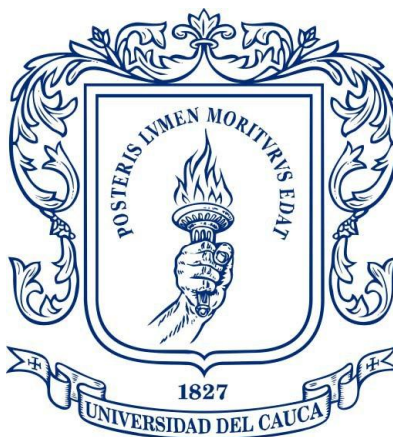


**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO EN LA MIGRACIÓN DE UNA RED
DWDM DE 10 A 40 Gbps, ANTE LAS VARIACIONES DE LAS PROPIEDADES DE UNA
FIBRA COMPENSADORA DE DISPERSIÓN (DCF)**

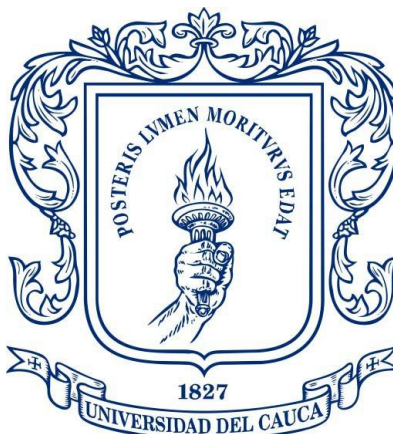


**Julián Silva Chávez
Yovan Ariel Díaz García**

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
GNTT – Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones
Popayán, Abril 2016

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO EN LA MIGRACIÓN DE UNA RED DWDM DE 10 A 40 Gbps, ANTE LAS VARIACIONES DE LAS PROPIEDADES DE UNA FIBRA COMPENSADORA DE DISPERSIÓN (DCF)



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

**Julián Silva Chávez
Yovan Ariel Díaz García**

Director: Ing. 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, Abril 2016

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	15
CAPÍTULO 1. SISTEMA WDM, CARACTERÍSTICAS DE DWDM, DEGRADACIONES ÓPTICAS Y PARÁMETROS DE MONITOREO ÓPTICO	17
1.1 Redes DWDM	17
1.2 MONITOREO DE DESEMPEÑO ÓPTICO	19
Degradaciones Ópticas	20
1.3 PARÁMETROS DE DESEMPEÑO ÓPTICO	27
Diagrama del Ojo	27
Figura 1.10 a) Parámetros del diagrama del ojo ideal y b) diagrama del ojo generado por la combinación y superposición de unos y ceros.	27
Jitter	28
Relación Señal a Ruido Óptico	28
Factor de calidad (Factor Q)	28
Tasa de Error de Bit (BER, Bit Error Rate)	28
CAPÍTULO 2. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LA DCF QUE PERMITAN LA MIGRACIÓN EN EL SISTEMA DWDM DE UNA TASA DE TRANSMISIÓN DE 10 A 40 Gbps	30
2.1 Fibra Monomodo Estándar	31
2.2 Fibra Compensadora de Dispersión	33
2.3 Propiedades de la DCF	34
2.3.1 Atenuación en la DCF	34
2.3.2 Máxima Dispersión Cromática Acumulada	35
2.3.3 Figura de Mérito	36
2.3.4 Área efectiva	37
2.4 Técnicas de Compensación	37
2.4.1 Pre-compensación	37
2.4.2 Post-compensación	38
2.4.3 Compensación simétrica	38
2.5 Parámetros de una DCF	39
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN.....	40
3.1 Herramienta de simulación	40
3.2 Metodología de simulación	41
3.2.1 Definición del escenario de simulación y casos de estudio	41
3.2.2 Identificación de los parámetros técnicos de simulación	44
3.2.3 Ejecución de la simulación	46
3.2.4 Análisis de los resultados de la simulación	46
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL MEJOR DESEMPEÑO DE LA RED DWDM RESPECTO A LA MIGRACIÓN DE 10 A 40 Gbps, BASADAS EN LAS VARIACIONES DE LAS PROPIEDADES DE UNA DCF.....	48

4.1	Caso 1: Configuración 1.1 Análisis del formato de modulación NRZ-OOK a 10 Gbps ante la variación de las propiedades de la DCF.	48
4.1.1	Máxima distancia alcanzable en el segmento de red, con parámetros implementados por los diferentes operadores de fibra óptica	49
4.1.2	Mejoras al segmento de red, variando las propiedades de la DCF	60
4.1.3	Distancias máximas en el segmento de red al variar las propiedades de la DCF	78
4.1.4	Distancia máxima alcanzada con enlaces concatenados	79
4.2	Caso 1: Configuración 1.2 Análisis del formato de modulación RZ-DQPSK a 10 Gbps ante la variación de las propiedades de la DCF.	81
4.2.1	Máxima distancia alcanzable en el segmento de red, con parámetros implementados por los diferentes operadores de fibra óptica	83
4.2.2	Mejoras al segmento de red, variando las propiedades de la DCF	97
4.2.3	Distancias máximas en el segmento de red al variar las propiedades de la DCF	114
4.2.4	Distancia máxima alcanzada con enlaces concatenados	114
4.3	Caso 2: Configuración 2.1 Análisis del formato de modulación NRZ-OOK a 40 Gbps con DCF mejorada.	116
4.3.1	Máxima distancia alcanzable por la fibra SSMF-28	118
4.3.2	Máxima distancia alcanzable en el segmento de red, al introducir DCF con parámetros estándar	120
4.3.3	Implementación del escenario DWDM a 40Gbps con los parámetros alcanzados en 10Gbps variando las propiedades de la DCF	122
4.3.4	Longitud máxima alcanzada en el segmento de red al aumentar drásticamente los parámetros en las propiedades de la DCF	127
	Distancia máxima alcanzada con enlaces concatenados	131
4.4	Caso 2: Configuración 2.2 Análisis del formato de modulación RZ-DQPSK a 40 Gbps con DCF mejorada.	134
4.4.1	Máxima distancia alcanzable por la fibra SSMF-28	135
4.4.2	Máxima distancia alcanzable en el segmento de red, con parámetros de red óptica implementados por los diferentes operadores de fibra.	137
4.4.3	Implementación del escenario DWDM a 40Gbps con los mejores parámetros alcanzados en 10Gbps variando las propiedades de la DCF	138
4.4.4	Distancia máxima alcanzada con enlaces concatenados	144
4.5	Análisis comparativo del desempeño en la migración de una red DWDM de 10 a 40 Gbps, para los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-DQPSK ante las variaciones de las propiedades de la DCF	146
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS...		150
5.1	Conclusiones	150
5.2	Recomendaciones	150
5.3	Trabajos futuros	151
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		152

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1	Pág.
Figura 1.1 Esquema de un sistema DWDM.	18
Figura 1.2 Codificaciones NRZ y RZ.....	18
Figura 1.3 Niveles del modelo de referencia OPM.....	20
Figura 1.4 Degradaciones que afectan el sistema DWDM.....	21
Figura 1.5 Efectos lineales en una red DWDM.....	21
Figura 1.6 Pulso a la entrada y salida de la fibra óptica, afectado por la CD.....	22
Figura 1.7 Clasificación de los diferentes efectos no lineales de la fibra óptica.....	23
Figura 1.8 Clasificación de no linealidades derivadas del Efecto Kerr.....	25
Figura 1.9 Interacción de tres canales, debido a FWM aparecen nuevas frecuencias.	27
Figura 1.10 a) Parámetros del diagrama del ojo ideal y b) diagrama del ojo generado por la combinación y superposición de unos y ceros	27
 CAPÍTULO 2	
Figura 2.1 Métodos de Compensación de Dispersión.....	30
Figura 2.2 a) Configuración y b) Mapa de dispersión de la técnica de pre-compensación óptica para la CD.....	37
Figura 2.3 a) Configuración y b) Mapa de dispersión de la técnica de pos-compensación óptica para la CD.....	38
Figura 2.4 a) Configuración y b) Mapa de dispersión de la técnica de compensación simétrica óptica para la CD.....	38
 CAPÍTULO 3	
Figura 3.1 Escenarios de simulación y casos de estudio.	41
Figura 3.2 Escenario de simulación.	42
Figura 3.3 Configuración 1.1, 1.2 y casos de simulación a 10 Gbps.	43
Figura 3.4 Configuración 2.1, 2.2 y casos de simulación a 40 Gbps.	43
Figura 3.5 Diagrama de flujo, casos de uso análisis de resultados de simulación.....	47
 CAPÍTULO 4	
Figura 4.1 Modelo simplificado de la red para el formato de modulación NRZ-OOK, transmitiendo a 10Gbps.....	48
Figura 4.2 Diagrama del ojo a) y Espectro óptico en 193.1Thz b) de la señal en el receptor Back to Back; para una velocidad de transmisión de 10 Gbps con formato de modulación NRZ-OOK.....	49
Figura 4.3 Comportamiento de los parámetros ópticos vs la longitud de fibra estándar. ...	50
Figura 4.4 Diagrama de ojo en el receptor: a) Back to Back y b) tras un tramo de 95 Km, afectado por todas las degradaciones de la red óptica.	51
Figura 4.5 Señal eléctrica en el receptor: a) Back to Back y b) tras un tramo de 95Km de SSMF-28	51
Figura 4.6 Diagrama del ojo tras un tramo de 95 km: a) afectado por la dispersión cromática y b) afectado por la atenuación y ruido.	52
Figura 4.7 Parámetros objetivo en los diferentes porcentajes de DCF para post-compensación y pre-compensación.....	54

Figura 4.8 Resultados del factor Q, BER y potencia de recepción para post-compensación y pre-compensación con una fibra óptica SSMF-28 de 95 Km.....	55
Figura 4.9 Diagramas de ojo obtenidos con PTx=12 dBm; compensando al 75 y 50 % de la DCF, para una longitud de la SSMF-28 de 95 Km en el segmento de red.	56
Figura 4.10 Fenómenos no lineales intracanal antes de la DCF a) y después de la DCF b)	57
Figura 4.11 Excitación fenómenos no lineales intercanal, con potencia de Tx, para todos los canales de 8 dBm, a) antes de la DCF y b) después de la DCF.	57
Figura 4.12 Parámetros de desempeño vs la potencia de transmisión, con configuración Inline y Booster.....	59
Figura 4.13 Segmento de red para el formato de modulación NRZ-OOK, transmitiendo a 10 Gbps, el cual cuenta el línea de trasmisión con DCF y amplificador EDFA.....	60
Figura 4.14 Segmento de red para el formato de modulación NRZ-OOK, transmitiendo a 10Gbps, al cual se varían las propiedades de la DCF.	61
Figura 4.15 Resultados obtenidos al variar el área efectiva en la DCF de 18, 20 y 21 μm^2 en el segmento de red.	62
Figura 4.16 Parámetros de calidad óptica al variar el área efectiva de 8 μm^2 hasta 34 μm^2 en el segmento de red.	62
Figura 4.17 Parámetros ópticos del segmento de red al variar la ganancia EDFA y el área efectiva de la DCF; entre 8 y 34 μm^2 . Utilizando porcentajes de compensación del 50 y 75 % de la DCF.....	64
Figura 4.18 Diagrama del ojo respecto al área efectiva de la DCF variable.	64
Figura 4.19 Diagrama del ojo compensando al: a) 50% de DCF y b) 75% de DCF; Área efectiva de 8 μm^2	65
Figura 4.20 Señal eléctrica en recepción: a) Back to Back., b) con atenuación en la DCF 0.1 dB/Km y c) con atenuación en la DCF 3.5 dB/Km.....	66
Figura 4.21 Diagrama del ojo variando la atenuación y el porcentaje de compensación de la DCF.	67
Figura 4.22 Parámetros de desempeño óptico establecidos al realizar variaciones en la atenuación de la DCF	68
Figura 4.23 Longitudes máximas alcanzadas por la fibra óptica SSMF-28 en el segmento de red, variando la longitud de la DCF.....	69
Figura 4.24 Parámetros objetivo al variar la atenuación en la DCF de 0.1 y 0.55 dB/Km. 69	
Figura 4.25 Comportamiento de la longitud de la DCF y la potencia de recepción al variar la FOM en la DCF.....	71
Figura 4.26 Parámetros objetivos al variar la FOM para cada porcentaje de compensación de la tabla 4.14.	72
Figura 4.27 Parámetros objetivos al variar la FOM de la DCF en el segmento de red con separación entre canales de 50 GHz, para cada porcentaje de compensación.	74
Figura 4.28 Comparación del diagrama del ojo para compensación en la DCF de: a) 50% Vs b) 100.784% para longitud de SSMF-28 de 157 Km, y c) 75% Vs d) 111.697% para longitud de SSMF-28 de 174 Km.	77
Figura 4.29 Parámetros de calidad óptica al variar el coeficiente de dispersión de la DCF compensando al 50 y 75%, a) Factor Q y b) BER.....	78
Figura 4.30 Diagrama del ojo para: a) un span de 186 km y b) dos span's de 186 km.....	79
Figura 4.31 Diagrama del ojo para: a) un span, b) dos span, c) tres span, d) cuatro span y e) cinco span; cada span de 125 km.....	80
Figura 4.32 Formato de modulación RZ-DQPSK para un canal.....	82

Figura 4.33 Diagrama de ojo a) y espectro óptico en 193.1 THz b) de la señal en el receptor Back to Back; para una velocidad de transmisión de 10 Gbps con formato de modulación RZ-DQPSK.	82
Figura 4.34 Parámetros de desempeño óptico versus la variación de la longitud de la fibra SSMF-28 con formato de modulación RZ-DQPSK a 10 Gbps.	84
Figura 4.35 a) Diagrama del ojo en el receptor Back to Back y b) Diagrama del ojo tras un tramo de 159 km, afectado por todas las degradaciones de la red óptica.	85
Figura 4.36 a) Señal eléctrica transmitida y b) Señal eléctrica en el receptor.	85
Figura 4.37 Diagrama del ojo tras un tramo de 159 km, afectado por: a) CD, b) atenuación y ruido.	86
Figura 4.38 Método de Pre-compensación (línea naranja) y Post-compensación (línea verde) para: a) Factor Q vs longitud DCF y b) BER vs longitud DCF.	88
Figura 4.39 Resultados del factor Q, BER y potencia de recepción para las dos técnicas de compensación efectuadas en una fibra óptica SSMF-28 de 159 Km.	89
Figura 4.40 Diagrama del ojo compensando al: a) 100%, b) 75% c) 50% y d) 25%, con $P_{tx}=12$ dBm.	90
Figura 4.41 Porcentaje de compensación al variar la potencia de transmisión: a) factor Q, b) BER y c) potencia de recepción.	91
Figura 4.42 Espectro óptico con potencia de transmisión a) y b) 0 dBm, c) y d) 25 dBm.	92
Figura 4.43 Espectro óptico con potencia de transmisión 12 dBm a) antes de la DCF y b) después de la DCF.	93
Figura 4.44 Factor Q dB, alcanzado en configuración Booster Vs configuración Inline.	94
Figura 4.45 BER en cuadratura y fase alcanzada en configuración EDFA, a) Booster y b) Inline.	95
Figura 4.46 PRx dBm alcanzada con amplificación EDFA configuración Booster Vs configuración Inline.	95
Figura 4.47 Diagrama de ojo para el segmento de red con configuración EDFA a) Inline y b) Booster.	96
Figura 4.48 Segmento de red para el formato de modulación RZ-DQPSK, transmitiendo a 10Gbps, el cual cuenta el línea de transmisión con DCF y amplificador EDFA.	97
Figura 4.49 Segmento de red para el formato de modulación RZ-DQPSK, transmitiendo a 10 Gbps, al cual se varían las propiedades de la DCF.	97
Figura 4.50 Resultados obtenidos en fase y cuadratura al variar el área efectiva en la DCF de 18, 20 y 21 μm^2 sobre el segmento de red.	98
Figura 4.51 Parámetros de calidad óptica al variar el área efectiva de 8 μm^2 hasta 34 μm^2 en el segmento de red.	99
Figura 4.52 Parámetros ópticos del segmento de red al variar la potencia EDFA y el área efectiva de la DCF; entre 8 y 34 μm^2 . Utilizando porcentajes de compensación del 50 y 75 % de la DCF.	101
Figura 4.53 Señal eléctrica en Back to Back a), en recepción con atenuación en la DCF 0.1dB/Km b), en recepción con atenuación en la DCF de 2 dB/Km c)	103
Figura 4.54 Diagramas de ojo con: a) atenuación en DCF de 0.1 dB/Km, b) atenuación 1.9 dB/Km y compensado al 50% en la DCF y c) atenuación de 1.9 dB/Km y compensado 75% en la DCF.	103
Figura 4.55 Parámetros de desempeño óptico establecidos al realizar variaciones en la atenuación de la DCF.	104
Figura 4.56 PRx variando la atenuación de la DCF.	104
Figura 4.57 Longitudes máximas alcanzadas por la fibra óptica SSMF-28 en el segmento de red, variando la longitud de la DCF.	105

Figura 4.58 Parámetros de calidad óptica a para diferentes porcentajes de compensación, a) BER y b) Factor Q.	106
Figura 4.59 FOM Vs longitud de la DCF.	108
Figura 4.60 Parámetros objetivo al variar la FOM para cada porcentaje de compensación de la tabla 4.38.	108
Figura 4.61 Potencia de recepción Vs FOM.	109
Figura 4.62 Comparación de diagrama de ojo para compensación en la DCF de: a) 50% Vs b) 100.784% para longitud de SSMF-28 de 458 Km, y c) 75% Vs d) 100.784% para longitud de SSMF-28 de 930 Km.	112
Figura 4.63 Parámetros de calidad óptica al variar el coeficiente de dispersión de la DCF compensando al 50 y 75%, a) Factor Q y b) BER.	113
Figura 4.64 Diagrama de ojo para: a) un span de 930 Km y b) dos span's de 1860Km.	114
Figura 4.65 Diagrama de ojo para: a) un span b) cuatro span's c) ocho span's d) diez span's e) doce span's.	115
Figura 4.66 Modelo simplificado de la red para el formato de modulación NRZ-OOK, transmitiendo a 40 Gbps.	117
Figura 4.67 Diagrama del ojo a) y Espectro óptico en 193.1 Thz b) de la señal en el receptor Back to Back; para una velocidad de transmisión de 40 Gbps con formato de modulación NRZ-OOK.	117
Figura 4.68 Diagrama del ojo con: a) Todas las degradaciones ópticas (VBS full), b) Afectado por la dispersión cromática (VBS line fiber), c) Afectado por la atenuación y ruido (Loss Only Fiber).	119
Figura 4.69 Señal eléctrica a) en el receptor Back to Back, b) con longitud SSMF-28 de 5Km y c) con longitud SSMF-28 de 7Km.	120
Figura 4.70 Longitud máxima alcanzada en el segmento de red con diferentes porcentajes de compensación.	121
Figura 4.71 Segmento de red para el formato de modulación NRZ-OOK, transmitiendo a 40 Gbps.	122
Figura 4.72 a) Longitud máxima alcanzada con parámetros en la DCF de la tabla 4.50 y b) Potencia de recepción alcanzada con parámetros en la DCF de la tabla 4.50.	123
Figura 4.73 Parámetros de calidad óptica al variar el coeficiente de dispersión y la atenuación de la DCF para una longitud de la SSMF-28 de 150Km, a) BER y b) Factor Q.	124
Figura 4.74 Potencia de recepción variando la atenuación y el porcentaje de dispersión de la DCF.	124
Figura 4.75 Longitud DCF compensada al 100% con diferentes parámetros de dispersión.	125
Figura 4.76 Distancia máxima del segmento de red con 100% de la DCF.	125
Figura 4.77 Parámetros de calidad óptica hallados al variar el área efectiva de la DCF entre 2 y 16 μm^2	128
Figura 4.78 Al aumentar la FOM se obtiene: Variaciones en la longitud de la DCF a) y parámetros de la calidad óptica factor Q b), BER c) y potencia de recepción d).	129
Figura 4.79 Diagrama de ojo en el segmento de red con: a) 100% de DCF y b) 110% de DCF.	130
Figura 4.80 Diagrama del ojo para: a) un span de 154 km y b) dos span's de 154 km.	132
Figura 4.81 Diagrama del ojo para: a) un span, b) dos span, c) tres span, d) cuatro span y e) cinco span; cada span de 52 km.	133
Figura 4.82 Modelo simplificado de la red para el formato de modulación RZ-DQPSK, transmitiendo a 40 Gbps.	134

Figura 4.83 Diagrama del ojo a) y Espectro óptico en 193.1 Thz b) de la señal en el receptor Back to Back; para una velocidad de transmisión de 40 Gbps con formato de modulación RZ-DQPSK.	135
Figura 4.84 Diagrama de ojo con: a) todas las degradaciones ópticas (VBS full), b) afectado por la dispersión cromática (VBS line fiber), c) afectado por la atenuación y ruido (Loss Only Fiber).	136
Figura 4.85 Señal eléctrica en el receptor a) Back to Back, b) con longitud SSMF-28 de 11Km, c) con longitud SSMF-28 de 18 Km.	137
Figura 4.86 Segmento de red para el formato de modulación RZ-DQPSK, transmitiendo a 40 Gbps.	139
Figura 4.87 Longitud máxima alcanzada con porcentajes de compensación del 50, 75 y 90% de la DCF a) y Potencias de recepción alcanzadas con porcentajes de compensación del 50,75 y 90% de la DCF.	140
Figura 4.88 Diagrama del ojo para: a) un span de 930 km y b) dos span's de 1860 km.	144
Figura 4.89 Diagrama del ojo para: a) un span, b) tres span's, c) cinco span's, d) siete span's y e) nueve span's; cada uno de 68 km.	145
Figura 4.90 Longitud máxima en el segmento de red con parámetros de DCF estándar para el formato de modulación NRZ-OOK.	147
Figura 4.91 Longitud máxima en el segmento de red con variación en las propiedades de la DCF para el formato de modulación NRZ-OOK.	147
Figura 4.92 Segmentos de red con DCF mejorada con velocidad de transmisión de 10 Gbps y 40 Gbps, para el formato de modulación NRZ-OOK.	148
Figura 4.93 Longitud máxima en el segmento de red con parámetros de DCF estándar.	148
Figura 4.94 Longitud máxima en el segmento de red con variación en las propiedades de la DCF.	149
Figura 4.95 Segmentos de red con DCF mejorada con velocidad de transmisión de 10 Gbps y 40 Gbps, para el formato de modulación RZ-DQPSK.	149

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1	Pág.
Tabla 1.1 Parámetros típicos en redes CWDM y DWDM	17
CAPÍTULO 2	
Tabla 2.1 Características de la fibra óptica estándar, atributo de la fibra, ITU-T 6.52.D... 31	
Tabla 2.2 Características de la fibra óptica estándar, atributo del cable, ITU-T 6.52.D 32	
Tabla 2.3 Especificaciones fibra óptica SSMF-28 corning..... 32	
Tabla 2.4 Parámetros de la fibra SSMF-28. 32	
Tabla 2.5 Porcentaje de compensación de la fibra óptica DCF. 33	
Tabla 2.6 Ventajas y desventajas que presenta la DCF..... 34	
Tabla 2.7 Parámetros típicos de algunas fibras DCF 39	
CAPÍTULO 3	
Tabla 3.1 Plan de frecuencias a 100GHz (0.1nm)..... 44	
Tabla 3.2 Característica y parámetros escenario de simulación. 45	
CAPÍTULO 4	
Tabla 4.1 Parámetros de monitoreo óptico, con espaciado entre canales de 100GHz a una velocidad de transmisión de 10 Gbps. 50	
Tabla 4.2 Parámetros estándar de la DCF..... 53	
Tabla 4.3 Porcentajes de compensación de la DCF para una distancia de 95 Km, utilizando post-compensación..... 53	
Tabla 4.4 Porcentajes de compensación de la DCF para una distancia de 95 Km, utilizando pre-compensación. 53	
Tabla 4.5 Valores de longitud de SSMF-28 hasta donde se mantienen los parámetros objetivo Q y BER. 58	
Tabla 4.6 Distancia máxima alcanzada para una configuración Inline. 60	
Tabla 4.7 Parámetros de área efectiva de la DCF 61	
Tabla 4.8 Parámetros de área efectiva de la DCF en un rango de 8 a 34 μm^2 62	
Tabla 4.9 Potencia de recepción hallada al variar el área efectiva de la DCF entre (8 a 34 μm^2)..... 62	
Tabla 4.10 Variación de la potencia EDFA, e incidencia en los parámetros Objetivo (Q, BER)..... 63	
Tabla 4.11 Distancia máxima alcanzada por el segmento de red óptica, con un área efectiva fija, variando los porcentajes de compensación en 75 y 50 %. 65	
Tabla 4.12 Parámetros de atenuación introducidos a la DCF. 66	
Tabla 4.13 Parámetros obtenidos de Q y BER, en el segmento de red al variar la potencia EDFA y la ganancia EDFA..... 68	
Tabla 4.14 Distancia máxima alcanzada en el segmento de red óptica, cumpliendo los parámetros objetivos; realizando análisis sobre la atenuación de la DCF..... 70	
Tabla 4.15 Variaciones en la figura de mérito, para las diferentes compensaciones de la DCF. 71	
Tabla 4.16 Distancia máxima alcanzada en el segmento de red óptica, cumpliendo los parámetros objetivos; realizando análisis sobre la FOM de la DCF. 73	

Tabla 4.17 Análisis sobre la FOM de la DCF, cumpliendo los parámetros objetivo; con espaciamiento entre canales de 50 GHz.	74
Tabla 4.18 a) Dispersión cromática acumulada en el segmento de red con DCF, con diferentes porcentajes de compensación.	76
Tabla 4.19 b) Longitud de la DCF con diferentes porcentajes de compensación en donde la dispersión cromática acumulada se hace cero matemáticamente.	76
Tabla 4.20 Valores de dispersión de la DCF.	77
Tabla 4.21 Dispersión cromática acumulada para diferentes valores de dispersión de la DCF.	78
Tabla 4.22 Distancias máximas en el segmento de red para cada porcentaje de compensación al variar las propiedades de la DCF.	79
Tabla 4.23 Parámetros de desempeño donde cada span es de 125 km.	80
Tabla 4.24 Máximo alcance para un canal alrededor de los 193.1 Thz con potencia de 0 dBm.	83
Tabla 4.25 Parámetros estándar de la DCF.	87
Tabla 4.26 Porcentaje de compensación para una distancia de 159 km, utilizando post-compensación.	87
Tabla 4.27 Porcentaje de compensación para una distancia de 159 km, utilizando pre-compensación.	87
Tabla 4.28 Máximo alcance del segmento de red hasta donde se cumple los parámetros objetivos (BER y Q).	93
Tabla 4.29 Distancia máxima alcanzada para una configuración Booster.	96
Tabla 4.30 Parámetros de área efectiva de la DCF.	98
Tabla 4.31 Parámetros de área efectiva de la DCF en un rango de 8 a 34 μm^2	99
Tabla 4.32 Potencia hallada en recepción al variar el área efectiva de la DCF de 8 a 34 μm^2	99
Tabla 4.33 Variación de potencia EDFA, e incidencia en los parámetros objetivo (Q, BER).	100
Tabla 4.34 Distancia máxima alcanzada en el segmento de red, variando parámetros de área efectiva.	101
Tabla 4.35 Parámetros de atenuación de la DCF.	102
Tabla 4.36 Parámetros de Q y BER obtenidos al variar la potencia EDFA y la atenuación en la DCF.	105
Tabla 4.37 Distancia máxima alcanzada en el segmento de red óptica, cumpliendo los parámetros objetivos; realizando análisis sobre la atenuación de la DCF.	106
Tabla 4.38 Variación de la FOM, para las distintas compensaciones de la DCF.	107
Tabla 4.39 Distancia máxima alcanzada en el segmento de red óptica, cumpliendo los parámetros objetivos; realizando variaciones de la FOM en la DCF.	109
Tabla 4.40 Dispersión cromática del segmento de red, con diferentes porcentajes de DCF.	111
Tabla 4.41 Longitud de la DCF con diferentes porcentajes de compensación en donde la dispersión cromática acumulada se hace cero matemáticamente.	111
Tabla 4.42 Valores de dispersión de la DCF.	112
Tabla 4.43 Dispersión cromática acumulada de la red, para diferentes porcentajes de compensación de la DCF.	113
Tabla 4.44 Distancias máximas en el segmento de red para cada porcentaje de compensación al variar las propiedades de la DCF.	114
Tabla 4.45 Parámetros de desempeño donde cada span es de 52 Km.	116
Tabla 4.46 Parámetros objetivo del segmento óptico solo con fibra SSMF-28.	118
Tabla 4.47 Parámetros estándar de la DCF.	120

Tabla 4.48 Longitudes máximas de la SSMF-28 para porcentajes de compensación de la DCF de 50, 75, 90 y 100%.....	121
Tabla 4.49 Longitudes máximas alcanzadas en el segmento de red para la configuración 1.1.	122
Tabla 4.50 Valores de los parámetros de las propiedades de la DCF.....	122
Tabla 4.51 Parámetros de las propiedades de la DCF alcanzados en 10 Gbps, para una compensación del 100%.....	123
Tabla 4.52 Parámetros en las propiedades de la DCF, para una longitud de segmento de red de 150 Km compensando al 100% la CD	125
Tabla 4.53 Comparación entre los parámetros de red de un operador con DCF estándar Vs un operador con variaciones en los parámetros de la propiedades en la DCF del segmento de red.....	126
Tabla 4.54 Parámetros del escenario inicial.....	127
Tabla 4.55 Parámetros de área efectiva en rango de 2 a 16 μm^2	127
Tabla 4.56 Variación de la FOM a velocidad de transmisión de 40 Gbps.....	128
Tabla 4.57 Velocidad de transmisión de 10 y 40 Gbps, al introducir una fibra DCF mejorada en el segmento de red.	131
Tabla 4.58 Parámetros de desempeño donde cada span es de 52 km.....	133
Tabla 4.59 Parámetros objetivo en el segmento óptico solo con fibra SSMF-28.	135
Tabla 4.60 Parámetros estándar de la DCF.....	137
Tabla 4.61 Parámetros objetivo para porcentajes de compensación del 50 y 75% de la DCF.....	138
Tabla 4.62 Longitudes máximas alcanzadas en el segmento de red para la configuración 1.2.	139
Tabla 4.63 Valores de los parámetros de las propiedades de la DCF.....	139
Tabla 4.64 Valores de los parámetros de las propiedades de la DCF para un 89% de compensación.	140
Tabla 4.65 Comparación entre los parámetros de red de un operador con DCF estándar Vs un operador con variaciones en los parámetros de la propiedades en la DCF del segmento de red.....	141
Tabla 4.66 Porcentajes de DCF por arriba del 89%.	142
Tabla 4.67 Parámetros de calidad ópticos hallados con un porcentaje de compensación del 89% en la DCF.....	142
Tabla 4.68 Velocidad de transmisión de 10 y 40 Gbps, al introducir una fibra DCF mejorada en el segmento de red.	143
Tabla 4.69 Parámetros de desempeño para varios span compensando al 89%.	145

ACRÓNIMOS

APD	<i>Avalanche Photodiode</i> , Fotodiodo de Avalancha.
BER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit.
CD	<i>Chromatic Dispersion</i> , Dispersión Cromática.
CWDM	<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda Ligera.
DCF	<i>Dispersion Compensating Fibers</i> , Fibras Compensadoras de Dispersión.
DGD	<i>Differential group Delay</i> , Retardo Diferencial de Grupo.
DQPSK	<i>Dual-Polarization Quadrature Phase Shift Keying</i> , Modulación por desplazamiento diferencial de cuadratura
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa.
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> , Amplificador de fibra dopado de Erblio.
ESNR	<i>Electrical Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido Eléctrica.
FOM	<i>Figure of Merit</i> , Figura de Mérito.
FWM	<i>Four Wave Mixing</i> , Mezcla de Cuarta Onda.
GVD	<i>Group Velocity Dispersion</i> , Dispersión de Velocidad de Grupo.
IFWM	<i>Intrachannel Four Wave Mixing</i> , Mezcla de Cuatro Ondas Intracanal.
IL	<i>Insertion Loss</i> , Pérdida por Inserción.
ISI	<i>Intersymbol Interference</i> , Interferencia Intersimbólica.
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> , Unión Internacional de Telecomunicaciones.
IXPM	<i>Intrachannel Cross-Phase Modulation</i> , Modulación de Fase Cruzada Intracanal.
LAN	<i>Local Area Network</i> , Red de Área Local.
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> , Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación.
LD-Chirp	<i>Length Dispersion-Chirp</i> , Longitud de Dispersión del Chirp.
LED	<i>Light Emitting Diode</i> , Diodo Emisor de luz.
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i> , Redes de Área Metropolitanas.
MZM	<i>Mach-Zehnder Modulator</i> , Modulador Mach-Zehnder.
NRZ	<i>Non Return to zero</i> , No Retorno a Cero.
OADM	<i>Optical Add-Drop Multiplexer</i> , Multiplexores Ópticos de Inserción Extracción.
OOK	<i>On-Off Keying</i> , Modulación por Encendido y apagado.
OPM	<i>Optical Performance Monitoring</i> , Monitoreo de desempeño óptico.
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.
SM	<i>Single-Mode</i> , Monomodo.

SOA	<i>Semiconductor Optical Amplifiers</i> , Amplificadores Ópticos Semiconductores.
SPM	<i>Self-Phase Modulation</i> , Automodulación de Fase.
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.
VBS	<i>Variable Bandwidth Simulation</i> , Ancho de Banda Variable de Simulación.
WAN	<i>Wide Área Network</i> , Red de Área Amplia.
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 los últimos años, el número de usuarios que navegan en Internet ha crecido considerablemente, principalmente por las aplicaciones y nuevos servicios que se presentan cada año; con el fin de suplir tal crecimiento se implementan nuevas redes ópticas, las cuales permiten transmitir una gran cantidad de datos a altas velocidades. En este sentido, los sistemas de comunicaciones ópticas se ven obligados a utilizar técnicas de multiplexación más robustos, como la Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*), la cual soporta el aumento continuo de la velocidad del canal migrando a velocidades de 10 a 40 Gbps en la transmisión [1].

La implementación de una red óptica DWDM, implica una serie de inconvenientes como la presencia de las degradaciones ópticas, entre ellos los efectos lineales y no lineales; destacándose de estos primeros, la dispersión cromática [2], debido a que limita la distancia máxima de transmisión. Para mitigar dicha perturbación, se implementa sistemas de compensación como la Fibra Compensadora de Dispersión (DCF, *Dispersion Compensation Fiber*) tiene propiedades que posiblemente permiten una migración de 10 a 40 Gbps y a su vez contrarrestar los efectos generados por la dispersión cromática, estas propiedades son la Máxima Dispersión Cromática Permitida, la Figura de Mérito (FOM, *Figure Of Merit*), el Área Efectiva y la Atenuación [3]. El formato de modulación también juega un papel importante para la migración de este sistema, por ello, este trabajo de investigación presenta dos formatos de modulación, uno tradicional y uno robusto.

El fin de este trabajo de grado, se aborda el estudio y el análisis en la migración de una red DWDM de 10 a 40 Gbps, bajo la determinación y la variación de las propiedades de una DCF; el cual se constituye de cinco capítulos que se distribuyen de la siguiente manera:

Capítulo 1. Sistema WDM, características de DWDM, degradaciones ópticas y parámetros de monitoreo óptico

En este capítulo se describe la red WDM y se clasifica según la ITU-T, especialmente se hace énfasis en las redes DWDM, que se caracteriza por los componentes del sistema desde el punto de transmisión hasta la recepción; destacándose entre ellos los formatos de modulación a implementar en la red. Posteriormente, se detallan los efectos lineales y no lineales generados por sistemas DWDM y por último se aplica el modelo de referencia OPM; dentro del cual sobresalen los parámetros de desempeño óptico, con el fin de establecer la medición de las degradaciones producidas por la red óptica.

Capítulo 2. Determinación de las propiedades en la DCF que permitan la migración en el sistema DWDM de una tasa de transmisión de 10 a 40 Gbps

En primera instancia se determinan las propiedades de la DCF, las cuales permitirían la migración de la red óptica de 10 a 40 Gbps en la tasa de transmisión; además, se fijan los parámetros de la fibra monomodo estándar SSMF-28, en especial el coeficiente de dispersión; luego, se establecen las técnicas de compensación de la DCF en el sistema DWDM y por último se fijan los parámetros del desempeño en la DCF.

Capítulo 3. Metodología y escenarios de simulación

Se implementa la herramienta de simulación OptSim® de Rsoft; además, se define la metodología de simulación, la cual permite definir los escenarios y casos de estudio, con los que se realizan las pruebas de simulación.

Capítulo 4. Análisis y evaluación del mejor desempeño de la red DWDM respecto a la migración de 10 a 40 Gbps, basadas en las variaciones de las propiedades de una DCF

Se desarrolla el proceso de simulación que permita establecer si es posible la migración de una red óptica de 10 a 40 Gbps variando los parámetros de las propiedades en la DCF, para ello se analiza y se evalúa el mejor desempeño que se obtenga en cada escenario de simulación. Son utilizados dos formatos de modulación, uno básico y el otro muy robusto con el fin de realizar un análisis comparativo al final del capítulo, para establecer si la DCF incide en la migración de la tasa de transmisión.

Capítulo 5. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

Se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

CAPÍTULO 1. SISTEMA WDM, CARACTERÍSTICAS DE DWDM, DEGRADACIONES ÓPTICAS Y PARÁMETROS DE MONITOREO ÓPTICO

El incremento exponencial en los últimos años del ancho de banda requerido por los operadores de fibra óptica, ha generado una búsqueda continua del aumento de la capacidad de los sistemas de comunicación óptica a través de técnicas de multiplexación más eficientes y seguras, como WDM [1]. El sistema Multiplicación por División de Longitud de Onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*) es un modelo que permite combinar dos o más señales ópticas, mediante portadoras de diferentes longitudes de ondas en una sola fibra, logrando optimizar el ancho de banda y tener un mayor flujo o tasas de transmisión de la fibra en comparación a otras tecnologías [4], [5].

En la actualidad, WDM se divide en dos tecnologías establecidas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunication Union*) como: la Multiplicación por División de Longitud de Onda Densa (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*) correspondiente a la recomendación G.694.1 [6] y la Multiplicación por División de Longitud de Onda Ligera (CWDM, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*) según la recomendación; siendo DWDM la más utilizada para sistemas de alta velocidad, de la cual se habla a continuación.

1.1 Redes DWDM

DWDM es una técnica de multiplexación para redes ópticas, que permite incrementar considerablemente la capacidad de un canal de fibra óptica, evitando nuevos tendidos y aprovechando un recurso que ya está establecido. Así mismo la transmisión de voz, correo electrónico, video, datos multimedia son algunos ejemplos de los que se puede transmitir simultáneamente por DWDM [8]. Las redes DWDM que trabajan a 10 Gbps tienen separación entre canales (para evitar problemas de diafonía) de 50 y 100 GHz; sin embargo, para la migración de 10 a 40 Gbps se condicionan los espaciamientos de canal a 100 y 200 GHz, con el fin de no tener inconvenientes a la hora de implementar la red de fibra óptica [12].

El sistema DWDM se divide en Redes de Área Metropolitanas (MAN, *Metropolitan Area Network*), que cubren mayor distancia que una Red de Área Local (LAN, *Local Area Network*) pero menor que una Red de Área Amplia (WAN, *Wide Area Network*), por ejemplo, una ciudad. La red LAN opera en un área geográfica limitada como un edificio o campus; mientras que las redes WAN, conectan redes de usuarios sobre un área geográfica grande. Además, Las características de los diferentes tipos de redes DWDM se encuentran en la tabla 1.1.

CARACTERÍSTICAS	DWDM, MAN/WAN	DWDM, Largo Alcance
Espaciamiento de los Canales	0.8nm (100 GHz)	0.4nm (50 GHz)
Ventanas Utilizadas	C, L	C, L, S
Canales por Fibra	32 - 80	80 - 160
Capacidad por Canal	10 Gbps	10 – 40 Gbps
Distancias Típicas	Cientos de Km	Miles de Km
Costos	Medio	Alto

Tabla 1.1 Parámetros típicos en redes CWDM y DWDM [10].

En la Figura 1.1 se observa el esquema básico de un sistema DWDM, compuesto por un trasmisor y un receptor, los cuales se comunican a través de fibra óptica, haciendo uso de

dispositivos ópticos y eléctricos como: Fuentes láser monomodo, moduladores, codificadores, multiplexadores, desmultiplexadores, decodificadores y fotorreceptores.

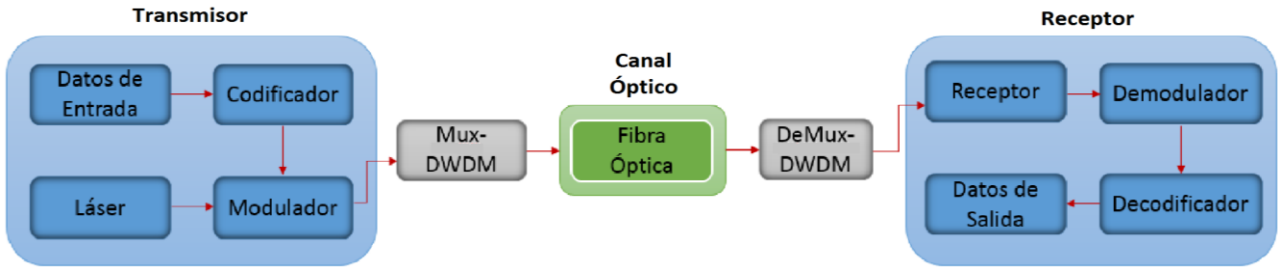


Figura 1.1 Esquema de un sistema DWDM [4].

A continuación se describe la codificación y modulación a implementar en el sistema DWDM.

1.1.1 Codificación

Existen dos modos de codificación que se describe a continuación:

- **Código de línea Sin Retorno a Cero**

En la Codificación de línea Sin Retorno a Cero (NRZ, *Non Return to Zero*), la señal óptica es conmutada ON/OFF (luz emitida/luz apagada) para su transmisión es necesario el uso de un simple código binario 1/0, como se aprecia en la figura 1.2. Esta codificación no es sensible al ruido de fase de láser, requiere un bajo ancho de banda eléctrico; además, su configuración es simple en el transmisor y receptor [9], [10], [11].

- **Código de línea con Retorno a Cero**

El Código de línea con Retorno a Cero (RZ, *Return to Zero*) también utiliza ON/OFF para transmitir información, pero en este método el pulso se pone en ON la mitad del ancho del pulso que en NRZ, y como resultado presenta mayor robustez a degradaciones ópticas (PMD); adicional a esto, la potencia óptica por bit se reduce aproximadamente a la mitad y el impacto de la no linealidad también se reduce (ver figura 1.2) [9], [10].

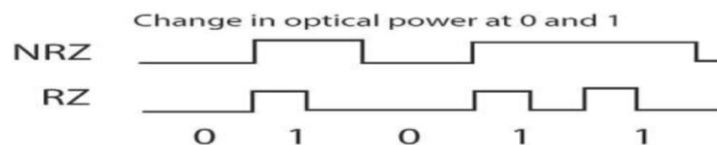


Figura 1.2 Codificaciones NRZ y RZ [9].

1.1.2 Formato de Modulación

Comúnmente los formatos de modulación más utilizados son los tradicionales, estos formatos binarios conocidos como OOK son preferidos para la mayoría de los enlaces, debido a su fácil implementación y para sistemas de baja velocidad de transmisión, es decir, para menores a 10 Gbps. En la actualidad, en las comunicaciones ópticas se

buscan formatos más eficientes, con el fin de transmitir mayor cantidad de información a mayor velocidad de transmisión de los mismos (40 Gbps), que permita alcanzar mayores distancias y que sean más robustos frente a las limitaciones por dispersión y efectos no lineales [4], [11].

✓ **Modulación por Desplazamiento de Amplitud**

El formato Modulación por Desplazamiento de Amplitud (ASK, *Amplitude Shift Keying*) también es conocido como Modulación por Encendido y Apagado (OOK, *On-Off Keying*). Este es el formato más utilizado en los sistemas de comunicaciones ópticos por su baja complejidad, sencillo de implementar y de bajo costo debido a que requiere un bajo ancho de banda eléctrico en los transmisores y receptores. También, es considerado para sistemas con velocidad de transmisión inferior o igual a 10 Gbps, ya que para velocidades superiores se requiere de un formato más robusto [12].

✓ **Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase en Cuadratura**

La Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase en Cuadratura (DQPSK, *Differential Quadrature Phase-Shift Keying*) es un formato de modulación multinivel que transporta más de un bit por símbolo, logrando ventajas como la reducción del tiempo requerido para enviar una cantidad de datos dada a través de un ancho de banda limitado, lograr una alta eficiencia espectral, es decir, una alta tasa de bit, aunque el ancho de banda sea bajo [13].

Este formato de mayor robustez es conveniente para velocidades superiores a 10 Gbps, presenta múltiples niveles de señal que llevará más información que las señales binarias, y su mayor duración de símbolo reducirá la distorsión inducida por la CD y la PMD. DQPSK presenta un mejor comportamiento ante los efectos no lineales logrando mayores distancias, una mejora en la sensibilidad del receptor y un espaciado de canal más cerrado. Además, se convierte en un formato más utilizado en los sistemas de transmisión ópticos de alta velocidad para grandes distancias, en otras palabras, superior a 80 km [10], [12].

Con el fin de establecer las degradaciones que perturban la señal transmitida en el sistema DWDM, y los parámetros de medida de la señal óptica que llega a recepción, se emplea un método de monitoreo de la señal óptica, el cual es descrito a continuación.

1.2 MONITOREO DE DESEMPEÑO ÓPTICO

El Monitoreo de Desempeño Óptico (OPM, *Optical Performance Monitoring*), es un enfoque utilizado para determinar la eficacia¹ de los canales ópticos en un nivel físico, permitiendo tener un control de calidad sobre la señal que se está transmitiendo en el dominio óptico, logrando la reducción de errores en la señal que viaja a través de la red [14]. En el presente trabajo de grado se adopta OPM en el análisis de la fibra óptica sobre el desempeño de una red DWDM en presencia a degradaciones ópticas. Y de manera secuencial OPM brinda las herramientas necesarias para resolver incertidumbres de una forma segura y fácil, éstas interrogantes son:

¹ Eficacia, es la capacidad de lograr el efecto que se desea o se espera.

- Que se debe medir en la red→Degradaciones Ópticas
- Como se va a medir→Parámetros de monitoreo
- Como se leen los resultados→Técnicas de monitoreo

Modelo de referencia OPM

Este modelo se divide en tres niveles, nivel de monitoreo de transporte, nivel de monitoreo de calidad de la señal y nivel de monitoreo del protocolo. Los tres niveles se explican a continuación [15], figura 1.3.

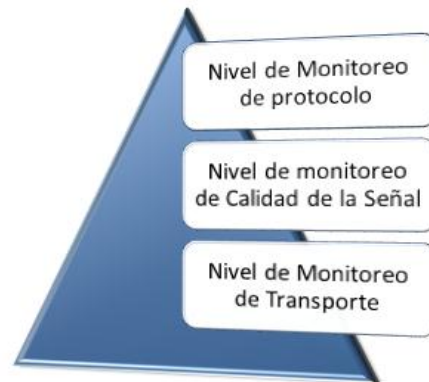


Figura 1.3 Niveles del modelo de referencia OPM [15].

- Nivel de monitoreo de transporte: se refiere al monitoreo del canal óptico, en este nivel son seleccionadas las herramientas o características del nivel óptico indispensables en el transporte y gestión de la red en la capa DWDM. Para realizar este tipo de monitoreo son utilizadas medidas como: Se crea un registro de cada longitud de onda, evaluación en tiempo real de los parámetros que componen la presencia del canal, nivel de potencia y Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR, *Optical Signal to Noise Ratio*) espectral [15].
- Nivel de monitoreo de calidad de la señal: se escoge una longitud de onda específica a la cual se le realizan medidas sensitivas de transmisión de señal. Los parámetros o características que son analizados en este nivel son: factor de calidad (Q), resultados arrojados por las mediciones del diagrama del ojo y las distorsiones que se presentan en él, nos aportan los fenómenos que perjudican la señal óptica que viaja por la red, como efectos no lineales y dispersiones producidas por la fibra óptica [15].
- Nivel de monitoreo de protocolo: Este nivel está directamente involucrado con el monitoreo del protocolo de datos y el monitoreo de desempeño del protocolo [15].

Degradaciones Ópticas

El desempeño y funcionalidad de la red se ve directamente relacionada con las limitaciones de velocidad del enlace y longitud de onda transmitida, las cuales son producidas por degradaciones ópticas, las más importantes consideradas por OPM son: pérdidas totales del enlace, Dispersión Cromática (CD, *Chromatic Dispersion*), Dispersión por Modo de Polarización (PMD, *Polarization Mode Dispersion*), Automodulación de Fase

(SPM, *Self-Phase Modulation*), Modulación de Fase Cruzada (XPM, *Cross Phase Modulation*) y Mezcla de Cuatro Ondas (FWM, *Four Wave Mixing*). En la figura 1.4 se clasifica las degradaciones presentes en el sistema DWDM.

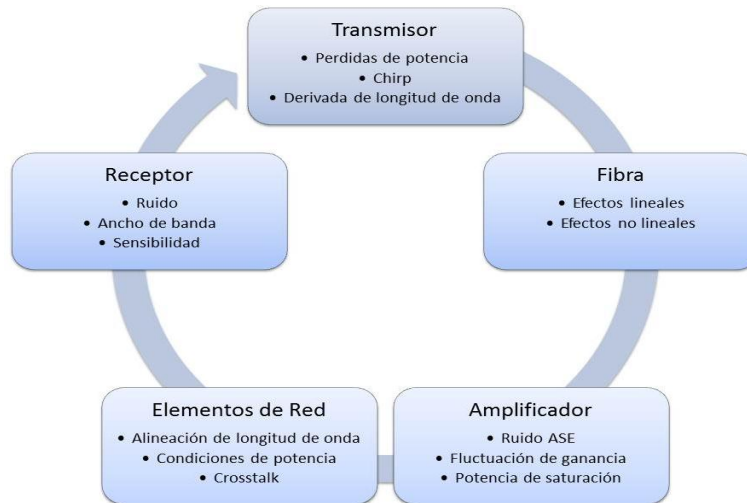


Figura 1.4 Degradaciones que afectan el sistema DWDM [15].

1.2.1.1 Efectos Lineales

Estos fenómenos son degradaciones que no dependen de la potencia de transmisión como es el caso de la Dispersión Cromática (CD, *Chromatic Dispersion*), la Dispersión por Modo de Polarización (PMD, *Polarization Mode Dispersion*) y las pérdidas causadas por la atenuación y el ruido [11]. En la figura 1.5 se muestra como están compuestos los fenómenos lineales.

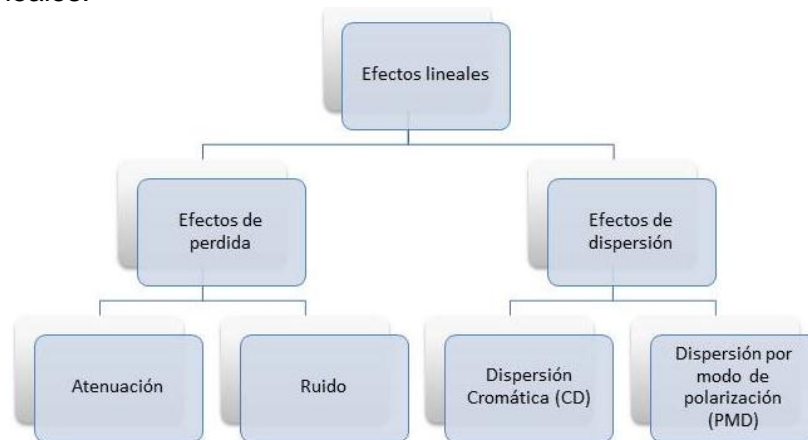


Figura 1.5 Efectos lineales en una red DWDM [11].

1.2.1.1.1 Atenuación

La atenuación de la señal óptica representa la disminución de la energía luminosa (Potencia de transmisión) en la propagación de la fibra, las pérdidas producidas por la atenuación producen efectos adversos tales como reducción del ancho de banda, velocidad de transmisión, eficiencia y capacidad del sistema, limita la distancia total del enlace de red [16]. Expresada en la fórmula (1.1).

$$A(dB) = 10 \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (1.1)$$

Dónde:

A: Atenuación de la fibra, unidades decibelios (dB)

1.2.1.1.2 Ruido

La luz transportada a través de la fibra óptica no se ve afectada por interferencias de radiación electromagnéticas, lo que la hace inmune frente al ruido, además la luz externa no penetra la fibra, por lo tanto no es necesario aislar los cables eléctricos de los ópticos. El ruido es generado en las fibras ópticas en sus extremos, como son el transmisor, el receptor, amplificadores (Eléctricos) y otros dispositivos que componen la red, ejemplo de este fenómeno es el ruido cuántico el cual se produce en la conversión del sistema fotónico al eléctrico [17].

1.2.1.1.3 Dispersión cromática

La Dispersión Cromática (CD, *Chromatic Dispersion*) es el retardo o deformación del pulso óptico transmitido a medida que se propaga a través de la fibra óptica y llega al receptor. Estos efectos degradantes se debe a la variación de la velocidad de propagación de las diferentes componentes espectrales contenidas en una señal óptica modulada que en el dominio del tiempo resulta en una distorsión de la señal y en una ampliación del pulso como se aprecia en la figura 1.6, esto es conocido como dispersión del material. Si el pulso aumenta, su duración temporal a medida que se propaga por la fibra da como resultado una Interferencia Intersimbólica (ISI, *Intersymbol Interference*) en un sistema de transmisión óptico, lo que conlleva a generar errores en la decodificación del pulso [11], [18], [19].

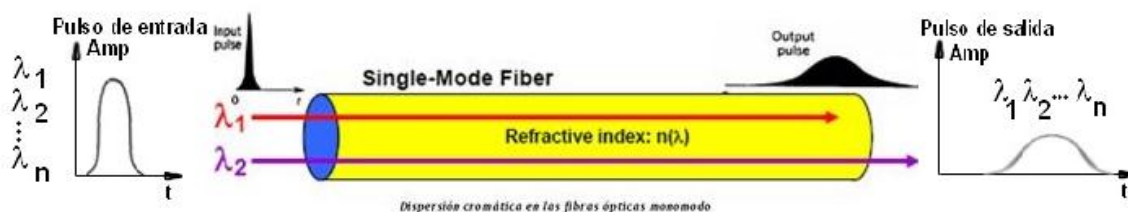


Figura 1.6 Pulso a la entrada y salida de la fibra óptica, afectado por la CD [20].

En la práctica se utiliza $D \left[\frac{ps}{nm \cdot Km} \right]$ para representar la dispersión cromática en una sola fibra óptica. La CD es el condicionante para las transmisiones a altas velocidades, ya que una red que al transmitir a 10 Gbps, la señal que viaja por la fibra tiene una mayor tolerancia a este fenómeno con respecto a una señal óptica que sea transmitida a 40 Gbps, se debe agregar que la dispersión cromática está directamente relacionada a la tasa de transmisión de la red; esta afirmación se encuentra en el anexo A, en particular en el ítem de la dispersión cromática.

1.2.1.1.4 Dispersión Modal o Dispersión por Modo de Polarización

La Dispersión por Modo de Polarización (PMD, *Polarization Mode Dispersion*), es un gran limitante para el rendimiento de transmisión en los sistemas de fibra óptica. La PMD solo

se da en la fibra óptica monomodo y es el resultado de la diferencia de velocidades de grupo de modos de polarización, generando retardos entre estos y ensanchamiento en los pulsos transmitidos, lo que ocasiona interferencia entre símbolos y un aumento en la tasa de error de bit (BER, *Bit Error Rate*), definida más adelante, lo que conlleva a tener una señal defectuosa en recepción, ya que el receptor no es capaz de reconocer si el pulso que entra es un “0” o un “1” [21], [22].

1.2.1.2 Efectos No Lineales

Pará sistemas DWDM los fenómenos no lineales son un factor determinante en la eficiencia, puesto que perturban la tasa de trasmisión y limitan la potencia del sistema [18]. Todos los fenómenos no lineales que pueden llegar a aparecer en la red óptica tienen un fundamento físico basado en la interacción de la radiación transmitida con respecto al silicio de la fibra, estos fenómenos tienen lugar fundamentalmente a través de dos mecanismos [23].

- En el primer mecanismo se da cuanto hay interacción entre los fotones de la señal con alguno de los fonones (modos de vibración de la fibra óptica) del material: Éí resultado de esta interacción produce dos tipos de dispersión espacial, el Scattering Estimulado de Raman (SRS) y el Scattering Estimulado de Brillouin (SBS).
- El segundo mecanismo es originado por el efecto Kerr (Dependencia del índice de refracción con la intensidad óptica). Este efecto es producido por el confinamiento intenso de la luz en el núcleo de la fibra, el cual origina un valor en la intensidad óptica que puede exceder los MW/cm², en estas condiciones el índice de refracción se puede ver afectado, inclusive se podría llegar a modificar su valor, traduciéndose a su vez en un cambio de fase de los campos EM que viajan por la fibra. A raíz de este contexto las variaciones en las intensidades ópticas de los diferentes canales WDM se traducirán en perturbaciones en su fase, generando diversos efectos no lineales debido a las múltiples interacciones entre la señal propagada y el ruido, un ejemplo de esto son SPM, XPM, FWM e IXPM.

En el esquema 1.7 se aprecian los fenómenos no lineales anteriormente mencionados según el tipo de interacción que los origina.



Figura 1.7 Clasificación de los diferentes efectos no lineales de la fibra óptica.

1.2.1.2.1 Efectos no Lineales producidos por la Interacción Fotón-Fonón

- **Scattering Estimulado de Brioullin (SBS, *Stimulated Brioullin Scattering*)**

En la fibra el campo óptico que se desplaza a través de la misma, induce pequeñas variaciones acústicas que conforman lo que es denominado como fonones acústicos. Al generarse una onda acústica por la interacción fotón-fonón, la cual se propaga por el núcleo en sentido contrario a la onda óptica, produciendo

alteraciones periódicas en la densidad del material, lo que a su vez se traduce en variaciones periódicas en el índice de refracción [23]. En este escenario, se habrá constituido una red Bragg que conlleva a dos repercusiones:

- ✓ La onda óptica sufre dispersión espacial y además se modifica su frecuencia instantánea según la velocidad de propagación de la onda acústica (Efecto Doppler) [23].
- ✓ Si la longitud de onda de radiación de la onda transmitida coincide con la red de Bragg se producirá una reflexión de potencia y si el desplazamiento de la frecuencia es lo suficientemente elevado se producirían problemas de diafonía² en el sistema DWDM con separación entre canales menor o igual a 20 MHz [23].

En este proyecto se tendría una separación entre canales superior a 20 MHz, por este motivo SBS nunca será un problema para la migración del sistema DWDM de 10 a 40 Gbps.

- **Scattering Estimulado de Raman (SRS, *Stimulated Raman Scattering*)**

Cuando interactúan los fotones que inciden sobre el silicio de la fibra, las vibraciones que tienen las moléculas y los átomos de la misma producen el efecto Raman. Las vibraciones características del medio o material, son conocidas como fonones ópticos. El problema principal generado por este efecto es que las frecuencias nuevas que aparecen pueden encontrarse dentro de la banda de los canales WDM adyacentes, generando diafonía en banda, muy difícil de eliminar mediante filtrado. En sistemas WDM con separación entre canales menor de 200 GHz (DWDM) la ganancia del efecto Raman no es significativa, pudiendo considerar este efecto como despreciable, excepto para valores de potencia óptica elevados en la fibra, en este caso si sería observable la transferencia de potencia entre los diferentes canales ópticos [24].

1.2.1.2.2 Fenómenos No Lineales producidos por el Efecto Kerr

Las no linealidades que distorsionan la señal de forma variada. Dependiendo de la interacción de cada canal WDM consigo mismo, con el ruido y con el resto de canales, el efecto Kerr se descompone en los fenómenos ilustrados en la figura 1.8. Donde el efecto Kerr queda dividido en no linealidades intracanal e intercanal, cuando los pulsos de un mismo canal WDM interactúan entre sí (intracanal) o con pulsos de otros canales del sistema WDM (intercanal), además se divide la señal-señal y la señal-ASE, ya que cada una genera distorsiones diferentes.

² Diafonía se presenta cuando parte de una onda, denominada perturbadora, aparece en otra ,denominada perturbada

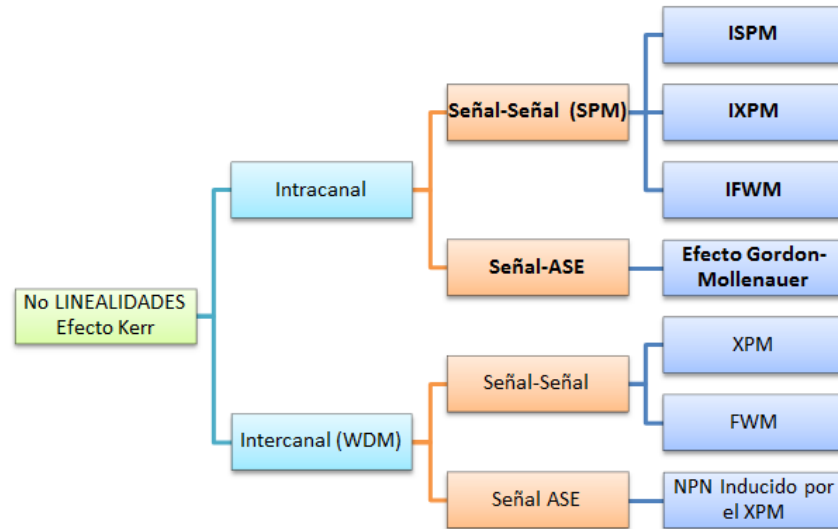


Figura 1.8 Clasificación de no linealidades derivadas del Efecto Kerr [23].

En esta sección no se hace referencia a la señal ASE, ya que esta se produce por inducción de ruido creado por un fenómeno no lineal.

Efectos No Lineales Intracanal

- **Auto Modulación de Fase**

La Auto Modulación de Fase (SPM, *Self Phase Modulation*) aparece debido a que el índice de refracción de la fibra tiene una componente dependiente de la intensidad. Este índice de refracción no lineal provoca un desplazamiento de fase que es proporcional a la intensidad del pulso. Genera que las diferentes partes del pulso sufran diferentes desplazamientos de fase, lo que provoca que el pulso adquiera un cierto chirp (C), el cual induce a que se modifiquen los efectos de la dispersión sobre el pulso [25]. El chirp generado depende de la longitud de la fibra y de la intensidad de la señal transmitida. En un sistema con alta potencia se podría generar ensanchamiento en los pulsos que viajan por la fibra [26].

- **Modulación de Fase Cruzada Intracanal y Mezcla de Cuatro Ondas Intracanal**

Estos dos efectos no lineales, son predominantes a velocidades iguales o superiores a 40 Gbps; si se inducen potencias de transmisión elevadas en el sistema DWDM. Son generados como consecuencia del solapamiento de pulsos en un mismo canal debido a su ensanchamiento por la dispersión cromática de la fibra, que a su vez estimula el efecto Kerr de la misma. La Modulación de Fase Cruzada Intracanal (IXPM, *Intrachannel Cross-Phase Modulation*) genera un cambio en la frecuencia por la variación en la intensidad de los pulsos traslapados, que al interactuar con la dispersión cromática se convierte en una fluctuación temporal o Jitter³ de fase [18], [21], [23].

³ Jitter, es una variación temporal o retardo en el pulso transmitido, es apreciable en la fase o en la amplitud en el diagrama de ojo de recepción

Mezcla de Cuatro Ondas Intra canal (IFWM, *Intrachannel Four Wave Mixing*), es evidente en señales de amplitud modulada o de intensidad, en las cuales crea un pulso fantasma en los slots de tiempo donde un bit "0" es transmitido, generando un error en el decisor de bits del receptor. Además este fenómeno induce transferencia de energía adicional, lo que lleva a tener amplitud de jitter en el símbolo 1 [21], [27].

Efectos No Lineales Intercanal

- **Modulación de Fase Cruzada**

La Modulación de Fase Cruzada (XPM, *Cross Phase Modulation*), es el término por el cual se conoce el conjunto de efectos de la refracción no lineal producida por un canal sobre canales co-propagantes [26]. La modulación cruzada de fase siempre aparece acompañada de la SPM [26], por ello este efecto en los sistemas DWDM lleva a que la potencia transmitida de un canal afecte la fase en la señal transmitida por otro canal, provocando un ensanchamiento del espectro óptico del canal afectado, lo que contribuye a reducir la tolerancia del sistema a la dispersión cromática para altas velocidades de transmisión, donde predomina el espectro de la modulación frente al de la fuente de la luz [23]. El efecto más perjudicial se provoca cuando los pulsos a diferentes longitudes de onda están parcialmente solapados en el tiempo, esto debido al cambio de fase no lineal inducido por XPM [18].

