

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LOS FORMATOS DE
MODULACIÓN RZ-DQPSK Y RZ-PDPSK FRENTE A TÉCNICAS DE
COMPENSACIÓN ÓPTICAS DE LA DISPERSIÓN CROMÁTICA EN REDES
DWDM A 10Gbps.**



**Juan David Herrera Varona
Jennifer Tatiana Toledo Noguera**

Universidad del Cauca

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

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LOS FORMATOS DE
MODULACIÓN RZ-DQPSK Y RZ-PDPSK FRENTE A TÉCNICAS DE
COMPENSACIÓN ÓPTICAS DE LA DISPERSIÓN CROMÁTICA EN REDES
DWDM A 10Gbps.**



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

**Juan David Herrera Varona
Jennifer Tatiana Toledo Noguera**

Director
Mag. Alejandro Toledo Tovar

Universidad del Cauca

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

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. CARACTERIZACIÓN DE LOS FORMATOS DE MODULACIÓN RZ-PDPSK Y RZ-DQPSK, LA CD Y SUS TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS EN REDES DWDM.....	1
1.1 Redes DWDM.....	1
1.2 Formatos de Modulación.	3
1.2.1 DPSK.....	4
1.2.1.1 Transmisor DPSK.	4
1.2.1.2 Receptor DPSK.....	5
1.2.2 PDPSK.	6
1.2.3 DQPSK.....	11
1.2.3.1 Transmisor DQPSK.....	12
1.2.3.2 Receptor DQPSK.....	13
1.3 Dispersión Cromática.	15
1.4 Técnicas de Compensación ópticas para la CD.....	17
1.4.1 Módulo Compensador de Dispersión (DCM).....	18
1.4.2 Fibra de Bragg Grating (FBG).....	18
1.4.3 Fibra Compensadora de Dispersión (DCF).....	18
1.4.3.1 Sub-técnica de post-compensación.....	19
1.4.3.2 Sub-técnica de pre-compensación.	19
1.4.3.3 Sub-técnica compensación simétrica.	20
1.5 Fibra Óptica Monomodo.	21
1.6 Parámetros de monitoreo óptico.	22
1.6.1 Diagrama de ojo.	22
1.6.2 Tasa de error de bit (BER).....	23
1.6.3 Jitter.	23
1.6.4 Factor de Calidad Q.....	23
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y ESCENARIO DE SIMULACIÓN	25
2.1 Modelo simplificado de Red.....	25
2.2 Metodología de Simulación.....	30
2.2.1 Generación de un escenario de simulación y casos de estudio.	31
2.2.2 Ejecución de la simulación.....	33
2.2.3 Plan de evaluación y pruebas.	33
2.2.4 Análisis comparativo de los resultados obtenidos en la simulación.....	35

2.2.5	Especificación de las características y elección del modo de operación de la herramienta de simulación.....	35
CAPÍTULO 3. SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS PARA LA CD EN REDES DWDM.		
37		
3.1	Escenario 1: simulación en ausencia de técnicas de compensación para la dispersión cromática.....	38
3.1.1	Caso 1: simulación en ausencia de técnicas de compensación de la CD, variando el coeficiente de dispersión cromática para el formato RZ-DQPSK.....	39
3.1.2	Caso 2: simulación en ausencia de técnicas de compensación de la CD, variando el coeficiente de dispersión cromática para el formato RZ-PDPSK.....	42
3.1.3	Caso 3: simulación en ausencia de técnicas de compensación de la CD, variando la potencia de transmisión para el formato RZ-DQPSK.	46
3.1.4	Caso 4: simulación en ausencia de técnicas de compensación de la CD, variando la potencia de transmisión para el formato RZ-PDPSK.....	47
3.1.5	Caso 5: simulación en ausencia de técnicas de compensación de la CD, variando el espaciado entre canales para el formato RZ-DQPSK.....	49
3.1.6	Caso 6: simulación en ausencia de técnicas de compensación de la CD, variando el espaciado entre canales para el formato RZ-PDPSK.	51
3.2	Escenario 2: simulación con técnicas de compensación ópticas para la dispersión cromática.....	55
3.2.1	Caso 7: simulación con técnicas de compensación ópticas de la CD, para el formato RZ-DQPSK.....	56
3.2.2	Caso 8: simulación con técnicas de compensación ópticas para la CD, para el formato RZ-PDPSK.	60
3.3	Escenario 3: simulación con efectos lineales y no lineales.	62
3.3.1	Caso 9: simulación con efectos lineales y no lineales, para el formato RZ-DQPSK.....	63
3.3.2	Caso 10: simulación con efectos lineales y no lineales, para el formato RZ-PDPSK.....	65
3.3.3	Caso 11: simulación con efectos lineales y no lineales, variando longitud de DCF para el formato RZ-DQPSK.....	66
3.3.4	Caso 12: simulación con efectos lineales y no lineales, variando longitud de DCF para el formato RZ-PDPSK.....	67
3.3.5	Caso 13: simulación con efectos lineales y no lineales, analizando la potencia de recepción para el formato RZ-DQPSK.	69
3.3.6	Caso 14: simulación con efectos lineales y no lineales, analizando la potencia de recepción para el formato RZ-PDPSK.....	73
3.4	Escenario 4: simulación implementado varios span.....	76

3.4.1	Caso 15: simulación implementando varios span para el formato de modulación RZ-DQPSK.....	76
3.4.2	Caso 16: simulación implementando varios span para el formato de modulación RZ-PDPSK.....	79
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS COMPARATIVOS DEL DESEMPEÑO DE LOS FORMATOS DE MODULACIÓN FRENTE A TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS.....		82
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....		86
5.1	Conclusiones.....	86
5.2	Recomendaciones.....	86
5.3	Trabajos futuros.....	87
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		88

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1	pagina
Figura 1.1 Configuración general de una red WDM [4].	2
Figura 1.2 Comparación entre espectro óptico CWDM y DWDM [5].	2
Figura 1.3 Clasificación de las modulaciones de fase diferencial PDPSK y DQPSK [5].	4
Figura 1.4 Diagrama de constelación DPSK [2].	5
Figura 1.5 Estructura del modulador DPSK [1].	5
Figura 1.6 (a) Estructura RZ-DPSK y (b-e) Diagramas de ojo y espectro de frecuencia a 42,8Gbps: (b) Modulación DPSK, (c) Componente constructiva, (d) Componente destructiva, (e) después de la detección balanceada [1] [2].	6
Figura 1.7 Concepto PDPSK, $\tau < T_b$ [2].	7
Figura 1.8 Espectros de frecuencia a la salida de interferómetro y diagramas de ojo después de la detección balanceada para diferentes retardos [2].	7
Figura 1.9 Estructura de transmisión propuesta: (a) RZ-DPSK, (b) RZ-PDPSK. Salidas de los brazos del interferómetro: (c) Componente constructiva, (d) Componente Destructiva.	8
Figura 1.10 Diagrama de ojo: (a) con receptor balanceado ideal, (b) receptor PDPSK.	9
Figura 1.11 Componente constructiva: (a) Diagrama de ojo. (b) Espectro de frecuencia.	9
Figura 1.12 Componente destructiva: (a) Diagrama de ojo. (b) Espectro de frecuencia.	9
Figura 1.13 Diagrama de ojo de la modulación RZ-DPSK a 10Gbps.	10
Figura 1.14 Demodulación RZ-PDPSK con un retraso de 65ps.	11
Figura 1.15 Diagrama de constelación DQPSK [4].	11
Figura 1.16 Modulación DQPSK [4] [17].	12
Figura 1.17 Estructura demodulador DQPSK [4].	13
Figura 1.18 (a) Estructura RZ-DQPSK y (b,c) Diagramas de ojo RZ-DQPSK: (b) Modulación DQPSK, (c) después de la demodulación de fase [2].	13
Figura 1.19 Estructura de transmisión RZ-DQPSK propuesta.	14
Figura 1.20 Diagrama de ojo RZ-DQPSK: (a) Modulación, (b) Demodulación.	14
Figura 1.21 Efectos Lineales [4].	15
Figura 1.22 Ensanchamiento de un pulso por efecto de la CD [6].	15
Figura 1.23 Esquema general de un mapa de control de dispersión cromática [24].	17
Figura 1.24 Técnica de post-compensación óptica para la CD [23].	19
Figura 1.25 Mapa de dispersión de la técnica de post-compensación óptica para la CD [23].	19
Figura 1.26 Técnica de pre-compensación óptica para la CD [23].	19
Figura 1.27 Mapa de dispersión de la técnica de pre-compensación óptica para la CD [23].	20
Figura 1.28 Técnica de compensación simétrica para la CD [29].	20
Figura 1.29 Dispersión en función de la longitud de onda para fibras monomodo [2].	21
Figura 1.30 Diagrama de ojo generado por la combinación y superposición de unos y ceros [33].	23

Capítulo 2

Figura 2.1 Modelo de red.....	29
Figura 2.2 Escenarios de simulación y casos de estudio.	31
Figura 2.3 Esquema de simulación.....	32
Figura 2.4 Diagrama de flujo para el escenario de simulación.	34

Capítulo 3

Figura 3.1 Parámetros de control avanzado de las fibras.	37
Figura 3.2 Escenario de simulación en ausencia de técnicas de compensación para la CD.	38
Figura 3.3 Parámetros de desempeño en cuadratura para RZ-DQPSK y $D(\lambda)=17\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$: (a) BER vs Longitud, (b) Factor Q vs Longitud.....	39
Figura 3.4 Parámetros de desempeño en fase para RZ-DQPSK y $D(\lambda)=17\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$: (a) BER vs Longitud, (b) Factor Q vs Longitud.....	40
Figura 3.5 (a) Diagrama de ojo del canal 2 en fase y (b) espectro de frecuencia a una distancia de 140 Km para RZ-DQPSK y $D(\lambda)=17\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$	41
Figura 3.6 Parámetros de desempeño en cuadratura para RZ-DQPSK y $D(\lambda)=8\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$: (a) BER vs Longitud, (b) Factor Q vs Longitud.	41
Figura 3.7 Parámetros de desempeño en fase para RZ-DQPSK y $D(\lambda)=8\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$: (a) BER vs Longitud, (b) Factor Q vs Longitud.....	42
Figura 3.8 (a) Diagrama de ojo del canal 2 en fase y (b) espectro de Frecuencia a una distancia de 308 Km para RZ-DQPSK y $D(\lambda)=8\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$	42
Figura 3.9 Parámetros de desempeño para RZ-PDPSK y $D(\lambda)=17\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$: (a) BER vs Longitud y (b) Factor Q vs Longitud.....	43
Figura 3.10 (a) Diagrama de ojo y (b) espectro de frecuencia del canal 1 a una distancia de 70 Km para RZ-PDPSK y $D(\lambda)=17\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$	44
Figura 3.11 Parámetros de desempeño para RZ-PDPSK y $D(\lambda)=8\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$: (a) BER vs Longitud y (b) Factor Q vs Longitud.....	44
Figura 3.12 (a) Diagrama de ojo del canal 1 y (b) espectro de frecuencia a una distancia de 156Km para RZ-PDPSK y $D(\lambda)=8\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$	45
Figura 3.13 Parámetros de desempeño en fase para RZ-DQPSK y variación de potencia de transmisión: BER vs Longitud.....	47
Figura 3.14 Parámetros de desempeño en fase para RZ-DQPSK y variación de potencia de transmisión: factor Q vs Longitud.	47
Figura 3.15 Parámetros de desempeño para RZ-PDPSK y variación de potencia de transmisión: BER vs Longitud.....	48
Figura 3.16 Parámetros de desempeño para RZ-PDPSK y variación de potencia de transmisión: Factor Q vs Longitud.	48
Figura 3.17 Parámetros de desempeño en ausencia de técnicas de compensación ópticas y diferentes separación de canales para RZ-DQPSK: (a) BER vs Longitud y (b) factor Q vs Longitud.	49
Figura 3.18 Diagramas de ojo con separación de (a) 25GHz, (b) 50GHz y (c) 100GHz para RZ-DQPSK.....	50

Figura 3.19 Espectros de frecuencia con separación de (a) 25GHz, (b) 50GHz y (c) 100GHz para RZ-DQPSK.....	51
Figura 3.20 Parámetros de desempeño en ausencia de técnicas de compensación ópticas y diferentes separación de canales para RZ-PDPSK: (a) BER vs Longitud y (b) factor Q vs Longitud.	52
Figura 3.21 Diagramas de ojo con separación de (a) 25GHz, (b) 50GHz y (c) 100GHz para RZ-PDPSK.	53
Figura 3.22 Espectros de frecuencia con separación de (a) 25GHz, (b) 50GHz y (c) 100GHz para RZ-PDPSK.	54
Figura 3.23 Escenarios de simulación con técnicas de compensación ópticas y configuraciones del amplificador EDFA.	55
Figura 3.24 Escenario de simulación con técnicas de post-compensación para la CD y amplificación Booster.	56
Figura 3.25 Parámetros de desempeño con técnica de post-compensación y diferentes configuraciones del amplificador para RZ-DQPSK en fase: (a) BER vs %Compensación y (b) factor Q vs %Compensación.....	57
Figura 3.26 Parámetros de desempeño con técnica de pre-compensación y diferentes configuraciones del amplificador para RZ-DQPSK en fase: (a) BER vs %Compensación y (b) factor Q vs %Compensación.....	58
Figura 3.27 Parámetros de desempeño con técnica de compensación simétrica y diferentes configuraciones del amplificador para RZ-DQPSK en fase: (a) BER vs %Compensación y (b) factor Q vs %Compensación.....	59
Figura 3.28 Parámetros de desempeño con técnicas de compensación ópticas y configuración del amplificador Booster para RZ-DQPSK: (a) BER vs %Compensación y (b) factor Q vs %Compensación.....	60
Figura 3.29 Escenario de simulación con técnica de post-compensación para la CD y amplificación inline.	61
Figura 3.30 Parámetros de desempeño con técnicas de compensación ópticas y diferentes configuraciones del amplificador para RZ-PDPSK: (a) BER vs %Compensación y (b) factor Q vs %Compensación.....	62
Figura 3.31 Parámetros de control avanzado de las fibras con efectos lineales y no lineales.....	63
Figura 3.32 Parámetros de desempeño con técnicas de compensación ópticas y configuración Booster para RZ-DQPSK teniendo en cuenta los efectos lineales y no lineales: (a) BER vs %Compensación y (b) factor Q vs %Compensación.....	64
Figura 3.33 Parámetros de desempeño con técnicas de compensación ópticas y configuración Booster para RZ-DQPSK: (a) BER vs %Compensación y (b) factor Q vs %Compensación. (1) Con efectos de CD y atenuación, (2) pre-compensación con EL y ENL, (3) post-compensación con EL y ENL, (4) compensación simétrica con EL y ENL.	65
Figura 3.34 Parámetros de desempeño con técnicas de compensación ópticas para RZ-PDPSK teniendo en cuenta los efectos lineales y no lineales: (a) BER vs %Compensación y (b) factor Q vs %Compensación.....	66
Figura 3.35 Máxima distancia del enlace variando la DCF, para RZ-DQPSK.	67

