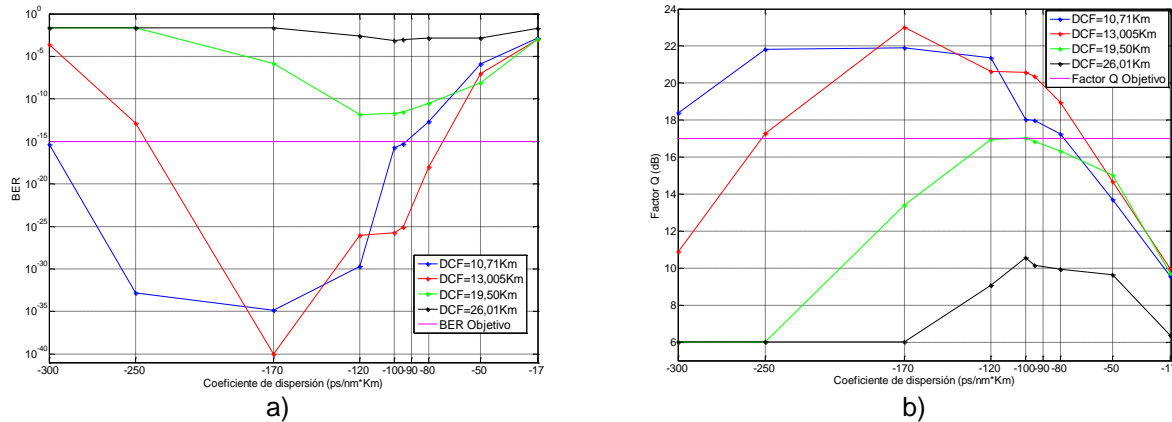


Figura 4.44 Comportamiento de la red ante la variación de diferentes valores del coeficiente de dispersión de la DCF.

Los resultados de la Figura 4.44 indican que para valores de coeficientes de dispersión altamente negativos la longitud de la DCF debe disminuir a valores inferiores de los 11 Km para mantener los parámetros de desempeño definidos, pero si por el contrario se necesita mayor compensación, es decir, longitudes de DCF más extensas, es adecuado no compensar la CD a porcentajes mayores al 50%, porque las perdidas presentadas en el enlace óptico no pueden ser compensadas únicamente con la potencia de bombeo. Es importante señalar que para una longitud de DCF igual a 10.71 Km, el rango aceptable para cumplir con los parámetros objetivos comprende un intervalo que oscila entre -95 y -300 ps/nm*Km. La mejor configuración se obtiene para un coeficiente de dispersión de -170 ps/nm*Km donde se presenta el mejor desempeño.



La Figura 4.45 (Anexo D, Tabla 7), muestra la segunda prueba de como diferentes porcentajes de compensación reflejado en diferentes longitudes de DCF impactan los parámetros ópticos.

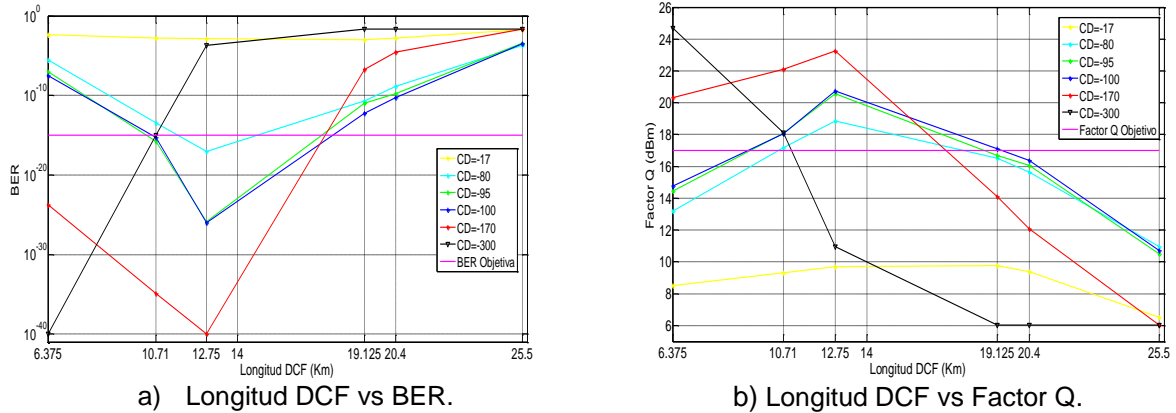


Figura 4.45 Comportamiento de la red ante la variación de diferentes longitudes de la DCF con diferentes coeficientes de dispersión.

Mediante el análisis de los resultados obtenidos en la Figura 4.45, se evidencia una mejora en el BER y Factor Q a medida que se disminuye la longitud de la DCF, sin embargo, solo para valores de coeficientes desde -95 hasta -170 ps/nm*Km, para una longitud de 10.71 y 12.75 Km, es posible cumplir con los parámetros de desempeño objetivos, lo cual indica que para favorecerse de la DCF en la amplificación Raman es necesario longitudes de DCF determinadas a partir de porcentajes de compensación menores al 50 % para la red de estudio.

Particularmente para una longitud de DCF de 10.71 Km, se observa que el incremento del coeficiente de dispersión debe hacerse a partir de -95 ps/nm*Km para cumplir con los parámetros de calidad objetivos, lo cual significa, que un valor menor en el coeficiente de dispersión no es suficiente para compensar la dispersión en la red, de igual manera, para emplear valores menores de coeficiente de dispersión se requieren longitudes de DCF superiores, pero a su vez, se evita compensar a elevados porcentajes para eludir efectos de pérdidas que impidan cumplir con el umbral mínimo definido respecto a los parámetros de desempeño requeridos.

De acuerdo a las dos pruebas realizadas para evaluar como diferentes coeficientes de dispersión de la DCF impactan en el desempeño de la amplificación Raman, se concluye que un aumento en el porcentaje de compensación no controlado impacta negativamente el desempeño de la red, y solo para longitudes de DCF determinadas como consecuencia de realizar compensación entre 40 y 50 % en un rango de -95 hasta -170 ps/nm*Km, se cumple con el BER y Factor Q objetivo.

4.3.1.3 Dispersión por modo de polarización (PMD)

Para determinar el impacto de la PMD en una distancia máxima de 153 Km, se varía el parámetro PMD dentro del entorno de simulación hasta conseguir un valor límite que cumpla los parámetros de calidad definidos. Para verificar este efecto lineal se analiza el



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

desempeño de la red en presencia de todas las degradaciones, sin PMD y únicamente con PMD. Con el fin de visualizar y evidenciar de una mejor manera los dos últimos análisis no se tiene en cuenta las atenuaciones ni el ruido introducido por dispositivos de amplificación.

La Figura 4.46 muestra el diagrama de ojo con todas las degradaciones, sin PMD, y únicamente con PMD respectivamente.

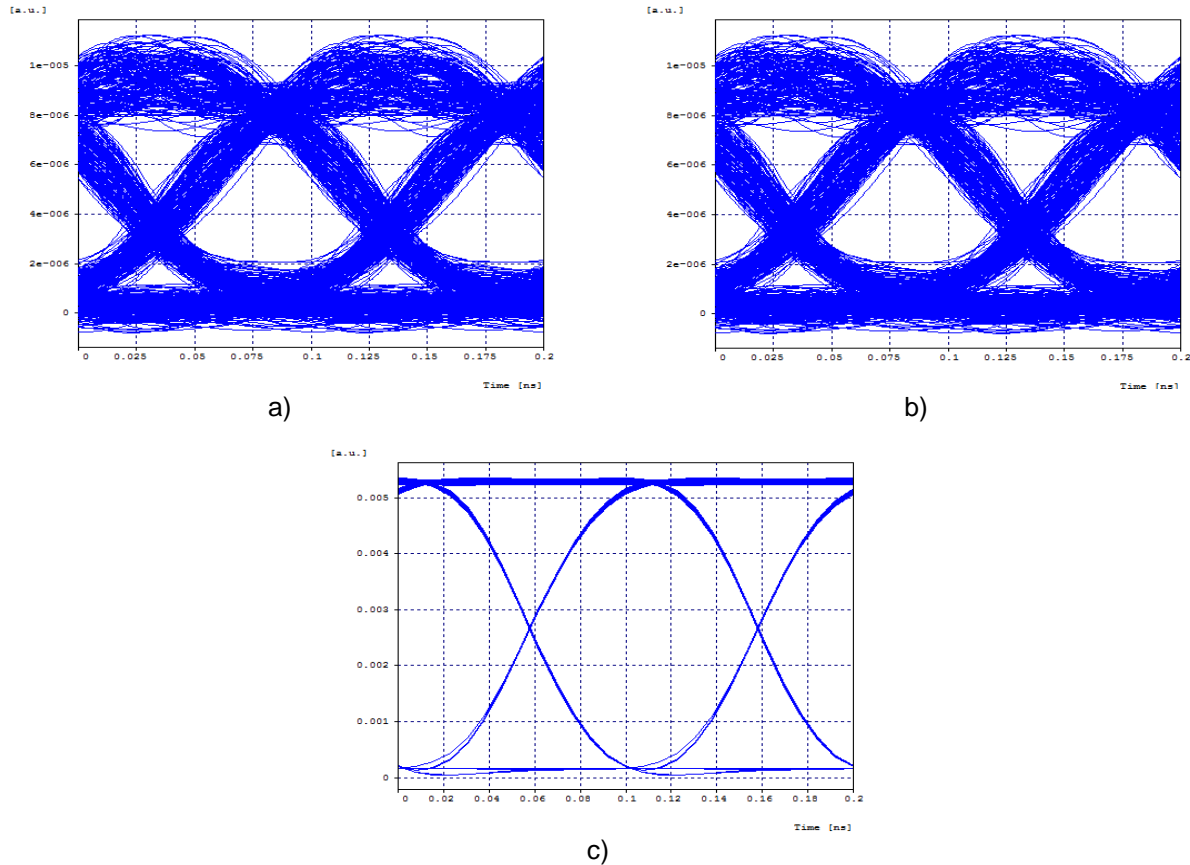


Figura 4.46 Diagrama de ojo para un tramo de 153 Km: a) En presencia de todas las degradaciones, b) Sin PMD y c) Solo con PMD.

La Tabla 4.15 resume los parámetros de monitoreo óptico para la red en presencia de todas las degradaciones, ausencia de PMD y presencia solamente de PMD.

Tabla 4.15 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de PMD en la red.

Simulación	Factor Q (dB)	BER	OSNRout (dB)	Prx (dBm)
En presencia de todas las degradaciones	18,04	1,80e-15	24,96	-23,58
Sin PMD	18,04	1,80e-15	24,96	-23,58
Solo con PMD	34,20	1,00e-40	27,32	-1,92

De acuerdo a la Figura 4.46 (a) y (b), se observa que el efecto de la PMD no genera un gran impacto en el desempeño de la red. Sin embargo, es importante mencionar, que en la amplificación Raman, la PMD puede conducir tanto a interferencia entre símbolos como a la inducción de grandes fluctuaciones en la señal al usar altos coeficientes; con un mayor



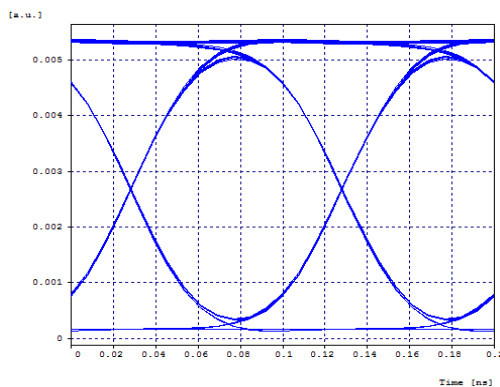
coeficiente de PMD, la variación aleatoria de la birrefringencia¹² de la fibra, hace que el bombeo y la señal, roten sus estados de polarización a diferentes velocidades y provoquen desfase adicional, causante de retardos y distorsión en la señal. Una fibra con alta PMD, limita la capacidad de transmisión especialmente en aquellas redes que empleen amplificación Raman.

Los parámetros de fibra como PMD, dependen fuertemente de las condiciones del proceso de fabricación; en fibras que se usan para telecomunicaciones, la birrefringencia es relativamente pequeña y por tanto poco influyente en la degradación de los parámetros de calidad objetivos, dicha afirmación se comprueba en la Tabla 4.15, donde se muestra que los valores de BER, Factor Q y OSNR, en presencia de todas las degradaciones y en ausencia de PMD son exactamente iguales. Teniendo en cuenta lo anterior y con el fin de visualizar el efecto de la PMD, se generan valores de PMD superiores al tradicional para establecer la máxima tolerancia del sistema frente a dicho efecto lineal. La Tabla 4.16 muestra el comportamiento de la red ante estas variaciones.

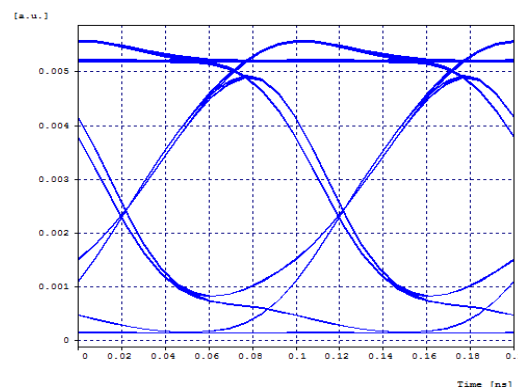
Tabla 4.16 Parámetros de monitoreo para diferentes valores de PMD.

Valor de PMD (ps/\sqrt{Km})	Factor Q (dB)	BER
0.8	31,97	1.00e-40
1	19,99	9,64e-23
1.2	18,10	6,17e-16
1.5	17,87	7,67e-15

De la Figura 4.47 (a), (b), (c) y (d), la cual muestra el diagrama de ojo para diferentes valores de PMD, se observa que a medida que aumenta el coeficiente de PMD el diagrama de ojo presenta mayores ladeaciones que degradan significativamente el desempeño de la red, lo que indica que la PMD tiene efecto sobre el enlace óptico, especialmente para valores ocho veces más grande al valor típico de PMD para una fibra SSMF-28 Corning ($0,1 ps/\sqrt{Km}$).



a) PMD = 0.8ps/ \sqrt{Km} .

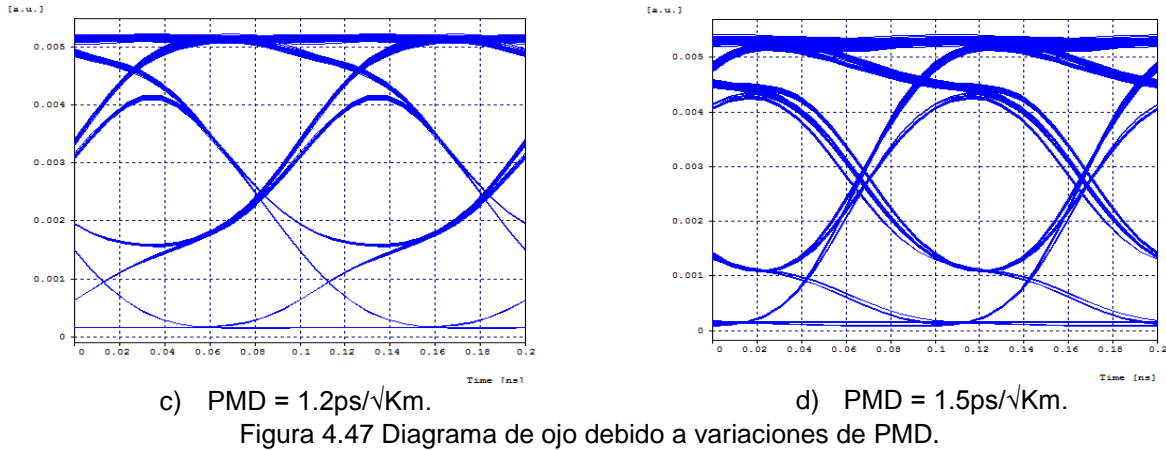


b) PMD = 1ps/ \sqrt{Km} .

¹² Birrefringencias, imperfecciones en el proceso de fabricación.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

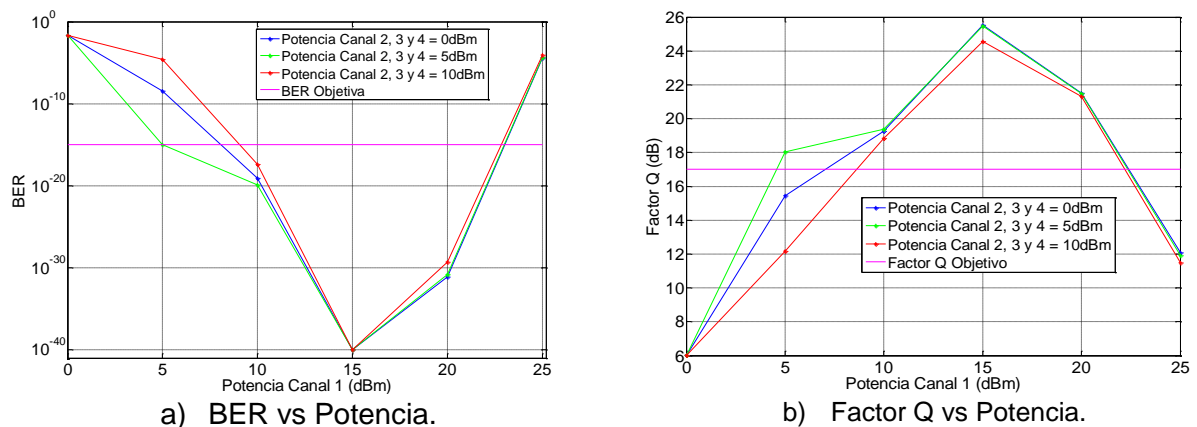


Mediante el análisis de los resultados obtenidos en la Figura 4.47, se determina que la máxima tolerancia al efecto de la PMD soportada por el caso de simulación 2, se encuentra alrededor de $1.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$, valor para el cual el enlace en condiciones únicamente de evaluación de PMD cumple los parámetros de desempeño objetivos; a partir de valores superiores, la red se ve altamente afectada por inclinaciones y alineaciones que generan errores en recepción. Finalmente, se concluye que la red es altamente tolerante al efecto de la PMD, debido a que el tipo de fibra utilizado en la red de estudio cuenta con un valor de PMD muy bajo ($0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$). Sin embargo, en comparación con el comportamiento del caso de estudio 1, la PMD en amplificación Raman es un efecto de dispersión óptica que limita en mayor proporción la capacidad de la fibra, resultando menos tolerante a la degradación de PMD.

4.3.2 Análisis de efectos no lineales:

4.3.2.1 Automodulación de fase (SPM)

Para determinar el efecto SPM, se evalúa el comportamiento de un canal variando la potencia del mismo en un rango de 0 a 25 dBm y fijando la potencia de los otros canales en valores determinados para evitar la presencia de efectos no lineales como XPM y FWM sobre el canal evaluado. La Figura 4.48 (Anexo D, Tabla 8), muestra las variaciones sobre el canal medido (195.2 THz).



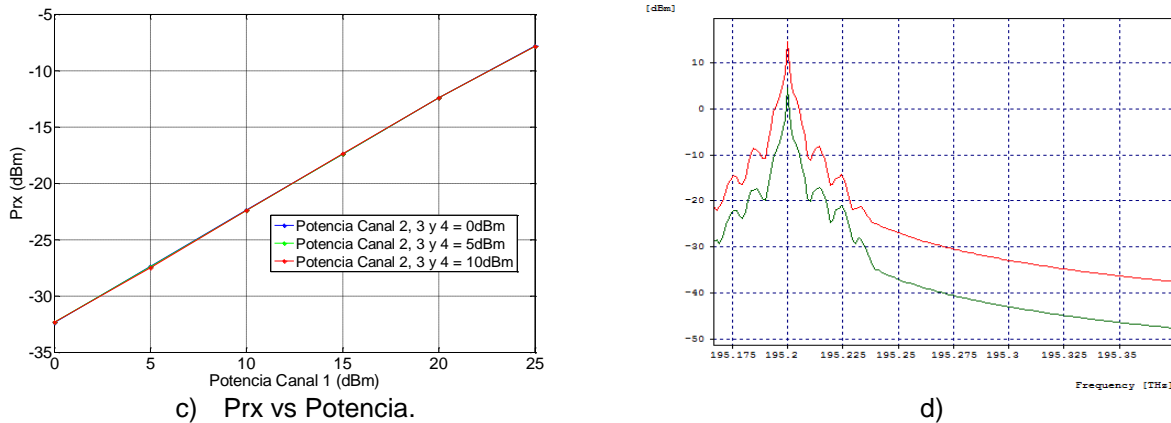


Figura 4.48 Desempeño del enlace en el canal 1: a), b) y c) Frente a las variaciones de las potencias de transmisión de los canales 2, 3 y 4 y d) Espectro óptico en recepción para valores de potencia de transmisión de 5 dBm (verde) y 15 dBm (rojo).

La Figura 4.48 (a), (b) y (c), presenta el comportamiento entre la variación de la potencia de transmisión del canal 1 y los parámetros de monitoreo óptico (BER, Factor Q y Potencia en recepción), respecto a la potencia de los demás canales; se hace evidente que a medida que aumenta la potencia de dicho canal, el desempeño empieza a mejorar hasta una potencia de transmisión de 15 dBm, luego empieza a decrecer evidenciando el ensanchamiento espectral, ocasionado por SPM tal como se observa en la Figura 4.48 (d).

A diferencia del efecto generado por la automodulación de fase en el caso 1, el ancho espectral inducido por SPM cuando se emplea amplificación Raman presenta una menor eficiencia en la utilización del espectro, resultado de un mayor ensanchamiento en el dominio de la frecuencia. El efecto de SPM es crítico y afecta considerablemente la evolución de los pulsos del bombeo y la señal para valores superiores a 20 dBm.