- **Mezcla de Cuatro Ondas**

Es conocido como Mezcla de Cuatro Ondas (FWM, *Four Wave Mixing*) porque implica la creación de una nueva onda a partir de la interacción de otras tres iniciales. Se genera como consecuencia de la dependencia no lineal del campo eléctrico que viaja por la fibra. En comparación con XPM y SPM las consecuencias sobre el sistema WDM son diferentes, ya que estas generan un ensanchamiento espectral de la señal ya existente en la fibra, mientras el efecto de la mezcla de cuatro ondas es responsable de la generación de nuevas componentes de frecuencia óptica, las cuales interfieren en zonas espectrales ocupadas por las portadoras ópticas del sistema [23]. Las componentes de la señal generada pueden interferir con señales del mismo canal o con señales de canales adyacentes, en número de frecuencias generadas está dada por la siguiente fórmula (1.2) y se muestra en la figura 1.9.

$$M = \frac{1}{2}(N^3 - N^2) \quad (1.2)$$

Dónde:

M: Número de frecuencias resultantes por FWM

N: Número de canales con frecuencias diferentes para cada uno

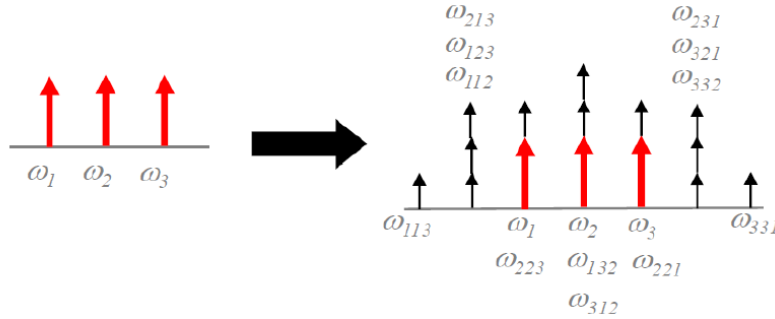


Figura 1.9 Interacción de tres canales, debido a FWM aparecen nuevas frecuencias [23].

Para que se produzca FWM debe de estar condicionada por “phase matching⁴”, donde, el efecto de la FWM depende de la dispersión y el espaciamiento de los canales de la señal [18].

1.3 PARÁMETROS DE DESEMPEÑO ÓPTICO

Siguiendo el modelo de referencia OPM, los parámetros de desempeño que se tendrán en cuenta son: la BER, el factor Q, la OSNR, el diagrama del ojo y el Jitter.

Diagrama del Ojo

El diagrama del ojo permite observar parámetros que determinan la calidad de la señal, donde se identifican dos tipos de cruces: cruce de tiempo, en el cual 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 el periodo de bit como se muestra en la figura 1.10 a), [28]. Además, el diagrama de ojo está conformado por la superposición de diferentes combinaciones posibles de unos y ceros en un rango de tiempo o cantidad de bits determinados. Por ejemplo, en la figura 1.10 b) se puede apreciar que en una secuencia de 3 bits se tiene una cantidad total de 8 combinaciones diferentes [28].

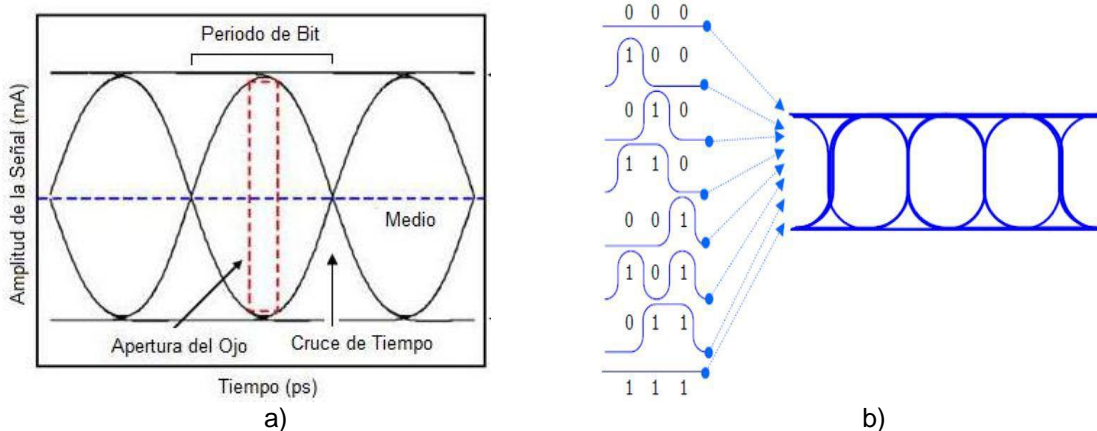


Figura 1.10 a) Parámetros del diagrama del ojo ideal y b) diagrama del ojo generado por la combinación y superposición de unos y ceros [20], [21].

⁴ Encuentro de fase, presente en el caso ideal de fibras sin dispersión.

Jitter

Este parámetro corresponde básicamente a una desviación de fase respecto al de la posición ideal en el tiempo de una señal digital que se propaga en un canal de transmisión. El Jitter es un efecto completamente indeseable en cualquier sistema de comunicaciones, que puede degradar totalmente la calidad y desempeño del enlace, introduciendo una serie de problemas al canal por lo cual debe ser tratado adecuadamente; el Jitter causa errores en la recepción de bits (degradar la BER) y puede producir Interferencia Intersimbólica (ISI, *Intersymbol Interference*) entre los pulsos que se propagan por el canal, generando un desplazamiento de las señales que componen el pulso mezclando las mismas, imposibilitando de esta manera el reconocimiento de los niveles respectivos de la señal en el receptor [28].

Relación Señal a Ruido Óptico

La Relación Señal a Ruido Óptico (OSNR, *Optical Signal to Noise Ratio*) se define como la medida de la relación de la potencia de la señal (P_i) con respecto a la potencia de ruido promedio (N_i) en un canal óptico. La OSNR sugiere que tanto es degradada una señal óptica que es transportada dentro de un sistema debido a fenómenos como la atenuación o dispersión [11]. Los factores que afectan principalmente la OSNR son: Formato de modulación, velocidad de transmisión, potencia a la salida de los amplificadores, dispersión en la fibra óptica, ancho de banda y el espaciamiento entre canales [20].

Factor de calidad (Factor Q)

El factor Q se define como la Relación Señal a Ruido Eléctrica (ESNR, *Electrical Signal to Noise Ratio*) en la entrada de un circuito de decisión de un receptor de señal digital, muestra todas las degradaciones causadas por los defectos ópticos y eléctricos sobre un punto de la red óptica. Éste parámetro es útil cuando no se puede efectuar una medición de la BER [4], [10]. Según la recomendación de la ITU-T, una BER de 10^{-12} corresponde a un $Q \approx 17.03$ [22].

Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*)

La Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*) es el parámetro más usado en la gestión de fallas, por esta razón es considerado el parámetro más importante en las comunicaciones ópticas, representa la relación entre el número esperado de bits errados y los bits transmitidos medidos en recepción, de esta forma se obtiene como resultado el número de bits que se han transmitido erróneamente. La BER se aumenta por el ruido, la atenuación, la dispersión y los efectos no lineales, los cuales se pueden contrarrestar usando mayor potencia de transmisión, reduciendo las pérdidas de la fibra, empleando amplificadores ópticos y/o compensadores de dispersión en el sistema de comunicación [4], [10], [11], [20]. Según la ITU-T para los sistemas de comunicación en general, el valor usual de la BER es de 10^{-12} que significa un bit erróneo por cada mil millones de bits transmitidos [22]. La BER está directamente relacionada con el factor de calidad y se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (1.3)$$

Donde $\text{erfc}(x)$ es la función complementaria de error (*erfc*, *Complementary Error Function*).

Mediante el desarrollo del presente capítulo se describe de manera general el sistema WDM, su división CWDM y DWDM, siendo este último el sistema más implementado por los operadores de fibra óptica.

Además, se describió los formatos de modulación a utilizar NRZ-OOK y RZ-DQPSK en el sistema DWDM, formatos de modulación a implementar en modo de simulación, para su posterior análisis de desempeño a diferentes velocidades de transmisión.

Así mismo, se describieron los efectos lineales y no lineales de mayor importancia, teniendo en cuenta que al aumentar la velocidad de transmisión, se vuelven críticos afectando de manera significativa el desempeño del enlace óptico.

Por otra parte, se describen los parámetros de monitoreo óptico, los cuales son importantes para el análisis del desempeño del sistema, estos son: BER, Factor Q, OSNR, Jitter y diagrama del Ojo.

Cada tema tratado en el primer capítulo se encuentra mejor detallado en el anexo A de este trabajo de grado.

En el siguiente capítulo, se describe la fibra óptica monomodo y fibra compensadora de dispersión a utilizar en el sistema DWDM. Además, las propiedades de la fibra compensadora de dispersión, las técnicas de compensación al introducir este tipo de fibra óptica al sistema DWDM y por ultimo sus parámetros.

CAPÍTULO 2. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LA DCF QUE PERMITAN LA MIGRACIÓN EN EL SISTEMA DWDM DE UNA TASA DE TRANSMISIÓN DE 10 A 40 Gbps

Las fibras monomodo empleadas en los sistemas DWDM tienen un coeficiente de dispersión positivo en la tercera ventana de trasmisión, este es el rango de longitudes de onda, en la cual es transmitida la señal de alta velocidad. Si las señales transmitidas pasan por un coeficiente de dispersión positivo, los pulsos de datos se ensanchan progresivamente con la distancia, solapándose unos con otros y generando interferencia intersimbólica (ISI, *Intersymbol Interference*); si esta es demasiado elevada en el sistema, no permite que se pueda recuperar los datos transmitidos. La ITU-T, en el suplemento 39 de la serie G de sus recomendaciones, establece el límite máximo de la Dispersión Acumulada $D * L$ (ps/nm), descrita en la fórmula (2.1); dicha expresión está conformada por una velocidad de trasmisión o tasa de transferencia R_{bit} (Gbps), y un ciclo de trabajo d_c del tren de pulsos [23]. Se debe tener en cuenta que para cuestiones prácticas el ancho espectral del pulso, tiende a uno.

$$D * L * \Delta\lambda = \frac{1819.650 * \varepsilon}{\lambda^2 R_{bit} \left[\left(\frac{1.932 R_{bit}}{d_c} \right) + \Gamma_v^2 \right]^{0.5}} = \Delta t$$

$$\Delta t \approx D * L \quad (2.1)$$

Dónde:

- Δt : Dispersión cromática acumulada
- D : Coeficiente de dispersión de la fibra óptica, [ps/ (nm*Km)]
- L : Longitud de la fibra óptica (Km)
- $\Delta\lambda$: Ancho espectral de la fuente de luz producida por un Laser o diodo, (nm)
- ε : Constante que depende de la penalización en potencia permitida por la GVD
- Γ_v : Ancho espectral de la fuente laser del transmisor
- λ : Longitud de la onda del canal (nm)

En la Figura 2.1, se aprecian tres métodos de compensación de la dispersión cromática [27]:

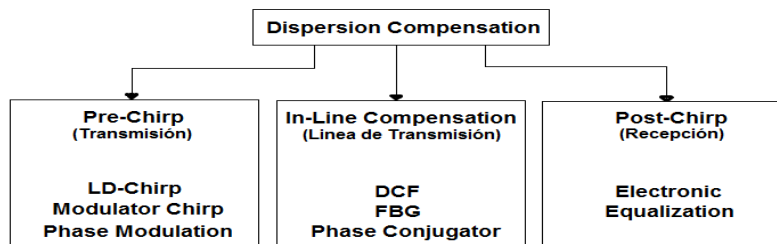


Figura 2.1 Métodos de Compensación de Dispersión [12].

- Pre-Chirp: se realiza en transmisión, teniendo en cuenta la Longitud de Dispersión del Chirp (LD-Chirp, *Length Dispersion*), que es un desplazamiento de fase o retardo y se presenta en la tasa de transmisión de datos cuando se combina con la dispersión cromática.

- Línea de transmisión: se utiliza DCF y las FBG para compensar la CD.
- Post-Chirp: se realiza en recepción utilizando compensación electrónica y de equalización.

Existen múltiples tipos de compensadores de la dispersión cromática, como se mencionaron anteriormente; aunque, para el desarrollo del trabajo de grado se toma sobre la línea de transmisión y se utiliza fibra óptica DCF para contrarrestar las diferentes degradaciones en la señal transmitida por la red óptica.

La CD es acumulativa y variable dependiendo de la velocidad de transmisión, siendo este un fenómeno lineal que afecta directamente la señal transmitida en el sistema DWDM; por tal razón, es necesario estudiar la fibra monomodo G.652, para establecer parámetros de dispersión acumulada en este tipo de fibra, y sus características que son el área efectiva y la longitud efectiva. Luego se caracteriza el dispositivo DCF, con el propósito de determinar sus propiedades y las técnicas de compensación; las cuales permitan la migración de una velocidad de transmisión de 10 a 40 Gbps, para que las señales transmitidas en la red óptica puedan ser reconocidas en recepción.

2.1 Fibra Monomodo Estándar

La Fibra Monomodo Estándar (SSMF, *Standard Single-Mode Fiber*) es el tipo de fibra con mayor implementación en sistemas DWDM comerciales, ha sido seleccionada porque trabaja en la banda C (1530-1560 nm), en la que se presenta bajos coeficientes de atenuación; este tipo de estándar garantiza una tasa de transmisión de 10 y 40 Gbps; además, según el estándar G.652.D de la ITU-T, las características de la fibra monomodo estándar se aprecian en la tabla 2.1.

ATRIBUTO DE LA FIBRA	DETALLE	G.652.D
DIÁMETRO DE CAMPO MODAL	<i>Longitud de onda</i>	1310 nm
	<i>Rango de valores nominales</i>	8.6 μm – 9.5 μm
	<i>Tolerancia</i>	$\pm 0.6 \mu\text{m}$
DIÁMETRO DE REVESTIMIENTO	<i>Nominal</i>	125 μm
	<i>Tolerancia</i>	$\pm 1 \mu\text{m}$
COEFICIENTE DE CD	λ_{0min}	1300 nm
	λ_{0max}	1324 nm
	S_{0max}	0.092 ps/(nm ² x km)
COEFICIENTES DE ATENUACIÓN EN ENLACES CONCATENADOS	1260 nm – 1360 nm	0.5 dB/Km
	1530 nm – 1565 nm	0.275 dB/Km
	1565 nm – 1625 nm	0.35 dB/Km
COEFICIENTE DE CD EN ENLACES CONCATENADOS	D_{1550}	17 ps/nm *Km
	S_{1550}	0.056 ps/(nm ² x km)

Tabla 2.1 Características de la fibra óptica estándar, atributo de la fibra, ITU-T 6.52.D.

ATRIBUTO DEL CABLE	DETALLE	G.652.D
COEFICIENTE DE ATENUACIÓN	Máximo a 1310 nm	-
	Máximo a 1550 nm	0.3 dB/Km
	Máximo a 1625 nm	-
	Máximo a 1310 nm-1625 nm	0.4 dB/Km
	Máximo a 1383 nm±3 nm	0.4 dB/Km
COEFICIENTE DE PMD	M	20 cables
	Q	0.01%
	Máximo PMD _Q	0.20 ps/km ^{1/2}

Tabla 2.2 Características de la fibra óptica estándar, atributo del cable, ITU-T 6.52.D

En la línea de transmisión del sistema DWDM, se utiliza la fibra SSMF-28 corning, la cual cumple con la estipulación ITU-T 6.52 [29]. Las características de esta fibra se muestran en la tabla 2.2.

Características (valores para λ=1550 nm)	SSMF-28
Diámetro del campo modal	10.4 μm ±0.8 μm
Diámetro del revestimiento	245 μm ±5 μm
Atenuación (dB/Km)	≤ 0.235
Dispersión (ps/(nm x km))	≤ 18
PMD (ps/km^{1/2}) Valor de diseño para enlace	≤ 0.1
PMD(ps/km^{1/2}) Máximo de fibra individual	≤ 0.2

Tabla 2.3 Especificaciones fibra óptica SSMF-28 corning [20], [18].

En la fibra SSMF-28 es conveniente definir dos parámetros que al ser variados impactan negativa o positivamente en el desempeño del sistema, estos parámetros son:

- Longitud efectiva, es la distancia que necesita recorrer la luz para que tenga lugar la generación de cada efecto no lineal.
- Área efectiva, se encuentra estrechamente relacionado con las no linealidades de la fibra óptica, las cuales provocan degradaciones en las señales ópticas transmitidas, siendo estas un condicionante en la potencia de trasmisión. También, se hace importante en los enlaces de largo alcance.

Los valores de longitud y área efectiva de la fibra SSMF-28 se encuentran en la tabla 2.3; las fórmulas de cada uno de estos parámetros se observan en el anexo A y los cálculos realizados se desarrollan en el anexo B.

Longitud Efectiva	Área Efectiva
$L_{ef} = 18,48 \text{ Km}$	$A_{ef} = 84,94 \mu\text{m}^2$

Tabla 2.4 Parámetros de la fibra SSMF-28.

Para estas fibras, los cálculos matemáticos de la PMD se mide en función de DGD, al trabajar en la ventana de los 1550nm la dispersión cromática acumulada (CD) se representa mediante la ecuación (2.2), la cual es una relación lineal con la longitud de onda [20].

$$D_{link}(\lambda) = l_{link}[D_{1550} + S_{1550}(\lambda - 1550)] \quad (2.2)$$

Dónde:

- $D_{link}(\lambda)$: Dispersión cromática acumulada en el enlace con fibra monomodo estándar (ps/nm)
- D_{1550} : Coeficiente de la dispersión cromática
- l_{link} : Longitud del tramo de la fibra (Km)
- S_{1550} : Pendiente de dispersión cromática
- λ : Longitud de onda del canal (nm)

2.2 Fibra Compensadora de Dispersión

Con el fin de contrarrestar la dispersión cromática producida en la fibra SSMF-28, se introduce en la línea de transmisión la Fibra Compensadora de Dispersión (DCF, *Dispersion Compensating Fibers*). Este tipo de fibra, está caracterizado por tener una dispersión elevada de signo contrario al de la fibra estándar SSMF-28; los valores de dispersión negativa de la DCF oscilan entre -100 ps/nm*Km y -200 ps/nm*Km. Este dispositivo de compensación tiene una gran acogida entre los operadores de sistemas ópticos, debido a que es anómalo y por tal razón compensa la totalidad de CD en los canales que se deseen implementar en transmisión; mientras que, si no fuese anómalo cada longitud de onda vería una dispersión diferente a la del canal central, lo que implicaría que solo se podría compensar un solo canal de transmisión [23], [30]. Como resultado de la dispersión cromática en la fibra SSMF-28, los pulsos llegados al receptor se ensanchan a medida que se aumenta la longitud de la red; en cambio, al introducir fibra óptica DCF, los pulsos ópticos se estrecharán debido al coeficiente de dispersión negativo.

La compensación de la longitud de la DCF, se estima en un 100%, para contrarrestar la CD en un segmento de red; esta se encuentra matemáticamente en la ecuación 2.3.

$$D_{SSMF} * l_{SSMF} * \Delta(\lambda) + D_{DCF} * l_{DCF} * \Delta(\lambda) = 0$$

$$l_{DCF(100\%)} = \left| \frac{D_{SSMF}}{D_{DCF}} \right| * l_{SSMF} \quad (2.3)$$

Dónde:

- D_{SSMF} : Coeficiente de dispersión cromático SSMF (ps/(nm*km))
- l_{SSMF} : Longitud de la fibra monomodo estándar (km)
- D_{DCF} : Coeficiente de dispersión cromático de la DCF (ps/(nm*km))
- l_{DCF} : Longitud de la DCF (km)
- $\Delta(\lambda)$: Ancho espectral del pulso (nm)

En la práctica los operadores de fibra óptica no compensan al 100% en la longitud de la DCF, ya que por la relación costo-eficiencia es preferible compensar el segmento de red con una longitud de DCF menor. Los diferentes porcentajes o longitudes de DCF utilizados por estos operadores se encuentran matemáticamente en la tabla 2.4.

Porcentaje de Compensación	Longitud DCF(Km)
100%	$l_{DCF(100\%)}$
75%	$l_{DCF(75\%)} = (l_{DCF(100\%)}) * 0.75$
50%	$l_{DCF(50\%)} = (l_{DCF(100\%)}) * 0.50$
25%	$l_{DCF(25\%)} = (l_{DCF(100\%)}) * 0.25$

Tabla 2.5 Porcentaje de compensación de la fibra óptica DCF.

Al tener un sistema DWDM con DCF a una velocidad de transmisión de 10 Gbps, la tolerancia a la dispersión cromática es dieciséis veces menor en comparación a un sistema que funcione a 40 Gbps. Aumentar la velocidad de transmisión, aumenta las degradaciones en la señal transmitida; por lo tanto, la longitud en la fibra compensadora de dispersión es mucho mayor en un sistema DWDM que trabaje a 40 Gbps en comparación a uno de 10 Gbps. La DCF presenta diversas ventajas y desventajas, algunas de ellas serán mencionadas a continuación, tabla 2.5:

Ventajas	Desventajas
Cuenta con dispersión cromática negativa beneficiosa para la red óptica	Requiere amplificadores ópticos (EDFA)
Un tramo corto de esta fibra puede compensar la dispersión acumulada de un tramo de SSMF-28.	Presenta mayor atenuación que la fibra estándar (0.4 dB/km, 0.6 dB/km), menor Área Efectiva (entre 0.9 y 2.4 μm^2 dependiendo del tipo de fibra) y generalmente es sensible a curvaturas [6], [31], [32].

Tabla 2.6 Ventajas y desventajas que presenta la DCF.

2.3 Propiedades de la DCF

Al diseñar el sistema con DCF para altas velocidades de transmisión, se debe disminuir las pérdidas por inserción, las pérdidas por empalme, suprimir la dispersión residual en banda de operación y además debe ser reducido su tamaño y costo [18]. Para esto es indispensable conocer las propiedades más relevantes de las fibras compensadoras de dispersión, las cuales son comentadas a continuación.

2.3.1 Atenuación en la DCF

La atenuación es una de las principales desventajas de la DCF, puesto que es tres veces mayor que una fibra estándar, y por ello resulta ser un limitante en la transmisión de las señales que viajan por la fibra. Al migrar el sistema de una velocidad hacia otra mucha mayor, la longitud de la fibra DCF aumentará, desencadenando que la atenuación para las dos velocidades sea diferente, como se muestra en la ecuación (2.4). Además, la atenuación en la fibra compensadora de dispersión es igual a la división entre el logaritmo de la potencia de salida y entrada de la fibra DCF sobre la longitud de la misma (l_{DCF}).

$$A_{DCF} \left[\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right] = -\frac{1}{l_{DCF}} \times 10 \log \left(\frac{p}{p_{in}} \right) \quad (2.4)$$

Para contrarrestar la atenuación son adicionados amplificadores ópticos EDFA en el sistema, los cuales degradan la SNR y adiciona costo al enlace. También, se hace necesario aumentar el nivel de potencia de la señal transmitida para contrarrestar dicho efecto, pero este aumento induce a la aparición de fenómenos no lineales citados en el anexo A [1], [3]. Al estar este fenómeno presente en la utilización de DCF, se introducen una serie de pérdidas en el sistema, las cuales se suman a las pérdidas de la fibra monomodo estándar, dando como resultado las pérdidas totales del enlace ($Loss_T$, ecuación (2.5)).

$$\begin{aligned} Loss_T &= Loos + A_{DCF} l_{DCF} \\ Loos &= L_{SSMF} + L_{EMP} + L_{CON} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Se define cada uno de los parámetros de la ecuación 2.5 como:

- Pérdidas totales del enlace de comunicaciones (Transmisor-receptor), se define como $Loss_T$
- Pérdidas en el segmento de red se define como $Loss$ y es la suma de las pérdidas de la fibra SSMF-28, las pérdidas por empalmes y las pérdidas por unión de conectores.
- Pérdidas de la fibra estándar monomodo SSMF-28 L_{SSMF} , es el producto entre la longitud y el coeficiente de atenuación de la fibra respectivamente.
- Pérdidas por empalmes L_{CON} , es el producto entre el número de conectores y la atenuación de los mismos.

Al unir la fibra estándar con la DCF se generaran pérdidas por empalme a las que se suman las pérdidas por conectores y pérdidas de la fibra compensadora, esta suma es conocida como Pérdida por Inserción (IL, *Insertion Loss*) y se representa con la ecuación (2.6). En una DCF convencional estas pérdidas se encuentran alrededor de 6 dB para compensar una dispersión acumulada en 80 Km de fibra monomodo estándar [3].

$$IL_{DCF} = A_{DCF} * l_{DCF} + \alpha_{conector} * N_{CON} + \alpha_{empalme} * N_{EMP} \quad (2.6)$$

Dónde:

- IL_{DCF} : Perdidas por inserción en el segmento de red
- $\alpha_{conector}$: Atenuación por conectores
- $\alpha_{empalme}$: Atenuación por empalme entre fibras
- N_{CON} : Número de conectores
- N_{EMP} : Número de empalmes entre las fibras
- A_{DCF} : Atenuación presente en la fibra DCF
- l_{DCF} : Longitud de la DCF (Km)

Las pérdidas intrínsecas se generan al unir o empalmar las dos fibras, es decir, la DCF con la fibra óptica SSMF-28, el valor de estas pérdidas es de 2.2 dB; debido a que la DCF tiene un diámetro de 5 μm , mientras que la fibra monomodo tiene un diámetro de 10.5 μm , la diferencia en el diámetro del núcleo de las dos fibras ocasiona difracción en la luz transmitida a través del segmento de red, lo que genera pérdidas en la señal transmitida. En la actualidad se han optimizado los parámetros de empalme para lograr reducir las pérdidas a un rango entre 0.7 dB y 0.8 dB [3].

2.3.2 Máxima Dispersión Cromática Acumulada

La dispersión es el efecto negativo que más influye en los sistemas ópticos y como se citó en el anexo A, este fenómeno es acumulativo; lo que conlleva a que se tenga mayor pérdida de información en cada tramo del sistema. Por tal motivo, resulta fundamental conocer el valor máximo de dispersión cromática para que el sistema funcione correctamente. Al utilizar DCF en la red óptica, el valor máximo del coeficiente de dispersión cromática sería la suma entre el coeficiente de dispersión cromático acumulado en el enlace de la fibra monomodo estándar (ecuación 2.2) y el producto entre la longitud con el coeficiente de dispersión de la DCF. En la ecuación (2.7) se muestra el coeficiente de dispersión máximo acumulado.

$$\Delta t_{total} = D_{link}(\lambda) + D_{DCF} * l_{DCF} * \Delta(\lambda) \quad (2.7)$$

$$D_{link}(\lambda) = l_{link}[D_{1550} + S_{1550}(\lambda - 1550)]$$

Dónde:

- Δt_{total} : Coeficiente de dispersión cromática máxima acumulada con DCF, por lo general matemáticamente $\Delta(\lambda)$ se hace igual a la unidad.
- $D_{link}(\lambda)$: Dispersión cromática acumulada en el enlace con fibra monomodo estándar (ps/nm)
- D_{DCF} : Coeficiente de dispersión cromático de la DCF (ps/(nm*km))
- l_{DCF} : Longitud de la DCF (km)
- $\Delta(\lambda)$: Ancho espectral del pulso (nm)

Para evaluar el rendimiento de la fibra DCF sobre un amplio rango de longitudes de onda se utiliza la dispersión residual (D_{RES}), la cual es una medida de la dispersión después del módulo de compensación en el receptor. Eliminar la dispersión totalmente no es posible, debido a chirps y efectos no lineales producidos por el transmisor [3], en la ecuación (2.8) se expresa la dispersión residual, la cual es evaluada en un tramo de la fibra óptica (l_{TF}) y con el coeficiente de dispersión (D_{TF}) que le corresponda.

$$D_{RES} = D_{TF} * l_{TF} + D_{DCF} * l_{DCF} \quad (2.8)$$

Dónde:

- D_{RES} : Dispersión residual
- D_{TF} : Dispersión del tramo de fibra óptica SSMF-28 donde se desea evaluar la dispersión residual
- l_{TF} : Longitud tramo de la SSMF-28

Si la $D_{RES} = 0$, se halla la longitud de fibra compensadora con la ecuación (2.3), debido a que La dispersión cromática es dependiente de la longitud de onda, a mayor longitud de onda, mayor es el parámetro de dispersión [3].

2.3.3 Figura de Mérito

La eficiencia espectral de la fibra es conocida como Figura de Mérito (FOM, *Figure Of Merit*), la cual mide que tan bien se aprovecha las bandas de frecuencia o los canales de transmisión de la fibra, es decir, la cantidad de información que podría transmitir por cada Hz de canal ocupado. Para la DCF, la FOM se define como la relación que existe entre la dispersión y la atenuación de la DCF, por lo cual es utilizada para manejar el incremento de la atenuación del enlace óptico que se da por la implementación de la fibra compensadora de dispersión en la línea de transmisión. La FOM se mide en ps/nm-dB, y entre más alta sea esta, la eficiencia de la fibra DCF es mucho mejor para contrarrestar la dispersión cromática [33]. En la ecuación (2.9) se muestra la figura de mérito de la DCF.

$$FOM = -\frac{D_{DCF}}{\alpha_{DCF}} O' \frac{|D_{DCF}|}{|\alpha_{DCF}|} \quad (2.9)$$

Al variar la velocidad de transmisión de 10 a 40 Gbps, se obtendrán figuras de mérito diferentes para cada una de estas, ya que la atenuación es variable y depende de la longitud de compensación cromática. Esto se expresa en la ecuación (2.10) y (2.11).

$$\text{Figura de mérito a 10Gbps} \rightarrow FOM_{10Gbps} = -\frac{D_{DCF}}{\alpha_{DCF-10Gbps}} O' \frac{|D_{DCF}|}{|\alpha_{DCF-10Gbps}|} \quad (2.10)$$

$$\text{Figura de mérito a 40Gbps} \rightarrow FOM_{40Gbps} = -\frac{D_{DCF}}{\alpha_{DCF-40Gbps}} O' \frac{|D_{DCF}|}{|\alpha_{DCF-40Gbps}|} \quad (2.11)$$

2.3.4 Área efectiva

Se produce cuando al pasar la luz láser o led de la SSMF hacia la DCF, el haz de luz se estrecha y se confina en el núcleo de la fibra, presentando una concentración mayor en el núcleo que en los extremos [5], [20], [34]. Esta área específica, es limitada por la sensibilidad de la curva de la fibra DCF y se encuentra en la ecuación (2.12).

$$A_{ef}(\mu m^2) = \pi w_0^2 \quad (2.12)$$

Dónde:

- A_{ef} : Área efectiva de la DCF
- w_0 : Radio del diámetro del campo modal de la DCF, el cual se puede aproximar por el radio del núcleo de la fibra

En la teoría se han logrado fibras DCF con buenas características de curvatura, las cuales cuentan con un área efectiva reducida como $20 \mu m^2$. Cabe resaltar, que al tener un área efectiva muy pequeña puede ocasionar el aumento de los fenómenos no lineales, pero estos fenómenos como la SPM, XPM y FWM son más pronunciados cuando se trata de altas potencias de transmisión implementada en los canales del sistema [20], [29].

2.4 Técnicas de Compensación

Anteriormente se ha mencionado la unión de la SSMF con la DCF para lograr un sistema DWDM a velocidades de 10 y 40 Gbps; teniendo en cuenta que la DCF proporciona una dispersión negativa que permite compensar la dispersión positiva de la SSMF, se definen tres técnicas de compensación: Técnica de Pre-compensación, Pos-compensación y la Compensación Simétrica. Teniendo claro estas técnicas, se toma una para la realización del trabajo de investigación según las conveniencias o requerimientos del mismo. En cada técnica de compensación, entre los tramos de la SSMF y la DCF, se coloca una etapa de amplificación para mantener un nivel de potencia detectable por el receptor.

2.4.1 Pre-compensación

Esta técnica consiste en colocar una DCF antes de la fibra estándar para conseguir una dispersión negativa y compensar la dispersión positiva que proporciona la SSMF que se va acumulando en toda la trayectoria, y finalmente gracias a la DCF obtener una dispersión residual pequeña. Este modo se puede apreciar en la figura 2.2.

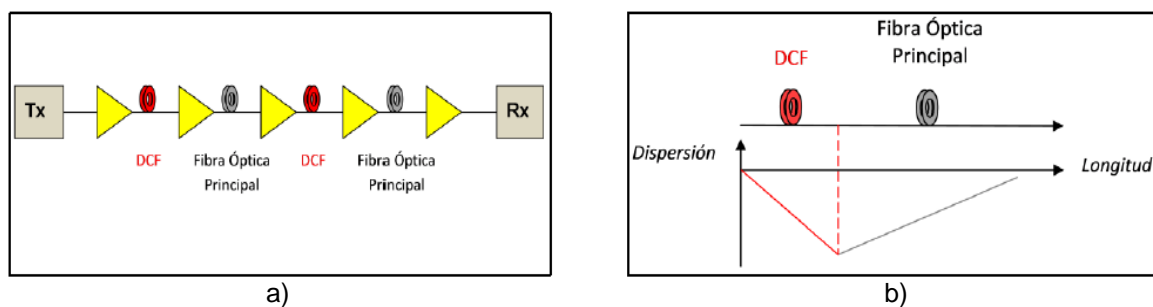


Figura 2.2 a) Configuración y b) Mapa de dispersión de la técnica de pre-compensación óptica para la CD [3].

En esta etapa de pre-compensación, con la implementación de la DCF se presenta un decremento en el nivel de potencia, logrando un efecto no lineal poco considerable debido a que la potencia que llega a la DCF es mayor que en la post-compensación [35].

2.4.2 Post-compensación

A diferencia de la anterior técnica, esta consiste en colocar un tramo de DCF después de la fibra estándar para obtener una dispersión positiva máxima que será compensada por una dispersión negativa proporcionada por la SSMF y la DCF respectivamente, de esa forma, también permite conseguir una dispersión residual menor. Esta técnica de compensación de la dispersión cromática se muestra en la figura 2.3.

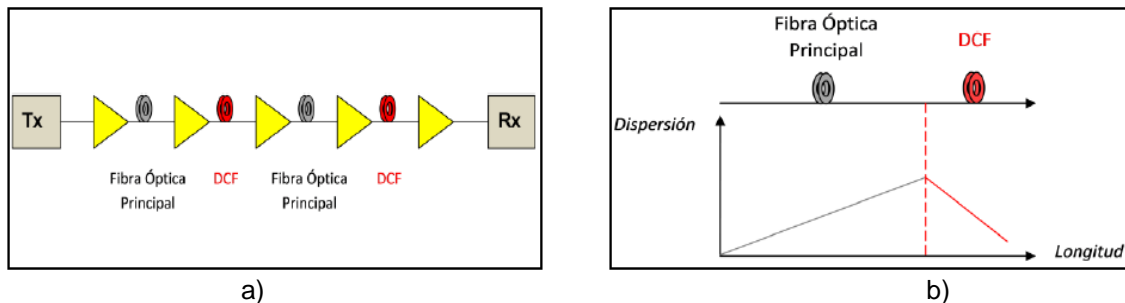


Figura 2.3 a) Configuración y b) Mapa de dispersión de la técnica de pos-compensación óptica para la CD [3].

En esta técnica los pulsos son ensanchados y presenta un decremento en el nivel de potencia, provocando que los efectos no lineales sean más significativos debido a que dicho nivel de potencia sea menor que en la pre-compensación [35].

2.4.3 Compensación simétrica

Esta es la implementación de las dos técnicas anteriores debido a que se coloca una DCF antes y otra después de la fibra estándar para equilibrar la dispersión negativa que se presenta por utilizar la SSMF. Para tener una mejor interpretación se debe observar la siguiente figura.

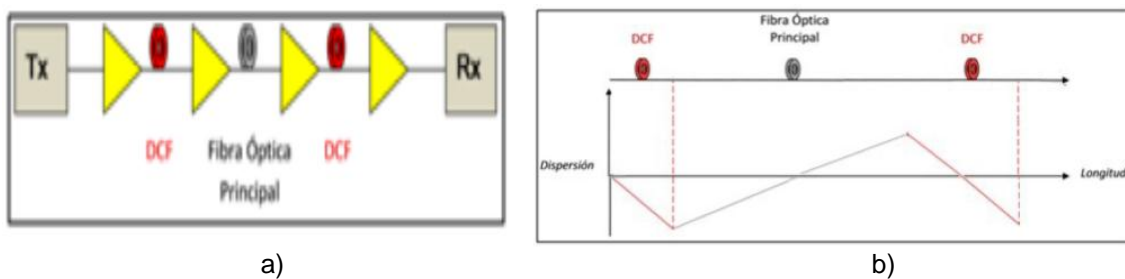


Figura 2.4 a) Configuración y b) Mapa de dispersión de la técnica de compensación simétrica óptica para la CD [3].

Esta técnica es recomendada para sistemas de mayor velocidad de transmisión por presentar un mejor rendimiento en comparación con las otras dos técnicas, sin embargo la implementación requiere un mayor costo [20].

2.5 Parámetros de una DCF

Las propiedades de la fibra compensadora de dispersión están directamente relacionadas con el desempeño del enlace, al ser variados los parámetros relacionados con las propiedades de la fibra se puede tener un mejor o peor enlace, como por ejemplo un alto valor en la figura de mérito (FOM) permite diseñar enlaces a larga distancia. En la tabla 2.6 se muestran ciertos valores típicos de la fibra DCF.

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	0.50	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	200	190	150
Pérdidas de Empalme [dB]	0.35	0.2	0.3	N/A	N/A	N/A

Tabla 2.7 Parámetros típicos de algunas fibras DCF [3]

En el siguiente capítulo, se define una metodología para analizar y evaluar, mediante la configuración del mejor desempeño de la red DWDM respecto a la migración de 10 a 40 Gbps, basadas en el análisis de propiedades de una DCF.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

En este capítulo se desarrolla el proceso de simulación que permita evaluar y analizar los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-DQPSK trabajando a una velocidad de transmisión de 10 y 40 Gbps, teniendo en cuenta las variaciones de los parámetros en las propiedades de una 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; para este fin se hará uso de la herramienta de simulación OptSim® de Rsoft.

3.1 Herramienta de simulación

Para el desarrollo de este trabajo de grado, la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca nos facilita la herramienta de simulación OptSim® para los sistemas de comunicaciones ópticas, ya que cuenta con la licencia de dicha herramienta. OptSim® permite realizar diseño, pruebas, análisis de un sistema de comunicaciones y la visualización de ello; brinda componentes necesarios para el diseño, simplemente se agrega los bloques convenientes para el enlace óptico, además simula degradaciones para analizar el comportamiento de la red y presenta ejemplos como esquemas de modulación que pueden ser utilizados para posteriores investigaciones [18]. Estas características son pertinentes para el desarrollo del trabajo de grado, por lo cual ha sido seleccionada.

OptSim® define dos modos de simulación que pueden ser utilizados según los resultados que se requieran: Modo Bloque, en el cual la secuencia de entrada se evalúa por bloque hasta el punto de salida y Modo Muestra, en el cual se implementa muestra a muestra, de tal forma que la señal de datos pasa entre componentes y representa una muestra única en cada instante de tiempo. Este último modo presenta dos tipos de simulación: la Técnica de Ancho de Banda Variable (VBS, *Variable Bandwidth Simulation*), que define un entorno donde las señales se propagan como muestras en el dominio del tiempo sobre un ancho de banda variable y sirve para determinar cómo se comporta la señal captada en la recepción de datos (óptica o eléctrica), y la Técnica de Propagación Espectral (SPT, *Spectral Propagation Technique*) que se realiza en el dominio de la frecuencia donde las señales se propagan en la red teniendo en cuenta las pérdidas de los componentes y el ruido, permite los espectros, la OSNR y los niveles de potencia en cualquier punto de la red óptica que se está simulando. VBS presenta diferentes opciones de simulación: Modelo “VBS Loss Only Fiber” que solo tiene en cuenta la atenuación de la fibra, el Modelo “VBS Linear Fiber” considera únicamente los efectos lineales y el Modelo “Full VBS” que tienen en cuenta todos los efectos de las fibras, lineales y no lineales, considerándose la opción más completa de simulación [36].

Para este trabajo de grado se acogerá el modo de simulación muestra y la técnica VBS, ya que permitirá obtener los resultados de los diferentes parámetros a estudiar de manera conjunta e independiente a su vez, siempre y cuando se estipulen diferentes valores, por lo menos un parámetros variable correspondiente a un dispositivo perteneciente a la red óptica a simular.

3.2 Metodología de simulación

Para realizar el análisis comparativo del desempeño en la migración de una red DWDM de 10 a 40 Gbps, ante las variaciones de las propiedades de una DCF, se debe seguir una metodología de simulación constituida por una serie de pasos, que conllevan a cumplir el objetivo específico número dos. Los pasos o procesos de simulación son:

- ✓ Definición del escenario de simulación y casos de estudio.
- ✓ Identificación de los parámetros técnicos de simulación.
- ✓ Ejecución de la simulación.
- ✓ Análisis de los resultados de la simulación.

3.2.1 Definición del escenario de simulación y casos de estudio

Para realizar el análisis comparativo del desempeño en la migración de una red DWDM de 10 a 40 Gbps, ante las variaciones de las propiedades de una DCF, se plantea un escenario de simulación, del cual desprenden dos casos de estudio, en estos se implementan los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-DQPSK, como se muestra en la figura 3.1. Para cada caso se estudia el comportamiento del sistema DWDM al variar las propiedades de la DCF teniendo diferentes velocidades de transmisión, determinando de forma comparativa el mejor comportamiento del sistema, teniendo en cuenta el grado de afectación con respecto a los fenómenos lineales, fenómenos no lineales, y degradaciones mencionadas en el capítulo 1.

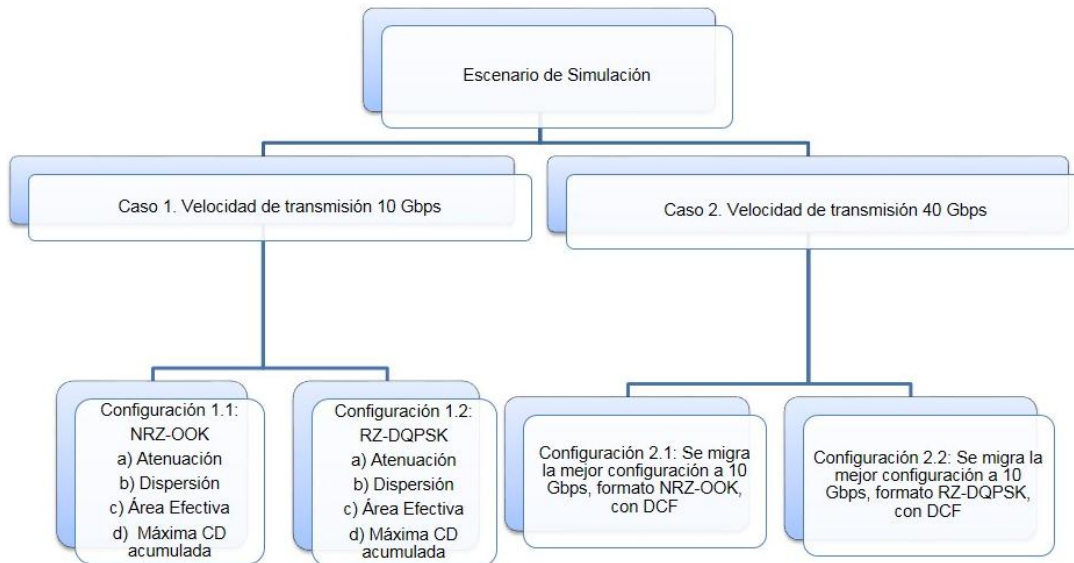


Figura 3.1 Escenarios de simulación y casos de estudio.

3.2.1.1 Escenario de simulación

Se encuentra compuesto por tres elementos básicos, un transmisor un medio de transmisión y un receptor. La topología implementada en el sistema DWDM es punto a punto. La Figura 3.2 muestra el esquema básico de referencia para la simulación, en él se puede apreciar unos parámetros fijos y variables, definidos como resultado del análisis teórico realizado en el capítulo 1 y 2.

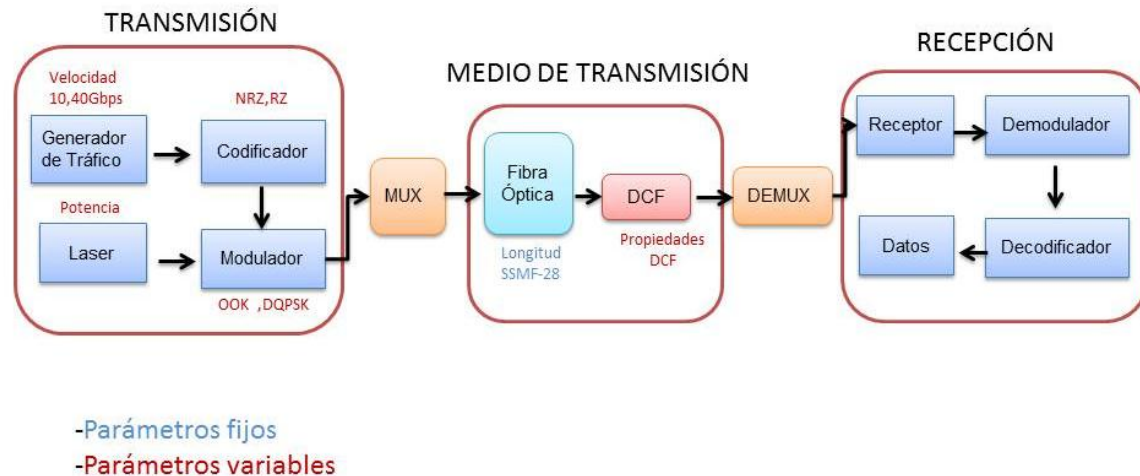


Figura 3.2 Escenario de simulación.

3.2.1.2 Casos de estudio

Se han definido dos casos de estudio: 1) velocidad de transmisión a 10 Gbps, 2) velocidad de transmisión a 40 Gbps. En el caso 1, se trabaja con una velocidad de 10 Gbps para los parámetros de modulación NRZ-OOK y RZ-DQPSK pretendiendo lograr la máxima longitud en el segmento de red, partiendo de 2 escenarios de simulación: a) con una DCF estándar y b) con variaciones en los parámetros de las propiedades de la DCF. Al evaluar los 2 segmentos de red, se podrá establecer si las propiedades de la DCF permiten aumentar la longitud de la red; de ser así, escogiendo los mejores parámetros de las propiedades de la DCF, los cuales a su vez serán implementados en los segmentos de red a una velocidad superior de 40Gbps, se quiere observar si se puede alcanzar las longitudes halladas en el segmento de red con DCF estándar y con la variación en las propiedades de la DCF de 10Gbps, de ser así se puede concluir que se lograría una migración en la red.

3.2.1.2.1 Configuración, casos de estudio a 10Gbps

- Formato de modulación NRZ-OOK y RZ-DQPSK

Para esta configuración se busca establecer el mejor desempeño del sistema DWDM, variando las propiedades de la DCF. Además de estos parámetros se variará la potencia de transmisión, la longitud de la fibra óptica estándar, espaciado entre canales, número de dispositivos amplificadores, la ganancia y potencia de estos. Al variar estos parámetros se podrá establecer el mejor desempeño del sistema, el cual contará con parámetros fijos en el transmisor, receptor y en las fibras utilizadas en el sistema, como son SSMF-28 y DCF. Además en esta configuración se realizará un análisis de cómo afectan los fenómenos lineales y no lineales al sistema al variar las propiedades de la DCF, a continuación se muestra el escenario a 10 Gbps con los parámetros fijos y variables en el segmento de red, figura 3.3.

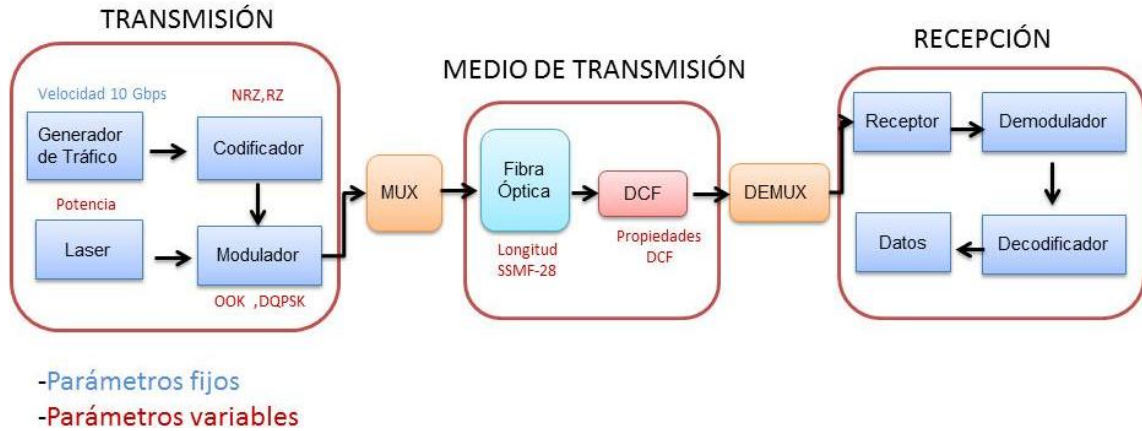


Figura 3.3 Configuración 1.1, 1.2 y casos de simulación a 10 Gbps.

3.2.1.2 Configuración, casos de estudio a 40Gbps

- Formato de modulación NRZ-OOK y RZ-DQPSK

Se establece a una tasa de transmisión de 40 Gbps utilizando la mejor configuración de red obtenida en 10 Gbps, se analiza si es posible realizar una migración a esta tasa de transmisión cambiando las propiedades de la DCF para obtener los valores óptimos de desempeño, como son la BER y factor Q. Si la migración no es realizable al evaluar los parámetros de desempeño al cambiar las propiedades de la DCF para una tasa de transmisión superior, se analizará que otros parámetros o dispositivos (estos dispositivos no deben afectar el funcionamiento del formato de modulación, ni lo deben cambiar) hay que variar o cambiar para establecer un sistema DWDM a una tasa de transmisión de 40 Gbps. A continuación se muestra el escenario a 40 Gbps con los parámetros fijos y variables en el segmento de red, figura 3.4.

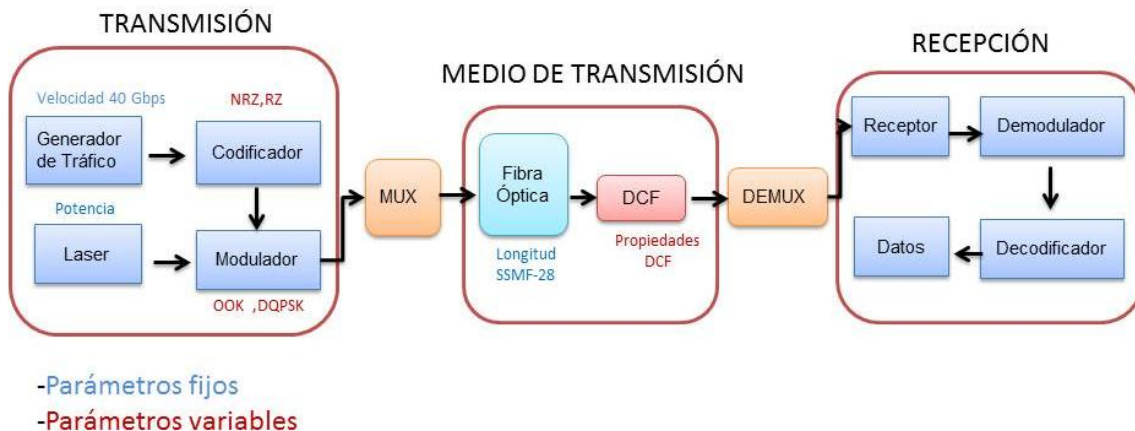


Figura 3.4 Configuración 2.1, 2.2 y casos de simulación a 40 Gbps.

3.2.2 Identificación de los parámetros técnicos de simulación

La identificación de los parámetros técnicos del escenario de simulación de la red DWDM, se realiza con relación al desarrollo hecho en el capítulo 1 y 2. Estos parámetros se definen a continuación.

- Tecnología DWDM unidireccional.
- Topología punto a punto para simplificar el esquema de la red DWDM.
- La potencia de transmisión será variable de -5dBm hasta 25 dBm y una sensibilidad en el receptor de -30dBm, esto permitirá observar con detalle el impacto de las variaciones de la DCF sobre el sistema DWDM.
- Se utiliza fibra óptica SSMF-28 Corning, una de las fibras ópticas más utilizadas a nivel comercial en sistemas DWDM.
- Velocidad de transmisión a 10 Gbps, velocidad a la cual trabajan la mayoría de operadores nacionales y 40 Gbps, velocidad que desean implementar dichos operadores de fibra óptica.
- Se empleará un formato robusto RZ-DQPSK y un formato con baja tolerancia a las degradaciones ópticas NRZ-OOK, con el fin de garantizar la influencia de los parámetros de la DCF en el desempeño del sistema.
- Teniendo en cuenta la recomendación ITU-T G.694.1 [6], citada en el capítulo 1, los espaciamentos entre canales serán de 50, 100 y 200 GHz; es importante destacar que el espaciamento a 100 GHz es el más implementado por los operadores de fibra óptica, por lo que en su gran mayoría los resultados se obtendrán con base en este espaciamento. Las longitudes de onda establecidas, son tomadas teniendo en cuenta equipos comerciales:

Número de señales	Frecuencia Central Nominal [THz]	Longitud de Onda [nm]
Canal 1	193.1 THz	1552.52
Canal 2	193.2 THz	1551.72
Canal 3	193.3 THz	1550.92
Canal 4	193.4 THz	1550.12

Tabla 3.1 Plan de frecuencias a 100GHz (0.1nm) [37].

- Los parámetros de la DCF a variar han sido definidos en trabajos de grado como por ejemplo, Impacto de las propiedades de una fibra compensadora de dispersión (DCF) en el diseño de un sistema WDM y el área efectiva por equipos Fujikura SC-DCFM, el cual es un módulo compensador con DCM, otros equipos comerciales y no comerciales [38], [39], como se describe a continuación:
 - Atenuación: 0.1 a 3.5 dB/Km
 - Coeficiente de dispersión: -17 a -333 ps/nm*Km
 - Área efectiva: 18,20, 21 μm^2

- Al implementar fibra compensadora de dispersión, se presentan pérdidas de potencia las cuales serán contrarrestadas introduciendo amplificadores EDFA.

En la tabla 3.2, aparecen de forma resumida los parámetros más sobresalientes del escenario de simulación.

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
PARÁMETRO	VALORES
Topología de Red	Punto a Punto
Velocidad del sistema	10 y 40 Gbps
Tecnología de Red	DWDM unidireccional
Banda de operación	Banda C (1530nm – 1560nm)
Ventana	Alrededor de 1550 nm
Estándares empleados	G.652.D, G.694.1
Tipo de Fibra	SSMF-28 (Corning)
Número de canales implementados	4 canales
Espaciamiento entre canales	200 GHz(1.6 nm), 100 GHz (0.8 nm), 50 GHz (0.4 nm)
Equipos de Amplificación	EDFA
Método de compensación	DCF
CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR	
Formato de modulación	NRZ-OOK y RZ-DQPSK
Tipo de modulación	Externa con Mach-Zehnder
Potencia del transmisor del láser	-5 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 DE LA DCF	
Esquema de compensación	Post-compensación, Pre-compensación
Coefficiente de dispersión	Entre -17 y -333 ps/nm/km
Atenuación	Entre 0,1 y 3.5 dB
CARACTERÍSTICAS DEL RECEPTOR	
Sensibilidad del receptor	-30 dBm
BER y Factor Q	10^{-12} y 17dB
Filtros de recepción ópticos	Filtro eléctrico tipo Bessel y filtro óptico Coseno Rizado

Tabla 3.2 Característica y parámetros escenario de simulación.

3.2.3 Ejecución de la simulación

Los diferentes casos de uso establecidos en la sección 3.2.1 se implementan en la herramienta OptSim® es un entorno de simulación que soporta el diseño y la evaluación de desempeño en sistemas de comunicaciones ópticas. Para la ejecución de la simulación se establece el número de muestras y el tiempo de simulación que permita obtener resultados confiables, 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, y el factor Q.

3.2.3.2 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 de la ITU-T G.sup39 [22], la cual sugiere un valor de BER = 10^{-12} y Q = 7,03, ya que al mantener el sistema con parámetros estándar la migración del mismo optimizará recursos. Para verificar los casos de estudio definidos en la primera fase de la metodología se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- ✓ Verificación de la máxima distancia alcanzable (Comprobación de la distancia límite en el enlace óptico).
- ✓ Verificación de los efectos lineales y no lineales con relación a los parámetros de las propiedades de la DCF.
- ✓ Verificación de los parámetros de monitoreo óptico OPM.

3.2.4 Análisis de los resultados de la simulación

En los diferentes casos de estudio se analizará: la máxima distancia alcanzable por el enlace, efectos lineales, no lineales y los parámetros de desempeño. Se debe tener en cuenta el cumplimiento de los parámetros recomendados para un rendimiento que permite la optimización de recursos de red, los cuales son una BER = 10^{-12} y Q = 17,03 dB según la nueva recomendación de la ITU-T. En conclusión para el proceso de simulación se llevaran 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 3.5 se observa de forma gráfica el algoritmo que contiene los pasos para una correcta simulación, los resultados y el respectivo análisis de estos se desarrollan en el capítulo cuatro.

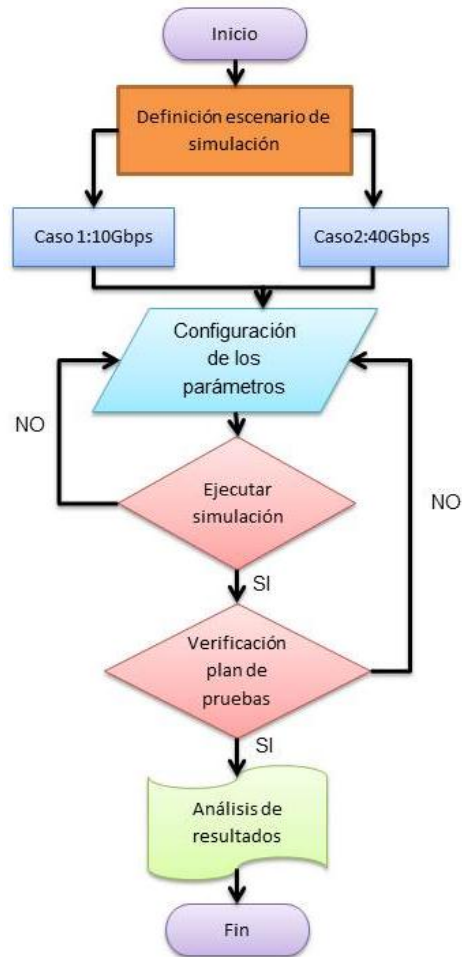


Figura 3.5 Diagrama de flujo, casos de uso análisis de resultados de simulación.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL MEJOR DESEMPEÑO DE LA RED DWDM RESPECTO A LA MIGRACIÓN DE 10 A 40 Gbps, BASADAS EN LAS VARIACIONES DE LAS PROPIEDADES DE UNA DCF

En el presente capítulo se implementa los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-OOK, con el fin de analizar si las variaciones en las propiedades de la fibra compensadora de dispersión en un segmento de red, permiten migrar el sistema DWDM de 10 a 40 Gbps, siempre y cuando el segmento de red cumpla con los parámetros objetivo de Q (17dB) y BER (10^{-12}). Además se analiza el comportamiento de la DCF frente a las degradaciones de la fibra, como son fenómenos no lineales y principalmente fenómenos lineales; entre los que se destaca la dispersión cromática.

El primer análisis a realizar, con una velocidad de trasmisión de 10 Gbps y modulación NRZ-OOK; para ello se establece la distancia máxima que la red óptica es capaz de alcanzar sin dispositivos que compensen las degradaciones del medio y posteriormente introducir la DCF y el amplificador de potencia; esto permitirá analizar las mejoras que se obtienen al implementar estos dispositivos en el sistema⁵ DWDM. Por último, se varían las propiedades de la DCF para evaluar el desempeño mediante los parámetros objetivos del sistema DWDM.

4.1 Caso 1: Configuración 1.1 Análisis del formato de modulación NRZ-OOK a 10 Gbps ante la variación de las propiedades de la DCF.

En la figura 4.1 se muestra un sistema DWDM con formato de modulación NRZ-OOK, el cual consta de una fuente láser de modulación externa, se forma la onda a partir de un driver NRZ rectangular o un driver coseno alzado; además se presenta un modulador MZ de seno cuadrado. Así mismo, se describe el receptor el cual requiere de unos filtros eléctricos y ópticos centrados en la frecuencia de trabajo, con un fotodetector de sensibilidad aceptable (-30 dBm).

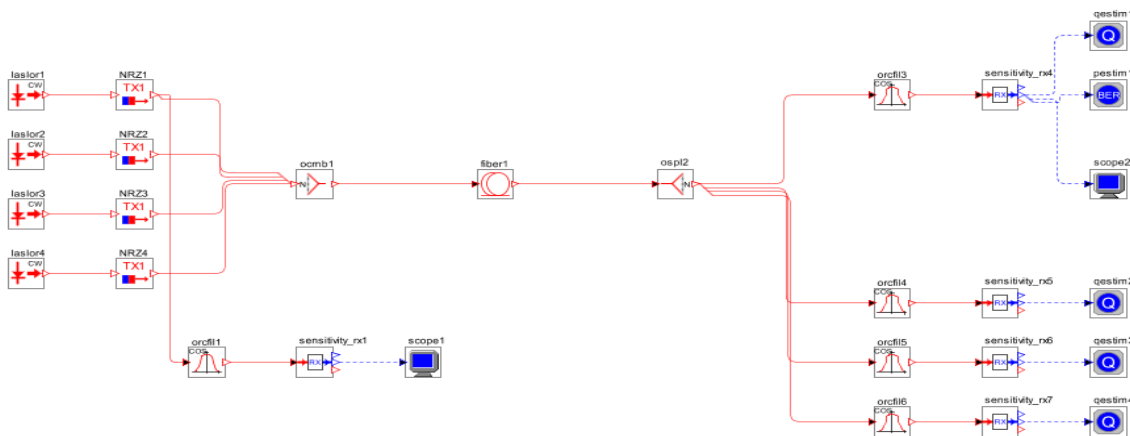


Figura 4.1 Modelo simplificado de la red para el formato de modulación NRZ-OOK, transmitiendo a 10Gbps.

En las figuras 4.2(a) y 4.2 (b) se observa el funcionamiento del formato NRZ-OOK, por medio del diagrama de ojo y el espectro óptico de la señal transmitida, utilizando un driver coseno alzado, con una frecuencia de trabajo de 193.1THz, a una velocidad de

¹³En este capítulo se toma la palabra sistema para referirse a la red óptica.

transmisión de 10 Gbps realizadas con las medidas en el receptor Back to Back; el cual permite establecer la transmisión ideal, es decir, sin perturbaciones influenciadas por degradaciones del medio de información que llega al receptor.

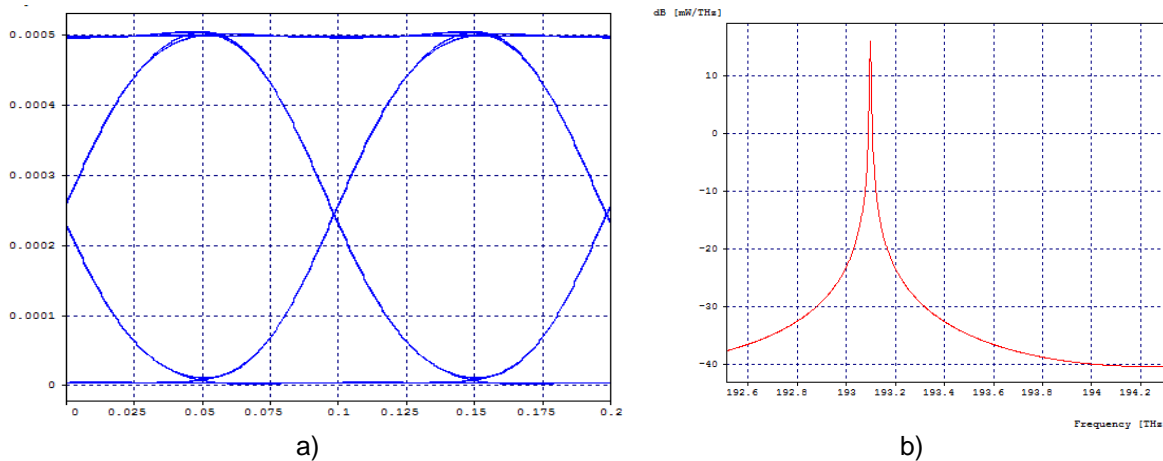


Figura 4.2 Diagrama del ojo a) y Espectro óptico en 193.1Thz b) de la señal en el receptor Back to Back; para una velocidad de transmisión de 10 Gbps con formato de modulación NRZ-OOK

4.1.1 Máxima distancia alcanzable en el segmento de red, con parámetros implementados por los diferentes operadores de fibra óptica

Una vez realizado el Back to Back, se configura el segmento de red con parámetros estándar utilizados por los diferentes operadores de fibra óptica; con el fin de analizar la inclusión de la fibra SSMF-28, DCF y el amplificador de potencia sobre la red óptica.

4.1.1.1 Máxima distancia alcanzable por la fibra SSMF-28, sin dispositivos compensadores de dispersión ni amplificadores

En primer lugar, se establece cuál de los dos drivers que forman el pulso en transmisión tiene un mejor funcionamiento. Al comparar los drivers coseno alzado y rectangular, se evidencia que el segundo alcanza una distancia menor respecto a los parámetros objetivos de BER y factor Q, como se muestra en el anexo C tabla 12. Por lo tanto, se utiliza el driver coseno alzado en el transmisor; debido a que este dispositivo es robusto frente al ruido y las degradaciones introducidas por el canal de transmisión logrando aumentar la longitud del segmento de red.

Luego de configurar el driver coseno alzado en transmisión, se establece la máxima distancia que puede alcanzar la fibra estándar SSMF-28 en el segmento de red para una BER de 10^{-12} y un factor Q de 17dB; cabe aclarar que la potencia implementada inicialmente en el sistema es de 0 dBm, teniendo en cuenta solo a los fenómenos lineales presentes en la fibra monomodo. Las diferentes longitudes alcanzadas en la fibra monomodo estándar se encuentran en la tabla 4.1.