Figura 3.36	Máxima distancia del enlace variando la DCF, para RZ-PDPSK.....	68
Figura 3.37	Diagrama de Ojo para DQPSK, sin amplificación, con amplificador en configuración Booster (a) G=10dB y (b) G=12dB.	70
Figura 3.38	Espectros de frecuencia para DQPSK, sin amplificación, con amplificador en configuración Booster (a) G=10dB y (b) G=12dB.	70
Figura 3.39	Disminución de fibra principal limitando en potencia para RZ-DQPSK, con compensación y ganancia del amplificador de 10dB.	71
Figura 3.40	Diagrama de ojo y espectro de frecuencia limitando el enlace en potencia..	71
Figura 3.41	Potencia de transmisión de 20dBm, para RZ-DQPSK: (a) Diagrama de ojo y (b) Espectro de frecuencia.....	72
Figura 3.42	Post-compensación para las configuraciones del amplificador.....	74
Figura 3.43	Pre-compensación para las configuraciones del amplificador en RZ-PDPSK.	74
Figura 3.44	Compensación simétrica para las configuraciones del amplificador en RZ-PDPSK.	74
Figura 3.45	Mejor amplificación para cada técnica de compensación en RZ-PDPSK.	75
Figura 3.46	Máxima longitud a diferentes porcentajes de compensación.....	78
Figura 3.47	Máxima distancia alcanzable a espaciamentos de 50 y 100GHz.	79
Figura 3.48	(a) Diagrama de ojo y (b) espectro de frecuencia para RZ-DQPSK a una separación de canales de 50GHz.....	79
Figura 3.49	(a) Diagrama de ojo y (b) espectro de frecuencia para RZ-PDPSK, en configuración back to back y una separación de canales de 50GHz.	81

LISTA DE TABLAS

Capítulo 1	pagina
Tabla 1.1 Característica redes WDM [5].	3
Tabla 1.2 Parámetros de la fibra óptica monomodo ITU-T G.652 [5].	22
Capítulo 2	
Tabla 2.1 Parámetros para diferentes tipos de DCF [6].	26
Tabla 2.2 Plan de frecuencias para 4 canales a 25, 50 y 100GHz.	29
Tabla 2.3 Características y parámetros del modelo simplificado de red.	30
Capítulo 3	
Tabla 3.1 Medidas de distancia, BER, factor Q, potencia en recepción, del escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK.	45
Tabla 3.2 Nivel de compensación y longitud de DCF para RZ-DQPSK.....	57
Tabla 3.3 Ganancias y potencias de recepción para diferentes niveles de post-compensación sobre RZ-DQPSK.	57
Tabla 3.4 Ganancias y potencias de recepción para diferentes niveles de pre-compensación sobre RZ-DQPSK.	58
Tabla 3.5 Ganancias y potencias de recepción para diferentes niveles de compensación simétrica sobre RZ-DQPSK.....	59
Tabla 3.6 Porcentaje de compensación y longitud de DCF para RZ-PDPSK.	61
Tabla 3.7 Potencias de recepción para las técnicas con diferentes niveles de compensación en RZ-PDPSK.	62
Tabla 3.8 Mejor técnica según el nivel de compensación para RZ-DQPSK en configuración Booster.....	64
Tabla 3.9 Ganancias y potencias de recepción para los niveles de compensación en Booster sobre RZ-DQPSK teniendo en cuenta EL y ENL.....	64
Tabla 3.10 Potencias de recepción para las técnicas con diferentes niveles de compensación, teniendo en cuenta los EL y ENL sobre RZ-PDPSK.	66
Tabla 3.11 Variación de la ganancia del EDFA en configuración Booster sin implementar técnica de compensación.	69
Tabla 3.12 Nivel de compensación y longitud de DCF para 158Km de SMF-28e+.	71
Tabla 3.13 Variación de potencia de transmisión sin implementar técnicas de compensación sobre RZ-DQPSK.	72
Tabla 3.14 Nivel de compensación y longitud de DCF para 74Km de SMF-28e+.	73
Tabla 3.15 Variación de la potencia de transmisión sin implementar técnicas de compensación para RZ-PDPSK.	75
Tabla 3.16 Longitud máxima alcanzable con varios span de fibra y una separación de canales de 100GHz para RZ-DQPSK.....	77
Tabla 3.17 Longitud máxima alcanzable con varios span de fibra y una separación de canales de 50GHz para RZ-DQPSK.....	78

Tabla 3.18 Longitud máxima alcanzable con varios span de fibra y una separación de canales de 100GHz para RZ-PDPSK. 80

Capítulo 4

Tabla 4.1 Análisis comparativo del desempeño de los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK en una red DWDM a 10Gbps, frente a las técnicas de compensación ópticas de la CD. 85

LISTA DE ACRÓNIMOS

AMI	Alternating Mark Inversion, Inversión de Marcas Alternadas.
ASK	Amplitude-Shift Keying, Modulación por Desplazamiento de Amplitud.
BER	Bit Error Rate, Tasa de Error de bit.
CD	Chromatic Dispersion, Dispersión Cromática.
CSF	Cutoff Shifted Fiber, Fibra con Corte Desplazado.
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing, Multiplexación por División de Longitud de Onda Ligera.
DB	Duo Binary, Dúo Binaria.
DCF	Dispersion Compensating Fiber, Fibra Compensadora de Dispersión.
DCM	Dispersion Compensation Module, Modulo Compensador de Dispersión.
DPSK	Differential Phase Shift Keying, Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase.
DSF	Dispersion Shifted Fiber, Fibra de Dispersión Desplazada.
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying, Modulación por Desplazamiento por Cuadratura Diferencial de Fase.
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing, Multiplexación por División en longitudes de Onda Densas.
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier, Amplificador de Fibra Dopada con Erblio.
EL	Efectos Lineales
ENL	Efectos No Lineales
FBG	Fiber Bragg Grating, Fibra de Bragg Grating.
FOM	Figure of Merit, Figura de Mérito.
FSR	Free Spectral Range, Rango Espectral Libre.
FWM	Four-Wave Mixing, Mezcla de Cuatro Ondas.
Gbps	Gigabit per Second, Gigabit por Segundo.
GVD	Group Velocity Dispersion, Dispersión de Velocidad de Grupo.

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
ISI	Intersymbol Interference, Interferencia entre Símbolos.
ITU-UIT	International Telecommunication Union, Unión Internacional de Telecomunicaciones.
MAN	Metropolitan Area Network, Red de Área Metropolitana.
MZI	Mach-Zehnder interferometer, Interferómetro Mach-Zehnder.
MZM	Mach-Zehnder Modulator, Modulador Mach-Zehnder.
NRZ	Non Return to Zero, No Retorno a Cero.
NZDSF	Non Zero Dispersion Shifted Fiber, Fibra de Dispersión Desplazada no Nula.
ODM	Optical Dispersion Management, Gestión de la Dispersión Óptica.
OOK	On-Off Keying, Modulación Encendido-Apagado.
OSNR	Optical signal to noise ratio, Relación Señal a Ruido Óptico.
PDPSK	Partial Differential Phase Shift Keying, Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase Parcial.
PM	Phase Modulator, Modulador de Fase.
PMD	Polarization Mode Dispersion, Dispersión por Modo de Polarización.
PSK	Phase Shift Keying, Modulación por Desplazamiento de Fase.
RZ	Return to Zero, Retorno a Cero.
SMF-28e+	Special Single Mode Fiber, Fibra Monomodo Especial.
SPM	Self-Phase Modulation, Modulación de Auto-fase.
SSMF	Standard Single Mode Fiber, Fibra Monomodo Estándar.
T_b	Bit Period, Periodo de Bit.
XPM	Cross-Phase Modulation, Modulación de Fase Cruzada.
WDM	Wavelength Division Multiplexing, Multiplexación por División en longitudes de Onda.

INTRODUCCIÓN.

Debido al aumento de usuarios y grandes exigencias de anchos de banda, se hace necesaria la implementación de tecnologías avanzadas sobre redes ópticas de 10Gbps, de las cuales, las más representativas son las redes de Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*), que surgieron para suplir la necesidad de brindar mayor capacidad de transmisión a largas distancias, que requieren la utilización de formatos de modulación avanzados y así disminuir los efectos que degradan la señal, tales como: atenuación, ruido, Dispersión Cromática (CD, *Chromatic Dispersion*), Dispersión por Modo de Polarización (PMD, *Polarization Mode Dispersion*), Modulación de Fase Inducida (SPM, *Self Phase Modulation*), Modulación de Fase Cruzada (XPM, *Cross Phase Modulation*), Mezcla de Cuatro Ondas (FWM, *Four Wave Mixing*), entre otras, para hacer más eficiente el uso del espectro óptico.

La Modulación Encendido-Apagado (OOK, *On-Off Keying*) es la más usada en redes de 10Gbps por su fácil implementación y bajos costos; pero debido a diferentes exigencias que se presentan por el gran auge de las comunicaciones, se hace necesaria la implementación de formatos de modulación más eficientes espectralmente, con los cuales, sea posible transmitir un mayor flujo de información. Para este trabajo de grado, los formatos de modulación avanzados que se estudian son Retorno a Cero-Modulación por Desplazamiento por Cuadratura Diferencial de Fase (RZ-DQPSK, *Return to Zero-Differential Quadrature Phase Shift Keying*) y Retorno a Cero-Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase Parcial (RZ-PDPSK, *Return to Zero-Partial Differential Phase Shift Keying*) que presentan una mayor robustez a los efectos lineales y no lineales de la fibra, junto con una mayor capacidad, mayor eficiencia espectral y resistencia al ruido [1].

También, existen múltiples estudios a nivel mundial acerca de las técnicas de compensación ópticas para los efectos de la CD en diferentes modulaciones, la implementación de estas técnicas permite obtener mayores velocidades por longitud de onda y alcanzar una mayor distancia del enlace.

Lo expuesto anteriormente dio origen a este trabajo de grado, que presenta una investigación de la tolerancia de dos formatos de modulación frente a técnicas de compensación ópticas de la CD en redes DWDM a 10Gbps, y de esta forma consolidar un conocimiento que puede ayudar a los operadores a definir soluciones que den soporte a nuevas exigencias.

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

Capítulo 1. Caracterización de formatos de modulación frente a la CD en redes DWDM a 10Gbps.

En este capítulo se presenta una caracterización de las redes WDM haciendo énfasis en DWDM; posteriormente, se realiza una descripción de los formatos de modulación RZ-PDPSK, RZ-DQPSK y de la dispersión cromática; seguido por técnicas de compensación ópticas para la CD y finalmente se presentan algunos de los parámetros de monitoreo ópticos, primordiales para el diseño de una red de comunicaciones ópticas.

Capítulo 2. Metodología y escenario de simulación.

Se define un modelo simplificado de red, posteriormente se define la metodología de simulación para generar un único escenario, para los diferentes casos de estudio según las modulaciones a trabajar; además, se establece la herramienta de simulación OptSim de Rsoft¹, que permite evaluar el desempeño de las diferentes técnicas de compensación para la CD.

Capítulo 3. Simulación de las técnicas de compensación ópticas para la CD en los formatos RZ-PDPSK y RZ-DQPSK.

Simulación de los formatos de modulación frente a las técnicas de compensación ópticas de la CD, mediante el escenario definido en el capítulo 2.

Capítulo 4. Análisis comparativos del desempeño de los formatos de modulación frente a técnicas de compensación ópticas.

Se presenta una comparación entre los formatos de modulación, y su comportamiento frente a las técnicas de compensación ópticas evaluadas en el capítulo 3, con el fin de establecer cual presenta un desempeño óptimo en una red DWDM a 10Gbps.

Capítulo 5. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

Finalmente en este capítulo se presenta una serie de conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros a desarrollar en esta área.

¹ www.rsoftdesign.com

CAPÍTULO 1. CARACTERIZACIÓN DE LOS FORMATOS DE MODULACIÓN RZ-PDPSK Y RZ-DQPSK, LA CD Y SUS TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS EN REDES DWDM.

Las redes de Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*), presentan dificultades para responder a las degradaciones en la transmisión. Para combatirlas, se hace uso de formatos de modulación avanzados que tengan una alta eficiencia espectral, sean más robustos al ruido y a la distorsión, como: RZ-PDPSK y RZ-DQPSK. Además, al aumentar la longitud de los enlaces y la velocidad de transmisión se hace necesario implementar técnicas de compensación ópticas como los Módulos Compensadores de Dispersión (DCM, *Dispersion Compensation Module*), basados en Fibra Compensadora de Dispersión (DCF, *Dispersion Compensating Fiber*), que gracias a sus propiedades contribuyen a disminuir las degradaciones causadas por la Dispersión Cromática (CD, *Chromatic Dispersion*) [2].

Para el desarrollo del presente capítulo, inicialmente, se hace una breve descripción de redes DWDM, se caracterizan² los formatos de modulación propuestos y la CD; posteriormente, se realiza una descripción de las técnicas de compensación ópticas, identificando sus principales propiedades; finalmente, se hace una breve descripción de algunos parámetros de desempeño, que serán de utilidad para brindar información acerca de la calidad del enlace de telecomunicaciones.

1.1 Redes DWDM.

Las redes de Multiplexación por División de longitud de Onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*), son ampliamente usadas en telecomunicaciones debido a que permiten el transporte de un mayor flujo de información, al transmitir varias longitudes de onda por un único medio, en el cual las señales ópticas generadas por N transmisores son multiplexadas en una única fibra. La fibra óptica es un medio de transmisión con un coeficiente de atenuación pequeño y un gran ancho de banda; sin embargo, a medida que la señal viaja por este medio su potencia va disminuyendo, haciendo necesaria la implementación de amplificadores ópticos para recuperar la potencia de la señal y mantenerla dentro de la sensibilidad del receptor. [3] [4].