4.3.2.2 Modulación de fase cruzada (XPM)

Para determinar el efecto XPM, se realizan dos análisis, en primer lugar, se varía la potencia de los canales 2 y 3, mientras la potencia de los canales adyacentes permanece fija. El canal 2 y 3 actúan como canales de bombeo con el fin de verificar si sus potencias afectan las fases del canal 1 y 4, generando ensanchamiento en el espectro óptico; un segundo análisis, debido a que efectos no lineales como XPM dependen de la dispersión cromática, se varía la CD dentro de la fibra para verificar su dependencia con XPM.

La Figura 4.49 (Anexo D, Tabla 9), muestra la respuesta del canal 1 y 4 ante los efectos de propagación de diferentes potencias del canal 2 y 3 respecto a los parámetros de medida BER y Factor Q.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

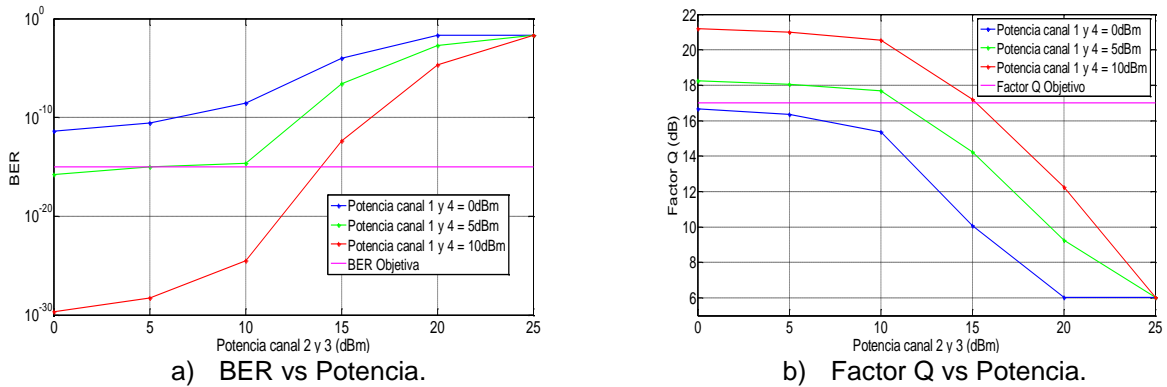


Figura 4.49 Comportamiento del canal 1 y 4, ante la variación de la potencia de transmisión de los canales 2 y 3.

De acuerdo a la Figura 4.49, se observa que para potencias de transmisión en los canales adyacentes superiores a 10 dBm, los parámetros ópticos de medida se empiezan a degradar por debajo de los niveles mínimos, esto debido al ensanchamiento que sufre la señal debido a XPM, volviéndose crítico a partir de 20 dBm. La Figura 4.50 muestra el efecto de XPM en el canal 1 mediante el análisis del espectro óptico de la señal de salida para tres niveles de potencia diferentes, donde se evidencia el mayor alargamiento en el espectro a medida que las potencias de los canales adyacentes aumentan.

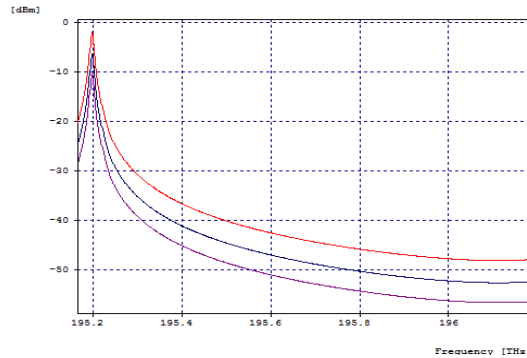


Figura 4.50 Espectro óptico a la salida del canal 1, para valores de potencia de transmisión de 0 dBm (Morado), 5 dBm (Azul) y 15 dBm (Rojo).

En la Figura 4.51, se muestra el espectro óptico de salida de la red dependiente del efecto de XPM, el cual presenta un leve alargamiento comparado con el espectro óptico de entrada.

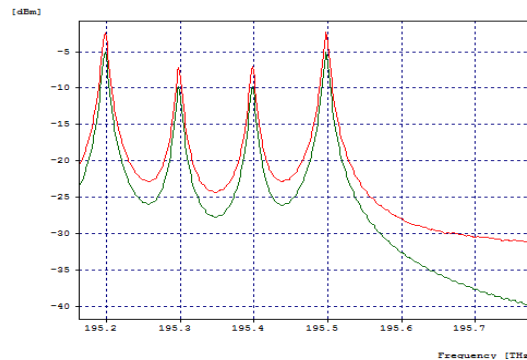


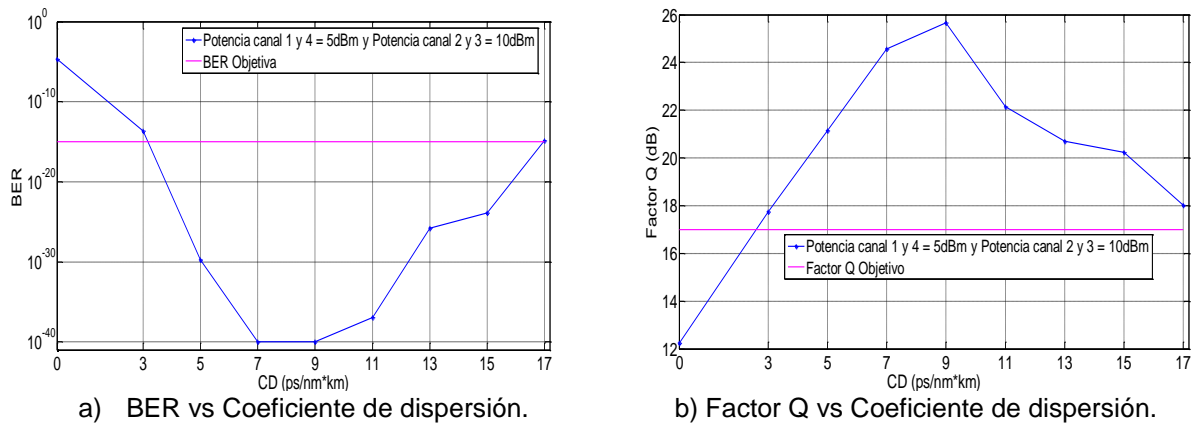
Figura 4.51 Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de salida (rojo) debido a XPM.



Mediante el análisis de los resultados obtenidos desde la Figura 4.49 hasta la Figura 4.51, XPM viene a ser un problema en el desempeño de la red cuando la diferencia de las potencias de entrada de los canales próximos es significativa, dado que el aumento de sus niveles de potencias generan ensanchamiento sobre el espectro óptico lo que impide al enlace cumplir con los parámetros de calidad definidos. Por lo tanto la cantidad de ensanchamiento espectral introducido por XPM, bajo las características iniciales de operación de la red de estudio, no resulta mayormente perjudicial en el desempeño para valores de potencia de transmisión adyacentes menores a 15 dBm. Sin embargo, el cambio de fase inducido por XPM se hace realmente significativo dentro de los parámetros de medida óptico cuando se presenta agotamiento en la potencia de bombeo a lo largo de la fibra, debido a que el pulso de la señal decrece más rápido y con menor energía, resultando en un desplazamiento de fase no lineal de los pulsos de la señal y el bombeo, que a su vez modifican desfavorablemente la forma espectral de las señales ópticas.

En la segunda prueba, se busca determinar el efecto de XPM mediante la variación de la dispersión cromática de la fibra SSMF-28 Corning; para esta prueba se define un rango de variación de CD de 0 ps/nm*Km a 17 ps/nm*Km con la finalidad de evaluar la dependencia de XPM con distintos coeficientes de dispersión cromática.

En la Figura 4.52 (Anexo D, Tabla 10), se muestra el comportamiento del enlace ante la variación del coeficiente de dispersión de la fibra SSMF Corning para una potencia de transmisión fija en los canales adyacentes 1 y 4 de 5 dBm y una potencia en los canales 2 y 3 de 10 dBm, para causar efectos de ensanchamiento mediante la propagación de múltiples potencias a diferentes valores de coeficiente de dispersión.



a) BER vs Coeficiente de dispersión. b) Factor Q vs Coeficiente de dispersión.
Figura 4.52 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto XPM mediante la variación del coeficiente de dispersión cromática.

De la Figura 4.52, se observa que para reducir los efectos de XPM se requiere aumentar la dispersión cromática. Sin embargo, es recomendable que el coeficiente de dispersión este por debajo de 18 ps/nm*Km, con el fin de evitar las degradaciones producidas producto de la misma dispersión cromática. Además se evidencia que el efecto de XPM es de mayor penalidad cuando la CD es 0 ps/nm*Km y de bajo o nulo impacto cuando la CD es 7 y 9 ps/nm*Km, así, los efectos de XPM pueden ser controlados a través de una apropiada selección en el coeficiente de dispersión de la fibra Raman. De este modo, se concluye que

XPM no es muy crítico en regiones con alta dispersión cromática y que las limitaciones introducidas por XPM pueden ser indudablemente serias en el contexto de la red estudiada cuando las potencias de transmisión de los canales adyacentes se incrementen y además se asigne un valor de CD bajo. A diferencia de lo anterior, y dada la caracterización general de la red, en la que se define 100 GHz de espaciado de canal, una alta dispersión cromática y el impedir el agotamiento de la bomba, es suficiente para reducir los efectos de XPM en aquellas redes que empleen amplificación Raman.

4.3.2.3 Mezcla de cuatro ondas (FWM)

Para determinar el efecto FWM, se realizan dos análisis; en primer lugar, se varía la potencia de los canales 2, 3 y 4 de forma simultánea dentro del rango de 0 a 25 dBm, mientras la potencia del canal 1 permanece fija; un segundo análisis, considera las variaciones de la dispersión cromática dentro de la fibra para verificar su dependencia con el efecto no lineal FWM.

La Figura 4.53 (Anexo D, Tabla 11), muestra la respuesta del canal 1 ante las variaciones de potencia de los canales 2, 3 y 4 respecto a los parámetros de medida BER y Factor Q.

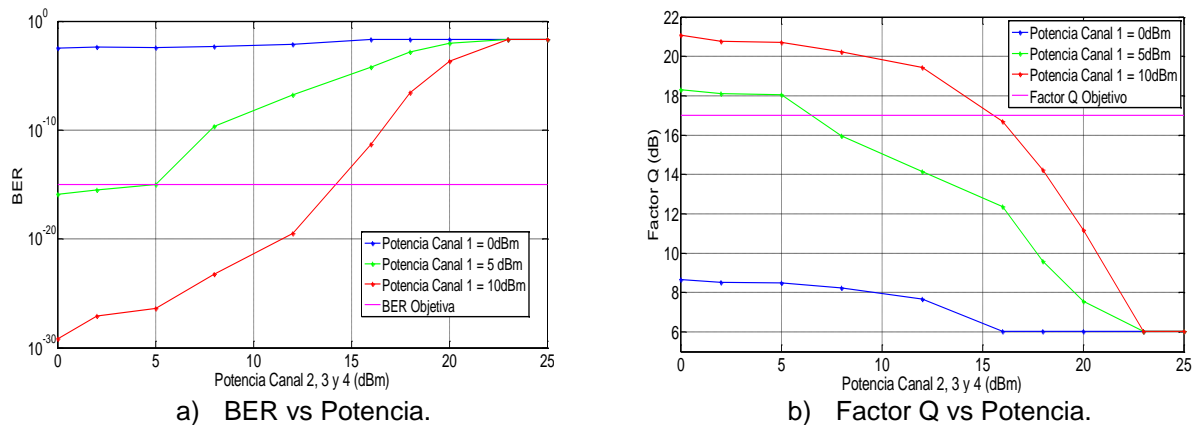


Figura 4.53 Comportamiento del canal 1, ante la variación de la potencia de los canales 2, 3 y 4.

De acuerdo a la Figura 4.53, se observa que a medida que las potencias de transmisión de los canales 2, 3 y 4 se incrementan, el rendimiento del canal evaluado empieza a descender por debajo de los niveles objetivos, a causa de componentes espectrales que coinciden con la transmisión de las frecuencias de los canales implementados. Los productos adicionales generados por FWM resultan críticos para valores superiores de potencia, dado que para dichas potencias las componentes originadas tienen mayor intensidad, resultando en la degradación de la calidad de transmisión para la red DWDM.

En la Figura 4.54, se muestra el espectro óptico de salida de la red dependiente del efecto FWM, para una potencia de transmisión del canal 1 de 5 dBm, el cual presenta la aparición de nuevas componentes de frecuencia indeseadas comparado con el espectro óptico de entrada.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

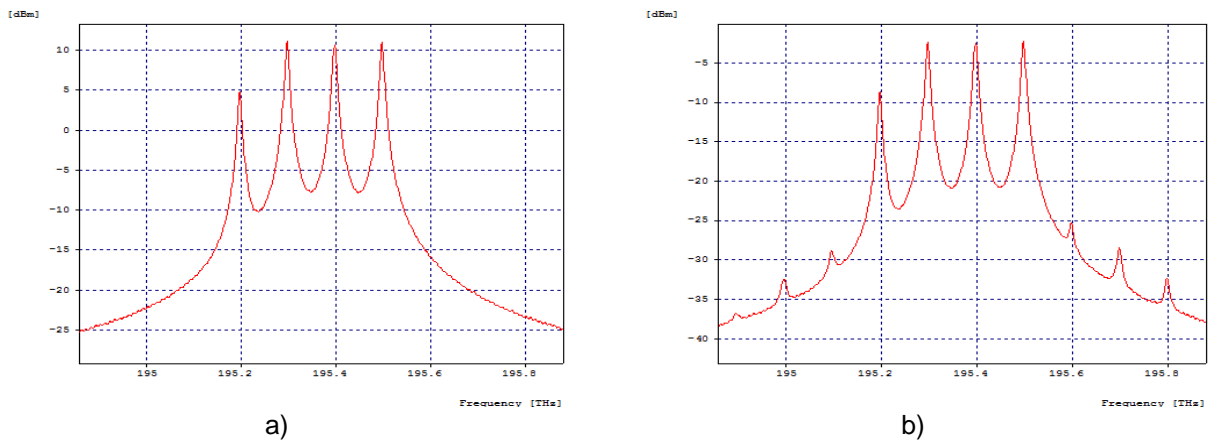


Figura 4.54 Espectro óptico de: (a) Entrada y (b) Salida debido a FWM.

Los resultados de la Figura 4.53 y Figura 4.54, indican que FWM causa nuevos productos de frecuencia en la zona espectral ocupada por las portadoras de los canales implementados, las cuales se convierten en un efecto limitante cuando sus niveles de potencia se incrementan; debido a lo anterior, el receptor los interpreta dependiendo de la intensidad como un nuevo canal, aun así, cuando ese canal es fantasma, ocasionando errores en el circuito de decisión del detector óptico. Sin embargo, para la red en estudio, el efecto FWM se manifiesta moderadamente, debido a que las nuevas frecuencias a la salida del medio de transmisión no han aumentado considerablemente su amplitud a expensas de la energía de las originales, razón por la cual no se considera una degradación significativa en la red.

Un componente clave de la amplificación Raman, son las altas fuentes de energía necesarias para llevar a cabo la amplificación, en consecuencia, las ondas generadas por FWM van a aumentar en amplitud, justamente porque el utilizar una potencia de bombeo, eleva el nivel general de intensidad, dando lugar a una mayor influencia de FWM en la señal, lo cual a su vez implica una penalidad superior a causa de FWM en la red. Generalmente este efecto es más significativo a medida que el espaciado entre canales disminuye y el número de canales transmitidos aumente.

En la segunda prueba, se busca determinar el efecto FWM mediante la variación de la dispersión cromática de la fibra SSMF-28 Corning; para esta prueba se define un rango de variación de CD de 0 a 17 ps/nm*Km, con la finalidad de evaluar la dependencia de FWM con distintos coeficientes de dispersión cromática.

En la Figura 4.55 (Anexo D, Tabla 12), se muestra el comportamiento del enlace frente a la variación del coeficiente de dispersión de la fibra SSMF-28 Corning para una potencia de transmisión fija en el canal 1 asignada en 5 dBm y una potencia variable en los canales 2, 3 y 4.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

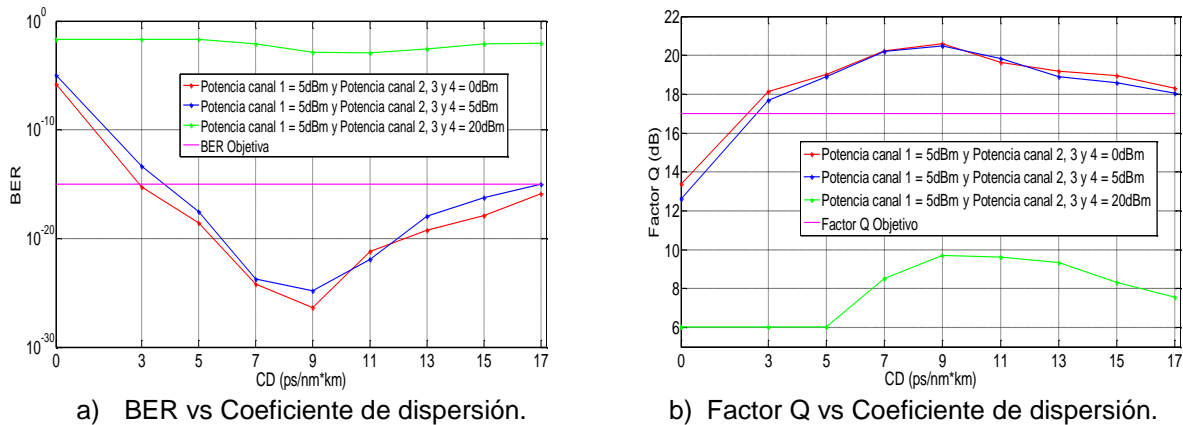


Figura 4.55 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de FWM mediante la variación del coeficiente de dispersión cromática.

De acuerdo a la Figura 4.55, la degradación generada por FWM ante la variación del coeficiente de dispersión, afecta en mayor medida a valores de dispersión por debajo de los 5 ps/nm*Km y beneficia valores de dispersión altos. Sin embargo, es recomendable que el coeficiente de dispersión este por debajo de los 18 ps/nm*Km para evitar degradaciones producto de la misma dispersión cromática. Además se observa que el efecto de FWM es de menor penalidad cuando la CD está en el intervalo de 7 a 11 ps/nm*Km, debido a que un mayor valor de dispersión reduce la aparición de nuevas frecuencias perjudiciales generadas por FWM. De esta manera, se concluye que FWM es más intensivo si la dispersión es nula y que las limitaciones introducidas por FWM pueden ser evidentemente dañinas en el contexto de la red de estudio cuando las potencias de los canales 2, 3 y 4 se incrementen por encima de los 12 dBm y se utilicen fibras en ausencia de dispersión.

Por otra parte, es de resaltar que uno de los efectos más importantes a considerar en la red del caso de estudio 2, es la dispersión cromática de la fibra principal, la cual degrada significativamente el desempeño general del enlace, ocasionando baja tolerancia en el impacto de la CD, debido a lo anterior, el intervalo de penalidad de FWM incrementa en la medida en que el efecto de la dispersión cromática aporte significativamente en la degradación del modelo, de hecho, en el caso de menor penalidad de 7 a 11 ps/nm*Km no se logra llegar a una BER de 10^{-40} , precisamente porque la red se ve altamente afectada por la presencia de dispersión cromática. Finalmente, FWM puede crear efectos perjudiciales en el rendimiento de la amplificación Raman si no se hace un control adecuado de los parámetros de diseño.

Después de realizar el análisis de las diferentes degradaciones que afectan la transmisión de una red basada en amplificación Raman sin etapas de amplificación EDFA, se concluye qué:

- Al usar una apropiada longitud de onda de bombeo, es posible obtener la ubicación de un perfil plano sobre un rango espectral deseado, con la finalidad de evitar interferencia entre canales.
- La potencia de bombeo requerida para una cierta ganancia, depende fuertemente de la posición de la DCF y de la utilización de láseres de bombeo disponibles comercialmente.



En la amplificación Raman la magnitud de la ganancia es proporcional a la intensidad de la fuente de bombeo, si bien existe un límite, si se aumenta en exceso la ganancia se debe confrontar el inconveniente de que los niveles de potencia a la salida de cada tramo de amplificación superen el umbral de efectos no lineales, adicionando degradaciones a la red.

- Uno de los principales problemas para la red caracterizada correspondiente al caso de estudio 2, es la degradación debido al alto nivel de atenuación producto de las distancias alcanzadas al emplear segmentos de red extensos; razón por la cual se disminuye la longitud del span para cubrir la distancia mínima objetiva de 600 Km.
- El uso general de una DCF en Post-compensación al emplear amplificación Raman, permite una mejora en el desempeño, dado que, cuanto más cerca la fibra DCF al final del span mayor llegara a ser la eficiencia Raman, a causa de que la luz de bombeo todavía conserva un nivel elevado de potencia. Sin embargo, tanto para el coeficiente de dispersión como para el coeficiente de atenuación se hace necesario definir una adecuada configuración de sus parámetros para optimizar su empleo en la red, pues de no hacerlo, la alta atenuación presente en la misma se convierte en un efecto dominante en la transmisión de las señales, afectando el desempeño de la red.
- La dispersión cromática de la fibra es uno de los parámetros de mayor impacto en el comportamiento de los efectos no lineales. La amplificación Raman puede ser muy útil sobre todo cuando se utilizan fibras con baja CD.
- Considerando el aumento de la potencia en los canales de transmisión para sistemas de centenares de kilómetros y el emplear en la red amplificación Raman, la cual requiere una alta potencia de bombeo, se produce un incremento en el nivel general de intensidad, lo cual implica mayores penalidades debido a las altas potencias, de hecho, cuando la diferencia en las potencias de los canales de transmisión son considerables, SPM y FWM son las no linealidades que limitan los parámetros de calidad de la red en estudio.