Potencia de transmisión(dBm)	Canal (Thz)	Distancia (Km)	Q (dB)	BER	Potencia de recepción (dBm)
0	193.1	0	40	1e-40	-5.942
0	193.1	15	32.65	1e-40	-8.726
0	193.1	35	24.37	1e-40	-12.422
0	193.1	65	20.38	1.16e-25	-18.183
0	193.1	75	19.30	3.91e-20	-20.049
0	193.1	85	18.23	2.12e-16	-21.948
0	193.1	95	17.08	1.69e-12	-23.771
0	193.1	105	15.71	7.49e-10	-25.692
0	193.1	125	9.30	0.19e-02	-29.594
0	193.1	130	7.53	0.93e-02	-30.415
0	193.1	140	6.02	0.22e-01	-32.245

Tabla 4.1 Parámetros de monitoreo óptico, con espaciamento entre canales de 100GHz a una velocidad de trasmisión de 10 Gbps.

Como se observa en la tabla 4.1, la distancia máxima alcanzable en el sistema es de 95 Km, esta cumple con las condiciones de BER y factor Q establecidas en la tabla 3.2 del capítulo 3. Además, en las figuras 4.3 (a) ,4.3 (b) y 4.3 (c) se observa el comportamiento de los parámetros de monitoreo, como factor Q, BER y potencia de recepción frente a las variaciones de la longitud de la fibra óptica estándar en el segmento de red.

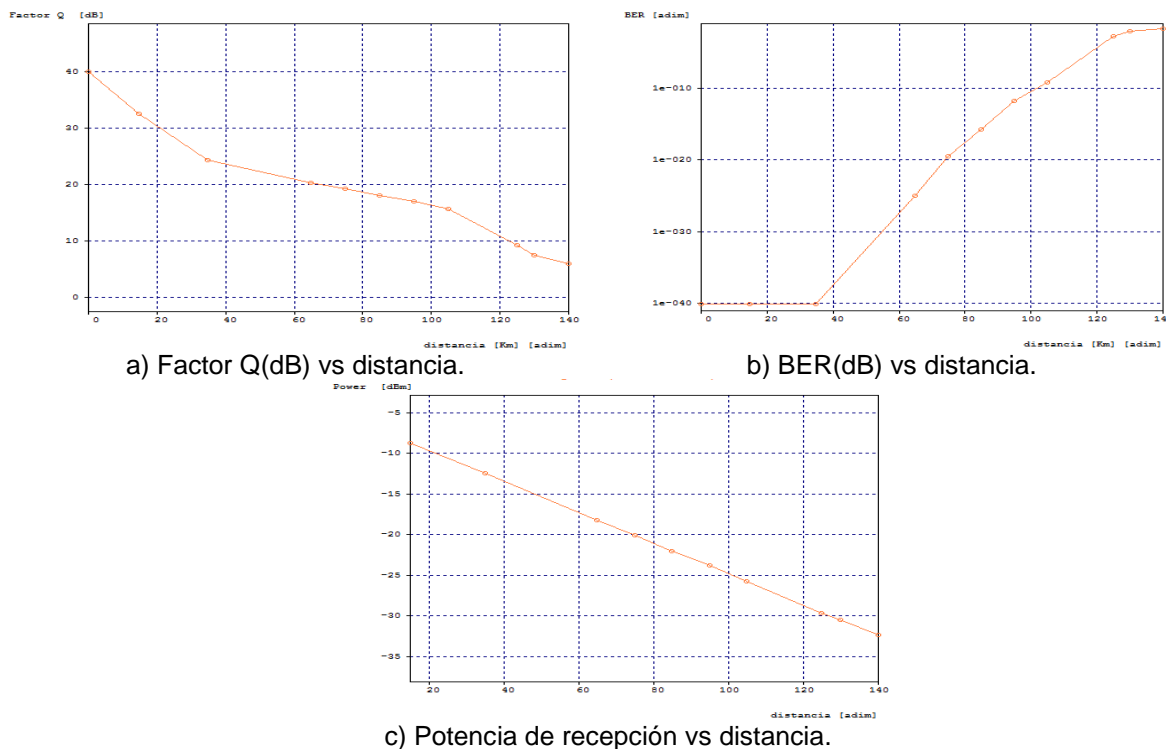


Figura 4.3 Comportamiento de los parámetros ópticos vs la longitud de fibra estándar.

El segmento de red con una longitud de SSMF-28 de 95 Km ocasiona degradaciones sobre la señal transmitida, debido a los fenómenos lineales; como se visualiza a continuación en las figuras 4.4; en estas se observa que los fenómenos lineales afectan la transmisión, porque al comparar el diagrama de ojo BACK to BACK con el obtenido al colocar 95 Km de fibra SSMF-28 sobre la línea de transmisión, muestra que la apertura de

ojo no se diferencia y es pequeña; debido a que este se encuentra desfasado en el instante óptimo de muestreo y de decisión; Vale la pena aclarar, que si la potencia de transmisión es del orden de cero decibelios, los efectos no lineales son despreciables inicialmente.

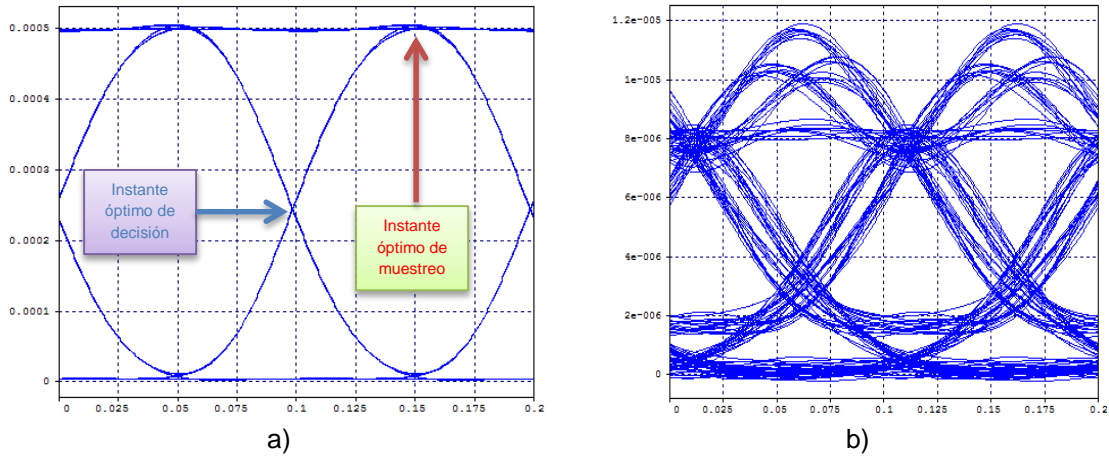


Figura 4.4 Diagrama de ojo en el receptor: a) Back to Back y b) tras un tramo de 95 Km, afectado por todas las degradaciones de la red óptica.

El impacto de los fenómenos lineales sobre la señal transmitida, se aprecia de igual manera en la deformación de los pulsos recibidos en comparación de los pulsos transmitidos a través del enlace. Como se aprecia en la figura 4.5(a) y 4.5 (b).

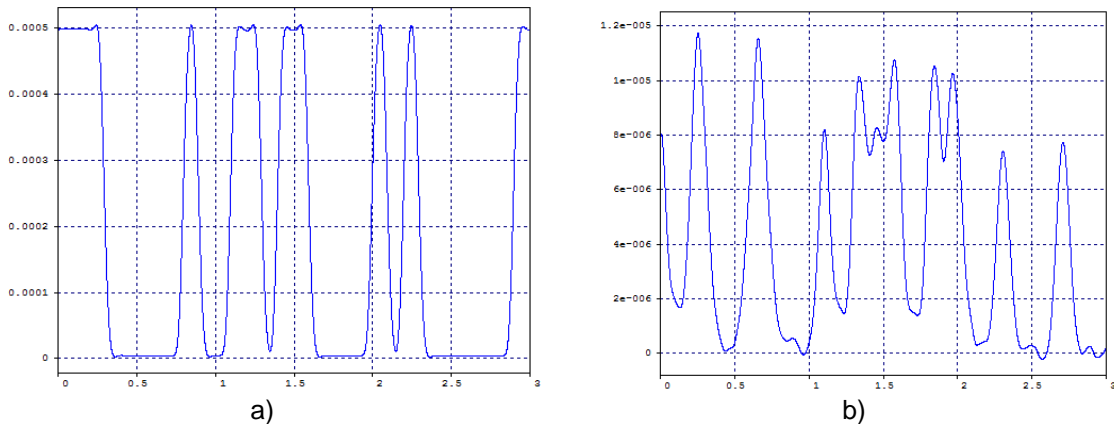


Figura 4.5 Señal eléctrica en el receptor: a) Back to Back y b) tras un tramo de 95Km de SSMF-28

Los fenómenos lineales están divididos en: atenuación, ruido, PMD y DC; en esta sección no se analizará el efecto de la PMD sobre el segmento de red, como se ha mostrado en trabajos de grado realizados anteriormente y han establecido que la red óptica es altamente tolerable a este efecto lineal, porque no tiene mayor incidencia sobre la señal transmitida a 10 Gbps sobre la fibra SSMF-28 [3], [12], [20].

Con el fin de determinar, cuál de los efectos lineales, tiene una mayor incidencia negativa sobre la señal transmitida; se compara la atenuación y el ruido frente a la dispersión cromática de la red. En primer lugar se analiza cómo afecta el ruido y las pérdidas introducidas por los dispositivos ópticos; para ello se simula en VBS Loss Only Fiber, se desprecia la CD introducida por la fibra SSMF-28, la cual tiene un valor de $18 \frac{Ps}{nm*Km}$; para

un segmento de red de 95Km, las pérdidas introducidas son 19 dB, ya que la fibra SSMF-28 tiene un coeficiente de atenuación de $0,2 \frac{dB}{Km}$. En segundo lugar se realiza la simulación en VBS Linear Fiber la cual tiene en cuenta la dispersión cromática y su efecto sobre la señal óptica transmitida. Los resultados arrojados en el diagrama de ojo de como impactan estos fenómenos lineales a la información transmitida se aprecia a continuación en las figuras 4.6 (a) y 4.6 (b); en donde la mayor degradación de la señal transmitida es ocasionada por la dispersión cromática en comparación a las pérdidas por atenuación y ruido, ya que con estas últimas el sistema logra llegar hasta unos parámetros OPM de $Q=26.10$, $BER= 1e-40$.

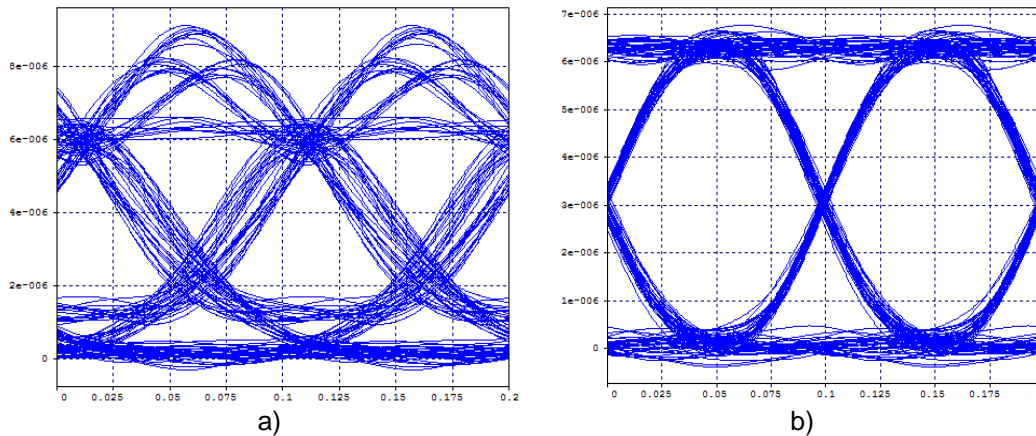


Figura 4.6 Diagrama del ojo tras un tramo de 95 km: a) afectado por la dispersión cromática y b) afectado por la atenuación y ruido.

En la figura 4.6 a), se observa que la dispersión cromática aporta pérdidas significativas a la red óptica, pero son difíciles de compensar a menos que se disminuya la longitud del segmento o se aumente la potencia de transmisión; ocasiona la excitación de los fenómenos no lineales en el sistema DWDM.

Finalmente se puede concluir que si solamente la atenuación y el ruido estuviesen presentes en el sistema, la transmisión de información sería ideal para los operadores de red óptica. Por lo tanto para que un enlace óptico funcione con parámetros Q y BER óptimos, debe estar configurado con fibra compensadora dispersión o algún dispositivo compensador, porque uno de los fenómenos que más degrada la transmisión de información en redes ópticas es la dispersión cromática (DC). En el siguiente análisis se observa las mejoras que tiene el sistema DWDM al introducir fibra compensadora de dispersión.

4.1.1.2 Máxima distancia alcanzable en el segmento de red con formato NRZ-OOK a 10 Gbps introduciendo fibra compensadora de dispersión y sin dispositivos de amplificación.

En el presente análisis se introduce fibra compensadora de dispersión para observar el impacto frente a los parámetros objetivo, luego se varían los niveles de potencia, para establecer cuál de ellos es óptimo en el funcionamiento del sistema DWDM, permitiendo obtener las máximas longitudes en la red óptica al utilizar la DCF. De este modo obtener un segmento de red con parámetros objetivo de Q (17dBm) y BER (10^{-12}), que servirá como escenario base al variar las propiedades de la DCF.

De la tabla 4.1, un segmento de red de 95 Km, la dispersión cromática acumulada en el enlace con fibra monomodo estándar se calcula a partir de la fórmula 2.2 del segundo capítulo y es igual a:

$$D_{link}(\lambda) = 95Km \left[18 \frac{Ps}{nm \cdot Km} + 0.056 \frac{Ps}{nm^2 \cdot Km} (1552.52nm - 1550nm) \right] = 1723.4064 \frac{Ps}{nm}$$

Para contrarrestar la dispersión cromática se utiliza un coeficiente de dispersión negativo de la DCF de -100 ps/nm·Km, siendo este parámetro ideal en las fibras de dispersión cromática comerciales. A su vez los valores de área efectiva y coeficiente de atenuación en la DCF, serán parámetros estándar⁶ para este análisis, como se muestra a continuación en la tabla 4.2.

Coeficiente de dispersión	Área efectiva	Coeficiente de atenuación
-100 $\frac{Ps}{nm \cdot Km}$	20 μm^2	0.55 $\frac{dB}{Km}$

Tabla 4.2 Parámetros estándar de la DCF.

La fibra SSMF-28 tiene un coeficiente de dispersión fijo, que sirve para calcular la distancia de compensación de la dispersión cromática, utilizando la fórmula 2.3 (definida en el segundo capítulo), así:

$$l_{DCF} = \left| \frac{18 \frac{Ps}{nm \cdot Km}}{-100 \frac{Ps}{nm \cdot Km}} \right| * 95Km$$

Se hace necesario una longitud de 17.1 Km para reducir hasta 13.4064 $\frac{Ps}{nm}$ la CD generada por la fibra SSMF-28, por lo tanto en la línea de transmisión se introduce fibra compensadora de dispersión, con método de post-compensación y pre-compensación, ya que la fibra DCF tiene mayor atenuación en comparación a la fibra SSMF-28, la cual provoca que la señal eléctrico óptica disminuya; esto se comprueba al observar la potencia de llegada con una longitud de SSMF-28 de 95 Km sin utilizar DCF (Tabla 4.1) y luego utilizando fibra compensadora de dispersión cromática. Los métodos de compensación de la CD se muestran a continuación en la tabla 4.3 y tabla 4.4.

% DCF	Longitud DCF (Km)	PTrx (dBm)	Canal (Thz)	Q(dB)	BER	Prx (dBm)
100	17.1	0	193.1	11.06857	0.000175234	No detectado
75	12.825	0		16.33754	6.11412e-11	No detectado
50	8.55	0		18.02971	2.31243e-15	-29.18
25	4.275	0		18.97869	3.8538e-19	-26.90

Tabla 4.3 Porcentajes de compensación de la DCF para una distancia de 95 Km, utilizando post-compensación.

% DCF	Longitud DCF (Km)	Ptx (dBm)	Canal (Thz)	Q(dB)	BER	Prx (dBm)
100	17.1	0	193.1	10.89694	0.000260374	No detectado
75	12.825	0		15.10371	1.31857e-8	No detectado
50	8.55	0		19.00965	1.09307e-18	-29.19
25	4.275	0		18.16928	1.0204e-15	-26.89

Tabla 4.4 Porcentajes de compensación de la DCF para una distancia de 95 Km, utilizando pre-compensación.

¹⁴Parámetros utilizados por los diversos operadores de servicios de redes ópticas.

Como se observa en la tabla 4.3 y tabla 4.4, los parámetros objetivos no son alcanzados a medida que se aumenta la longitud de la fibra compensadora de dispersión, para los dos métodos; post-compensación y pre-compensación, ya que la potencia en transmisión es muy pequeña y la atenuación de la DCF ayuda a degradar la señal transmitida por el segmento de red. Este resultado también se puede visualizar en la figura 4.7

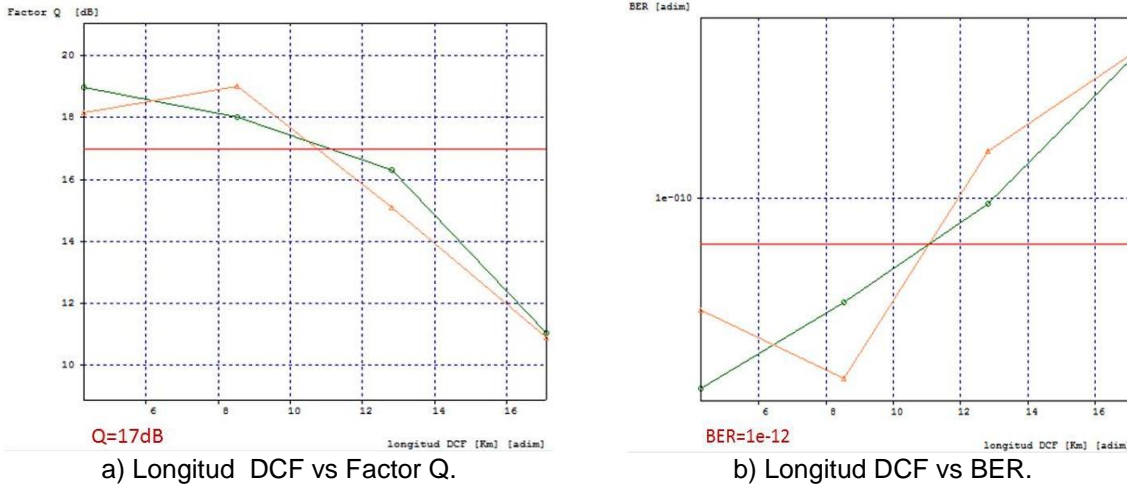


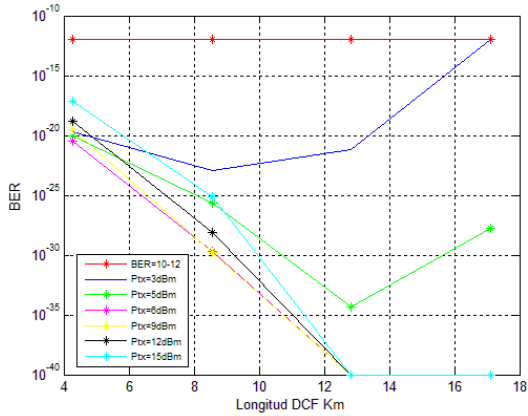
Figura 4.7 Parámetros objetivo en los diferentes porcentajes de DCF para post-compensación y pre-compensación

En la figura 4.7, se realiza una comparación entre los dos métodos de compensación, pre-compensación (línea naranja) y post-compensación (línea verde), en los cuales los parámetros objetivo son alcanzables hasta un 50% de porcentaje de compensación en la longitud de la DCF; en este caso los mejores parámetros objetivo se obtienen al realizar pre-compensación con una longitud de 8.55 Km; esto se debe a que en este método de compensación los fenómenos lineales impactan en menor medida la señal transmitida.

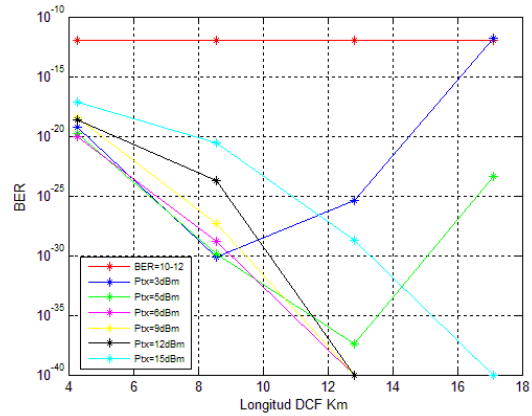
Por otra parte la potencia implementada inicialmente de 0 dBm no logra contrarrestar las pérdidas por kilómetro en el enlace provocadas por la DCF, entonces se aumenta la potencia de transmisión de 3 dBm hasta 15 dBm sobre el canal de 193.1 THz; con el fin de analizar cuál de los dos métodos de compensación ofrece una mayor longitud al segmento de red, cumpliendo los parámetros objetivo. Solo se varía la potencia de un canal, dado que potencias altas excitan fenómenos no lineales intercanal, los otros canales permanecerán con una potencia de 0 dBm.

En las figuras 4.8(a), 4.8 (b), 4.8(c), 4.8 (d), 4.8 (e) y 4.8 (f) se observa la variación de la potencia de transmisión para los dos métodos de compensación de la CD; los datos de estas figuras se encuentran en el anexo C, tabla 13 y tabla 14.

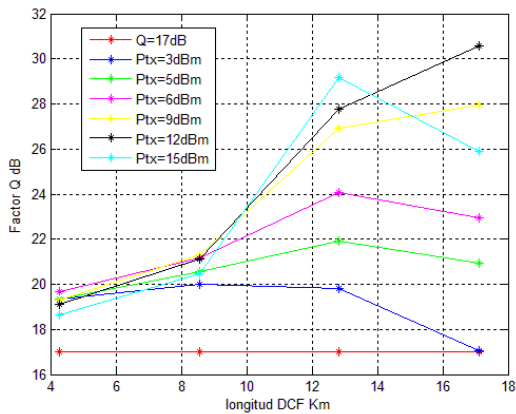
Análisis Comparativo del Desempeño en la Migración de una Red DWDM de 10 a 40 Gbps, ante las Variaciones de las Propiedades de una Fibra Compensadora de Dispersión (DCF)



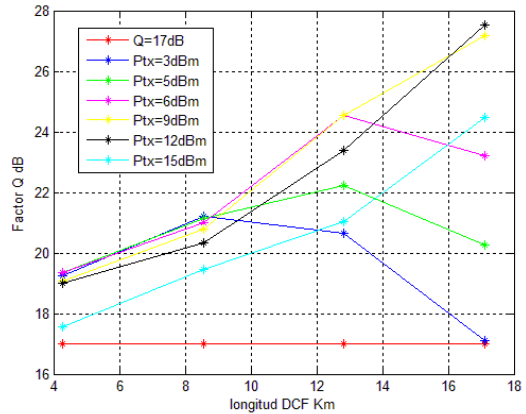
a) Longitud DCF con post-compensacion vs BER.



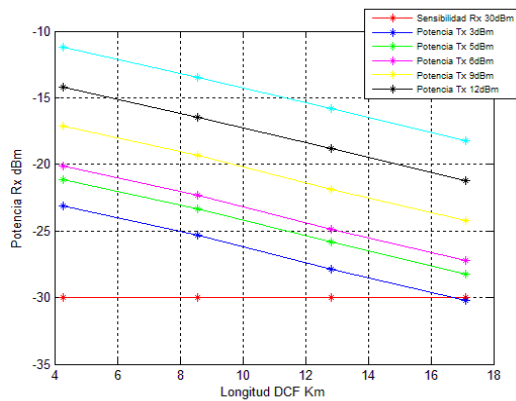
b) Longitud DCF con pre-compensacion vs BER.



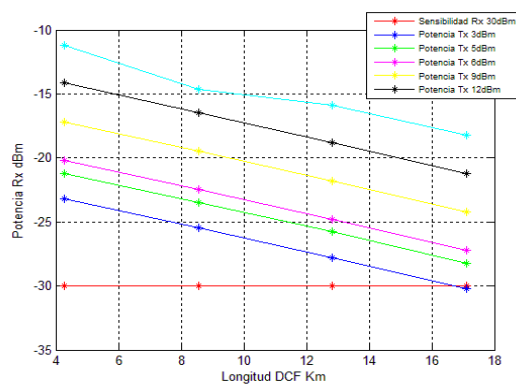
c) Longitud DCF con post-compensacion vs factor Q.



d) Longitud DCF con pre-compensacion vs factor Q.



e) Longitud DCF con post-compensacion vs PRx.



f) Longitud DCF con pre-compensacion vs PRx.

Figura 4.8 Resultados del factor Q, BER y potencia de recepción para post-compensación y pre-compensación con una fibra óptica SSMF-28 de 95 Km.

En la figura 4.8 se observa que para post-compensación y pre-compensación, los parámetros objetivo encontrados son altos y casi idénticos, demostrando así que los dos métodos de compensación son efectivos a la hora de contrarrestar las degradaciones del

medio óptico. Por lo tanto, se utilizará el método de post-compensación, ya que es el más implementado en las redes de fibra óptica en la actualidad.

A su vez los porcentajes de compensación de la DCF no varían al utilizar diferentes potencias de transmisión y con longitudes menores del 100% se logra alcanzar los parámetros objetivos, por ello se hace conveniente analizar que porcentajes de DCF son convenientes para el segmento de red.

En una longitud de 95 Km en la SSMF-28 los parámetros objetivo más altos se dan al tener una compensación del 100%; en la longitud de la DCF de 17.1 Km, así se introducen pérdidas en la red de 9.405 dB, pero la potencia de recepción en este caso siempre es la menor al variar la potencia de trasmisión; lo que lo hace ineficiente para un sistema DWDM ideal. Por consiguiente, al aplicar la relación costo eficiencia a corto plazo, la mejor opción es tomar un porcentaje de compensación entre 50% y 75% de la DCF, con longitudes de 12.8 y 8.55 Km respectivamente. Estas longitudes introducen pérdidas de 7.053 y 4.702 dB a la red óptica, como se muestran en el anexo C, tabla 13. En pocas palabras para posteriores análisis de segmento de red se compensara al 50 y 75 % de la DCF. A diferencia con una compensación del 25% de la DCF, no se tiene en cuenta porque no se logra alcanzar los parámetros objetivos en la red óptica.

En la figura 4.9 se muestran los diagramas de ojo para porcentajes de compensación del 75 y 50% en la longitud de la DCF; se utiliza una potencia umbral de 12 dBm, porque con potencias superiores los efectos no lineales tienen una mayor incidencia sobre la señal transmitida, provocando disminución en el factor Q y aumentos de la BER.

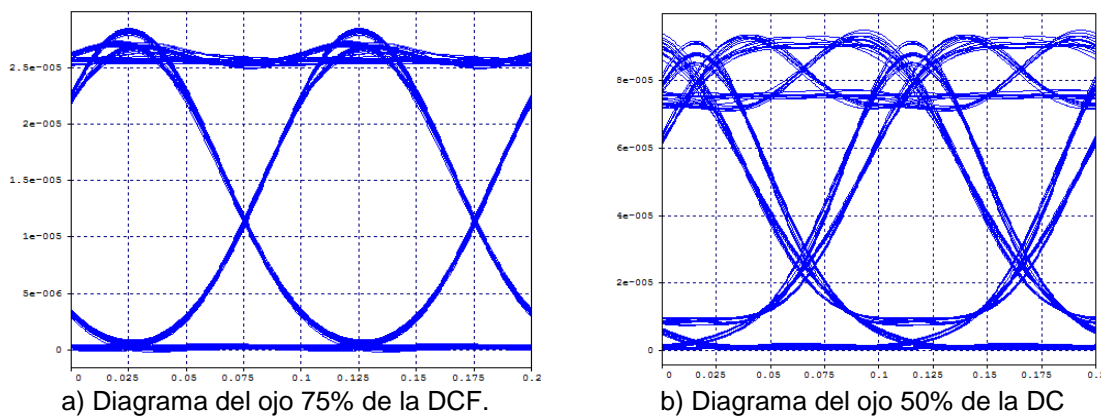


Figura 4.9 Diagramas de ojo obtenidos con $PT_x=12$ dBm; compensando al 75 y 50 % de la DCF, para una longitud de la SSMF-28 de 95 Km en el segmento de red.

Los diagramas de ojo de la figura 4.9, se encuentran afectados por la CD, que es provocada a su vez por efectos no lineales debido a que se aumentó la potencia de transmisión hasta 12 dBm con el fin de incrementar la longitud del segmento de red. Estos efectos no lineales se dividen en: intra-canal e inter-canal; para el siguiente análisis se estudia si la DCF es capaz de contrarrestar estos efectos en el segmento de red y determinar las potencias en trasmisión que los provocan.

Para corroborar la incidencia negativa sobre la señal transmitida provocada por los efectos no lineales intracanal; se aumenta la potencia de transmisión por arriba de los 12 dBm para un solo canal mientras que para los restantes la potencia de transmisión se deja en 0 dBm, debido a que, el sistema DWDM cuenta con cuatro canales en

transmisión. El resultado de una potencia superior a 12 dBm en transmisión se muestra en la figura 4.10.

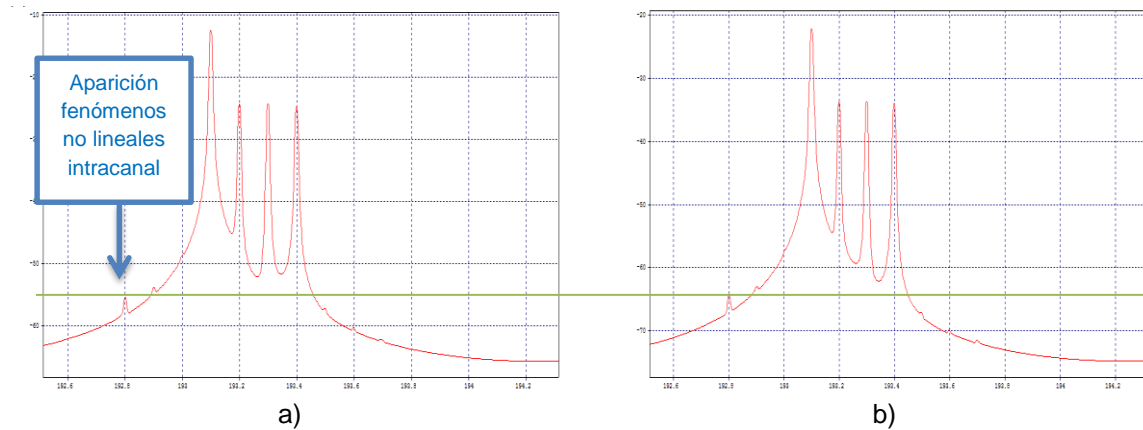


Figura 4.10 Fenómenos no lineales intracanal antes de la DCF a) y después de la DCF b)

Como se observa en la figura 4.10, la fibra compensadora de dispersión DCF, no es capaz de mitigar los efectos no lineales intracanal, por lo tanto se debe transmitir con potencias por debajo de los 12 dBm, no obstante, cabe la posibilidad cuando se transmite en los cuatro canales a la misma potencia, que aparezcan fenómenos no lineales intercanal, los cuales afecten la señal transmitida. Estos fenómenos no lineales intercanal conlleva a establecer hasta que potencia de transmisión en los cuatro canales estas degradaciones inciden sobre el segmento de red.

Al introducir potencias idénticas de 8 dBm para cada canal de transmisión, se existan los fenómenos no lineales intercanal, cómo se observa en la figura 4.11. Este resultado es contrario para potencias que van de 0 dBm hasta 6 dBm; por lo que se establece que potencias iguales o por debajo de los 6 dBm no excitan a los fenómenos no lineales.

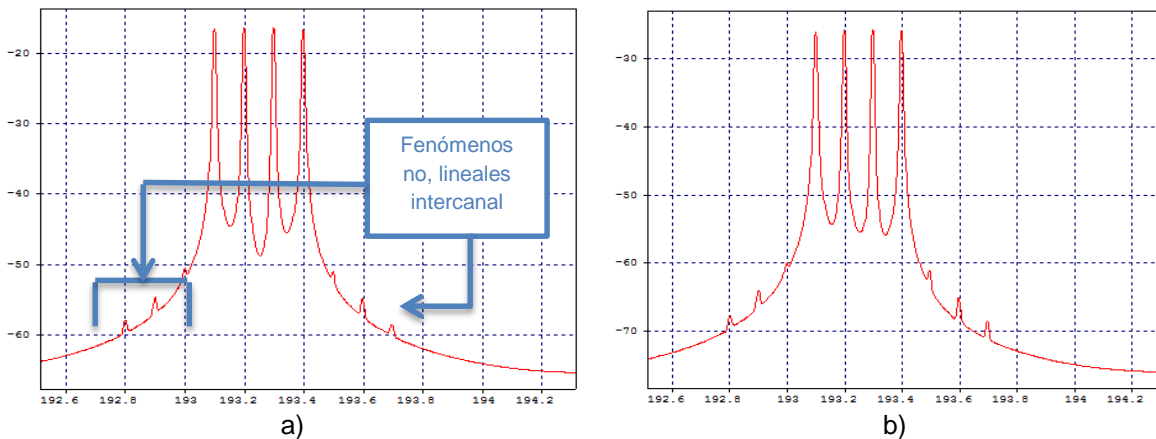


Figura 4.11 Excitación fenómenos no lineales intercanal, con potencia de Tx, para todos los canales de 8 dBm, a) antes de la DCF y b) después de la DCF.

Mediante el análisis de la figura 4.11, se observa que los fenómenos no lineales intercanal no son anulados por la DCF. Por lo tanto, se establece que la DCF no contrarresta perturbaciones provocadas por las altas potencias en transmisión; haciendo necesaria la utilización de potencias de transmisión que estén entre los 3 y 6 dBm, con el fin de no excitar fenómenos no lineales, ya que estos pueden ser contrarrestados utilizando bajas

potencias en transmisión; se determina no analizar la SPM, XPM y FWM en el sistema DWDM, debido a que no son un impedimento para lograr una migración en la velocidad de transmisión de 10 a 40 Gbps.

La longitud máxima que logra alcanzar el segmento de red cumpliendo los parámetros objetivos, con valores de potencia en transmisión de 3 a 6 dBm y compensando la longitud de la DCF al 50 y 75%, se encuentran en la tabla 4.5.

Ptx dBm	% DCF	Longitud SMF-28	Longitud DCF	Q dB	BER	Prx dBm
3	50	108	9.72	17.33765	1.17473e-13	-28.584
	75	102	13.77	17.22821	1.84038e-13	-29.599
4	50	111	9.99	17.50487	1.33053e-13	-28.300
	75	106	14.31	17.28148	1.89684e-13	-29.605
5	50	117	10.53	17.07917	5.31407e-13	-28.746
	75	109	14.715	17.06863	4.87821e-13	-29.433
6	50	119	10.71	17.45563	6.69376e-14	-28.205
	75	114	15.39	17.61773	5.05549e-14	-29.721

Tabla 4.5 Valores de longitud de SSMF-28 hasta donde se mantienen los parámetros objetivo Q y BER.

En la tabla 4.5, se observa que los valores de longitud máximo en el segmento de red, se obtienen al compensar al 50 % de la DCF en comparación a los obtenidos al compensar al 75 % de la misma y que al aumentar la potencia de transmisión también se aumenta la del segmento de red. Por otra parte las potencias obtenidas en recepción son bajas, ocasionadas por la atenuación de la DCF; para solucionar este problema se hace necesaria la introducción de un dispositivo amplificador de potencia sobre el segmento de red.

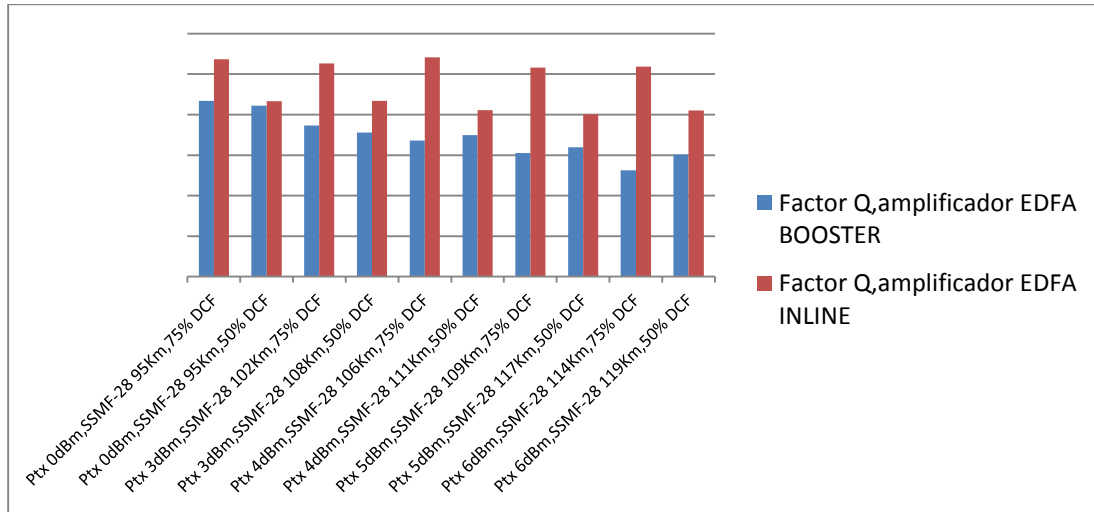
En conclusión en la sección 4.1.1.2, se observa como aumentan los niveles de los parámetros objetivos, al introducir fibra compensadora de dispersión en el segmento de red y como la fibra compensadora de dispersión incide positivamente para que la red óptica logre alcanzar distancias mayores en comparación a una que no tenga fibra compensadora. Este análisis es de gran importancia, ya que permitirá determinar si al variar las propiedades de la DCF la longitud de la red óptica aumenta o por el contrario disminuye.

4.1.1.3 Máxima distancia alcanzable en el segmento de red, utilizando fibra compensadora de dispersión y amplificador de potencia EDFA.

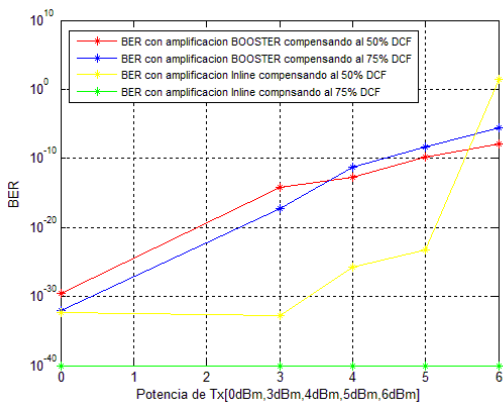
En un enlace de fibra óptica se necesitan niveles de potencia mayores a los obtenidos al introducir fibra compensadora de dispersión en el sistema; por lo tanto, se analiza si la potencia que llega a recepción aumenta al introducir EDFAS (amplificadores de potencia), y así mismo medir el impacto de este dispositivo sobre los parámetros objetivo de Q y BER.

Para el siguiente análisis se tendrá en cuenta los valores encontrados en la tabla 4.4 y se contará con dos configuraciones de amplificación óptica en el segmento de red: a) Configuración Booster; en la cual el amplificador EDFA se ubica entre el transmisor y la fibra óptica. b) Configuración Inline; en el cual el amplificador se usa entre span's de fibra óptica; en este caso en medio de la fibra SSMF28 y la DCF. Para las dos configuraciones se obtienen distintos resultados en el segmento de red como se muestra en las Figuras

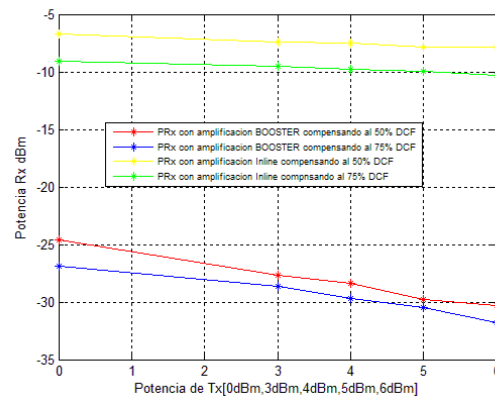
4.12(a),4.12(b) y 4.12(c) (Anexo C, tabla 21 y tabla 22); los resultados observados en estas figuras permitirán evaluar la mejor configuración EDFA sobre el sistema DWDM.



a) Factor Q dB, alcanzado con amplificación EDFA configuración Booster Vs configuración Inline.



b) BER, alcanzada con amplificación EDFA configuración Booster Vs configuración Inline.



c) PRx (dBm), alcanzada con amplificación EDFA configuración Booster Vs configuración Inline.

Figura 4.12 Parámetros de desempeño vs la potencia de transmisión, con configuración Inline y Booster.

De las figuras 4.12, se observa que al introducir amplificadores ópticos de potencia en un sistema DWDM con DCF, la configuración Inline permite optimizar de mejor forma la red óptica, ya que los parámetros objetivo de Q y BER mejoran al aumentar la potencia de trasmisión; caso contrario a una configuración Booster, en la cual los parámetros objetivo decrecen hasta llegar a valores por debajo del umbral de un factor de Q óptimo de 17 dBm y una BER de 10⁻¹². Otro factor a tener en cuenta en las dos configuraciones, es la potencia de llegada al receptor, siendo mucho mayor la recibida en una configuración Inline en comparación a una Booster.

En la configuración Inline se obtuvieron los mejores resultados en comparación a la configuración Booster; para análisis de posteriores apartados de este capítulo en el segmento de red, se contara con una configuración Inline del amplificador EDFA, la potencia en el dispositivo transmisor será de 5 dBm, ya que esta potencia es la más implementada por láseres comerciales (Huawei OSN 3500) empleados por los diferentes

operadores de redes ópticas. Al mismo tiempo, este valor de potencia permite cumplir con los parámetros objetivos.

El amplificador Inline con una potencia de trasmisión de 5 dBm permite alcanzar una distancia máxima para la fibra SSMF-28 de 150 y 144 Km, compensando al 50 y 75% de la DCF respectivamente, como se muestra en la tabla 4.6 (Anexo C, tabla 23 y tabla 24).

Prx dBm	OSNR In dB	% DCF	Longitud SMF-28 Km	Longitud DCF Km	OSNR Out dB	Q dB	BER	Ptx dBm
5	29.307	50	150	13.5	25.931777	17.04277	1.32068e-12	-26.585
		75	144	19.44	25.609242	17.04860	8.79423e-13	-28.604

Tabla 4.6 Distancia máxima alcanzada para una configuración Inline.

En comparación, una red que utiliza amplificadores de potencia cuando se introduce DCF es más eficiente a una que no los utiliza, ya que la fibra compensadora de dispersión atenúa los niveles de potencia, siendo necesario aumentarlos. Por esta razón, se hace indispensable la utilización de amplificadores para posteriores análisis, ya que se variaran los parámetros de DCF y estos incidirán en los niveles de la potencia de recepción.

En la figura 4.13, se observa el segmento de red alcanzado al realizar los anteriores análisis para una transmisión a 10 Gbps con formato de modulación NRZ-OOK, el cual cuenta en la línea de transmisión con la Fibra SSMF-28, fibra DCF estándar en método de post-compensación y amplificador EDFA en configuración Inline.

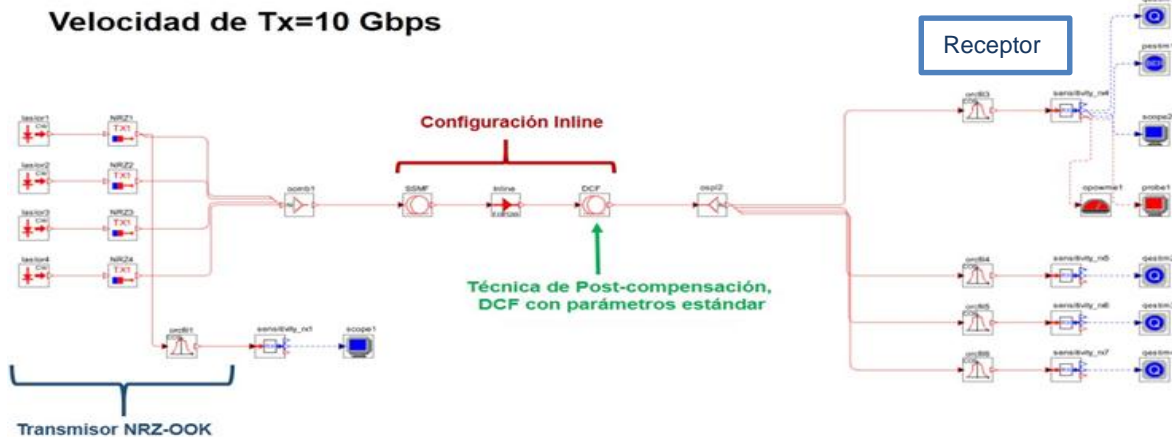


Figura 4.13 Segmento de red para el formato de modulación NRZ-OOK, transmitiendo a 10 Gbps, el cual cuenta el línea de transmisión con DCF y amplificador EDFA.

4.1.2 Mejoras al segmento de red, variando las propiedades de la DCF

En este análisis se varía las propiedades de la DCF, como son: el área efectiva, la atenuación, la figura de mérito y la máxima dispersión cromática acumulada. Se encontraran los parámetros que permitan obtener el mejor funcionamiento sobre el segmento de red en comparación al escenario ideal planteado en la anterior sección 4.1.1; al conseguir estos parámetros se definirá el escenario o sistema DWDM, el cual se migrará a una velocidad de trasmisión de 40 Gbps. El escenario utilizado para analizar la variación de las propiedades de la DCF se muestra a continuación, figura 4.14.

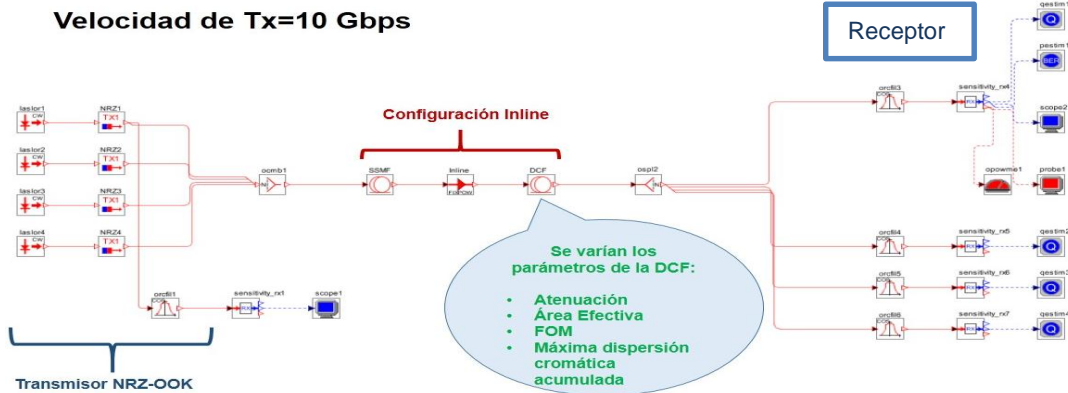


Figura 4.14 Segmento de red para el formato de modulación NRZ-OOK, transmitiendo a 10Gbps, al cual se varían las propiedades de la DCF.

4.1.2.1 Área Efectiva

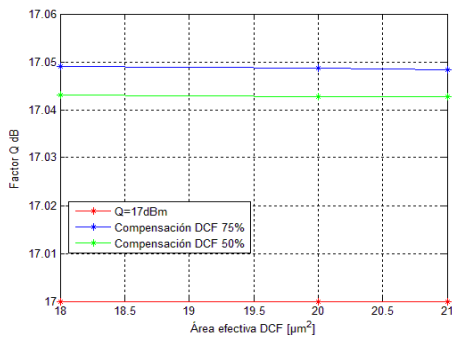
Es el área de la DCF es por donde se condensa una mayor cantidad de luz o potencia óptica, al reducirse esta propiedad aparecen degradaciones producidas por la potencia de transmisión; en teoría una fibra óptica con un área efectiva grande tiene un mejor desempeño frente a los fenómenos lineales en comparación a un área efectiva pequeña. Por lo tanto, el siguiente análisis se enfocará en determinar si la afirmación anteriormente hecha es correcta o por lo contrario no se cumple. El escenario de simulación se plantea con una potencia de transmisión de 5 dBm por cada canal, la separación de estos será de 100 GHz, además se contará con los valores encontrados en la tabla 4.6; como longitud de la SSMF-28 y porcentajes de compensación del 50 y 75% de la DCF.

En la tabla 4.7, se observan los tres valores escogidos para realizar el análisis de la incidencia del área efectiva de la DCF sobre el segmento de red.

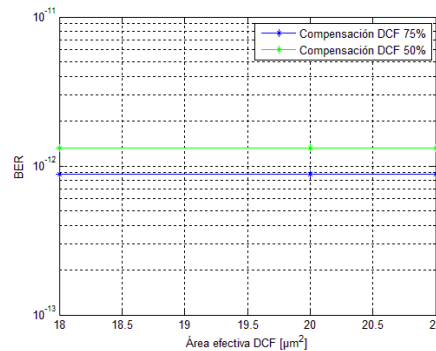
Área efectiva DCF μm^2	18	20	21
-----------------------------------	----	----	----

Tabla 4.7 Parámetros de área efectiva de la DCF

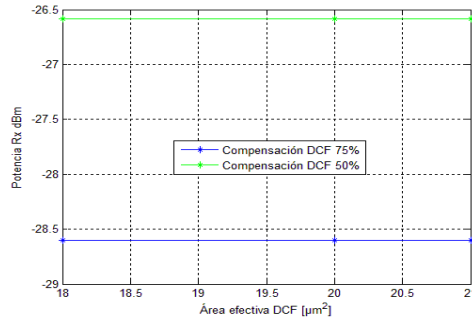
Al variar el área efectiva en la fibra compensadora de dispersión, con valores de la tabla 4.7; los resultados en el segmento de red indican que los parámetros objetivos de BER y factor Q no varían en gran medida y la potencia de recepción permanece constante, como se aprecia en las figuras 4.15(a), 4.15 (b), 4.15(c) (Anexo C, tabla 24 y tabla 25).



a) Factor Q compensando al 50 y 75% de la DCF.



b) BER compensando al 50 y 75% de la DCF.



c) Potencia de recepción compensando al 50 y 75% de la DCF.

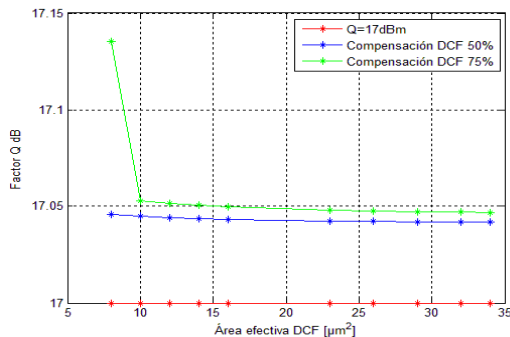
Figura 4.15 Resultados obtenidos al variar el área efectiva en la DCF de 18, 20 y 21 μm^2 en el segmento de red.

Debido a que con los valores de la tabla 4.7, no se logra establecer la incidencia del área efectiva de la DCF sobre el segmento de red, se toma un rango mayor que va desde los 8 μm^2 hasta los 34 μm^2 , como se aprecia en la tabla 4.8.

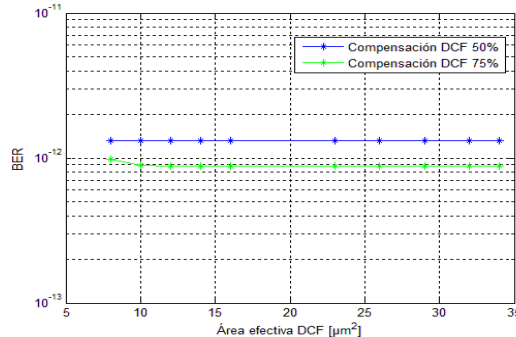
Área Efectiva DCF μm^2	8	10	12	14	16	23	26	29	32	34
-----------------------------------	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Tabla 4.8 Parámetros de área efectiva de la DCF en un rango de 8 a 34 μm^2

Al variar el área efectiva con los parámetros de la tabla 4.8; en el amplificador EDFA se deja constantes la ganancia y potencia; cabe recordar que este dispositivo está en configuración Inline en el segmento de red. Los resultados se observan en las figura 4.16 y en la tabla 4.9 (Anexo C, tabla 26, tabla 27, tabla 28, tabla 29).



a) Factor Q compensando al 50 y 75% de la DCF



b) BER compensando al 50 y 75% de la DCF

Figura 4.16 Parámetros de calidad óptica al variar el área efectiva de 8 μm^2 hasta 34 μm^2 en el segmento de red.

Área Efectiva DCF	8	10	12	14	16	23	26	29	32	34
Potencia recepción dBm	-29.458008									

Tabla 4.9 Potencia de recepción hallada al variar el área efectiva de la DCF entre (8 a 34 μm^2).

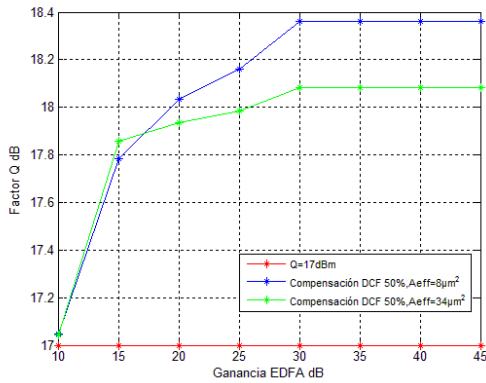
En la figura 4.16 y la tabla 4.9, se observa que los parámetros objetivo encontrados son idénticos para cada variación del área efectiva de la DCF y la potencia en recepción permanece constante. Este fenómeno se debe a que el amplificador es un dispositivo que estabiliza el sistema DWDM, por lo tanto, la variación de los parámetros de área efectiva de la DCF no impactan sobre el segmento de red, a menos que se varíen los parámetros fundamentales del amplificador, como son la Potencia EDFA y la ganancia EDFA.

Se varía la potencia EDFA con valores de área efectiva establecidos en la tabla 4.8; este análisis se efectúa con el fin de aumentar los parámetros OPM del segmento de red. Como se observa en la tabla 4.10 (Anexo C, tabla 30, tabla 31, tabla 32, tabla 33), variar la potencia de amplificación no garantiza mejoras en el sistema DWDM, así se esté variando el área efectiva de la fibra DCF.

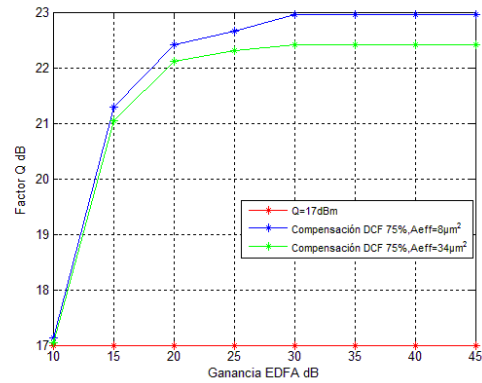
Potencia EDFA-dBm	5	10	20	30	40	50	60	70
Área Efectiva			8 μm^2			34 μm^2		
Compensación al 50% de la DCF	Factor Q dB		17.046858			17.042627		
	BER		1.32546e-12			1.3195e-12		
Compensación al 75% de la DCF	Factor Q dB		17.135265			17.047984		
	BER		9.84474e-13			8.76368e-13		

Tabla 4.10 Variación de la potencia EDFA, e incidencia en los parámetros Objetivo (Q, BER).

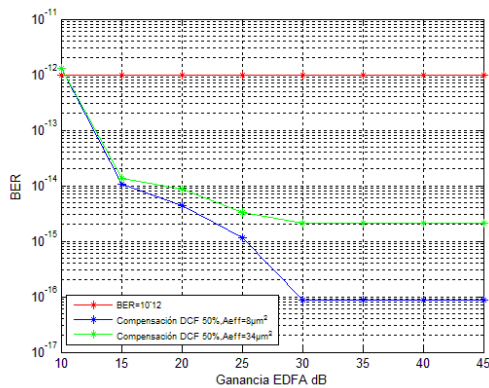
La variación de la Ganancia EDFA con valores de área efectiva de la tabla 4.8, y tomando diferentes valores de compensación de la DCF entre 50 y 75% se muestran en la figura 4.17, basada en datos tomados del anexo C, tabla 34, tabla 35, tabla 36 y tabla 37, respectivamente.



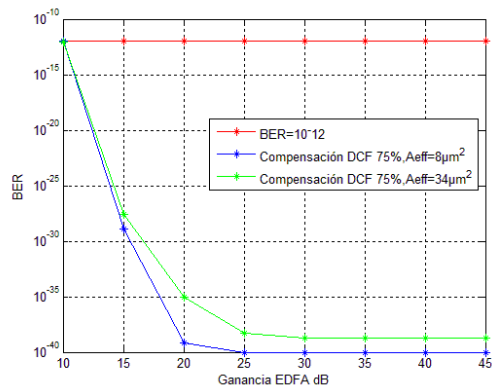
a) Factor Q, compensando al 50% la DCF.



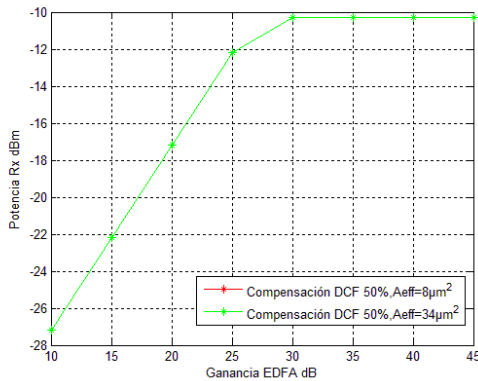
b) Factor Q, compensando al 75% la DCF.



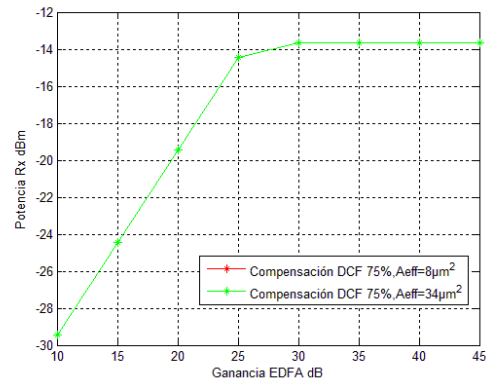
c) BER, compensando al 50% la DCF.



d) BER, compensando al 75% la DCF.



e) Potencia de Recepción, compensando al 50% la DCF.

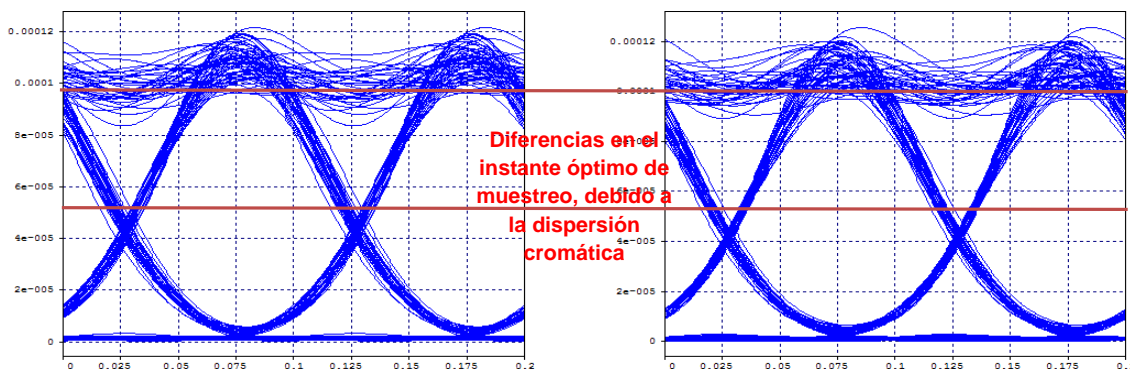


f) Potencia de Recepción, compensando al 75% la DCF.

Figura 4.17 Parámetros ópticos del segmento de red al variar la ganancia EDFA y el área efectiva de la DCF; entre 8 y 34 μm². Utilizando porcentajes de compensación del 50 y 75 % de la DCF.

En la figura 4.17, se observa como los parámetros OPM y la potencia tienden a aumentar en recepción de forma exponencial, por lo que al variar la ganancia en el EDFA y el área efectiva de la DCF se mejora la longitud del segmento de red, cumpliendo con los parámetros objetivos. Así mismo con un valor de compensación del 75% en la DCF, se obtienen mejores parámetros objetivo que al compensar al 50 % de la DCF, excepto en la potencia de recepción donde los valores más bajos son obtenidos al 75% de la DCF, debido a que a mayor longitud de DCF, mayor atenuación en la potencia de la señal transmitida; por lo tanto, la potencia tiende a disminuir en comparación a una longitud de segmento de red menor.

En conclusión y con los datos analizados, un área efectiva más pequeña en la DCF es mucho mejor que un área relativamente grande, esto se muestra en los diagramas de ojo, figura 4.18 a), figura 4.18 b). El único valor que no cambia es la potencia de recepción, esto se debe a que con valores de área pequeños en la fibra compensadora de dispersión, se logra contrarrestar degradaciones ópticas que perturban la señal que viaja por el segmento de red. Por tanto la afirmación hecha inicialmente en esta sección es totalmente errónea debido a que con un área efectiva de DCF pequeña se han obtenido los mejores resultados en los parámetros de desempeño ópticos.



a) Diagrama de ojo con Área Efectiva DCF de 8 μm², con compensación DCF a 75%.

b) Diagrama de ojo con Área Efectiva DCF de 34 μm², con compensación DCF a 75%.

Figura 4.18 Diagrama del ojo respecto al área efectiva de la DCF variable.

En la tabla 4.11 (Anexo C, tabla 38), se visualizan los valores de longitud máximos alcanzados en el segmento de red óptico cumpliendo con los parámetros objetivo ($Q=17\text{dB}$ y $\text{BER}=10^{-12}$); para hallar estos parámetros se dejó de utilizar el módulo de SSMF-28 del simulador; debido a que este presenta problemas de incompatibilidad con el sistema operativo en el cual funciona el software OptSim.

Ptx dBm	Longitud SSMF-28 Km	DCF %	Área Efectiva DCF μm^2	Potencia EDFA dBm	Ganancia EDFA dB	Q dB	BER	Prx dBm
5	173	75	8	4	30	17.18	5.6e-13	-19.07
	157	50				17.69	4.18e-14	-11.10

Tabla 4.11 Distancia máxima alcanzada por el segmento de red óptica, con un área efectiva fija, variando los porcentajes de compensación en 75 y 50 %.

Las variaciones en la ganancia EDFA y área efectiva de la DCF, aumentan la distancia máxima que puede alcanzar el segmento de red; con un valor de $8 \mu\text{m}^2$ se logró alcanzar la mayor distancia en la línea de transmisión. Al relacionar los datos arrojados por la tabla 4.11, la mayor distancia del segmento de red se logra con una compensación del 75%; esto se debe a que esta contrarresta de mejor forma la dispersión cromática en comparación a una compensación del 50%; este resultado se puede comprobar observando la apertura de diagrama de ojo de la figura 4.19 a) y 4.19 b), en donde el diagrama de ojo que se encuentra más afectado por la CD es el de 50%.

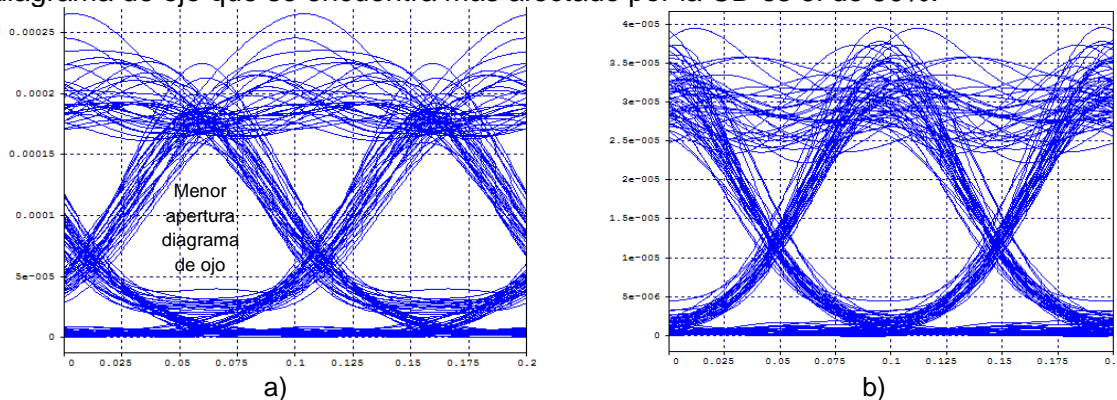


Figura 4.19 Diagrama del ojo compensando al: a) 50% de DCF y b) 75% de DCF; Área efectiva de $8 \mu\text{m}^2$.

De acuerdo al análisis de resultados efectuados en esta sección, para mejorar el segmento de red óptico, en análisis posteriores se contará con un área efectiva de fibra compensadora de dispersión pequeña, la mejor opción se consigue con un valor de área efectiva de $8 \mu\text{m}^2$ y una ganancia de 30 dB en el EDFA, utilizando en configuración Inline. También se comprueba que un área efectiva pequeña en la DCF permite alcanzar mayores longitudes en el segmento de red que un área efectiva grande. Por último se evidencia que al modificar el área efectiva de la DCF se aumenta la longitud del segmento de red cumpliendo con los parámetros objetivo; como se observa al comparar la tabla 4.6 y 4.11.