La figura 1.1 muestra la configuración general de una red WDM, la cual consta de cinco partes: transmisor, multiplexor, fibra óptica, demultiplexor y receptor. En los que cada longitud de onda forma un canal óptico y se trata de forma independiente del resto de canales [3].

²Define los formatos de modulación, mediante una descripción de la estructura general tanto de transmisión como de recepción; además, utiliza diagramas de ojo y espectros de frecuencia que se obtienen mediante el simulador, lo que está soportado por la teoría; también, define la CD mediante expresiones matemáticas y explica el efecto degradante que causa a la señal.



Figura 1.1 Configuración general de una red WDM [4].

Dentro de WDM actualmente existen dos clasificaciones, éstas son: DWDM y Multiplexación por División de Longitud de Onda Liger (CWDM, *Coarse wavelength Division Multiplexing*); CWDM se define por longitudes de onda, mientras que DWDM por frecuencias, la cual logra transportar más canales por una única fibra, pero su implementación y operación es más costosa. En la figura 1.2 se presenta una comparación de la división del espectro para DWDM y CWDM [5].

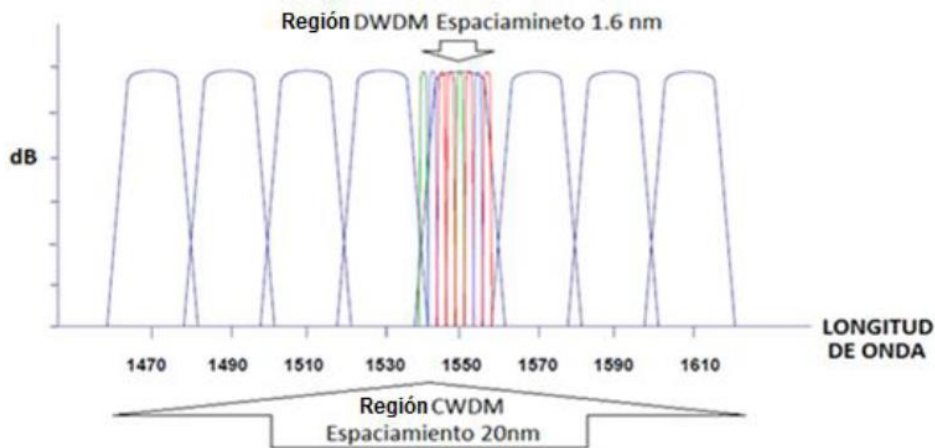


Figura 1.2 Comparación entre espectro óptico CWDM y DWDM [5].

Algunas características de estos dos tipos de redes se muestran en la tabla 1.1, en la que se plantea que CWDM es utilizada para cortas distancias con una capacidad por canal baja comparada con DWDM; además, utiliza un gran espaciamento entre canales haciendo ineficiente el uso del espectro óptico, por lo cual la tecnología DWDM es más utilizada hoy en día [5].

CARACTERÍSTICAS	CWDM	DWDM (MAN-WAN) ³	DWDM Largo Alcance
Espaciamiento de los Canales	20nm (2500GHz)	0.8nm (100 GHz)	0.4nm (50 GHz)
Ventanas Utilizadas	O, E, S, C, L	C, L	C, L, S
Canales por Fibra	4 – 16	32 – 80	80 – 160
Capacidad por Canal	2.5 Gbps	10 Gbps	10 – 40Gbps
Distancias Típicas	Hasta 80Km	Cientos de Km	Miles de Km
Costos	Bajo	Medio	Alto

Tabla 1.1 Característica redes WDM [5].

Una red DWDM se caracteriza por: amplificar las longitudes de onda sin tener que convertirlas a señales eléctricas, tener independencia entre protocolos y capacidades, transportar señales con diferentes velocidades y transmitir diferentes números de lambdas multiplexadas en una única fibra. Actualmente, se pueden conseguir hasta 320 canales ópticos, llegando cada uno de ellos a una velocidad de 40Gbps a nivel comercial sobre cualquier formato de transmisión [6].

Aunque las redes DWDM son muy efectivas en la transmisión de información, también presentan limitaciones debido a que su desarrollo y evolución se encuentran en un punto intermedio, igualmente son muy dependientes de las características de las fibras, lo cual puede limitar el número de lambdas. Otro limitante es la calidad de los componentes ópticos, como láseres con control de temperatura, sistemas de refrigeración, multiplexores y demultiplexores, que al ser más desarrollados implican un aumento en el costo total de la red a instalar [6].

Estas redes se tienen implementar mediante la transmisión unidireccional, por ello se debe recurrir a sistemas en anillo y con doble fibra para conseguir comunicación completa [7]. Por lo cual, para el análisis de esta red se escoge un enlace punto a punto que representa la conexión de dos nodos de forma unidireccional, que presenta altas velocidades de transmisión por lambda sobre distancias del orden de cientos de kilómetros [5] [8].

Como en redes DWDM se reduce el espaciado entre canales (actualmente a 10Gbps el espaciado típico de canales es de 100GHz [5] [9]), se aumenta la capacidad del canal y las distancias de transmisión, entonces se hace necesario el uso de formatos de modulación avanzados, para mitigar los efectos no deseados causados por las características no lineales de la fibra.

1.2 Formatos de Modulación.

Las modulaciones⁴ empleadas en redes ópticas son digitales y están basadas en cuatro características para el transporte de información: amplitud, frecuencia, fase y polarización. Cabe resaltar, que los formatos que codifican la información en la fase no se ven afectados por cambios en la amplitud de la señal, lo que se refleja en una mayor robustez.

³ Red de Área Metropolitana (MAN, *Metropolitan Area Network*) - Red de Área Amplia (WAN, *Wide Area Network*).

⁴ La modulación es la variación de parámetros de una señal (portadora), en función de la señal de información (moduladora).

Dentro de las modulaciones de fase están las convencionales y las diferenciales⁵, éstas últimas son las que han generado mayor atención, siendo utilizadas ampliamente a altas velocidades de transmisión. En la figura 1.3 se visualiza la clasificación de las modulaciones de fase diferencial PDPSK y DQPSK, ya que son los formatos a analizar en el actual trabajo de grado.

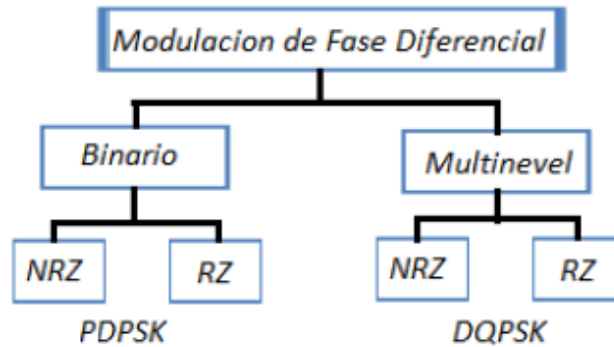


Figura 1.3 Clasificación de las modulaciones de fase diferencial PDPSK y DQPSK [5].

A continuación, se hace una caracterización de las modulaciones: DPSK, PDPSK y DQPSK; inicialmente se detalla la Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase (DPSK, *Differential Phase Shift Keying*).

1.2.1 DPSK.

Esta modulación se ha implementado ampliamente en redes DWDM a 10Gbps, por presentar una robustez superior comparada con OOK frente a las no linealidades de la fibra [1].

En DPSK la información se transmite en cambios diferenciales de fase en la portadora óptica, se representan en saltos de 0 y π radianes como se muestra en la figura 1.4. Si el bit a transmitir es un 1 lógico se producirá un cambio de π radianes; en cambio, si el bit a transmitir es un 0 lógico no se presenta cambio de fase sobre la portadora óptica, es por esto que se utiliza la fase de un bit como referencia de fase del bit siguiente [1].

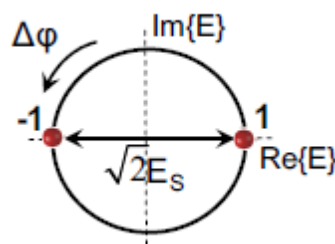


Figura 1.4 Diagrama de constelación DPSK [2].

⁵ Modulación de fase convencional: la información se codifica en el valor del salto de fase. Modulación de fase diferencial: la información está contenida en el valor del salto de fase con relación al bit anterior.

1.2.1.1 Transmisor DPSK.

Existen dos métodos para generar DPSK, haciendo uso de un Modulador de Fase (PM, *phase modulator*) o un Modulador Mach-Zehnder (MZM, *Mach-Zehnder Modulator*), este último produce saltos de π radianes, los cuales se representan solo en el eje real, haciendo que sea de mayor implementación [1].

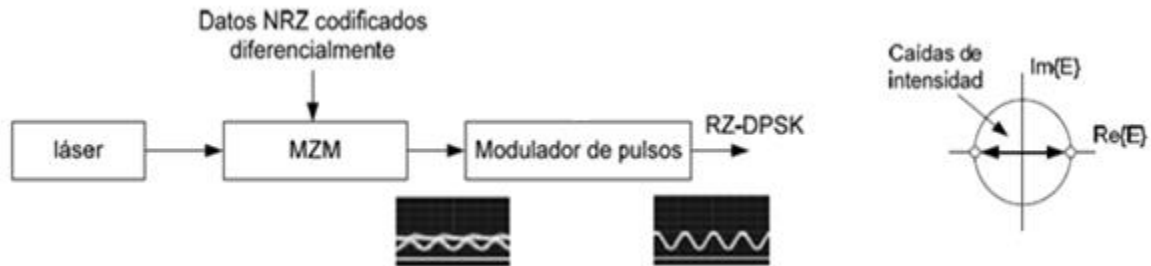


Figura 1.5 Estructura del modulador DPSK [1].

En la figura 1.5 se expone el esquema completo del transmisor para generar DPSK, primero, se encuentra el láser de emisión continua seguido por un MZM para la codificación de los datos en NRZ-DPSK; posteriormente, el modulador de pulsos para pasar a una codificación RZ (lo cual es opcional de acuerdo al formato de modulación que se quiera obtener) y finalmente obtener RZ-DPSK. Para el modulador de pulsos, también se utiliza un MZM ya que reduce las imperfecciones creando pulsos RZ sin chirp [1].

1.2.1.2 Receptor DPSK.

La demodulación se hace por medio de detección balanceada que se implementa con Interferómetro Mach-Zehnder (MZI, *Mach-Zehnder interferometer*); cuando la señal llega a recepción atraviesa el MZI, el cual genera dos señales que contienen la misma información, pero a una de ellas se le introduce un retardo de duración del Periodo de Bit (T_b , *Bit Period*) de la señal transmitida [1].

Al comparar los bits, si llegan en fase se genera una interferencia constructiva que contiene la señal más ruido, mientras que si llegan en desfase se anulan dejando solo ruido; esto permite al detector balanceado hacer una comparación y restar la potencia de ruido de la potencia de la señal transmitida, mejorando de esta forma la recepción de la señal [1].

La función de transferencia del MZI, se define a través de ecuación 1.1:

$$u_{\pm}(t) = r(t) \pm e^{j\Delta\phi} r(t - \tau) \quad (1.1)$$

En donde $u_{\pm}(t)$ representa las componentes constructiva y destructiva; $r(t)$ es la señal de entrada, $\Delta\phi$ la diferencia de fase entre los dos brazos del interferómetro (idealmente $\Delta\phi = 0 \pm \pi$), y τ es el retardo. El desplazamiento de fase y la señal de entrada, hacen que a la salida de uno de los brazos del interferómetro se presente una interferencia destructiva y en la otra una interferencia constructiva, donde las componentes de la señal tienen una estructura y espectros de frecuencia diferentes, pero transportan la misma información [2].

El espectro óptico del puerto de salida constructivo tiene un lóbulo central con una anchura espectral de $B_0 = 1/T_b$, lo que resulta en la modulación duobinaria; en cambio, en el espectro óptico destructivo se suprime la frecuencia portadora, obteniéndose una señal de Inversión de Marcas Alternadas (AMI, *Alternating Mark Inversion*) [2].

En la figura 1.6 se encuentra la estructura general de DPSK con su respectivo transmisor y receptor; se pueden distinguir los diagramas de ojo y espectros de frecuencia en diferentes puntos, los cuales posteriormente servirán como guía para realizar las comparaciones con los resultados arrojados por el simulador. La figura 1.6b muestra el diagrama en tiempo exactamente después de la modulación de fase; la figura 1.6c y 1.6d son los diagramas y espectros constructivo y destructivo respectivamente, mientras que la figura 1.6e es la salida después de realizar la detección balanceada, es decir, la diferencia de las dos señales anteriores.

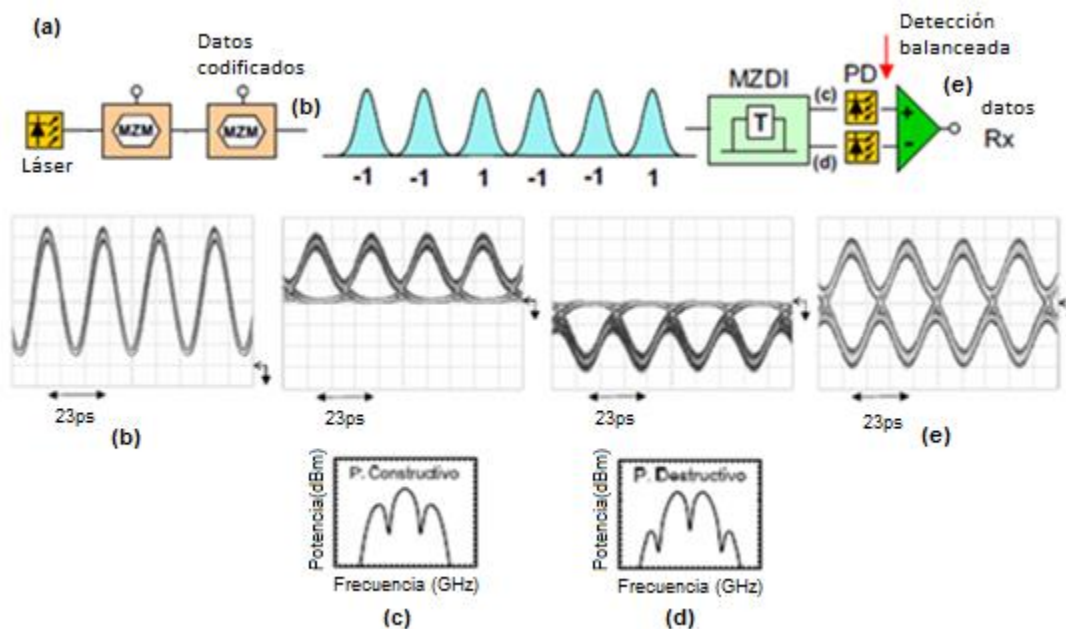


Figura 1.6 (a) Estructura RZ-DPSK y (b-e) Diagramas de ojo y espectro de frecuencia a 42,8Gbps: (b) Modulación DPSK, (c) Componente constructiva, (d) Componente destructiva, (e) después de la detección balanceada [1] [2].