4.4 Caso de estudio 3: Inyección Raman con amplificación EDFA (Figura 4.56).

- Formato de modulación NRZ-OOK.
- Tasa de transmisión 10 Gbps.
- Fibra SMF-28 Corning.
- Inyección Raman.
- Presencia de 2 etapas de amplificadores tipo EDFA, en configuración Booster e Inline.
- Fibra DCF.

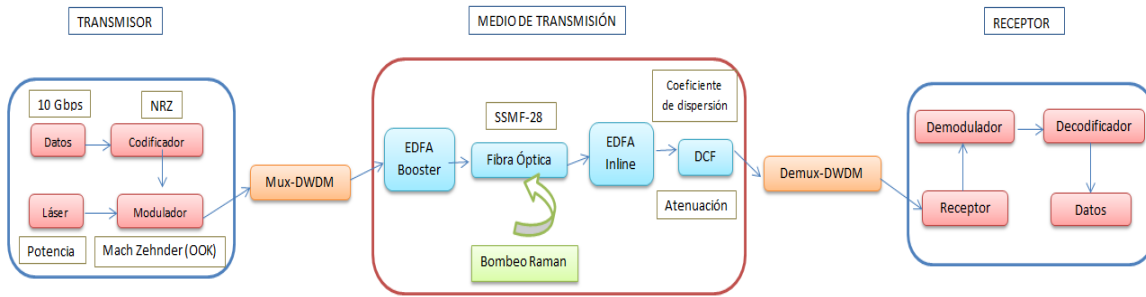


Figura 4.56 Caso de estudio 3: Inyección Raman con amplificación EDFA.

La Figura 4.57 muestra el escenario de simulación implementado en la herramienta Optisim que corresponde al caso de estudio 3. En este caso, al escenario general de simulación, se le agrega inyección Raman y 2 etapas de amplificación EDFA en configuración Booster e Inline. El desarrollo correspondiente al caso de estudio híbrido con amplificación EDFA e inyección Raman se aborda teniendo en cuenta la sección 3.1.4, referente a analizar comparativamente el desempeño de los escenarios mediante la determinación de la máxima distancia alcanzada por un segmento de red, concatenación de segmentos de red y el análisis de los efectos tanto lineales como no lineales.

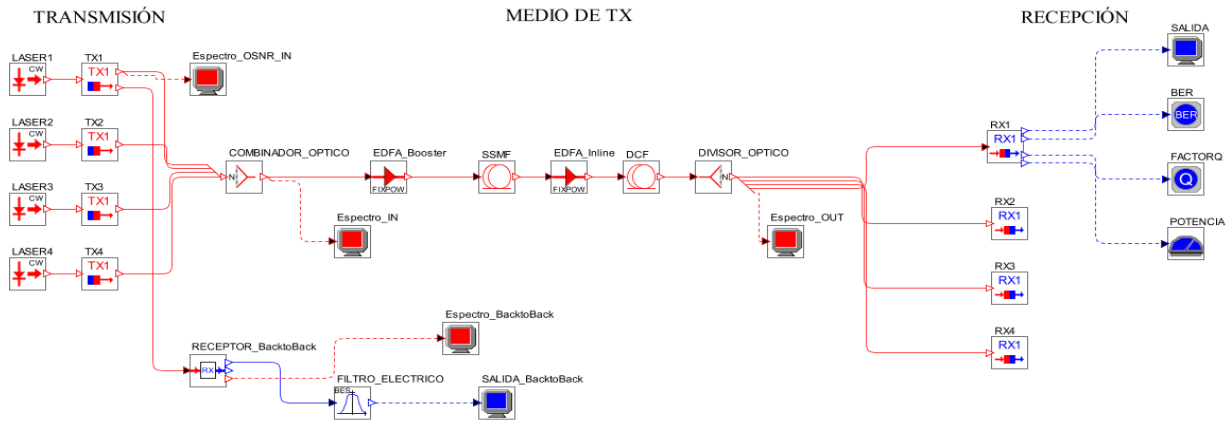


Figura 4.57 Caso de estudio 3: Inyección Raman con amplificación EDFA.

A) Distancia máxima alcanzable por un segmento de red

Para este análisis, se determina la máxima distancia alcanzada por un tramo de fibra SSMF en conjunto con una DCF y la presencia tanto de amplificación EDFA como de amplificación Raman. Este estudio se hace con el fin de analizar en una red DWDM el comportamiento simultáneo de la amplificación Raman y EDFA en el desempeño óptico frente a las diferentes degradaciones presentes en la red. A partir de estos resultados se pretende lograr un mayor valor de distancia máxima manteniendo los parámetros de desempeño objetivos; para obtenerla se simula en modo VBS Full, lo cual implica que se tiene en cuenta todas las degradaciones ópticas.

Con el propósito de conseguir la red con mayor alcance posible, y desde la perspectiva de la eficiencia referida a la fuente de bombeo, se determina la potencia umbral Raman, que define el nivel de potencia crítico límite antes de que la señal se vea afectada en la forma y



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

desplazamiento temporal debido a efectos de dispersión y SRS. En la Figura 4.58 (Anexo E, Tabla 1), se evidencia que 26 dBm correspondiente a ≈ 398 mW es el máximo valor de potencia de bombeo para cumplir con los parámetros de calidad objetivos.

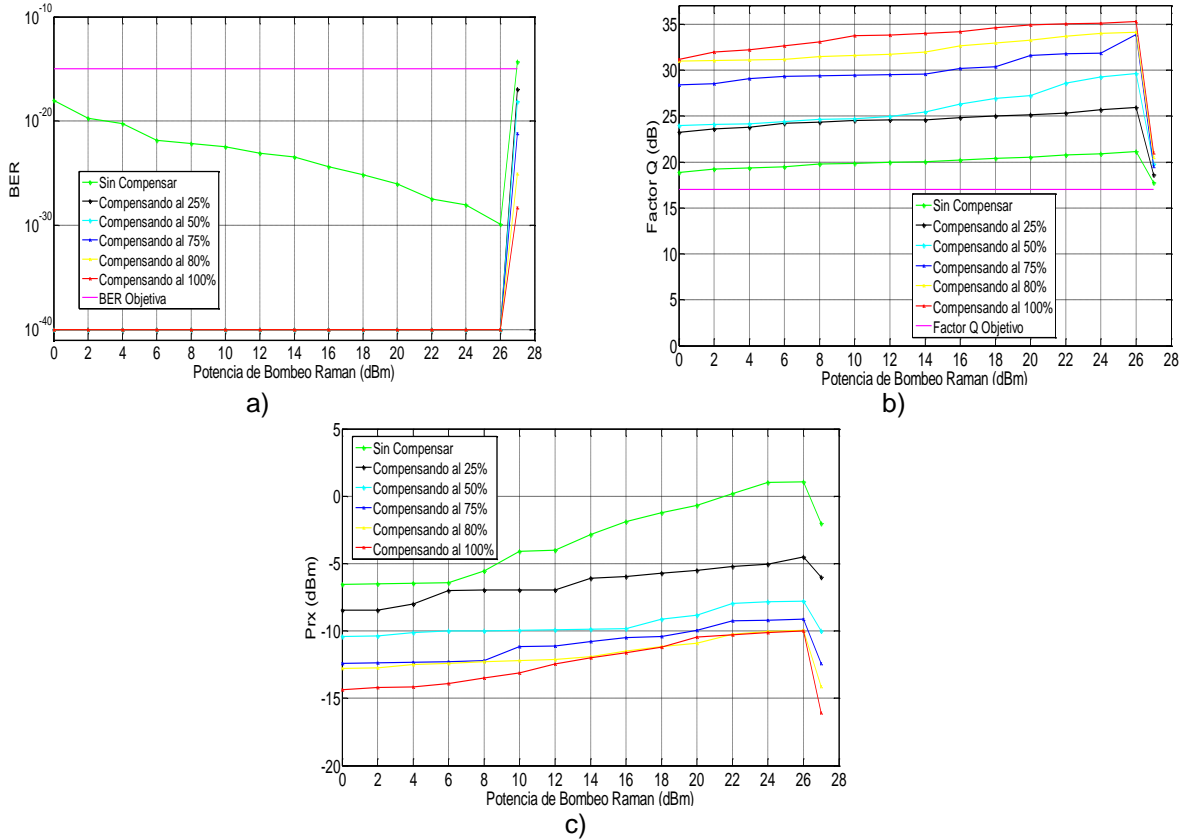


Figura 4.58 Parámetros ópticos ante variaciones en la potencia de bombeo a diferentes porcentajes de compensación.

Como se observa en la Figura 4.58, el nivel de potencia para el que se produce el efecto nocivo de SRS es bastante alto de aproximadamente 27 dBm. Este hecho hace de este fenómeno un efecto no lineal de bajo impacto en la red de estudio en el caso de valores inferiores. Por consiguiente, si el bombeo es el adecuado (valores menores a 27 dBm) todos los distintos canales que puedan transmitirse por la fibra pueden amplificarse sin impedimentos debidos a SRS.

De manera análoga al resultado del caso de inyección Raman sin amplificación EDFA, la potencia umbral Raman en una configuración híbrida presenta un comportamiento similar para los mismos valores de potencia de bombeo, siendo 26 dBm el umbral límite. Así mismo, cuando se compara la potencia de bombeo máxima entregada por la fuente de bombeo de la caracterización correspondiente a 26.53 dBm, el valor de 26 dBm encontrado en simulación, sólo presenta una diferencia de 0.53 dBm, lo cual resulta en la optimización de la fuente Raman de bombeo.

Por otra parte, el porcentaje de compensación de la DCF adquiere un papel importante dentro de la potencia de bombeo, debido a que la DCF favorece la eficiencia Raman, por lo



tanto, al emplear una DCF al final del span mayor será la eficiencia de bombeo, puesto que la potencia inyectada por la fuente Raman conserva un alto nivel de intensidad; de hecho, cuando se utiliza amplificación híbrida en un enlace y se adiciona una DCF, el compensar a altos porcentajes, no resulta mayormente perjudicial, debido a que la configuración Raman-EDFA compensa la atenuación en mayor medida, manteniendo mejores rendimientos en comparación con el comportamiento de sistemas que usen un sólo tipo de amplificación.

La Figura 4.59 muestra la curva de ganancia Raman (On-Off) y la Figura de Ruido (NF) para una fuente de bombeo operando a 1440.82202 nm, la cual genera una ganancia a la señal aproximadamente de 1525 a 1540 nm (196.58 a 194.67 THz), rango de amplificación conveniente para las frecuencias nominales de los cuatro canales implementados (195.2, 195.3, 195.4 y 195.5 THz), valores donde se consigue la mayor ganancia Raman.

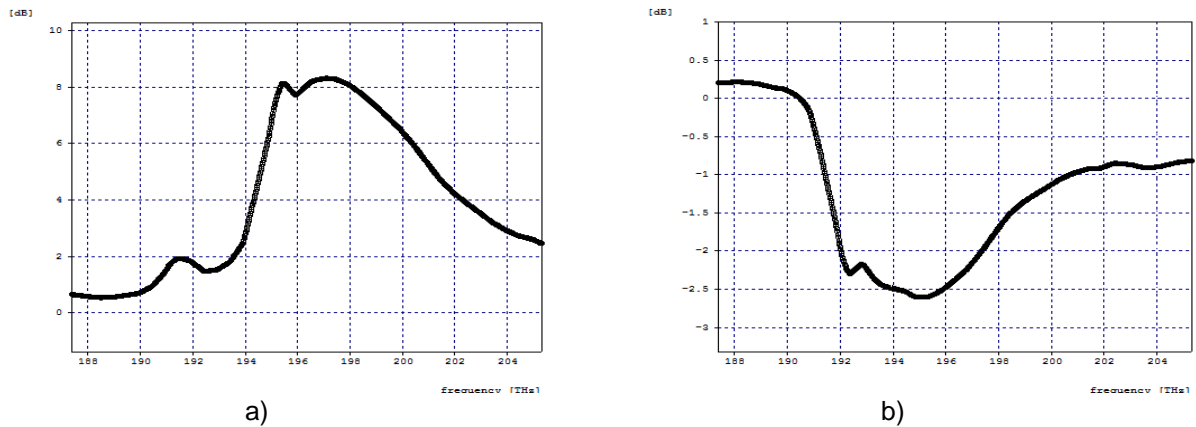


Figura 4.59 Espectro de: a) Ganancia Raman y b) Figura de ruido.

Teniendo en cuenta la fuente de bombeo definida en la caracterización, la típica ganancia Raman para una fibra SSMF es 8.5 dB, y dada la respuesta en la curva de ganancia obtenida de acuerdo al resultado de simulación, se evidencia un comportamiento similar alcanzando un valor de 8.3 dB. Así mismo, se corrobora que los amplificadores Raman entregan figuras de ruido negativas, valores inalcanzables al emplear amplificadores EDFA. Para el amplificador Raman se obtiene un valor negativo de -2.83 dB.

Con el fin de obtener la máxima distancia alcanzada por un segmento de red, se hace uso de la máxima potencia de bombeo que cumpla con los parámetros requeridos. En Anexo E (Tabla 2), se evidencia que al realizar compensación y adicionalmente agregar amplificación EDFA e inyección Raman con una potencia de bombeo de 26 dBm, se verifica una pequeña mejora en el número de kilómetros alcanzada por la red en comparación al caso de inyección Raman sin amplificación EDFA; esto se debe principalmente al hecho de que al emplear únicamente amplificación Raman no se compensa necesariamente la pérdida completa del enlace de transmisión, mientras que en una configuración híbrida, parte de esa atenuación sin mitigar se compensa mediante etapas de amplificación EDFA.

La Tabla 4.17 (Anexo E, Tabla 3), resume las distancias máximas alcanzadas por un segmento de red cuando se inyecta Raman a la fibra en presencia de etapas de amplificación EDFA.

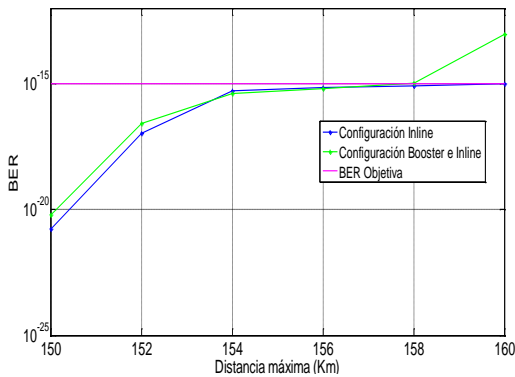


ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

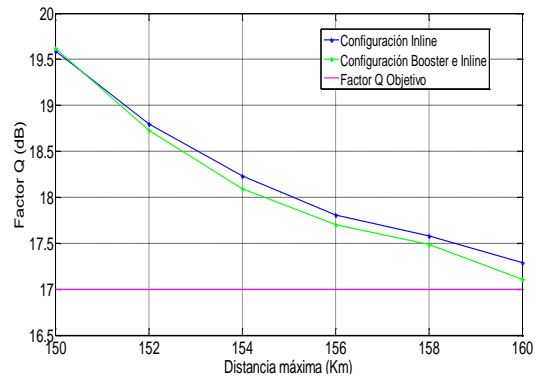
Tabla 4.17 Distancia máxima alcanzada al usar configuración híbrida en comparación con el caso general.

Potencia de trabajo (dBm)	Amplificación	Longitud DCF (Km)	Distancia máxima alcanzada (Km)	BER	Factor Q (dB)
5	Ninguna	10.71	100	2,81e-17	18,70
	EDFA (Booster-Inline) y Raman		158	2.25e-15	17.47
	EDFA (Inline) y Raman		160	8,77e-15	17,29

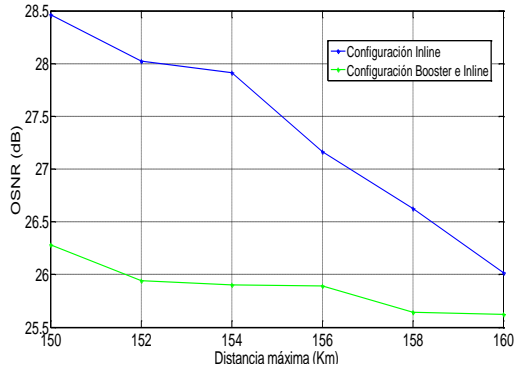
En la Figura 4.60 (a), (b), (c) y (d), se muestran los parámetros de desempeño óptico al utilizar etapas de amplificación EDFA, en configuración Booster e Inline (Color verde) y configuración Inline únicamente (Color azul) en conjunto con amplificación Raman, encontrando que realizar amplificación a continuación de una fuente óptica (Booster), no afecta positivamente la eficiencia de la red, por lo tanto para posteriores análisis se trabaja en configuración Inline, donde esta no solo presenta mejor desempeño en la amplificación híbrida, sino también, minimiza los dispositivos implementados en la red.



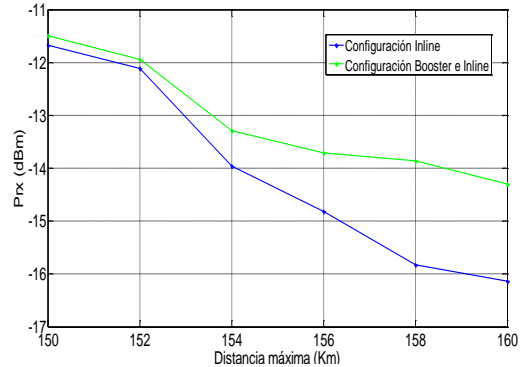
a) BER vs Distancia máxima.



b) Factor Q vs Distancia máxima.



c) OSNR vs Distancia máxima.



d) Prx vs Distancia máxima.

Figura 4.60 Parámetros ópticos al realizar compensación a menos del 50% con amplificación Raman y etapas de amplificación EDFA.

Finalmente la distancia máxima alcanzada por un segmento de red al usar 10.71 Km de DCF con amplificación EDFA, en configuración Inline, y amplificación Raman, alcanza 60 Km de más en comparación con el caso general en ausencia de algún tipo de amplificación. Así pues, el valor máximo para el cual el enlace cumple con los parámetros de desempeño objetivo para una configuración híbrida es 160 Km.



A) Distancia mínima de 600 Km mediante enlaces concatenados

Con el fin de optimizar la amplificación Raman y crear una ganancia distribuida a lo largo de la fibra óptica sin que la señal se atenué por enlaces de larga distancia, la cual permita alcanzar una distancia mínima de 600 Km, se concatenan segmentos de red de decenas de kilómetros con el objetivo de disminuir específicamente las pérdidas acumuladas en span's de grandes longitudes.

Como primera medida, se parte de segmentos de red con distancias de los 160 Km por span, buscando la máxima longitud de tramo de fibra que permita cumplir con los parámetros de desempeño objetivos. No obstante, la distancia mínima de 600 Km requerida no se alcanzó, debido a la pérdida global del tramo de fibra. La Figura 4.61 muestra el diagrama de ojo al usar span's de 160 Km.

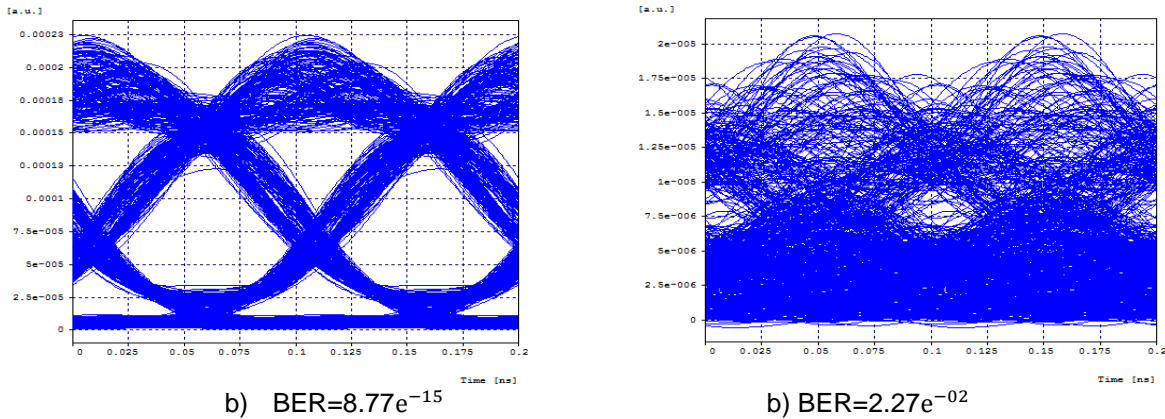


Figura 4.61 Diagrama del ojo para: a) Un span de 160 Km y b) Dos span de 160 Km.

De la Figura 4.61 se observa que concatenar segmentos de red del orden de los 160 Km no resulta adecuado para cumplir con la distancia mínima de 600 Km, debido a que primordialmente las pérdidas introducidas por cada span degradan de manera considerable el desempeño de la red, razón por la cual se requiere disminuir la longitud de cada span a valores cercanos de 70 Km (representa el valor mínimo para que un amplificador tipo EDFA sea situado en red) para llegar a la distancia máxima deseada como se muestra en la Tabla 4.18 (Anexo E, Tabla 4).

Tabla 4.18 Parámetros de monitoreo óptico para segmentos de red concatenados con amplificación Raman y una etapa de amplificación EDFA, en configuración Inline.