4.1.2.2 Atenuación DCF

Este fenómeno óptico degrada la señal transmitida; debido a que está directamente relacionado con la dispersión cromática, además reduce la potencia de transmisión y es un factor limitante para la distancia total que pueda alcanzar el segmento de red. Con el fin de establecer el impacto de la atenuación de la DCF y su influencia sobre el segmento de

red óptico, se busca determinar los valores de atenuación que permitan aumentar la longitud de la SSMF-28 cumpliendo con los parámetros objetivo (Factor Q y BER); se contará con una potencia de transmisión estable de 5 dBm para no excitar fenómenos no lineales, además se tendrá en cuenta que los parámetros de la fibra óptica SSMF-28 permanecerán constantes. El escenario utilizado para el análisis contará con los parámetros encontrados en la tabla 4.11; como área efectiva de la DC, longitud de la SSMF-28 para los porcentajes de compensación de 50 y 75% de la DCF, por último se contará con el amplificador EDFA en configuración Inline.

Los valores de atenuación utilizados en la DCF se encuentran en un rango de atenuación soportado por el segmento de red óptico, además son parámetros comerciales y no comerciales; como se muestran en la tabla 4.12.

Atenuación DCF ($\frac{dB}{Km}$)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.55	0.7	1	2	3.5
------------------------------------	-----	-----	-----	-----	------	-----	---	---	-----

Tabla 4.12 Parámetros de atenuación introducidos a la DCF.

A medida que se aumenta los valores de atenuación en la DCF siguiendo la tabla 4.12, las señales eléctricas se van deteriorando en el segmento de red, convirtiendo al pulso que llega a recepción en una señal no identificable en comparación a la señal eléctrica transmitida; esto se observa en la figura 4.20 a), 4.20 b) y 4.20 c), en donde se tiene el pulso transmitido sin perturbaciones Back to Back y dos pulsos en recepción degradados por parámetros de atenuación en la DCF de 0.1 y 3.5 dB/Km respectivamente.

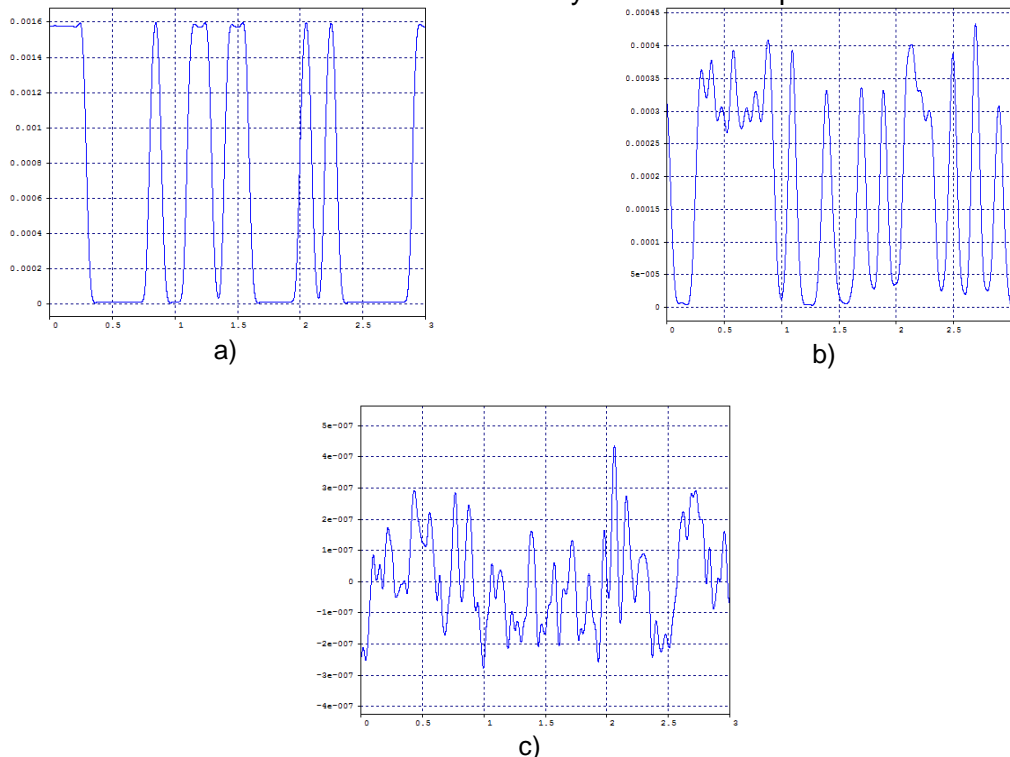
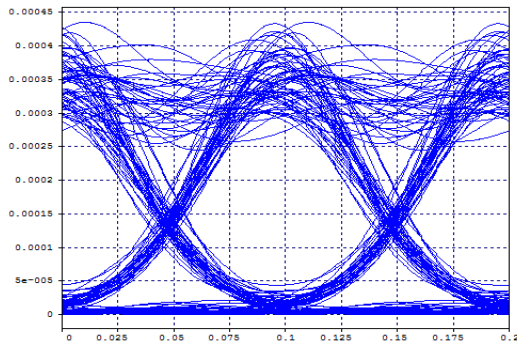


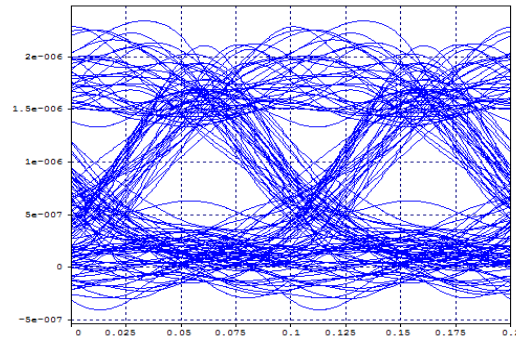
Figura 4.20 Señal eléctrica en recepción: a) Back to Back., b) con atenuación en la DCF 0.1 dB/Km y c) con atenuación en la DCF 3.5 dB/Km.

Se analiza si la atenuación está directamente relacionada con la dispersión cromática y la longitud de la fibra óptica; ya que teóricamente al aumentar la atenuación de la DCF se reduce los niveles de potencia de la señal transmitida y se aumenta la dispersión

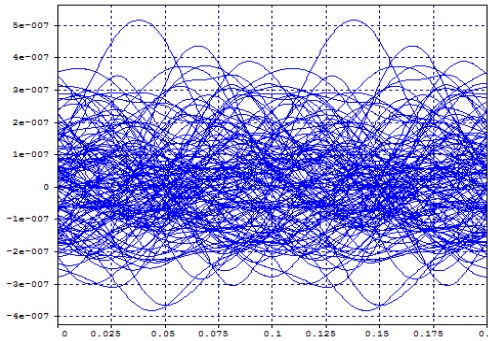
cromática en el segmento de red óptico. Para corroborar como aumenta la CD al aumentar la atenuación de la DCF, se varía de 0.1 dB/Km hasta 2 dB/Km la atenuación en la DCF dando como resultado los diagrama de ojo de la figura 4.21(a), 4.21(b) y 4.21(c).



a) Diagrama de ojo con atenuación en DCF de 0.1 dB/Km.



b) Diagrama de ojo con atenuación de 2 dB/Km, compensando al 50% de la DCF.



c) Diagrama de ojo con atenuación de 2 dB/Km, compensando al 75% de la DCF.

Figura 4.21 Diagrama del ojo variando la atenuación y el porcentaje de compensación de la DCF.

Como se observa en la figura 4.21 a) en comparación a la 4.21 b) y 4.21 c), el aumento en la atenuación en la DCF provoca niveles más altos de dispersión cromática y al aumentar la longitudes de la DCF se degrada en mayor proporción la señal transmitida; debido a que en un porcentaje de 75%, las pérdidas introducidas están en el orden de 46.75 dB, siendo casi el doble en comparación a las pérdidas introducidas para un porcentaje de compensación del 50%, las cuales son iguales a 28.26 dB.

Al ser la atenuación un valor condicionante en el segmento de red; se varían los parámetros de esta propiedad de la DCF según la tabla 4.12, con el fin de establecer un valor umbral en el cual no se aumente en gran medida la CD y no se reduzca en mayor proporción la potencia de la señal que viaja por el segmento de red. Como se observa en la figura 4.22.

Análisis Comparativo del Desempeño en la Migración de una Red DWDM de 10 a 40 Gbps, ante las Variaciones de las Propiedades de una Fibra Compensadora de Dispersión (DCF)

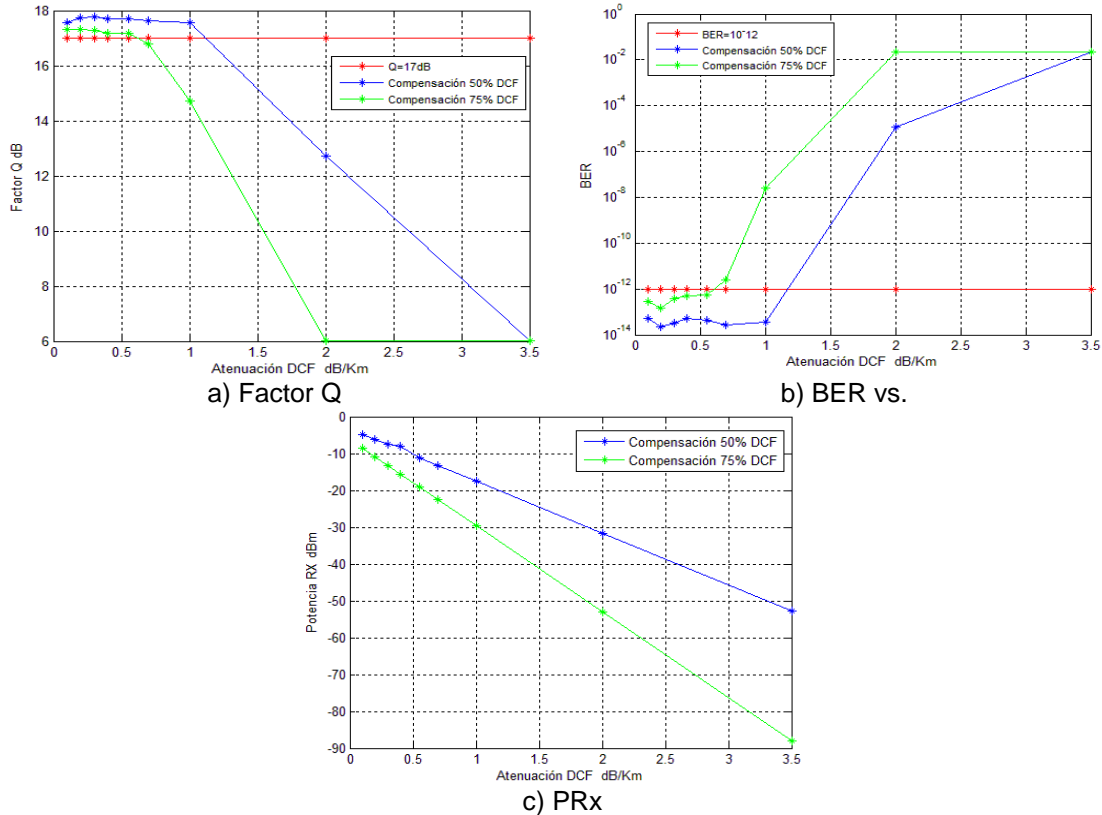


Figura 4.22 Parámetros de desempeño óptico establecidos al realizar variaciones en la atenuación de la DCF

Según la figura 4.22, para valores que se encuentran por encima de 0.55 dB/Km en la atenuación de la fibra compensadora de dispersión influyen negativamente sobre los parámetros objetivo (Factor Q y BER) y disminuyen los niveles de potencia que llegan al receptor. Para alcanzar niveles de longitud máxima en los segmentos de red compensados al 50% y 75% de la DCF, se toma un valor de atenuación por debajo de los que inciden de forma negativa sobre la red óptica.

En la figura 4.22 c), se observa que a medida que aumenta la atenuación en la DCF los niveles de potencia en recepción se reducen considerablemente; con el fin de aumentar este parámetro de medición óptico, se varía en el amplificador EDFA la ganancia y la potencia, dando como resultado los parámetros de la tabla 4.13 (Anexo C, tabla 39, tabla 40, tabla 41 y tabla 42).

Variación en Potencia EDFA	Factor Q dB	BER	Potencia en recepción dBm
Compensación DCF 50%	17.884	1.563e-14	-6.990
Compensación DCF 75%	17.391	1.0795e-13	-9.960
Variación en ganancia EDFA	Factor Q dB	BER	Potencia en recepción dBm
Compensación DCF 50%	17.884	1.563e-14	-6.990
Compensación DCF 75%	17.446	4.508e-14	-7.786

Tabla 4.13 Parámetros obtenidos de Q y BER, en el segmento de red al variar la potencia EDFA y la ganancia EDFA.

Los resultados de la tabla 4.13, indican que los parámetros objetivo (Factor Q y BER) y la potencia de recepción, para los porcentajes de compensación de 50 y 75% de la DCF en el segmento de red óptico no cambian o tienen modificaciones mínimas al realizar variaciones en los niveles de potencia y ganancia del amplificador EDFA; por lo tanto, este dispositivo no compensa la incidencia de la atenuación DCF sobre la potencia de la señal óptica que recorre el segmento de red.

Debido a que se condicionó la DCF con valores de atenuación iguales o por debajo de 0.55 dB/km permitiendo reducir las pérdidas del enlace de transmisión, se analiza; si al variar los porcentajes de compensación de la DCF se logra aumentar la longitud del segmento de red, como se muestra en la figura 4.23.

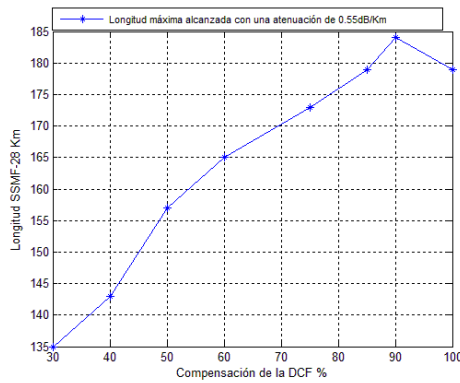


Figura 4.23 Longitudes máximas alcanzadas por la fibra óptica SSMF-28 en el segmento de red, variando la longitud de la DCF.

Los resultados de la figura 4.23, muestran que al aumentar la compensación de la DCF se logra aumentar la longitud en el segmento de red, como se ve, la mayor longitud de red se encuentra compensando a un 90% de la DCF, ya que para valores superiores disminuye la longitud de la SSMF-28.

Con el propósito de observar que valores de atenuación en la DCF permiten aumentar al máximo la longitud del segmento de red, cumpliendo con los parámetros objetivo de BER y factor Q. Se varían los porcentajes de compensación de la DCF hasta 90%, mientras que los parámetros de atenuación serán valores que estén por debajo de 0.55 dB/Km de la tabla 4.12, como se muestra en la figura 4.24.

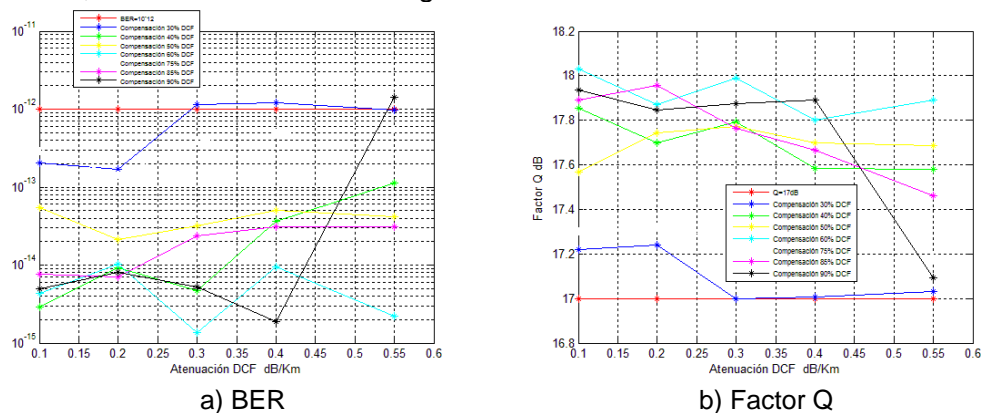


Figura 4.24 Parámetros objetivo al variar la atenuación en la DCF de 0.1 y 0.55 dB/Km.

De la figura 4.24, se puede observar que para los diferentes porcentajes de compensación se logra superar los parámetros objetivos. Por lo tanto valores de atenuación en la DCF pequeños no tienen una mayor incidencia sobre el segmento de red, excepto para una compensación del 30% para la cual no se cumple con los parámetros objetivo si la atenuación es de 0.3 dB/Km. La longitud máxima que puede llegar a tener el segmento de red no se halla para cada porcentaje de compensación de la DCF, debido a que desde un comienzo al analizar la atenuación se estableció porcentajes de compensación de la DCF de 50 y 75%, salvo un porcentaje de compensación del 90%; debido a que con este se logró la mayor distancia del segmento de red como se muestra en la figura 4.23.

En la tabla 4.14 (Anexo C, tabla 43 y tabla 44), se encuentran los valores de atenuación en la DCF que permiten la mayores distancia en el segmento de red para compensaciones de 50, 75 y 90%.

Ptx dBm	Lon SSMF-28 Km	DCF %	Lon DCF Km	Perdidas DCf, por la atenuación dB	Atenuación DCF dB/km	Q dB	BER	Prx dBm
5	157	50	14.13	4.239	0.3	17.77	3.219e-14	-7.586
	174	75	23.49	4.698	0.2	17.002	2.992e-12	-11.143
	186	90	30.132	3.0132	0.1	17.844	2.245e-15	-11.853

Tabla 4.14 Distancia máxima alcanzada en el segmento de red óptica, cumpliendo los parámetros objetivos; realizando análisis sobre la atenuación de la DCF.

De acuerdo a los análisis realizados a la atenuación en la DCF, se concluye que para valores superiores a 0.55 dB/Km, estos inciden negativamente en el segmento de red, debido a que disminuyen la potencia de la señal transmitida y en algunos casos no se cumple con los parámetros objetivos debido al aumento en la CD. Además el dispositivo amplificador EDFA no logra aumentar la potencia de la señal transmitida, la cual es afectada por la atenuación DCF.

Para las siguientes secciones se tendrán en cuenta los parámetros de la tabla 4.14, como los diferentes valores de atenuación para los tres porcentajes de compensación de la DCF y las diferentes longitudes de SSMF-28.

4.1.2.3 Figura de mérito DCF (FOM)

La eficiencia espectral de la fibra es conocida como Figura de Mérito (FOM, *Figure Of Merit*), la cual mide que tan bien se aprovecha las bandas de frecuencia o los canales de transmisión de la fibra. Para la DCF, la FOM se define como la relación que existe entre la dispersión y la atenuación de la DCF.

El estudio de la figura de mérito, se realiza con la fórmula 2.3, 2.9 y con variaciones de la tabla 2.4, todos estos definidos en el capítulo 2. La fórmula 2.9 relaciona la dispersión y la atenuación que se encuentra en la DCF; entre más alta se la dispersión cromática negativa de la DCF, mayor será la figura de mérito. Los valores de área efectiva y atenuación de la DCF son tomados de los anteriores análisis, tabla 4.11 y 4.14; de esta

última se toman las longitudes de la SSMF-28. La ecuación 2.3, implementada para los diferentes porcentajes de compensación se muestra a continuación.

$$l_{DCF(100\%)} = \left| \frac{D_{SSMF}}{D_{DCF}} \right| * l_{SSMF} \rightarrow \text{Longitud DCF al compensar al 100\%}$$

$$l_{DCF(90\%)} = (l_{DCF(100\%)}) * 0.9 \rightarrow \text{Longitud DCF al compensar al 90\%}$$

$$l_{DCF(75\%)} = (l_{DCF(100\%)}) * 0.75 \rightarrow \text{Longitud DCF al compensar al 75\%}$$

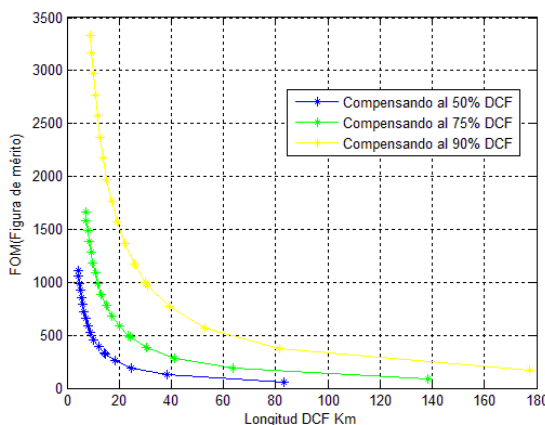
$$l_{DCF(50\%)} = (l_{DCF(100\%)}) * 0.50 \rightarrow \text{Longitud DCF al compensar al 50\%}$$

Las variaciones de la FOM se hacen tomando los parámetros de la tabla 4.15, con el fin de establecer la incidencia de este parámetro de la DCF sobre el segmento de red y probar si este parámetro permite aumentar la longitud de la fibra SSMF-28 cumpliendo con los parámetros objetivo. Cabe concluir que las variaciones de la FOM se efectuaran para porcentajes de compensación de la DCF de 50, 75 y 90%.

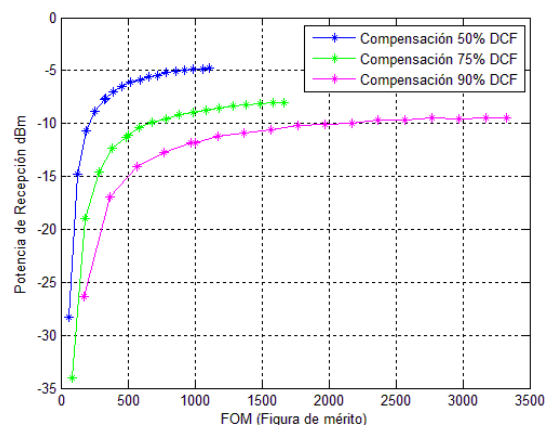
FOM(Figura de mérito)	<i>Dispersión de la DCF</i> <i>Atenuación de la DCF</i>
Compensación DCF del 50%	$[-17 \text{ hasta } -333 \frac{ps}{nm * Km}]$ $0.3 \frac{dB}{Km}$
Compensación DCF del 75%	$[-17 \text{ hasta } -333 \frac{ps}{nm * Km}]$ $0.2 \frac{dB}{Km}$
Compensación DCF del 90%	$[-17 \text{ hasta } -333 \frac{ps}{nm * Km}]$ $0.1 \frac{dB}{Km}$

Tabla 4.15 Variaciones en la figura de mérito, para las diferentes compensaciones de la DCF.

De a tabla 4.15, al aumentar el parámetro de dispersión de la FOM en la DCF, se incide en el segmento de red provocando la reducción en la longitud de la DCF para cada porcentaje de compensación y se aumenta la potencia de la señal que llega al receptor como se visualiza en las figuras 4.25 a) y 4.25 b) (Anexo C, tabla 45, tabla 46 y tabla 47).



a) FOM Vs longitud DCF de la DCF.

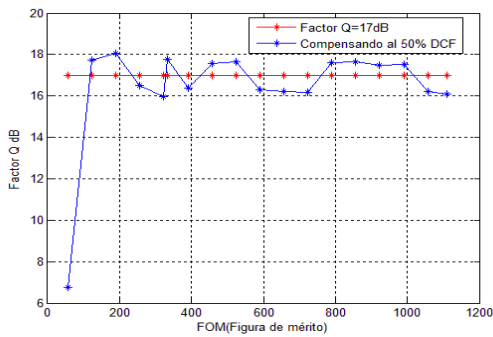


b) FOM Vs Potencia de recepción.

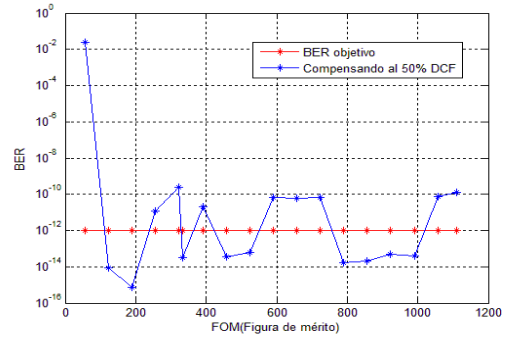
Figura 4.25 Comportamiento de la longitud de la DCF y la potencia de recepción al variar la FOM en la DCF.

Como se observa en las figuras 4.25, al aumentar la FOM, se logra compensar con una menor longitud de DCF la CD provocada por la SSMF-28, este mismo resultado es igual para los tres porcentajes de compensación implementados. Así mismo la disminución en la longitud de la DCF provocada por la FOM; incrementa la potencia con la que la señal que viaja a través de la red llega al receptor.

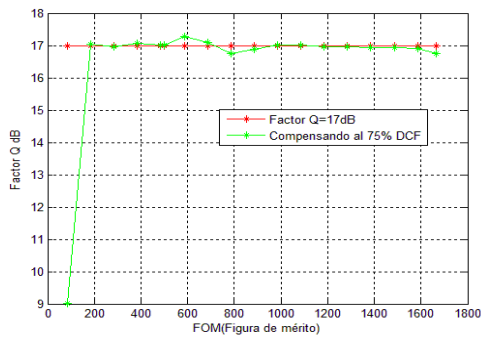
De los valores obtenidos en la tabla 4.14, se varía la FOM siguiendo la tabla 4.15, se debe tener en cuenta que cada porcentaje de compensación tiene una atenuación de la DCF, esto permitirá establecer si al disminuir la DCF en el segmento de red se sigue cumpliendo con los parámetros objetivos. El factor Q y BER de cada porcentaje de compensación se muestran en la figura 4.26 (Anexo C, tabla 45, tabla 46 y tabla 47).



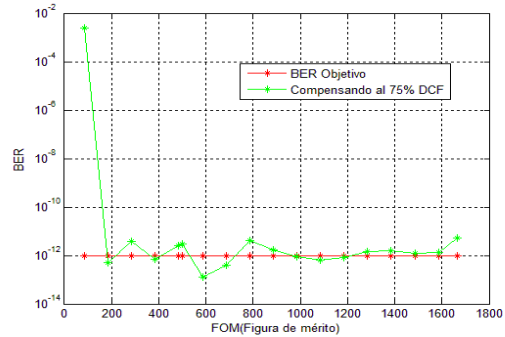
a) Factor Q Vs FOM, compensando al 50% en la DCF.



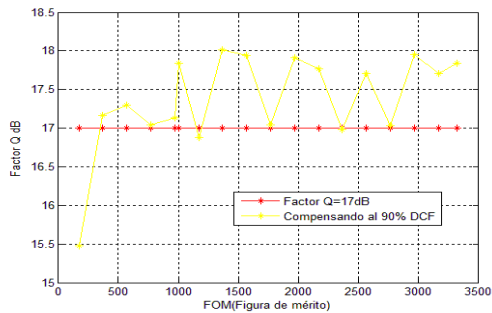
b) BER Vs FOM, compensando al 50% en la DCF.



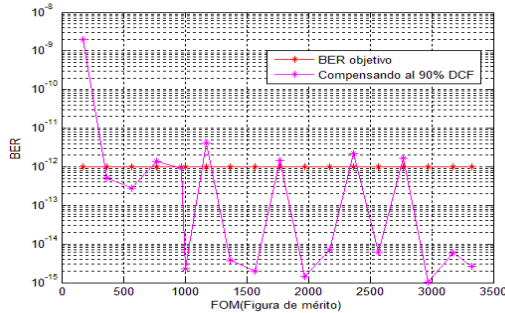
c) Factor Q Vs FOM, compensando al 75% en la DCF.



d) BER Vs FOM, compensando al 75% en la DCF.



e) Factor Q Vs FOM, compensando al 90% en la DCF.



f) BER Vs FOM, al compensar 90% en la DCF.

Figura 4.26 Parámetros objetivos al variar la FOM para cada porcentaje de compensación de la tabla 4.14.

Los resultados de la figura 4.26, indican que para cada porcentaje de compensación de la tabla 4.14; al reducir la longitud de la DCF debido al aumento de la FOM se alcanza los parámetros objetivos en algunos casos.

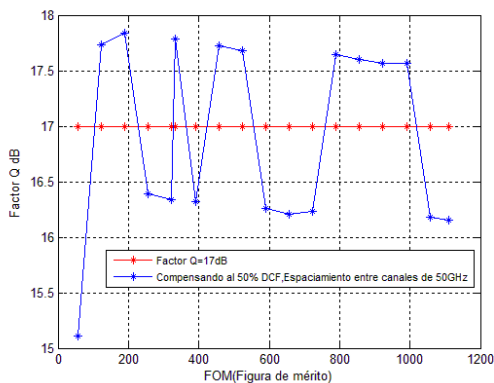
En conclusión, al aumentar la FOM en la DCF no se incrementa la longitud de la fibra óptica SSMF-28 en el segmento de red, pero si la relación costo eficiencia, ya que se alcanzan los parámetros objetivo con una DCF más reducida en longitud; por consiguiente, el escenario obtenido tendrá costos menores al ser implementado, en comparación a los encontrados en la tabla 4.14, con lo que se beneficiarían los operadores de redes ópticas. De lo anterior, los parámetros de FOM para cada porcentaje de compensación con los que se logra la mayor reducción en la longitud de la DCF cumpliendo con los parámetros objetivos se muestra en la tabla 4.16.

Ptx dBm	Lon SSMF-28 Km	DCF %	Lon DCF Km	FOM	Atenuación DCF dB/km	Q dB	BER	Prx dBm
5	157	50	4.75758	990	0.3	17.540	3.870e-14	-4.858
	174	75	10.82488	1085	0.2	17.008	6.277e-13	-8.712
	186	90	9.04865	3330	0.1	17.837	2.621e-15	-9.418

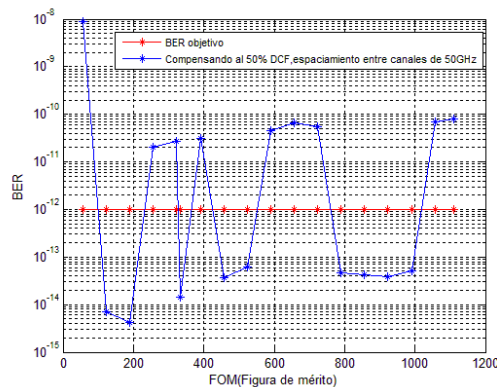
Tabla 4.16 Distancia máxima alcanzada en el segmento de red óptica, cumpliendo los parámetros objetivos; realizando análisis sobre la FOM de la DCF.

Con el fin de establecer si la FOM ayuda a medir el aprovechamiento de las bandas de frecuencia utilizadas en el sistema DWDM; se reduce el espaciado entre canales de 100 a 50 GHz, en otras palabras reducir el espaciado entre canales permite una mayor transmisión de información en el segmento óptico debido a que se cuenta con un mayor número de canales.

En la figura 4.27 (Anexo C, tabla 48, tabla 49 y tabla 50), se muestran las mediciones realizadas al segmento de red, el cual cuenta con cuatro canales en el transmisor con separación de 50 GHz y potencia para cada canal de 5 dBm.

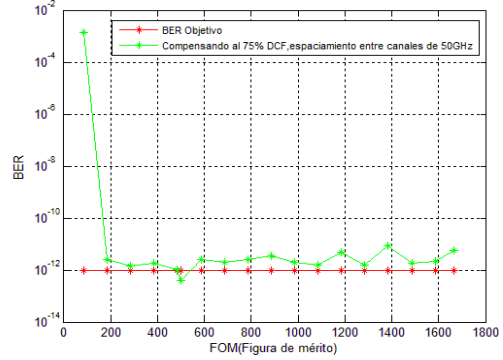
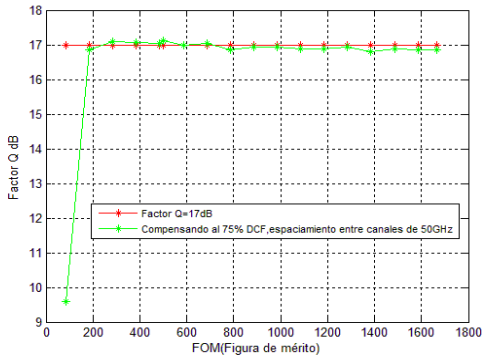


a) Factor Q vs FOM, al 50% de la DCF.



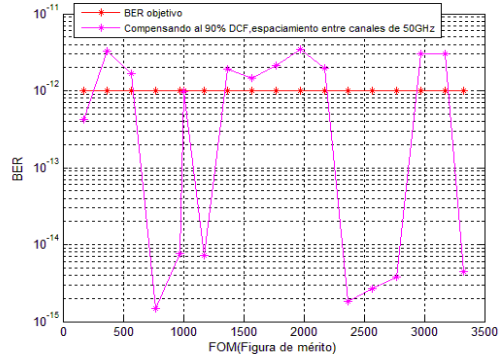
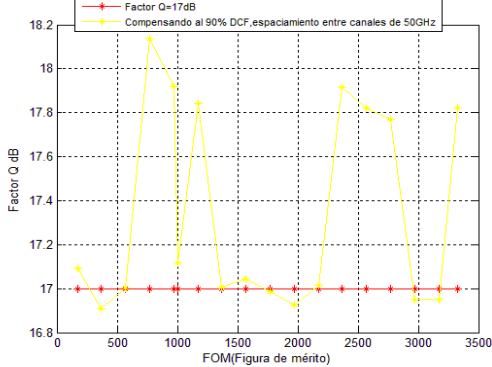
b) BER vs FOM, al 50% de la DCF.

Análisis Comparativo del Desempeño en la Migración de una Red DWDM de 10 a 40 Gbps, ante las Variaciones de las Propiedades de una Fibra Compensadora de Dispersión (DCF)



c) Factor Q vs FOM, al 75% de la DCF.

d) BER vs FOM, al 75% de la DCF.



e) Factor Q vs FOM, al 90% de la DCF.

f) BER vs FOM, al 90% de la DCF.

Figura 4.27 Parámetros objetivos al variar la FOM de la DCF en el segmento de red con separación entre canales de 50 GHz, para cada porcentaje de compensación.

En las figuras 4.27 se observa que a medida que se aumenta la figura de mérito en el segmento de red con un espaciamento entre canales menor, se puede aprovechar de mejor forma el ancho de banda espectral, ya que los parámetros objetivo son alcanzados o superados en algunos casos por valores de FOM altos, para los distintos porcentajes de compensaciones de la DCF implementados en la red óptica. Los mejores resultados al tener un espaciamento de 50 GHz entre canales, se muestran en la tabla 4.17.

Ptx dBm	Lon SSMF-28 Km	DCF %	Lon DCF Km	FOM	Atenuación DCF dB/km	Q dB	BER	Prx dBm
5	157	50	4.75758	990	0.3	17.567	5.206e-14	-4.864
	174	75	17.14599	685	0.2	17.052	2.054e-12	-9.979
	186	90	9.04865	3330	0.1	17.821	4.413e-15	-9.409

Tabla 4.17 Análisis sobre la FOM de la DCF, cumpliendo los parámetros objetivo; con espaciamento entre canales de 50 GHz.

De acuerdo al análisis realizado a la FOM, esta propiedad permite tener una menor longitud DCF dentro del sistema DWDM cumpliendo los parámetros objetivos para que el sistema sea funcional al reducir el espaciamento entre canales de transmisión; esto incrementa la capacidad de información que se puede transmitir, ya que esta propiedad de la DCF permite aumentar el número de canales con lo cual se aumenta la capacidad de información que puede transmitir la red óptica. Para concluir, esta propiedad mejora el sistema DWDM en relación costo eficiencia, pero no permite aumentar la longitud de la fibra SSMF-28.

Los valores de la tabla 4.17, no se tendrán en cuenta para la siguiente sección debido que al migrar la red a una transmisión de 40 Gbps con separación de canales de transmisión a 50 GHz incidiría en la pérdida de información.

4.1.2.4 Máxima dispersión cromática acumulada

Debido a que la dispersión cromática es el efecto negativo que más influye en los sistemas ópticos y es acumulativo; lo que conlleva a generar mayores pérdidas de información en cada tramo del sistema. Por tal motivo, resulta fundamental conocer el valor máximo de dispersión cromática para que el sistema funcione correctamente.

Para el siguiente análisis se varía el parámetro de la dispersión negativa, para porcentajes de compensación de 50, 75 y 90 % de la DCF; el escenario que se plantea contará con los parámetros alcanzados en la tabla 4.14. Además se establecerá hasta que valores de dispersión en la DCF el segmento de red cumple con los parámetros objetivo y que mejoras en la variación de dispersión ayudan o perjudican en el rendimiento del sistema DWDM.

Para establecer la dispersión cromática acumulada por cada segmento de red, con diferentes porcentajes de compensaciones de la DCF, se utiliza la fórmula 2.7 del segundo capítulo; con la cual se logra disminuir la CD acumulada en la red empleando como técnica de compensación una DCF, debido a que ésta con su alta dispersión negativa permite compensar la dispersión positiva de la SSMF. El coeficiente de dispersión de la DCF es de -100 ps/nm*Km; el cual es implementado por los diferentes operadores de fibra óptica.

$$\Delta t_{total} = D_{link}(\lambda) + D_{DCF} * l_{DCF} \quad (2.7)$$

Aplicando la ecuación 2.7, para una compensación del 50% en la DCF, de tendría una longitud en la fibra compensadora de dispersión ($l_{DCF} = 14,13\text{Km}$). y para el coeficiente de dispersión acumulado de la fibra SSMF-28 ($D_{link}(\lambda)$), se emplea la ecuación 2.2, la cual se encuentra en el segundo capítulo; esta ecuación asocia la máxima longitud alcanzada por la SSMF-28 ($L = 157 \text{ Km}$), la pendiente de dispersión para longitudes de onda que trabajan en los 1550 nm ($S_0 = 0.056 \text{ ps}/[\text{nm}]^2 * \text{Km}$), la CD de la fibra SSMF-28 Corning ($18 \text{ ps}/\text{nm} * \text{Km}$) y la longitud de onda del canal de transmisión que se asignó para evaluar ($1552.52 \text{ nm} = 193.1 \text{ THz}$):

$$D_{link}(\lambda) = 157\text{Km} \left[\frac{18\text{ps}}{\text{nm} * \text{Km}} + \frac{0,056\text{ps}}{\text{nm}^2 * \text{Km}} * (1552.52\text{nm} - 1550\text{nm}) \right] = 2848.15584 \frac{\text{Ps}}{\text{nm}}$$

Por lo tanto, la dispersión máxima acumulada de la red para un porcentaje de compensación del 50% en la DCF sería igual a:

$$\Delta t_{total} = 2848.15584 \frac{\text{Ps}}{\text{nm}} + (-100 \frac{\text{Ps}}{\text{nm} * \text{Km}} * 14.13\text{Km}) = 1435.15584 \frac{\text{Ps}}{\text{nm}}$$

Los cálculos matemáticos efectuados para los restantes porcentajes de compensación en la DCF se encuentran en el anexo B, ítem 2. De otro lado la dispersión cromática máxima acumulada por el segmento de red para los porcentajes de compensación del 50, 75 y 90% de la DCF se encuentran en la tabla 4.18.

Porcentaje de compensación DCF	50%	75%	90%
Longitud SSMF-28,Km	157	174	186
Dispersión cromática acumulada en la fibra SSMF-28, $D_{link}(\lambda)$ [ps/nm]	2848.15584	3156.55488	3374.24832
Longitud DCF, Km	14.13	23.49	30.132
Máxima dispersión cromática acumulada Δt_{total} [ps/nm]	1435.15584	807.55488	361.04832

Tabla 4.18 a) Dispersión cromática acumulada en el segmento de red con DCF, con diferentes porcentajes de compensación.

Para determinar si se puede contrarrestar o eliminar totalmente la dispersión cromática máxima acumulada en el enlace de red, se realizan dos análisis: En primer lugar se analizará con que longitudes de la DCF se logra eliminar la dispersión cromática acumulada del enlace, un segundo análisis, consiste en variar los coeficientes de dispersión de la DCF para contrarrestar la dispersión máxima acumulada; para los dos análisis se empleara la fórmula 2.7.

Con el fin de establecer las longitudes de DCF para las cuales se haga cero la dispersión cromática; se despeja la fórmula 2.7 igualándola a cero, el coeficiente de dispersión de la DCF seguirá siendo el utilizado por los diferentes operadores de fibra (-100 ps/nm*Km), además se toma los coeficientes de dispersión acumulada de la SSMF-28 de la tabla 4.18.

$$0 = D_{link}(\lambda) + D_{DCF} * l_{DCF}$$

$$l_{DCF} = \frac{D_{link}(\lambda)}{D_{DCF}}$$

En la tabla 4.19, se muestran los resultados de las longitudes de la DCF en la cual la dispersión cromática se hace cero para longitudes de la SSMF-28 de 157, 174 y 186 Km.

Porcentaje de compensación en la DCF	50%	75%	90%
Longitud SSMF-28,Km	157	174	186
Longitud DCF, Km	28.4815584	31.5655488	33.7424832
Aumento en la compensación de la DCF	100.784%	111.697%	119.4%
Factor Q dB	20.499	19.519	17.366
BER	3.582e-25	3.142e-21	1.292e-13

Tabla 4.19 b) Longitud de la DCF con diferentes porcentajes de compensación en donde la dispersión cromática acumulada se hace cero matemáticamente.

Al aumentar la longitud DCF la dispersión cromática se reduce pero nunca desaparece, como se corrobora en los diagramas de ojo de las figuras 4.28.

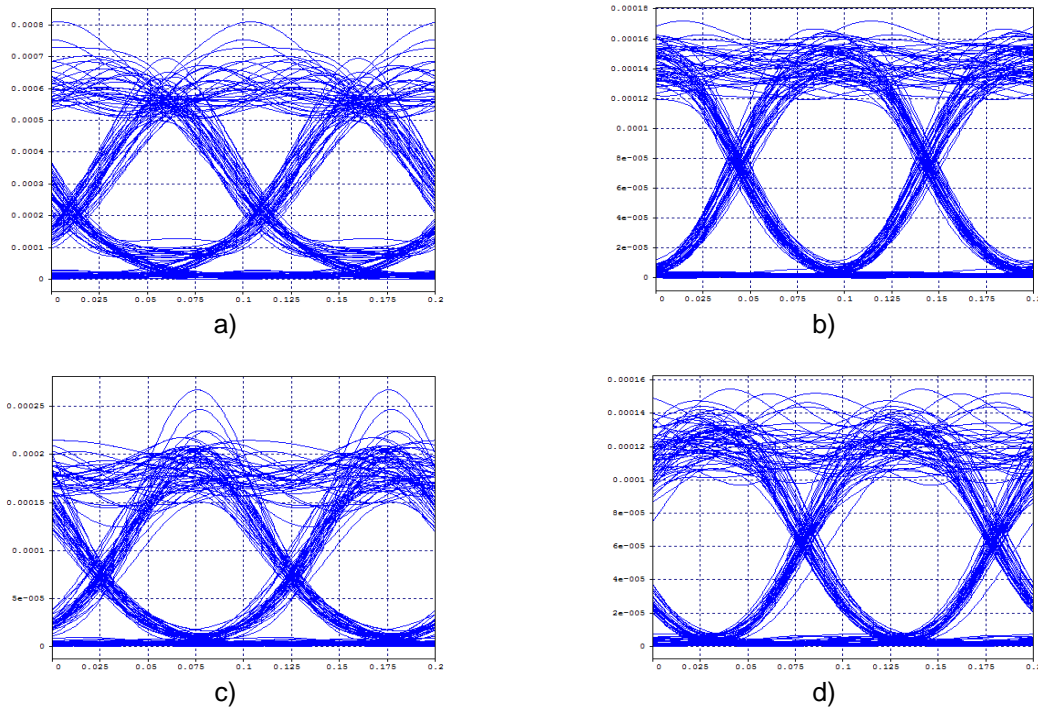


Figura 4.28 Comparación del diagrama del ojo para compensación en la DCF de: a) 50% Vs b) 100.784% para longitud de SSMF-28 de 157 Km, y c) 75% Vs d) 111.697% para longitud de SSMF-28 de 174 Km.

Al aumentar la longitud de la DCF como se muestra en la tabla 4.19, lo que aumenta es el porcentaje de compensación de la fibra compensadora de dispersión, haciendo que el sistema DWDM aumente su costo al incrementar su eficiencia, mientras que con porcentajes de compensación del 50, 75 y 90% se ha logrado aumentar la eficiencia del segmento de red con longitudes de DCF muy pequeñas. Por lo tanto no es conveniente aumentar la longitud en la DCF por arriba del 90%.

Para el segundo análisis se realizan variaciones del parámetro de la dispersión de la DCF, para reducir la dispersión cromática acumulada en el sistema. Los parámetros de dispersión de la DCF utilizados para este análisis se encuentran en la tabla 4.20.

Coefficiente de dispersión DCF, ps/nm*Km	-17	-57	-100	-137	-197	-257	-297	-333
---	------------	------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Tabla 4.20 Valores de dispersión de la DCF.

Al incrementar los coeficientes de dispersión de la DCF; la mayoría de estos valores sobrepasa la barrera de los parámetros objetivo, reduciendo la longitud de la DCF y aumentando la potencia del segmento de red óptico de forma idéntica a lo conseguido en la FOM; debido a que esta propiedad de la DCF está directamente relacionada a la dispersión negativa, por consiguiente, al variar la dispersión negativa de la DCF se obtienen los mismos datos que al variar la FOM, por otro lado, los parámetros de factor Q y BER alcanzados al realizar las variaciones del coeficiente de dispersión siguiendo la tabla 4.20, se muestran en las figura 4.29 (Anexo C, tabla 45, tabla 46 y tabla 47).

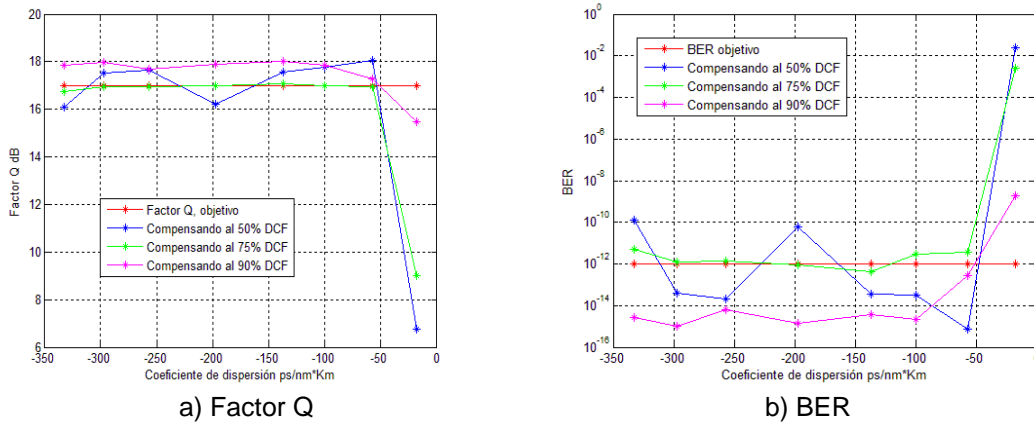


Figura 4.29 Parámetros de calidad óptica al variar el coeficiente de dispersión de la DCF compensando al 50 y 75%, a) Factor Q y b) BER

De la figura 4.29 se concluye que, que la dispersión cromática acumulada en el sistema DWDM no se puede eliminar completamente, solo se puede contrarrestar hasta cierto límite, cumpliendo con los parámetros objetivos definidos inicialmente, ya que al aumentar la dispersión negativa solo reduce la longitud de la DCF y no aumenta la distancia de la fibra estándar SSMF-28, para los parámetros objetivo de $BER=10^{-12}$ y factor $Q=17$ dB. Los valores de dispersión para diferentes porcentajes de compensación de la DCF, se encuentran en la tabla 4.21.

Ptx dBm	Lon SSMF-28 Km	DCF %	Lon DCF Km	Dispersión n DCF ps/nm*Km	Dispersión Cromática acumulada Δt_{total} [ps/nm]	Q dB	BER	Prx dBm
5	157	50	4.75758	-297	1435.15458	17.5403	3.870e-14	-4.858
	174	75	10.82488	-217	807.55598	17.008	6.277e-13	-8.712
	186	90	9.04865	-333	361.04787	17.837	2.621e-15	-9.417

Tabla 4.21 Dispersión cromática acumulada para diferentes valores de dispersión de la DCF.

Los valores de dispersión encontrados en la tabla 4.21 son considerados parámetros umbral para cada porcentaje de compensación de DCF, ya que para valores superiores de dispersión no se cumplen los parámetros objetivo, o son el último valor escogido para realizar el análisis de la máxima dispersión cromática acumulada del segmento de red. Variar el coeficiente de dispersión de la DCF no reduce en gran medida la dispersión máxima acumulada en el segmento de red, esto se comprueba comparando la máxima dispersión cromática hallada inicialmente (tabla 4.18) y la encontrada al variar el valor de dispersión de la DCF (tabla 4.21).

4.1.3 Distancias máximas en el segmento de red al variar las propiedades de la DCF

En la tabla 4.22, se encuentra la máxima longitud que alcanza el segmento de red variando las propiedades de la DCF y cumpliendo con los parámetros objetivo, para una velocidad de transmisión de 10 Gbps con formato de modulación NRZ-OOK.

Ptx dBm	% DCF	Lon SSMF -28 Km	Lon DCF Km	Dispersión DCF ps/nm*Km	Máxima CD acumulada Δt_{total} [ps/nm]	FOM	Atenuación DCF dB/km	Área Efectiva DCF μm^2	Potencia EDFA dBm	Ganancia EDFA dB
5	50	157	4.75758	-297	1435.15458	990	0.3	8	4	30
	75	174	10.82488	-217	807.55598	1085	0.2			
	90	186	9.04865	-333	361.04787	3330	0.1			

Tabla 4.22 Distancias máximas en el segmento de red para cada porcentaje de compensación al variar las propiedades de la DCF

4.1.4 Distancia máxima alcanzada con enlaces concatenados

Se desea que el escenario hallado al variar las propiedades de la DCF logre su máximo alcance en longitud concatenando segmentos de red, cumpliendo con los parámetros objetivos; para ello se adicionan varios enlaces concatenados con una cantidad de dispositivos para lograr una máxima distancia. Se debe recordar que el alcance máximo de un segmento de red depende de la compensación que se desee o según la conveniencia del operador; pero si se trata de una compensación del 100%, el operador debe saber que los costos pueden ser de mayor proporción. Para este caso, la distancia máxima es de 157, 173 y 186 km con una compensación del 50, 75 y 90% para la DCF.

Partiendo de las máximas distancias con compensación para un span (segmento de red óptico), se obtiene como resultado que compensar al 50 y 75% no se logra un aumento significativo del alcance; pero compensando al 90% de la DCF, los resultados cumplen con los parámetros objetivos de factor Q y BER. Se visualiza en los diagramas del ojo, que compensando al 90% de la DCF con 186 km de longitud de la SSMF-28 para uno y dos span's, no se cumple con los parámetros objetivo, debido a que la dispersión máxima por span es acumulativa; por lo tanto, la única solución es reducir la longitud del segmento de red para una compensación del 90%. Esto se observa en la figura 4.30.

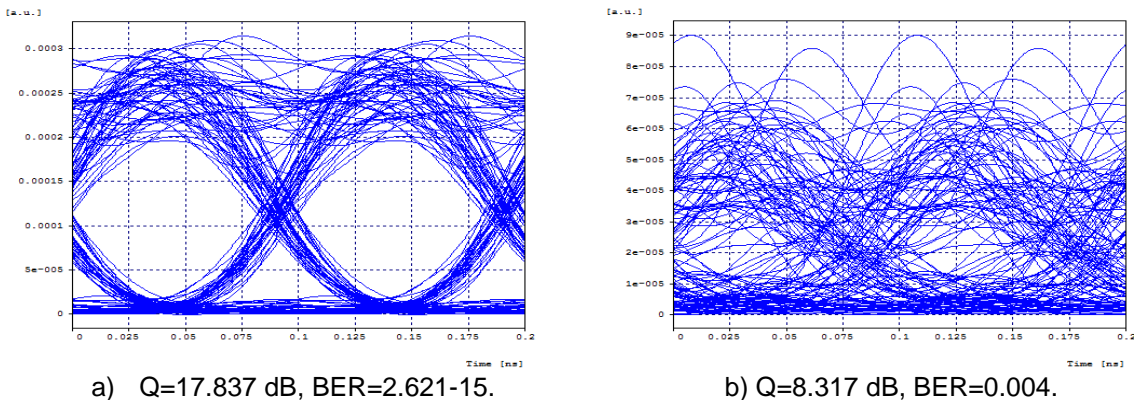


Figura 4.30 Diagrama del ojo para: a) un span de 186 km y b) dos span's de 186 km.

Se reduce el alcance total por span a 125 Km de fibra SSMF-28, compensando al 90% de la DCF y se logra concatenar 5 span's alcanzando una longitud máxima de 625 km, logrando que se cumplan los parámetros objetivo, como se muestra en los diagrama de ojo de la figura 4.31. Para el máximo alcance del segmento de red óptico, se obtiene una dispersión acumulada de 11338.2 ps/nm para una dispersión que proporciona la fibra estándar de 18 ps/nm*Km, la cual será compensada con la dispersión negativa acumulada

de la DCF de -10125 ps/nm con -333 ps/nm*km por segmento de red, y finalmente el resultado de todo el sistema será una dispersión total de 1213.2 ps/nm. Este valor es grande si se considera un solo span, pero en este caso hace referencia a todo el sistema para el enlace total.

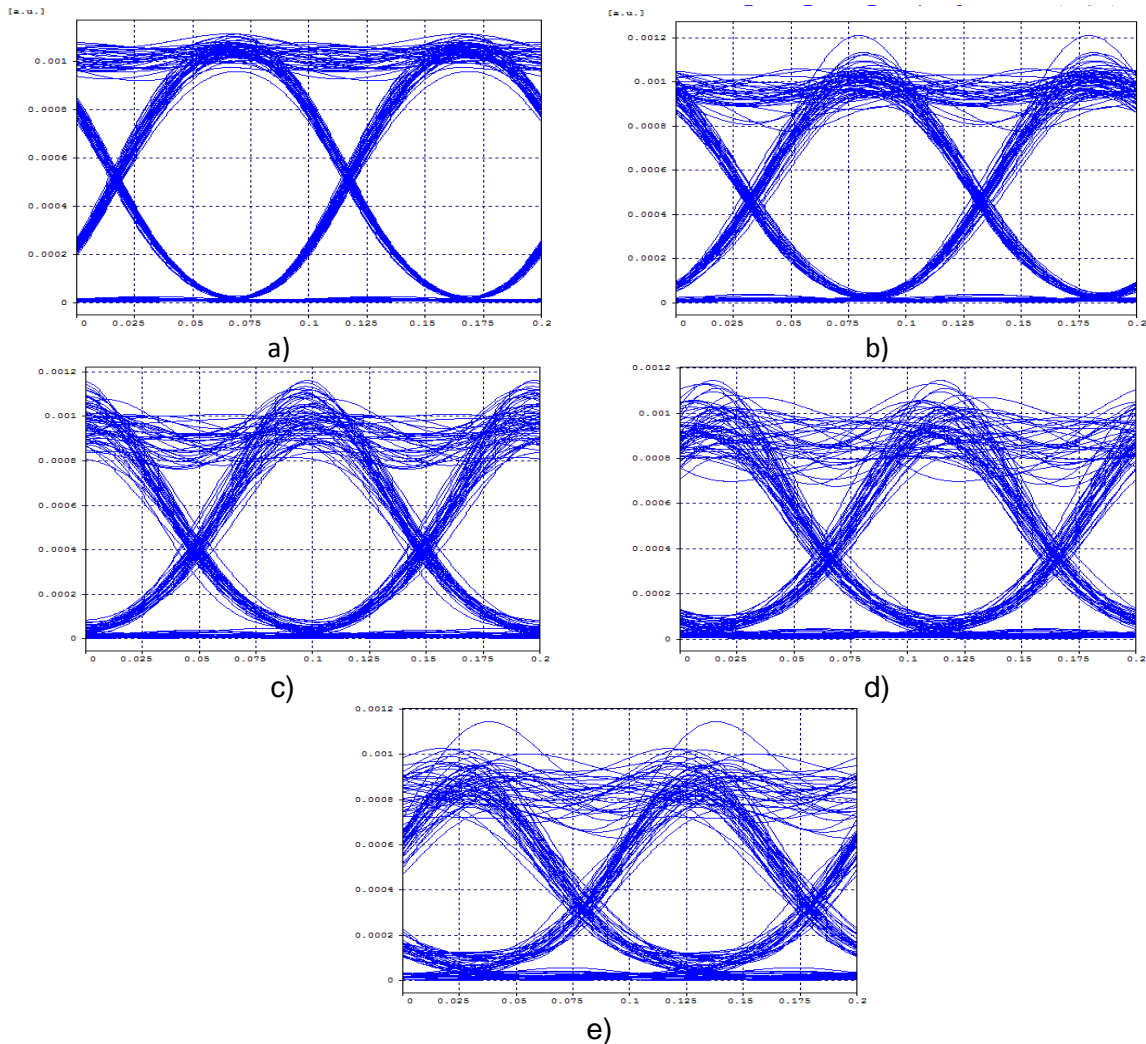


Figura 4.31 Diagrama del ojo para: a) un span, b) dos span, c) tres span, d) cuatro span y e) cinco span; cada span de 125 km.

La siguiente tabla muestra los parámetros de desempeño OPM del sistema para diferentes span's, cumpliendo con los parámetros objetivo. En la figura 4.31 y en la tabla 4.23 se observa que a medida que se aumenta un segmento de red, el sistema se va degradando debido a las pérdidas inducidas por efectos de atenuación, ruido y especialmente por la dispersión cromática acumulada, este último es el efecto lineal que más impacto tiene sobre la red.

Parámetros de desempeño óptico	1 span (125 km)	2 span (250 km)	3 span (375 km)	4 span (500 km)	5 span (625 km)
Factor Q (dB)	29.345	23.265	19.600	17.799	17.244
BER	1e-40	1e-40	2.416e-21	3.619e-15	4.288e-13

Tabla 4.23 Parámetros de desempeño donde cada span es de 125 km.

En conclusión, un operador puede considerar los 5 span's con un total de 625 km o puede adicionar un mayor número de span con una menor distancia y así lograr un mayor alcance. Sin embargo, esto no sería recomendable por los costos al utilizar un mayor número de dispositivos en el enlace; por ejemplo, suponer una mínima distancia de 74 km conlleva a tener 13 span's para operadores que deseen una trayectoria de red de 900 km. Después de realizar el análisis de la variación en las propiedades de la DCF en un sistema DWDM con velocidad de transmisión a 10 Gbps, se determina:

- Con respecto al desempeño, al variar las propiedades de la DCF del sistema DWDM, aumenta la longitud de fibra monomodo estándar SSMF-28; en comparación al escenario inicialmente planteado.
- Aumentar la figura de mérito impacta directamente en la potencia de recepción, ya que los niveles obtenidos son muy altos al realizar variaciones de FOM, además, bajan los costos de implementación de la red óptica sin desmejorar el factor Q y BER.
- Las variaciones realizadas a las propiedades de la fibra compensadora de dispersión, contrarrestan la dispersión acumulada en la red, pero no la logran eliminar. Por lo anterior, esta degradación permanece intrínseca en el canal de transmisión.
- La variación de las propiedades de la DCF incrementa los límites del formato de modulación implementado, NRZ-OOK; al aumentar la longitud máxima de un segmento de red óptico.
- Al implementar fibra compensadora de dispersión en segmento de red, se necesita de un dispositivo amplificador EDFA, ya que este tipo de fibra degrada la potencia de transmisión.
- Al transmitir con potencias bajas, se evita excitar los fenómenos no lineales que sumados a la dispersión cromática de red óptica, harán que el sistema sea inviable desde los parámetros objetivo; ya que en el análisis realizado de las propiedades de la DCF sobre la red, se evidenció la aparición de los fenómenos no lineales para potencias superiores a 5 dBm afectando los parámetros OPM, los cuales son visualizados en el espectro de la señal recibida.
- Las compensaciones a la curva de dispersión cromática de la fibra SSMF-28, son una característica importante para el rendimiento en los sistemas DWDM.

4.2 Caso 1: Configuración 1.2 Análisis del formato de modulación RZ-DQPSK a 10 Gbps ante la variación de las propiedades de la DCF.

Para el análisis de esta sección se implementa con una velocidad de transmisión de 10 Gbps y modulación RZ-DQPSK; para ello se establece la distancia máxima que la red óptica es capaz de alcanzar sin dispositivos que compensen las degradaciones del medio y posteriormente introducir la DCF y el amplificador de potencia; esto permitirá analizar las mejoras que se obtienen al implementar estos dispositivos en el sistema DWDM. Por último, se varían las propiedades de la DCF para evaluar el desempeño mediante los

parámetros objetivos del sistema DWDM y establecer si propiedades de esta fibra permiten aumentar la longitud de la red.

En la figura 4.32, se observa el formato RZ-DQPSK implementado en la herramienta de simulación OptSim. Al implementar este formato de modulación se debe tener en cuenta su complejidad y gran cantidad de elementos utilizados tanto en el transmisor como en el receptor. El transmisor está conformado por: una fuente, un láser de emisión continua, un divisor de potencia para separar la luz en dos caminos de igual intensidad, un modulador Mach-Zehnder con un pulso carver para el patrón de código de línea, un modulador DQPSK, una fuente y un precodificador de datos. En el receptor, los datos primero son filtrados y luego la señal resultante se divide en dos (fase y cuadratura) y se introduce un par de receptores DPSK, con el fin de realizar la detección de los componentes en fase y cuadratura de la señal DQPSK [10].

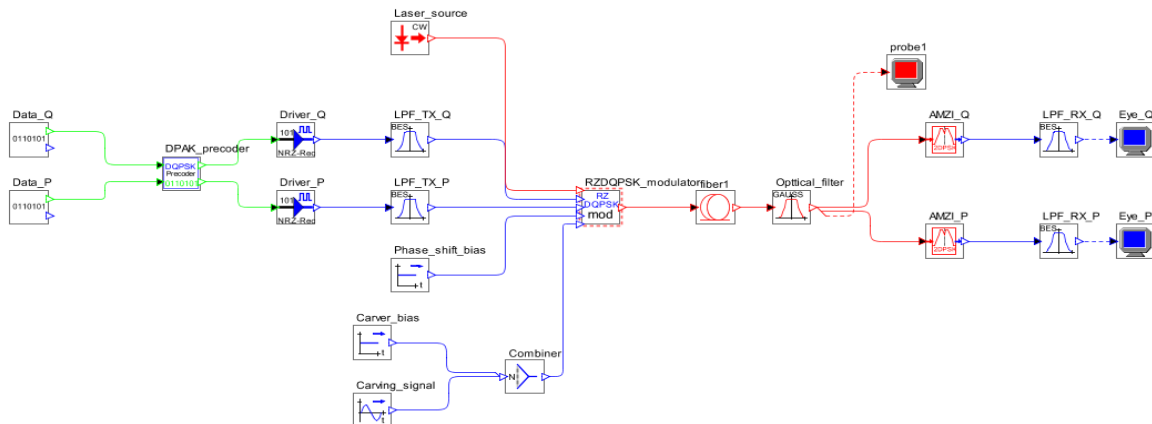


Figura 4.32 Formato de modulación RZ-DQPSK para un canal.

De la figura 4.32, con el fin de garantizar la correcta modulación y demodulación de la señal implementada en el formato RZ-DQPSK, se realizan medidas en el receptor Back to Back; el cual permite ajustar los parámetros tanto del transmisor como del receptor. En la figura 4.33(a) y 4.33(b) se aprecian las condiciones básicas del formato de modulación RZ-DQPSK, representada por un diagrama de ojo sin perturbaciones y el espectro óptico alrededor de los 193.1 THz (Canal 1).

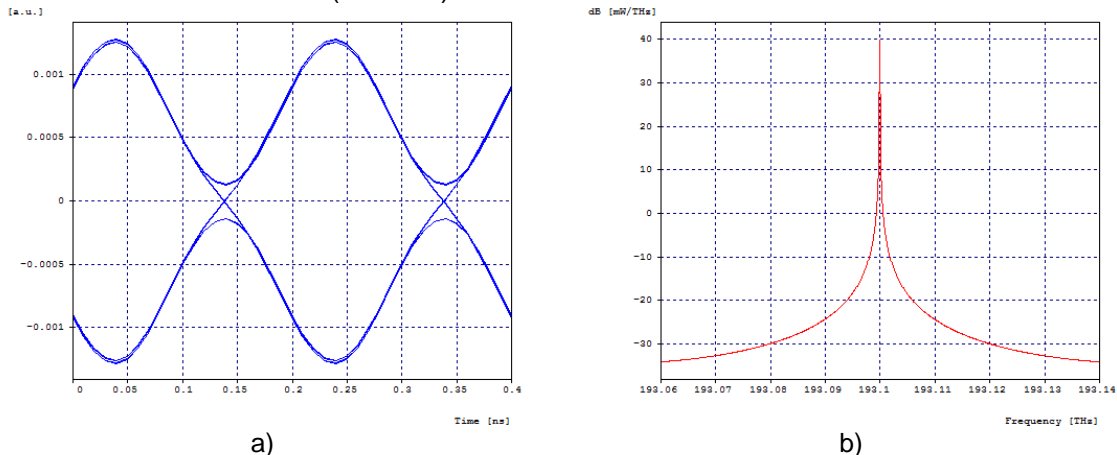


Figura 4.33 Diagrama de ojo a) y espectro óptico en 193.1 THz b) de la señal en el receptor Back to Back; para una velocidad de transmisión de 10 Gbps con formato de modulación RZ-DQPSK.