1.2.2 PDPSK.

Esta modulación tiene un comportamiento similar a la modulación DPSK, pero su recepción es mejor por ser más sensible a los cambios de fase, su diferencia se basa en los brazos del MZI en el que uno de ellos presenta un retardo menor al T_b de la señal transmitida; entonces, el bit interfiere parcialmente con el adyacente y parcialmente consigo mismo, de esta forma se logra contrarrestar la degradación que ha sufrido la señal al ser transmitida por el medio óptico [1].

La figura 1.7 representa el concepto de PDPSK para $\tau < T_b$ (τ es el retardo del MZI), la señal y su copia retardada son sólo parcialmente superpuestas, lo que resulta en la interferencia al principio y al final del período de bit [2].

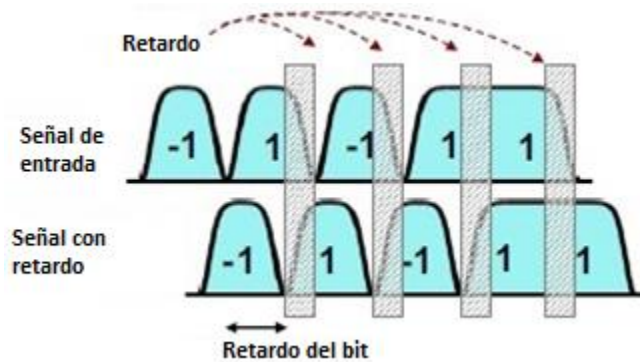


Figura 1.7 Concepto PDPSK, $\tau < T_b$ [2].

En el momento que el bit interfiere parcialmente consigo mismo, se crea una interferencia constructiva generando una mayor potencia a los bits después de la demodulación, esta ganancia de potencia minimiza la interferencia destructiva que causa la Interferencia entre Símbolos (ISI, *Intersymbol Interference*) [2].

El proceso de reducir el retraso de los brazos del MZI a un valor menor al T_b , representa una mejora significativa en la tolerancia de la CD sin tener grandes repercusiones en la Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR, *Optical Signal To Noise Ratio*); esto se debe a que la señal de salida del interferómetro, soporta un filtrado de banda mucho más estrecho al tener menor ancho de banda que una señal DPSK [1]. En la figura 1.8 se muestran los diagramas de ojo y espectros de frecuencia para diferentes retardos del interferómetro.

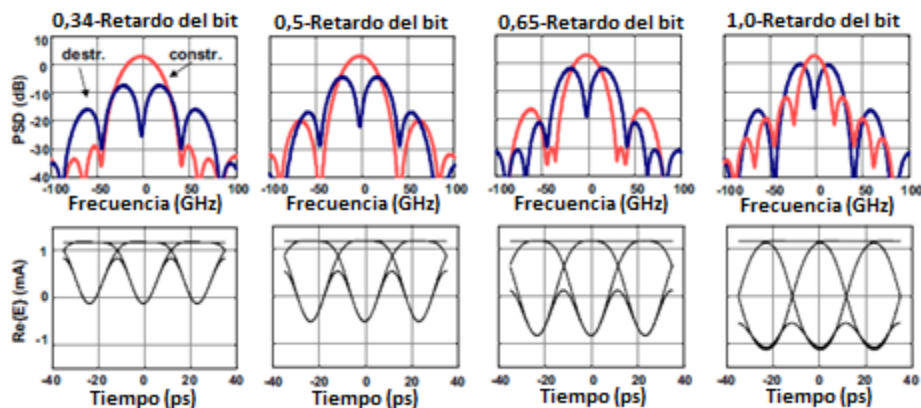


Figura 1.8 Espectros de frecuencia a la salida de interferómetro y diagramas de ojo después de la detección balanceada para diferentes retardos [2].

A continuación, se realiza una comparación de la base teórica con diagramas y espectros arrojados por la herramienta de simulación OptSim, para RZ-DPSK y RZ-PDPSK en configuración back-to-back, con el fin de validar la estructura de transmisión propuesta para los formatos de modulación.

En la figura 1.9 se muestra la estructura de transmisión de RZ-DPSK y RZ-PDPSK propuestas para este trabajo de grado; en la figura 1.9a se realiza la demodulación de fase haciendo uso de un receptor balanceado ideal, dado que este receptor no permite variar el retardo de los brazos del interferómetro para conseguir la demodulación PDPSK, se hace necesario realizar el montaje de la figura 1.9b, el cual consta de un MZI, dos fotodetectores, un restador y un filtro eléctrico. Esta estructura (figura 1.9b), se encuentra soportada por la base teórica expuesta en la figura 1.6a y con la patente de esta

modulación publicada el 8 de noviembre del 2007 por la World Intellectual Property Organization (numero internacional de publicación WO 2207/127208 A2) [10].

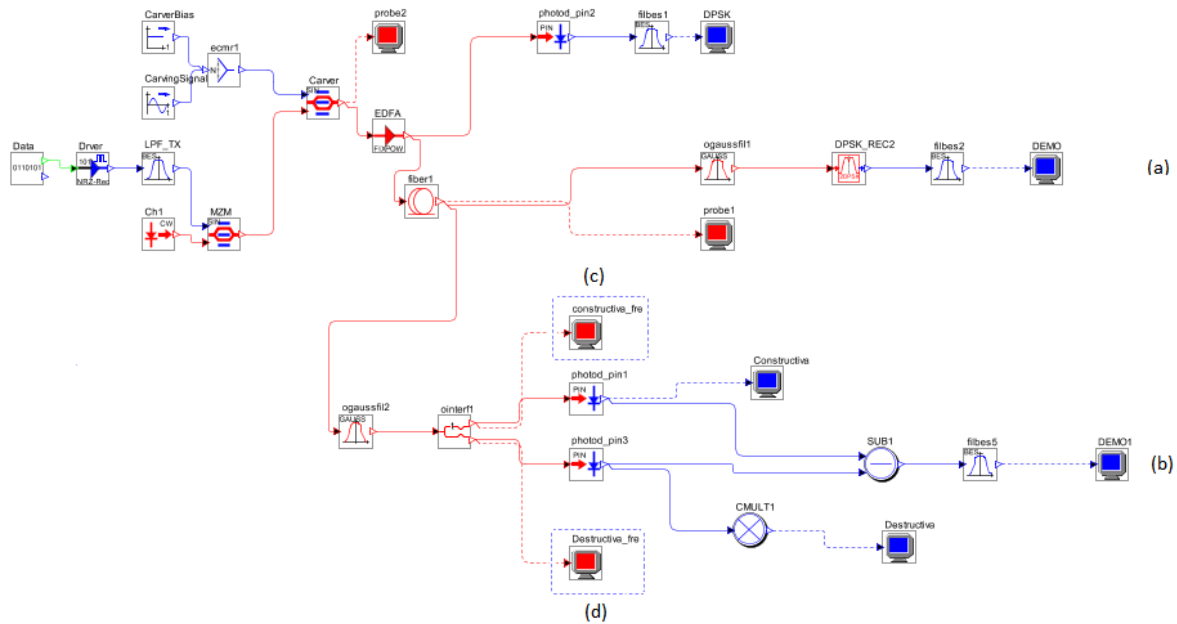


Figura 1.9 Estructura de transmisión propuesta: (a) RZ-DPSK, (b) RZ-PDPSK. Salidas de los brazos del interferómetro: (c) Componente constructiva, (d) Componente Destructiva.

La figura 1.10a y 1.10b exponen los diagramas de ojo de las demodulaciones DPSK y PDPSK respectivamente; PDPSK tiene un retardo de 100ps correspondientes al valor del periodo del bit⁶, esto hace que PDPSK asuma el comportamiento de DPSK. Además, al realizar una comparación entre la figura 1.10 y figura 1.6e se ve que son similares, por lo cual la figura 1.6e le da un soporte teórico a la simulación y esquema propuesto para PDPSK.

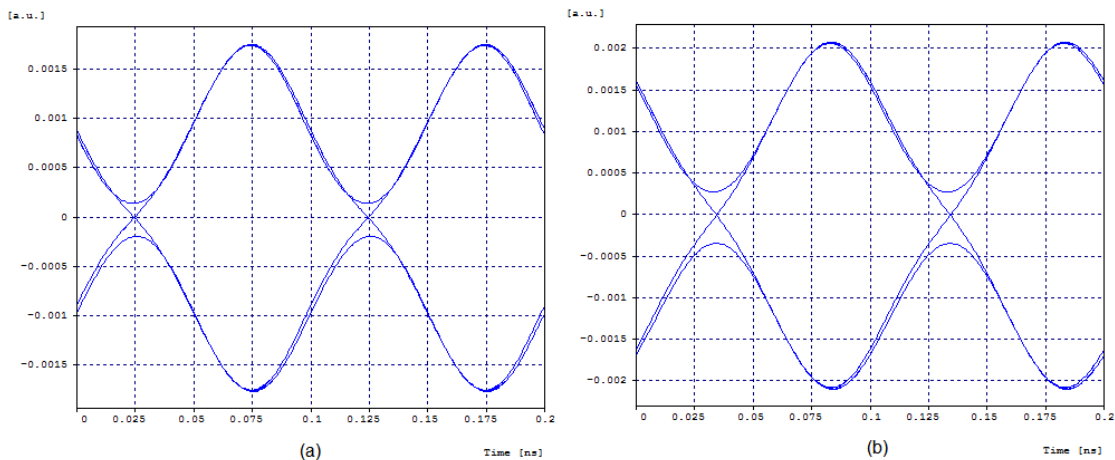


Figura 1.10 Diagrama de ojo: (a) con receptor balanceado ideal, (b) receptor PDPSK.

⁶ El periodo del bit es inversamente proporcional a la tasa de transmisión $T_b = 1/R$, siendo $R=10$ Gbps, $T_b=100$ ps.

Adicionalmente, la figura 1.6c se compara con la figura 1.11 y la figura 1.6d se compara con la figura 1.12, visualizando que los diagramas de ojo y los espectros de frecuencia son similares.

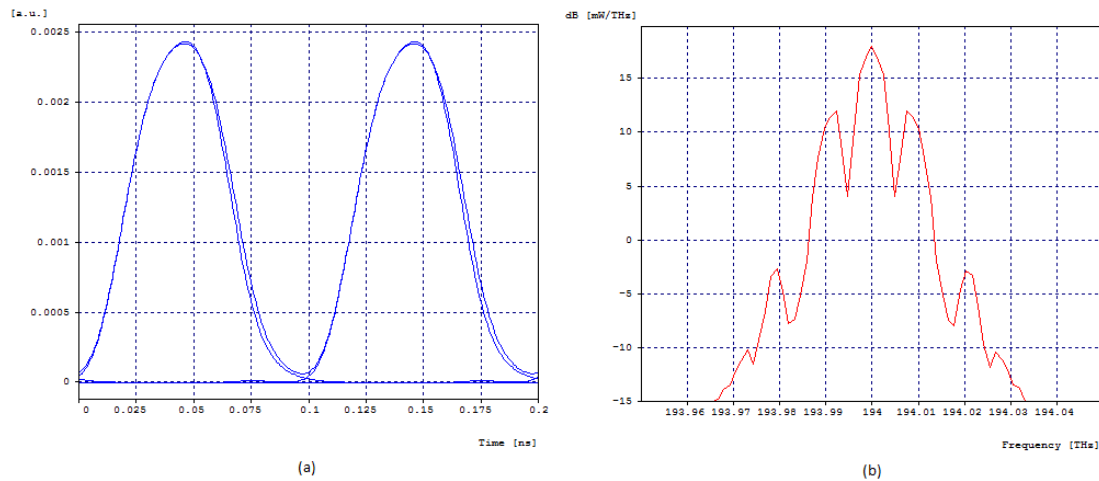


Figura 1.11 Componente constructiva: (a) Diagrama de ojo. (b) Espectro de frecuencia.

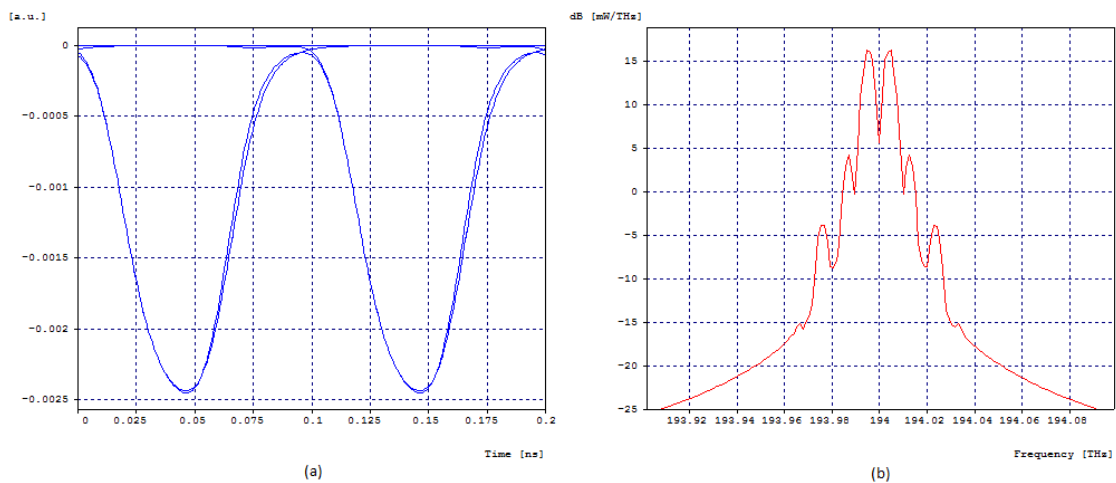


Figura 1.12 Componente destructiva: (a) Diagrama de ojo. (b) Espectro de frecuencia.