Distancia Total (Km)	Número de span's	Longitud de span (Km)	Amplificación	Factor Q (dB)	BER	OSNR _{out} (dB)	Prx (dBm)
2520	36	70	EDFA (Inline) y Raman	17,69	8.54e-15	22,5203	-11,79
160	1	160		17,29	8,77e-15	25,6944	- 7,72

En la Figura 4.62 (a), (b), (c) y (d), se muestra el efecto de la degradación del sistema debido a la concatenación de enlaces con distancias de 70 Km utilizando amplificación Raman y una etapa de amplificación EDFA (Inline), encontrándose que hasta el treintaseisavo span se alcanza una distancia máxima de 2520 Km manteniendo los parámetros objetivos.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

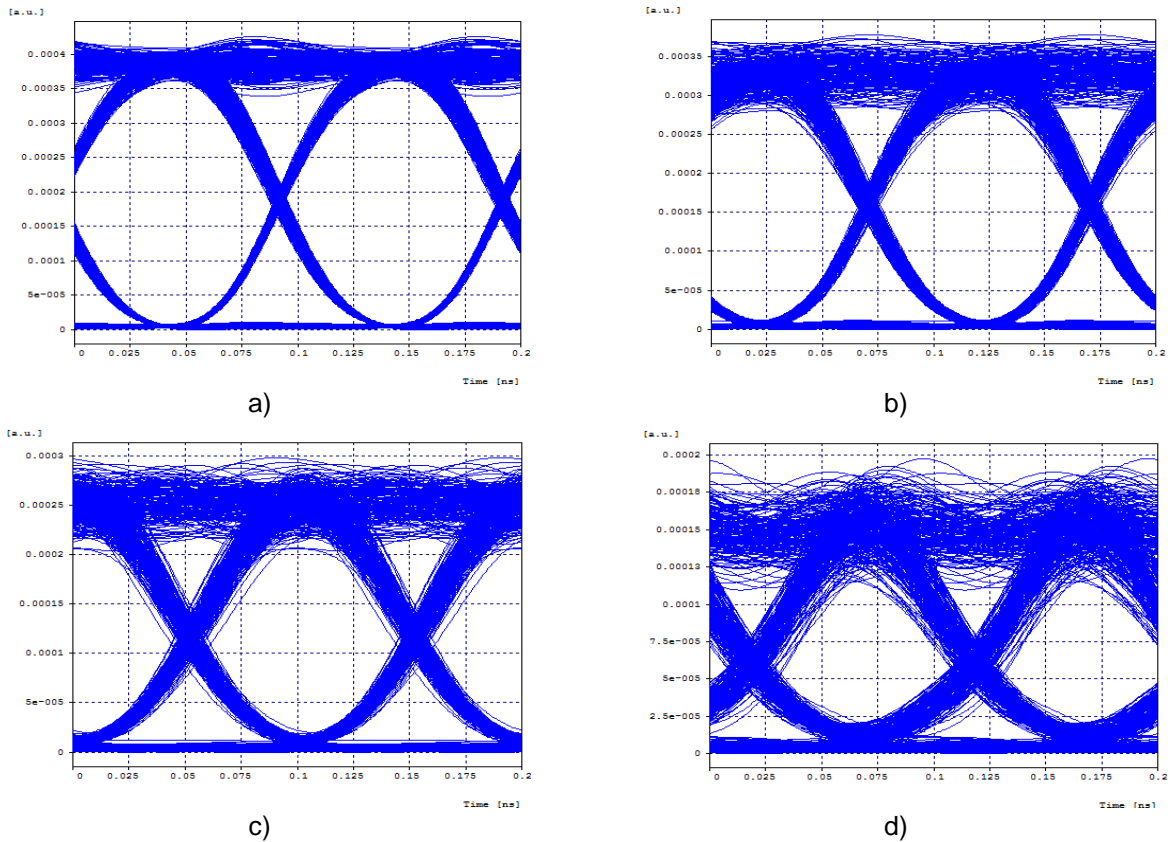


Figura 4.62 Diagrama del ojo para: a) Un span de 70 Km b) Catorce span's de 70 Km, c) Veintiocho span's de 70 Km y d) Treinta y seis span's de 70 Km.

Al igual que para el estudio de un segmento de red, se analiza cómo etapas de amplificación EDFA influyen en el desempeño de enlaces concatenados. De modo similar al caso analizado para un segmento de red, la adición de un amplificador EDFA, en configuración Booster aporta negativamente al desempeño de la red como se observa en la Tabla 4.19, debido a que el utilizar una potencia de Bombeo en conjunto con un amplificador Booster, se eleva el nivel general de intensidad, excitando los efectos no lineales, afectando la calidad de la señal recibida, dando como resultado una distancia máxima de 1960 Km mediante 28 span's de 70 Km (Anexo E, Tabla 5), en comparación a una distancia máxima de 2520 Km lograda en configuración Inline únicamente.

Tabla 4.19 Parámetros de monitoreo óptico para segmentos de red concatenados con amplificación Raman y dos etapas de amplificación EDFA.

Distancia Total (Km)	Número de span's	Longitud de span (Km)	Amplificación	Factor Q (dB)	BER	OSNR _{out} (dB)	Prx (dBm)
1960	28	70	EDFA (Booster e Inline) y Raman	17.78	6.82e-15	23,8153	-10.70
160	1	160		19,21	6.51e-20	25,630	-9.22

En la Figura 4.63 (a), (b), (c) y (d), se muestra el efecto de la degradación generada a partir de la concatenación de enlaces con distancias de 70 Km utilizando amplificación Raman y dos etapas de amplificación EDFA, en configuración Booster e Inline, encontrándose que



hasta el veintiochoavo span se alcanza una distancia máxima de 1960 Km manteniendo los parámetros objetivos.

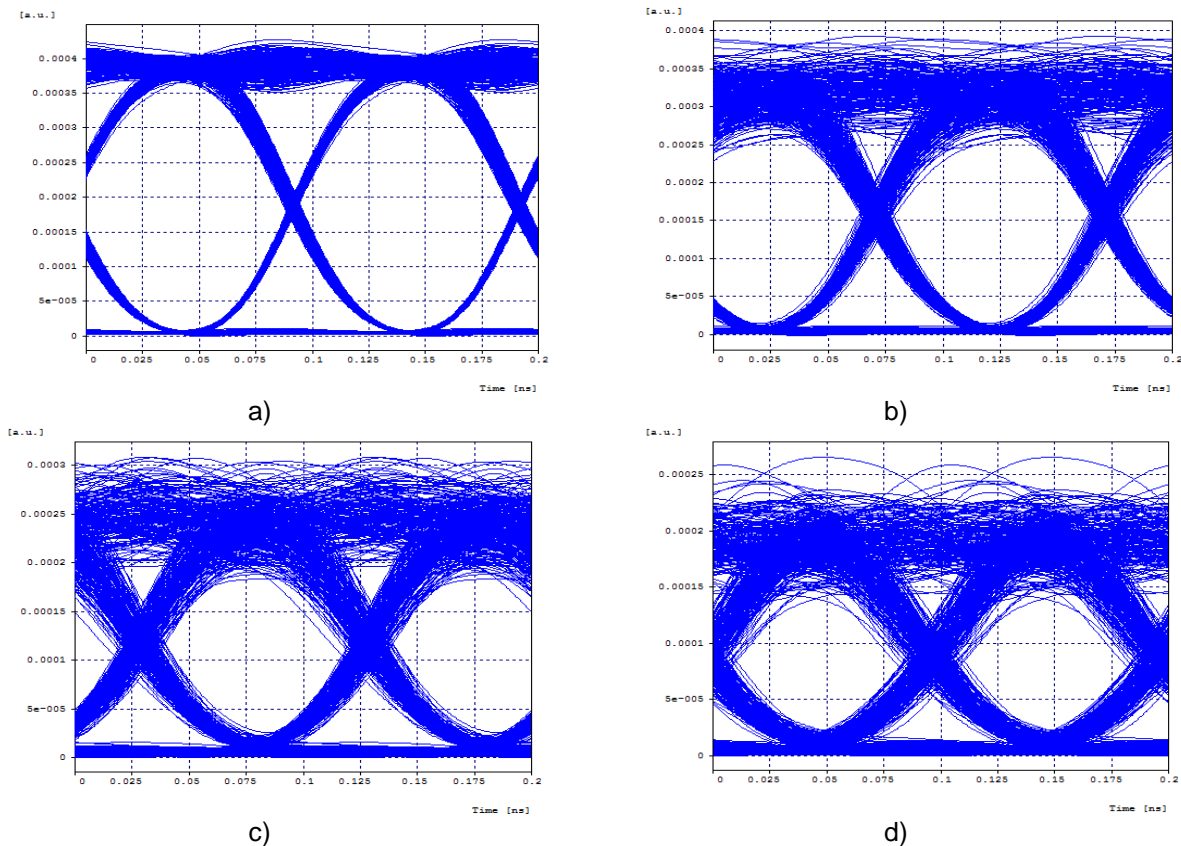


Figura 4.63 Diagrama del ojo para: a) Un span de 70 Km b) Siete span's de 70 Km, c) Veinte span's de 70 Km y d) Veintiocho span's de 70 Km.

Con el fin de corroborar que la amplificación Raman y la adición de un Booster en enlaces concatenados excita la presencia de los efectos no lineales, se simula en “VBS Linear Fiber”, en el cual únicamente se tiene en cuenta los efectos lineales, para determinar exactamente sí el aumento general de la potencia es la causa de la disminución de la distancia. En Anexo E (Tabla 6), se evidencia que precisamente el incremento considerable de potencia en las señales propagadas reduce la distancia máxima, puesto que sin efectos no lineales la longitud del enlace, en configuración Booster e Inline alcanza 4480 Km con 64 span's, mientras que en configuración únicamente Inline, alcanza 4060 Km con 58 span's, lo cual indica que los efectos no lineales producto de las elevadas potencias presentes en el canal óptico impiden cumplir al Booster la función de regeneración, dando como resultado el aporte negativo de esta etapa de amplificación en el desempeño de la red.

En la Figura 4.64 (Anexo E, Tabla 4 y Tabla 5), se evidencia que la amplificación Raman en conjunto con amplificación EDFA para enlaces concatenados, presenta un mejor desempeño al emplear configuración Inline únicamente, debido a su mayor distancia alcanzada (2520 Km), 560 Km por encima del valor logrado en configuración Booster e Inline.

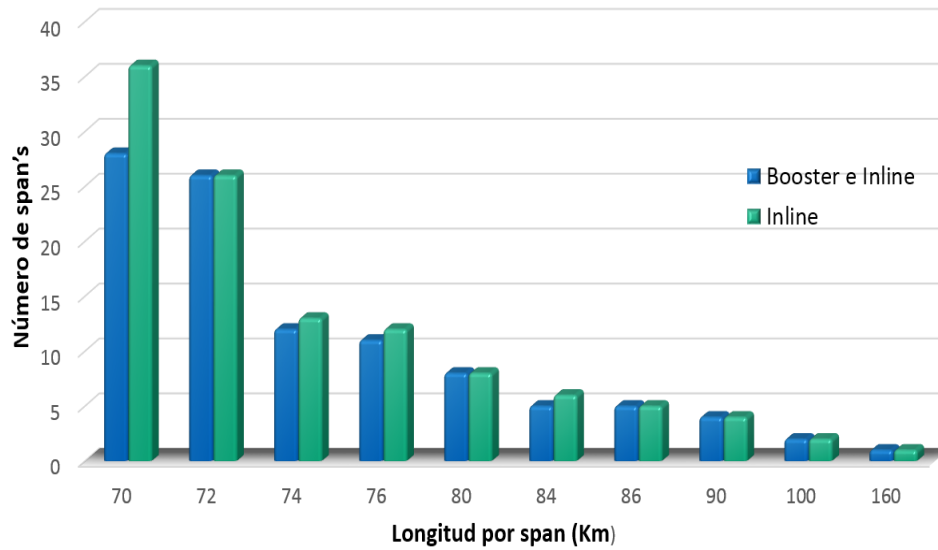


Figura 4.64 Número de span alcanzado con amplificación Raman y etapas de amplificación EDFA, en configuración Booster e Inline y configuración Inline únicamente.

4.4.1 Análisis de efectos lineales:

4.4.1.1 Ruido y Pérdidas

Para determinar el efecto de ruido y pérdidas acumuladas durante la propagación de la señal en un span de 160 Km, se analizan los parámetros de monitoreo óptico mediante el incremento de la distancia, debido a que el ruido y la atenuación son parámetros intrínsecos de la fibra, que dependen principalmente del aumento de la misma o del incremento de los dispositivos de amplificación.

Para verificar la degradación de la señal en la red, debido únicamente a las pérdidas introducidas por la DCF y el ruido de los dispositivos de amplificación, se trabaja con potencias mínimas de amplificación (5 dBm) con el fin de no excitar los efectos no lineales y se realiza variaciones tanto en el coeficiente de atenuación de la DCF, los cuales oscilan entre valores comerciales y no comerciales (Tabla 4.20), como también en la distancia, para generar un rango de atenuación máximo para el cual la red siga cumpliendo los parámetros de desempeño objetivos y así determinar la dependencia de la distancia respecto a variaciones en el coeficiente de atenuación de la DCF (Anexo E, Tabla 7).

La Tabla 4.20, muestra los valores del coeficiente de atenuación para la prueba.

Tabla 4.20 Variación del coeficiente de atenuación de la DCF.

Atenuación (dB/Km)	0,1	0,235	0,35	0,55	1,4	2,7	3,5
--------------------	-----	-------	------	------	-----	-----	-----

La Figura 4.65 (a) y (b) muestra los siete valores del coeficiente de atenuación de la DCF definidos para el análisis de la atenuación, con su correspondiente variación respecto a los parámetros ópticos y distancia máxima alcanzada.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

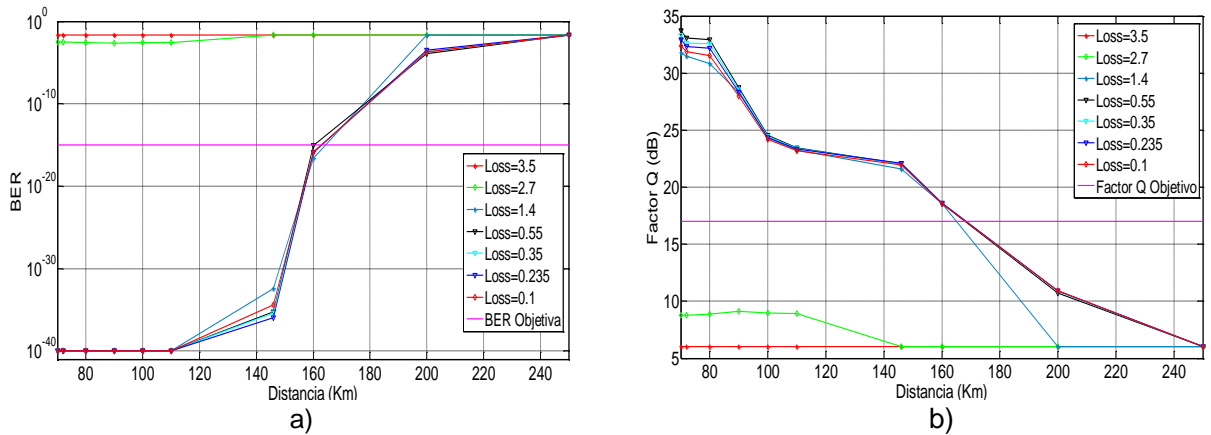
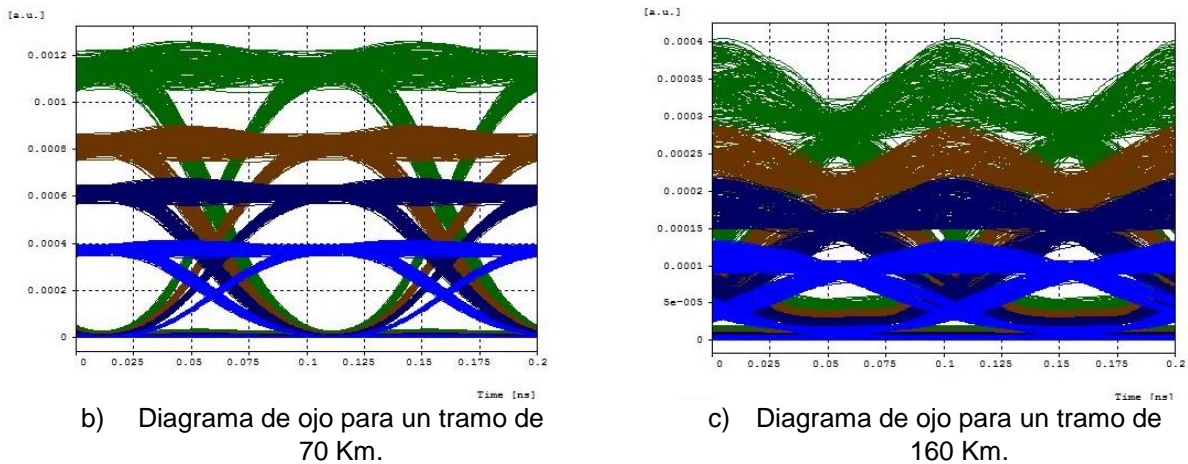


Figura 4.65 a) BER vs Distancia y b) Factor Q vs Distancia para diferentes coeficientes de atenuación de la DCF.

La Figura 4.65 (a) y (b), muestra el comportamiento de la red al variar el coeficiente de atenuación de la DCF en los valores mencionados. Al realizar dichas variaciones se observa el efecto de las pérdidas en la red, donde la mayor degradación se origina en valores altos de atenuación, es el caso de 3.5 dB/Km que ocasionan unas pérdidas de 37.48 dB, valor de atenuación para el cual la red se deteriora en gran medida; no obstante, en una configuración híbrida, para que se produzca una degradación significativa son necesarios coeficientes de atenuación mayores o iguales a 2.7 dB/Km que hacen que la señal propagada pierda potencia con la distancia recorrida. De acuerdo a los resultados obtenidos, la amplificación Raman-EDFA es más tolerante frente a las pérdidas soportando un rango de 0.1 a 1.4 dB/Km, a causa de una potencia a lo largo del enlace mucho más alta.

La Figura 4.66 muestra el efecto de las pérdidas y ruido introducido por los elementos de la red para un tramo de fibra de 70 y 160 Km respecto a los parámetros de desempeño óptico definidos ($BER=10^{-15}$, $Q=17$ dB).

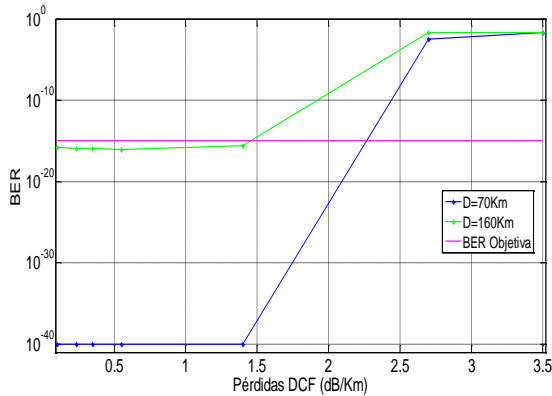


b) Diagrama de ojo para un tramo de 70 Km.

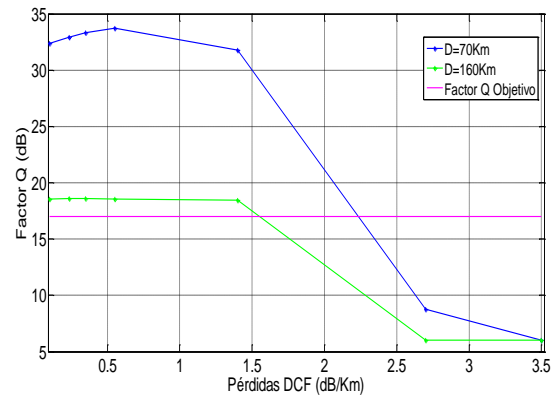
c) Diagrama de ojo para un tramo de 160 Km.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.



c) BER vs Pérdidas DCF.



d) Factor Q vs Pérdidas DCF.

Figura 4.66 Desempeño del enlace ante variaciones del coeficiente de atenuación de la DCF.

Como se puede observar en la Figura 4.66 (a), (b), (c) y (d), la pérdida de potencia de luz que experimenta la señal debido a la atenuación de la DCF, afecta en mayor medida a distancias del orden de los cientos de Kilómetros, resultando evidente la atenuación excesiva de sus señales, mientras que para distancias menos extensas (70 Km), el efecto de las pérdidas y el ruido no aporta una degradación significativa en el desempeño de la red. Por lo tanto, sólo para entornos de larga distancia la penalización de ruido y atenuación se hace realmente significativa. A diferencia de la configuración Raman sin etapas de amplificación EDFA, la configuración híbrida mantiene mejor desempeño ante el efecto del ruido y atenuación de la DCF, debido a que la pérdida global del enlace puede ser contrarrestada en parte por la potencia de bombeo y por el amplificador EDFA, en configuración Inline.

4.4.1.2 Dispersión cromática (CD)

Para determinar el efecto de la dispersión cromática, se parte de la máxima distancia alcanzada por la red en presencia de todas las degradaciones ópticas, que corresponde a 160 Km. Para verificar este efecto lineal, se definen los siguientes análisis: En primer lugar, se determina el desempeño sin CD y únicamente con CD, segundo, se calcula la CD acumulada en la red, y tercero, se evalúa el coeficiente de dispersión de la DCF para determinar su impacto en el desempeño del enlace.

Determinar el desempeño de la red en presencia CD y ausencia de CD.