4.2.1 Máxima distancia alcanzable en el segmento de red, con parámetros implementados por los diferentes operadores de fibra óptica

Una vez realizado el Back to Back del formato de modulación RZ-DQPSK, se configura el segmento de red con parámetros estándar utilizados por los diferentes operadores de fibra óptica; con el fin de analizar la máxima distancia que logra el segmento de red con la inclusión de la fibra SSMF-28, DCF y el amplificador de potencia sobre la red óptica.

4.2.1.1 Máxima distancia alcanzable por la fibra SSMF-28, sin dispositivos compensadores de dispersión ni amplificadores

Inicialmente se introduce fibra óptica SSMF-28 del estándar G.652.D de la ITU-T en la línea de transmisión del escenario planteado en la figura 4.32; esto con el fin de establecer el máximo alcance del segmento teniendo en cuenta todas las degradaciones posibles, en este caso hace referencia a los efectos lineales y las pérdidas generadas por la misma fibra óptica estándar. Las variaciones en la longitud se realizan considerando los parámetros de calidad para un factor Q (17dB), BER (10^{-12}) y una potencia en el receptor (-30 dBm).

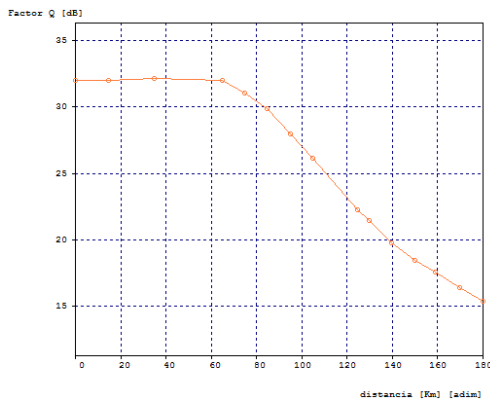
La potencia implementada inicialmente en el transmisor del segmento de red es de 0 dBm; con el fin de analizar los fenómenos lineales y de no excitar los no lineales. Las diferentes longitudes alcanzadas en el segmento de red se muestran en la tabla 4.24.

PTx (dBm)	Canal (Thz)	Distancia (km)	Cuadratura		Fase		PRx (dBm)
			Q (dB)	BER	Q (dB)	BER	
0	193.1	0	32.041	1e-40	32.182	1e-40	-0.322
0	193.1	15	32.060	1e-40	32.178	1e-40	-3.287
0	193.1	35	32.051	1e-40	32.097	1e-40	-7.285
0	193.1	65	31.802	1e-40	31.894	1e-40	-13.294
0	193.1	85	29.654	1e-40	29.462	1e-40	-17.317
0	193.1	105	26.319	1e-40	26.267	1e-40	-21.293
0	193.1	125	22.074	3.011e-37	21.816	7.056e-34	-25.300
0	193.1	140	19.517	1.853e-20	19.154	7.947e-20	-28.307
0	193.1	150	18.357	6.301e-17	17.975	2.491e-15	-30.310
0	193.1	159	17.362	9.144e-14	17.038	9.881e-13	-32.115
0	193.1	170	16.697	1.692e-11	16.294	6.630e-11	-34.284

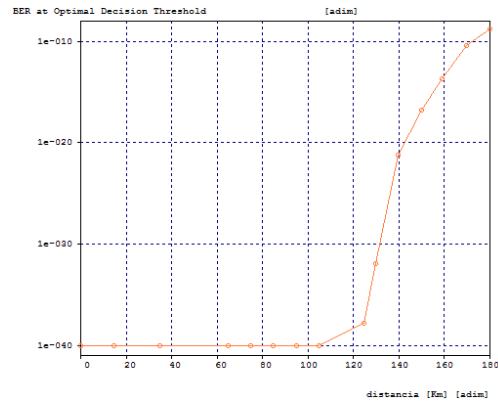
Tabla 4.24 Máximo alcance para un canal alrededor de los 193.1 Thz con potencia de 0 dBm.

En la tabla 4.24 (Anexo D, tabla 51) se observa que al variar la longitud en el segmento de red, el máximo alcance es de 159 km, puesto que a distancias superiores las degradaciones producidas por los efectos lineales en el segmento de red conllevan a tener una BER y un factor Q fuera de los valores definidos según la recomendación de la ITU-T G.sup39. Además, en las figuras 4.34 (a), 4.28 (b) y 4.28 (c) se observa el comportamiento de los parámetros de monitoreo, como factor Q, BER y potencia de recepción frente a la variaciones de la longitud de la fibra óptica estándar en el segmento de red.

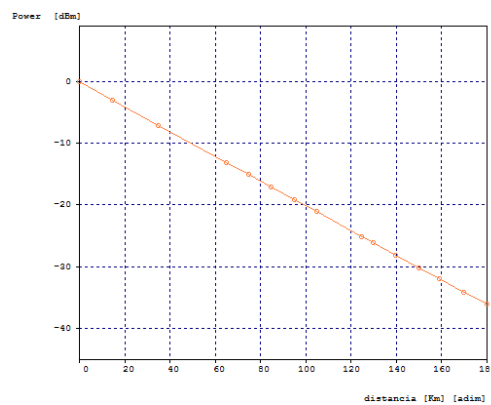
Análisis Comparativo del Desempeño en la Migración de una Red DWDM de 10 a 40 Gbps, ante las Variaciones de las Propiedades de una Fibra Compensadora de Dispersión (DCF)



a) Factor Q vs longitud del segmento de red.



b) BER vs longitud del segmento de red.



c) PRx vs longitud del segmento de red

Figura 4.34 Parámetros de desempeño óptico versus la variación de la longitud de la fibra SSMF-28 con formato de modulación RZ-DQPSK a 10 Gbps.

Como se evidencia en la tabla 4.24 y la figura 4.34, la información enviada a través de la fibra SSMF-28, es afectada por perturbaciones que degradan la señal transmitida; debido a que al aumentar la longitud del segmento de red después de los 159 Km se produce un decremento en los parámetros de calidad óptica como la BER, factor Q y la potencia de recepción. Cabe aclarar que la longitud límite hasta la cual se cumple con los parámetros objetivos es de 159 Km.

Una longitud de 159 Km en la red ocasiona degradaciones sobre la señal transmitida, debido a los fenómenos lineales; como se visualiza en la figuras 4.35; en estas se observa que los fenómenos lineales afectan la trasmisión de la señal, porque al comparar el diagrama de ojo Back to Back con el obtenido al colocar 159 Km de fibra SSMF-28 sobre la línea de transmisión, la apertura de ojo que se está cerrando en el instante óptimo de muestreo y desfasado en el instante óptimo de fase.

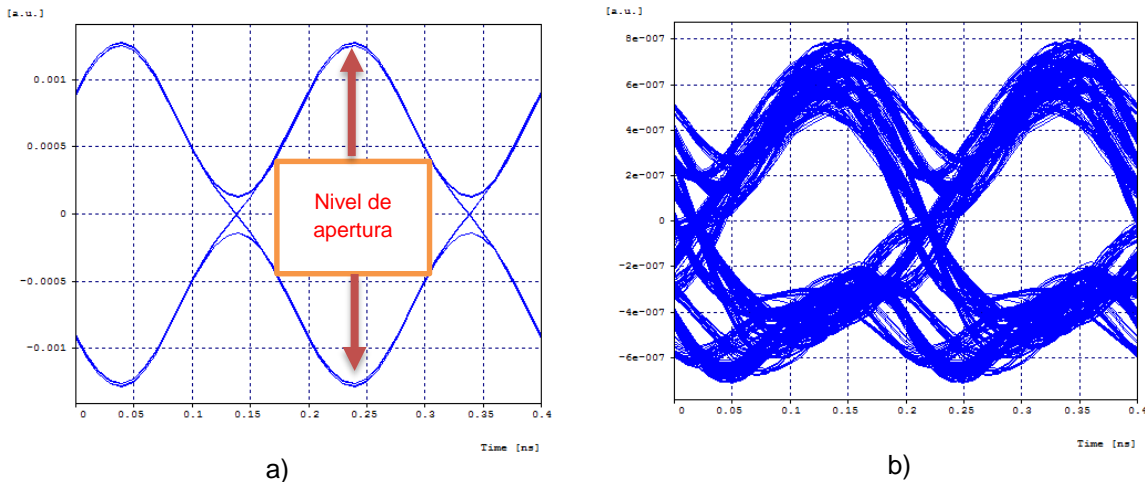


Figura 4.35 a) Diagrama del ojo en el receptor Back to Back y b) Diagrama del ojo tras un tramo de 159 km, afectado por todas las degradaciones de la red óptica.

En la figura 4.36, se observa la incidencia de los fenómenos lineales sobre la señal transmitida, debido a que al comparar la señal eléctrica transmitida con respecto a la señal eléctrica recibida; esta última se encuentra alargada y los pulsos están concatenados.

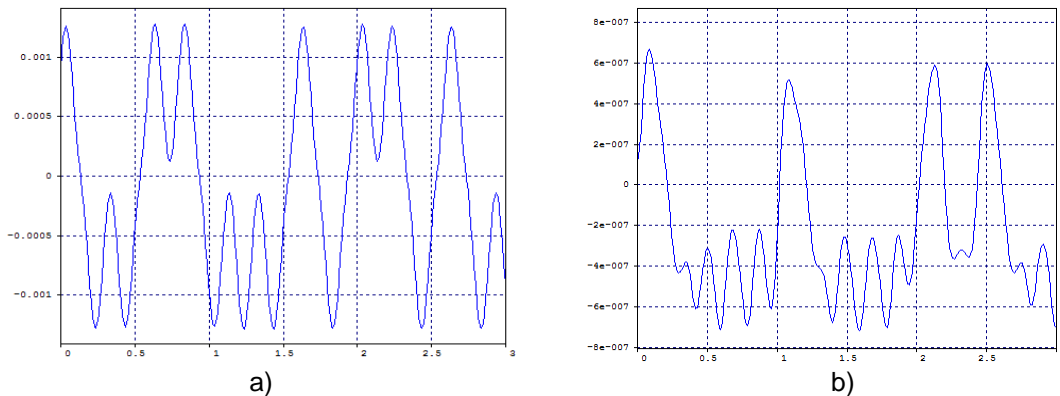


Figura 4.36 a) Señal eléctrica transmitida y b) Señal eléctrica en el receptor.

Como se observa en la figura 4.35 y 4.36, el impacto de los fenómenos lineales sobre el segmento de red provoca las pérdidas de información; debido a que para longitudes superiores a los 159 Km no se cumple con los parámetros objetivos. Por lo tanto se hace necesario identificar cuál de los fenómenos lineales tiene una mayor incidencia sobre el segmento de red.

Como se mencionó en el capítulo 1, los fenómenos lineales son: la atenuación, el ruido, la PMD y la CD; de los cuales se hace despreciable la PMD; debido a que esta se toma con un valor muy pequeño establecido por los fabricantes, además, según estudios realizados para un formato de modulación RZ-DQPSK a 10 y 40 Gbps, el aumento de la PMD en la fibra dentro de los valores típicos ($0.1 \text{ ps/km}^{1/2}$) no tiene mayor incidencia sobre los parámetros de desempeño óptico [10], [14]; teniendo claro esto, se analiza cuál de los restantes fenómenos lineales tiene un mayor impacto en el segmento de red.

Con el fin de determinar, cuál de los efectos lineales, tiene una mayor incidencia negativa sobre la señal transmitida; se compara la atenuación y el ruido frente a la dispersión

cromática de la red, como se muestra en la figura 4.37. En la cual, primero se desprecian las pérdidas de la fibra óptica producidas por la atenuación y el ruido; se simula en VBS linear fiber, para establecer el efecto de la dispersión cromática de la red, se toma el valor estándar de dispersión de la fibra SSMF 18 $\frac{ps}{nm*km}$, segundo se desprecia la dispersión cromática, para esto simula en VBS loss only fiber, de este modo se observa el efecto de las pérdidas ocasionadas por la atenuación de la fibra SSMF-28, con un valor de 0.2 $\frac{dB}{km}$ generando pérdidas de 31.8 dB para un alcance máximo de 159 km.

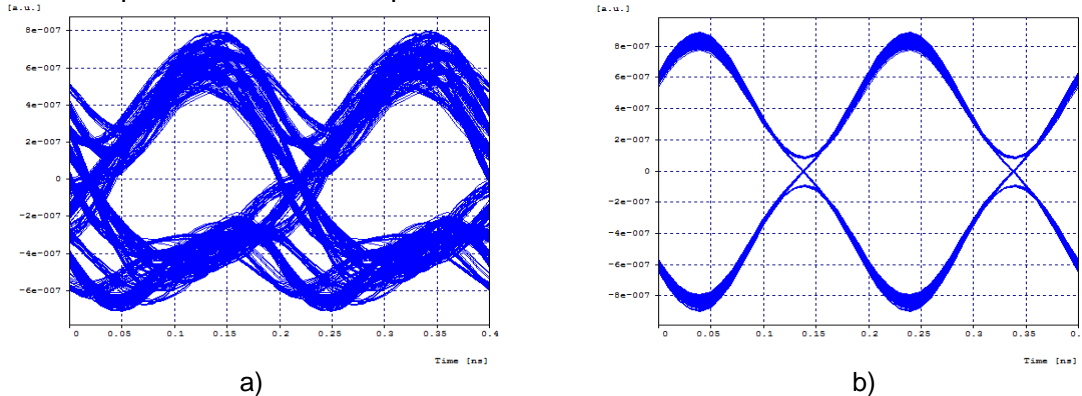


Figura 4.37 Diagrama del ojo tras un tramo de 159 km, afectado por: a) CD, b) atenuación y ruido.

Como se observa en las figura 4.37, el efecto lineal que más degrada la señal transmitida es la CD en comparación a la atenuación y el ruido. Por lo tanto para que un enlace óptico funcione con parámetros Q y BER óptimos, debe estar configurado con fibra compensadora dispersión o algún dispositivo compensador, porque uno de los fenómenos que más degrada la trasmisión de información en redes ópticas es la DC. En el siguiente análisis se observa las mejorías que tiene el sistema DWDM al introducir fibra compensadora de dispersión.

4.2.1.2 Máxima distancia alcanzable en el segmento de red con formato RZ-DQPSK a 10 Gbps introduciendo fibra compensadora de dispersión y sin dispositivos de amplificación.

En el presente análisis se introduce fibra compensadora de dispersión para observar el impacto frente a los parámetros objetivo, luego se varían los niveles de potencia, con el fin de establecer si la DCF contrarresta los fenómenos no lineales y de no ser así limitar los niveles de potencia hasta un valor óptimo en el funcionamiento del sistema DWDM, permitiendo obtener las máximas longitudes en la red óptica al utilizar la DCF. De este modo obtener un segmento de red con parámetros objetivo de Q (17dBm) y BER (10^{-12}), que servirá como escenario base al introducir un amplificador de potencia.

De la tabla 4.24, un segmento de red de 159 Km, la dispersión cromática acumulada en el enlace con fibra monomodo estándar se calcula a partir de la fórmula 2.2 del segundo capítulo y es igual a:

$$D_{link}(\lambda) = 159Km \left[\frac{18ps}{nm * Km} + \frac{0,056ps}{nm^2 * Km} * (1552.52nm - 1550nm) \right] = 2884.43808 \frac{ps}{nm}$$

Para contrarrestar la dispersión cromática se utilizara un coeficiente de dispersión negativo de la DCF de -100 ps/nm*Km, siendo este parámetro ideal en las fibras de dispersión cromática comerciales. A su vez los valores de área efectiva y coeficiente de

atenuación en la DCF, serán los mismos parámetros estándar implementados en la tabla 4.2 sección 4.1.1.2, como se muestra en la tabla 4.25.

Coeficiente de dispersión	Área efectiva	Coeficiente de atenuación
$-100 \frac{ps}{nm \cdot Km}$	$20 \mu m^2$	$0.55 \frac{dB}{Km}$

Tabla 4.25 Parámetros estándar de la DCF.

El coeficiente de dispersión de la fibra SSMF-28 es fijo, con el cual se puede calcular la longitud de compensación de la dispersión cromática para una longitud de segmento de red de 159 Km, utilizando la expresión 2.3, así:

$$l_{DCF} = \left| \frac{18 \frac{ps}{nm \cdot km}}{-100 \frac{ps}{nm \cdot km}} \right| * 159 Km = 28.62 Km$$

Por lo tanto, para contrarrestar $2884.43808 \frac{ps}{nm}$ generados por 159 Km de SSMF-28 hacen falta 28,62 Km de DCF, esto si se compensa al 100%, pero también es factible contrarrestar la CD con longitudes menores de DCF, de este modo también se analizara si es conveniente compensar al 25, 50 y 75 % de la DCF.

Al introducir DCF en el segmento de red, se puede configurar en pre-compensación y post-compensación para diferentes porcentajes de compensación, en el siguiente análisis se establece que método de compensación se seguirá utilizando para contrarrestar la CD de la red. En la tabla 4.26 y 4.27 se visualizan los parámetros de red alcanzados al utilizar los métodos de compensación mencionados.

% DCF	Longitud DCF (Km)	Potencia de Tx (dBm)	Canal	Q (dB)	BER	Potencia de Rx (dBm)
100	28.62	0	193.1	32.155	1e-40	-47.890
75	21.465	0		32.124	1e-40	-43.930
50	14.31	0		30.777	1e-40	-39.953
25	7.155	0		22.712	1e-40	-36.025

Tabla 4.26 Porcentaje de compensación para una distancia de 159 km, utilizando post-compensación.

% DCF	Longitud DCF (Km)	Potencia de Tx (dBm)	Canal	Q (dB)	BER	Potencia de Rx (dBm)
100%	28.62	0	193.1	31.850	1e-40	-47.872
75%	21.465	0		31.568	1e-40	-43.926
50%	14.31	0		30.072	1e-40	-39.980
25%	7.155	0		22.835	1e-40	-36.040

Tabla 4.27 Porcentaje de compensación para una distancia de 159 km, utilizando pre-compensación.

Según el análisis comparativo del desempeño de las dos técnicas de compensación de la tabla 4.26 y 4.27, al variar la longitud de la DCF para contrarrestar la CD en 159 Km de SSMF-28; los parámetros de medición de calidad de la señal óptica (BER y factor Q) de las dos tabla son muy parecidos, por lo tanto, al transmitir con una potencia de 0 dBm y con diferentes porcentajes de compensación de la DCF no se puede considerar el mejor

método de compensación, puesto que la diferencia paramétrica es mínima. Este resultado también es apreciable en la figura 4.38.

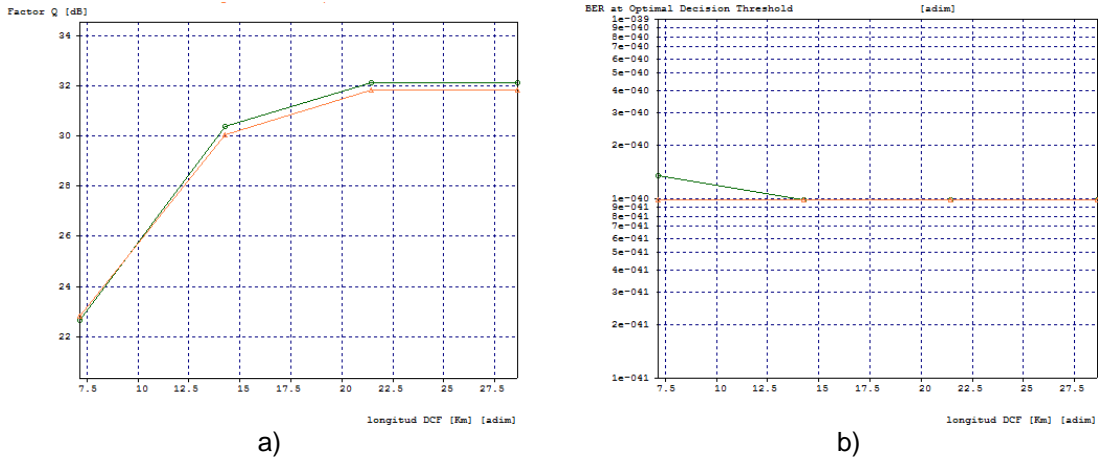
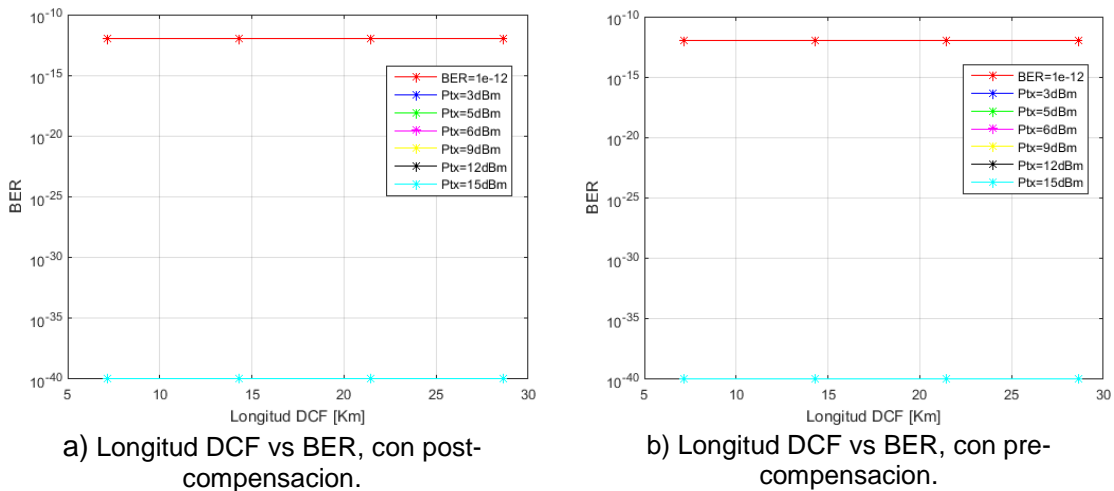


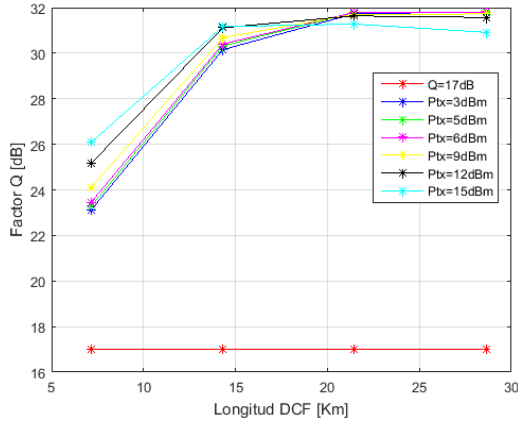
Figura 4.38 Método de Pre-compensación (línea naranja) y Post-compensación (línea verde) para: a) Factor Q vs longitud DCF y b) BER vs longitud DCF.

Como se observa en la figura 4.38, al realizar una comparación entre los dos métodos de compensación, pre-compensación (línea naranja) y post-compensación (línea verde) para diferentes porcentajes de compensación de la DCF, en estos se alcanza una BER de 10^{-40} y un factor Q por encima de los 21 dB. Es decir que al introducir la DCF para el formato de modulación RZ-DQPSK se puede aumentar la longitud del segmento de red considerablemente. Sin embargo, los niveles de potencia al introducir la DCF tienden a disminuir, por ello es conveniente realizar un estudio variando la potencia de transmisión para los dos métodos de compensación y de esta forma visualizar el comportamiento de la DCF a medida que aumente los niveles de potencia de la señal transmitida.

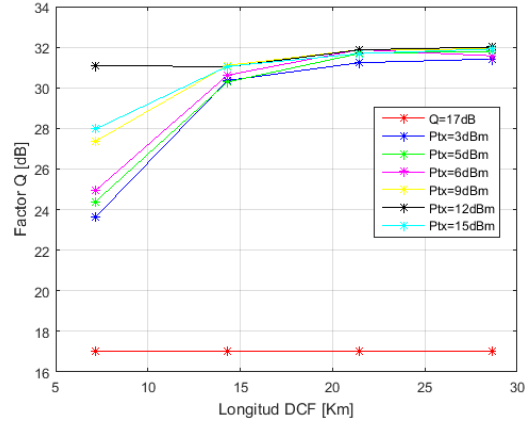
Se aumenta la potencia de 3 dBm hasta 15 dBm para el canal de 193.1 THz en las dos técnicas de compensación de la DCF, mientras que para los restantes canales la potencia de transmisión se deja en 0 dBm con el fin de no excitar fenómenos no lineales intercanal. Es decir que la potencia se varía para cada porcentaje de compensación o longitud de DCF. Esto se aprecia a continuación, figura 4.39 (Anexo D, tabla 52 y 53).



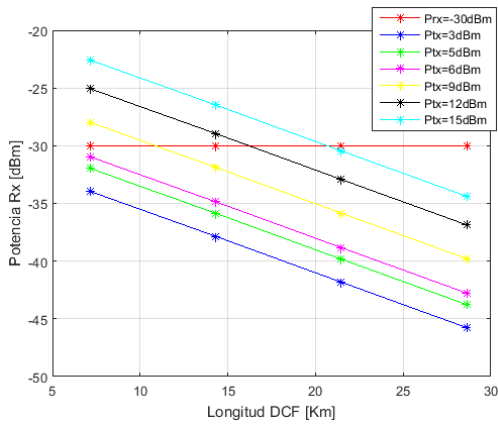
Análisis Comparativo del Desempeño en la Migración de una Red DWDM de 10 a 40 Gbps, ante las Variaciones de las Propiedades de una Fibra Compensadora de Dispersión (DCF)



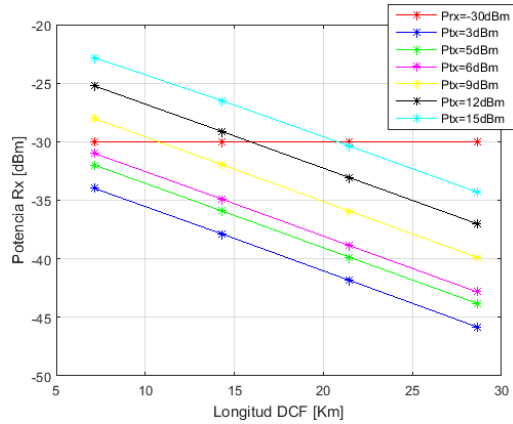
c) Longitud DCF vs factor Q, con post-compensación.



d) Longitud DCF vs factor Q, con pre-compensación.



e) Longitud DCF vs PRx, con post-compensación.



f) Longitud DCF vs PRx, con pre-compensación.

Figura 4.39 Resultados del factor Q, BER y potencia de recepción para las dos técnicas de compensación efectuadas en una fibra óptica SSMF-28 de 159 Km.

De acuerdo a la figura 4.39, se visualiza que al aumentar la potencia de transmisión para post-compensación y pre-compensación, los parámetros objetivo encontrados son altos y casi semejantes, demostrando así que los dos métodos de compensación son efectivos a la hora de contrarrestar las degradaciones del medio óptico. Por lo tanto, se utilizará el método de post-compensación, en vista de que es la más implementada por los operadores de fibra óptica y en estudios realizados anteriormente se concluía que este método era mucho mejor en comparación del método de pre-compensación para el formato de modulación RZ-QPSK al transmitir a 10 y 40 Gbps [10].

Los resultados de la figura 4.39, indican que la BER se comporta de igual forma para las diferentes potencias de transmisión con relación a la longitud de la DCF, su valor es constante y muy bajo comparado con el parámetro objetivo. Mientras que el factor Q crece hasta mantenerse constante a medida que se aumenta la longitud de la DCF para las diferentes potencias de transmisión. Sin embargo con potencia de transmisión de 12 y 15 dBm la mejor respuesta en la potencia de recepción se obtiene con 25 y 50% de la DCF, debido a que la fibra compensadora de dispersión introduce una mayor atenuación que incide negativamente sobre la señal que transita por esta fibra, por lo tanto a una mayor longitud de DCF menor será la potencia de recepción. Por tanto compensar al 100% de la DCF se tienen una mejor BER y Q, pero la sensibilidad en recepción es la

más baja, y por la relación costo-eficiencia no resulta favorable para los operadores (mayor compensación, mayor costo). La principal razón por la que se limita la potencia a mayor compensación de la DCF es por las pérdidas que adiciona la fibra compensadora, por ejemplo al compensar al 100, 75, 50 y 25% las pérdidas son 15.741, 11.806, 7.870 y 3.935 dB respectivamente.

En la figura 4.40, se observa la incidencia de la CD para una potencia de transmisión de 12 dBm compensando al 100, 75, 50, 25% de la DCF.

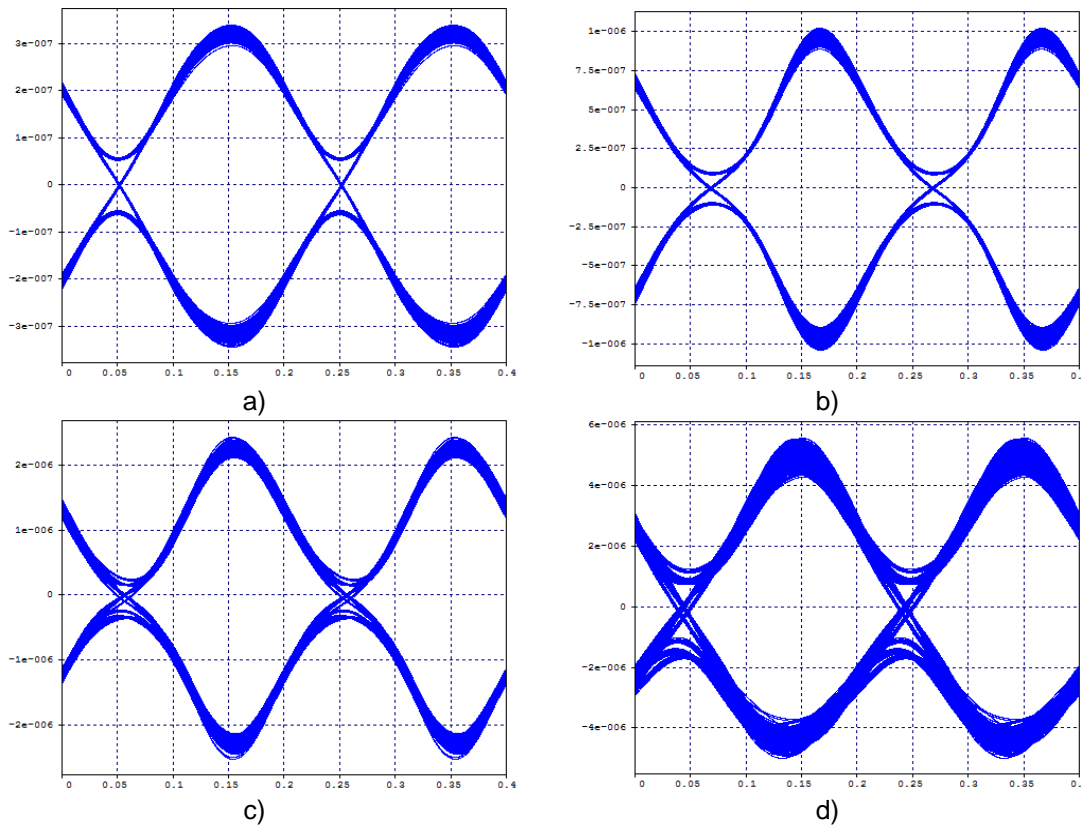


Figura 4.40 Diagrama del ojo compensando al: a) 100%, b) 75% c) 50% y d) 25%, con $P_{tx}=12$ dBm.

De a la figura 4.39 y 4.40, se puede observar que al 25% de compensación, es donde se presenta mayor degradación; sin embargo, se mantiene por encima de los parámetros objetivos y al 100, 75 y 50% los parámetros objetivo son muy parecidos, esto quiere decir que el formato RZ-DQPSK con la DCF tienen un buen comportamiento ante los efectos degradantes de la señal transmitida producidos por la CD, por ello se puede estimar un menor porcentaje de compensación reduciendo los costos para el operador.

En la figura 4.41, se analizan los porcentajes de compensación de la DCF de 25, 50, 75 y 100%, para una longitud de la SSMF-28 de 300 Km, con potencias de transmisión de 3 a 15 dBm. Por el momento se toman potencias que incidan fenómenos no lineales ya que lo que se busca es encontrar los porcentajes de compensación en los cuales se cumpla con los parámetros objetivos y se aumente la relación costo eficiencia, beneficiando a los operadores de fibra óptica.

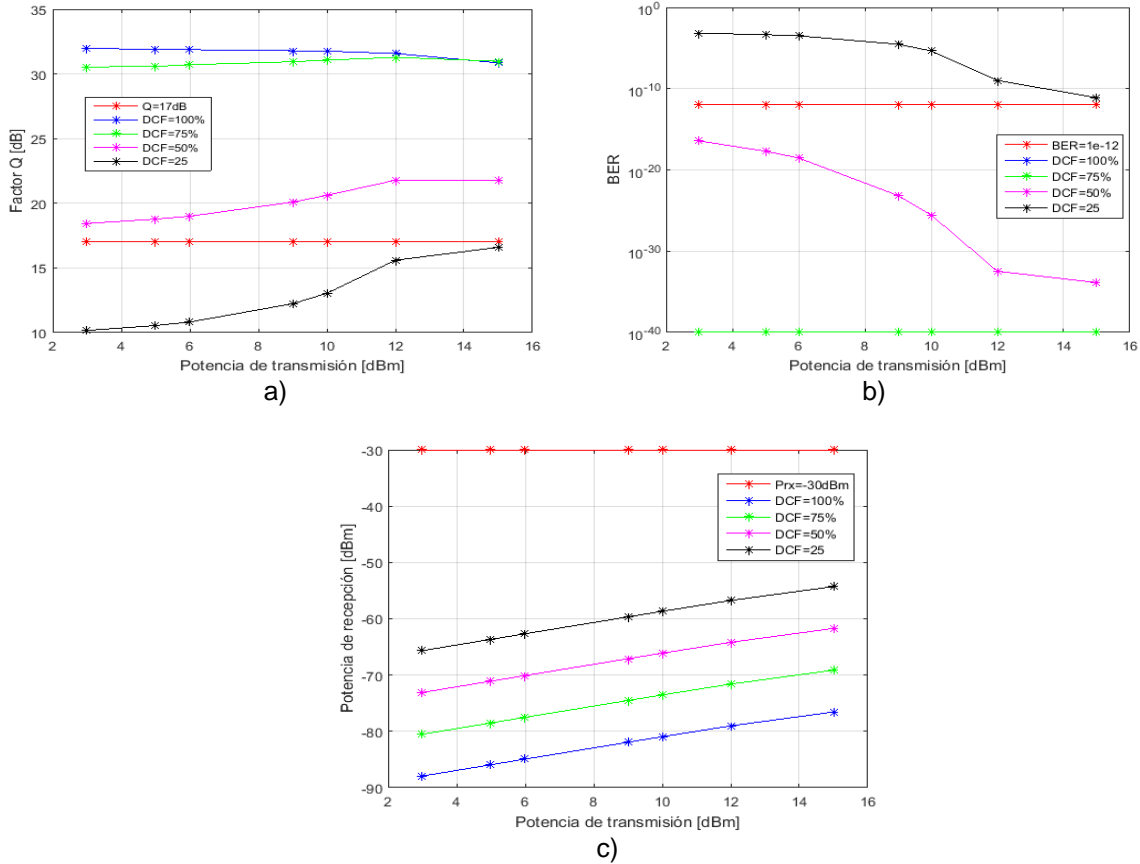


Figura 4.41 Porcentaje de compensación al variar la potencia de transmisión: a) factor Q, b) BER y c) potencia de recepción.

De la figura 4.41, se observa que es conveniente compensar al 50 y 75%, ya que al 25% no se cumple los parámetros objetivo, en cuanto a la relación costo-eficiencia, compensar al 100% se obtienen mejores resultados de BER y Q, pero el costo es el más elevado en comparación a los otros porcentajes de DCF. También es de notar que la potencia de recepción disminuye a medida que se aumenta el porcentaje de compensación, en otras palabras, los menores valores de potencia se encuentran al compensar al 100% y los mayores valores de potencia se encuentran al compensar al 25% de la DCF. Para los operadores de fibra óptica y para posteriores análisis es recomendable la utilización de porcentajes de compensación del 50 y 75 % de la DCF.

Con el fin de analizar los fenómenos no lineales se aumenta la potencia de transmisión del segmento de red. En la figura 4.42, se observa el espectro óptico antes y después de la fibra compensadora de dispersión, esto para establecer que valores de potencia de transmisión inciden en la aparición de fenómenos no lineales, seguidamente se analiza si la DCF aparte de contrarrestar la CD también mitiga estos fenómenos no lineales. Para efectos no lineales intracanal se considera una potencia de 0 dBm en los canales 2, 3 y 4 con separación de 100 GHz (193.2, 193.3 y 193.4), y para el primer canal se toman diferentes potencias de transmisión (0, 12 y 25 dBm), figura 4.42 a) a d). Solo se varía el primer canal para no excitar los otros fenómenos no lineales intercanal (XPM y FWM).

Análisis Comparativo del Desempeño en la Migración de una Red DWDM de 10 a 40 Gbps, ante las Variaciones de las Propiedades de una Fibra Compensadora de Dispersión (DCF)

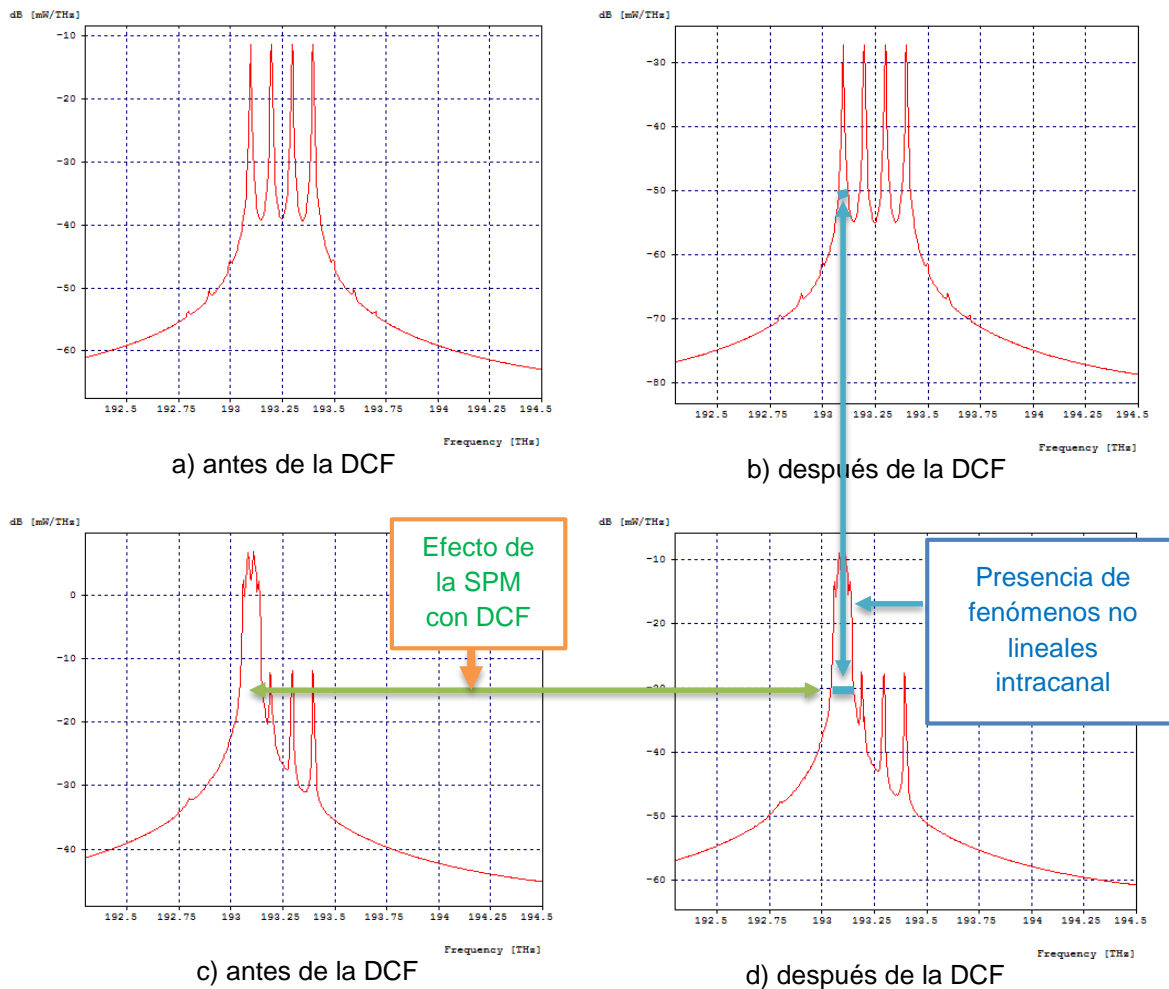


Figura 4.42 Espectro óptico con potencia de transmisión a) y b) 0 dBm, c) y d) 25 dBm.

En la figura 4.42 se puede notar que los efectos no lineales son más evidentes cuando se trabaja con una potencia de transmisión elevada, en este caso 25 dBm provoca la aparición de la SPM, la cual incide en el aumento de la DC, ensanchando los pulsos del primer canal (193.1 THz). El espectro antes y después de la DCF no es muy diferente, por lo cual se concluye que la DCF no logra mitigar el efecto de la SPM, por dicha razón la potencia de transmisión debe ser pequeña con el fin de no excitar el efecto no lineal intracanal.

Para observar los efectos no lineales intercanal, se asigna una potencia idéntica para cada uno de los cuatro canales, en este caso se trabaja con una potencia de transmisión de 12 dBm. En efecto al aumentar la potencia de transmisión se excitan los fenómenos no lineales intercanal, como se observa en la figura 4.43.

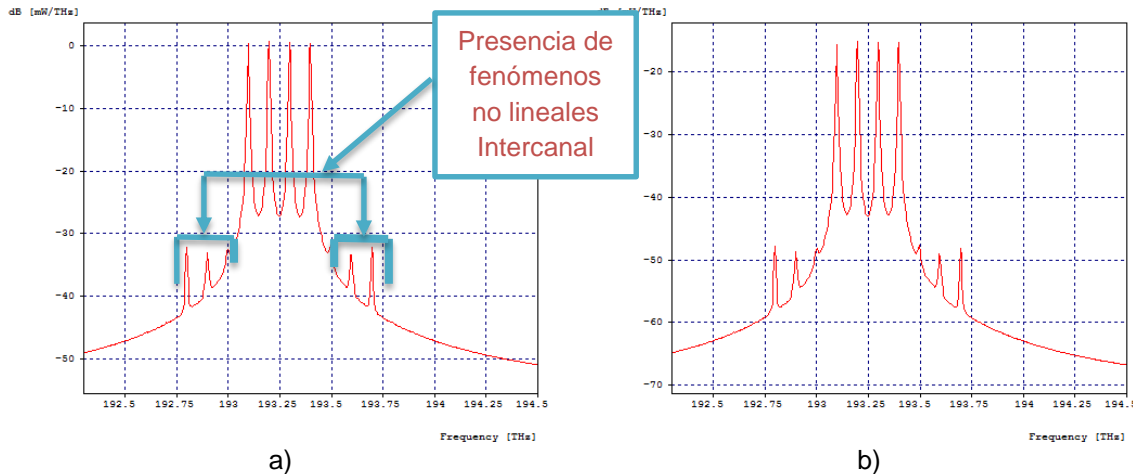


Figura 4.43 Espectro óptico con potencia de transmisión 12 dBm a) antes de la DCF y b) después de la DCF.

Al comparar la figura 4.43 a) con la 4.43 b), se observa que la fibra DCF no contrarresta los fenómenos no lineales; debido a que las degradaciones producidas en el espectro de potencia tienen la misma forma antes y después de la fibra compensadora de dispersión.

En conclusión la DCF no contrarresta los fenómenos no lineales para el formato de modulación RZ-DQPSK Y con el fin de evitar que estas degradaciones incidieran negativamente en los parámetros de calidad de la señal óptica BER, factor Q y potencia de recepción, se debe transmitir en el segmento de red con potencias pequeñas, en este caso se utilizan las mismas de la sección 4.1.1.1; estas potencias se encuentran entre 3 y 6 dBm.

Establecido el porcentaje de compensación del 50 y 75% en la DCF, y la potencia de transmisión en el rango de 3 a 6 dBm, se obtienen los máximos alcances del segmento de red cumpliendo los parámetros objetivos de BER y factor Q, como se observa en la tabla 4.28 (Anexo D, tabla 61):

Ptx (dBm)	DCF (%)	Longitud SSFM (km)	Longitud de la DCF (Km)	Cuadratura		Fase		Prx (dBm)
				Q (dB)	BER	Q (dB)	BER	
3	50	333	29.97	17.659	7.654e-14	17.032	5.964e-13	-80.369
	75	598	80.73	17.006	1.288e-12	17.096	5.694e-13	-161.279
4	50	333	29.97	17.373	2.992e-13	17.021	2.393e-12	-79.396
	75	672	90.72	17.923	2.082e-15	17.362	7.940e-14	-180.606
5	50	319	28.71	18.023	8.255e-16	17.738	6.458e-15	-74.889
	75	697	94.095	17.469	6.098e-14	17.009	9.690e-13	-186.452
6	50	350	31.5	18.071	5.813e-16	17.580	1.883e-14	-81.633
	75	674	90.99	18.194	2.990e-16	17.746	9.996e-15	-179.147

Tabla 4.28 Máximo alcance del segmento de red hasta donde se cumple los parámetros objetivos (BER y Q).

En la tabla 4.28, se aprecia que el máximo alcance se logra para una compensación del 75% en cualquiera de las potencias de transmisión, pero una de las potencias que sobresale en la tabla es 5 dBm, ya que es un valor comercial utilizado en el láser Huawei OSN 3500 implementado en sistemas DWDM de los diferentes operadores de fibra óptica. Trabajar con una compensación alta también trae sus consecuencias, como es de notar

en el transcurso del análisis de la sección 4.2.1.2 al introducir la DCF se genera una mayor degradación de la potencia de recepción; por lo tanto, se hace necesario la implementación de un dispositivo amplificador en la línea de transmisión.

En conclusión en la sección 4.2.1.2, se observa que para el formato RZ-DQSK al introducir DCF en la línea de transmisión se logra compensar en gran medida a la CD, permitiendo aumentar en cientos de kilómetros el segmento de red. Además son establecidos dos coeficientes de compensación de la DCF, los cuales servirán como parámetros de referencia para las siguientes secciones y por último se comprueba que la fibra compensadora de dispersión no contrarresta los fenómenos no lineales por este motivo la potencia en transmisión es pequeña.

4.2.1.3 Máxima distancia alcanzable en el segmento de red, utilizando fibra compensadora de dispersión y amplificador de potencia EDFA.

El estudio realizado al formato de modulación RZ-DQPSK introduciendo fibra compensadora de dispersión a la red óptica incide sobre la potencia de recepción; ya que los niveles de potencia obtenidos se encuentran por debajo de los rangos aceptables para realizar una correcta trasmisión de información. Es conveniente introducir dispositivos amplificadores de potencia EDFA a la red óptica, para mejorar la potencia en recepción y aumentar la longitud del segmento de red cumpliendo con los parámetros objetivos.

En el siguiente análisis se contara con los valores encontrados en la tabla 4.28 y con dos configuraciones del amplificador EDFA en la línea de transmisión: a) Configuración Booster; en la cual el amplificador EDFA se ubica entre el transmisor y la fibra óptica. b) Configuración Inline; en el cual el amplificador se usa entre span's de fibra óptica; en este caso en medio de la fibra SSMF28 y la DCF. Con estas configuraciones de amplificación en el segmento de red se obtienen diferentes resultados en fase y cuadratura, como se observa en la figura 4.44 (Anexo D, tabla 62 y tabla 63).

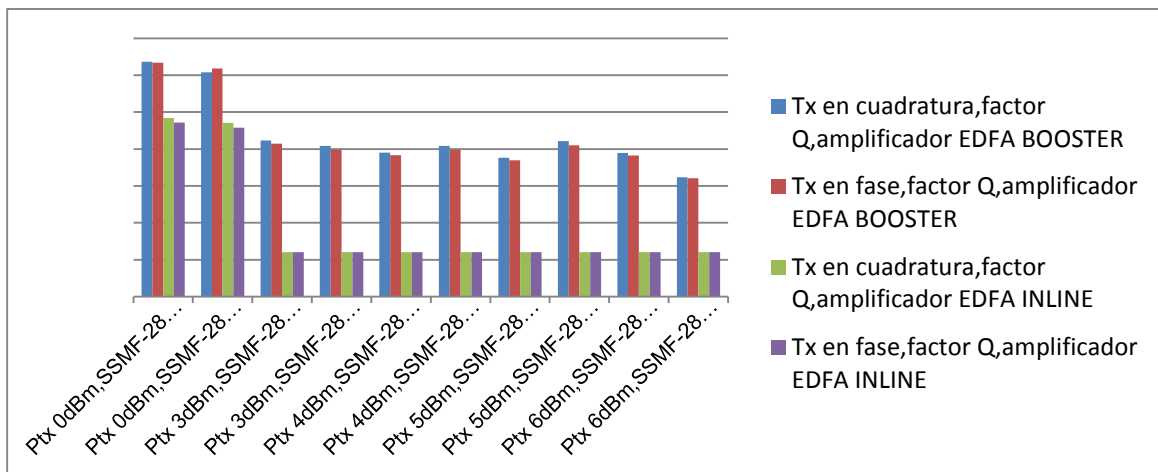


Figura 4.44 Factor Q dB, alcanzado en configuración Booster Vs configuración Inline.

De la figura 4.44, se observa que la mejor configuración obtenida, analizando el factor Q del segmento de red, es la configuración EDFA Booster, ya que la configuración Inline aplicando una potencia por arriba de 0dBm no se logra alcanzar los parámetros objetivo. Este mismo resultado se presenta en la BER, la cual se muestra a continuación, figura 4.45.

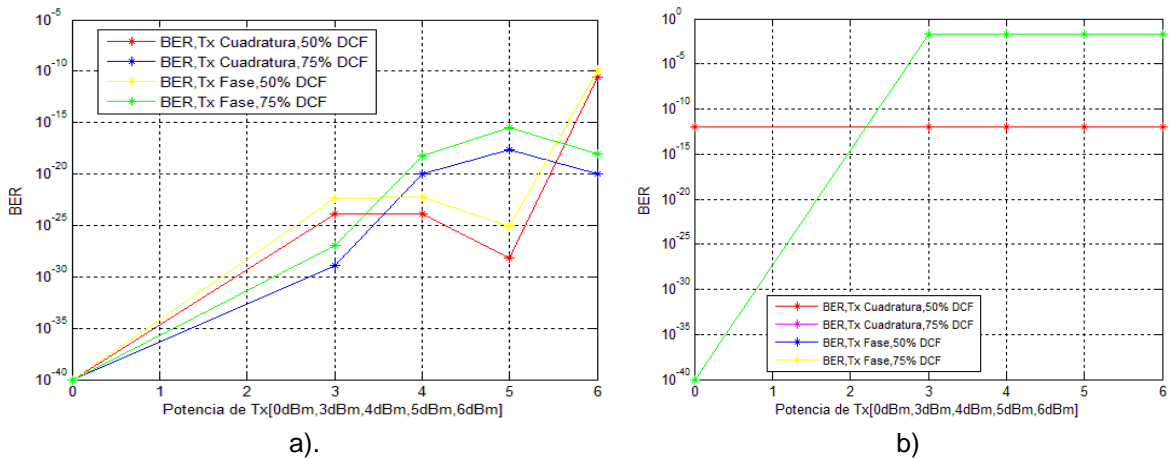


Figura 4.45 BER en cuadratura y fase alcanzada en configuración EDFA, a) Booster y b) Inline

En la figura 4.45, se observa el mal funcionamiento de la red óptica con configuración EDFA Inline en comparación a la configuración EDFA Booster, en esta última la mayoría de las potencias de transmisión analizadas en el segmento de red para cada porcentaje de compensación se encuentran por debajo de 10^{-12} en la BER, mientras que para la configuración EDFA Inline se encuentran por arriba de este valor. Por lo tanto, la configuración Inline no cumple el parámetro objetivo de BER. El único parámetro en el cual la configuración EDFA Inline se encuentra por arriba de la configuración EDFA Booster es la potencia de recepción, como se observa en la figura 4.46.

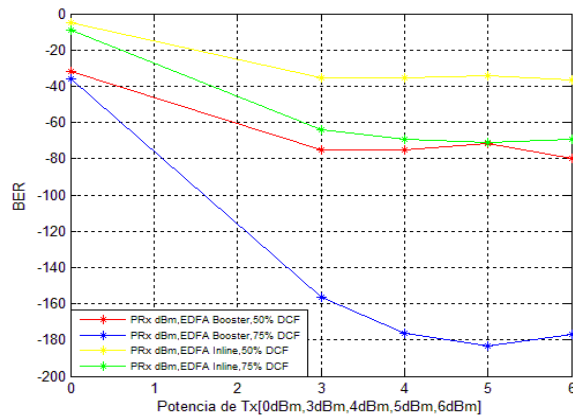


Figura 4.46 PRx dBm alcanzada con amplificación EDFA configuración Booster Vs configuración Inline.

Se analiza por qué la configuración de EDFA en Inline con respecto a la Booster para el formato de modulación RZ-DQPSK reduce tan significativamente los parámetros de BER y factor Q en el segmento de red; esto se muestra al comparar los diagramas de ojo aplicando estas configuraciones de EDFA en la línea de transmisión, como se muestra en la figura 4.47.

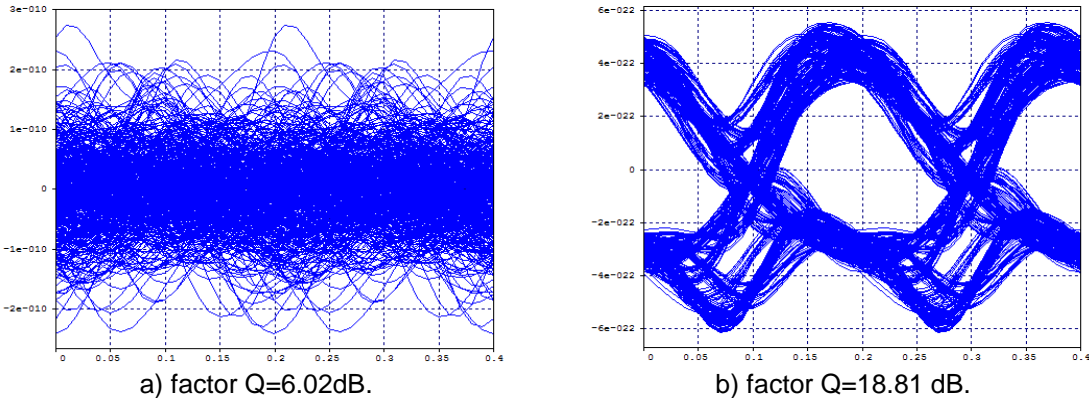


Figura 4.47 Diagrama de ojo para el segmento de red con configuración EDFA a) Inline y b) Booster

De la figura 4.47, se observa que la configuración Inline aumenta los niveles de dispersión cromática en la red, causando que la información transmitida no sea reconocida en recepción. En cambio en la configuración EDFA Booster la CD se mantiene estable, permitiendo aumentar la longitud en el segmento de red.

En conclusión para posteriores análisis de la sección 4.2 se utilizara una configuración EDFA Booster en la red óptica y la potencia de trasmisión utilizada será de 5 dBm, ya que es la más implementada por láseres comerciales; empleados por los diferentes operadores de redes ópticas .

El amplificador EDFA en configuración Booster con una potencia de trasmisión de 5 dBm permite alcanzar una distancia máxima para la fibra SSMF-28 de 319 y 697 Km, compensando al 50 y 75% de la DCF, como se muestra en la tabla 4.29 (Anexo D, tabla 62 y tabla 63).

PTx dBm	OSNR In dB	% DCF	Longitud SMF-28 Km	Longitud DCF Km	OSNR Out dB	Cuadratura		Fase		PRx dBm
						dB Q	BER	Q dB	BER	
5	38.654	50	319	30.69	42.397	19.369624	1.91262e-20	18.993167	2.55206e-18	-77.369747
		75	697	94.905	14.925	18.311194	1.38635e-16	17.914258	4.15392e-15	-185.074906

Tabla 4.29 Distancia máxima alcanzada para una configuración Booster.

De esta sección, se concluye que para una red óptica implementada en formato de modulación RZ-DQPSK y que cuente con fibra compensadora de dispersión, la introducción de amplificador EDFA en configuración Booster aumenta los parámetros OPM como factor Q y BER, los cuales son obtenidos en cuadratura y en fase, permitiendo aumentar la longitud del segmento de red cumpliendo los parámetros objetivo. Aunque el nivel de la potencia en recepción permanece bajo debido al formato de modulación que se está manejando en el segmento de red.

En la figura 4.48, se observa el segmento de red alcanzado al realizar el análisis de la sección 4.2.1 para una transmisión a 10 Gbps con formato de modulación RZ-DQPSK, el

cual cuenta en la línea de transmisión con la Fibra SMMF-28, fibra DCF estándar en método de post-compensación y amplificador EDFA en configuración Inline.

Velocidad de Tx=10 Gbps

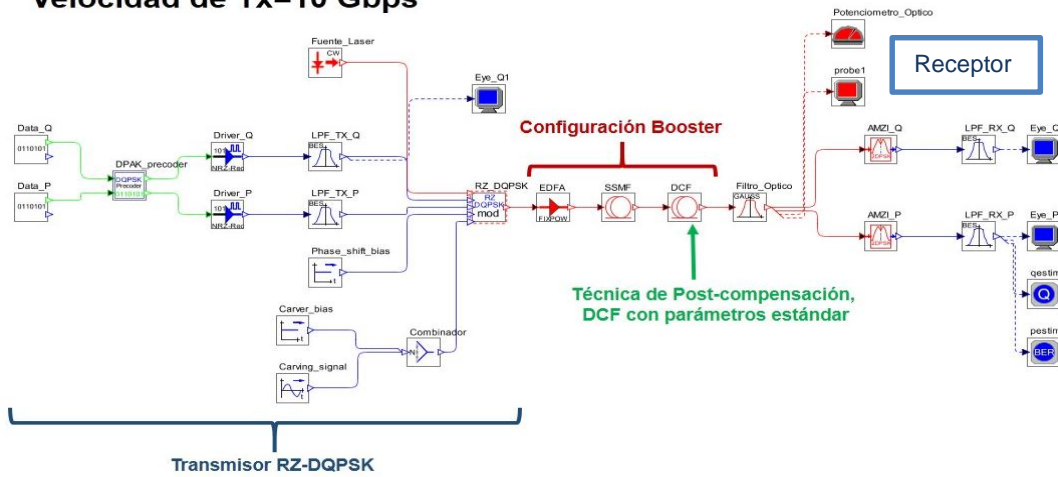


Figura 4.48 Segmento de red para el formato de modulación RZ-DQPSK, transmitiendo a 10Gbps, el cual cuenta el línea de transmisión con DCF y amplificador EDFA

4.2.2 Mejoras al segmento de red, variando las propiedades de la DCF

En este análisis se variaran las propiedades de la DCF, como son: el área efectiva, atenuación, figura de mérito y máxima dispersión cromática acumulada. Se busca encontrar los parámetros que permitan obtener el mejor funcionamiento sobre el segmento de red en comparación al escenario ideal planteado en la sección 4.2.1, al conseguir estos parámetros se definirá el escenario o sistema DWDM, el cual se migrará a una velocidad de trasmisión de 40 Gbps con formato de modulación RZ-DQPSK. El escenario utilizado para analizar la variación de las propiedades de la DCF se muestra a continuación, figura 4.49.

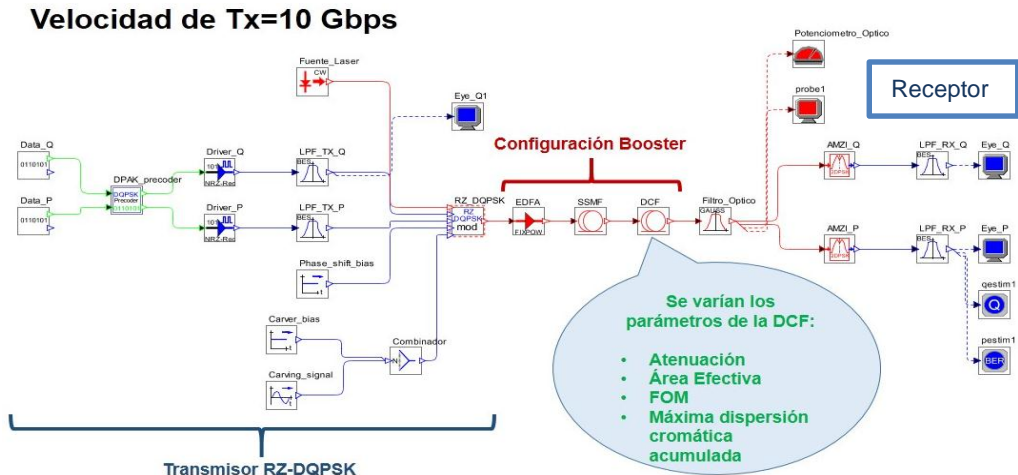


Figura 4.49 Segmento de red para el formato de modulación RZ-DQPSK, transmitiendo a 10 Gbps, al cual se varían las propiedades de la DCF.

4.2.2.1 Área Efectiva

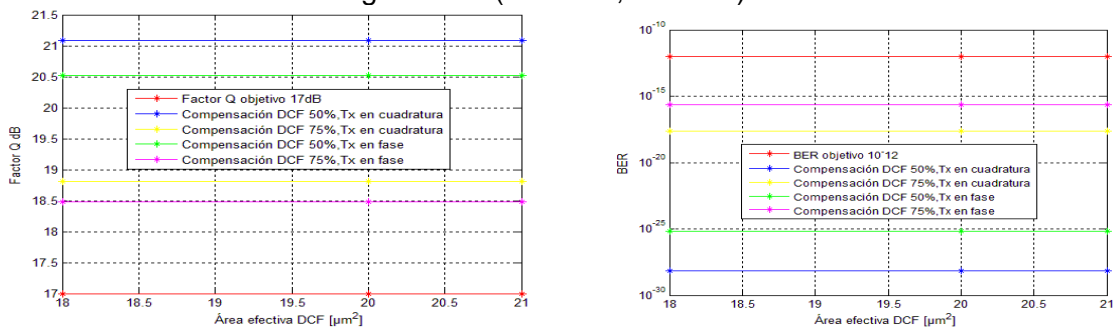
Independiente del formato de modulación que se esté utilizando, el área efectiva es por donde se condensa la mayor potencia transmitida en la fibra óptica, un área efectiva grande en teoría es mucho mejor que una pequeña, por lo tanto el siguiente análisis estará enfocado en analizar y evaluar si en la modulación RZ-DQPSK el sistema DWDM es más eficiente con un área efectiva pequeña o grande de la DCF. Se busca que valor de área efectiva incrementa los parámetros OPM (factor Q y BER) o por el contrario esta propiedad de la DCF no influye sobre el sistema DWDM. El escenario de simulación se plantea con una potencia de trasmisión de 5 dBm por cada canal, la separación de estos será de 100 GHz, además se contara con los valores encontrados en la tabla 4.29, como longitud de la SSMF-28 y porcentajes de compensación del 50 y 75% de la DCF.

Los tres valores escogidos inicialmente para realizar el análisis de la incidencia del área efectiva de la DCF sobre el segmento de red se muestran a continuación, tabla 4.30.

Área efectiva DCF μm^2	18	20	21
-----------------------------------	----	----	----

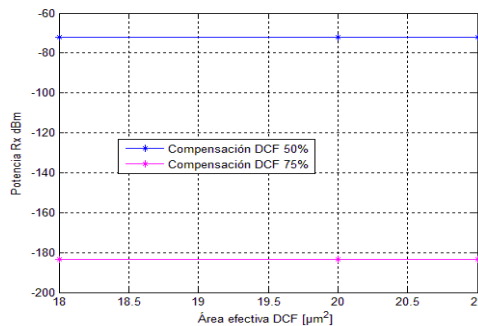
Tabla 4.30 Parámetros de área efectiva de la DCF

Al realizar variaciones de área efectiva en la DCF siguiendo la tabla 4.30, no se producen incrementos ni decrementos del factor Q y la BER, los cuales son obtenidos en el segmento de red en cuadratura y en fase. Además, en la red óptica la potencia de recepción permanece constante al variar el área efectiva en la DCF. Los resultados de los parámetros de calidad óptica BER, factor Q y potencia de recepción al variar el área efectiva se observan en la figura 4.50 (Anexo D, tabla 64).



a) Factor Q compensando al 50 y 75% de la DCF

b) BER compensando al 50 y 75% de la DCF



b) Potencia de recepción compensando al 50 y 75% de la DCF.

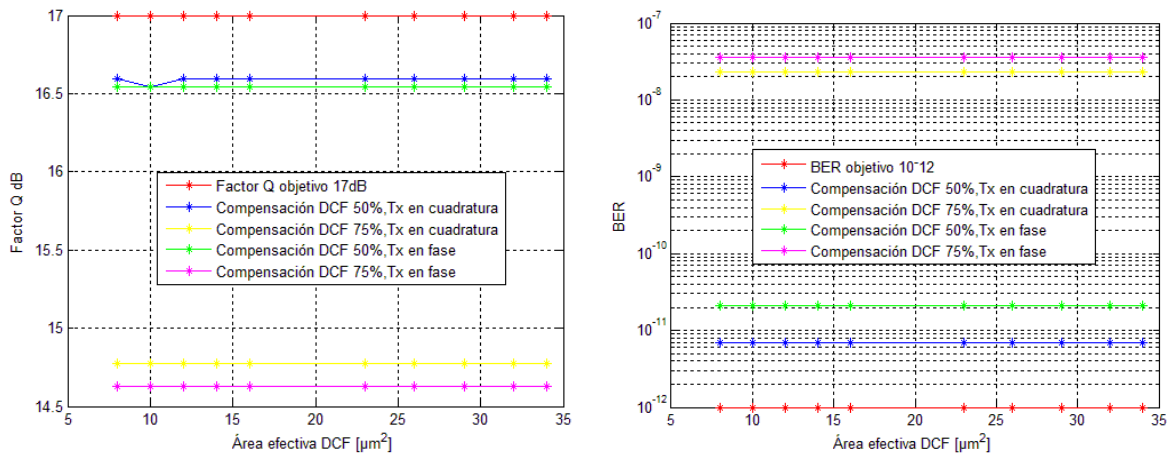
Figura 4.50 Resultados obtenidos en fase y cuadratura al variar el área efectiva en la DCF de 18, 20 y 21 μm^2 sobre el segmento de red.