También, se realiza una comparación de la figura 1.6b con la figura 1.13, dando un resultado similar en el diagrama de ojo. Todas estas comparaciones se hacen con el fin de verificar que la generación del formato de modulación PDPSK en la simulación, es coherente con la base teórica que se ha propuesto anteriormente.

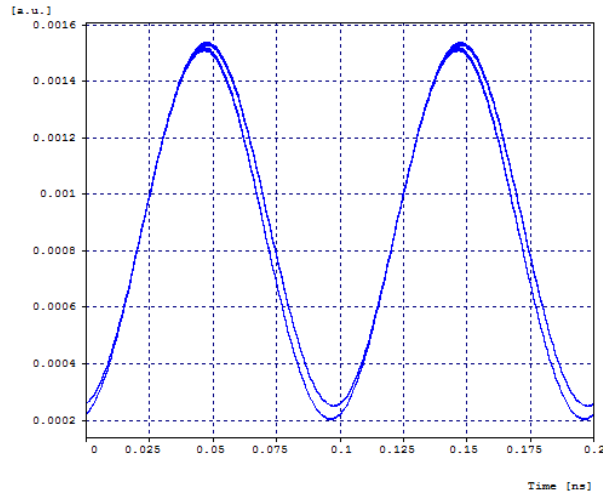


Figura 1.13 Diagrama de ojo de la modulación RZ-DPSK a 10Gbps.

Por otro lado, un aspecto crítico en cualquier diseño del receptor PDPSK es la elección del MZI, el papel de éste es decodificar y convertir la señal en modulación de intensidad; esta elección depende de muchos factores, incluido el costo, el tamaño, el control de la complejidad, las características de la red DWDM, impacto de los filtros, entre otros [11]. Para realizar una elección adecuada del retardo del interferómetro este trabajo se basa en diferentes estudios [12], [13], [14], [15], [16] los cuales realizan un mayor énfasis en el Rango Espectral Libre (FSR, *Free Spectral Range*), que es el período espectral de un ciclo de la función de transferencia y equivale a $1/T$, dichos estudios revelan que mientras el FSR sea mayor, es decir, mientras menor sea el retardo del MZI, mejor será el rendimiento obtenido.

Dado que PDPSK tiene un retraso menor al T_b , se escoge un retraso de 65ps correspondientes a un FSR de 15.3GHz (figura 1.14), este valor es concluyente en los estudios antes mencionados por su buen rendimiento, mayor robustez comparado con DPSK, no necesita de fuerte filtrado óptico⁷ y presenta un menor ancho de banda comparado con un retardo menor.

⁷ Un fuerte filtrado óptico hace referencia a la implementación de filtros con un ancho de banda más estrecho (pequeño).

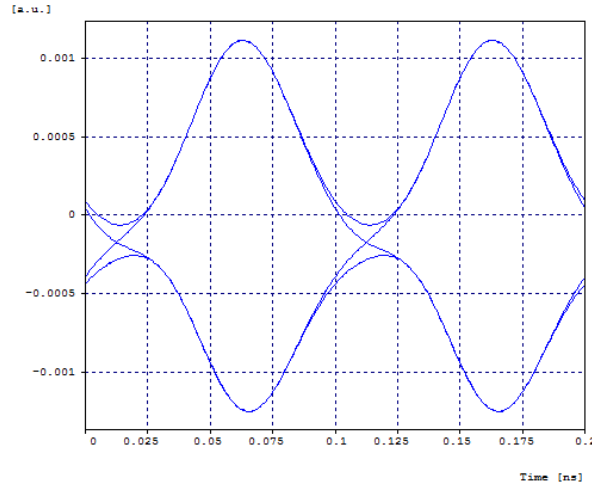


Figura 1.14 Demodulación RZ-PDPSK con un retraso de 65ps.

En general, la modulación PDPSK puede ser vista más como un método de demodulación de DPSK, en la que se mejora significativamente la recepción de la señal; también, para esta modulación se ha demostrado experimentalmente que permite la utilización de sistemas híbridos en redes DWDM, haciendo el uso del espectro óptico más eficiente, por lo tanto, la modulación PDPSK satisface diferentes requisitos y permite el uso de la infraestructura existente [1].

1.2.3 DQPSK.

DQPSK es una modulación que al igual que DPSK transmite la información en cambios diferenciales de fase en la portadora óptica, su principal característica es transmitir dos bits por símbolo (dibits), en otras palabras, la modulación se transmite a la mitad de la velocidad del símbolo [17]. Esto es posible ya que dos fases ortogonales de la portadora óptica son utilizadas para duplicar la eficiencia espectral, realizando la conversión de dos flujos de datos de la señal en forma eléctrica en una señal óptica de cuatro fases [18]. A continuación, en la figura 1.15 se muestra la constelación de esta modulación.

DQPSK: 2 símbolos/bit

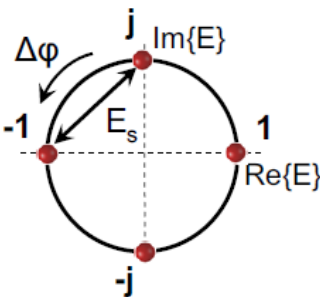


Figura 1.15 Diagrama de constelación DQPSK [4].

Al transmitir los dibits se logra comprimir el espectro haciendo posible la transmisión de más información utilizando un mismo ancho de banda, lo cual en redes DWDM se ve representado en una mejora de la eficiencia espectral y a su vez en una mayor tolerancia a la CD en comparación con DPSK [17].

Los cambios diferenciales de fase se producen por saltos de $\pi/2$, en donde la información se codifica como el cambio de fase de un periodo de símbolo al siguiente, en lugar de una fase absoluta [4]. La señal transmitida puede ser representada como se indica en las ecuaciones 1.2 y 1.3:

$$x(t) = A\cos(2\pi fct + \phi(k)), \quad kT \leq t \leq (k+1)T \quad (1.2)$$

Dónde:

$$\phi(k) - \phi(k-1) = \begin{cases} 0 & \text{si } [I(k), Q(k)] = (1,1) \\ \pi/2 & \text{si } [I(k), Q(k)] = (0,1) \\ \pi & \text{si } [I(k), Q(k)] = (0,0) \\ 3\pi/2 & \text{si } [I(k), Q(k)] = (1,0) \end{cases} \quad (1.3)$$

1.2.3.1 Transmisor DQPSK.

Existen diferentes configuraciones de transmisión para DQPSK, entre ellas se destacan tres: configuración simple, serie y paralelo, siendo ésta última de mayor implementación [4].

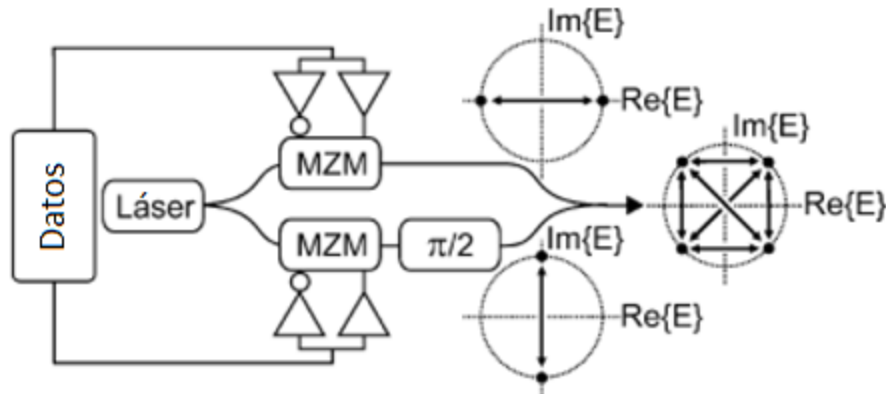


Figura 1.16 Modulación DQPSK [4] [17].

En la figura 1.16 se expone el esquema completo del transmisor, primero se encuentra el láser de emisión continua; seguido por un divisor de potencia que divide y distribuye la luz proveniente del láser por dos caminos con igual intensidad hacia los MZM; posteriormente, se encuentra un acoplador que une estas dos señales para generar la señal de salida [17]. La transmisión de los dos flujos de datos eléctricos se convierten en los canales I^8 y Q^9 , cada MZM es impulsado por uno de los canales modulando la luz del láser, es decir, que para este proceso primero las señales I y Q generan un desplazamiento de fase de 0 o π radianes, en el que uno de los brazos de la estructura anidada tiene un conmutador óptico con un desfase adicional de $\pi/2$, y al integrar estas dos señales ópticas los símbolos se manifiestan en las fases $\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$ o $7\pi/4$ [18]. Adicionalmente, se puede encontrar un MZM que se utiliza para producir la técnica de formación de pulsos que en este caso sería RZ, y así finalmente obtener el formato de modulación RZ-DQPSK [17].

⁸ Componente en fase.

⁹ Componente en Cuadratura.

1.2.3.2 Receptor DQPSK.

En recepción, para detectar los cambios de fase de la señal se utilizan dos demoduladores DPSK, en los que se divide la señal en dos partes iguales hacia los MZI, los cuales fijan la diferencia de fase para la detección de las componentes en $\pi/4$ para I y $-\pi/4$ para Q; una estructura de este proceso se expone en la figura 1.17 [4] [17] [18].

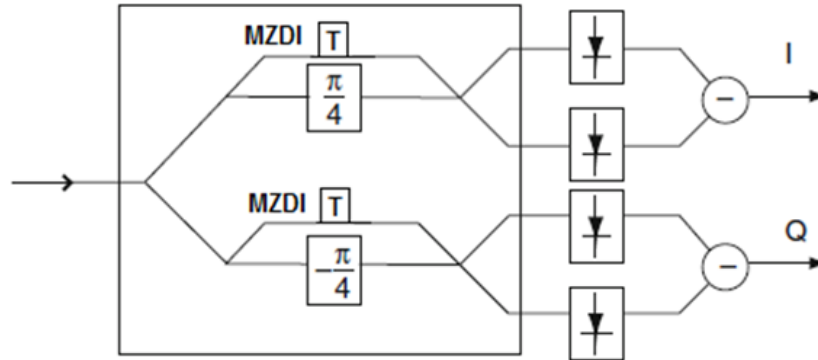


Figura 1.17 Estructura demodulador DQPSK [4].

En la figura 1.18a, se encuentra la estructura general de DQPSK con su respectivo transmisor y receptor; además, en la figura 1.18b se muestra el diagrama en tiempo después de la modulación de fase, mientras que la figura 1.18c muestra la salida después de realizar la demodulación.

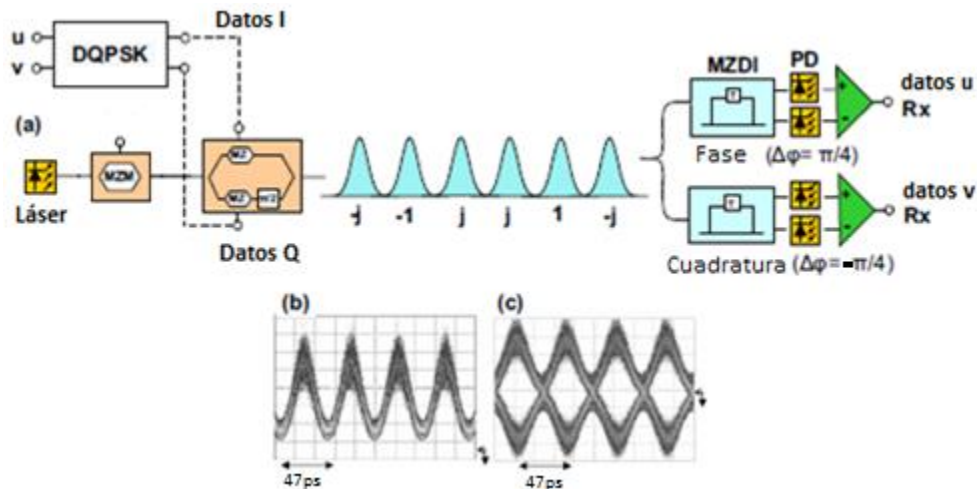


Figura 1.18 (a) Estructura RZ-DQPSK y (b, c) Diagramas de ojo RZ-DQPSK: (b) Modulación DQPSK, (c) después de la demodulación de fase [2].

Tomando como referencia la figura 1.18, se realiza una comparación de la base teórica con los diagramas y espectros arrojados por la herramienta de simulación OptSim, para el formato de modulación RZ-DQPSK en configuración back-to-back. Además, en la figura 1.19 se muestra la estructura de transmisión de RZ-DQPSK propuesta en este trabajo de grado, se puede observar que su montaje es similar al de la figura 1.18a.

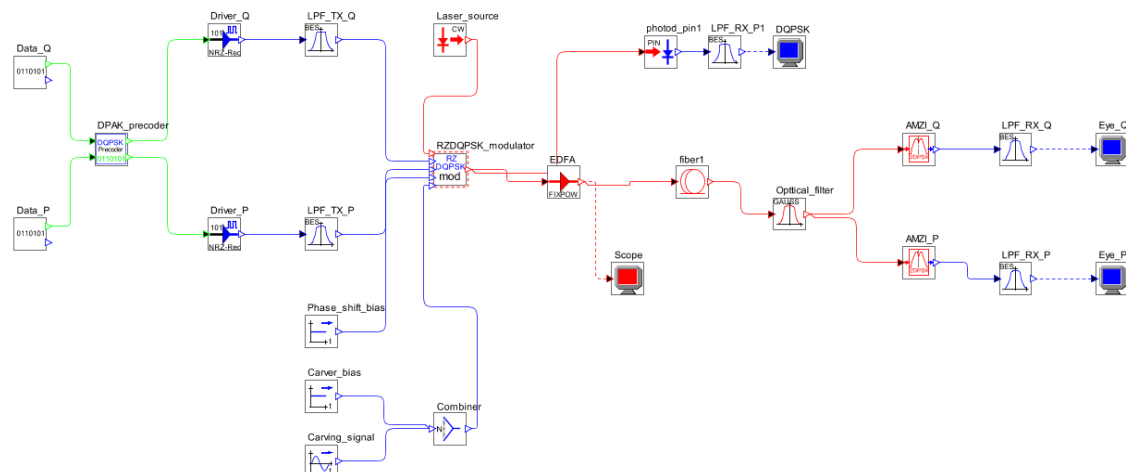


Figura 1.19 Estructura de transmisión RZ-DQPSK propuesta.