Con la finalidad de verificar el impacto de la dispersión cromática, se analiza el comportamiento de la red sin CD y solo con CD. La Figura 4.67 (a), (b) y (c), muestra los diagramas de ojo en presencia de todas las degradaciones, ausencia de CD y presencia solo de CD respectivamente.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

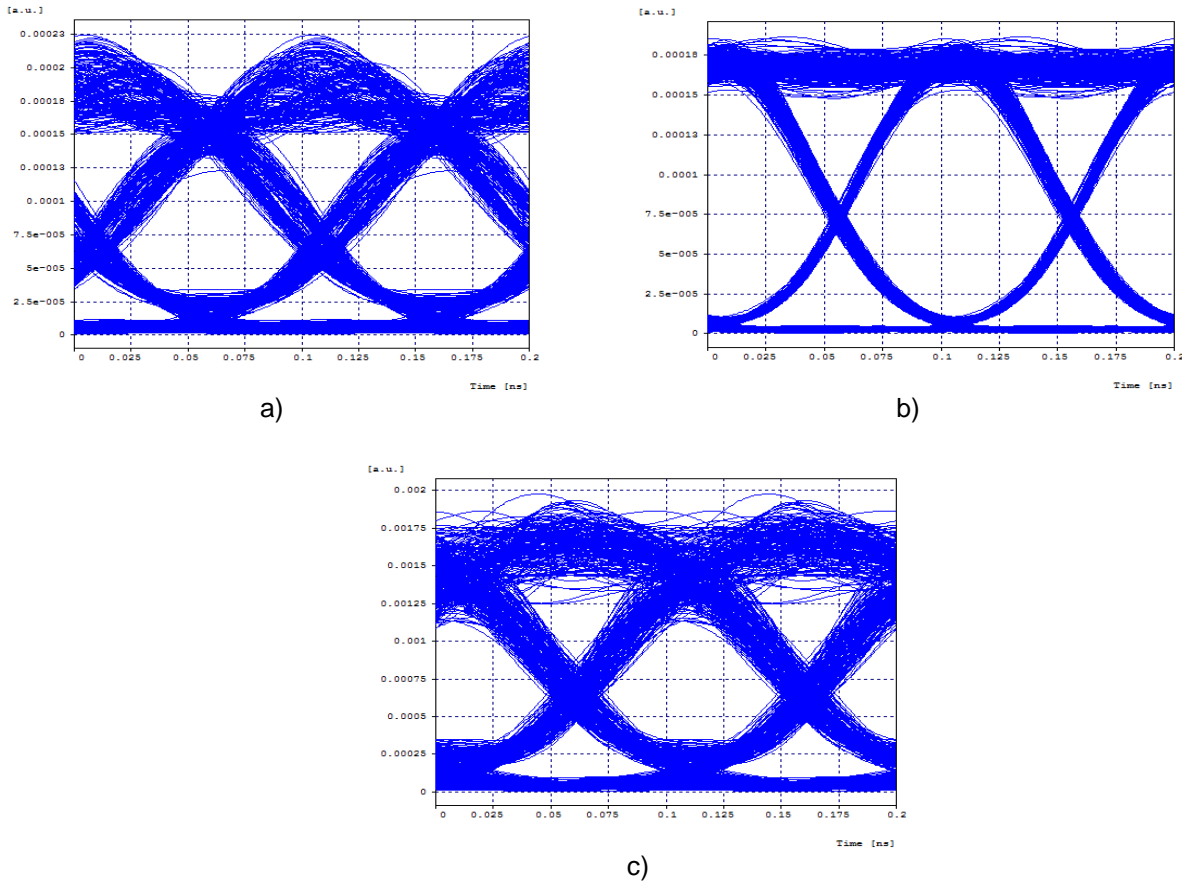


Figura 4.67 Diagrama de ojo para un tramo de 160 Km: a) En presencia de todas las degradaciones, b) Sin CD y c) Solo con CD.

En la Figura 4.67 (a), (b) y (c), se muestra la degradación generada en el diagrama del ojo tras propagarse la señal dentro de la fibra con todas las degradaciones, sin CD y solo con CD. A partir del resultado de simulación se observa que el desempeño del enlace se encuentra moderadamente afectado por la presencia de dispersión cromática, resultando en un efecto significativo para la degradación del modelo de red.

La Tabla 4.21 resume los parámetros de monitoreo óptico para la red en presencia de todas las degradaciones ópticas, ausencia de CD y presencia solamente de CD.

Tabla 4.21 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de CD en la red.

Simulación	Factor Q (dB)	BER
En presencia de todas las degradaciones	17,29	8,77e-15
Sin CD	26,71	1,00e-40
Solo con CD	16,18	9,27e-11

La Figura 4.68 muestra el efecto de la dispersión cromática reflejado en la señal eléctrica detectada por el receptor en ausencia de CD y solo con CD, en comparación a la señal eléctrica transmitida, donde se evidencia la variación en el tiempo de llegada de los pulsos de la señal, y en consecuencia el ensanchamiento de los mismos. El alargamiento de los pulsos se verifica cuando el Δ de un pulso recibido presenta un valor superior al Δ



transmitido. Adicionalmente se observa los pulsos en recepción cuando se hace uso de la compensación, permitiendo disminuir el ensanchamiento.

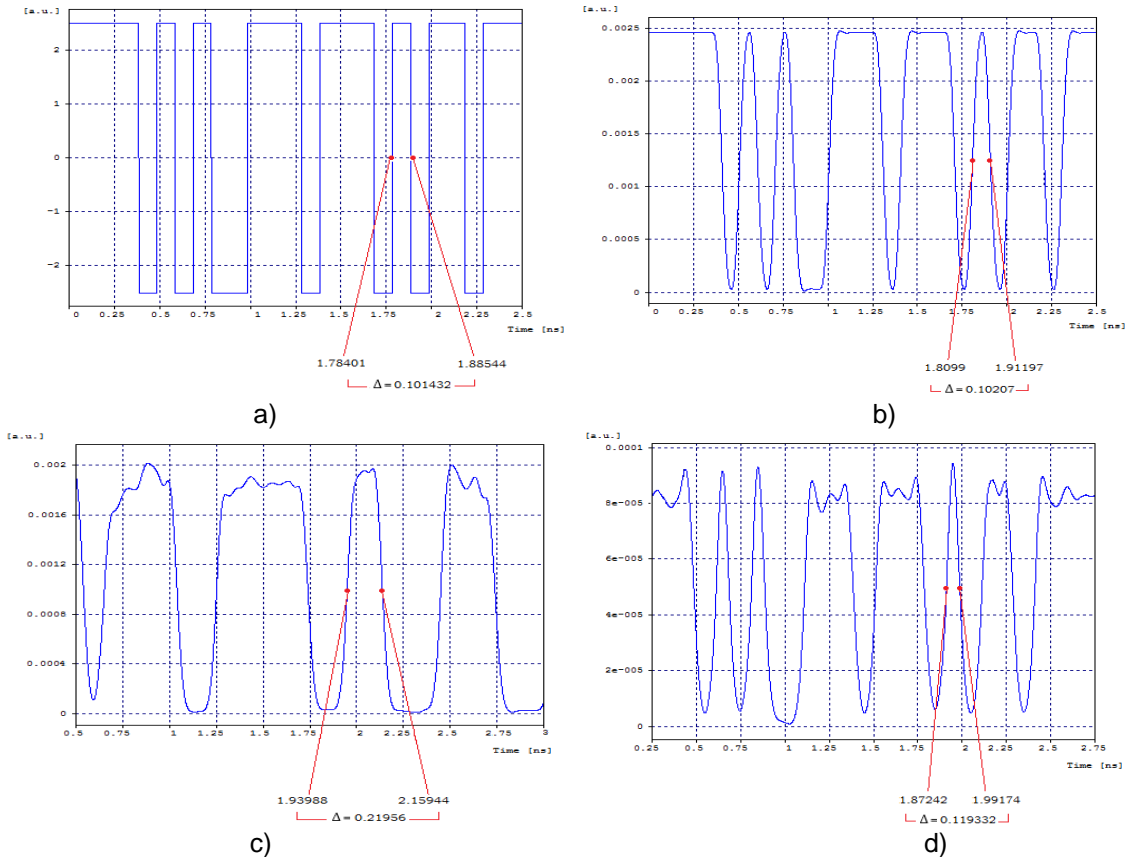


Figura 4.68 Pulso eléctrico de la señal: a) Transmitido, b) Sin CD, c) Solo con CD y d) Después de compensar la CD.

Como se observa en los resultados obtenidos en la Tabla 4.21 y en la Figura 4.68 (a), (b), (c) y (d), la señal se ve afectada por la dispersión cromática, la cual introduce un efecto de alargamiento temporal de los pulsos a lo largo de su propagación; dicho alargamiento puede limitar seriamente el desempeño de la red, debido a que los pulsos pueden interferirse más rápidamente unos con otros; para este caso, el pulso se ensancha moderadamente y es más pronunciado cuando la red únicamente se encuentra en presencia de CD, sin embargo, al realizar compensación es posible mejorar la calidad del enlace, evitando que los pulsos lleguen al destino en diferentes tiempos generando así, cumplir con los parámetros de desempeño definidos. Por otra parte, se comprueba que la configuración Raman-EDFA es más tolerante al efecto de la dispersión cromática en comparación a la configuración Raman sin etapas EDFA, puesto que cuando se utiliza amplificación híbrida en un enlace en conjunto con una DCF, se mitiga la atenuación de la fibra y se mejora la compensación de la dispersión cromática.



Cálculo de la CD acumulada en la red.

El cálculo de la CD acumulada en la red se realiza matemáticamente, como se mostró en la ecuación 4.1, donde se asocia la máxima longitud alcanzada ($L = 160 \text{ Km}$), la pendiente de dispersión para longitudes de onda que trabajan en los 1550 nm ($S_0 = 0.056 \text{ ps/nm}^2 * \text{Km}$), la CD de la fibra SSMF-28 Corning ($17 \text{ ps/nm} * \text{Km}$) y la longitud de onda del canal de transmisión que se asignó para evaluar ($1535.82202 \text{ nm} = 195.2 \text{ THz}$) así:

$$D_{link}(\lambda) = 160\text{Km} \left[\frac{17\text{ps}}{\text{nm} * \text{Km}} + \frac{0,056\text{ps}}{\text{nm}^2 * \text{Km}} * (1535.82202\text{nm} - 1550\text{nm}) \right] = 2592,96 \frac{\text{ps}}{\text{nm}}$$

Para lograr disminuir la CD acumulada en la red se emplea como técnica de compensación una DCF, debido a que ésta con su alta dispersión negativa permite compensar la dispersión positiva de la SSMF, el siguiente resultado muestra como la dispersión acumulada se reduce cuando se agrega una longitud de DCF de 10.71 Km .

$$D_{link}(\lambda) = 2592,96 \frac{\text{ps}}{\text{nm}} - \left(100 \frac{\text{ps}}{\text{nm} * \text{Km}} * 10,71\text{Km} \right) = 1521,96 \frac{\text{ps}}{\text{nm}}$$

Adicionar longitudes de DCF más extensas reduce en mayor proporción la dispersión acumulada en la red, sin embargo, se establece una compensación menor al 50% (10.71 Km), debido a que operadores comerciales, por razones de costos no realizan la compensación a altos porcentajes.

Evaluar como diferentes coeficientes de dispersión de la DCF impactan el desempeño de la red, principalmente en el parámetro de distancia.

La Tabla 4.22 muestra los nueve coeficientes de dispersión de la DCF definidos para realizar el análisis de la CD en una distancia máxima de 160 Km , algunos comerciales y otros valores no comerciales, con el fin de observar en detalle el impacto de una de las propiedades más relevantes de la DCF.

Tabla 4.22 Variación del coeficiente de dispersión de la DCF.

Dispersión (ps/nm*Km)	-17	-50	-80	-95	-100	-120	-170	-250	-300
-----------------------	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------

Con el propósito de observar si la disminución del coeficiente de dispersión de la DCF permite alcanzar mayores distancias, se realizan dos pruebas: La primera, consiste en la variación de los coeficientes de dispersión para tres longitudes de DCF fijas ($10.71, 20.4$ y 27.2 Km) que corresponden al $39.38, 75$ y 100% de compensación respectivamente; la segunda, consiste en variar la longitud de la DCF de acuerdo al porcentaje de compensación deseado, con el fin de encontrar el valor de coeficiente de dispersión de la DCF mínimo que la red necesita para cumplir con el BER y Factor Q definido, así como también, el coeficiente de dispersión máximo hasta el cual es recomendable utilizar en la red.

La Figura 4.69 (Anexo E, Tabla 8), muestra la primera prueba de cómo diferentes coeficientes de dispersión impactan los parámetros ópticos.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

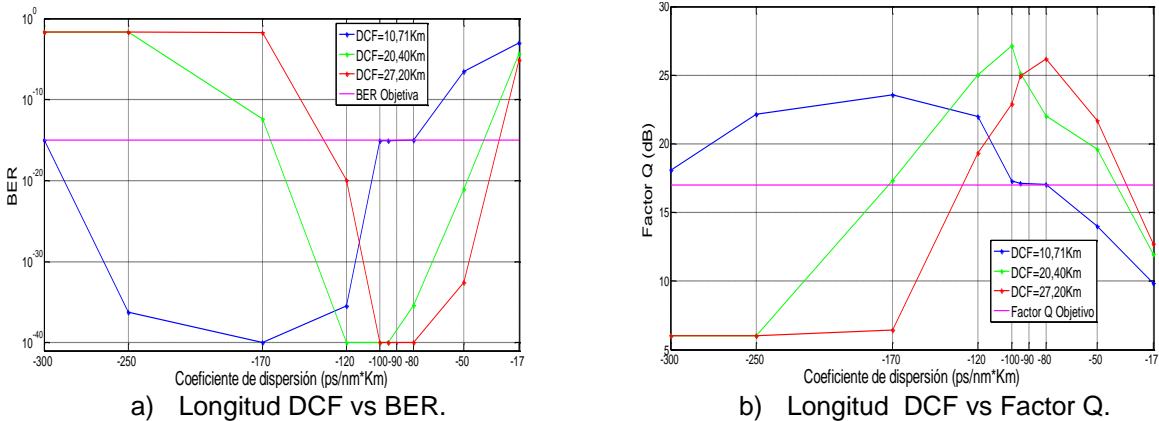


Figura 4.69 Comportamiento de la red ante la variación de diferentes valores del coeficiente de dispersión de la DCF.

Los resultados de la Figura 4.69 indican que para valores de coeficientes de dispersión altamente negativos se necesita una longitud de DCF reducida, para mantener los parámetros de desempeño objetivos, pero sí por el contrario, se necesita mayor compensación, es decir, longitudes de DCF más extensas, el valor del coeficiente de dispersión debe ser mayor o igual a -120, pero a su vez, menor o igual a -50 para la red en estudio. Es importante señalar que para una longitud de DCF igual a 10.71 Km, el rango aceptable para cumplir con los parámetros objetivos comprende un intervalo que oscila entre -80 y -300 ps/nm*Km. De lo anterior resulta que la amplificación híbrida se presenta como la mejor configuración comparada con los anteriores casos de estudio, puesto que el nivel general de potencia en la red se eleva, lo cual permite aumentar la longitud de la DCF en relación con la configuración Raman sin etapas EDFA, debido a que la adición de un amplificador EDFA, en configuración Inline, equilibra las pérdidas originadas cuando se realiza compensación a altos porcentajes, y permite reducir el coeficiente de dispersión de la DCF en relación con la configuración de amplificación EDFA sin inyección Raman.

La Figura 4.70 (Anexo E, Tabla 9), muestra la segunda prueba de como diferentes porcentajes de compensación reflejado en diferentes longitudes de DCF impactan los parámetros ópticos.

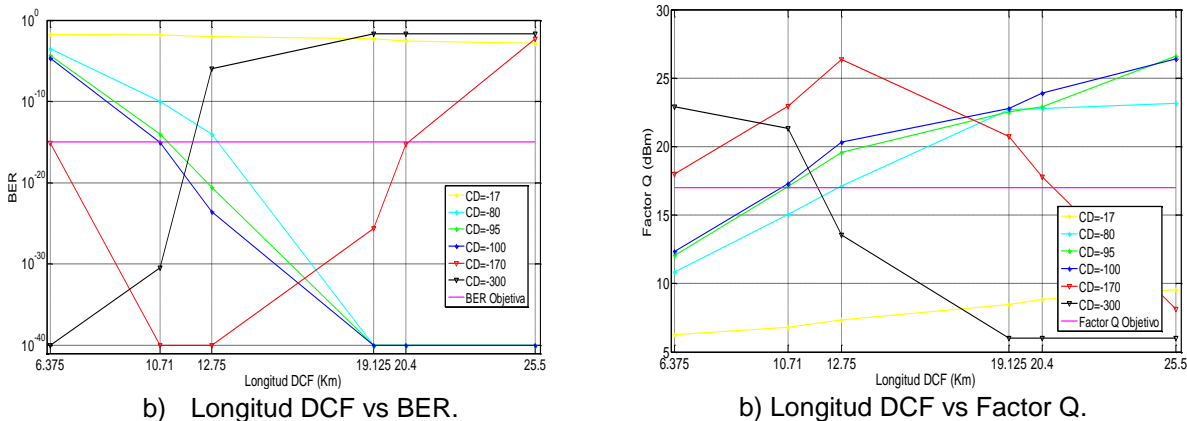


Figura 4.70 Comportamiento de la red ante la variación de diferentes longitudes de la DCF con diferentes coeficientes de dispersión.



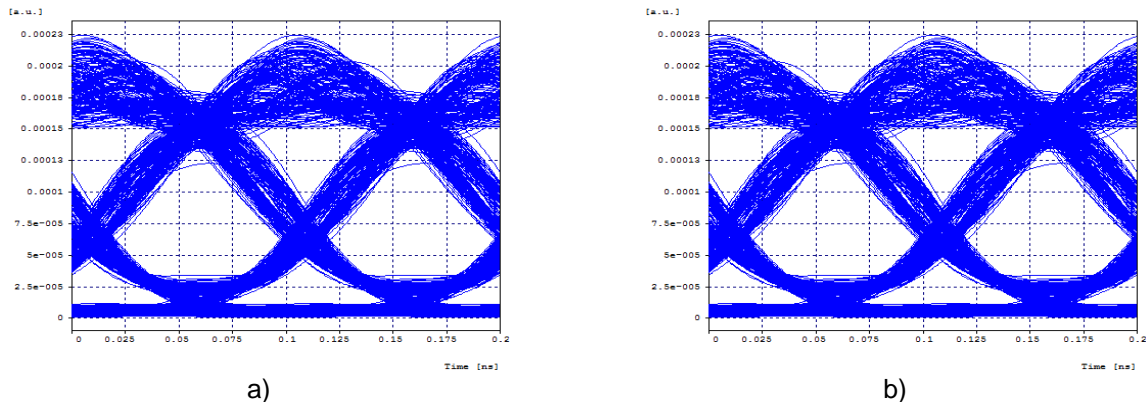
Mediante el análisis de los resultados obtenidos en la Figura 4.70, se evidencia una mejora en el desempeño al aumentar la longitud de la DCF para valores de CD entre -80 y -100 ps/nm*Km, manteniendo una BER de 10^{-40} , mientras que para valores de CD mayores a -170 ps/nm*Km, la longitud de la DCF debe disminuir para conservar los parámetros de desempeño objetivos; no obstante, a diferencia del efecto generado por el coeficiente de dispersión de la DCF para el caso de estudio 1 y 2, la configuración híbrida en un enlace incrementa el nivel general de potencia, permitiendo compensar la atenuación originada por grandes longitudes de DCF; en consecuencia, una adecuada relación entre el coeficiente de dispersión y la longitud de la DCF favorece considerablemente la amplificación Raman-EDFA.

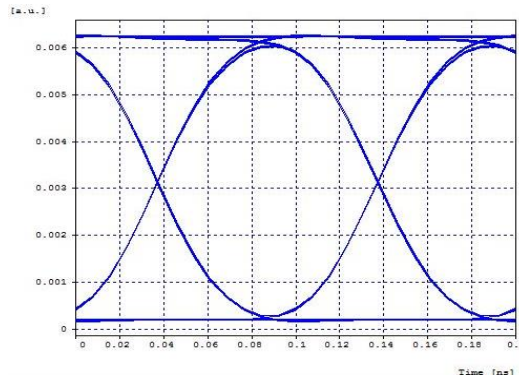
Particularmente, para una longitud de DCF de 10.71 Km, se observa que el incremento del coeficiente de dispersión debe hacerse a partir de -95 ps/nm*Km para cumplir con los parámetros de calidad definidos, lo cual significa, que un valor menor en el coeficiente de dispersión no es suficiente para compensar la dispersión en la red, de igual manera, para emplear valores menores de coeficientes de dispersión se requieren longitudes de DCF superiores.

De acuerdo a las dos pruebas realizadas para evaluar como diferentes coeficientes de dispersión de la DCF impactan en el desempeño de una amplificación híbrida, se concluye que para hacer un buen uso de la DCF en una configuración Raman-EDFA, teniendo en cuenta los coeficientes analizados, se recomienda utilizar longitudes de DCF determinadas por altos porcentajes de compensación para mejorar el desempeño del enlace, sin embargo, por razones de costos los operadores comerciales pueden desaprobado esta consideración.

4.4.1.3 Dispersión por modo de polarización (PMD)

Para determinar el impacto de la PMD en una distancia máxima de 160 Km, se varía el parámetro PMD dentro del entorno de simulación hasta conseguir un valor límite que cumpla los parámetros de calidad definidos. Para verificar este efecto lineal se analiza el desempeño de la red en presencia de todas las degradaciones, sin PMD y únicamente con PMD. Para visualizar con mayor claridad los dos últimos análisis no se tiene en cuenta las atenuaciones ni el ruido introducido por dispositivos de amplificación. La Figura 4.71 muestra el diagrama de ojo con todas las degradaciones, sin PMD, y únicamente con PMD respectivamente.





c)

Figura 4.71 Diagrama de ojo para un tramo de 160 Km: a) En presencia de todas las degradaciones, b) Sin PMD y c) Solo con PMD.