Debido a que con los valores de la tabla 4.31, no se logra establecer la incidencia del área efectiva de la DCF sobre el segmento de red, se toma un rango mayor que va desde los 8 μm^2 hasta los 34 μm^2 , como se aprecia en la tabla 4.31.

Área Efectiva DCF μm^2	8	10	12	14	16	23	26	29	32	34
-----------------------------------	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Tabla 4.31 Parámetros de área efectiva de la DCF en un rango de 8 a 34 μm^2

Al realizar las variaciones de área efectiva de la tabla 4.31 en el segmento de red, con la potencia y ganancia del EDFA constantes. Se visualiza que los parámetros de calidad óptica (BER, factor Q y potencia de recepción) permanecen constantes tanto en fase como en cuadratura para los porcentajes de compensación del 50 y 75%. Este fenómeno se debe a que el amplificador es un dispositivo que estabiliza el sistema DWDM, por lo tanto, la variación de los parámetros de área efectiva de la DCF no impactan sobre el segmento de red, a menos que se varíen los parámetros la Potencia EDFA y la ganancia EDFA. Los parámetros de calidad óptica al variar el área efectiva de la DCF se muestran a continuación, figura 4.51 y tabla 4.32 (Anexo D, tabla 65, tabla 66, tabla 67 y tabla 68).



a) Factor Q al 50% en fase y cuadratura VS Factor Q al 75% en fase y cuadratura.

b) BER al 50% en fase y cuadratura VS BER al 75% en fase y cuadratura.

Figura 4.51 Parámetros de calidad óptica al variar el área efectiva de 8 μm^2 hasta 34 μm^2 en el segmento de red

Área Efectiva DCF μm^2	8	10	12	14	16	23	26	29	32	34
Potencia en recepción dBm	-75.870970									

Tabla 4.32 Potencia hallada en recepción al variar el área efectiva de la DCF de 8 a 34 μm^2 .

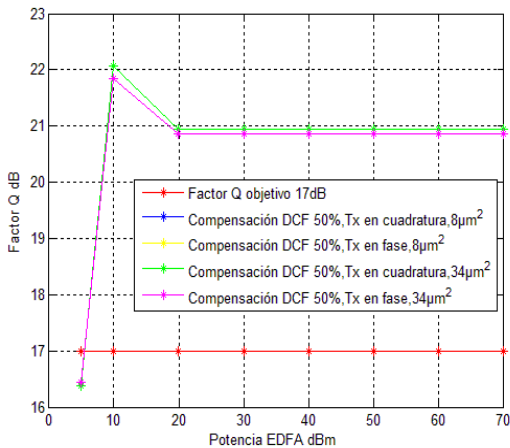
Al variar la ganancia EDFA se obtienen parámetros idénticos para diferentes valores de área efectiva (8 a 34 μm^2), compensando al 50 y 75% de la DCF. Además el factor Q y la BER para transmisión en cuadratura y en fase no alcanzan a los parámetros objetivos para que el segmento de red tenga un funcionamiento ideal, esto se muestra en la tabla 4.33 (Anexo D, tabla 73, tabla 74, tabla 75 y tabla 76).

Ganancia EDFA dB	10	15	20	25	30	35	40	45
Área Efectiva			8 μm^2			34 μm^2		
Compensación al 50% de la DCF	Factor Q en cuadratura dB	16.598			16.598			
	Factor Q en fase dB	16.547			16.547			
	BER en cuadratura	6.904e-12			6.904e-12			
	BER en fase	2.118e-11			2.118e-11			
Compensación al 75% de la DCF	Factor Q en cuadratura dB	14.777			14.777			
	Factor Q en fase dB	14.627			14.627			
	BER en cuadratura	2.348e-08			2.348e-08			
	BER en fase	3.615e-08			3.615e-08			

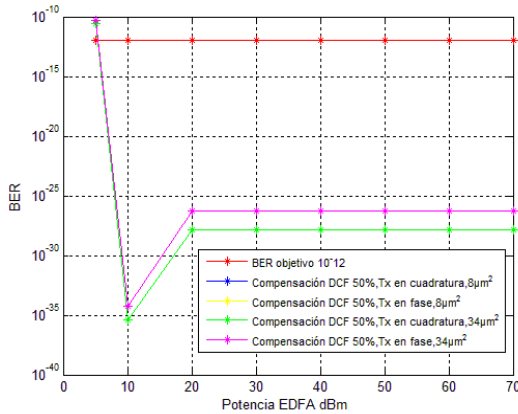
Tabla 4.33 Variación de potencia EDFA, e incidencia en los parámetros objetivo (Q, BER).

De la tabla 4.33, se concluye que para la modulación RZ-DQPSK variar la ganancia EDFA no garantiza mejoras en el sistema DWDM así se realicen variaciones en el área efectiva en la DCF.

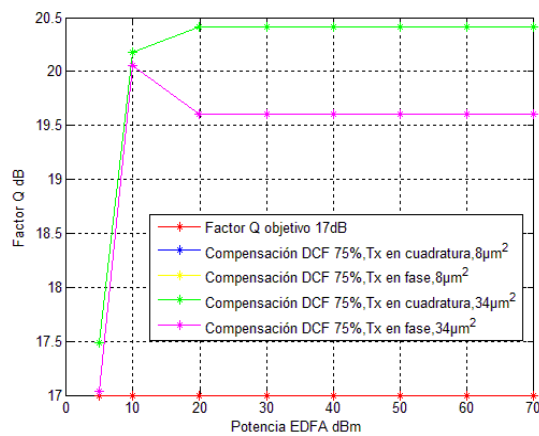
Las variaciones de la potencia EDFA con valores de área efectiva de la tabla 4.31 y tomando diferentes valores de compensación de la DCF entre 50 y 75% se muestran en la figura 4.52, basada en datos tomados del anexo D, tabla 69, tabla 70, tabla 71 y tabla 72, respectivamente.



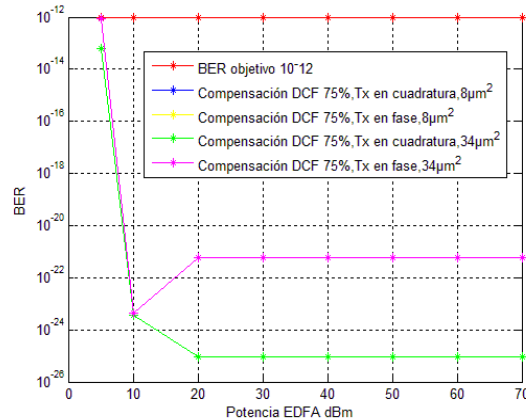
a) Factor Q compensando al 50% DCF.



c) BER compensando al 50% DCF.

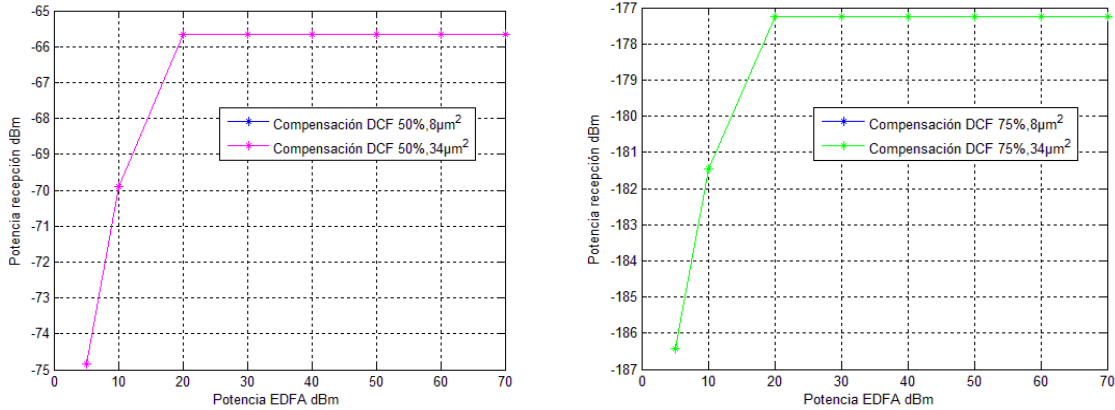


b) Factor Q compensando al 75% DCF.



d) BER compensando al 75% DCF.

Análisis Comparativo del Desempeño en la Migración de una Red DWDM de 10 a 40 Gbps, ante las Variaciones de las Propiedades de una Fibra Compensadora de Dispersión (DCF)



e) Potencia de recepción compensando al 50% DCF.

f) Potencia de recepción compensando al 75% DCF.

Figura 4.52 Parámetros ópticos del segmento de red al variar la potencia EDFA y el área efectiva de la DCF; entre 8 y 34 μm^2 . Utilizando porcentajes de compensación del 50 y 75 % de la DCF.

Como se observa en las figura 4.52, el factor Q y la BER tanto en fase como en cuadratura se encuentran por arriba de los parámetros objetivo lo que indica que al variar la potencia del amplificador EDFA se llega a aumentar la longitud del segmento de red en contraparte las variaciones efectuadas en el área efectiva no inciden sobre los parámetros de calidad óptica; ya que el factor Q, la BER y la potencia de recepción para un área efectiva de 8 μm^2 son idénticos que para un área efectiva de 34 μm^2 .

En tabla 4.34, se toma un área efectiva igual a la hallada en la sección 4.1.2.1, la cual al ser implementada en la DCF para el formato de modulación NRZ-OOK permite aumentar la longitud del segmento de red. Esto con el fin de obtener un punto de comparación entre los dos formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-DQPSK implementados en los diferentes escenarios de simulación. La potencia EDFA para los porcentajes de compensación es diferente debido a que con cada una de ellas se cumple con los parámetros objetivo caso contrario para potencias mayores.

Ptx dBm	Longitud SSMF-28 Km	% DCF	Área Efectiva DCF μm^2	Potencia EDFA dBm	Ganancia EDFA dB	Q-cuadratura		P-fase		Prx dBm
						Q dB	BER	Q dB	BER	
5	743	75	8	20	10	19.56	8.558e-21	19.08	1.045e-18	-189.84
	357	50		10		17.34	1.607e-13	17.03	1.608e-12	-79.370

Tabla 4.34 Distancia máxima alcanzada en el segmento de red, variando parámetros de área efectiva.

De la sección 4.2.2.1, se puede concluir que al variar el área efectiva de la DCF con formato de modulación RZ-DQPK no incide sobre la BER y el factor Q, por lo tanto esta propiedad de la DCF no permite que se aumente la longitud del segmento de red. En este análisis solo la potencia del amplificador incidió positivamente sobre la red óptica, permitiendo aumentar la longitud de la SMMF-28 hasta donde se cumplan los parámetros objetivos como se muestra en la tabla 4.34 (Anexo D, tabla 77).

4.2.2.2 Atenuación DCF

Este fenómeno está directamente relacionado con la longitud del segmento de red introduciendo mayores pérdidas a mayores distancias con lo que se compromete la longitud máxima alcanzable, en la cual se pueda cumplir con los parámetros objetivo. Para el siguiente análisis se busca determinar el impacto de la atenuación de la DCF y su incidencia sobre el segmento de red óptico, también se determinan los valores de atenuación que permitan aumentar la longitud de la SSMF-28 cumpliendo con los parámetros objetivo (Factor Q y BER); para esto se contará con una potencia de transmisión estable de 5 dBm para no excitar fenómenos no lineales, la separación entre canales será de 100 GHz, además se tendrá en cuenta que los parámetros de la fibra óptica SSMF-28 permanecerán constantes. El escenario utilizado para el análisis contará con los parámetros encontrados en la tabla 4.34; como área efectiva de la DC, longitud de la SSMF-28 para los porcentajes de compensación de 50 y 75% de la DCF y por último se contará con el amplificador EDFA en configuración Booster.

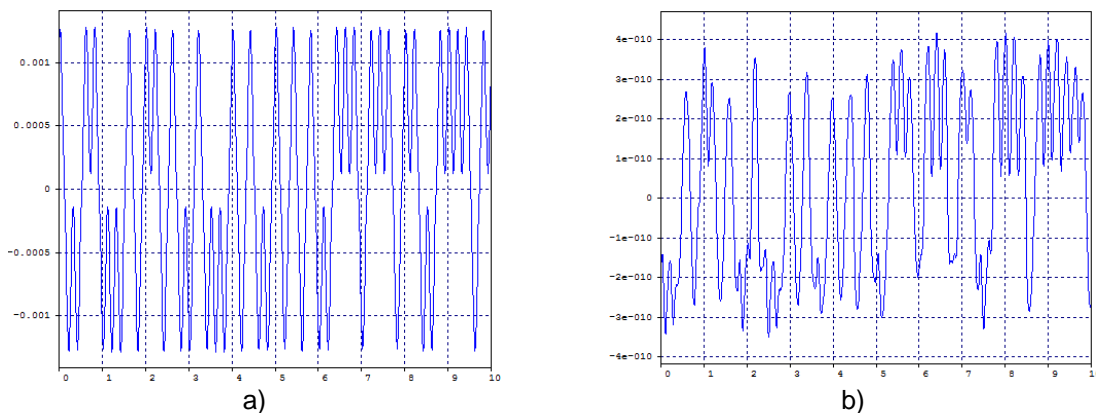
Los valores de atenuación implementados en la DCF se encuentran en un rango soportado por el segmento de red óptico, además son parámetros comerciales y no comerciales; como se muestran en la tabla 4.35.

Atenuación DCF ($\frac{dB}{Km}$)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.55	0.7	1	2	3.5
------------------------------------	-----	-----	-----	-----	------	-----	---	---	-----

Tabla 4.35 Parámetros de atenuación de la DCF.

A medida que se aumenta los valores de atenuación en la DCF siguiendo la tabla 4.35, las señales eléctricas se van deteriorando en el segmento de red, convirtiendo al pulso que llega a recepción en una señal no identificable en comparación a la señal eléctrica transmitida; esto se observa en la figura 4.53 a), 4.53 b) y 4.53 c), en donde se tiene el pulso transmitido sin perturbaciones Back to Back y dos pulsos en recepción degradados por parámetros de atenuación en la DCF de 0.1 y 3.5 dB/Km respectivamente.

Al variar la atenuación en la DCF siguiendo la tabla 4.35, se analiza si la variación de estos parámetros de la DCF afecta la señal eléctrica transmitida, esto se muestra en la figura 4.53.



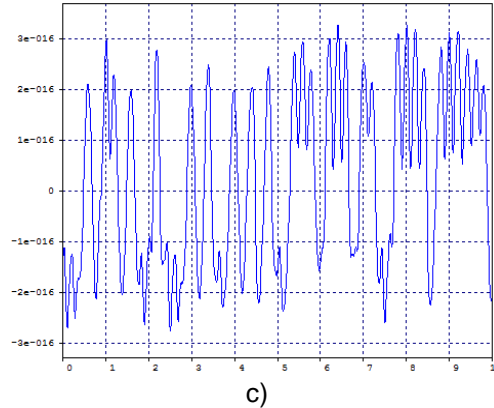


Figura 4.53 Señal eléctrica en Back to Back a), en recepción con atenuación en la DCF 0.1dB/Km b), en recepción con atenuación en la DCF de 2 dB/Km c)

En las grafica 4.53, se observa que la atenuación en la DCF no afecta en mayor medida la forma de la señal eléctrica, porque al comparar la señal eléctrica Back to Back con la señal eléctrica inducida con atenuación en la DCF de 0.1 y 2 dB/Km, la señal eléctrica mantiene la forma que el receptor reconoce con facilidad, al llegar a este punto, la atenuación no tienen alta incidencia en la señal eléctrica transmitida. También se puede observar el efecto de la atenuación en los diagrama de ojo con compensación del 50 y 75% en la DCF, figura 4.54.

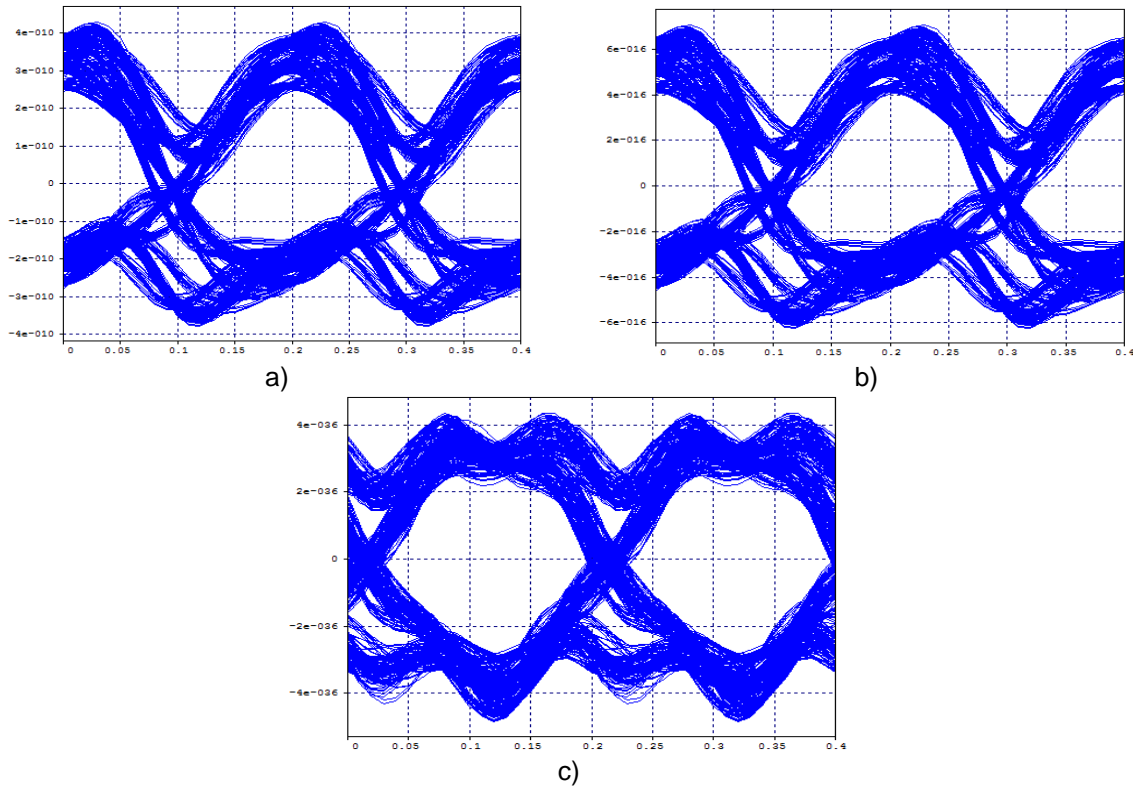


Figura 4.54 Diagramas de ojo con: a) atenuación en DCF de 0.1 dB/Km, b) atenuación 1.9 dB/Km y compensado al 50% en la DCF y c) atenuación de 1.9 dB/Km y compensado 75% en la DCF.

En la figura 5.54, se observa que la atenuación no aumenta en gran medida la CD del segmento de red para la modulación RZ-DQPSK, pero esto solamente es cierto para una

compensación del 50% en la DCF, debido a que para una compensación del 75% con una atenuación superior al 1.9 dB/Km se aumenta la dispersión cromática.

Debido a que la atenuación condiciona el segmento de red; se varían los parámetros de esta propiedad de la DCF según la tabla 4.35, con el fin de establecer un valor en el cual se aumente los parámetros de calidad ópticos como el factor Q, la BER y no se reduzca en mayor proporción la potencia de la señal que viaja por el segmento de red. Las variaciones de atenuación en la DCF efectuadas sobre el segmento de red se muestran en la figura 4.55 (Anexo D, tabla 78 y tabla 79).

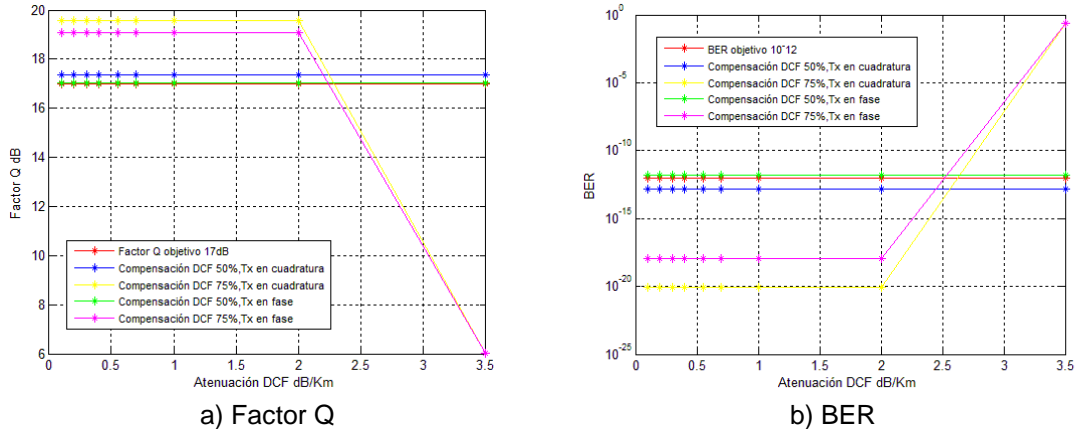


Figura 4.55 Parámetros de desempeño óptico establecidos al realizar variaciones en la atenuación de la DCF.

En la figura 4.55, se observa que el comportamiento del factor Q y la BER permanece constante al compensar al 50% de la DCF tanto para fase como cuadratura, mientras que para una compensación del 75% de DCF estos parámetros permanecen constantes hasta los 2 dB/Km, ya que para valores superiores de atenuación el segmento de red no logra alcanzar los parámetros objetivo. Además, con valores de atenuación superiores a 0.55 dB/Km al compensar al 75% de la DCF, la potencia de recepción es tan pequeña que el analizador de espectro óptico no muestra ningún resultado, mientras que para una compensación del 50% de la DCF las potencias de recepción son mostradas por el analizador de espectro óptico, esto es observable en la figura 4.56 (Anexo D, tabla 78).

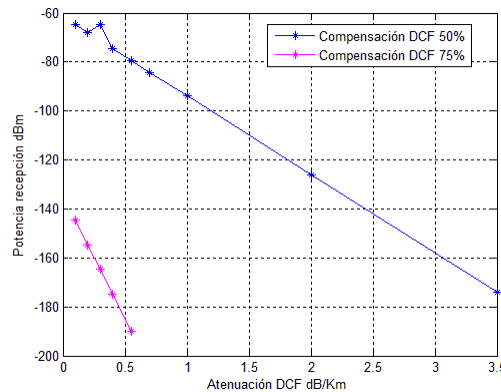


Figura 4.56 PRx variando la atenuación de la DCF.

De los resultados obtenidos en la figura 4.55 y 4.56, se busca establecer un rango de atenuación para los porcentajes de compensación (50 y 75%) en la DCF y mejorar la

potencia en recepción, para ello se varía la potencia EDFA entre (4, 14, 24, 34, 44 y 54 dBm) y la atenuación de la DCF siguiendo la tabla 4.35; los resultados al realizar este estudio se muestran en la tabla 4.36 (Anexo D, tabla 80 y tabla 81).

PTx dBm	Lon SSMF-28 Km	DCF %	Atenuación DCF dB/km	Potencia EDFA dBm	cuadratura		fase		PRx dBm
					Factor Q dB	BER	Factor Q dB	BER	
5	357	50	0.1 hasta	14	22.997	1e-40	22.668	6.396e-40	-65.794
	743	75	0.55		25.763	1e-40	24.247	1e-40	-149.344

Tabla 4.36 Parámetros de Q y BER obtenidos al variar la potencia EDFA y la atenuación en la DCF.

De la tabla 4.36, se concluye que para aumentar los parámetros de calidad del factor Q, BER y potencia de recepción, la atenuación en la DCF estará entre 0.1 y 0.55 dB/Km, con el fin de no introducir más pérdidas al enlace y debido a que con parámetros de atenuación en la DCF por arriba de los 75% en compensación no se detectaba la potencia de recepción. Además, se contará con una potencia en el amplificador de 14 dBm, con la cual se lograran los mejores parámetros de calidad óptica.

Debido a que se condicione en el segmento de red la DCF con valores de atenuación iguales o por debajo de 0.55 dB/km permitiendo reducir las pérdidas del enlace de transmisión y además se cuenta con una potencia fija en el amplificador de 14 dBm, se analiza; si al variar los porcentajes de compensación de la DCF se logra aumentar la longitud del segmento de red, como se muestra en la figura 4.57 (Anexo D tabla 82).

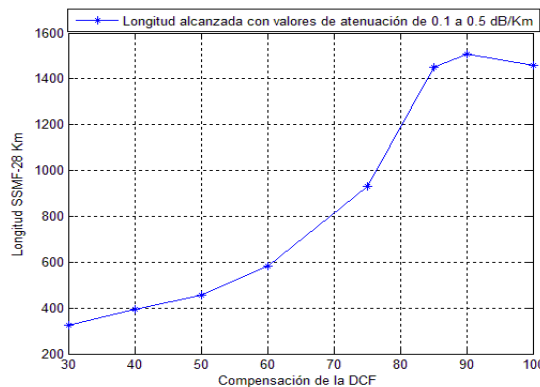


Figura 4.57 Longitudes máximas alcanzadas por la fibra óptica SSMF-28 en el segmento de red, variando la longitud de la DCF.

En la figura 4.57 se observa que las longitudes máximas alcanzadas para cada porcentaje de DCF son mucho mayores a las encontradas con el formato NRZ-OOK, pero para los dos formatos a una velocidad de 10 Gbps no es viable tener una compensación al 100% de la DCF, ya que el mayor alcance de la DCF se logra con una compensación del 90% de la DCF. En este caso se debe a que en una compensación del 100% en la DCF al aumentar la longitud de la SSMF-28 por arriba de la longitud que se muestra en la figura 4.57, en el simulador no se mostraba el diagrama de ojo, por lo tanto no se podía establecer el factor Q y la BER. Los parámetros de calidad óptica factor Q y BER alcanzados en los diferentes porcentajes de DCF al transmitir en fase y en cuadratura, se muestran a continuación, figura 4.58 (Anexo D, tabla 82).

Análisis Comparativo del Desempeño en la Migración de una Red DWDM de 10 a 40 Gbps, ante las Variaciones de las Propiedades de una Fibra Compensadora de Dispersión (DCF)

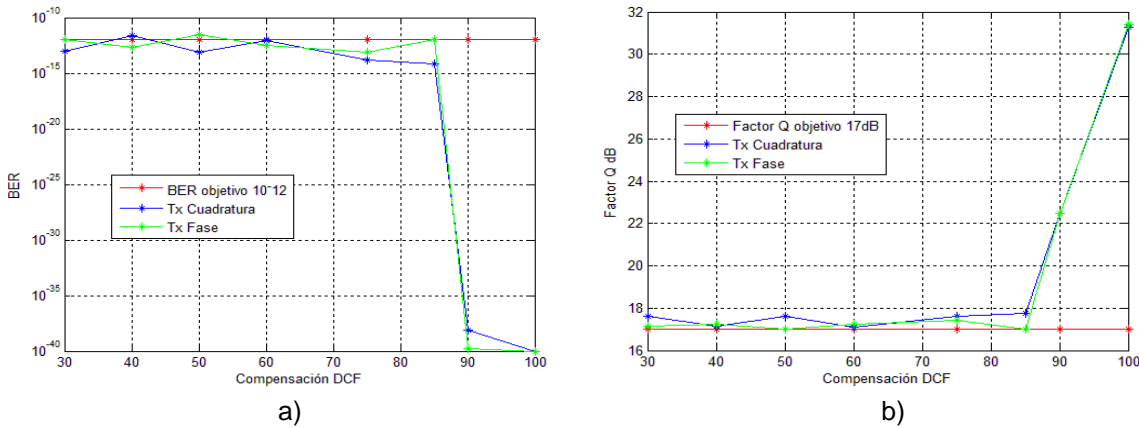


Figura 4.58 Parámetros de calidad óptica a para diferentes porcentajes de compensación, a) BER y b) Factor Q.

De la figura 4.58, se puede observar que en la transmisión en fase y cuadratura para los diferentes porcentajes de compensación se logra superar los parámetros objetivos. Por lo tanto, con un parámetro de atenuación pequeño permite aumentar la longitud del segmento de red.

Todo lo planteado hasta ahora indica que el mejor parámetro de atenuación en la DCF sería de 0.1 dB/Km, debido a que con este se introducen menos pérdidas al segmento de red y para porcentajes de compensación del 50, 75 y 90% se logra aumentar la longitud de la red en comparación a la tabla 4.34, en la cual se hallaron las máximas longitudes al variar el área efectiva de la DCF. Los mejores resultados de este análisis se muestran en la tabla 4.37.

Otra de las razones de la utilización de una atenuación de 0.1 dB/Km en la DCF, se debe a que valores mayores a este parámetro para cada porcentaje de compensación, excepto para un 90% de la DCF el simulador no detecta la potencia de recepción en cada una de las longitudes máximas encontradas cumpliendo con los parámetros objetivo.

PTx dBm	Lon SSMF -28 Km	DC F %	Lon DCF Km	Pote ncia EDFA dBm	Ate nuación DCF dB/k m	Cuadratura		Fase		PRx dBm
						Q dB	BER	Q dB	BER	
5	454	50	40.86	14	0.1	17.606	7.634e-14	17.027	2.769e-12	-99.975
	930	75	125.55			17.611	1.604e-14	17.449	7.556e-14	-183.398
	1508	90	244.296			22.501	7.187e-39	22.458	1.691e-40	no detectada

Tabla 4.37 Distancia máxima alcanzada en el segmento de red óptica, cumpliendo los parámetros objetivos; realizando análisis sobre la atenuación de la DCF.

En conclusión para el formato de modulación RZ-DQPSK a una velocidad de transmisión de 10 Gbps, valores de atenuación de la DCF que se encuentren entre 0.1 hasta 1.9 dB/Km no generan perturbaciones en la señal transmitida, ya que los parámetros OPM (Factor Q y BER) se encuentran por encima de los parámetros objetivo. Aumentar la

ganancia EDFA para contrarrestar la atenuación de la DCF no cambia los parámetros OPM como se aprecia en el anexo D tabla 81, mientras que aumentar la potencia EDFA aumenta los parámetros OPM con lo que se obtendría una mayor longitud en el segmento de red para cada porcentaje de compensación de la DCF.

4.2.2.1 Figura de mérito DCF (FOM)

La FOM (*Figure Of Merit*), se define como la eficiencia espectral de la fibra y permite medir que tan bien se aprovecha las bandas de frecuencia o los canales de transmisión de la red óptica. Para la DCF, Se busca el parámetro de la figura de mérito que mejore la relación costo eficiencia del segmento de red o aumente el factor Q y la BER por encima de los parámetros objetivo, esto permitiría aumentar la longitud del segmento de red.

El estudio de la figura de mérito, se realiza con la fórmula 2.3, 2.9 y con variaciones de la tabla 2.4, todos estos definidos en el capítulo 2. La fórmula 2.9 relaciona la dispersión y la atenuación que se encuentra en la DCF; entre más alta se la dispersión cromática negativa de la DCF, mayor será la figura de mérito. Los valores de área efectiva y atenuación de la DCF son tomados de la tabla 4.34 y 4.37; de esta última se toman las longitudes de la SSMF-28, porcentaje de compensación de la DCF y la potencia en el amplificador EDFA. La ecuación 2.3, implementada para los diferentes porcentajes de compensación como se muestra a continuación.

$$\begin{aligned}
 l_{DCF(100\%)} &= \left| \frac{D_{SSMF}}{D_{DCF}} \right| * l_{SSMF} && \rightarrow \text{Longitud DCF al compensar al 100\%} \\
 l_{DCF(90\%)} &= (l_{DCF(100\%)}) * 0.9 && \rightarrow \text{Longitud DCF al compensar al 90\%} \\
 l_{DCF(75\%)} &= (l_{DCF(100\%)}) * 0.75 && \rightarrow \text{Longitud DCF al compensar al 75\%} \\
 l_{DCF(50\%)} &= (l_{DCF(100\%)}) * 0.50 && \rightarrow \text{Longitud DCF al compensar al 50\%}
 \end{aligned}$$

Los valores de la FOM a utilizar en el presente análisis se encuentran en la tabla 4.38, en esta se observa que el valor de atenuación en la DCF es constante y es el mismo para cada porcentaje de compensación, mientras que el coeficiente de dispersión es variable y está definido en un rango que va desde los -17 ps/nm*Km hasta los -333 ps/nm*Km.

FOM (Figura de mérito)	$\frac{\text{Dispersión de la DCF}}{\text{Atenuación de la DCF}}$
Compensación DCF del 50%	$\frac{[-17 \text{ hasta } -333 \frac{\text{ps}}{\text{nm} * \text{Km}}]}{0.1 \frac{\text{dB}}{\text{Km}}}$
Compensación DCF del 75%	
Compensación DCF del 90%	

Tabla 4.38 Variación de la FOM, para las distintas compensaciones de la DCF.

Al aumentar el parámetro de dispersión siguiendo la tabla 4.38, se aumenta la FOM provocando la reducción en la longitud de la DCF para cada porcentaje de compensación en la DCF necesaria para contrarrestar la CD en cada longitud de la SSMF-28 (545, 930 y 1508 Km), esto se observa en la figura 4.59 (Anexo D, tabla 84, tabla 85 y tabla 86).

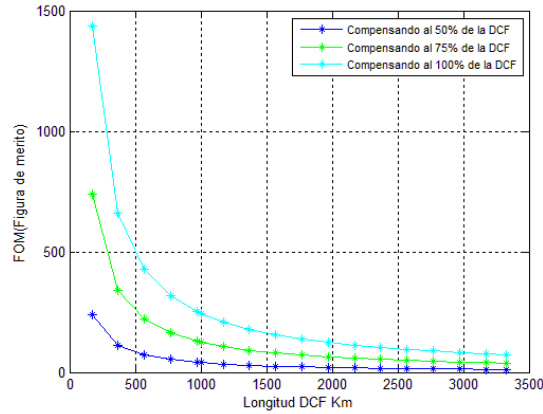


Figura 4.59 FOM Vs longitud de la DCF.

Como se observa en las figuras 4.59, al aumentar la FOM, se logra compensar con una menor longitud de DCF la CD provocada por la SSMF-28, este mismo resultado es igual para los tres porcentajes de compensación implementados. En la figura 4.60 se muestran los parámetros de BER y factor Q obtenidos al aumentar la FOM para las diferentes longitudes de DCF.

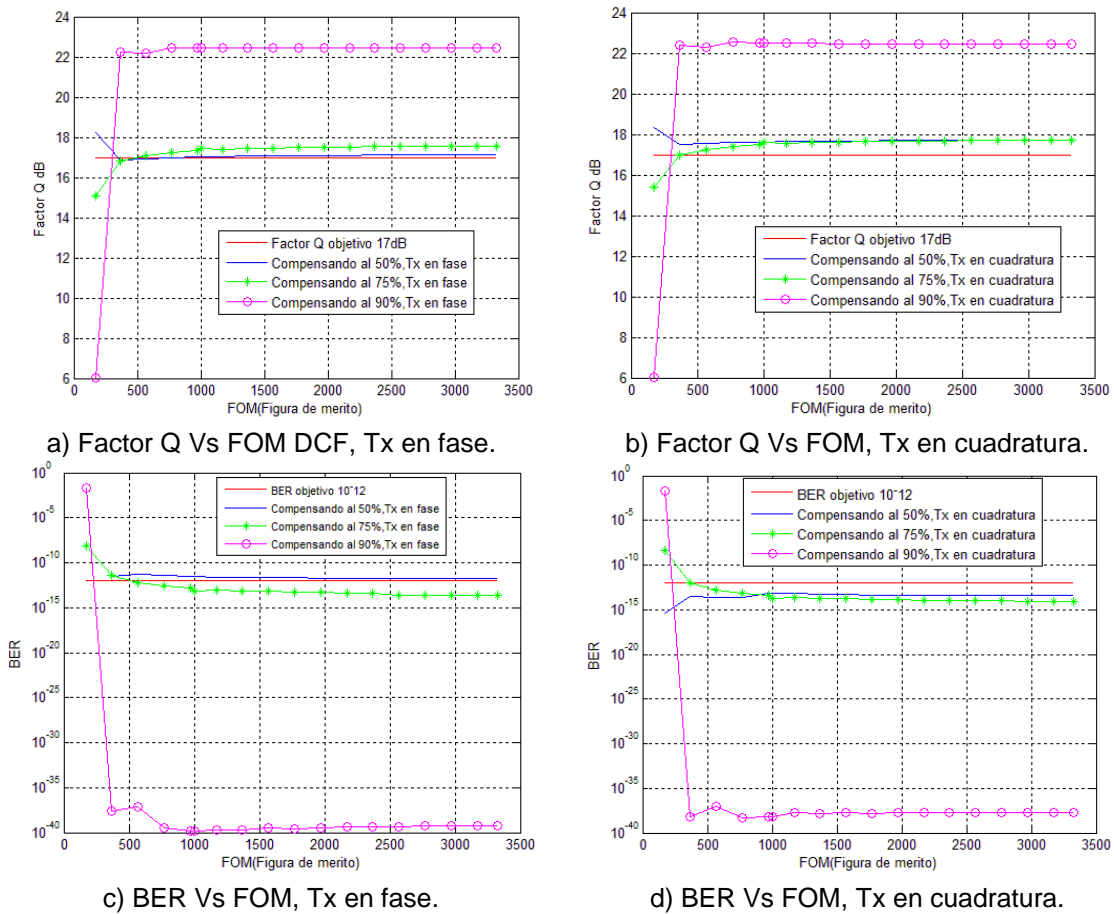


Figura 4.60 Parámetros objetivo al variar la FOM para cada porcentaje de compensación de la tabla 4.38.

De la figura 4.60, se observa que para los porcentajes de compensación de la tabla 4.38; al reducir la longitud de la DCF por el aumento de la FOM se logra alcanzar los parámetros objetivos en la mayoría de los casos. Por lo tanto entre más alta sea la FOM menor será la longitud DCF que se necesite en la línea de transmisión.

Debido a que no es posible la detección de la potencia en recepción para una compensación del 90% de la DCF al realizar el análisis de variaciones de la atenuación y FOM de la DCF; se considera que este porcentaje de compensación no es viable en la red óptica, ya que incide de manera directa sobre la eficiencia del segmento de red al provocar potencias en recepción tan pequeñas, las cuales se encuentran en el orden de los -200 dBm y por debajo lo que las hace indetectables para el diodo tipo pin y avalancha. Por consiguiente, en la figura 4.61 se visualiza la potencia de recepción Vs la FOM solo para los porcentajes de compensación de 50% y 75% de la DCF.

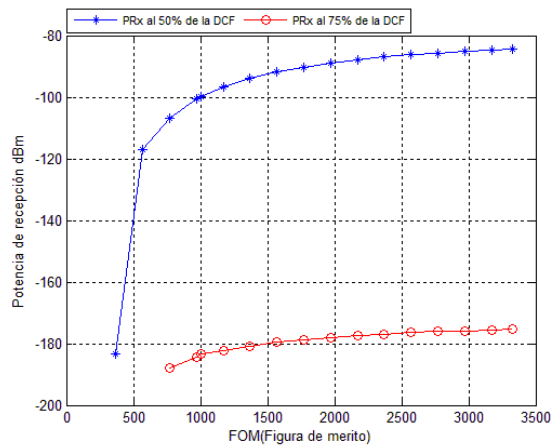


Figura 4.61 Potencia de recepción Vs FOM.

Del análisis llevado a cabo en esta sección, los parámetros de la FOM con los que se logra reducir al máximo la longitud de la fibra compensadora de dispersión cumpliendo con los parámetros objetivo para porcentajes de compensación de la DCF del 50 y 75 %, se muestran a continuación, tabla 4.39. Cabe recordar que el factor Q y la BER se muestran tanto en fase como en cuadratura.

Ptx dBm	Lon SSMF-28 Km	DCF %	Lon DCF Km	FOM	Atenuación DCF dB/km	Cuadratura		Fase		Prx dBm
						Q dB	BER	Q dB	BER	
5	454	50	12.27027	3330	0.1	17.726	3.706e-14	17.122	1.619e-12	-84.251
	930	75	37.7027			17.712	8.452e-15	17.573	2.089e-14	-175.337

Tabla 4.39 Distancia máxima alcanzada en el segmento de red óptica, cumpliendo los parámetros objetivos; realizando variaciones de la FOM en la DCF.

Al variar la FOM en el formato de modulación NRZ-OOK se logra transmitir a 10 Gbps con una separación entre canales de 50 Ghz, por el contrario en RZ-DQPSK no es posible la disminución del espaciado entre canales ya que los parámetros de medición de la red OPM se encuentran por debajo de los objetivos; este resultado es igual para los tres

porcentajes de compensación que se han estudiado hasta el momento; los resultados de esta conclusión se encuentran en el anexo D tabla 87, tabla 88 y tabla 89.

4.2.2.4 Máxima dispersión cromática acumulada

Al ser la dispersión cromática el efecto negativo que mayor degradación produce en las señales que viajan a través de redes ópticas y además es acumulativo; lo que genera mayores pérdidas de información en cada tramo del sistema. Por tal motivo, resulta fundamental conocer el valor máximo de dispersión cromática para que el sistema funcione correctamente en la modulación RZ-DQPSK transmitiendo a 10 Gbps.

Para el siguiente análisis se utilizara un porcentaje de compensación de 50% y 75 % de la DCF, no se toma 90% ya que para este porcentaje de compensación no se logró obtener la potencia de recepción del segmento de red en la sección 4.2.2.2 y 4.2.2.1; el escenario que se plantea contará con los parámetros alcanzados en la tabla 4.37, como longitud de la SSMF-28, longitud y atenuación de la DCF; Además, el área efectiva de la tabla 4.34.

Para establecer la dispersión cromática acumulada por cada segmento de red, con diferentes porcentajes de compensaciones de la DCF, se utiliza la fórmula 2.7 del segundo capítulo; con la cual se logra disminuir la CD acumulada en la red empleando como técnica de compensación una DCF, debido a que ésta con su alta dispersión negativa permite compensar la dispersión positiva de la SSMF. El coeficiente de dispersión de la DCF es de -100 ps/nm*Km; el cual es implementado por los diferentes operadores de fibra óptica.

$$\Delta t_{total} = D_{link}(\lambda) + D_{DCF} * l_{DCF} \quad (2.7)$$

Aplicando la ecuación 2.7, para una compensación del 50% en la DCF, de tendría una longitud en la fibra compensadora de dispersión ($l_{DCF} = 12,13\text{Km}$).y para el coeficiente de dispersión acumulado de la fibra SSMF-28 ($D_{link}(\lambda)$), se emplea la ecuación 2.2, la cual se encuentra en el segundo capítulo; esta ecuación asocia la máxima longitud alcanzada por la SSMF-28 ($L = 157 \text{ Km}$), la pendiente de dispersión para longitudes de onda que trabajan en los 1550 nm ($S_0 = 0.056 \text{ ps/} [\text{nm}]^2 * \text{Km}$), la CD de la fibra SSMF-28 Corning ($18 \text{ ps/nm} * \text{Km}$) y la longitud de onda del canal de transmisión que se asignó para evaluar ($1552.52 \text{ nm} = 193.1 \text{ THz}$):

$$D_{link}(\lambda) = 454\text{Km} \left[\frac{18\text{ps}}{\text{nm} * \text{Km}} + \frac{0,056\text{ps}}{\text{nm}^2 * \text{Km}} * (1552.52\text{nm} - 1550\text{nm}) \right] = 8236.06848 \frac{\text{Ps}}{\text{nm}}$$

De lo anterior, la dispersión máxima acumulada de la red para un porcentaje de compensación del 50% en la DCF sería igual a:

$$\Delta t_{total} = 8236.06848 \frac{\text{Ps}}{\text{nm}} + (-100 \frac{\text{Ps}}{\text{nm} * \text{Km}} * 40.86\text{Km}) = 4150.06848 \frac{\text{Ps}}{\text{nm}}$$

Los cálculos matemáticos efectuados para el porcentaje de compensación del 75% de la DCF se encuentran en el anexo B, ítem 3. De otro lado la dispersión cromática máxima acumulada por el segmento de red para los porcentajes de compensación del 50, 75% de la DCF se encuentran en la tabla 4.40.

Porcentaje de compensación DCF	50%	75%
Longitud SSMF-28,Km	454	930
Dispersión cromática acumulada en la fibra SSMF-28, $D_{link}(\lambda)$ [ps/nm]	8236.06848	16871.2416
Longitud DCF, Km	40.86	125.55
Máxima dispersión cromática acumulada Δt_{total} [ps/nm]	4150.06848	4316.2416

Tabla 4.40 Dispersión cromática del segmento de red, con diferentes porcentajes de DCF.

Partiendo de la fórmula 2.7 del segundo capítulo se busca establecer si para el formato de modulación RZ-DQPSK la dispersión cromática se hace cero o se logra contrarrestar, a diferencia del análisis de esta propiedad de la DCF llevada a cabo con modulación NRZ-OOK en la cual no se logró eliminar este fenómeno óptico degradante del segmento de red. Con el fin de realizar el estudio de la CD máxima acumulada se realizan dos análisis: En primer lugar se analizará con que longitudes de la DCF se logra eliminar la dispersión cromática acumulada del enlace, un segundo análisis, consiste en variar los coeficientes de dispersión de la DCF para contrarrestar la dispersión máxima acumulada; para los dos análisis se empleara la fórmula 2.7.

Para establecer las longitudes de DCF en las cuales se haga cero la dispersión cromática; se despeja la fórmula 2.7 igualándola a cero, el coeficiente de dispersión de la DCF seguirá siendo el utilizado por los diferentes operadores de fibra (-100 ps/nm*Km), además se toma los coeficientes de dispersión acumulada de la SSMF-28 de la tabla 4.40.

$$0 = D_{link}(\lambda) + D_{DCF} * l_{DCF}$$

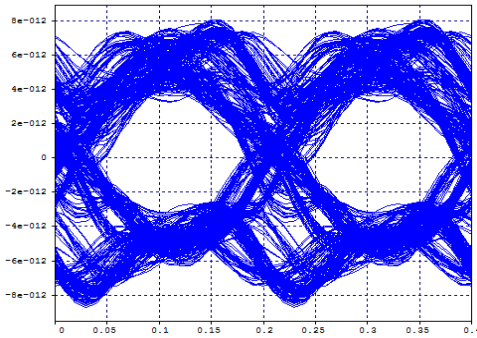
$$l_{DCF} = \frac{D_{link}(\lambda)}{D_{DCF}}$$

En la tabla 4.41, se muestran los resultados de las longitudes de la DCF en la cual la dispersión cromática se hace cero para longitudes de la SSMF-28 de 454 y 930 Km.

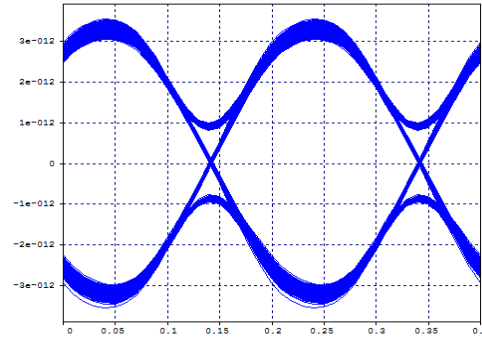
Porcentaje de compensación DCF	50%	75%
Longitud SSMF-28,Km	454	930
Longitud DCF, Km	82.3606848	168.712416
Aumento en la compensación de la DCF	100.784%	
Factor Q dB, Tx en cuadratura	30.964755	31.005576
BER, Tx en cuadratura	1e-40	1e-40
Factor Q dB, Tx en fase	31.146038	31.346325
BER, Tx en fase	1e-40	1e-40

Tabla 4.41 Longitud de la DCF con diferentes porcentajes de compensación en donde la dispersión cromática acumulada se hace cero matemáticamente.

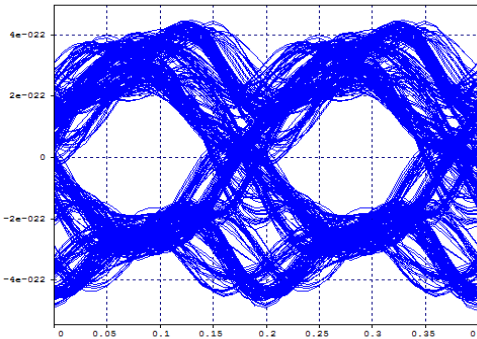
Al implementar las longitudes de la DCF de la tabla 4.41 se logra contrarrestar la CD pero no eliminarla completamente como se observa en las figura 4.48 (a, b, c y d); en la cual se muestra los diagramas de ojo para porcentajes de compensación del 50, 75% y 100.784% para una longitud de SSMF-28 de 450 y 930 Km respectivamente.



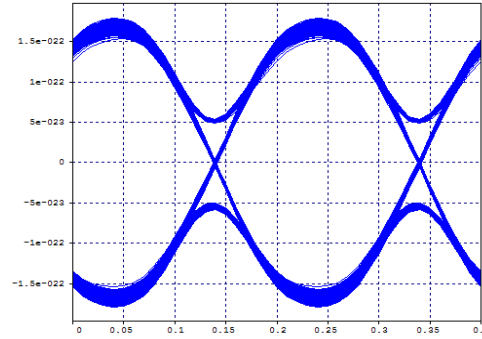
a) Diagrama de ojo para una compensación del 50% de la DCF.



b) Diagrama de ojo para longitud de SSMF-28 de 458 Km, compensado con DCF al 100.784%.



c) Diagrama de ojo para una compensación del 75% de la DCF.



b) Diagrama de ojo, compensado con DCF al 100.784%.

Figura 4.62 Comparación de diagrama de ojo para compensación en la DCF de: a) 50% Vs b) 100.784% para longitud de SSMF-28 de 458 Km, y c) 75% Vs d) 100.784% para longitud de SSMF-28 de 930 Km.

De la figura 4.62, se puede concluir que para el formato RZ-DQPSK no se logra reducir la dispersión cromática acumulada de la red aplicando las longitudes de la DCF de la tabla 4.41, ya que se busca aumentar la longitud de la SSMF-28 para 50 % y 75% de la DCF, pero al aumentar el porcentaje de compensación hasta 100.174%; se tiene una mayor longitud de fibra óptica compensadora de dispersión para 454 y 930 Km de la SSMF-28, contrario a los análisis realizados al variar la longitud de la DCF, para los cuales, se concluyó que tomar porcentajes iguales o superiores al 100% no era viable desde la relación costo eficiencia para el sistema DWDM y además para un porcentaje de compensación superior al 75% no se logra detectar la potencia en el receptor.

Para el segundo análisis se realizan variaciones del parámetro de la dispersión de la DCF, para reducir la dispersión cromática acumulada en el sistema. Los parámetros de dispersión de la DCF utilizados para este análisis se encuentran en la tabla 4.42.

Coefficiente de dispersión DCF, ps/nm*Km	-17	-57	-100	-137	-197	-257	-297	-333
---	------------	------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Tabla 4.42 Valores de dispersión de la DCF.

Al variar coeficientes de dispersión de la DCF siguiendo la tabla 4.42; el factor Q y la BER tanto para fase como en cuadratura para porcentajes de compensación del 50 y 75% en el segmento de red se logra alcanzar los parámetros objetivo, reduciendo la longitud de la DCF de forma idéntica a lo conseguido en la FOM; debido a que esta propiedad de la DCF está directamente relacionada a la dispersión negativa, por consiguiente, al variar la

dispersión negativa de la DCF se obtienen los mismos datos que al variar la FOM. El factor Q y la BER alcanzados en cuadratura y fase al realizar las variaciones del coeficiente de dispersión de la DCF, se muestran en las figura 4.63 (Anexo C, tabla 45, tabla 46 y tabla 47).

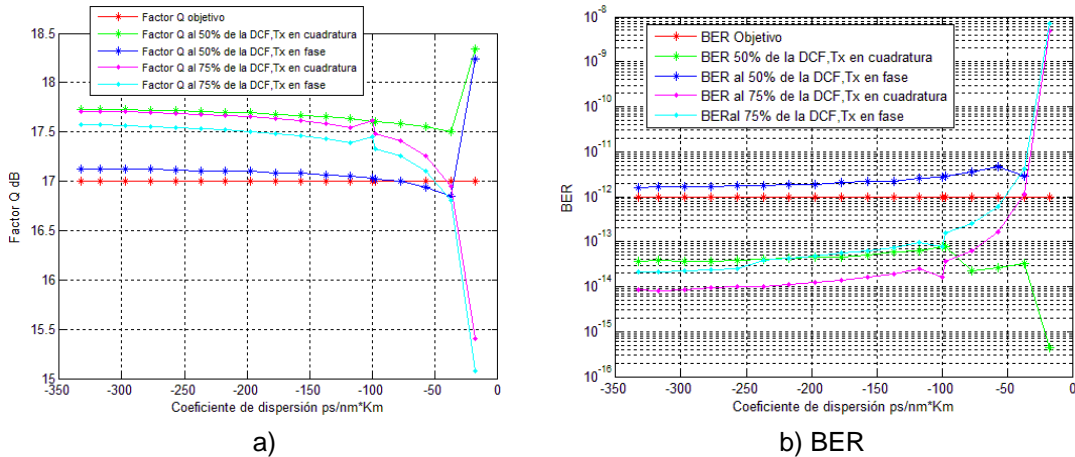


Figura 4.63 Parámetros de calidad óptica al variar el coeficiente de dispersión de la DCF compensando al 50 y 75%, a) Factor Q y b) BER.

En últimas, al variar el coeficiente de dispersión de la DCF para el formato de modulación RZ-DQPSK, se obtiene el mismo resultado del formato de modulación NRZ-OOK; en los cuales la dispersión cromática acumulada solo se puede reducir hasta cierto límite mas no eliminar completamente de la red óptica. El coeficiente de dispersión solo reduce la fibra óptica DCF del segmento de red cumpliendo los parámetros objetivo, por otro lado, no aumenta la longitud SSMF-28.

En la tabla 4.43, se visualizan los parámetros calidad óptica obtenidos al realizar variaciones del coeficiente de dispersión de la DCF en el segmento de red y los cuales cumplen con los parámetros objetivos; logrando reducir el costo y manteniendo eficiencia de la red óptica.

Pt x dBm	Lon SSMF-28 Km	D CF %	Lon DCF Km	Dispersión DCF ps/nm* Km	CD acumulada Δt_{total} [ps/nm]	Cuadratura		Fase		Prx dBm
						Q dB	BER	Q dB	BER	
5	454	50	12.27027	-333	4150.06848	17.725	3.706	17.122	1.619	-
						719	16e-14	267	03e-12	84.250715
5	930	75	37.7027	-333	4316.2416	17.711	8.451	17.573	2.089	-
						619	57e-15	116	79e-14	175.337188

Tabla 4.43 Dispersión cromática acumulada de la red, para diferentes porcentajes de compensación de la DCF.

4.2.3 Distancias máximas en el segmento de red al variar las propiedades de la DCF

En la tabla 4.44, se encuentra la máxima longitud que alcanza el segmento de red variando las propiedades de la DCF y cumpliendo con los parámetros objetivo, para una velocidad de transmisión de 10 Gbps con formato de modulación RZ-DQPSK.

Ptx dBm	% DCF	Lon SSM F-28 Km	Long DCF Km	Dispersión DCF ps/nm*Km	Máxima CD acumulada Δt_{total} [ps/nm]	FOM	Atenuación DCF dB/km	Área Efectiva DCF μm^2	Potencia EDFA dBm	Ganancia EDFA dB
5	50	454	12.27027	-333	4150.06848	3330	0.1	8	14	10
	75	930	37.7027		4316.2416					

Tabla 4.44 Distancias máximas en el segmento de red para cada porcentaje de compensación al variar las propiedades de la DCF

4.2.4 Distancia máxima alcanzada con enlaces concatenados

Se busca lograr la mayor longitud del sistema DWDM concatenando de forma secuencial varios segmentos ópticos, con los dispositivos de red utilizados anteriormente; para este caso se cuenta con porcentajes de compensación de la DCF al 50 y 75 %, con los cuales, se logra una distancia máxima para cada segmento de red de 454 y 930 Km, respectivamente. Para cada span se contara con una compensación del 75% de la DCF; por ser este porcentaje el que mayor longitud del segmento de red se logró. En las figura 4.64 se observan los diagramas de ojo para los diferentes span's.

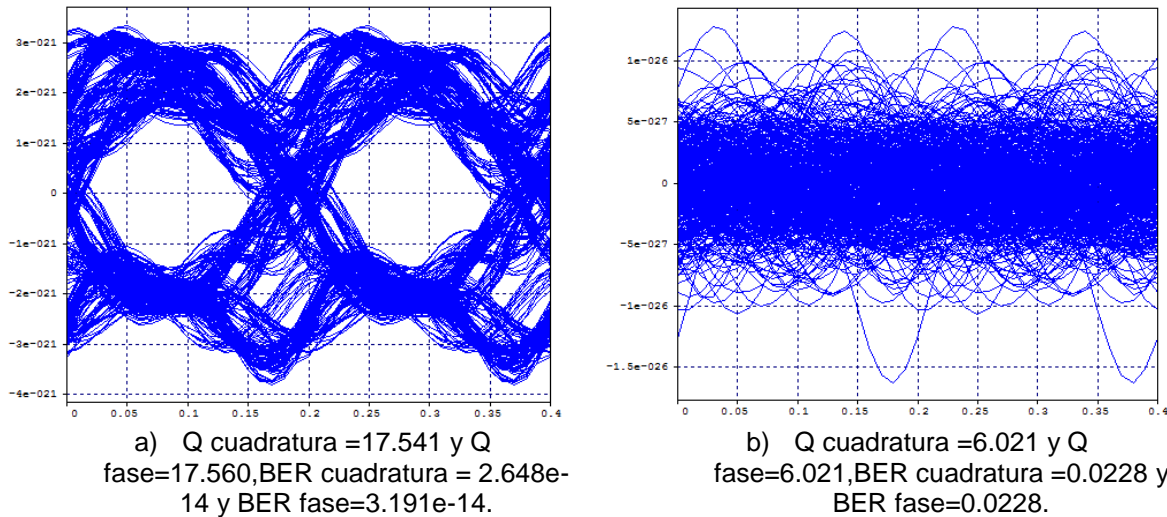


Figura 4.64 Diagrama de ojo para: a) un span de 930 Km y b) dos span's de 1860Km.

Concatenar dos segmentos de red con longitud de 930 Km para cada uno, no cumple con los parámetros objetivo; por esta razón, se reduce la longitud de segmento de red y se aumenta el número de span,s; como se observa en las figura 4.65.

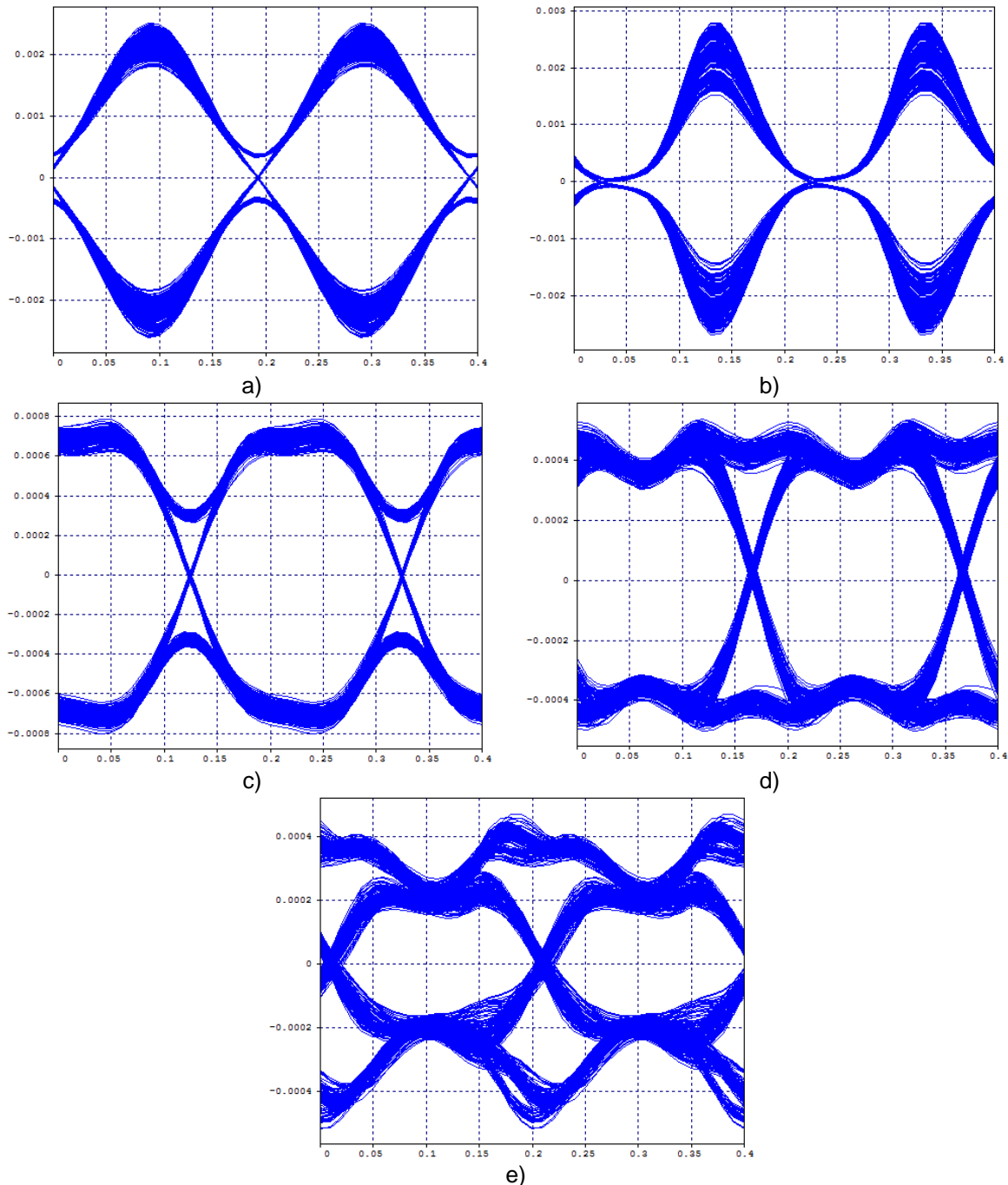


Figura 4.65 Diagrama de ojo para: a) un span b) cuatro span's c) ocho span's d) diez span's e) doce span's.

La máxima longitud alcanzada en el sistema DWDM es de 624 Km (Tabla 4.45); esto se logra con doce span's concatenados, pero comparando esta longitud con los 930 Km alcanzados en un segmento de red compensado al 75% de la DCF, se reduce la longitud total del sistema DWDM en 306 Km, con lo cual concatenar segmentos de red utilizando formato de modulación RZ-DQPSK y una velocidad de transmisión de 10 Gbps no aumenta la eficiencia de la red óptica, ya que este formato está planteado para lograr el máximo rendimiento de los parámetros OPM solo en un segmento de red.

Parámetros de desempeño óptico		2 span (104 km)	4 span (208 km)	6 span (312 km)	8 span (416 km)	10 span (520 km)	12 span (624 km)
Q-cuadratura	Factor Q	27.232	20.906	29.555	28.189	25.699	20.503
	BER	1e-40	3.321e-21	1e-40	1e-40	1e-40	1.027e-24
P-fase	Factor Q	25.734	19.024	29.116	28.097	25.861	19.605
	BER	1e-40	8.309e-12	1e-40	1e-40	1e-40	6.001e-22

Tabla 4.45 Parámetros de desempeño donde cada span es de 52 Km.

Después de realizar el análisis de la variación de las propiedades de la DCF en un sistema DWDM, para un formato de modulación RZ-DQPSK con velocidad de transmisión a 10 Gbps, se determina:

- Propiedades de la DCF, como el área efectiva y la atenuación en el segmento de red son contrarrestadas por el formato de modulación RZ-DQPSK, lo cual significa, que las variaciones efectuadas en estas no tienen incidencia en los parámetros OPM del segmento de red.
- Introducir DCF aumenta la longitud máxima que alcanza el segmento de red, el único problema es la reducción de la potencia en recepción por ello hay que introducir dispositivos amplificadores de potencia, aumentando el costo de la red.
- No es recomendable realizar concatenado de segmentos de red, debido a que el formato de modulación RZ-DQPSK está diseñado para lograr el máximo alcance en un segmento de red; en el estudio realizado el máximo alcance para un segmento de red es de 930 Km con variaciones en las propiedades de la DCF y dispositivo amplificador de potencia.
- El amplificador EDFA al ser un dispositivo estabilizador incide sobre el segmento de red, por lo tanto para observar los cambios en los parámetros OPM de la red al variar las propiedades de la DCF también se debe realizar variaciones de ganancia y potencia EDFA.