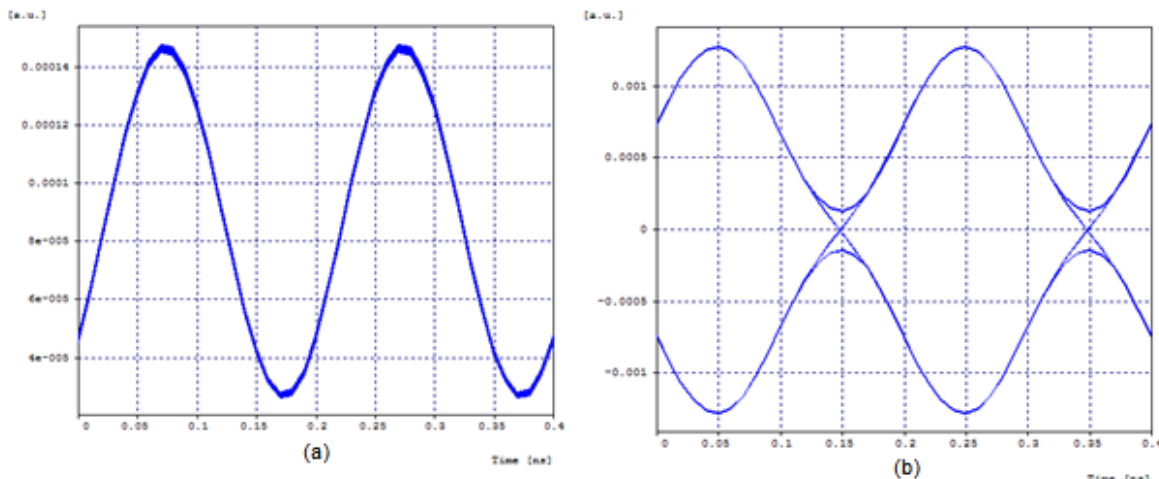


Figura 1.20 Diagrama de ojo RZ-DQPSK: (a) Modulación, (b) Demodulación.

En la figura 1.20 se muestra los diagramas de ojo correspondientes a la transmisión y recepción de DQPSK, al comparar ésta con la figura 1.18b y 1.18c, se observan similitudes obteniéndose así un soporte teórico. Estas comparaciones se hacen con el fin de verificar que la generación del formato de modulación DQPSK, a nivel de simulación es coherente a la base teórica.

Finalmente, se puede decir que DQPSK es adecuado para la modulación en redes con altas velocidades y largas distancias de transmisión, esto se debe a que presenta una mayor eficiencia espectral que DPSK, excelente tolerancia a la CD, capacidad de modulación y demodulación a la mitad de la velocidad de bits transmitidos y gran tolerancia a la distorsión de la forma de la onda; sin embargo, el diseño del transmisor implica un proceso complejo [4] [17] [19].

A continuación, se realiza una caracterización de la dispersión cromática, definiéndola mediante expresiones matemáticas y explicando el efecto degradante que causa a la señal, además, se describen sus técnicas de compensación ópticas.

1.3 Dispersión Cromática.

En el transporte de información a través de una red basada en fibra óptica, se presentan diversas degradaciones de la señal, las cuales están catalogadas dentro de los efectos no lineales y lineales, para este último las degradaciones ópticas no dependen de la transmisión, si no del medio [4].

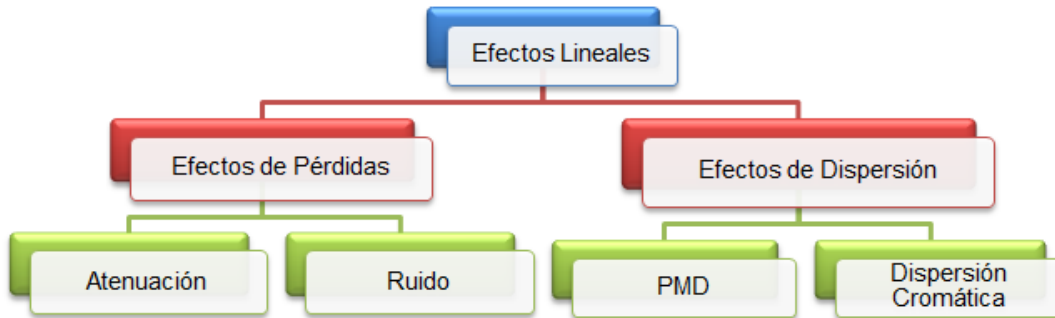


Figura 1.21 Efectos presentes en la fibra óptica.

En la figura 1.21, se visualiza la clasificación de los efectos lineales que se dividen en efectos de pérdidas y efectos de dispersión; dentro de este último se encuentra la PMD y la dispersión cromática, siendo la CD de único interés para el actual trabajo de grado.

La CD es el retardo o ensanchamiento espectral de los pulsos ópticos a medida que se propagan por la fibra (figura 1.22), dando como resultado que estos lleguen en distintos tiempos al receptor; si estos tiempos son demasiado grandes ocasionarán un solapamiento con sus adyacentes (lo que genera un aumento del nivel de ceros), variación en la velocidad de propagación de los pulsos y distorsión de la señal; todo lo anterior, hace más difícil la recuperación de la información en recepción [7] [17] [20].



Figura 1.22 Ensanchamiento de un pulso por efecto de la CD [6].

Matemáticamente los efectos de la dispersión se consideran a través de la expansión en series de Taylor, de la constante de propagación o número de onda (β), en función de la frecuencia angular (ω); para el desarrollo de la serie de Taylor se supone que la señal viaja una distancia l , como se muestra en la ecuación 1.4 [17]:

$$\beta(\omega) = \beta_0 + \beta_1 (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} (\beta_2)(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6} (\beta_3)(\omega - \omega_0)^3 ,$$

$$\beta_m = \left(\frac{d^m \beta}{d\omega^m} \right)_{\omega=\omega_0} \quad (1.4)$$

Esta serie tiene factores β_0 , β_1 , β_2 y β_3 los cuales vienen dados por las siguientes características: β_0 es la envolvente de la velocidad de fase (v_p); β_1 es la inversa de la velocidad de grupo (v_g); β_2 es el coeficiente de la dispersión de velocidad de grupo (ecuaciones 1.5, 1.6 y 1.7 respectivamente) y β_3 hace referencia a la dispersión de tercer orden.

$$v_p = \frac{\omega_0}{\beta_0} = \frac{c}{n(\omega_0)} \quad (1.5)$$

$$\beta_1 = \frac{1}{v_g} \text{ [s/m]} \quad (1.6)$$

$$\beta_2 = \frac{\lambda^2}{2\pi c} D \quad (1.7)$$

En redes ópticas los pulsos experimentan ensanchamiento debido a efectos dispersivos. Para los casos en que la dispersión de segundo orden sea compensada pero se trabaje a altas velocidades (mayores a 40Gbps), se debe tener en cuenta los efectos dispersivos de orden mayor; por ejemplo, si la longitud de onda del pulso es aproximada al valor de la longitud de onda de dispersión cero y $\beta_2 \approx 0$, entonces, β_3 es el causante de los efectos de la Dispersión de Velocidad de Grupo (GVD, *Group Velocity Dispersion*). Para pulsos ultracortos ($T_b < 1\text{ps}$), se debe considerar la dispersión de tercer orden, incluso cuando $\beta_2 \neq 0$ [21].

El coeficiente β_2 es el de mayor interés para el actual trabajo de grado, y se encuentra directamente relacionado con la dispersión de segundo orden, el cual se define en la ecuación 1.7, donde D es el factor de la dispersión de la fibra, λ es la longitud de onda de la portadora y c es la velocidad de la luz en el vacío; despejando el coeficiente D de la ecuación y multiplicándolo por la longitud del trayecto, se obtiene la $CD_{acumulada}$ (ecuación 1.8) [17].

$$CD_{acumulada} = Dl = \frac{\tau}{\delta\lambda} \text{ [ps/nm]} \quad (1.8)$$

De la ecuación 1.8, se puede deducir que la anchura espectral de la señal es la que marca el límite de transmisión de una red; teniendo en cuenta lo anterior, se deduce que con cierta cantidad de $CD_{acumulada}$ en un trayecto, la señal con mayor anchura espectral experimenta un mayor retardo de grupo, a diferencia de una señal con menor ancho de banda.

Por otro lado, la dependencia del coeficiente de reflexión y la longitud de onda en redes DWDM, es causada porque cada portadora óptica se transporta a diferentes velocidades a través de la fibra; este fenómeno se caracteriza por S , que es el coeficiente de pendiente de la dispersión (ecuación 1.9), el cual al multiplicarlo por la longitud del enlace se halla la pendiente de dispersión total [17].

$$S = \frac{D}{\Delta\lambda} \text{ [ps/nm}^2 \cdot \text{Km]} \quad (1.9)$$

Donde $\Delta\lambda$ es el rango de longitudes de onda DWDM.

Otra forma de ver la CD, es por su dependencia de la dispersión del material (D_m) y la dispersión de guía de onda (D_g), teniendo como resultado que la dispersión total está dada por la ecuación 1.10:

$$D = D_m + D_g \quad (1.10)$$

La dispersividad del material se produce por la dependencia del índice de refracción del núcleo de la fibra y la frecuencia. Dado que la velocidad de fase en función del índice de refracción causa que cada componente espectral se desplace a velocidades diferentes, desencadenando la dispersividad de material a causa del ensanchamiento de los pulsos [22].

La dispersión de guía de onda surge suponiendo que el índice de refracción de la fibra no varía con la frecuencia, en cambio β si varía en función de ésta, por tal razón se presentan diferentes caminos para cada componente espectral del modo de propagación [22].

Finalmente, se puede concluir que esta degradación es una gran limitante en redes DWDM, las cuales permiten un valor de CD máximo para su correcto funcionamiento; para mantener dicha funcionalidad, se busca reducir la dispersión haciendo necesario la implementación de laser de mayor calidad, fibras de baja dispersión y compensarla mediante diferentes técnicas ópticas o eléctricas [4].

Las técnicas de compensación ópticas son de mayor interés para este trabajo, dado que el planteamiento del problema está orientado hacia el análisis de éstas, por lo cual en la sección 1.4 se presenta su descripción general, dejando para futuros trabajos el análisis de las técnicas de compensación eléctricas.

1.4 Técnicas de Compensación ópticas para la CD.

Las técnicas de compensación ópticas, también son conocidas como técnicas de compensación en línea, se les atribuyen estos nombres dado que son aplicados en el trayecto del enlace [8] [23] [24].

La figura 1.23 ilustra esquemáticamente la estructura de un mapa de dispersión típico, consiste en tramos de fibra con dispersión anómala¹⁰ (D_1) y longitud L_1 , tramos de fibra con dispersión normal (D_2) y longitud L_2 intercalados. El control de la dispersión del enlace puede completarse mediante la introducción de cierto chirp inicial en los pulsos (pre-compensación), así como al final del enlace (post-compensación) [24] [22].

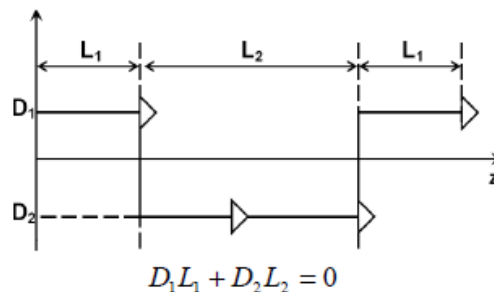


Figura 1.23 Esquema general de un mapa de control de dispersión cromática [24].

¹⁰ Coeficiente de dispersión negativo

Las técnicas de compensación están planteadas en la gestión de dispersión óptica (ODM, Optical Dispersion Management), que es una herramienta indispensable a la hora de analizar la CD en redes DWDM. Estas técnicas ópticas se basan en los siguientes elementos [8]:

- Modulo Compensador de Dispersión (DCM, *Dispersion Compensation Module*).
- Fibra de Bragg Grating (FBG, *Fiber Bragg Grating*).
- Fibra Compensadora de Dispersión (DCF, *Dispersion Compensating Fiber*).

1.4.1 Módulo Compensador de Dispersión.

Estos módulos están compuestos de FBG o DCF para compensar dispersión de tercer y segundo orden respectivamente, junto a amplificadores ópticos. Además, algunos tienen sistemas conmutados que realizan compensación variable para diferentes longitudes de la fibra, presentando bajas pérdidas por inserción y polarización; proveen una optimización de la compensación de la dispersión alrededor 1525 a 1565nm, entre otros.

1.4.2 Fibra de Bragg Grating.

En redes DWDM a velocidades de transmisión altas (mayor a 40Gbps), la dispersión de tercer orden es la que afecta el canal de forma considerable, haciendo necesaria compensarla mediante técnicas aptas a estas velocidades. Entre estas técnicas, la FBG es la más implementada [25] [26], ya que al introducir adecuadamente tramos en la red, permite que las longitudes de onda más lentas puedan alcanzar a las más rápidas, esto se logra colocando una frecuencia de referencia en la longitud de onda central del láser [8] [24].

1.4.3 Fibra Compensadora de Dispersión.

La implementación de DCF es actualmente la técnica de compensación más utilizada a velocidades de 10Gbps, su característica principal es tener una dispersión cromática elevada y de signo contrario a la que ha introducido la fibra principal; por esto es suficiente introducir a lo largo de la red pequeños tramos para compensar la CD acumulada, hasta que la dispersión residual sea prácticamente nula [22].

Las DCF son más utilizadas para compensar dispersión cromática de segundo orden, dicha dispersión se presenta con mayor intensidad en redes a 10Gbps, estas fibras también trabajan a bajas potencias e introducen altas pérdidas, lo cual hace necesario el uso de amplificadores ópticos [8].