La Tabla 4.23 resume los parámetros de monitoreo óptico para la red en presencia de todas las degradaciones, ausencia de PMD y presencia solamente de PMD.

Tabla 4.23 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de PMD en la red.

Simulación	Factor Q (dB)	BER	OSNRout (dB)	Prx (dBm)
En presencia de todas las degradaciones	17,29	8,77e-15	26,01	-16,14
Sin PMD	17,29	8,77e-15	26,01	-16,14
Solo con PMD	36,97	1,00e-40	28,22	-1,01

De acuerdo a la Figura 4.71 (a) y (b), se observa que el efecto de la PMD no genera un gran impacto en el desempeño de la red. Sin embargo, la PMD puede conducir tanto a interferencia entre símbolos como a la inducción de grandes fluctuaciones en la señal al usar altos coeficientes. En fibras usadas en telecomunicaciones, el valor típico de PMD es relativamente pequeño y por tanto poco influyente en la degradación de los parámetros de calidad objetivos, dicha afirmación se comprueba en la Tabla 4.23, donde se muestra que los valores de BER, Factor Q y OSNR, en presencia de todas las degradaciones y en ausencia de PMD son exactamente iguales. Teniendo en cuenta lo anterior y con el fin de visualizar el efecto de la PMD, se generan valores de PMD superiores al tradicional para establecer la máxima tolerancia del sistema frente a dicho efecto lineal. La Tabla 4.24 muestra el comportamiento de la red ante estas variaciones.

Tabla 4.24 Parámetros de monitoreo para diferentes valores de PMD.

Valor de PMD ($\text{ps}/\sqrt{\text{Km}}$)	Factor Q (dB)	BER
1	31,13	1,00e-40
1.2	21,02	1,65e-28
1.5	18,20	1,54e-17
2	17,68	8,86e-15

De la Figura 4.72 (a), (b), (c) y (d), la cual muestra el diagrama de ojo para diferentes valores de PMD, se observa que a medida que aumenta el coeficiente de PMD el diagrama de ojo presenta mayores ladeaciones que degradan significativamente el desempeño de la red, lo que indica que la PMD tiene efectos sobre el enlace óptico, especialmente para valores diez veces más grande al valor típico de PMD para una fibra SSMF-28 ($0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$).



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

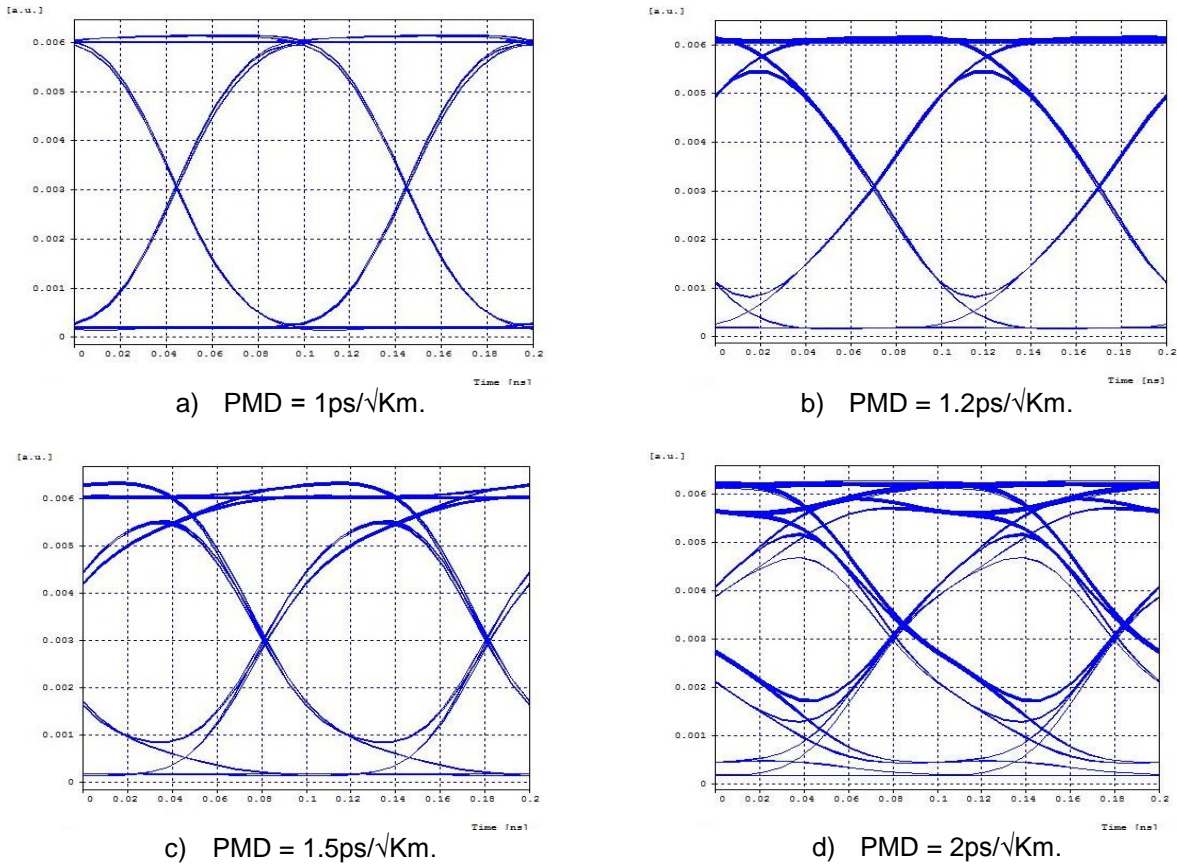


Figura 4.72 Diagrama de ojo debido a variaciones de PMD.

Mediante el análisis de los resultados obtenidos en la Figura 4.72, se determina que la máxima tolerancia al efecto de la PMD soportada por el caso de simulación 3, se encuentra alrededor de $2 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$, valor para el cual el enlace en condiciones únicamente de evaluación de PMD cumple los parámetros de desempeño objetivos; a partir de valores superiores, la red se ve altamente afectada por inclinaciones y desalineaciones que generan detecciones incorrectas. Finalmente, se concluye que la red es altamente tolerante al efecto de la PMD, debido a que el tipo de fibra utilizada en la red de estudio cuenta con un valor de PMD muy bajo ($0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$). Sin embargo, en comparación con el comportamiento del caso 2, la PMD en configuración híbrida es un efecto que limita en menor proporción la capacidad de la fibra, resultando más tolerante a la degradación de PMD en relación con la configuración Raman sin etapas de amplificación EDFA, esto debido principalmente a que la PMD introduce desfase adicional que reduce el valor promedio de la ganancia Raman, de lo anterior resulta que la penalidad de PMD para una configuración híbrida es menor puesto que su valor de ganancia Raman es sutilmente más elevado.



4.4.2 Análisis de efectos no lineales:

4.4.2.1 Automodulación de fase (SPM)

Para determinar el efecto SPM, se realizan dos análisis: en primer lugar, debido a que efectos no lineales como SPM, se presentan principalmente cuando se aplican altas potencias en la señal transmitida por la fibra óptica, se varía la potencia de los dispositivos de amplificación para verificar si al incrementar sus potencias se mantienen o no los parámetros de desempeño objetivos, un segundo análisis, consiste en evaluar el comportamiento de un canal variando la potencia del mismo en un rango de 0 a 25 dBm y fijando la potencia de los otros canales en valores determinados para evitar la presencia de efectos no lineales como XPM y FWM sobre el canal evaluado.

La Figura 4.73 (a) y (b), corresponde a los diagramas de ojo de la señal en variación de la potencia de los dispositivos de amplificación EDFA para 0 y 23 dBm respectivamente, con una potencia de transmisión de 5 dBm.

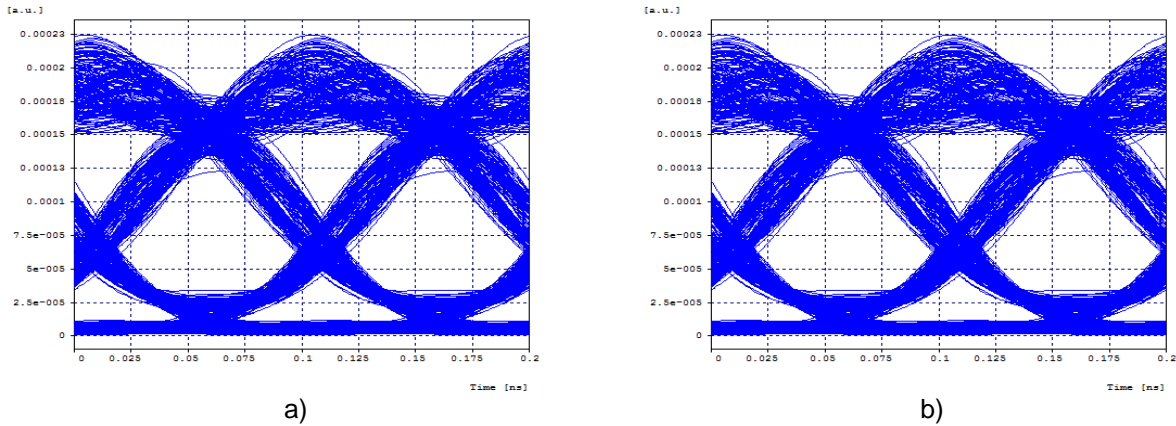


Figura 4.73 Diagrama de ojo con: a) Potencia EDFA= 0dBm y b) Potencia EDFA= 23dBm.

Así mismo, la Figura 4.74 (a) y (b), muestra el comportamiento de la red al incrementar la potencia de los amplificadores EDFA con variaciones en la potencia de transmisión de 0, 5 y 10 dBm (Anexo E, Tabla 10).

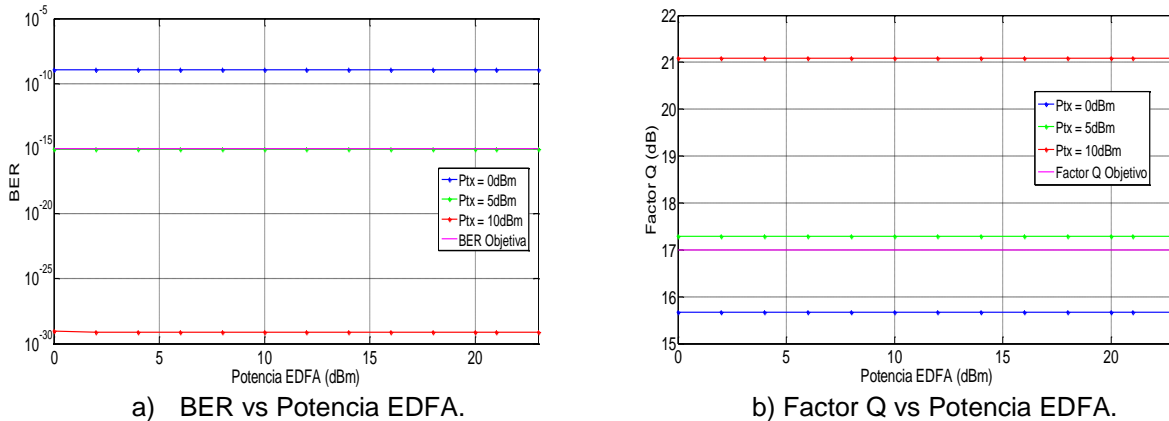


Figura 4.74 Desempeño de la red al realizar variaciones en la potencia de los dispositivos de amplificación EDFA para diferentes potencias de transmisión.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

Como se observa tanto en los diagramas de ojo (Figura 4.73), como en el comportamiento de los parámetros de calidad, el realizar variaciones en la potencia del EDFA (0 a 23 dBm), con distintas potencias de transmisión (Figura 4.74), muestra un desempeño constante en el enlace de transmisión, por lo tanto, el efecto SPM no resulta significativo al incrementar la potencia del dispositivo EDFA.

Por otra parte, para la segunda prueba, se analiza el efecto de SPM en el canal 1 (195,2 THz), variando la potencia del mismo en un rango de 0 a 25 dBm y asignando a los tres canales restantes valores de potencia no elevados. La Figura 4.75 (Anexo E, Tabla 11), muestra las variaciones sobre el canal medido.

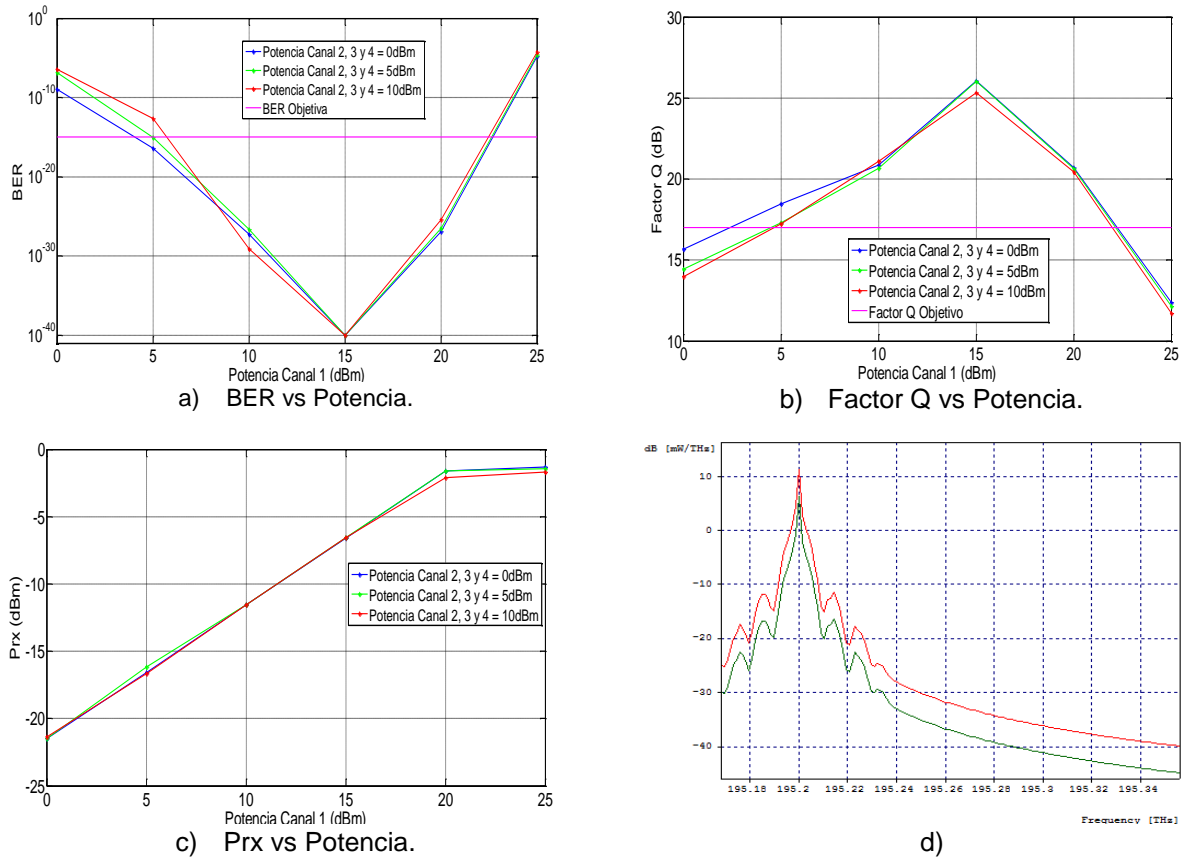


Figura 4.75 Desempeño del enlace en el canal 1: a), b) y c) Frente a las variaciones de las potencias de transmisión de los canales 2,3 y 4 y d) Espectro óptico en recepción para valores de potencia de transmisión de 5 dBm (verde) y 15 dBm (rojo).

La Figura 4.75 (a), (b) y (c), presenta el comportamiento entre la variación de la potencia de transmisión del canal 1 y los parámetros de monitoreo óptico (BER, Factor Q y Potencia en recepción), respecto a la potencia de los demás canales; se hace evidente que a medida que aumenta la potencia de dicho canal, el desempeño empieza a mejorar hasta una potencia de transmisión de 15 dBm, luego empieza a decrecer evidenciando el ensanchamiento espectral, ocasionado por el efecto SPM tal como se observa en la Figura 4.75 (d).

A diferencia del efecto generado por la automodulación de fase en la configuración Raman sin etapas de amplificación EDFA, la configuración híbrida, mantiene mejor desempeño

frente al efecto SPM para potencias de transmisión entre 0 y 15 dBm, debido a que el ancho de sus pulsos en el dominio de la frecuencia disminuye en relación al caso 2 (ver Figura 4.48 (d) y Figura 4.75 (d)). Sin embargo, es de resaltar que para potencias mayores a 15 dBm la configuración Raman-EDFA presenta un menor desempeño en el enlace, puesto que el nivel general de potencia se vuelve excesivo y afecta considerablemente la evolución de los pulsos del bombeo y la señal.

4.4.2.2 Modulación de fase cruzada (XPM)

Para determinar el efecto XPM, se realizan dos análisis, en primer lugar, se varía la potencia de los canales 2 y 3, mientras la potencia de los canales adyacentes permanece fija. El canal 2 y 3 actúan como canales de bombeo con el fin de verificar si sus potencias afectan las fases del canal 1 y 4, generando ensanchamiento en el espectro óptico; un segundo análisis, debido a que efectos no lineales como XPM dependen de la dispersión cromática, se varía la CD dentro de la fibra para verificar su dependencia con XPM.

La Figura 4.76 (Anexo E, Tabla 12), muestra la respuesta del canal 1 y 4 ante los efectos de propagación de diferentes potencias del canal 2 y 3 respecto a los parámetros de medida BER y Factor Q.

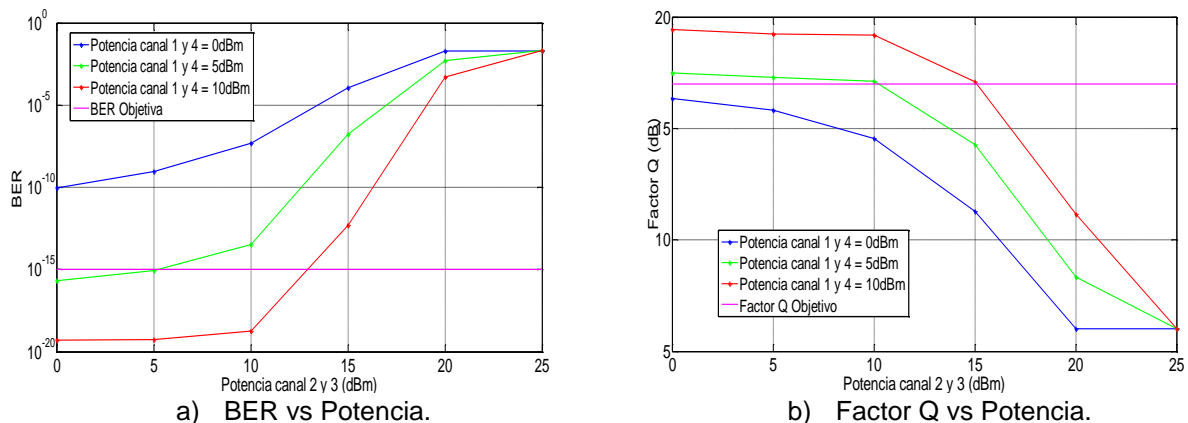


Figura 4.76 Comportamiento del canal 1 y 4, ante la variación de la potencia de transmisión de los canales 2 y 3.

De acuerdo a la Figura 4.76, se observa que para potencias de transmisión en los canales adyacentes superiores a 10 dBm, los parámetros ópticos de medida se empiezan a degradar por debajo de los niveles mínimos, esto debido al ensanchamiento que sufre la señal debido a XPM, volviéndose crítico a partir de 15 dBm. La Figura 4.77 muestra el efecto de XPM en el canal 1 mediante el análisis del espectro óptico de la señal de salida para tres niveles de potencia diferentes, donde se evidencia el mayor alargamiento en el espectro a medida que las potencias de los canales adyacentes aumentan.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

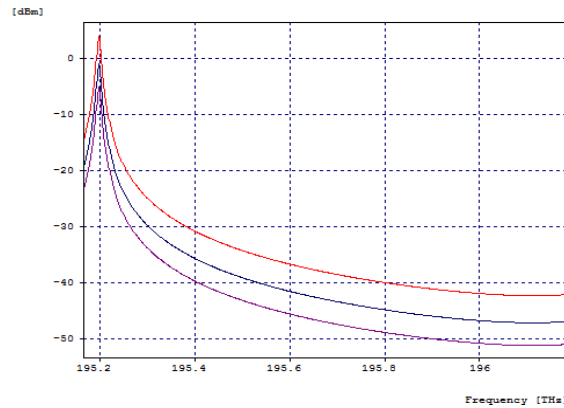


Figura 4.77 Espectro óptico a la salida del canal 1, para valores de potencia de transmisión de 0 dBm (Morado), 5 dBm (Azul) y 15 dBm (Rojo).

En la Figura 4.78, se muestra el espectro óptico de salida de la red dependiente del efecto de XPM, el cual presenta un moderado alargamiento comparado con el espectro óptico de entrada.