4.3 Caso 2: Configuración 2.1 Análisis del formato de modulación NRZ-OOK a 40 Gbps con DCF mejorada.

En el siguiente análisis se utiliza el mismo escenario de la configuración 4.1 (Figura 4.1); además en este caso de estudio el sistema DWDM cuenta con una velocidad de transmisión de 40 Gbps, con formato de modulación NRZ-OOK; el cual consta de una fuente láser de modulación externa, un driver NRZ coseno alzado para formar la onda y por ultimo un modulador MZ de seno cuadrado. En la sección del receptor solo se requiere un filtro eléctrico pasa banda, un filtro óptico centrado en la frecuencia de trabajo y un receptor con una sensibilidad aceptable de -30 dBm. Como se observa en la figura 4.66.

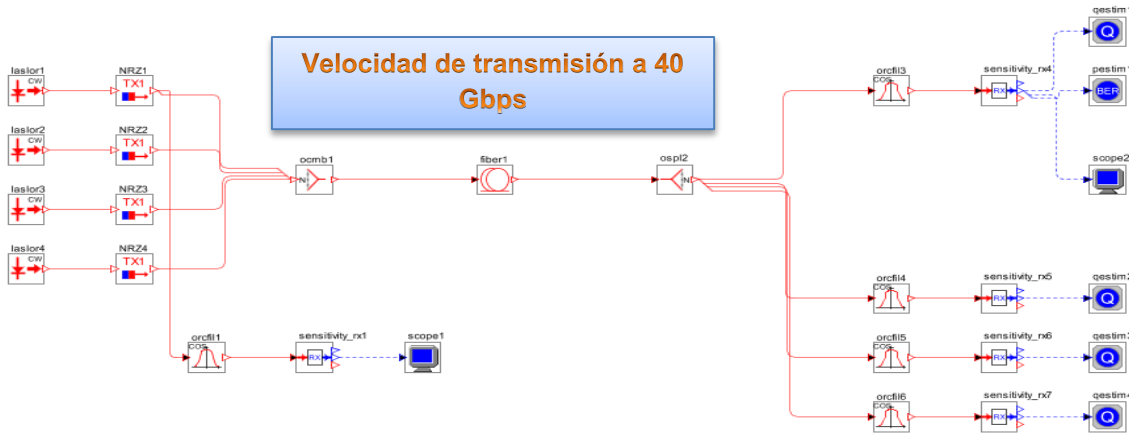


Figura 4.66 Modelo simplificado de la red para el formato de modulación NRZ-OOK, transmitiendo a 40 Gbps.

En las figuras 4.67, se observa el funcionamiento del formato NRZ-OOK, por medio del diagrama de ojo y el espectro óptico de la señal transmitida, utilizando un driver coseno alzado, con una frecuencia de trabajo de 193.1Thz, a una velocidad de transmisión de 40 Gbps realizadas con las medidas en el receptor Back to Back; el cual permite establecer la transmisión ideal que llega al receptor, es decir, sin perturbaciones influenciadas por degradaciones del medio de transmisión.

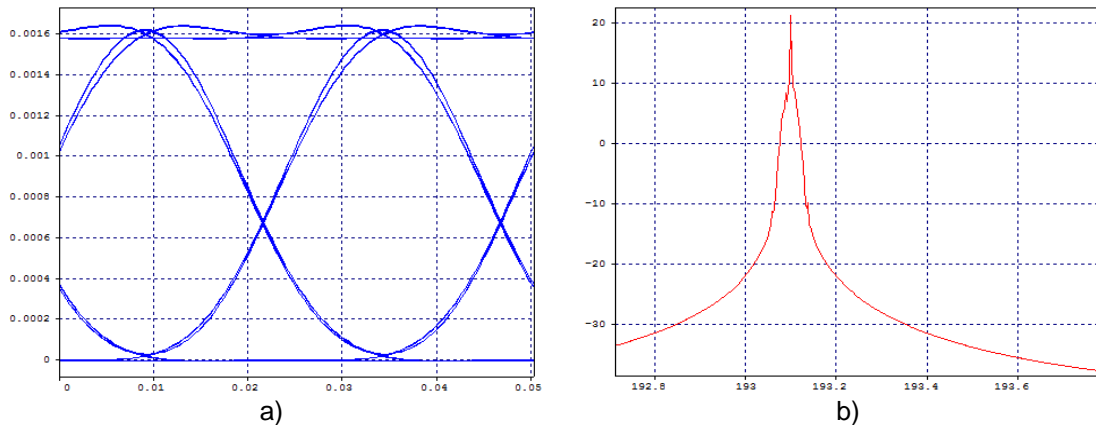


Figura 4.67 Diagrama del ojo a) y Espectro óptico en 193.1 Thz b) de la señal en el receptor Back to Back; para una velocidad de transmisión de 40 Gbps con formato de modulación NRZ-OOK

Antes de establecer el escenario con los mejores parámetros de DCF encontrados al analizar el formato NRZ-OOK en 10 Gbps (sección 4.1.2), se establece cual es el impacto de la dispersión cromática a una tasa de transmisión superior, para verificar si al introducir fibra compensadora de dispersión contrarresta la CD y si los parámetros de las propiedades en la DCF permiten la migración hacia una tasa de transmisión de 40 Gbps, teniendo en cuenta las longitudes del segmento de red halladas en la sección 4.1.1 y 4.1.2.

4.3.1 Máxima distancia alcanzable por la fibra SSMF-28

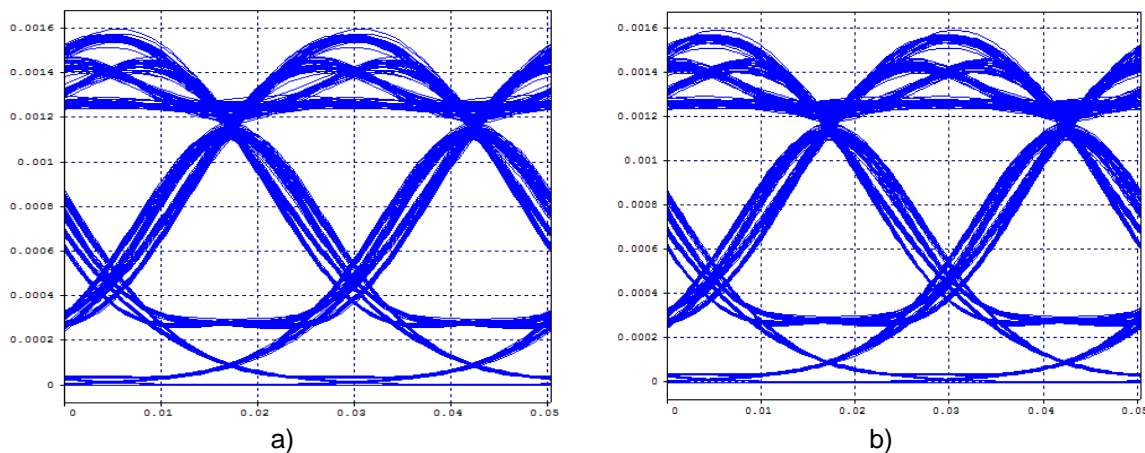
En esta sección, se desea establecer la máxima distancia que logra la SSMF-28 en un segmento de red a una velocidad de transmisión de 40 Gbps con formato de modulación NRZ-OOK; para ello se contara con: una potencia de 5dBm en el transmisor, con el fin de evitar excitar fenómenos no lineales; los cuales no son contrarrestados por la DCF como se comprobó en la sección 4.1.1.2. Además, se aumenta el ancho de banda de los filtros gaussianos utilizados en 10 Gbps, estos pasan de 30 a 60 GHz; debido a que en una velocidad de 40 Gbps el filtro de 30 Ghz no funciona correctamente por el incremento en el flujo de información.

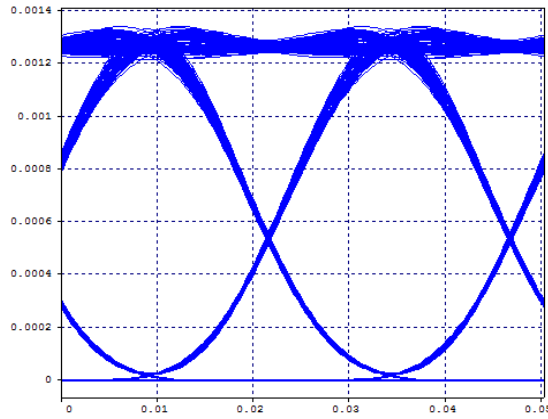
Con el fin de establecer la longitud máxima que logra alcanzar la SSMF-28 en el segmento de red, se analiza cuál de los fenómenos lineales tiene mayor incidencia negativa; para ello se simula el segmento de red en: el modelo "VBS Loss Only Fiber" que solo tiene en cuenta la atenuación de la fibra, el modelo "VBS Linear Fiber" considera únicamente los efectos lineales y el modelo "Full VBS" el cual considera todos los efectos degradantes de la señal que viaja por la red óptica, el resultado de los tres modelos de simulación se muestra a continuación, tabla 4.46 (Anexo D, tabla 79).

VBS	PTx dBm	Lon SSMF-28, Km	Factor Q dB	BER	PRx dBm
Full	5	5	17.218	2.03742e-13	-3.587256
Linear Fiber			17.182	2.25649e-13	-3.588810
Loss Only Fiber			33.631	1e-40	-3.669140

Tabla 4.46 Parámetros objetivo del segmento óptico solo con fibra SSMF-28.

Los resultados de la tabla 4.46, se dan porque el aumento de velocidad afecta en gran medida al formato de modulación NRZ-OOK, ya que al establecer el segmento de red con fibra SSMF-28 la distancia máxima que se alcanza es de solo 5 Km; siendo esta la longitud en la cual con los diferentes modelos de simulación se logra alcanzar los parámetros objetivo de BER a la 10^{-12} y un factor Q de 17 dB. Además, el fenómeno que más degrada o que mayor impacto tiene sobre la señal en el canal de trasmisión (fibra óptica) es la dispersión cromática comparada con los otros fenómenos lineales, como se observa en la figura 4.68.



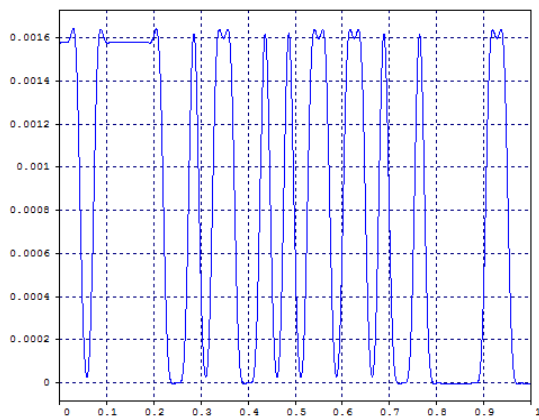


c)

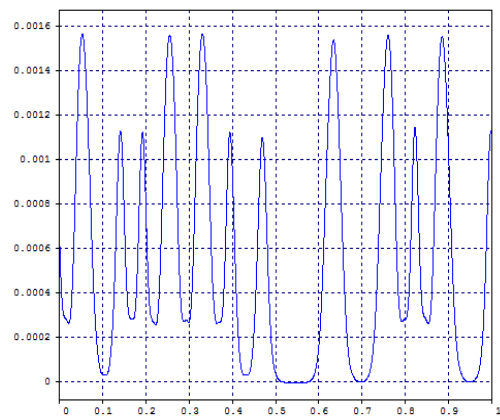
Figura 4.68 Diagrama del ojo con: a) Todas las degradaciones ópticas (VBS full), b) Afectado por la dispersión cromática (VBS line fiber), c) Afectado por la atenuación y ruido (Loss Only Fiber).

De la figura 4.68, al analizar los diagramas de ojo, la atenuación y el ruido son fenómenos cuyo impacto negativo sobre el segmento de red no afecta en gran medida los parámetros OPM (Factor Q y BER); un ejemplo de esto es la BER cuyo valor es de 10^{-40} cuando se simula solo estos fenómenos. Por lo tanto, el fenómeno a evaluar es el de la CD en la red óptica, ya que este es la principal barrera que impide o restringe el aumento en la longitud del segmento de red a una velocidad de transmisión de 40 Gbps con formato de modulación NRZ-OOK. Cabe recordar que a una tasa de transmisión de 40 Gbps la CD es dieciséis veces mayor comparada a la producida en la fibra óptica a una velocidad de transmisión de 10 Gbps.

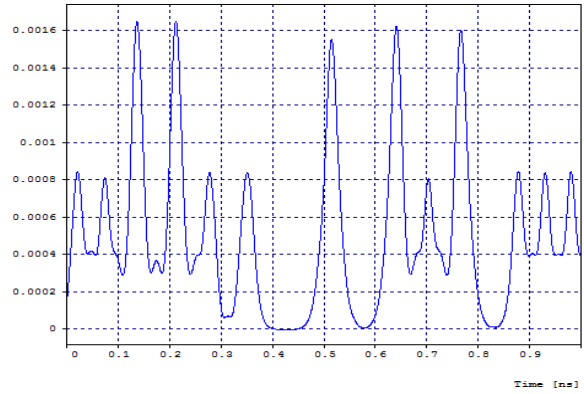
La incidencia negativa de la dispersión cromática sobre la señal transmitida, es apreciable de igual manera en la deformación de los pulsos recibidos en comparación de los pulsos transmitidos a través de la línea de transmisión, como se muestra en la figura 4.69.



a)



b)



c)

Figura 4.69 Señal eléctrica a) en el receptor Back to Back, b) con longitud SSMF-28 de 5Km y c) con longitud SSMF-28 de 7Km.

De la figura 4.69, se observa que al comparar la señal eléctrica obtenida en el Back to Back con las obtenidas a 5 y 7 Km de longitud; la dispersión cromática a medida que la fibra óptica estándar SSMF-28 se aumenta en longitud los pulsos eléctricos se degradan al concatenarse unos con otros y no son reconocidos en recepción. De modo que para aumentar la longitud en el segmento de red cumpliendo con los parámetros objetivo se debe introducir fibra compensadora de dispersión.

4.3.2 Máxima distancia alcanzable en el segmento de red, al introducir DCF con parámetros estándar

En el siguiente análisis se establece si la fibra óptica compensadora de dispersión mejora la longitud máxima alcanzada en el segmento de red de 5 Km con una velocidad de transmisión de 40 Gbps. Para esto se contará con los valores estándar en las propiedades de la DCF, definidos en la tabla 4.47.

Coeficiente de dispersión	Área efectiva	Coeficiente de atenuación
$-100 \frac{Ps}{nm \cdot Km}$	$20 \mu m^2$	$0.55 \frac{dB}{Km}$

Tabla 4.47 Parámetros estándar de la DCF.

Debido a que en 40 Gbps se tiene una CD dieciséis veces mayor al transmitir a 10 Gbps, se tendría una dispersión cromática acumulada en la SSMF-28 a partir de la fórmula 2.2 del segundo capítulo igual a:

$$D_{link}(\lambda) = 16 \left\{ 5Km \left[18 \frac{Ps}{nm \cdot Km} + 0.056 \frac{Ps}{nm^2 \cdot Km} (1552.52nm - 1550nm) \right] \right\} = 1451.2896 \frac{Ps}{nm}$$

Debido al aumento en el coeficiente de dispersión cromática del enlace se utilizan porcentajes de compensación del 50 al 100% de la DCF, con el fin de contrarrestar la CD. Estos porcentajes de compensación de la DCF se calculan utilizando la fórmula 2.3 (definida en el segundo capítulo); esta ecuación es igual a:

$$100\% \text{ de compensación del en la DCF} \rightarrow l_{DCF(100\%)} = \left| \frac{18 \frac{Ps}{nm \cdot Km}}{-100 \frac{Ps}{nm \cdot Km}} \right| * 5Km = 0.9Km$$

$$90\% \text{ de compensación del en la DCF} \rightarrow l_{DCF(90\%)} = (0.9Km) * 0.9 = 0.81Km$$

$$75\% \text{ de compensación del en la DCF} \rightarrow l_{DCF(75\%)} = (0.9Km) * 0.75 = 0.675Km$$

$$50\% \text{ de compensación del en la DCF} \rightarrow l_{DCF(50\%)} = (0.9Km) * 0.5 = 0.45Km$$

Cabe recordar que las longitudes de DCF anteriormente halladas son para una longitud de la SSMF de 5 Km.

En la figura 4.70, se muestran las longitudes máximas que alcanza el segmento de red cumpliendo con los parámetros objetivo, para los diferentes porcentajes de compensación de la DCF.

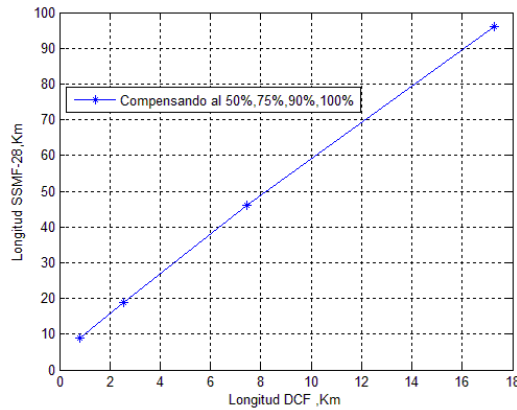


Figura 4.70 Longitud máxima alcanzada en el segmento de red con diferentes porcentajes de compensación.

De la figura 4.70, la longitud de la fibra monomodo estándar SSMF-28 aumenta proporcionalmente a medida que aumenta longitud de la DCF, en comparación al análisis hecho en 10 Gbps, el cual era más eficiente para el segmento de red al compensar o introducir longitudes de DCF por debajo del 100%; porque con longitudes menores se obtuvo mejores o iguales resultados en los parámetros de calidad óptica como el factor Q y la BER. Además, los parámetros de calidad óptica obtenidos al hallar la máxima longitud de la fibra óptica SSMF-28 para porcentajes de compensación en la fibra DCF del 50, 75, 90 y 100%, se muestra en la en la tabla 4.48 (Anexo D, tabla 80).

Potencia Tx dBm	% DCF	Longitud DCF Km	Longitud SSMF-28 Km	Factor Q dB	BER	Potencia Rx dBm
5	50	0.81	9	18.968	1.954e-18	-4.800
	75	2.565	19	17.699	1.989e-14	-7.780
	90	7.452	46	17.333	1.272e-13	-15.918
	100	17.28	96	17.649	4.882e-14	-31.358

Tabla 4.48 Longitudes máximas de la SSMF-28 para porcentajes de compensación de la DCF de 50, 75, 90 y 100%.

De esta sección puede concluirse que para una velocidad de 40 Gbps en el segmento de red, la mejor forma de compensar la dispersión cromática es con grandes longitudes de fibra DCF, lo que permite el aumento en la longitud del segmento de red; en particular compensando al 100% de la DCF.

4.3.3 Implementación del escenario DWDM a 40Gbps con los parámetros alcanzados en 10Gbps variando las propiedades de la DCF

En el siguiente análisis se busca comprobar si para diferentes porcentajes de compensación en la DCF, con los valores alcanzados al variar las propiedades de la fibra compensadora de dispersión a una velocidad de 10 Gbps, estos al ser implementados en un escenario con una velocidad superior de 40 Gbps, el segmento de red sigue siendo funcional al alcanzar los parámetros objetivos y si la longitud alcanzada aumenta con respecto a la lograda en la sección 4.1.1 y la sección 4.1.3. Las longitudes que se quieren alcanzar en 40 Gbps se muestran a continuación, tabla 4.49.

Longitud MAX	PTx dBm	% DCF	Longitud SSMF-28 Km
Con parámetros estándar de la DCF	5	50	150
Con variación en los parámetros de la DCF		90	186

Tabla 4.49 Longitudes máximas alcanzadas en el segmento de red para la configuración 1.1.

En esta sección se tiene un sistema DWDM con formato de modulación NRZ-OOK a una velocidad de 40 Gbps en transmisión, al cual se introduce en la línea de transmisión la fibra óptica SSMF-28-28, se configura la fibra DCF en post-compensación y amplificador EDFA en modo Inline, como se observa en la figura 4.71.

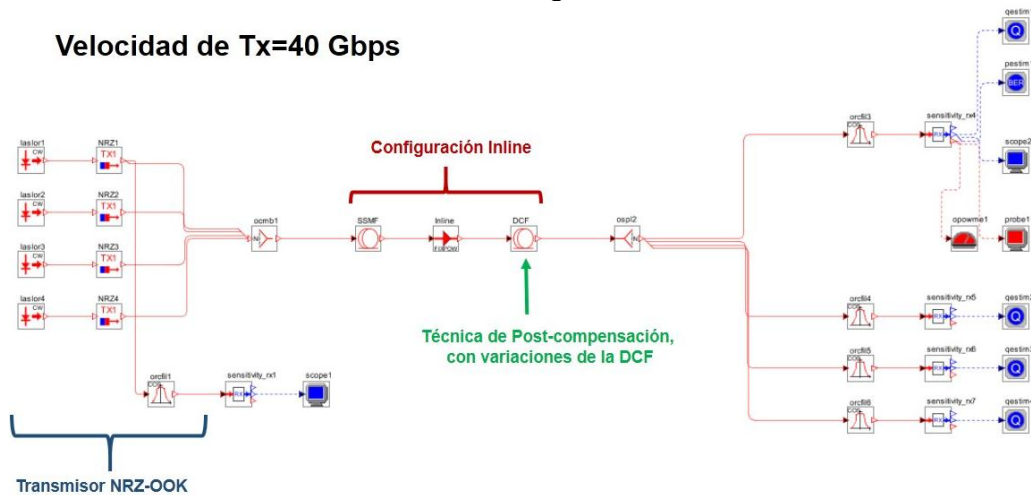


Figura 4.71 Segmento de red para el formato de modulación NRZ-OOK, transmitiendo a 40 Gbps.

Para la implementación del segmento de red a 40 Gbps se toman los parámetros alcanzados en 10 Gbps variando las propiedades de la DCF, estos se encuentran a continuación, tabla 4.50.

Ptx dBm	% DCF	Dispersión DCF ps/nm*Km	FOM	Atenuación DCF dB/km	Área Efectiva DCF μm^2	Potencia EDFA dBm	Ganancia EDFA dB
5	50	-297	990	0.3	8	4	30
	75	-217	1085	0.2			
	90	-333	3330	0.1			

Tabla 4.50 Valores de los parámetros de las propiedades de la DCF.

Al establecer los parámetros de la tabla 4.50 en la DCF introducida en el segmento de red de la figura 4.71, las longitudes alcanzadas cumpliendo los parámetros objetivos son mínimas; esto se debe que al compensar la DCF con valores inferiores al 100%, para una velocidad de 40 Gbps en cada canal de trasmisión, no se logra contrarrestar la dispersión cromática de la fibra SSMF-28. Porque la CD para un tramo de 9 Km de fibra óptica SSMF-28 a una velocidad de 10 Gbps es de 188.47 ps/nm según la fórmula 2.2 del segundo capítulo; mientras que para una velocidad de 40 Gbps se tendría 3015.52 ps/nm. En consecuencia, al contrarrestar tan alta dispersión cromática en la red con un porcentaje del 50, 75 y 90% de la DC; no es posible alcanzar las longitudes de la tabla 4.49. Este análisis se corrobora en las figura 4.72 (Anexo D, tabla 81).

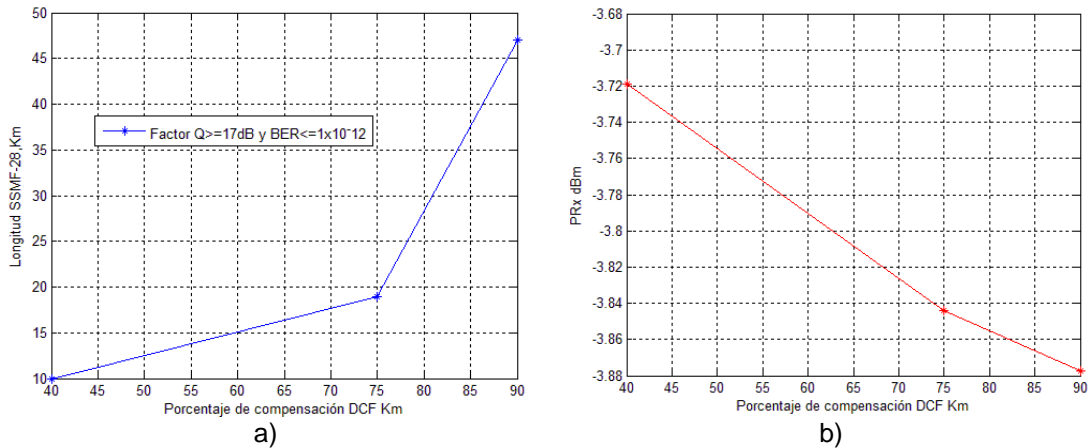


Figura 4.72 a) Longitud máxima alcanzada con parámetros en la DCF de la tabla 4.50 y b) Potencia de recepción alcanzada con parámetros en la DCF de la tabla 4.50.

De la figura 4.72, el único valor que permanece alto es la potencia de recepción alcanzada para los diferentes porcentajes de compensación. De manera que, para lograr migrar la red a una velocidad de 40 Gbps y aumentar la longitud de la fibra monomodo estándar cumpliendo los parámetros objetivos, es indispensable compensar el segmento de red al 100% de la DCF y con los parámetros de las propiedades de la DCF alcanzados en 10 Gbps, como se muestra a continuación, tabla 4.51.

Ptx dBm	% DCF	Lon SSMF-28 Km	Dispersión DCF ps/nm*Km	FOM	Atenuación DCF dB/km	Área Efectiva DCF μm^2	Potencia EDFA dBm	Ganancia EDFA dB
5	100	150	-297	990	0.3	8	4	30
			-217	1085	0.2			
			-333	3330	0.1			

Tabla 4.51 Parámetros de las propiedades de la DCF alcanzados en 10 Gbps, para una compensación del 100%.

Al realizar las variaciones de la atenuación para cada coeficiente de dispersión siguiendo la tabla 4.51 para una compensación del 100% en la DCF e introduciendo la longitud que se desea alcázar en el segmento de red de 150 Km, los resultados se muestran en la figura 4.73 y 4.74 (Anexo D, tabla 82). Además se introduce un valor de atenuación estándar de 0.55 dB/Km en la DCF con el fin de estudiar su comportamiento frente a los definidos en la tabla 4.51.

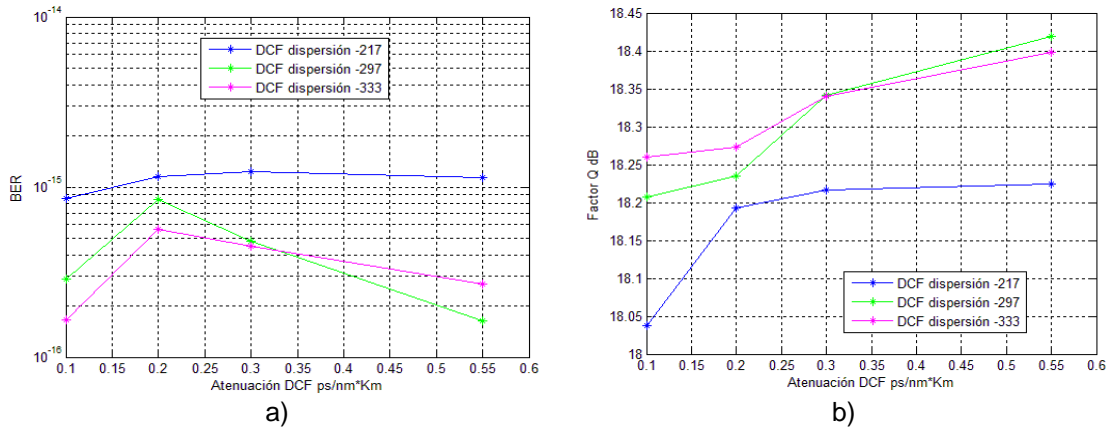


Figura 4.73 Parámetros de calidad óptica al variar el coeficiente de dispersión y la atenuación de la DCF para una longitud de la SSMF-28 de 150Km, a) BER y b) Factor Q.

De la figura 4.73, se observan que los parámetros de calidad óptica, como el factor Q es superior a 18 dB y la BER se encuentran por debajo de 10^{-15} ; al realizar variaciones de la atenuación para los diferentes coeficientes de dispersión de la DCF. Pero la BER y el factor Q son proporcionales a los aumentos de la atenuación en la DCF, esto en teoría debería ser un resultado totalmente contrario, ya que a mayor atenuación mayor son las pérdidas por kilómetro introducidas a la red óptica; inclusive el mayor valor de factor Q y BER se obtiene con una atenuación de 0.55 dB/Km para cada valor de dispersión negativo.

Mientras que los valores de potencia de recepción más altos se dan en el segmento de red cuando se tiene una menor longitud de DCF, obtenida con un valor de dispersión de -297 ps/nm*Km y -333 ps/nm*Km, para una atenuación del 0.1 dB/Km en la DCF, como se observa en la figura 4.74 (Anexo D, tabla 82).

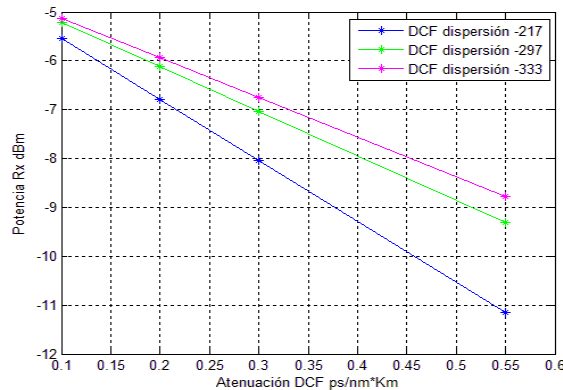


Figura 4.74 Potencia de recepción variando la atenuación y el porcentaje de dispersión de la DCF.

En consecuencia de la figura 4.73 y 4.74, para el formato de modulación NRZ-OOK el incremento en la atenuación de la DCF a una velocidad de 40 Gbps disminuye la potencia en el enlace de transmisión, pero incrementa los valores de factor Q y BER, siendo el límite de atenuación de la DCF el parámetro estándar de 0.55 dB/Km.

En la figura 4.75, con los diferentes coeficientes de dispersión de la tabla 4.51, se logra reducir la longitud de la DCF para una compensación del 100% teniendo la misma eficiencia en los parámetros objetivo, por lo tanto se reducen los costos en la red.

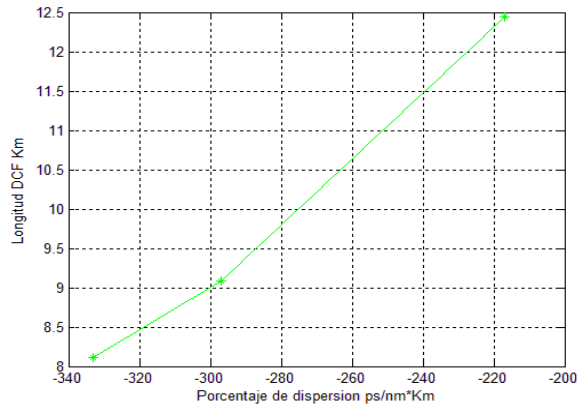


Figura 4.75 Longitud DCF compensada al 100% con diferentes parámetros de dispersión.

De modo que al compensar al 100% de la DCF con los parámetros de la tabla 4.51, para una velocidad de transmisión de 40 Gbps y con formato de modulación RZ-DQPSK se logra alcanzar la longitud de 150 Km, mientras que para porcentajes menores no se logra alcanzar ni la tercera parte de esta longitud como se observa en la figura 4.76. debido a que para incrementar hasta 10 km a una velocidad de 40 Gbps el factor Q debe estar por encima de 20 dB, debido a la alta dispersión generada al aumentar la velocidad de transmisión del sistema DWDM.

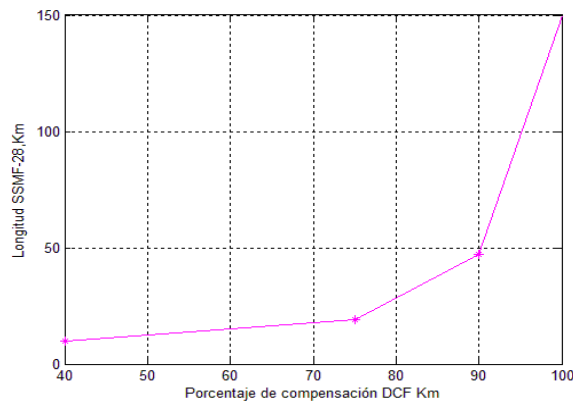


Figura 4.76 Distancia máxima del segmento de red con 100% de la DCF.

Del análisis de esta sección, los resultados más altos en los parámetros de medición de la calidad óptica BER y factor Q, obtenidos a partir de los parámetros de las propiedades de la DCF se muestran en la tabla 4.52.

Ptx dBm	% DCF	Lon SSMF-28 Km	Dispersión DCF ps/nm²Km	FOM	Atenuación DCF dB/km	Área Efectiva DCF μm²	Potencia EDFA dBm	Ganancia EDFA dB	Factor Q dB	BER
5	100	150	-333	1110	0.3	8	4	30	18.339	4.506e-16

Tabla 4.52 Parámetros en las propiedades de la DCF, para una longitud de segmento de red de 150 Km compensando al 100% la CD

En conclusión, para un operador de fibra óptica que esté utilizando en un segmento de red velocidad de transmisión de 10 Gbps con los parámetros de fibra óptica compensadora de dispersión estándar como los obtenidos en la tabla 4.6, sección 4.1.1, es viable realizar

una migración a una velocidad de 40 Gbps ante las variaciones de las propiedades de la DCF; este resultado se da al comparar los parámetros de los datos arrojados en un segmento estándar y un segmento al cual se le introdujeron valores con variaciones en la DCF, como se observa en la tabla 4.53.

En la tabla 4.53, se califica como alta la eficiencia del segmento de red si se encuentra el factor Q y BER por arriba de los parámetros objetivo, y muy alta si la velocidad de trasmisión del segmento de red se cuadruplica permitiendo el mayor envío de información teniendo la misma longitud de red y por arriba de los parámetros objetivo.

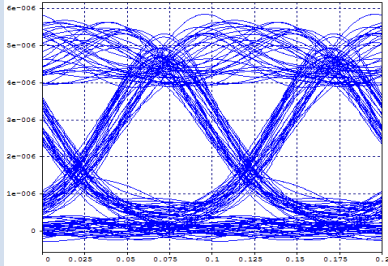
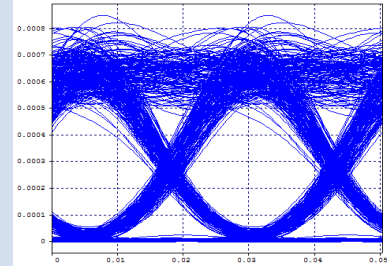
	Velocidad de trasmisión a 10 Gbps, segmento de red con parámetros estándar	Velocidad de trasmisión a 40Gbps ,segmento de red con mejoras en la DCF
Potencia de trasmisión	5dBm	
Longitud segmento de red, fibra óptica SSMF-28	150 Km	
Potencia EDFA	4 dBm	
Ganancia EDFA	30 dB	
Diagrama de ojo		
Longitud DCF	13.5 Km	8.10811 Km
Factor Q	18.135 dB	18.339 dB
BER	2.016e-15	4.506e-16
Potencia de recepción	-10.286 dBm	-6.745 dBm
Eficiencia del segmento de red	Alta	Muy Alta

Tabla 4.53 Comparación entre los parámetros de red de un operador con DCF estándar Vs un operador con variaciones en los parámetros de la propiedades en la DCF del segmento de red.

Cabe concluir que migrar una red de 10 a 40 Gbps es posible manteniendo los parámetros estándar DCF en el segmento de red a una velocidad de 10 Gbps; mientras que a 40 Gbps, la red debe tener una compensación del 100% y una fibra compensadora dispersión mejorada para que las dos logren los mismos parámetros objetivos.

Por lo tanto, para el siguiente análisis se desea establecer si a una velocidad de 40 Gbps se puede alcanzar la máxima longitud del segmento de red, como el alcanzado a 10 Gbps en el que se obtuvo un resultado de 186 Km. Para esto, habría que utilizar parámetros DCF no establecidos en el capítulo 3, los cuales se encuentren en un rango más amplio para determinar si es posible alcanzar una longitud del segmento de red a una velocidad de 40 Gbps con una DCF mejorada.

4.3.4 Longitud máxima alcanzada en el segmento de red al aumentar drásticamente los parámetros en las propiedades de la DCF

En el siguiente análisis no se realizaran variaciones a la atenuación de la DCF, ya que para valores pequeños de esta propiedad no aumentan el factor Q ni la BER; en efecto, no es posible aumentar la longitud del segmento de red. De esta manera, reducir la atenuación de la DCF a una velocidad de 40 Gbps no disminuye el impacto en el sistema DWDM generado por la dispersión cromática. Por lo tanto se toma el valor estándar de 0.55 dB en la DCF; con el cual se logró alcanzar los mejores resultados en el factor Q y la BER en la sección 4.3.3.

Antes de realizar los análisis faltantes a las propiedades de la DCF, es necesario aumentar la longitud del segmento de red hasta donde se cumplan los parámetros objetivo, esto se muestra en la tabla 4.54, en la cual se establecen los parámetros del escenario inicial.

Ptx dBm	% DCF	Lon DCF Km	Dispersión DCF pS/nm*Km	Área Efectiva μm^2	Atenuación DCF dB/Km	LonSSMF-28 Km	Factor Q dB	BER	PRx dBm
5	100	8.32432	-333	8	0.55	154	17.199	7.60e-13	-9.012

Tabla 4.54 Parámetros del escenario inicial.

Luego de obtener los parámetros del escenario base tabla 4.54, se varían los parámetros de área efectiva, FOM y se aumenta los porcentajes de compensación por arriba del 100% de la DCF, con el fin de analizar si al variar estas propiedades se aumenta la longitud de 154 Km establecida en el segmento de red.

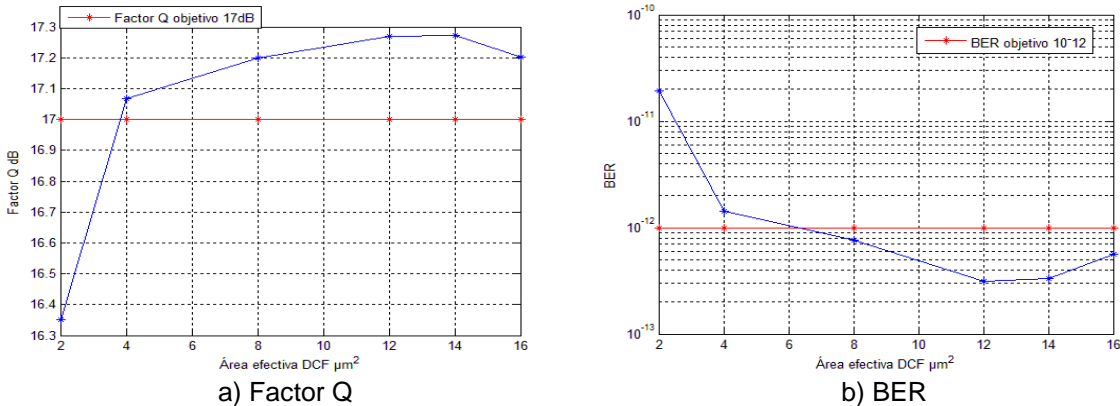
4.3.4.1 Área efectiva DCF

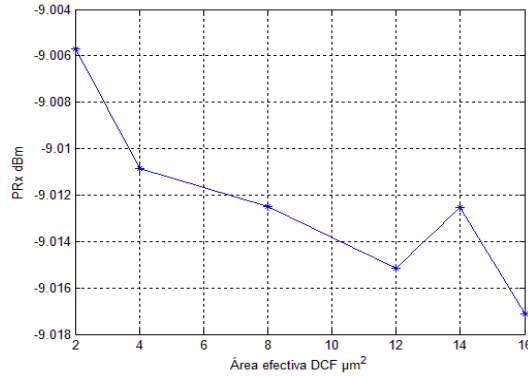
Las variaciones del área efectiva de la DCF se realizan con parámetros de 2 a 16 μm^2 , como se muestran a continuación, tabla 4.55.

Área efectiva DCF μm^2	2	4	8	12	14	16
-----------------------------------	---	---	---	----	----	----

Tabla 4.55 Parámetros de área efectiva en rango de 2 a 16 μm^2 .

Los resultados de los parámetros de calidad óptica como BER, factor Q y potencia de recepción al seguir la tabla 4.55, se observan en la figura 4.77.





c) Potencia de recepción

Figura 4.77 Parámetros de calidad óptica hallados al variar el área efectiva de la DCF entre 2 y 16 μm^2 .

De la figura 4.77, se observa que variar el área efectiva no aumenta en gran medida los parámetros de calidad óptica como el factor Q y la BER, es decir el valor más alto de estos parámetro de la calidad se obtiene con 14 μm^2 y no llega a los 20 dB para el factor Q y 10^{-19} para la BER, con lo cual no se logra un aumento de la longitud del segmento de red, excepto para la potencia de recepción la cual permanece alta si se incrementa o no el área efectiva de la DCF. En conclusión las variaciones realizadas en el área efectiva no aumentan la longitud del segmento de red para una velocidad de trasmisión de 40 Gbps.

4.3.4.2 Figura de mérito DCF (FOM)

Se recurre a las formulas y tablas empleadas en el análisis de la FOM a una velocidad de transmisión de 10 Gbps; sección 4.1.2.3, como se muestra en la tabla 4.56, en donde se varia la dispersión por debajo de $-333\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$ y con el valor de atenuación fijo; lo que permitirá establecer si con aumento de la FOM el segmento de red incrementa los parámetros OPM(Factor Q y BER), permitiendo aumentar la longitud de 154 Km en la SSMF-28 y cumpliendo los parámetros objetivo; o por el contrario, el aumento de la FOM reduciría la longitud de la DCF cumpliendo los parámetros objetivo, pero no se logra aumentar la longitud total del segmento de red.

FOM(Figura de mérito)	$\frac{\text{Dispersión de la DCF}}{\text{Atenuación de la DCF}}$
Compensación DCF del 100%	$\frac{[-333 \text{ hasta } -563 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{Km}}]}{0.55 \frac{\text{dB}}{\text{Km}}}$

Tabla 4.56 Variación de la FOM a velocidad de trasmisión de 40 Gbps.

De a tabla 4.56, Al aumentar el parámetro de dispersión de la FOM en la DCF, se incide en el segmento de red provocando la reducción en la longitud de la DCF y los parámetros de calidad óptica como BER y factor Q cumplen con los parámetros objetivos, como se observa a continuación, figura 4.78.

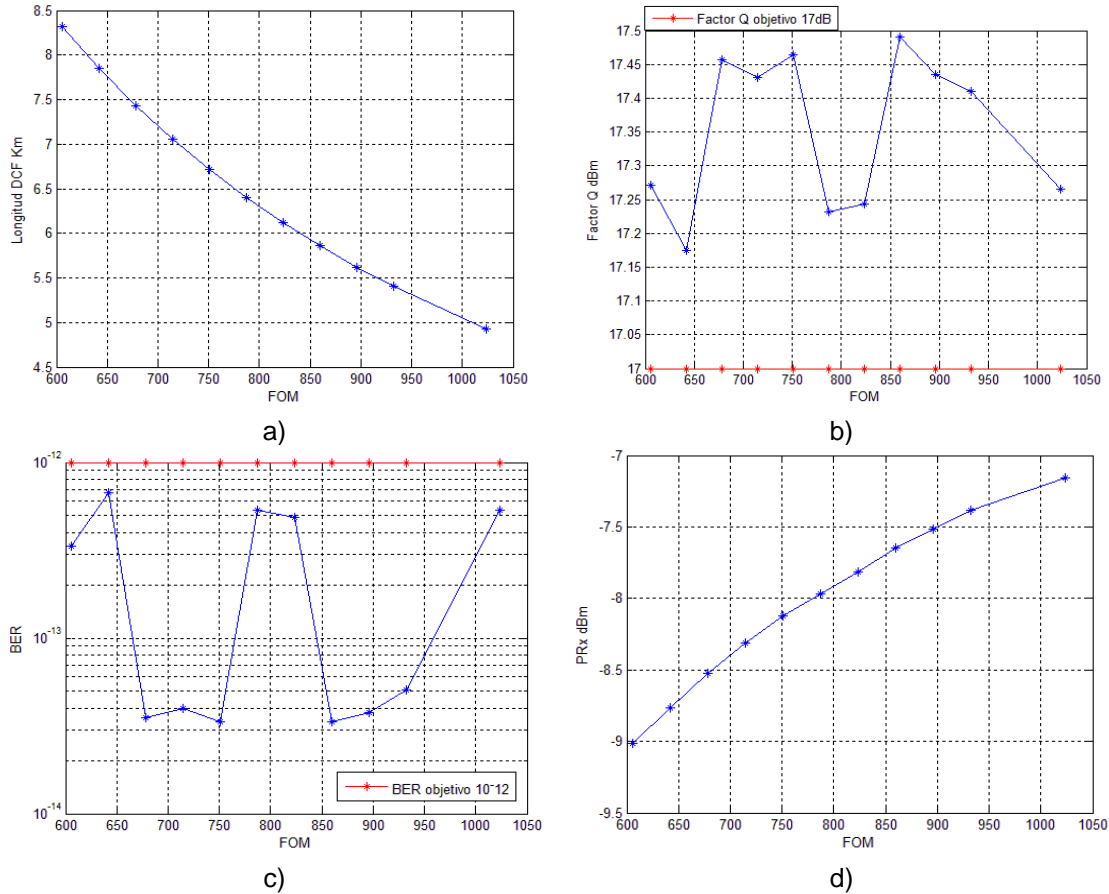


Figura 4.78 Al aumentar la FOM se obtiene: Variaciones en la longitud de la DCF a) y parámetros de la calidad óptica factor Q b), BER c) y potencia de recepción d).

Del estudio realizado en la figura 4.78, se establece que al realizar aumentos en la figura de mérito de la DCF, empleando valores de la tabla 4.56, se logra reducir la longitud de la DCF en el segmento de red cumpliendo con los parámetros objetivo y aumentando la potencia de recepción, pero no se logra sobrepasar en gran medida estos dos parámetros (factor $Q=17\text{dB}$ y $\text{BER}=10^{-12}$); en consecuencia, a una velocidad de transmisión de 40 Gbps el aumento de los parámetros OPM (factor Q y BER) debe ser mucho mayor que el obtenido, por lo tanto no se puede aumentar la longitud total del segmento de red incrementando la figura de mérito de la DCF por encima de los valores establecidos para este mismo parámetro a una velocidad de 10 Gbps .

Con el fin de analizar si aumentando o reduciendo el espaciamiento entre los canales se aumenta la BER y el factor Q del segmento de red. Se separan los canales de transmisión hasta 200 GHz, variando las propiedades de la DCF, pero los datos OPM (Factor Q y BER) arrojados por la red óptica son casi idénticos que al utilizar una separación de 100 GHz, por lo que no es posible aumentar la longitud del segmento de red; esta conclusión está probada en la tabla 83, tabla 84, tabla 85, tabla 86 y tabla 87 del anexo D. Por otra parte, reducir la separación entre canales a 50 GHz a una velocidad de 40 Gbps no es conveniente, ya que los parámetros objetivos no se logran cumplir; en efecto, una mayor y una menor separación entre canales para el formato de modulación NRZ-OOK a 40 Gbps no mejora los parámetros OPM de la red óptica.

4.3.4.3 Aumento en porcentajes de compensación de la DCF

Se analiza si sobrepasando el 100% en la fibra compensadora de dispersión se logra aumentar los parámetros OPM (Factor Q y BER) del sistema DWDM. Con una compensación de la DCF del 110%, el resultado obtenido se muestra en la figura 4.79.

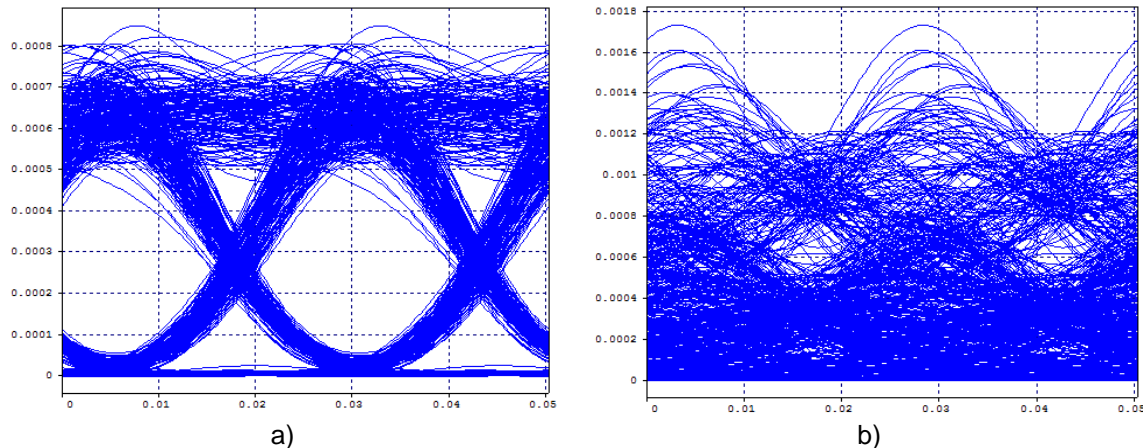


Figura 4.79 Diagrama de ojo en el segmento de red con: a) 100% de DCF y b) 110% de DCF.

De la figura 4.79, se observa que compensar por encima del 100% de la DCF no es factible para el segmento de red, ya que la dispersión acumulada de la red aumenta, como se puede corroborar comparando los dos diagramas de ojo; por consiguiente, una compensación de 110% en la DCF no es efectiva para contrarrestar la dispersión cromática; esto también se comprueba con los parámetros OPM, como el factor Q el cual se reduce hasta 6.0206dB y aumenta la BER 0.0227501, por tal razón el segmento de red no cumpliría con los parámetros objetivo.

En conclusión, variar las propiedades de la DCF a una velocidad de 40 Gbps para incrementar los niveles en los parámetros OPM del segmento de red no es efectivo como lo realizado a una velocidad de 10 Gbps, en donde se logró aumentar el segmento de red hasta 186 Km. Los resultados de comparar el formato de modulación NRZ-OOK para las dos velocidades de transmisión implementadas en este capítulo y con mejoras en la DCF como resultado de variar sus propiedades se muestran a continuación, tabla 4.57.

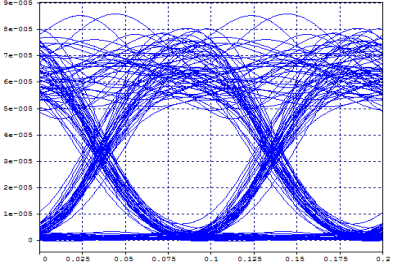
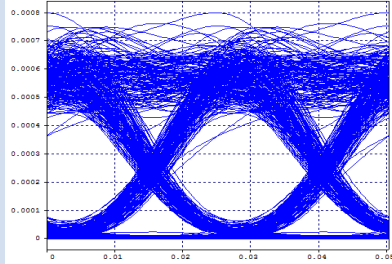
	Velocidad de trasmisión a 10 Gbps, segmento de red con mejoras en la DCF	Velocidad de trasmisión a 40Gbps ,segmento de red con mejoras en la DCF
Potencia de trasmisión	5dBm	
Longitud segmento de red, fibra óptica SSMF-28	186Km	154Km
Potencia EDFA	4 dBm	
Ganancia EDFA	30 dB	
Diagrama de ojo, compensado al 90% DCF a 10Gbps y compensado al 100% DCF a 40Gbps		
Longitud DCF	9.04865Km	4.92362Km
Factor Q	17.837dB	17.266dB
BER	2.621e-15	5.372e-13
Potencia de recepción	-9.417dBm	-7.154
Eficiencia del segmento de red	Alta	Media

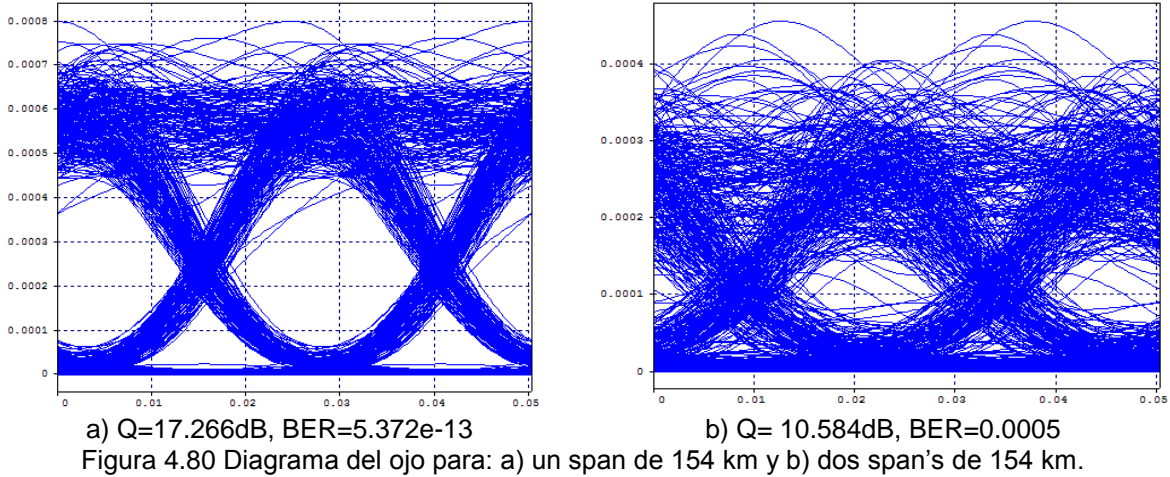
Tabla 4.57 Velocidad de trasmisión de 10 y 40 Gbps, al introducir una fibra DCF mejorada en el segmento de red.

Al no lograr alcanzar los 186 Km en el segmento de red con una velocidad de transmisión de 40 Gbps y aplicando mejoras en las propiedades de la DCF; se concluye que no es factible realizar una migración en la velocidad de transmisión para el formato de modulación NRZ-OOK ante las variaciones de las propiedades de la DCF.

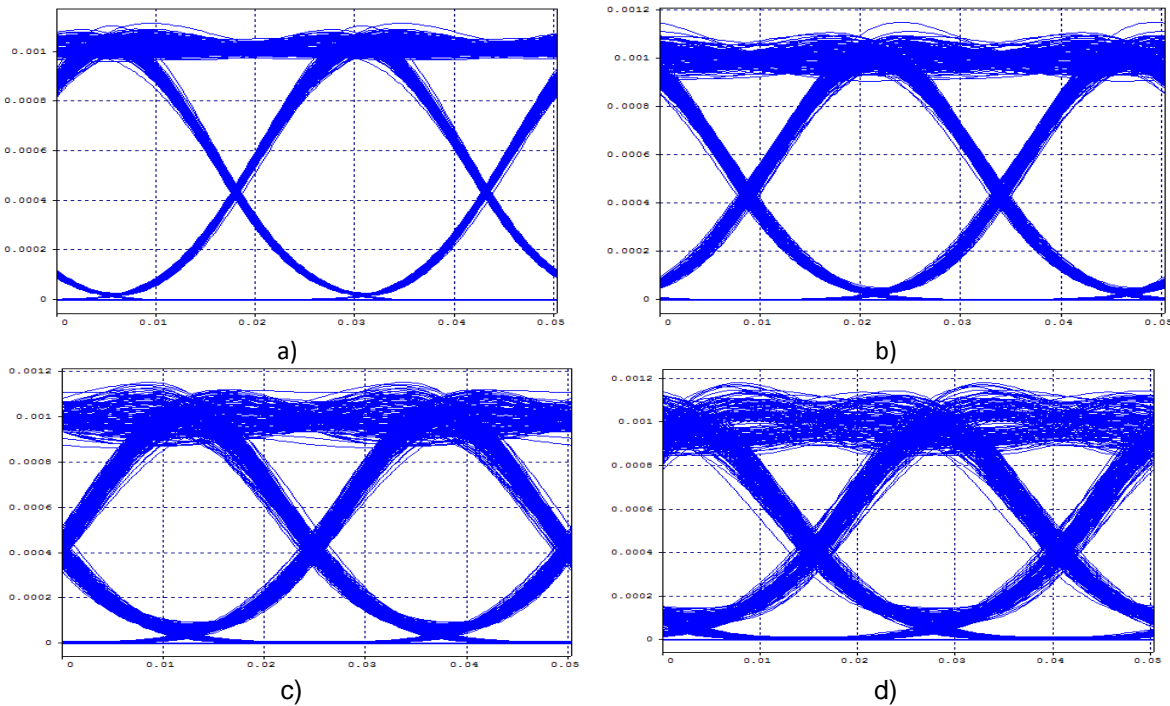
Distancia máxima alcanzada con enlaces concatenados

Se desea que el escenario DWDM variando las propiedades de la DCF a una velocidad de transmisión de 40 Gbps, logre su máximo alcance en longitud con enlaces concatenados; para ello se adicionan varios segmentos de red concatenados, con una cantidad de dispositivos, como por ejemplo, un mayor número de amplificadores, los cuales permitan alcanzar una distancia igual o que este cercana a la conseguida en 10Gbps. El mayor alcance logrado por un segmento de red tiene una longitud de 154 Km para la fibra SSM-28 compensando al 100% de la DCF y con variaciones en los parámetros de las propiedades de la DCF.

La máxima distancia alcanzada con segmentos de red a 154 Km es de 308 Km en los cuales no se cumple con los parámetros objetivos; por tanto, es conveniente reducir la longitud de segmento de red, para alcanzar la longitud obtenida con segmento de red concatenados a 10 Gbps. El diagrama de ojo para los dos span concatenados, con segmento de red para cada uno de 150 Km como se observan en la figura 4.80.



Se reduce el alcance total por span a 52 Km de fibra SSMF-28, concatenando 9 span's alcanzando una longitud máxima de 468 km cumpliendo los parámetros objetivo; como se muestra en los diagramas de ojo de la figura 4.81. Logrando el máximo alcance, en el medio se obtiene una dispersión acumulada de 135840.71 ps/nm para una dispersión que proporciona la fibra estándar de 18 ps/nm*km que será compensada con la dispersión negativa acumulada de la DCF de -8423.99 ps/nm con -563 ps/nm*km por segmento de red, y finalmente el resultado de todo el sistema sería una dispersión total de 127416.72 ps/nm, este valor es demasiado en comparación al encontrado en una transmisión a 10 Gbps. Por tal razón, una velocidad de transmisión de 40 Gbps no es posible alcanzar la máxima longitud de enlaces concatenados lograda a una velocidad de 10 Gbps.



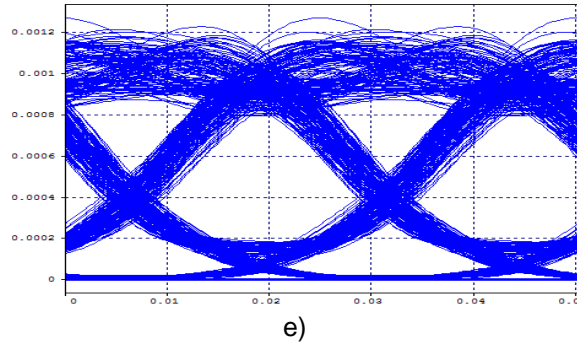


Figura 4.81 Diagrama del ojo para: a) un span, b) dos span, c) tres span, d) cuatro span y e) cinco span; cada span de 52 km.

En la siguiente tabla se observan los parámetros de desempeño OPM (Factor Q y BER) del sistema para diferentes span's, cumpliendo y estando por encima de los parámetros objetivo. En la figura 4.81 y en la tabla 4.58 se observa que a medida que se aumenta un segmento de red, el sistema se va degradando por las pérdidas inducidas por la dispersión cromática acumulada de cada span, siendo para una velocidad de transmisión de 40 Gbps uno de los fenómenos que más impacto tienen sobre el sistema DWDM y limita la distancia máxima que se puede alcanzar.

Parámetros de desempeño óptico	1 span (52km)	3 span (156 km)	5 span (260km)	7 span (364 km)	9 span (468 km)
Factor Q (dB)	30.071480	26.135133	22.250596	19.528023	17.182
BER	1e-40	1e-40	8.73663e-37	1.39362e-21	3.409e-13

Tabla 4.58 Parámetros de desempeño donde cada span es de 52 km.

Después de realizar el análisis de la variación de las propiedades de la DCF en un sistema DWDM, para un formato de modulación NRZ-OOK con velocidad de transmisión a 40 Gbps, se determina:

- La separación por arriba de 100 GHz para el formato de modulación NRZ-OOK transmitiendo a 40 Gbps con variaciones en las propiedades de la DCF, no mejora los parámetros OPM obtenidos en la red óptica y separar por debajo de los 100 GHz implica no alcanzar los parámetros objetivos
- La dispersión cromática acumulada en una red óptica con velocidad de transmisión a 40 Gbps, es mucho mayor a la producida en una red con velocidad de transmisión a 10 Gbps, siendo este efecto el que más degrada la señal que viaja por la red óptica y es el que condiciona la migración en velocidad de transmisión para las actuales redes ópticas.
- Un sistema DWDM con velocidad de transmisión a 10 Gbps y con parámetros de segmento de red óptica estándar utilizados por los diferentes operadores, es factible su migración a una velocidad de 40 Gbps variando las propiedades de la DCF, como se observó en la tabla 4.53 al comparar los dos segmentos de red con sus respectivas velocidades, los cuales alcanzan una longitud de 150 Km, logrando que los valores resultantes de OPM estén por arriba de los parámetros objetivo.

- Lograr los valores obtenidos para el segmento de red óptico y span's concatenados para una distancia alcanzada con velocidad de trasmisión de 10 Gbps, para formato de modulación NRZ-OOK, variando las propiedades de la DCF; obteniendo un segmento de red con fibra DCF mejorada, no es posible para una velocidad de trasmisión de 40 Gbps utilizando el mismo formato de modulación y con variación de las propiedades en la DCF, los parámetros utilizados en 40 Gbps en algunos casos están por encima a los utilizados a 10 Gbps pero no permiten mejorar la longitud del segmento de red; por esta razón, la migración a 40 Gbps con DCF mejorada no logra alcanzar los mismos parámetros OPM alcanzados en 10 Gbps con DCF mejorada.

4.4 Caso 2: Configuración 2.2 Análisis del formato de modulación RZ-DQPSK a 40 Gbps con DCF mejorada.

En el siguiente análisis se utiliza el mismo escenario de la configuración 4.2 (Figura 4.32); además en este caso de estudio el sistema DWDM cuenta con una velocidad de trasmisión de 40 Gbps, con formato RZ-DQPSK; el cual cuenta en el transmisor con: una fuente, un láser de emisión continua, un divisor de potencia para separar la luz en dos caminos de igual intensidad, un modulador Mach-Zehnder con un pulso carver para el patrón de código de línea, un modulador DQPSK, una fuente y un precodificador de datos. En el receptor, los datos primero son filtrados y luego la señal resultante se divide en dos (fase y cuadratura) y se introduce un par de receptores DPSK, con el fin de realizar la detección de los componentes en fase y cuadratura de la señal DQPSK [10]. El sistema DWDM con formato de modulación RZ-DQPSK para una velocidad de trasmisión de 40 Gbps se muestra en la figura 4.82.

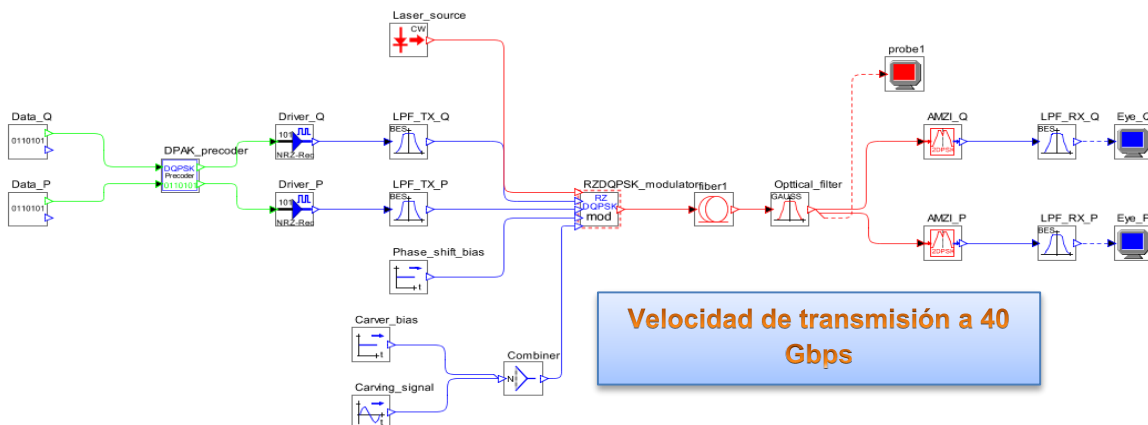


Figura 4.82 Modelo simplificado de la red para el formato de modulación RZ-DQPSK, transmitiendo a 40 Gbps.

En la figura 4.83, se observa el funcionamiento del formato RZ-DQPSK a una velocidad de transmisión de 40Gbps, con una frecuencia de trabajo de 193.1Thz, los cuales son mostrados por medio del diagrama de ojo y el espectro óptico de la señal transmitida en el receptor Back to Back; este permite establecer la trasmisión ideal que llega al receptor, es decir, sin perturbaciones influenciadas por degradaciones de la línea de transmisión.