Como el objetivo del trabajo de grado es la compensación de la dispersión cromática en una red DWDM a 10Gbps, y teniendo en cuenta que a esta velocidad de transmisión se obtiene pulsos con un periodo igual a 100ps, es decir, $T_b > 1ps$ no se debe considerar la dispersión de tercer orden, entonces, se llega a la conclusión de que la técnica más apropiada es la implementación de DCM basados en DCF [21] [24] [27], en la que se hace uso de tres sub-técnicas, las cuales se explican a continuación:

1.4.3.1 Sub-técnica de post-compensación.

La sub-técnica de post-compensación óptica se basa en ubicar tramos de DCF después de la fibra principal, para que la dispersión cromática acumulada sea compensada al final de cada tramo; en esta sub-técnica los pulsos son ensanchados y presentan bajas en el nivel de potencia, siendo más notorios que en el caso de la pre-compensación y por esto los efectos no lineales serán más significativos [23]. La figura 1.24 muestra un esquema de red general para aplicar post-compensación, en el que se ilustra los tramos de DCF después de la fibra óptica principal, por lo tanto, a lo largo del trayecto de la fibra principal se incrementa la dispersión cromática, seguida de ella es empalmado un tramo de DCF, el cual reduce la CD y da como resultado una acumulación residual al final del enlace significativamente menor (figura 1.25).

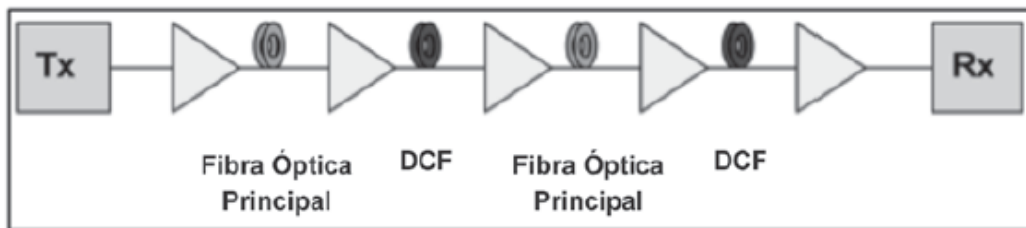


Figura 1.24 Técnica de post-compensación óptica para la CD [23].

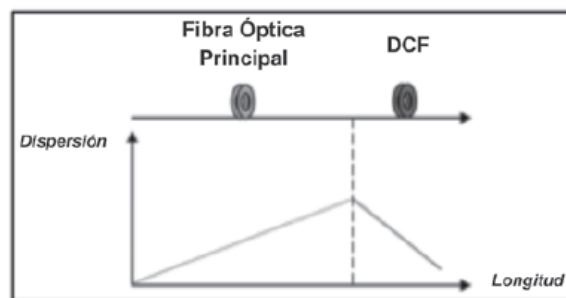


Figura 1.25 Mapa de dispersión de la técnica de post-compensación óptica para la CD [23].

1.4.3.2 Sub-técnica de pre-compensación.

Esta sub-técnica consiste en colocar tramos de DCF antes de la fibra principal, causando una compresión de los pulsos y una baja del nivel de potencia de la señal; sin embargo, se tiene una potencia más alta a la entrada de la DCF que en post-compensación, con lo cual los efectos no lineales son menos significativos [23]. En la figura 1.26 se observa la configuración general de la red en pre-compensación.

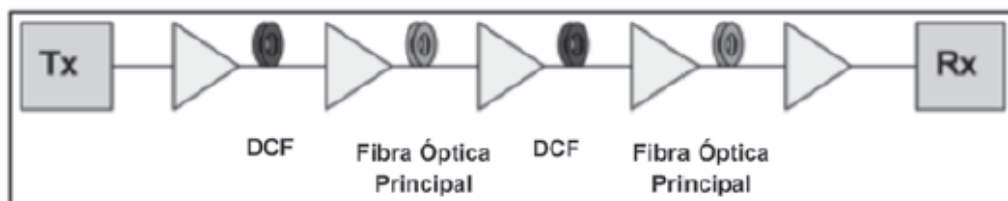


Figura 1.26 Técnica de pre-compensación óptica para la CD [23].

El mapa de dispersión muestra cómo se acumula CD negativa al inicio de la red, debido a las propiedades de la DCF, después se incrementa de forma positiva debido a la fibra principal; de tal manera que en recepción, la dispersión residual será cercana a cero (figura 1.27).

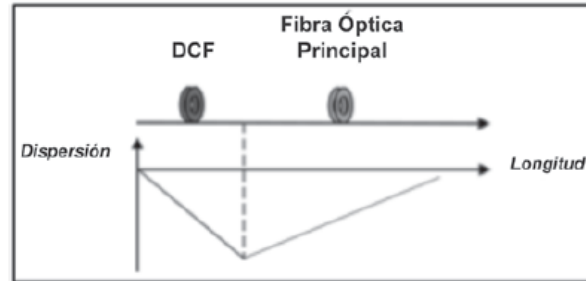


Figura 1.27 Mapa de dispersión de la técnica de pre-compensación óptica para la CD [23].

1.4.3.3 Sub-técnica compensación simétrica.

Esta sub-técnica de compensación se basa en ubicar la DCF antes y después del tramo principal de fibra (figura 1.28), siendo más eficiente que los modos de pre-compensación y post-compensación al obtener en recepción un factor Q, Tasa de Error de bit (BER, *Bit Error Rate*) y jitter más adecuados para una comunicación óptica a grandes velocidades [28] [29].

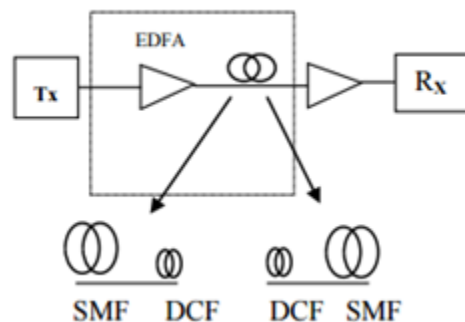


Figura 1.28 Técnica de compensación simétrica para la CD [28].

En esta sub-técnica como en las anteriores, es de vital importancia calcular la cantidad de DCF necesaria para compensar un enlace, debido a que un exceso o falta de ésta puede causar degradaciones por el aumento de los efectos no lineales [23] [28] [29].

Cabe resaltar, que aunque con las técnicas de compensación se busca minimizar la dispersión cromática, no es óptimo que ésta se compense en su totalidad, dado que al tener en cuenta otros efectos lineales como no lineales, la CD ayuda a contrarrestar alguno de estos, como es el caso de la PMD [30]. Igualmente, un aumento en la dispersión de la fibra influye en la minimización del impacto de la SPM, XPM y FWM; también, se debe tener en cuenta que la SPM introduce cierto 'chirp' el cual es de signo opuesto al que se genera por la dispersión cromática, por lo que se puede pensar en compensar dicha dispersión a partir de una cierta no linealidad [31].

Finalmente, se puede concluir que existen diferentes técnicas de compensación para la CD que dependen del formato de modulación y la estructura general de la red, por lo cual, en el capítulo 3 se realiza un análisis para definir la mejor técnica de compensación óptica para los formatos RZ-DQPSK y RZ-PDPSK. También, para mantener la funcionalidad de la red y reducir la dispersión, se hace necesaria la implementación de fibras ópticas, de las cuales existen las fibras multimodo y monomodo, éstas últimas son de mayor interés para el actual trabajo de grado, por lo cual se presenta una descripción de éstas en la sección 1.5.

1.5 Fibra Óptica Monomodo.

La CD se presenta en todos los tipos de fibra óptica, sin embargo, en las fibras multimodo la dispersión cromática es despreciable en comparación a la dispersión modal, por lo que solo se suele considerar en fibras monomodo [3] [22].

La fibra óptica monomodo, es la más implementada en redes DWDM, ya que permite alcanzar grandes distancias con bajas pérdidas por atenuación; además, existen diferentes tipos como: fibra monomodo estándar (SMF, *Single Mode Fiber*), fibra de dispersión desplazada (DSF, *Dispersion Shifted Fiber*), fibra con corte desplazado (CSF, *Cutoff Shifted Fiber*) y fibra de dispersión desplazada no nula (NZDSF, *Non Zero Dispersion Shifted Fiber*) [7].

Se puede observar en la figura 1.29, los valores típicos de dispersión en función de la longitud de onda; también, se ve la dependencia de la dispersión a la ventana de operación y al tipo de fibra monomodo.

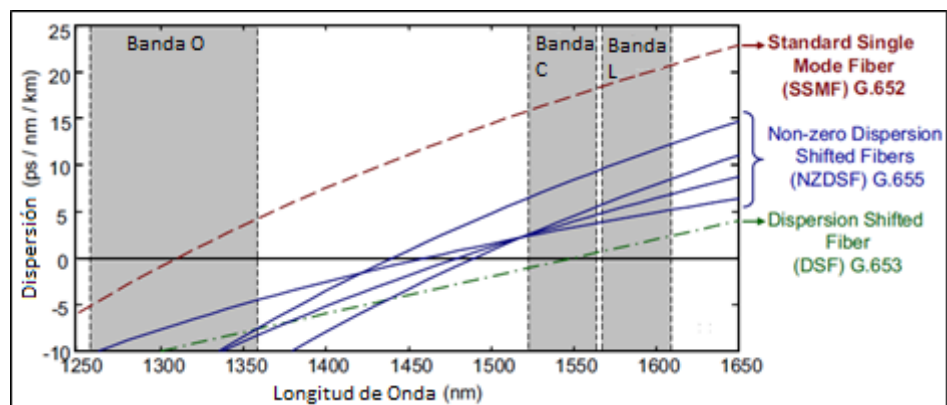


Figura 1.29 Dispersión en función de la longitud de onda para fibras monomodo [2].

La Fibra Monomodo Estándar (SSMF, *Standard Single Mode Fiber*), está definida por la recomendación UIT-T G.652, la cual se optimizó inicialmente para su uso en la región de 1310nm, teniendo una dispersión cromática mínima siendo adecuada para CWDM; sin embargo, puede ser utilizada en la región de 1550nm, pero la dispersión cromática se convierte en un factor altamente degradante, generando una dispersión que va desde los 16 a los 20ps/nm*Km [5] [7] [27].

ATRIBUTO	DETALLE	VALOR
Diámetro de campo modal	Longitud de onda	1550nm
	Rango de valores nominales	10.4μm
	Tolerancia	±0.5μm
Diámetro de revestimiento	Nominal	125μm
	Tolerancia	±0.3μm
Coeficiente de dispersión cromática	λ_{0min}	1304 nm
	λ_{0max}	1324 nm
	S_{0max}	0.088ps/ nm ² xKm
Coeficiente de atenuación	Máximo a 1310 nm	≤0.35dB/Km
	Máximo a 1550 nm	≤0.20 dB/Km
	Máximo a 1625 nm	≤0.23 dB/Km
Coeficientes de atenuación en enlaces concatenados	1260nm – 1360 nm	0.5 dB/Km
	1530nm – 1565 nm	0.275 dB/Km
	1565nm – 1625 nm	0.35 dB/Km
Coeficiente de dispersión cromática en enlaces concatenados	D_{1550}	≤18 ps/nm ² xKm
	D_{1625}	≤22 ps/nm ² xKm

Tabla 1.2 Parámetros de la fibra óptica monomodo Corning SMF-28e+ [32].

La fibra Corning SMF-28e+ presenta mayor implementación en redes comerciales DWDM, trabajando a 10Gbps en la tercera ventana; por tal razón este tipo de fibra es la seleccionada en el actual trabajo de grado, teniendo en cuenta las características mencionadas en la tabla 1.2 [32]. A continuación, se hace una breve descripción de algunos de los parámetros de monitoreo óptico, para estimar y analizar el desempeño de la red.

1.6 Parámetros de monitoreo óptico.

Existen diversos parámetros que brindan información acerca de la calidad del enlace, estos parámetros están definidos por la recomendación UIT-T G.697, que los aborda mediante técnicas de monitoreo óptico en el dominio del tiempo y la frecuencia [33]; a continuación, se establecen los parámetros de monitoreo a utilizar en el trabajo de grado: el diagrama de ojo, la BER, Jitter, y Factor Q, con el fin de estimar y analizar el desempeño de la red con respecto a los formatos de modulación implementados y su tolerancia frente a la CD.

1.6.1 Diagrama de ojo.

Muchos de los parámetros de medición no son apropiados para encontrar el origen del problema de un sistema de comunicaciones; por esto se hace necesario el uso del diagrama de ojo, ya que permite el análisis de los pulsos que se propagan en el canal de transmisión, y del cual se pueden deducir parámetros de medición como la BER y el Factor Q [20] [34]. En la figura 1.30 se observa el diagrama de ojo generado por la combinación y superposición de unos y ceros.

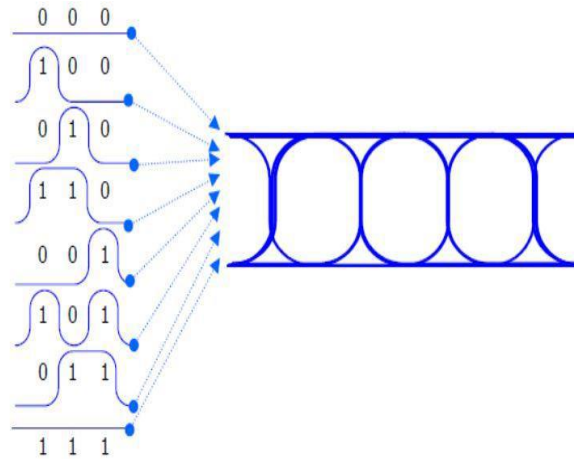


Figura 1.30 Diagrama de ojo generado por la combinación y superposición de unos y ceros [35].

1.6.2 Tasa de Error de bit.

La tasa de error de bit es el parámetro de medición más importante en cualquier sistema de telecomunicaciones, también, es considerado como la medida de desempeño principal para una red ya que cuantifica los bits transmitidos erróneamente; además, está definida por el número de errores detectados y el número de bits transmitidos en un intervalo de tiempo, por tal razón, es una medida de la probabilidad que tiene un bit transmitido de ser recibido como erróneo. Cabe resaltar, que la ITU-T define el valor usual para la BER en 10^{-12} , lo que significa que puede presentar un bit erróneo por cada 10^{12} bits transmitidos [36] [37].

1.6.3 Jitter.

Este efecto es completamente indeseable dado que introduce problemas al canal, tales como la degradación de la calidad y el desempeño del enlace, causando errores en recepción al degradar la BER, y en consecuencia se produce pérdida de sincronismo en recepción al intentar recuperar la información; además, puede producir ISI entre los pulsos que se propagan [20] [34].