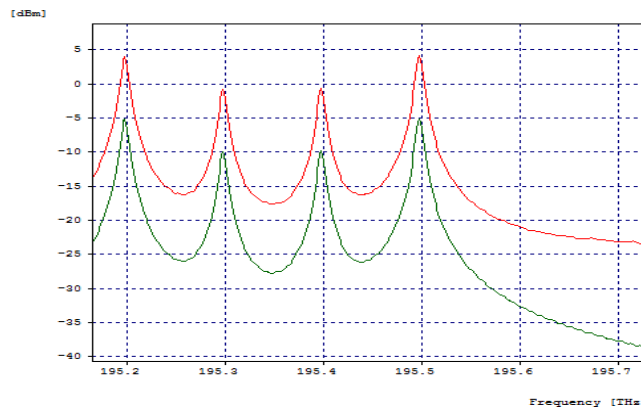


Figura 4.78 Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de salida (rojo) debido a XPM.

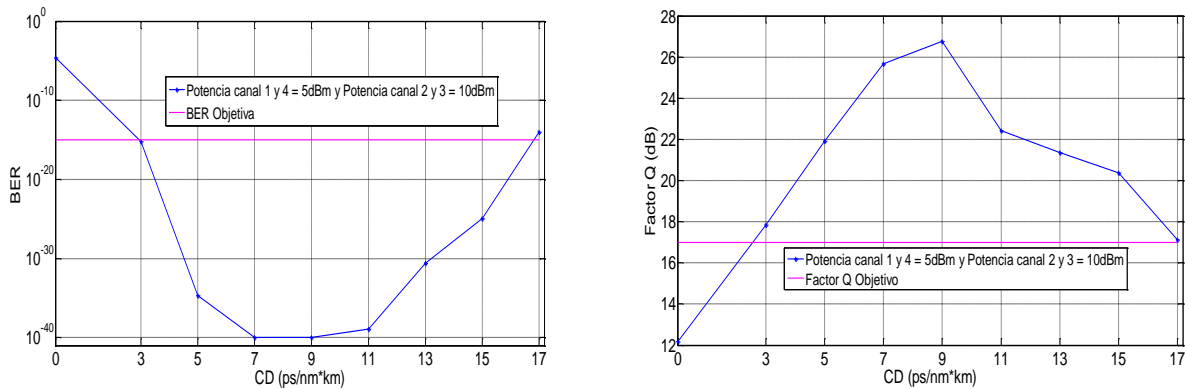
Mediante el análisis de los resultados obtenidos desde la Figura 4.76 hasta la Figura 4.78, XPM viene a ser un efecto significativo para la degradación del desempeño de la red cuando la diferencia de las potencias de entrada de los canales próximos es mayor a 10 dBm, dado que el aumento de sus niveles de potencias generan ensanchamiento sobre el espectro óptico lo que impide al enlace cumplir con los parámetros de calidad definidos. Por lo tanto la cantidad de ensanchamiento espectral introducido por XPM, bajo las características iniciales de operación de la red de estudio, resulta un efecto degradante en el desempeño del enlace, limitando la potencia de transmisión de los canales 2 y 3.

En la segunda prueba, se busca determinar el efecto de XPM mediante la variación de la dispersión cromática de la fibra SSMF-28 Corning; para esta prueba se define un rango de variación de CD de 0 a 17 ps/nm*Km con la finalidad de evaluar la dependencia de XPM con distintos coeficientes de dispersión cromática.

En la Figura 4.79 (Anexo E, Tabla 13), se muestra el comportamiento del enlace ante la variación del coeficiente de dispersión de la fibra SSMF Corning para una potencia de transmisión fija en los canales adyacentes 1 y 4 de 5 dBm y una potencia en los canales 2



y 3 de 10 dBm, para provocar efectos de ensanchamiento mediante la propagación de diferentes potencias a diferentes valores de coeficiente de dispersión.



a) BER vs Coeficiente de dispersión.

b) Factor Q vs Coeficiente de dispersión.

Figura 4.79 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de XPM mediante la variación del coeficiente de dispersión cromática.

De la Figura 4.79, se observa que para reducir los efectos de XPM se requiere aumentar la dispersión cromática. Sin embargo, es recomendable que el coeficiente de dispersión este por debajo de 18 ps/nm*Km, con el fin de evitar las degradaciones producidas producto de la misma dispersión cromática. Además se evidencia que el efecto de XPM es de mayor penalidad cuando la CD es 0 ps/nm*Km y de bajo o nulo impacto cuando la CD es 7 y 9 ps/nm*Km, debido a que un mayor valor de dispersión cromática reduce en gran proporción el ensanchamiento del pulso debido a XPM. De esta forma, se concluye que XPM no es muy crítico en regiones con alta dispersión cromática y que las limitaciones introducidas por XPM pueden ser indudablemente serias en el contexto de la red estudiada cuando las potencias de transmisión de los canales adyacentes se incrementen y además se asigne un valor de CD bajo. Sin embargo, en comparación con el comportamiento del caso de estudio 2, el efecto de XPM en una amplificación híbrida es un efecto no lineal que limita en mayor proporción la potencia de los canales, resultando la configuración Raman-EDFA menos tolerante a la degradación de XPM; la principal razón de que XPM limite la potencia, es el nivel general de intensidad que se presenta en el modelo de red cuando se hace uso tanto de amplificación Raman como de dispositivos de amplificación EDFA.

4.4.2.3 Mezcla de cuatro ondas (FWM)

Para determinar el efecto FWM, se realizan dos análisis; en primer lugar, se varía la potencia de los canales 2, 3 y 4 de forma simultánea dentro del rango de 0 a 25 dBm, mientras la potencia del canal 1 permanece fija; un segundo análisis, considera las variaciones de la dispersión cromática dentro de la fibra para verificar su dependencia con el efecto no lineal FWM.

La Figura 4.80 (Anexo E, Tabla 14), muestra la respuesta del canal 1 ante las variaciones de potencia de los canales 2, 3 y 4 respecto a los parámetros de medida BER y Factor Q.



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

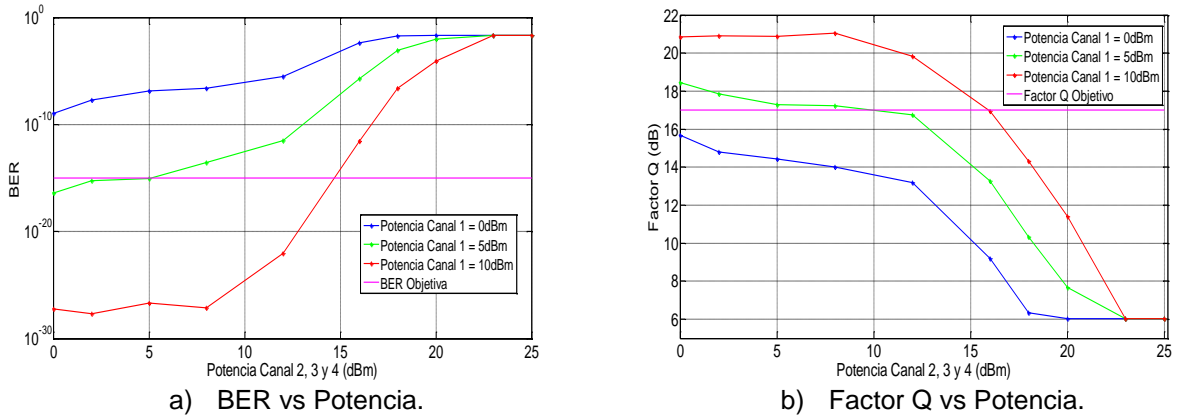


Figura 4.80 Comportamiento del canal 1, ante la variación de la potencia de los canales 2, 3 y 4.

De acuerdo a la Figura 4.80, se observa que a medida que las potencias de transmisión de los canales 2, 3 y 4 se incrementan, el rendimiento del canal evaluado empieza a descender por debajo de los niveles objetivos, a causa de componentes espectrales que coinciden con la transmisión de las frecuencias de los canales implementados. Los productos adicionales generados por FWM resultan críticos para valores superiores de potencia, dado que para dichas potencias las componentes originadas tienen mayor intensidad, resultando en la degradación de la calidad de transmisión para la red DWDM.

En la Figura 4.81, se muestra el espectro óptico de salida de la red dependiente del efecto FWM, para una potencia de transmisión del canal 1 de 5 dBm, el cual presenta la aparición de nuevas componentes de frecuencia indeseadas comparado con el espectro óptico de entrada.

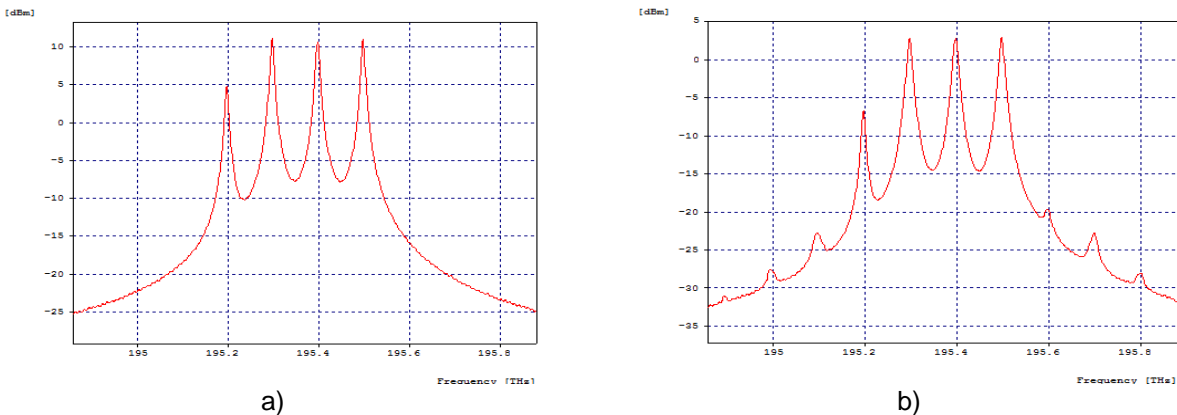


Figura 4.81 Espectro óptico de: (a) Entrada y (b) Salida debido a FWM.

Los resultados de la Figura 4.80 y Figura 4.81, indican que FWM causa nuevos productos de frecuencia en la zona espectral ocupada por las portadoras de los canales implementados, las cuales se convierten en una limitante cuando sus niveles de potencia se incrementan; ocasionando errores en el circuito de decisión del detector óptico. Sin embargo, para la red en estudio, el efecto FWM se manifiesta moderadamente, debido a que las nuevas frecuencias a la salida del medio de transmisión no han aumentado considerablemente su amplitud a expensas de la energía de las originales, razón por la cual no se considera una degradación significativa en la red.

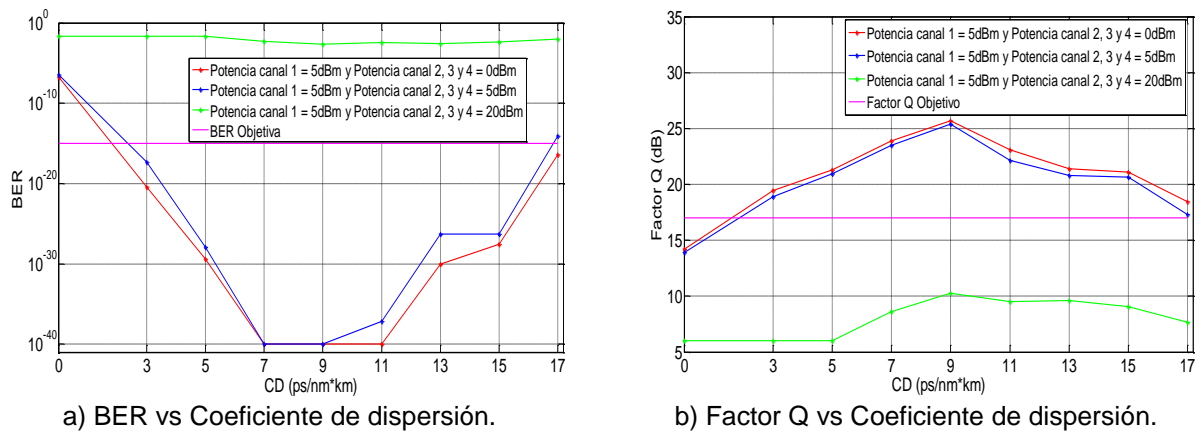


ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

El nivel general de potencia para una configuración híbrida es típicamente significativa, en consecuencia, las componentes espectrales generadas por FWM van a aumentar en amplitud, precisamente porque el utilizar una potencia de bombeo y una potencia suministrada por un dispositivo EDFA, dan lugar a una mayor influencia de FWM en el espectro; no obstante, el modelo de red planteado es adecuado para reducir la degradación generada por el efecto no lineal FWM. Generalmente este efecto es más significativo a medida que el espaciado entre canales disminuye, el número de canales aumente y se utilice configuración de fuente de bombeo Bi-direccional, dado que al aumentar el número de longitudes de bombeo se incrementa la probabilidad de componentes debido a FWM.

En la segunda prueba, se busca determinar el efecto FWM mediante la variación de la dispersión cromática de la fibra SSMF-28 Corning; para esta prueba se define un rango de variación de CD de 0 a 17 ps/nm*km, con la finalidad de evaluar la dependencia de FWM con distintos coeficientes de dispersión cromática.

En la Figura 4.82 (Anexo E, Tabla 15), se muestra el comportamiento del enlace frente a la variación del coeficiente de dispersión de la fibra SSMF-28 Corning para una potencia de transmisión fija en el canal 1 asignada en 5 dBm y una potencia variable en los canales 2, 3 y 4.



a) BER vs Coeficiente de dispersión.

b) Factor Q vs Coeficiente de dispersión.

Figura 4.82 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto FWM mediante la variación del coeficiente de dispersión cromática.

De acuerdo a la Figura 4.82, la degradación generada por FWM ante la variación del coeficiente de dispersión, afecta en mayor medida a valores de dispersión por debajo de los 5 ps/nm*km y beneficia valores de dispersión altos. Sin embargo, es recomendable que el coeficiente de dispersión este por debajo de los 18 ps/nm*km para evitar degradaciones producto de la misma dispersión cromática. Además se observa que el efecto de FWM es de menor penalidad cuando la CD está en el intervalo de 7 a 11 ps/nm*km, debido a que un mayor valor de dispersión reduce la aparición de nuevas frecuencias perjudiciales generadas por FWM; no obstante, en 17 ps/nm*km surgen componentes extras que afectan el ancho de banda de las señales propagadas, pero aun así, no son realmente significativas en el desempeño del enlace. De esta manera, se concluye que FWM es más intensivo si la dispersión es nula y que las limitaciones introducidas por FWM pueden ser evidentemente dañinas en el contexto de la red de estudio cuando las potencias de los canales 2, 3 y 4 se incrementen por encima de los 10 dBm y se utilice fibras en ausencia de dispersión.



Después de realizar el análisis de las diferentes degradaciones que afectan la transmisión de una red basada en amplificación Raman-EDFA, se concluye qué:

- Para los sistemas de transmisión ópticos de largo recorrido, la amplificación Raman-EDFA se encamina generalmente como la configuración más común a implementar, debido a la mayor distancia conseguida a partir de su combinación y a su desempeño aceptable frente a algunas degradaciones presentes en la red; si bien la configuración híbrida se presenta como una tecnología prometedora para redes DWDM de largo alcance, el costo de su despliegue resulta más elevado.
- Uno de los principales problemas para la red caracterizada correspondiente al caso de estudio 3, es la degradación debido al alto nivel de atenuación que introduce enlaces de largas distancias al emplear segmentos de red extensos; razón por la cual se disminuye la longitud del span para cubrir la distancia mínima objetiva de 600 Km.
- La configuración híbrida es esencial, no sólo para maximizar la longitud del tramo, sino también para superar las limitaciones de ancho de banda y figura de ruido, ventajas que mejoran la capacidad del sistema, convirtiéndola en una amplificación de excelente rendimiento.
- El uso general de una DCF en Post-compensación al emplear amplificación híbrida, permite mantener niveles aceptables de desempeño en largas distancias, dado que la DCF compensa en parte la dispersión cromática acumulada en el enlace; pero sí por el contrario, no se usa una DCF, la dispersión presente en el sistema se hace realmente significativa en la calidad del desempeño. Finalmente, el resultado deseado en una configuración Raman-EDFA se consigue con la integración de una DCF, aunque, tanto para su coeficiente de dispersión como para el coeficiente de atenuación se hace necesario definir una adecuada configuración de sus parámetros para optimizar su empleo en la red, pues de no hacerlo, la alta atenuación presente en la misma se convierte en un factor limitante en la transmisión de las señales, afectando los parámetros de calidad objetivos.
- La dispersión cromática de la fibra es uno de los parámetros de mayor impacto en el comportamiento de los efectos no lineales. La amplificación híbrida puede ser muy provechosa sobre todo cuando se utilizan fibras con baja CD.
- En sistemas donde los trayectos alcanzan miles de kilómetros, se requiere incrementar la potencia de los canales de transmisión o hacer uso de dispositivos de amplificación para mantener niveles de señal aceptables, lo cual causa que los efectos no lineales se manifiesten en mayor medida; de hecho, cuando la diferencia en las potencias de los canales de transmisión son considerables, XPM y FWM son las no linealidades que limitan el umbral mínimo requerido de la red en estudio.



4.5 Análisis comparativo en el desempeño de una red DWDM a 10 Gbps, al usar configuraciones Raman con fibras DCF.

Una vez analizada la incidencia de usar configuraciones Raman con fibras DCF sobre el desempeño de una red DWDM, se genera la Tabla 4.25, donde se resume el comportamiento del sistema referente a analizar comparativamente el desempeño de los escenarios mediante la determinación de la máxima distancia alcanzada por un segmento de red, concatenación de segmentos de red y el análisis frente a las degradaciones (como ruido y pérdidas, CD, PMD, SPM, XPM y FWM), donde se hace referencia al nivel de tolerancia de cada caso de estudio (configuración Raman), siendo:

- ❖ Muy Alta: hace referencia a niveles de tolerancia donde las degradaciones no son considerables para las configuraciones Raman, resultando en una degradación de nulo impacto en el desempeño de la red.
- ❖ Alta: hace referencia a niveles de tolerancia donde las degradaciones son mínimas para las configuraciones Raman, resultando en una degradación de bajo impacto en el desempeño de la red.
- ❖ Media: hace referencia a niveles de tolerancia en el cual las degradaciones son poco considerables para las configuraciones Raman, en donde a pesar de presentar degradación en los parámetros de desempeño óptico, estas no aportan significativamente en el desempeño de la red.
- ❖ Baja: hace referencia a niveles de tolerancia donde las degradaciones son considerables para las configuraciones Raman, dado que degradan notablemente el desempeño de la red.
- ❖ Muy Baja: hace referencia a niveles de tolerancia donde las degradaciones afectan de manera significativa las configuraciones Raman, dado que degradan excesivamente el desempeño de la red y en general deben ser contrarrestadas apropiadamente y eficientemente para mantener el cumplimiento de los parámetros de calidad.

Mediante el análisis de los resultados obtenidos se concluye:

El concatenar segmentos de red resultó aún más beneficioso para la configuración Raman híbrida alcanzando una distancia total de 2520 Km y encontrándose que hasta el treintaseisavo span fue posible mantener los parámetros de desempeño objetivos.

La dispersión cromática afecta en mayor proporción al caso de estudio 2, puesto que presenta mayor alargamiento temporal de los pulsos a lo largo de su propagación en comparación a los casos de estudio 1 y 3; dicho alargamiento puede limitar seriamente el desempeño de la red, debido a que los pulsos pueden interferirse más rápidamente unos con otros generando ISI, la cual afecta la BER en el receptor.

En general para los 3 casos de estudio el efecto de dispersión por modo de polarización no tiene incidencia alguna en el desempeño de la red de estudio; de lo anterior resulta que las configuraciones Raman son altamente tolerables al efecto de la PMD.



El efecto SPM se manifiesta levemente en el desempeño de la red para los casos de estudio 1 y 3, y moderadamente para el caso de estudio 2, a causa de un mayor ensanchamiento espectral; SPM viene a ser un efecto significativo para la degradación del desempeño de la red para los tres casos de estudio para potencias superiores a 20 dBm, donde la configuración solo Raman presenta un menor desempeño en el enlace, producido por el agotamiento en la potencia de bombeo a lo largo de la fibra, donde la señal decrece más rápido y con menor energía, resultando en un desplazamiento de fase no lineal de los pulsos de la señal y el bombeo, lo que conlleva a una modificación desfavorablemente la forma espectral de las señales ópticas.



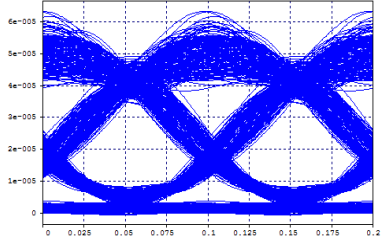
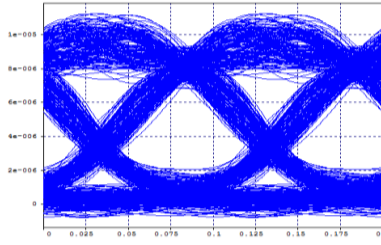
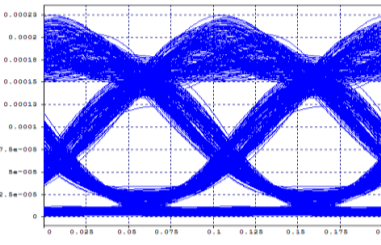
XPM viene a ser un efecto significativo para la degradación del desempeño de la red para los tres casos de estudio cuando la diferencia de las potencias de entrada de los canales próximos es mayor a 10 dBm; adicionalmente el efecto XPM se manifiesta levemente en el desempeño de la red para los casos de estudio 1 y 2, y moderadamente para el caso de estudio 3, representado en un mayor ensanchamiento espectral debido al nivel general de intensidad que se presenta en el modelo de red cuando se hace uso tanto de amplificación Raman como de dispositivos de amplificación EDFA.