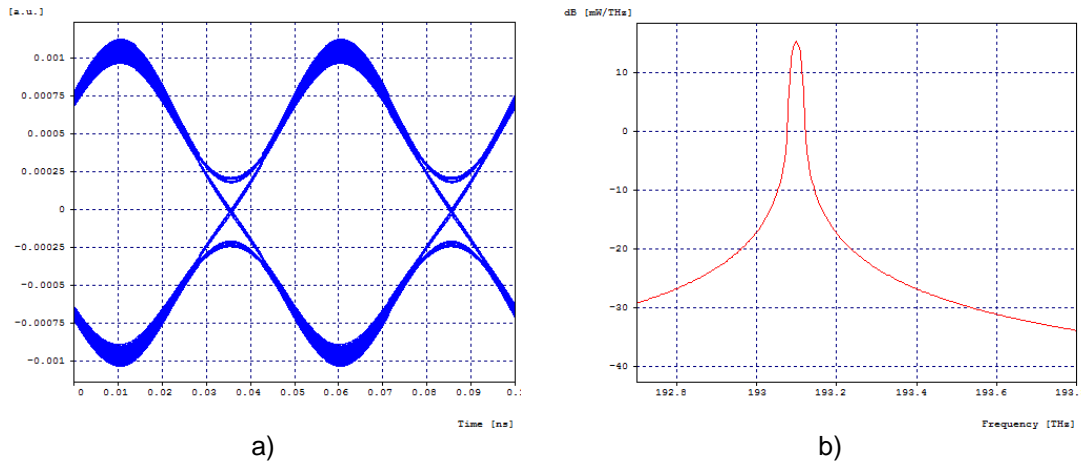


Figura 4.83 Diagrama del ojo a) y Espectro óptico en 193.1 Thz b) de la señal en el receptor Back to Back; para una velocidad de transmisión de 40 Gbps con formato de modulación RZ-DQPSK.

Antes de establecer el escenario con los mejores parámetros de DCF encontrados al analizar el formato RZ-DQPSK en 10 Gbps (sección 4.2.2), antes que nada se establece cual es el impacto de la dispersión cromática a una velocidad de transmisión de 40 Gbps al introducir fibra monomodo estándar SSMF-28 en el segmento de red; para esto se aumenta la longitud del segmento de red hasta donde se cumplan los parámetros objetivo, después, se introduce DCF con el fin de contrarrestar la dispersión cromática provocada por la SSMF-28 y aumentar la longitud del segmento de red.

4.4.1 Máxima distancia alcanzable por la fibra SSMF-28

En esta sección, se establece la máxima distancia que logra alcanzar la SSMF-28 en un segmento de red a una velocidad de transmisión de 40 Gbps con formato de modulación RZ-DQPSK; para ello se contara con: una potencia de 5 dBm en el transmisor, con el fin de evitar excitar fenómenos no lineales; los cuales no son contrarrestados por la DCF como se comprobó en la sección 4.2.1.2.

Para establecer la longitud máxima que logra alcanzar la SSMF-28 en el segmento de red, se analiza cuál de los fenómenos lineales tiene mayor incidencia negativa; para ello se simula el segmento de red con los tres modelos VBS, “VBS Loss Only Fiber”, “VBS Linear Fiber” y “Full VBS”, el resultado de simular con los tres modelos de VBS se muestra a continuación, tabla 59 (Anexo E, tabla 88).

VBS	Potencia Tx (dBm)	Long. SSMF-28 km	Q-cuadratura		P-fase		Potencia Rx (dBm)
			Factor Q (dB)	BER	Factor Q (dB)	BER	
Full	5	11	17.514	2.968e-14	17.108	6.675e-13	-2.017
Linear Fiber			17.303	1.150e-13	16.907	2.029e-12	-2.057
Loss Only Fiber			31.936	1e-40	31.805	1e-40	-2.049

Tabla 4.59 Parámetros objetivo en el segmento óptico solo con fibra SSMF-28.

Los resultados encontrados en la tabla 4.59, se dan como respuesta al aumento de la velocidad de transmisión, que en este caso es de 40 Gbps, la cual incide de forma negativa en el formato de modulación RZ-DQPSK, ya que el segmento de red con fibra

SSMF-28 solo alcanza una distancia máxima de 11 km; siendo esta la longitud en la cual con los diferentes modelos de simulación VBS se logra alcanzar los parámetros objetivo de BER a la 10^{-12} y un factor Q de 17 dB. Al mismo tiempo el fenómeno lineal que más incidencia negativa o que mayor degradación produce sobre la señal óptica en la línea de transmisión es la dispersión cromática comparada con la atenuación y el ruido, como se observa en la figura 4.84.

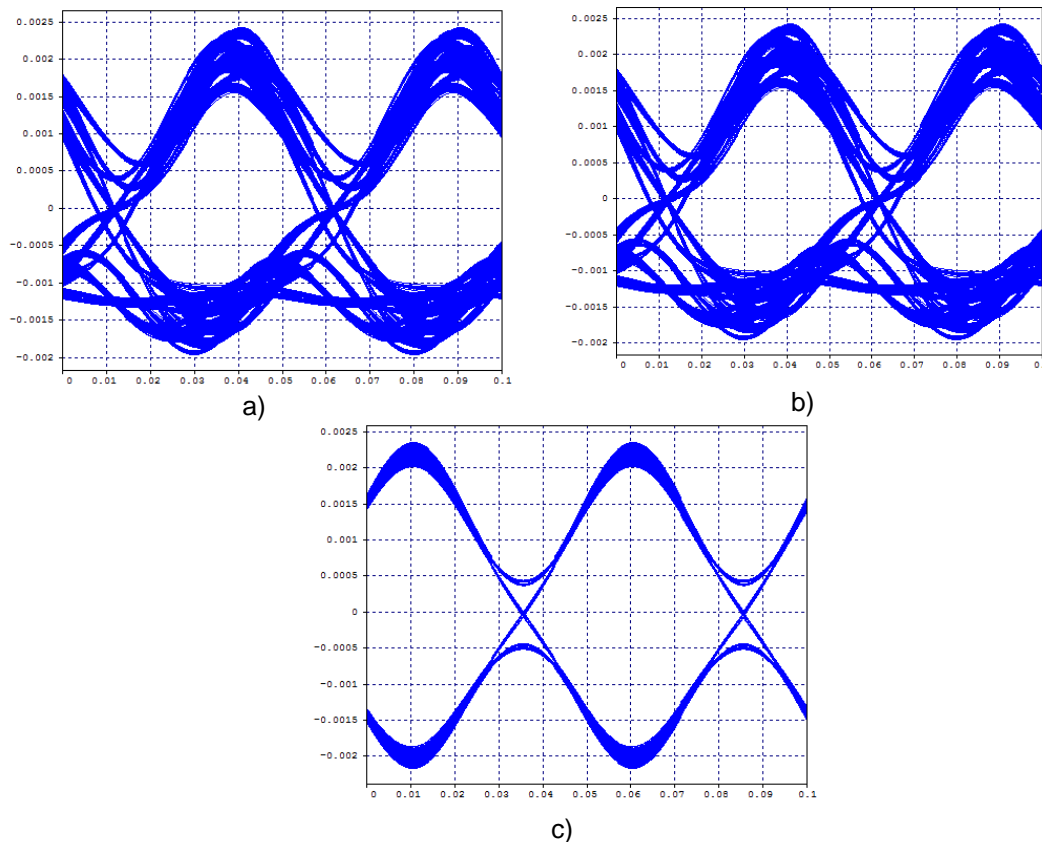


Figura 4.84 Diagrama de ojo con: a) todas las degradaciones ópticas (VBS full), b) afectado por la dispersión cromática (VBS line fiber), c) afectado por la atenuación y ruido (Loss Only Fiber).

De la figura 4.84, se observa que la atenuación y el ruido son las degradaciones que menos impactan o perjudican la señal transmitida en la red óptica en comparación a la dispersión cromática (CD), esta última limita considerablemente la longitud del segmento de red. Por lo tanto, el fenómeno a evaluar es el de la CD en la red óptica.

El impacto negativo de la dispersión cromática sobre la señal transmitida, se aprecia de igual manera en el alargamiento y deformación de los pulsos recibidos al ser comparados con los pulsos transmitidos del segmento de red. Esto se muestra en la figura 4.85.

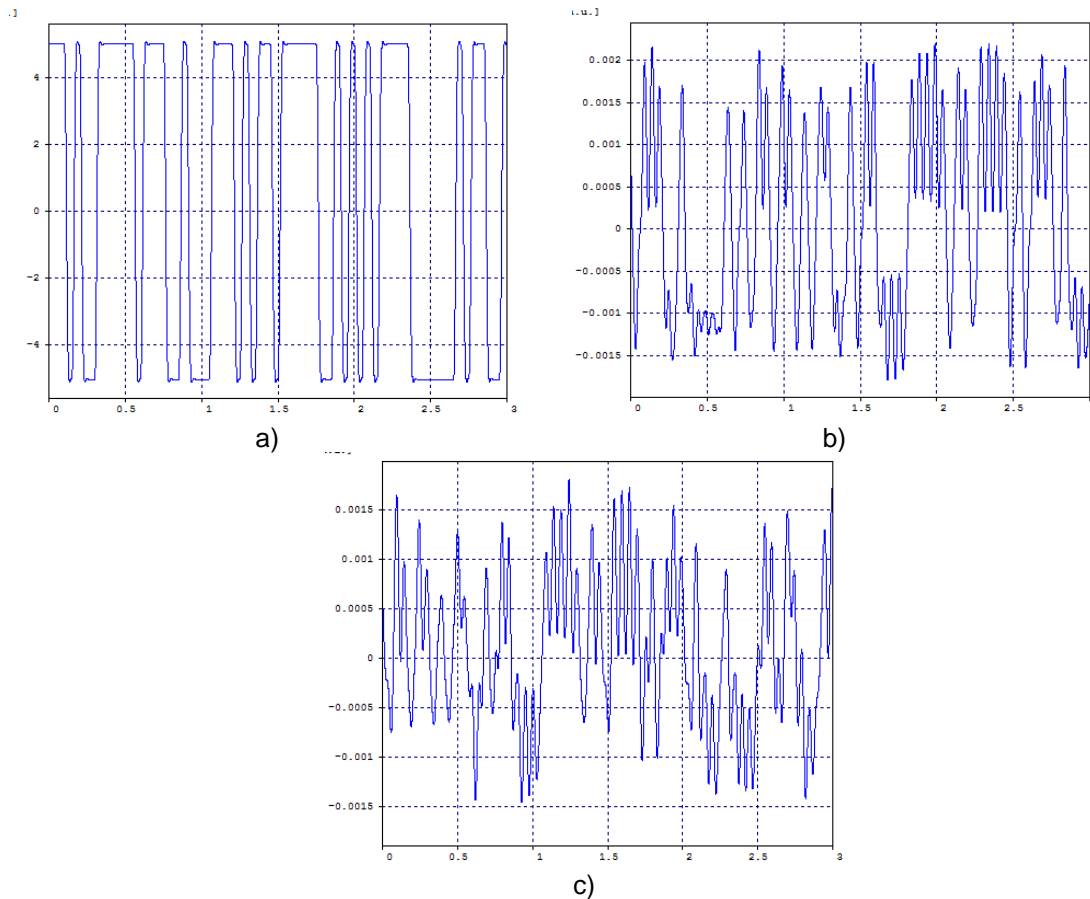


Figura 4.85 Señal eléctrica en el receptor a) Back to Back, b) con longitud SSMF-28 de 11Km, c) con longitud SSMF-28 de 18 Km.

Comparativamente, la figura 4.85 (b) y figura 4.85 (c) respecto a la figura 4.85 (a), los pulsos eléctricos se ven afectadas por la longitud de la fibra ssmf-28 y en consecuencia por la dispersión cromática que se presenta en mayor proporción al aumentar de 11 a 18 km. Este incremento de la longitud hace que los pulsos se ven alargados y concatenados unos con otros, dando como resultado que no sean reconocidos por el receptor. Por lo tanto para aumentar la longitud en el segmento de red cumpliendo con los parámetros objetivo se debe introducir fibra compensadora de dispersión en la línea de transmisión.

4.4.2 Máxima distancia alcanzable en el segmento de red, con parámetros de red óptica implementados por los diferentes operadores de fibra.

En esta sección se establece si la fibra óptica compensadora de dispersión al ser introducida en la línea de transmisión mejora la longitud máxima alcanzada en el segmento de red de 11 Km con una velocidad de 40 Gbp. Para esto se contara con parámetros estándar de la DCF, definidos en la tabla 4.60.

Coeficiente de dispersión	Área efectiva	Coeficiente de atenuación
$-100 \frac{Ps}{nm \cdot Km}$	$20 \mu m^2$	$0.55 \frac{dB}{Km}$

Tabla 4.60 Parámetros estándar de la DCF.

Debido a que en 40 Gbps se tiene una CD dieciséis veces mayor al transmitir a 10 Gbps, se tendría una dispersión cromática acumulada en la SSMF-28 a partir de la fórmula 2.2 del segundo capítulo igual a:

$$D_{link}(\lambda) = 16\left\{ 11Km \left[18 \frac{Ps}{nm*Km} + 0.056 \frac{Ps}{nm^2*Km} (1552.52nm - 1550nm) \right] \right\} = 3192.8371 \frac{Ps}{nm}$$

Debido al aumento en el coeficiente de dispersión cromática del enlace se utilizan porcentajes de compensación del 50 y 75% de la DCF; teniendo en cuenta que teóricamente el formato de modulación RZ-DQPSK está definido para altas velocidades y para contrarrestar en mayor medida la dispersión cromática. Además, con estos dos porcentajes de DCF se consiguió las mayores longitudes en 10 Gbps. Estos porcentajes de compensación de la DCF se calculan utilizando la fórmula 2.3 (definida en el segundo capítulo); esta ecuación es igual a:

Las longitudes máximas que alcanza el segmento de red para porcentajes de compensación del 50 y 75 % de la DCF se encuentran en la tabla 4.61.

Ptx (dBm)	DCF (%)	Long DCF (km)	Long SSMF-28 (km)	Q-cuadratura		P-fase		OSNR Out (dB)	Prx (dBm)
				Factor Q (dB)	BER	Factor Q (dB)	BER		
5	50	2.16	24	17.981	1.290e-15	17.587	4.165e-14	52.489	-5.846
	75	8.91	66	17.562	3.404e-14	17.139	9.018e-13	52.347	-18.005

Tabla 4.61 Parámetros objetivo para porcentajes de compensación del 50 y 75% de la DCF.

Como se observa en la tabla 4.61, introducir DCF en el segmento de red resulta ser ventajoso al lograr un mayor alcance en la longitud de la SSMF-28, especialmente cuando se compensa al 75 %, ya que disminuye el efecto de la CD en comparación al 50%; sin embargo, es necesario recordar que a una mayor DCF, mayor serán los costos.

El alcance máximo de 24 y 66 km al 50 y 75% respectivamente con formato RZ-DQPSK a 40 Gbps, es menor cuando se compara con RZ-DQPSK a 10 Gbps, dado que este último logra 319 y 697 km equivalente al 50 y 75% de compensación. En otras palabras, una velocidad de transmisión de 40 Gbps es un parámetro que limita el alcance del sistema DWDM así se esté utilizando un formato de modulación robusto RZ-DQPSK.

4.4.3 Implementación del escenario DWDM a 40Gbps con los mejores parámetros alcanzados en 10Gbps variando las propiedades de la DCF

En esta sección se busca comprobar si para porcentajes de compensación en la DCF del 50 y 75%, con los valores alcanzados al variar las propiedades de la fibra compensadora de dispersión a una velocidad de 10 Gbps, estos al ser implementados en un escenario con una velocidad superior de 40 Gbps, el segmento de red sigue siendo funcional al alcanzar los parámetros objetivos y si la longitud alcanzada aumenta con respecto a la lograda en la sección 4.2.1 y la sección 4.2.3. Las longitudes que se quieren alcanzar en 40 Gbps se muestran a continuación, tabla 4.62.

Longitud MAX	PTx dBm	% DCF	Longitud SSMF-28 Km
Con parámetros estándar de la DCF	5	75	697
Con variación en los parámetros de la DCF			930

Tabla 4.62 Longitudes máximas alcanzadas en el segmento de red para la configuración 1.2.

En esta sección se tiene un sistema DWDM con formato de modulación RZ-DQPSK a una velocidad de 40 Gbps en transmisión, al cual se introduce en la línea de transmisión la fibra óptica SSMF-28, se configura la fibra DCF en post-compensación y amplificador EDFA en modo Booster, como se observa en la figura 4.86.

Velocidad de Tx=40 Gbps

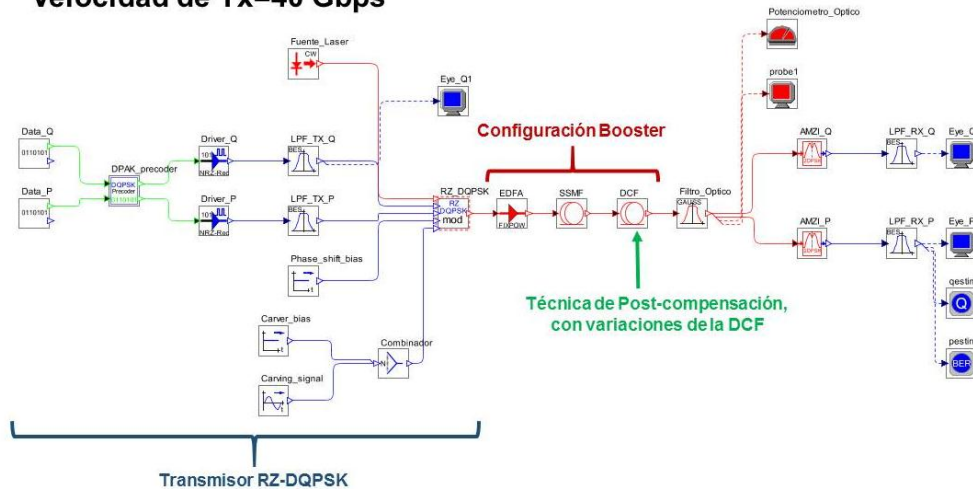


Figura 4.86 Segmento de red para el formato de modulación RZ-DQPSK, transmitiendo a 40 Gbps.

En la implementación del segmento de red a 40 Gbps se toman los parámetros alcanzados en 10 Gbps variando las propiedades de la DCF, estos se encuentran a continuación, tabla 4.63.

Ptx dBm	DCF %	Dispersión DCF ps/nm*Km	FOM	Atenuación DCF dBm/km	Área Efectiva DCF μm^2	Potencia EDFA dBm	Ganancia EDFA dB
5	50	-333	3330	0.1	8	14	10
	75						

Tabla 4.63 Valores de los parámetros de las propiedades de la DCF.

Al introducir los parámetros de la tabla 4.63, con porcentajes de compensación del 50 y 75% de la DCF, respectivamente, el segmento de red no aumentan en gran medida el factor Q y la BER con respecto a los parámetros objetivo, por lo que la longitud máxima del segmento de red para cada porcentaje de DCF aumenta en unos pocos kilómetros en comparación al obtenido en la tabla 4.61; por tal razón, se aumenta el porcentaje de compensación de la DCF y se busca el porcentaje que permita aumentar el factor Q y la BER para lograr alcanzar las longitudes de la tabla 4.62.

Para aumentar en mayor proporción el segmento se toma un porcentaje de compensación del 89 % y con los parámetros de las propiedades en la DCF de la tabla

4.63, como se observa en la tabla 4.64. Teniendo en cuenta que en primer lugar se desea alcanzar una longitud en el segmento de red de 703 Km.

Ptx dBm	DCF %	Lon SSMF-28 Km	Lon DCF Km	Dispersión DCF ps/nm*Km	FOM	Atenuación DCF dB/km	Área Efectiva DCF μm^2	Potencia EDFA dBm	Ganancia EDFA dB
5	89	703	33.82	-333	3330	0.1	8	14	10

Tabla 4.64 Valores de los parámetros de las propiedades de la DCF para un 89% de compensación.

Los valores de calidad óptica factor Q (cuadratura 22.489 dB y fase 21.313 dB) y BER (cuadratura 10^{-40} y fase 1.137×10^{-30}) tanto para cuadratura como para fase al compensar al 89% de la DCF, se encuentran por encima de los parámetros objetivo, permitiendo alcanzar la longitud de segmento de red con parámetros de DCF estándar utilizada por los diferentes operadores de fibra óptica. En la figura 4.87, se muestra la longitud y la potencia alcanzada con un porcentaje de 89% en comparación al 50 y 75% de la DCF.

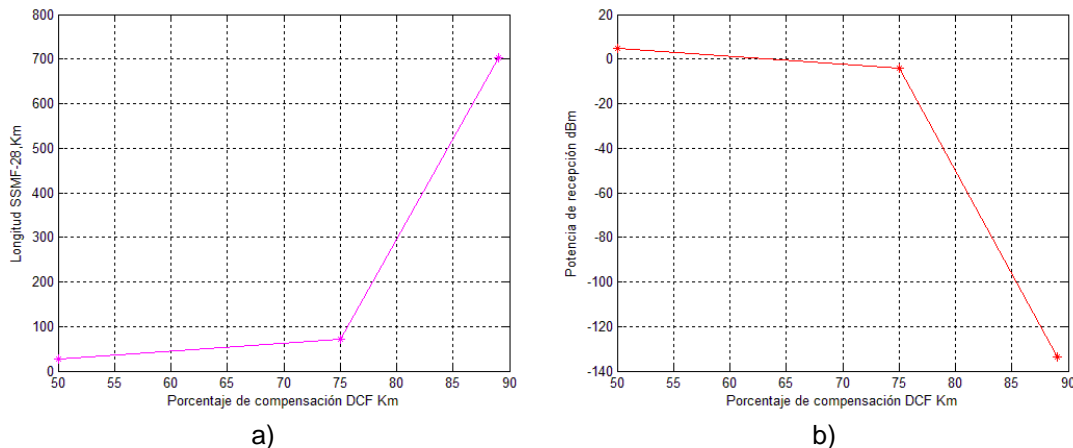


Figura 4.87 Longitud máxima alcanzada con porcentajes de compensación del 50, 75 y 90% de la DCF a) y Potencias de recepción alcanzadas con porcentajes de compensación del 50, 75 y 90% de la DCF.

De la figura 4.87, se puede observar que una compensación del 89% en la DCF permite aumentar un 100% la longitud en el segmento de red en comparación a un porcentaje de compensación del 75%. Aunque, la menor potencia en el receptor se produce con una compensación del 89%; debido a que a una mayor longitud de DCF atenúa los niveles de potencia de la señal que viaja por la línea de transmisión.

Se utiliza un porcentaje de compensación de 89% de la DCF para compensar la CD generada en 703 Km de SSMF-28; debido a que para porcentajes inferiores no se alcanza los parámetros objetivos y para porcentajes de DCF superiores se generan conflictos de simulación; como por ejemplo, no se logra visualizar la potencia de recepción y no se logra observar los diagramas de ojo para establecer el factor Q y la BER. Además en algunos casos para porcentajes de compensación por arriba del 89% en la DCF el factor Q y la BER se mantienen constantes así se varié la longitud del segmento de red, por tal razón, no se tiene en cuenta porcentajes de DCF mayores al mencionado, como límite de buen funcionamiento del simulador. Lo mencionado anteriormente se encuentra en la tabla 89 anexo E.

En últimas, para un operador de fibra óptica que cuente en un segmento de red con velocidad de transmisión de 10 Gbps y parámetros de fibra óptica compensadora de dispersión estándar como los obtenidos en la tabla 4.29, sección 4.2.1, es posible realizar una migración a una velocidad de 40 Gbps ante las variaciones de las propiedades de la DCF; este análisis se da al comparar los parámetros de los datos arrojados en un segmento estándar y un segmento al cual se le introdujeron valores con variaciones en la DCF, como se observa en la tabla 4.65.

Cabe recordar que en la siguiente tabla se califica como alta la eficiencia del segmento de red si se encuentra el factor Q y BER por arriba de los parámetros objetivo, y muy alta si la velocidad de transmisión del segmento de red se cuadruplica permitiendo el mayor envío de información teniendo la misma longitud de red y por arriba de los parámetros objetivo.

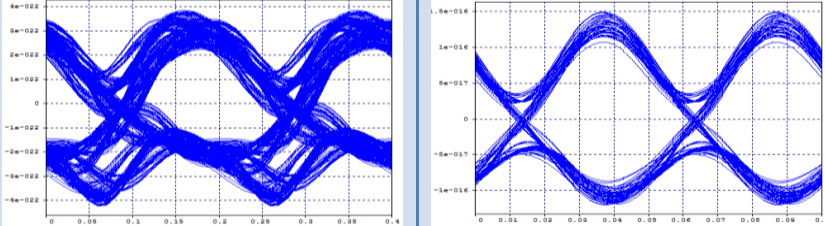
	Velocidad de transmisión a 10 Gbps, segmento de red con parámetros estándar	Velocidad de transmisión a 40Gbps ,segmento de red con mejoras en la DCF
Potencia de transmisión	5dBm	
Longitud segmento de red, fibra óptica SSMF-28	697Km	
Potencia EDFA	14 dBm	
Ganancia EDFA	10 dB	
Diagrama de ojo, compensado al 75% DCF a 10Gbps y compensado al 89% DCF a 40Gbps		
Longitud DCF	94.905 Km	33.53km
Factor Q Cuadratura	18.311 dB	22.489 dB
Factor Q fase	17.914 dB	21.313 dB
BER Cuadratura	1.38635e-16	1e-40
BER fase	4.154e-15	1.137e-30
Potencia de recepción	-185.075 dBm	-133.706 dBm
Eficiencia del segmento de red	Alta	Muy Alta

Tabla 4.65 Comparación entre los parámetros de red de un operador con DCF estándar Vs un operador con variaciones en los parámetros de la propiedades en la DCF del segmento de red.

A continuación, se busca a una velocidad de transmisión de 40 Gbps en el segmento de red, alcanzar la longitud de red lograda a 10 Gbps con mejoras en la DCF; para ello se aumentara los porcentajes de compensación del 89 a 100% de la DCF o de ser necesario se aumentaran los parámetros de la DCF como se hizo al realizar este análisis en 40 Gbps con modulación NRZ-OOK.

Al aumentar los porcentajes de compensación por arriba de 89% en la DCF en una longitud de segmento de red de 930 Km, los parámetros de la calidad óptica factor Q y BER están por debajo de los parámetros objetivos, esto se evidencia en la tabla 4.66 (Anexo E, tabla 90).

Análisis Comparativo del Desempeño en la Migración de una Red DWDM de 10 a 40 Gbps, ante las Variaciones de las Propiedades de una Fibra Compensadora de Dispersión (DCF)

Ptx dBm	% DCF	Lon DCF km	Lon SSMF-28 KM	Q-cuadratura		P-fase		PRx dBm
				Factor Q dB	BER	Factor Q dB	BER	
5	91	45.746	930	12.990	4.150e-06	12.229	2.179e-05	-180.043
	95	47.75676		6.021	0.023	6.021	0.023	-180.275
	100	50.27027027		6.021	0.023	6.021	0.022	-181.291

Tabla 4.66 Porcentajes de DCF por arriba del 89%.

Como se observa en la tabla 4.66, la dispersión cromática no permite aumentar la longitud del segmento de red ya que los parámetros OPM (Factor Q y BER) se ven directamente afectados por este fenómeno; esto se comprueba en los diagramas de ojo de fase y cuadratura de cada porcentaje de compensación. Por lo tanto el valor máximo de compensación en la DCF es de 89% para un segmento de red de 930 Km de SSMF-28 y con los parámetros de las propiedades en la DCF de la tabla 4.63. Los resultados de los parámetros de calidad óptica al realizar es análisis se muestran a continuación, tabla 4.67.

Ptx dBm	Lon SSMF-28 Km	% DCF	Lon DCF Km	Cuadratura		Fase		PRx dBm
				Q	BER	Q	BER	
5	930	89	4474.054	19.699 dB	2.644e-21	19.801 dB	1.030e-22	-180.318 dBm

Tabla 4.67 Parámetros de calidad ópticos hallados con un porcentaje de compensación del 89% en la DCF.

Como se observa en la tabla 4.67, con una compensación del 89% y con una DCF mejorado con los parámetros de la tabla 4.64, se alcanza la longitud de 930 Km. Esto se debe a que los parámetros de calidad óptica como la BER y el factor Q cumplen con los parámetros objetivos.

Se concluye que para un operador de fibra óptica que esté empleando el formato de modulación RZ-DQPSK y en el segmento de red velocidad de transmisión de 10 Gbps con variación en los parámetros de fibra óptica compensadora de dispersión, como los obtenidos en la tabla 4.44, sección 4.2.1, es factible realizar una migración a una velocidad de 40 Gbps ante las variaciones de las propiedades de la DCF; este resultado se da al comparar dos segmento de red con mejoras en la DCF transmitiendo a 10 Gbps y a 40 Gbps, como se observa en la tabla 4.68.

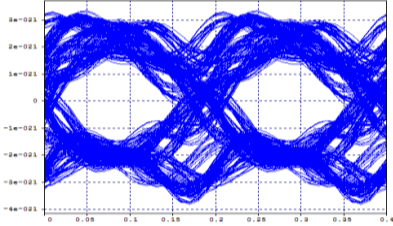
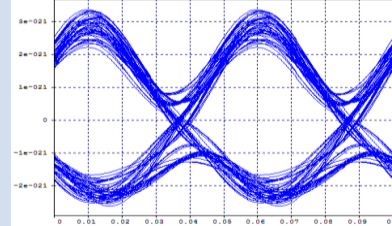
	Velocidad de trasmisión a 10 Gbps, segmento de red con mejoras en la DCF	Velocidad de trasmisión a 40Gbps ,segmento de red con mejoras en la DCF
Potencia de trasmisión	5dBm	
Longitud segmento de red, fibra óptica SSMF-28	930Km	
Potencia EDFA	14 dBm	24 dBm
Ganancia EDFA	10 dB	
Diagrama de ojo, compensado al 75% DCF a 10Gbps y compensado al 89% DCF a 40Gbps		
Longitud DCF	37.7027 Km	44.74054 Km
Factor Q cuadratura	17.712 dB	19.699 dB
Factor Q fase	17.573 dB	19.801 dB
BER cuadratura	8.452e-15	2.644e-21
BER fase	2.089e-14	1.030e-22
Potencia de recepción	-175.337 dBm	-180.318 dBm
Eficiencia del segmento de red	Alta	Muy alta

Tabla 4.68 Velocidad de trasmisión de 10 y 40 Gbps, al introducir una fibra DCF mejorada en el segmento de red.

Se visualiza en la anterior tabla un segmento de red transmitiendo a 40 Gbps utilizando una DCF mejorada en sus propiedades y con un dispositivo amplificador EDFA, logra transmitir a la máxima distancia alcanzada en 10 Gbps con DCF mejorada, por lo tanto, con formato de modulación RZ-DQPSK y con DCF mejorada se logra una migración de 10 a 40 Gbps alcanzando los parámetros objetivo. Además, el formato de modulación RZ-DQPSK está hecho para altas velocidades si se compensa la dispersión cromática en el segmento de red con un porcentaje de DCF por encima de 75 a 89%, siendo este último valor con que se logra establecer mayor longitud en la red óptica. No es necesario aumentar los valores en los parámetros de la DCF, debido a que con 89% de compensación de esta fibra se logra establecer una migración en la red óptica.

El parámetro de potencia EDFA es diferente para las dos velocidades de trasmisión, debido a que con 40 Gbps y con una longitud de segmento de red de 930 Km la potencia en recepción es muy pequeña para una potencia EDFA de 14 dBm, por lo tanto, se aumentó esta potencia hasta 24 dBm; ya que para valores superiores se incidía

negativamente en los parámetros OPM y con valores menores no se detectó un valor de potencia de recepción en el módulo de espectro óptico.

4.4.4 Distancia máxima alcanzada con enlaces concatenados

En busca del máximo alcance se concatenan varios segmentos de red, el cual tiene una longitud máxima de 930 km compensando al 89% de DCF. En este caso se considera el mismo porcentaje y el mismo alcance para cada span, esto con el fin de observar si se logra una mayor distancia cumpliendo con los parámetros objetivo. En la figura 4.88 se nota el comportamiento de uno y dos span:

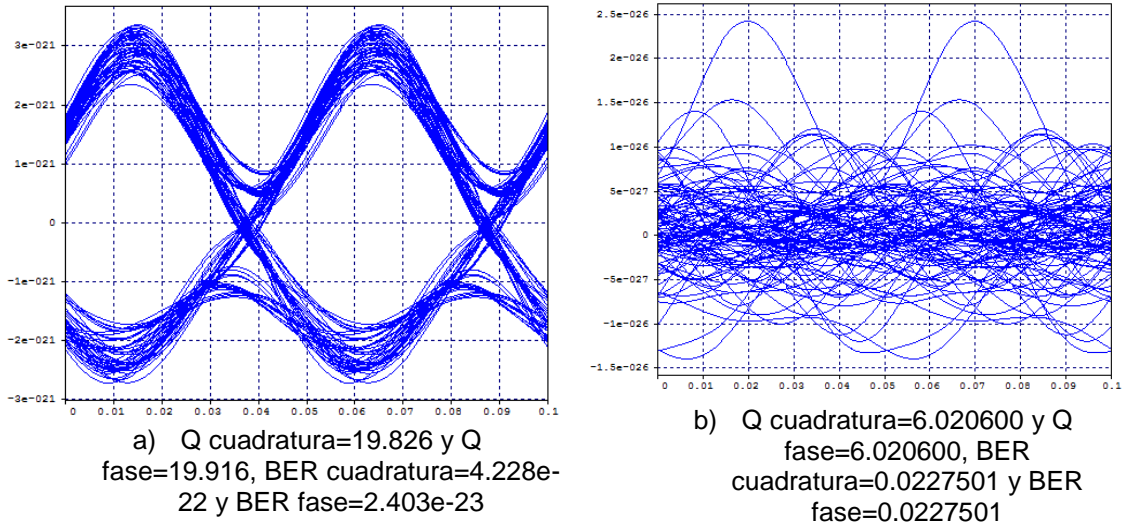
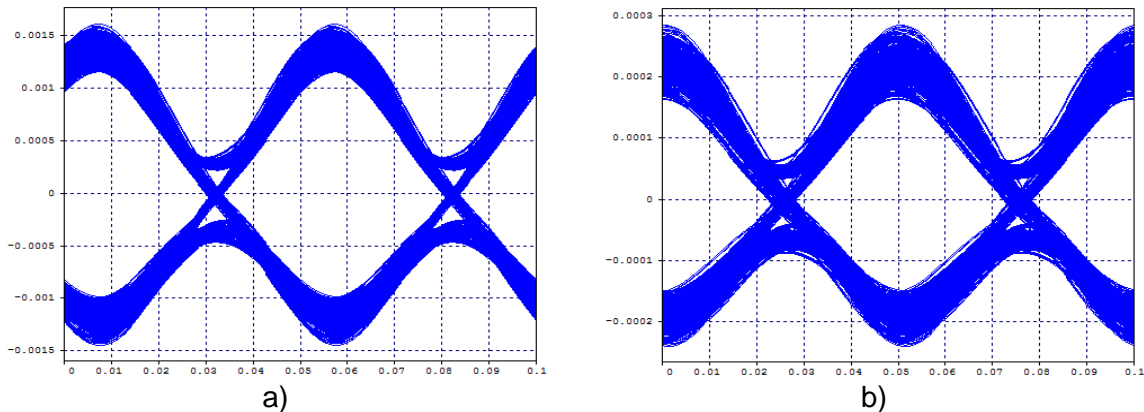


Figura 4.88 Diagrama del ojo para: a) un span de 930 km y b) dos span's de 1860 km.

En un segmento de red de 930 km cumple con los parámetros objetivo, pero cuando se concatena otro de ellos, el diagrama del ojo se ve totalmente afectado por la dispersión cromática acumulada; ya que para dos span concatenados la longitud es de 1860 Km y la CD es de 623207.7312 ps/nm, siendo un valor demasiado alto que la DCF no logra compensar, por tal razón no alcanza los parámetros objetivo. Se reduce la distancia de cada segmento y a la vez se aumenta el número de span para dar como resultado los diagramas del ojo de la figura 4.89.



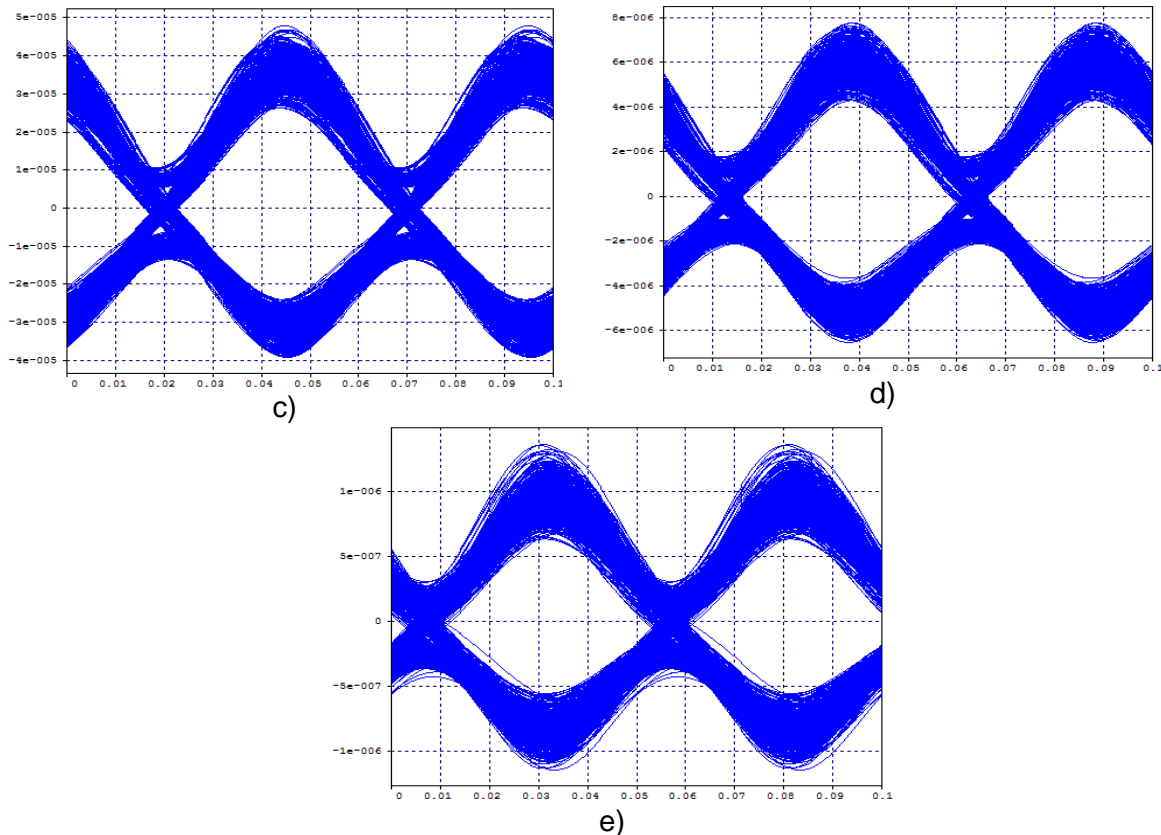


Figura 4.89 Diagrama del ojo para: a) un span, b) tres span's, c) cinco span's, d) siete span's y e) nueve span's; cada uno de 68 km.

Como se puede observar en la figura 4.89, a medida que se va aumentando el número de span's, el diagrama del ojo se va afectando hasta el punto de no cumplir con los parámetros objetivo. La longitud de cada segmento de red se redujo a 68 km para llegar a un alcance máximo de 612 km en 9 span's; esto quiere decir que no es conveniente concatenar segmentos de red para el formato de modulación RZ-DQPSK a una velocidad de transmisión de 40 Gbps, puesto que los 930 km se logra con un solo span, además, concatenar segmentos genera mayores costos a los operadores por los dispositivos adicionales en la red. En la tabla 4.69, se aprecia y se corrobora el alcance máximo del sistema cumpliendo con los parámetros OPM.

Parámetros de desempeño óptico		1 span (68 km)	3 span (204 km)	5 span (340 km)	7 span (476 km)	9 span (612 km)
Q-cuadratura	Factor Q	23.451	20.697	20.128	19.483	17.920
	BER	1e-40	4.620e-27	4.212e-24	2.195e-21	1.808e-15
P-fase	Factor Q	22.422	19.753	19.238	18.863	17.171
	BER	8.617e-39	5.660e-22	2.557	1.834e-18	3.972e-13

Tabla 4.69 Parámetros de desempeño para varios span compensando al 89%.

Después de realizar el análisis de la variación de las propiedades de la DCF en un sistema DWDM, para un formato de modulación RZ-DQPSK con velocidad de transmisión a 40 Gbps, se determina:

- Se comprueba que el formato RZ-DQPSK con fibra DCF está hecho para las altas velocidades; ya que los mayores parámetros OPM del segmento de red se obtuvieron en 40 Gbps comparados con los obtenidos en 10 Gbps.
- A una velocidad de 40 Gbps se debe introducir un mayor porcentaje de compensación de la DCF en comparación a 10 Gbps, ya que a mayor velocidad mayor dispersión cromática; se encontró que el porcentaje en el cual el segmento de red con DCF mejorada logra alcanzar su mayor longitud es de 89% y para porcentajes mayores la longitud decrece.
- Para el formato RZ-DQPSK a 40 Gbps, no es necesario elevar los parámetros de la DCF mejorada; debido a que con este formato se logra realizar una migración de la red óptica, a diferencia del formato de modulación NRZ-OOK a 40 Gbps; para el cual no se logra alcanzar la longitud del segmento de red con DCF mejorada con una velocidad de 10 Gbps.
- La no utilización de fibra compensadora de dispersión en el segmento red limitaría la distancia máxima alcanzable, la cual se encontraría por debajo de los 15 Km, comprobando que a 40 Gbps un formato robusto de modulación no logra alcanzar una longitud del sistema DWDM significativa para un operador de red.
- Las mejoras de la DCF implementadas en 10 y 40 Gbps permiten realizar una migración de la red óptica, estando los parámetros OPM por encima cuando se cuadruplica la velocidad en el transmisor de la red óptica.

4.5 Análisis comparativo del desempeño en la migración de una red DWDM de 10 a 40 Gbps, para los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-DQPSK ante las variaciones de las propiedades de la DCF

Una vez realizado el análisis individual de cada una de los casos de estudio, se pudo determinar algunos factores que inciden significativamente en el desempeño de los formatos de modulación a la hora de migrar una red óptica que trabaja a una velocidad de 10 Gbps y se desea pasar a una velocidad superior de 40 Gbps, como se observa en la tabla comparativa 4.40 ; en la cual se resume el comportamiento de la red óptica al migrar la velocidad de transmisión a medida que se variaron los parámetros de las propiedades de la DCF.

Se logra la migración de 10 Gbps segmento de red con parámetros estándar a 40 Gbps con DCF mejorada. En este caso la máxima longitud alcanzada con parámetros de DCF estándar y compensando al 50% es de 150Km, la cual se puede lograr en 40 Gbps en este caso con variaciones de las propiedades de la DCF como un área efectiva de $8 \mu\text{m}^2$, un aumento en el porcentaje de dispersión de $-333 \text{ ps/nm}\cdot\text{Km}$, una disminución en el área efectiva hasta un valor de 0.3 dB/Km con lo que se tendría una FOM de 1110 y por ultimo un aumento en el porcentaje de compensación del 100%. Esto se observa en las figuras 4.90 y 4.91.

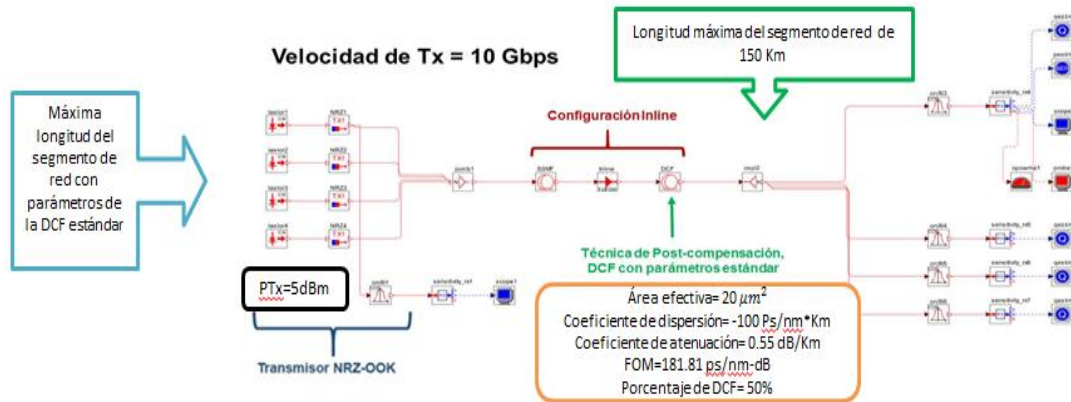


Figura 4.90 Longitud máxima en el segmento de red con parámetros de DCF estándar para el formato de modulación NRZ-OOK.

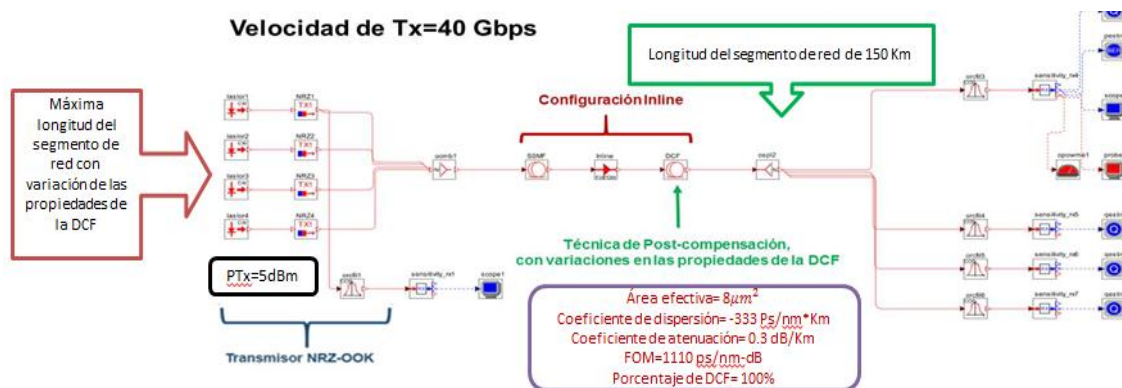


Figura 4.91 Longitud máxima en el segmento de red con variación en las propiedades de la DCF para el formato de modulación NRZ-OOK.

No se logra la migración de 10 Gbps segmento de red con DCF mejorada a 40 Gbps con DCF mejorada. En este caso la máxima longitud alcanzada con parámetros de DCF mejorada y compensando al 90% es de 186Km, la cual no se logra en 40 Gbps en este caso con variaciones de las propiedades de la DCF como un aumento en la atenuación de 0.3 dB/Km y un aumento en el porcentaje de compensación del 100%, como se observa en la figura 4.92. Cabe recordar que el parámetro de FOM es diferente para los dos segmentos de red debido a que este es igual a el parámetro de la dispersión sobre la atenuación de la DCF.

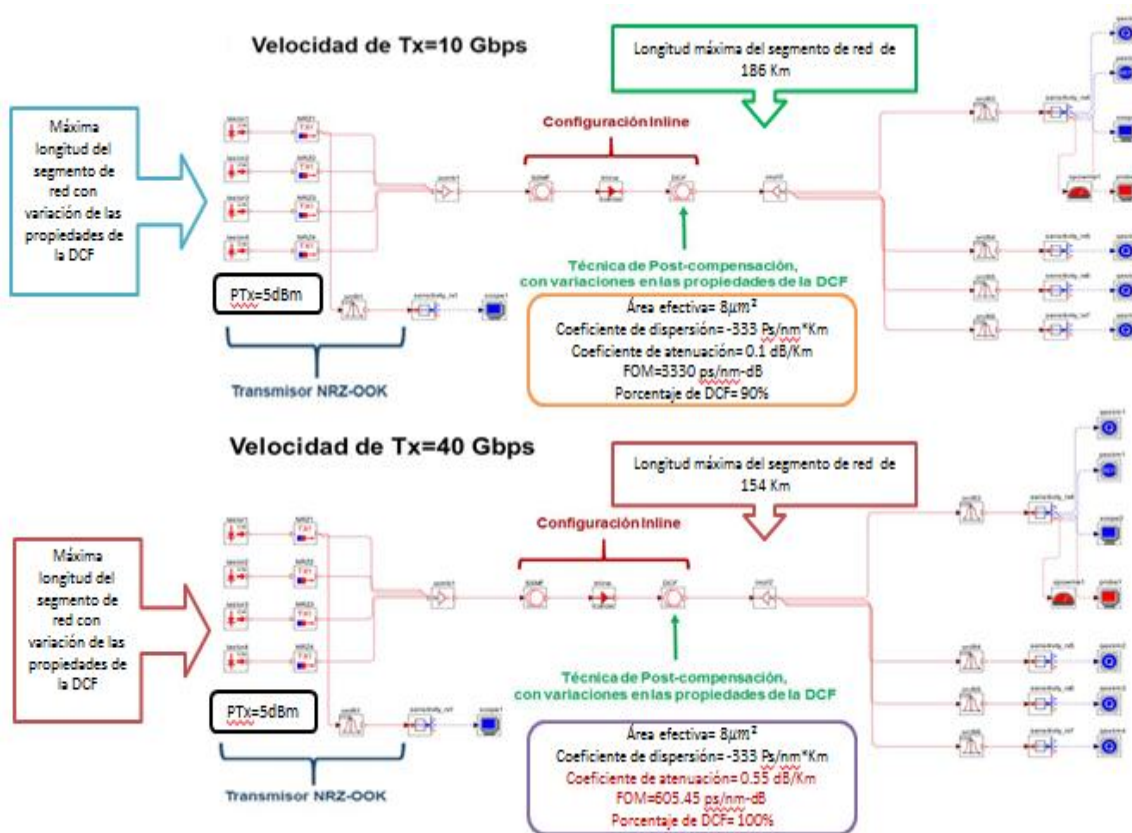


Figura 4.92 Segmentos de red con DCF mejorada con velocidad de transmisión de 10 Gbps y 40 Gbps, para el formato de modulación NRZ-OOK.

Para el formato de modulación RZ-DQPSK se logra la migración de 10 Gbps segmento de red con parámetros estándar a 40 Gbps con DCF mejorada. En este caso la máxima longitud alcanzada con parámetros de DCF estándar y compensando al 75% es de 697 Km, la cual se puede lograr en 40 Gbps en este caso con variaciones de las propiedades de la DCF como un área efectiva de $8 \mu\text{m}^2$, un aumento en el porcentaje de dispersión de $-333 \text{ ps/nm}^* \text{Km}$, una disminución en el área efectiva hasta un valor de 0.1 dB/Km con lo que se tendría una FOM de 3330 y por último un aumento en el porcentaje de compensación del 89% (solo se puede compensar al 89% de la DCF debido a que para porcentajes de compensación mayores no se logra detectar la potencia en el canal de recepción). Esto se observa en las figuras 4.93 y 4.94.

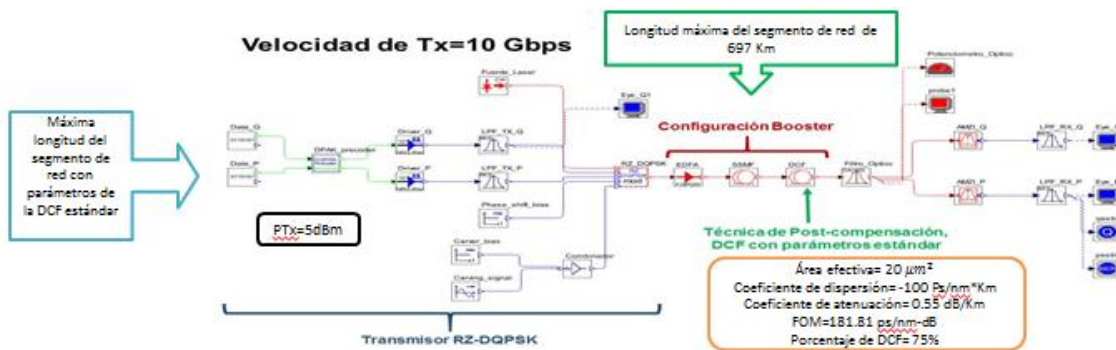


Figura 4.93 Longitud máxima en el segmento de red con parámetros de DCF estándar.

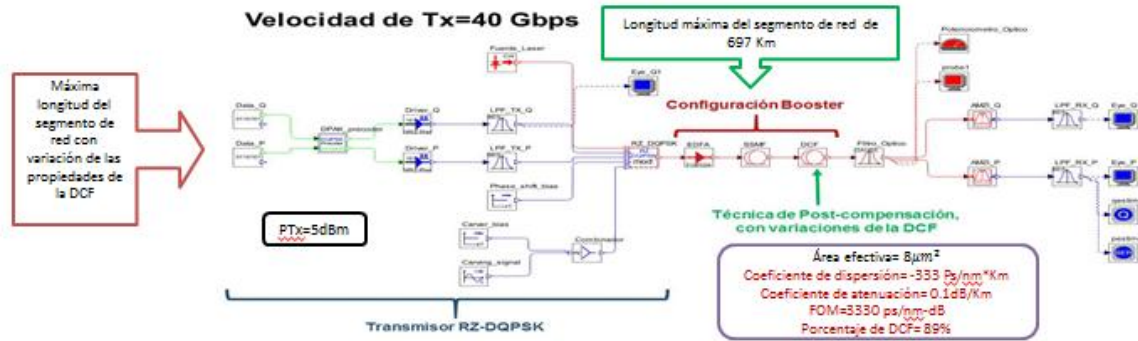


Figura 4.94 Longitud máxima en el segmento de red con variación en las propiedades de la DCF.

Para el formato de modulación RZ-DQPSK al ser robusto frente a las degradaciones del medio en especial a la dispersión cromática, se logra la migración de 10 Gbps segmento de red con DCF mejorada a 40 Gbps con DCF mejorada. En este caso la máxima longitud alcanzada con parámetros de DCF mejorada y compensando al 75% es de 930Km, la cual se logra en 40 Gbps en este caso con variaciones de las propiedades de la DCF como aumento en el porcentaje de compensación del 89%; debido a que en 40 Gbps se tienen una dispersión cromática dieciséis veces más alta que la tratada en 10 Gbps, esto se observa en las figura 4.95. Cabe recordar que el parámetro de FOM es diferente para los dos segmentos de red debido a que este es igual a el parámetro de la dispersión sobre la atenuación de la DCF.

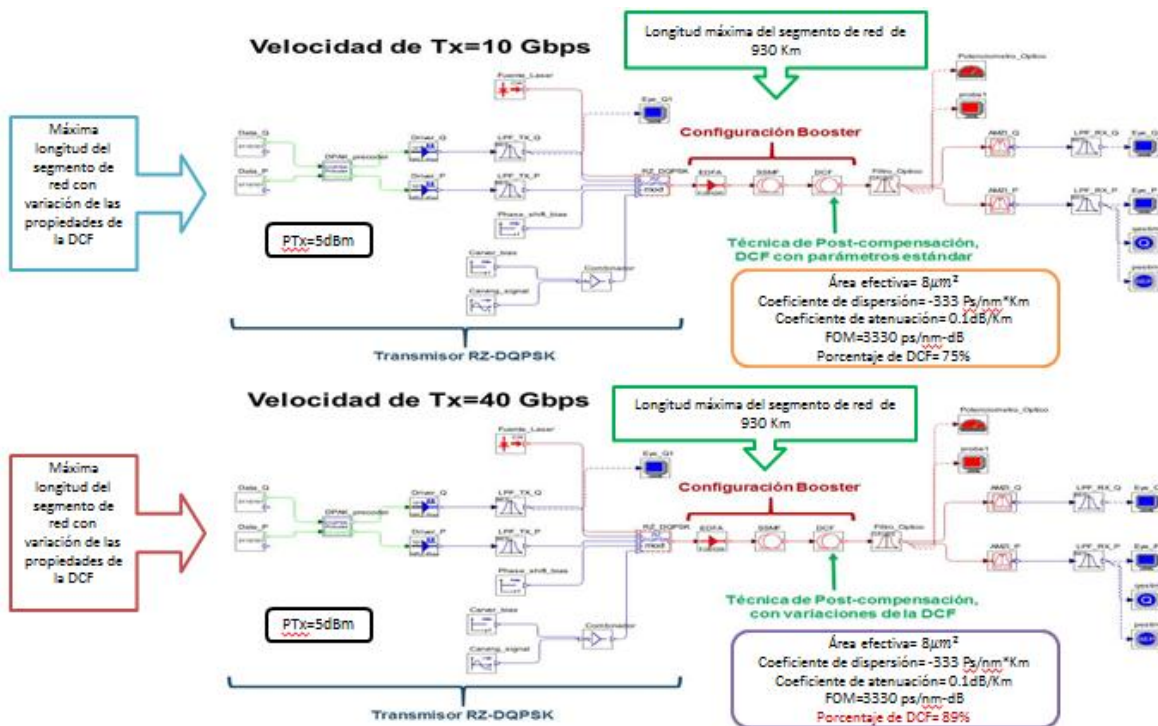


Figura 4.95 Segmentos de red con DCF mejorada con velocidad de transmisión de 10 Gbps y 40 Gbps, para el formato de modulación RZ-DQPSK.

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

- En el presente trabajo de grado se probó que es posible realizar una migración de 10 a 40 Gbps variando las propiedades de la DCF, para esto hay que contar con un formato robusto de modulación RZ-DQPSK, un dispositivo amplificador EDFA y por supuesto la DCF, por el contrario, al utilizar un formato de modulación típico como NRZ-OOK no es posible migrar la red de 10 a 40 Gbps.
- A una velocidad de transmisión de 40 Gbps el solo formato de modulación no logra que el segmento de red donde es implementado, alcance una longitud por arriba de los 20 Km, esto se comprobó con el formato de modulación RZ-DQPSK donde hubo que introducir DCF para alcanzar una longitud de red de los cientos de kilómetros.
- La degradación que tiene una mayor incidencia en 10 y 40 Gbps es la CD, inclusive es dieciséis veces mayor en 40 Gbps; las otras degradaciones de la fibra óptica como fenómenos no lineales son fácilmente contrarrestados con potencias bajas del láser, y la atenuación, ruido, PMD no tienen una mayor incidencia en el segmento de red como fue comprobado en el desarrollo del capítulo 4. Se comprobó que la CD se puede contrarrestar hasta cierto límite, pero no se la puede eliminar totalmente de la red óptica.
- Para un operador de fibra óptica que esté trabajando con formato de modulación NRZ-OOK a 10 Gbps y desee migrar a una tasa mayor de transmisión 40 Gbps, tendrá que cambiar la mayoría de los dispositivos de red; como transmisor, receptor por la implementación del formato de modulación RZ-DQPSK, fibra DCF mejorada y amplificador EDFA configurado en Booster, el único dispositivo de red que no necesita ser cambiado es el tendido de fibra óptica SSMF-28 el cual es funcional para los dos formatos de modulación y las dos velocidades de transmisión. Por lo tanto, aumentar la eficiencia al migrar la tasa de transmisión traería consigo un mayor costo de red a corto plazo.

5.2 Recomendaciones

El trabajo de grado desarrollado es de gran utilidad para el desarrollo de nuevos proyectos de telecomunicaciones, en especial en el área de fibra óptica y para los operadores de redes ópticas que deseen aumentar la capacidad de sus sistemas DWDM.

Se debe definir el entorno de simulación y el alcance del proyecto de investigación, dado que los formatos de modulación reaccionan de diferente manera frente a la variación de las propiedades de la DCF.

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.

De acuerdo a las pruebas realizadas en el presente trabajo de grado, para obtener resultados confiables, se recomienda ejecutar las simulaciones con un número de muestras igual a 128 y 70 ns de tiempo de simulación y con una gran cantidad de parámetros recolectados al simular cada escenario.

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 en la migración de una red DWDM de 10 a 40 Gbps, ante las variaciones de las propiedades de una DCF, tales como:

- Analizar comparativamente el desempeño en la migración de una red DWDM de 10 a 40 Gbps, al implementar diferentes dispositivos compensadores de CD.
- Analizar el desempeño en la migración de una red DWDM de 10 a 40 Gbps para el formato de modulación NRZ-OOK, con diferentes dispositivos de amplificación y variando las propiedades de la DCF.
- Analizar comparativamente el desempeño de los formatos de modulación RZ-DQPSK y NRZ-DQPSK a una tasa de transmisión de 100 Gbps, al variar las propiedades de la DCF.
- Analizar y evaluar el desempeño de los diferentes formatos de modulación a una tasa de transmisión de 40 Gbps, ante las variaciones de las propiedades de la DCF para diferentes tipos de fibra monomodo estándar.
- Realizar un estudio del comportamiento de las propiedades de la DCF para los diferentes formatos de modulación con transmisión de 40 Gbps, variando el láser transmisor del sistema DWDM.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 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, n° 12, pp. 12-19, 2008.
- [2] Mamyshev, P., *et al.*, "40-Gb/s upgradability of 10-GB/S systems," 2004, pp. 23-24.
- [3] 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.
- [4] 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, n° 31, pp. 23-35, Jul-Dic 2011.
- [5] 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.
- [6] "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid," ITU-T Rec. G.694.1, Noviembre 2012.
- [7] "Spectral grids for WDM applications: CWDM frequency grid," ITU-T Rec. G.694.2, Diciembre, 2003.
- [8] J. L. Caizaluisa, "Estudio para la integración de la técnica de multiplexación DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) dentro de un enlace Quito-Guayaquil que utilice SDH como técnica de transmisión para una mediana empresa portadora," Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2009.
- [9] D. F. Alzate, "Retos en la transmisión de 40/100 Gbps sobre fibra óptica," Revista en Telecomunicaciones e Informática, vol. I, n° 2, pp. 23-60, Jul-Oct 2011.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] A. G. Salazar y S. F. Chaves, "Diseño a nivel de simulación de un compensador de dispersión cromática basado en estructuras Mach Zehnder para redes DWDM a 2.5 Gbps," Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2015.
- [13] D. C. Eguizabal e I. A. Muñoz, "Impacto del formato de modulación sobre la ISD en una red DWDM a 10 Gbps y 40 Gbps," Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2015.
- [14] G. Rossi, T. E. Dimmick y D. J. Blumenthal, "Optical Performance Monitoring in Reconfigurable WDM Optical Networks Using Subcarrier Multiplexing," Journal of Lightwave Technology, december 2000, vol. 18, n° 12, pp. 1639-1648.
- [15] Z. Pan, C. Yu y A. E. Wilner, "Optical performance monitoring for the next generation optical communication networks," Optical Fiber Technology, vol. 16, pp. 20-45, 2010.

- [16] R. A. Pinto, "Sistemas de comunicaciones ópticas," Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería, Programa Ingeniería en Telecomunicaciones, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2014.
- [17] L. C. Hinojosa, "Temas Selectos de Fibra Óptica," Tesis de Pregrado, Universidad Autónoma del estado de Hidalgo, Pachuca, México, 2007.
- [18] 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.
- [19] N. Kikuchi, E. Yamada, Y. Shibata y H. Ishii, "High-speed InP-based Mach-Zehnder Modulator for Advanced Modulation Formats," NTT Photonics Laboratories, NTT Corporation, Morinosato Wakamiya, Atsugi, Kanagawa, Japan, 2012.
- [20] 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.
- [21] D. Van den Borne, "Robust Optical Transmission Systems: Modulation and Equalization," Tesis Doctoral, Universidad Técnica de Eindhoven, Holanda, 2008.
- [22] "Optical system design and engineering considerations," ITU-T Rec.G.Supplement39, Septiembre, 2012.
- [23] 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.
- [24] F. Juanni, "The effect of SRS to DWDM Optical System," International Conference on Electrical and Control Engineering, Zhejiang Wanli University, Ningbo, China, 2010.
- [25] H. A. Ballestas, "Análisis del efecto Self Phase Modulation (SPM), en un sistema de comunicación óptico, teniendo en cuenta fenómenos de dispersión," Programa de Ingeniería Electrónica, Área Telecomunicaciones, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, 2013.
- [26] M. González, "Desarrollo de técnicas no lineales para la medida de la distribución longitudinal de dispersión cromática en fibras ópticas monomodo," Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2014.
- [27] G. Silva, "Formatos de Modulcao de uma Portadora Óptica com Deteccao Direta," Universidade de Sao Paulo, Curso de Engenharia Eléctrica com enfase em Electronica, Sao Carlos, Brasil, 2011.
- [28] J. A. Dinamarca, "Análisis de Diagramas de Ojo," Tesis de Pregrado, Universidad Técnica de Federico Santa María, Chile, 2002.
- [29] Corning, "Corning SMF-28 Optical Fiber Product Information," Corning Incorporated, Release V100R004, New York, USA, Abril 2002.
- [30] M. Erman, C. Camus, M. Deason, A. Ortelt, G. Arroyo, I. Liu y A. Paulsrud Revista de Telecomunicaciones de Alcatel, tercer trimestre 1998, Alcatel España, S.A.
- [31] B. Collings, F. Heismann y G. Lietaert, "Reference Guide to Optic Testing," Advanced Fiber Optic Testing High-Speed Fiber Link and Network Characterization, vol. 2, 2010.
- [32] R. A. Pinto, "Sistemas de comunicaciones ópticas," Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería, Programa Ingeniería en Telecomunicaciones, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2014.
- [33] R. Ramaswami y K. N. Sivarajan, Optical Networks: A Practical Perspective, Segunda edición, USA: Morgan Kaufmann Publishers, 2002.

- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] RSoft Design Group Inc, "OptSim User Guide," New York, USA, 2004.
- [37] H. F. Bermúdez y W. D. Jiménez, "Multiplexación por división de longitud de onda – WDM una nueva alternativa para comunicaciones ópticas," Revista investigación Universidad del Quindío, vol. 18, pp. 49-58, 2008.
- [38] Fujikura, "Slope Compensation Dispersion Compensation Fiber Modules (SC-DCF Module)," Optical Fiber Development Department.
- [39] Corning, "Corning PureForm Single-mode Fiber DCM Modules for C-Band, 100% Dispersion Slope Compensation for Standard Single-mode Fiber" Corning Discovering Beyond Imagination, New York, USA. Publicado Marzo 2002.