El efecto FWM se manifiesta levemente en el desempeño de la red para el caso de estudio 1, y moderadamente para los casos de estudio 2 y 3, evidenciándose la aparición de un mayor número de componentes espectrales indeseadas alrededor de las portadoras debido al alto nivel de intensidad suministrado por la potencia de bombeo cercana al medio vatio de la amplificación Raman y dispositivos de amplificación EDFA.

Para dar respuesta a la pregunta de investigación planteada en el anteproyecto y de acuerdo a los resultados obtenidos de la Tabla 4.25, se observa que emplear configuraciones Raman con fibras DCF presenta una incidencia favorable en el comportamiento de una red DWDM, a 10 Gbps, debido a las ventajas entregadas no sólo en distancias máximas alcanzadas, sino también, en los aceptables niveles de tolerancia frente a las degradaciones ópticas tras realizar una adecuada configuración en los parámetros del modelo de red.



Tabla 4.25 Análisis comparativo de las configuraciones Raman con fibras DCF sobre el desempeño de una red DWDM a 10 Gbps.

 Ventaja  Desventaja		CASO DE ESTUDIO 1 <i>Amplificación EDFA sin Raman</i>	CASO DE ESTUDIO 2 <i>Amplificación Raman sin EDFA</i>	CASO DE ESTUDIO 3 <i>Amplificación Raman con EDFA</i>
<i>Diagrama del ojo con todas las degradaciones ópticas</i>				
<i>Distancia máxima alcanzada por un segmento de red</i>		150 km	153 Km	160 Km
<i>Distancia máxima por un segmento de red con etapas EDFA</i>	<i>Booster e Inline</i>	134 Km	No aplica	158 Km
	<i>Inline</i>	150 Km	No aplica	160 Km
<i>Distancia máxima alcanzada mediante enlaces concatenados</i>		770 Km (11 span's de 70 Km)	1260 Km (18 span's de 70 Km)	2520 Km (36 span's de 70 Km)
<i>Distancia máxima mediante enlaces concatenados con etapas EDFA</i>	<i>Booster e Inline</i>	770 Km	No aplica	1960 Km
	<i>Inline</i>	560 Km	No aplica	2520 Km



ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED DWDM, A 10 Gbps, AL USAR CONFIGURACIONES RAMAN CON FIBRAS DCF.

<i>Tolerancia al Ruido y pérdidas</i>	MEDIA	BAJA	MEDIA
<i>Tolerancia a CD</i>	MEDIA	BAJA	MEDIA
<i>Tolerancia a PMD</i>	MUY ALTA	ALTA	ALTA
<i>Tolerancia a SPM</i>	ALTA	MEDIA	ALTA
<i>Tolerancia a XPM</i>	ALTA	ALTA	MEDIA
<i>Tolerancia a FWM</i>	ALTA	MEDIA	MEDIA



CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

En el actual capítulo, se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros relacionados con el desarrollo del presente proyecto de grado. Las conclusiones son resultado de los objetivos y análisis de las simulaciones, las recomendaciones y trabajos futuros son producto de la metodología y ejecución de la simulación.

5.1 Conclusiones

- A partir del análisis y los resultados obtenidos, se evaluó el desempeño de las configuraciones Raman frente a los efectos lineales y no lineales para determinar cuál de las configuraciones aporta ventajas fundamentales para ser implementada en redes de fibra óptica, donde fueron identificados en cada uno de ellas los factores que más inciden negativamente en la calidad de transmisión, así pues, los resultados conseguidos pueden contribuir en decisiones futuras para el mejoramiento de las redes ópticas y de esta manera, dependerá principalmente de las condiciones específicas del operador y del costo de implementación para sus despliegues.
- Con el desarrollo de este trabajo de grado, en especial con los resultados obtenidos en el tercer caso de estudio, se comprobó, que la configuración híbrida presenta mejor rendimiento, pues al realizarse un análisis de las degradaciones que más influyeron en el desempeño general del enlace, la red no se ve alterada en gran medida, consiguiendo aumentar la distancia máxima de transmisión; en consecuencia, la configuración Raman-EDFA se presenta como la mejor configuración para comunicaciones de larga distancia, aunque, es la más costosa de implementar.
- Parámetros de la DCF, como longitud, coeficiente de dispersión y coeficiente de atenuación, impactan considerablemente en el desempeño de las configuraciones Raman, por esta razón, se hace necesario definir una adecuada relación de sus parámetros para optimizar su empleo en la red, pues de no hacerlo, la atenuación introducida por este tipo de fibras se convierte en un factor limitante en la transmisión de las señales, afectando negativamente el desempeño de la red.
- Las propiedades que convierten a la fibra óptica en un medio de ganancia son cruciales para la viabilidad de las redes que empleen el fenómeno de amplificación Raman, dado que parámetros como la dispersión cromática, atenuación, PMD y área efectiva, ocasionan modificaciones significativas en el desempeño general de su efecto.
- Se comprobó que la dispersión cromática, y la tolerancia al ruido y pérdidas en un sólo segmento de red, son los efectos que más degradan el desempeño de las configuraciones Raman estudiadas, siendo los efectos más limitantes para la amplificación Raman sin etapas EDFA, afectando maximizar la distancia alcanzable y calidad de la señal recibida.
- Es necesario definir un adecuado nivel de potencia de transmisión en redes que empleen amplificación Raman, puesto que el utilizar una fuente de bombeo, eleva el



nivel general de intensidad, dando lugar a una mayor influencia de efectos no lineales que degradan el desempeño de la red.

- Utilizar amplificación Raman junto con compensación de la dispersión mediante una DCF, permite incrementar la distancia máxima a la lograda con la configuración de amplificación EDFA sin Raman, evidenciándose mayormente la mejora en enlaces concatenados, obteniendo entre 490 y 1750 Km de más cuando no se emplea amplificación Raman en la red.

5.2 Recomendaciones

Para la realización del estudio del desempeño al usar configuraciones Raman con fibras DCF, es necesario tener en cuenta un orden de recomendaciones que resultan de bastante ayuda para la obtención y análisis de resultados que serán nombradas a continuación:

- Revisar bibliografía disponible acorde al tema de interés para la realización del trabajo de grado, con el fin de ampliar el marco teórico y fundamentar alternativas para lograr el cumplimiento de los objetivos definidos
- Precisar una metodología de simulación para seguir un orden, desarrollar con mayor facilidad y obtener los resultados acordes al contexto sobre el cual se plantea el desarrollo del proyecto de grado.

5.3 Trabajos futuros

Mediante el cumplimiento de los objetivos del trabajo de grado, se identificaron nuevas investigaciones concernientes al análisis comparativo en el desempeño de una red DWDM a 10 Gbps, al usar configuraciones Raman con Fibras DCF, tales como:

- Evaluar la incidencia de usar configuraciones Raman con fibras DCF en el desempeño de una red DWDM, para velocidades de transmisión superiores a 10 Gbps.
- Verificar el impacto de diferentes formatos de modulación en una red DWDM al usar configuraciones Raman con fibras DCF frente a efectos lineales y no lineales para velocidades de transmisión de 10, 40 y 100 Gbps.
- Estudiar la incidencia en el desempeño de una red DWDM, para diferentes velocidades de transmisión, al usar configuraciones Raman con diferentes técnicas de compensación ópticas y electrónicas.
- Analizar el impacto en el desempeño de una red DWDM para 10, 40 y 100 Gbps, al emplear diferentes tipos de fibra óptica para configuraciones Raman con fibras DCF.
- Realizar un análisis comparativo respecto al impacto en el desempeño de una red DWDM, al implementar amplificaciones híbridas como es el caso EDFA-SOA, Raman-SOA y Raman-EDFA, para velocidades de transmisión iguales y/o superiores a 10 Gbps.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. García, "Diseño y caracterización de sistemas optoelectrónicos de comunicaciones basados en fibra óptica," Tesis de Pregrado, Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad Carlos III de Madrid, Getafe, España, 2011.
- [2] J. R. Santamaría, "Sistemas de Multiplexación CWDM: actualidad, ventajas y desventajas frente a otros sistemas de multiplexación y tendencias," Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Costa Rica, Costa Rica, 2004.
- [3] X. Liu, "Optimization of Broadband Raman Amplification In Ultra-long-haul DWDM Transmissions," en *Lasers and Electro-Optics*, Long Beach, USA, 2002, vol. I, pp. 479-480.
- [4] K. J. Hoyos y J. S. Vélez, "Impacto de las Propiedades de una Fibra Compensadora de Dispersión (DCF) en el Diseño de un Sistema WDM," Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2013.
- [5] L. Gruner-Nielsen, Y. Qian y P. B. Gaarde, "Dispersion compensating fibers for Raman applications," en *Raman Amplifiers for Telecommunications 1*, New York: Springer Science + Business Media Inc, 2006, pp. 115-143.
- [6] W. Tomasi, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, Cuarta edición, México: Pearson Educación, 2003.
- [7] C. A. García, "Análisis de la Tecnología IP sobre WDM," Tesis de Pregrado, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, 2006.
- [8] O. R. Alvarado, "Recomendaciones para el diseño, implementación y puesta en servicio de red DWDM para empresa de telecomunicaciones en el Salvador," Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería, Universidad do Bosco, San Salvador, El Salvador, 2009.
- [9] R. J. Millán, "Estudio y Diseño de Multiplexores por División en Longitud de Onda (WDM) mediante efectos Electroópticos, Termoópticos y Acustoópticos," Tesis de Pregrado, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad de Valladolid, Valladolid, España, 1998.
- [10] "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid," ITU-T Rec. G.694.1, Noviembre 2012.
- [11] "Spectral grids for WDM applications: CWDM frequency grid," ITU-T Rec. G.694.2, Diciembre, 2003.
- [12] R. J. Millán, "CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)," *bit*, n^o 158, pp. 60-62, Ago-Sep 2006.



- [13] E. I. Mena y R. E. Mendoza, "Diseño de una red WDM para Andinatel S.A en la provincia de Tungurahua," Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2009.
- [14] R. W. Cadena, "Estudio de la red óptica CWDM (Coarse wavelength Division Multiplexing) y propuesta de una metodología de diseño," Tesis de Pregrado, Escuela de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2005.
- [15] R. P. Grébol, "Análisis de espectro en redes de fibra óptica," Promax Electrónica, n° 362, pp. 70-73, Mar 2005.
- [16] J. J. Astudillo y E. Y. Ramírez, "Manual para la caracterización de la fibra óptica en DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)," Tesis de Pregrado, Facultad Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2014.
- [17] A. Gumaste y T. Antony, DWDM Network Designs and Engineering Solutions, Indianapolis: Cisco Press, 2002.
- [18] G. Gómez y J. F. Grijalba, "Análisis del desempeño de formatos de modulación en comunicaciones ópticas sobre redes WDM," Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2010.
- [19] L. D. Melendez, "Estudio de integración de redes DWDM con las redes Metro Ethernet," Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica, 2013.
- [20] D. Sembroiz, "Desarrollo de un algoritmo energy-aware de enrutamiento y asignación de longitudes de onda en redes ópticas," Tesis de Pregrado, Departamento de Arquitectura de Computadores, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España, 2013.
- [21] CWDM/DWDM integration – an easy-to-realize expansion of existing CWDM systems (2012), Pan Dacom Direkt. [En línea]. Disponible: <http://www.pandacomdirekt.com/en/technologies/wdm/cwdmdwdm-integration.html> [Último acceso: 20 Febrero 2015].
- [22] D. Van den Borne, "Robust Optical Transmission Systems: Modulation and Equalization," Tesis Doctoral, Universidad Técnica de Eindhoven, Holanda, 2008.
- [23] J. C. Ferrin, "Estudio y Diseño de una propuesta para el mejoramiento de la capacidad de la red de fibra óptica de la UCSG utilizando tecnología DWDM," Tesis de Pregrado, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2014.
- [24] D. F. Melo y J. A. Ruiz, "Análisis de Desempeño de Diferentes Técnicas de Compensación Ópticas y Electrónicas para la Dispersión Cromática en Redes WDM,"



Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2011.

- [25] R. Blanco, "Desarrollo de una GUI para el estudio de Sistemas de Comunicaciones Ópticas," Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2012.
- [26] M. S. Fajardo, "Simulación de Códigos de Línea destinada a transmisiones de datos en forma digital," Tesis de Pregrado, Facultad de Educación Técnica para el desarrollo, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2014.
- [27] B. Chomycz, Planning Fiber Optic Networks, The McGraw-Hill Professional, 2009.
- [28] A. F. Ocampo, "Simulación de un enlace de fibra óptica basado en WDM (Wavelength Division Multiplexing) utilizando POFS (Polymer Optical Fiber) en el espectro de luz visible," Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2014.
- [29] S. L. Criollo y F. R. Lasso, "Impacto de la fibra óptica sobre el desempeño de una red WDM a 10 Gb/s," Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2014.
- [30] M. A. Mendoza, "Estudio de factibilidad para el gerenciamiento del proceso de migración de SDH a DWDM de la red de fibra óptica de la Corporación Nacional de Telecomunicaciones en Quito," Tesis de Maestría, Departamento de Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador, 2013.
- [31] A. Ortiz, "Contribución al estudio de la amplificación Raman en Fibras ópticas," Tesis Doctoral, Dept Fis, Universidad de Córdoba, Córdoba, Colombia, 2013.
- [32] R. Ramaswami y K. N. Sivarajan, Optical Networks: A Practical Perspective, Segunda edición, USA: Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- [33] E. Alvarez, C. G. Hernández y G. A. Quiroz, "Transmisiones ópticas mediante el uso de solitones," Tesis de Pregrado, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Instituto Politécnico Nacional, México D.F, México, 2007.
- [34] O. I. Gaxiola, "Simulador de un sistema de comunicación óptico empleando multicanalizador por división de longitudes de onda (WDM)," Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, Tijuana B.C, México, 2005.
- [35] J. A. Hernández, "Theory and experiment in modular Raman spectroscopy with fiber optics applied to the analysis of pigments," Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España, 2011.



- [36] A. Carrasco, "Generación de frecuencias de referencia para la calibración de sistemas WDM en comunicaciones ópticas," Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Granada, España, 2007.
- [37] A. Macho, "Comunicaciones ópticas de banda ancha con fase modulada: "Estudio de la degradación de la señal óptica," Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2013.
- [38] M. M. Rocco, et al. "Brillouin Effects in Distributed Raman Amplifiers under Saturated Conditions," en Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), SBMO/IEEE MTT-S International, pp. 841-845, 2009.
- [39] H. J. Khashi , M. A. Hameed y A. A. Ramadan, "Mathematical Model of Amplified Stimulated Raman Scattering and Fiber Raman Amplifier," en Iraqi Journal of Physics , vol. V, nº 1, pp. 42-45, 2008.
- [40] "Optical fibres, cables and systems," ITU-T Manual, 2009.
- [41] O. Frazao, C. Correia, M. M. Rocco, M. B. Marques, H. M. Salgado, M. G. Martinez, J. W. Costa, A. P. Barbero y J. M. Baptista, "Stimulated Raman Scattering and its Applications in Optical Communications and Optical Sensors," The Open Optics Journal , nº 3, pp. 1-11, 2009.
- [42] A. Okhrimchuk, G. Onishchukov y F. Lederer, "Long-haul soliton transmission in a standard fiber at 1.3 um with distributed Raman amplification," Conference on lasers and Electro-Optics, pp. 343-344, 2000.
- [43] C. C. Chan, Optical Performance Monitoring, Advanced Techniques for Next-Generation Photonic Networks, California: ELSEIVER, 2010.
- [44] J. G. López, A. Toledo, H. Ordóñez y J. P. Agredo, "Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM," Revista Facultad de Ingeniería, UPTC, vol. XX, nº 31, pp. 23-35, Jul-Dic 2011.
- [45] A. Escallón , J. Barrios y A. Toledo, "Incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana WDM," Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, vol. II, nº 12, pp. 12-19, 2008.
- [46] J. P. Agredo y H. J. Ordoñez, "Análisis del desempeño en redes WDM frente a variaciones en los parámetros de transmisión y su incidencia en los efectos no lineales," Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2010.
- [47] G. P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems," Presentación, Institute of Optics University of Rochester.
- [48] C. A. Ararat y E. D. Paz, "Análisis del desempeño de los formatos (RZ-NRZ)/DQPSK a 10 y 40 Gbps en una Red Metropolitana DWDM," Tesis de Pregrado, Facultad de



Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2013.

- [49] Telnet Redes Inteligentes, "Fibra Óptica para NGN-Dispersión Cromática y PMD," 2009.
- [50] L. C. Hinojosa, "Temas Selectos de Fibra Óptica," Tesis de Pregrado, Universidad Autónoma del estado de Hidalgo, Pachuca, México, 2007.
- [51] A. G. Molina, A. M. Cárdenas y C. Carmona, "Benefits and drawbacks of SPM in single-channel 10 Gbps DPSK transmission," Communications Conference (COLCOM), 2012 IEEE Colombian, pp. 1-5, Dic 2012.
- [52] H. Guano , P. Molina y M. Jiménez, "Estudio y Simulación de los efectos no lineales Scattering Estimulado de Brillouin (SBS) y Scattering Estimulado de Raman (SRS) en una Fibra Óptica Monomodo," Revista EPN, vol. 33, nº 3, Ene 2014.
- [53] A. Fakhri, S. Jagtap y S. Panbude, "DWDM link with Multiple Backward Pumped Raman Amplification," International journal of Computational Engineering Research, vol. III, pp. 31-40, Nov 2013.
- [54] G. P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, Tercera edición, New York:WileyInterscience, 2002.
- [55] A. González, "Análisis de Atenuación, Dispersión y Automodulación de Fase en Sistemas de Comunicaciones de Único Canal por Fibra Óptica a 10Gbps," Tesis de Maestría, Centro de Investigaciones en Óptica A.C, León Guanajuato, México, 2007.
- [56] E. J. Gualda, "Optimización de las prestaciones de enlaces ópticos submarinos de gran capacidad y larga distancia mediante el control de la dispersión," Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España, 2005.
- [57] S. P. Singh y N. Singh, "Nonlinear effect in optical fibers: origin management and applications," Progress In Electromagnetics Research, pp. 249-275, 2007.
- [58] "Application-related aspects of optical amplifier devices and subsystems," ITU-T Rec. G.663, Abril, 2011.
- [59] "Supervisión óptica para sistemas de multiplexación por división en longitud de onda densa," ITU-T Rec. G.697, Febrero, 2012.
- [60] "Optical system design and engineering considerations," ITU-T Rec.G.Supplement39, Septiembre, 2012.
- [61] J. A. Dinamarca, "Análisis de Diagramas de Ojo," Tesis de Pregrado, Universidad Técnica de Federico Santa María, Chile, 2002.



- [62] On Semiconductor, "Understanding Data Eye Diagram Methodology For Analyzing High Speed Digital Signals," Semiconductor Components Industries, Phoenix, USA, Rev-1 (AND9075/D) , Junio 2014.
- [63] Corporate Headquarters, "Introduction to DWDM for Metropolitan Networks," Cisco Systems Inc, USA, OL-0884-01, 2000.
- [64] D. F. Alzate, "Retos en la transmisión de 40/100 Gbps sobre fibra óptica," Revista en Telecomunicaciones e Informática, vol. I, nº 2, pp. 23-60, Jul-Oct 2011.
- [65] M. P. Fedoruk, et al, "Lasers and Electro-Optics, 2007 and the International Quantum Electronics Conference. European Conference on IEEE, pp. 1, 2007.
- [66] S. Banerjee, A. Agarwal, D. F. Grosz , A. P. Kung, D. N. Maywar, M. Movassaghi y T. H. Wood, "Long-haul 64 x 40 Gbps DWDM transmission over commercial fibre types with large operating margins," ELECTRONICS LETTERS, vol. 39, nº 1, pp. 92-94, Ene 2003.
- [67] Shangai Chucheng Information Technology Co (2014), Alibaba. [En línea]. Disponible: http://chucheng.en.alibaba.com/product/1854539884-220193585/Huawei_Metro_6040_WDM_Huawei_Metro_6040_DWDM.html. [Último acceso: Febrero 2015].
- [68] K. M. Salas, "Interferómetro Mach Zehnder en fibra óptica utilizando rejillas de periodo largo," Tesis de maestría, Centro de Investigaciones en Óptica A.C, León Guanajuato, México, 2010.
- [69] "Characteristics of a single-mode optical fiber and cable," ITU-T Rec. G.652, Noviembre 2009.
- [70] Corning, "Corning SMF-28 Optical Fiber Product Information," Corning Incorporated, Release V100R004, New York, USA, Abril 2002.
- [71] S. P. Neves, M. Freitas, R. T. R Almeida y L. C. Calmon, "Raman Amplifier performance of dispersion compensating fibers," Microwave and Optoelectronics Conference, 2003. IMOC 2003. Proceedings of the 2003 SBMO/IEEE MTT-S International, vol. 2, pp. 553-558, Mar 2003.
- [72] S. P. Neves Cani y L. C. Calmon, "Performance Evaluation of Simultaneous Dispersion Compensation and Raman Amplification using Microstructured Optical Fibers," Microwave and Optoelectronics, 2005 SBMO/IEEE MTT-S International Conference, pp. 546-549, May 2005.
- [73] Cisco System, «Raman C-Band Optical Amplifier for the Cisco ONS 15454 Multiservice Transport Platform," San Jose, USA, 2008.



- [74] O. M. Ulgen, J. J. Black, B. Johnsonbaugh y R. Klungle, "Simulation Methodology -- A Practitioners Perspective," Michigan Simulation User Group, Technical Committee on Simulation Methodology, 2000.
- [75] U. P. d. Navarra, «Arquitectura de Redes Sistemas y Servicios: Conceptos de simulación y OPNET," 2004.
- [76] RSoft Design Group Inc, "OptSim User Guide," New York, USA, 2004.