1.6.4 Factor de Calidad Q.

El factor Q es una medida completa de la calidad de la señal de un canal óptico, el cual tiene en cuenta los efectos de ruido, filtrado, distorsiones lineales y no lineales; además, se define como la distancia desde el umbral de decisión a la fotocorriente media dividida por la desviación estándar; lo anterior, se mide en el dominio del tiempo en términos de unidades logarítmicas, obteniendo una ventaja sobre la calidad de la transmisión ya que es directamente proporcional a la OSNR. Cabe resaltar, que un aumento o disminución de la OSNR, se verá reflejado equitativamente en el factor Q; sin embargo, la OSNR no puede ser fácilmente medida, por tal razón, se utiliza la BER o el factor Q para cuantificar el rendimiento de las redes de transmisión DWDM [2].

Mediante el desarrollo del primer capítulo se caracterizan los formatos de modulación RZ-PDPSK, RZ-DQPSK y la dispersión cromática, igualmente, se realiza una descripción de las técnicas de compensación ópticas de la CD, definiendo los módulos compensadores de dispersión basados en DCF como la técnica apropiada para esta tasa de bits; finalmente, se establecen los parámetros de monitoreo a utilizar para estimar y analizar el desempeño de la red.

Una vez estudiada la base teórica acerca de las redes DWDM, los formatos de modulación, la dispersión cromática, las técnicas de compensación ópticas de la CD y los parámetros de monitoreo; es importante definir el modelo simplificado de red y la metodología de simulación, lo cual sirve para analizar paso a paso los escenarios de los diferentes casos de estudio, lo que conlleva al análisis comparativo del desempeño de los formatos de modulación RZ-PDPSK y RZ-DQPSK, para redes DWDM a 10Gbps frente a la implementación de DCM basados en DCF, como técnica de compensación óptica de la CD.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y ESCENARIO DE SIMULACIÓN

2.1 Modelo simplificado de Red

A partir de la base teórica descrita en el capítulo anterior, se procede a definir un modelo simplificado de red a trabajar, que reúne diferentes características según los equipos comerciales del mercado, parámetros de desempeño y recomendaciones de la ITU-T, lo cual permite generar y analizar diferentes casos de estudio, con el fin de observar el desempeño de la red.

A manera de resumen, la caracterización del modelo simplificado se fundamenta en:

1. Tecnología DWDM unidireccional. En la transmisión unidireccional solo se permite el envío de información en un sentido, por ello se requiere recurrir a sistemas con doble fibra para conseguir comunicación completa; este método resulta útil debido a su mayor eficiencia y es más fácil para diseñar e instalar. [6].
2. Topología punto a punto. Las redes basadas en esta topología, presentan altas velocidades de transmisión por lambda sobre distancias del orden de cientos de kilómetros, alta integridad, confiabilidad de la señal y simplificación del esquema de red; además, para este modelo se trabaja con un enlace punto a punto, que permite conectar dos nodos de la red, representando un enlace con topología en anillo, la cual es la más utilizada por los operadores a nivel nacional [5] [8].
3. Banda C alrededor de los 1550nm. El estándar ITU G.694.1 recomienda las bandas L y C para las redes DWDM; sin embargo, por la atenuación de la fibra óptica la banda C es la más usada, ya que comprende la región que va desde los 1530 a los 1560nm [9].
4. Láser de onda continua. Existen diferentes tipos de láser, sintonizables y de onda continua, estos últimos son ampliamente utilizados en redes ópticas debido a que manejan altas velocidades y tienen una mayor vida útil [6].
5. Potencia de transmisión. Se considera un rango desde 0 a 6dBm según la recomendación ITU-T G.691, correspondientes a redes DWDM a 10Gbps alrededor de los 1550nm [37].
6. Modulación externa. Existen dos métodos mediante los cuales puede ser modulada una fuente de luz: directa y externa; para el caso de redes DWDM con velocidades de transmisión de 10Gbps, se implementa modulación externa debido a que hace un mejor control del chirp, ya que no limita la velocidad del láser, a diferencia de la modulación directa [6].
7. Formatos de modulación RZ-PDPSK y RZ-DQPSK.
8. Periodo de bit. Teniendo en cuenta que la velocidad de transmisión es de 10Gbps, el tiempo de duración de bit (T_b) viene dado por la ecuación 2.1 [6] [8].

$$T_b = \frac{1}{R} = \frac{1}{10 \text{ Gbps}} = 100 \text{ ps} \quad (2.1)$$

9. Fibra óptica Monomodo Estándar: Corning SMF-28e+. Permite alcanzar grandes distancias debido a que posee un diámetro de núcleo pequeño y puede transmitir elevadas tasas de bits, siendo adecuadas para redes DWDM [27].
10. Coeficiente de dispersión de la fibra óptica. Este parámetro se varía para analizar el efecto sobre la dispersión cromática y observar la incidencia de éste, en los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK; estos valores están basados en los datasheet de las fibras comerciales TeraLight y SMF-28e+, correspondientes a 8 y 17ps/nm*Km respectivamente [38] [32] [39].
11. Atenuación. Se maneja la atenuación de la fibra SSMF correspondiente a 0,275dB/km, que incluye los empalmes y las márgenes del cable, en las redes de 1550nm [37].
12. Compensación de segundo orden. Las transmisiones a altas velocidades, son más propensas a sufrir degradaciones en el enlace a medida de que se aumenta la distancia, especialmente la dispersión cromática que se acumula con el trayecto, por ello es necesario realizar compensación de la dispersión; para este caso se realiza compensación de dispersión de segundo orden [27].
13. Técnica de compensación: Módulos compensadores basados en DCF. La DCF permite compensar la dispersión de la fibra de transmisión en las bandas C y L, siendo de mayor uso comercial para compensar la CD; además, emplea sub-técnicas tales como: pre-compensación, post-compensación o compensación simétrica. La tabla 2.1, resume algunas propiedades y valores típicos de las 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	0.55	0.50	0.68
Dispersión Residual	± 0.02	± 0.2	± 0.1	N/A	N/A	N/A
FOM [$ps/nm * dB$]	280	430	370	182	190	150
Pérdidas de Empalme [dB]	0.35	0.2	0.3	N/A	N/A	N/A

Tabla 2.1 Parámetros para diferentes tipos de DCF [6].

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

14. Tipo de amplificación: Amplificador de Fibra Dopada con Erblio (EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifier*). Es un amplificador unidireccional usado cuando se requiere la amplificación de una o más longitudes de onda, permite alcanzar ganancias de hasta 50dB con potencias de bombeo moderadas, y la zona espectral en la que se realiza la amplificación corresponde a la tercera ventana,

principalmente en la banda C; son implementados para contrarrestar los efectos de pérdida de potencia, generados por la introducción de DCF en la red. Además, existen tres configuraciones: Booster, en la cual el EDFA se sitúa a continuación de una fuente óptica y antes de la fibra principal; Inline, que sitúa el amplificador entre los span de fibra óptica; y pre-amplificación, en la cual EDFA se ubica inmediatamente antes del receptor [6].

15. CD máxima permisible. Su valor está dado en función de la velocidad de transmisión, es decir, cuando se utiliza una red a 10Gbps el resultado será 25ps (ecuación 2.2); para los casos en los que se exceda dicho valor, se debe hacer uso de técnicas de compensación [8]:

$$\Delta t = \frac{1}{4R} = \frac{1}{4 \cdot 10Gbps} = 25ps \quad (2.2)$$

16. Longitud del enlace. Distancia máxima la cual se logra haciendo uso de técnicas de compensación para la CD, además, está dada por redes DWDM a nivel comercial y su valor es de 500Km; mientras que para la recomendación G.691, la distancia mínima debe ser alcanzada, sin necesidad de implementar técnicas de compensación y se encuentra alrededor de los 60Km [5] [8] [37]:

$$60 \text{ km} \leq \text{Distancia } (L) \leq 500 \text{ km}$$

17. Ensanchamiento del pulso. Para el rango de distancia definido en el anterior numeral, se tienen los siguientes límites de ensanchamiento del pulso, los cuales están dados en función de la constante de dispersión de la fibra óptica $D(\lambda)$ y la longitud L (ecuación 2.3) [8]:

$$\Delta t = LD(\lambda) \text{ [ps/nm]} \quad (2.3)$$

$$D(\lambda) = 8\text{ps/nm} \cdot \text{Km}: 480 \frac{\text{ps}}{\text{nm}} \leq \text{Ensanchamiento del pulso } (\Delta t) \leq 4000 \frac{\text{ps}}{\text{nm}}$$

$$D(\lambda) = 17\text{ps/nm} \cdot \text{Km}: 1020 \frac{\text{ps}}{\text{nm}} \leq \text{Ensanchamiento del pulso } (\Delta t) \leq 8500 \frac{\text{ps}}{\text{nm}}$$

18. Longitud de DCF. Las constantes de dispersión de la fibras, junto con la longitud de la fibra óptica principal (L_{FOP}), son utilizados para hallar la longitud de la fibra compensadora de dispersión (L_{DCF}) mediante la ecuación 2.4 [8]:

$$D_{DCF}L_{DCF} + L_{FOP}D_{FOP} = 0 \quad (2.4)$$

Para un $D(\lambda)=8\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$ y una distancia máxima de Corning SMF-28e+ se tiene:

$$8 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}} \times 500\text{km} - 100 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}} \times L_{DCF1} = 0$$

$$L_{DCF1} = 40 \text{ km}$$

Para un $D(\lambda)=17 \text{ ps/nm}^2\text{Km}$ y una distancia máxima de Corning SMF-28e+ se tiene:

$$17 \frac{\text{ps}}{\text{nm}^2\text{km}} \times 500\text{km} - 100 \frac{\text{ps}}{\text{nm}^2\text{km}} \times L_{DCF2} = 0$$

$$L_{DCF2} = 85 \text{ km}$$

Los valores de $L_{DCF1,2}$, corresponden a la máxima longitud de fibra compensadora a utilizar en la red, dichos valores dependen de los diferentes coeficientes de dispersión y la máxima distancia de la fibra estándar.

19. Número de canales. Dado que DWDM es un método de multiplexación, en donde varias señales se transmiten por una única fibra utilizando distintas longitudes de onda, se eligen 4 canales para representar una red DWDM y sobre ella observar el desempeño de diferentes técnicas de compensación de la dispersión cromática.
20. Espaciamiento entre canales. Este parámetro ayuda a evitar la interferencia de canal adyacente y debe ser definido según el número de canales a implementar en redes DWDM, la recomendación ITU-T G.694.1 define los espaciamientos típicos entre canales de 0.2nm (25GHz), 0.4nm (50GHz), 0.8nm (100GHz) y 1.6nm (200GHz). Teniendo en cuenta lo anterior, inicialmente se selecciona el espaciamiento de 100GHz, debido a que corresponde a redes DWDM a 10Gbps [9]; posteriormente, se varía para poder analizar el efecto de éste sobre la dispersión cromática, y observar su incidencia en las diferentes técnicas de compensación de la CD [9].
21. Plan de frecuencias. Las frecuencias de los canales autorizados para redes DWDM en una fibra está dada por la ecuación 2.5:

$$\begin{aligned} 25\text{GHz} & \quad 193.1 + n * 0.025 \quad [\text{THz}] \\ 50\text{GHz} & \quad 193.1 + n * 0.05 \quad [\text{THz}] \\ 100\text{GHz} & \quad 193.1 + n * 0.1 \quad [\text{THz}] \end{aligned} \quad (2.5)$$

Dónde n es un número entero positivo o negativo incluyendo 0 y 193.1 es la frecuencia de referencia en THz [9]. Además, con los valores de frecuencias es posible determinar la longitud de onda a partir de la ecuación 2.6 [5] [8].

$$\lambda[\text{nm}] = \frac{2.99792458 * 10^8 \left[\frac{\text{m}}{\text{sg}} \right]}{f[\text{THz}]} \quad (2.6)$$

Teniendo en cuenta el plan de frecuencias de la recomendación ITU-T G.694.1, se eligen los canales a trabajar correspondientes a una separación de 25, 50 y 100GHz, estos se observan en la tabla 2.2 [9].

Número de canales	Separación [GHz]	Frecuencia Central Nominal [THz]	Longitud de Onda [nm]
Canal 1	25	194.000	1545.32
Canal 2		194.025	1545.12
Canal 3		194.050	1544.92
Canal 4		194.075	1544.72
Canal 1	50	194.000	1545.32
Canal 2		194.050	1544.92
Canal 3		194.100	1544.52
Canal 4		194.150	1544.12
Canal 1	100	194.000	1545.32
Canal 2		194.100	1544.52
Canal 3		194.200	1543.73
Canal 4		194.300	1542.93

Tabla 2.2 Plan de frecuencias para 4 canales a 25, 50 y 100GHz.

La figura 2.1 ilustra los módulos básicos que caracterizan una red DWDM (transmisión, medio y recepción) los cuales conforman el modelo de red, estos módulos constan de elementos con diferentes parámetros como: potencia del láser, espaciado entre canales, longitud de fibra principal, longitud de DCF y coeficiente de dispersión; que mediante su variación y análisis sobre los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK, definen los diferentes casos de estudio del capítulo 3.

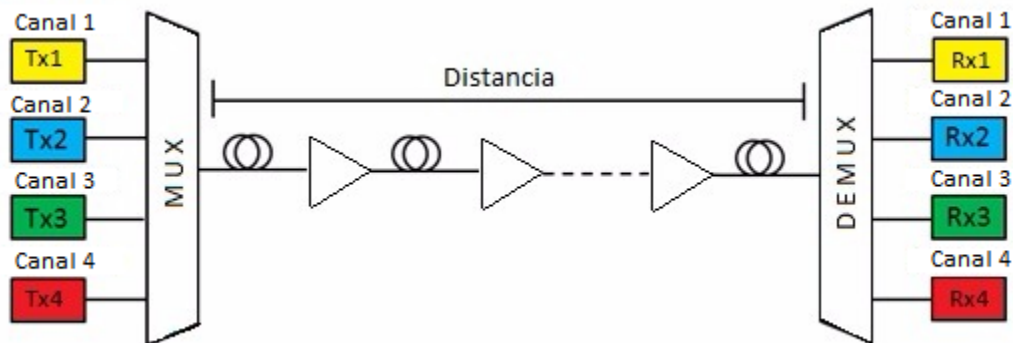


Figura 2.1 Modelo de red.

Después de realizar la especificación de las características y el cálculo de algunos parámetros para una red DWDM, se procede a sintetizar en la tabla 2.3 los valores, rangos de trabajo, características y propiedades de los elementos que conforman el modelo simplificado de red.

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
PARÁMETRO	VALORES
Topología de Red	Punto a Punto
Velocidad del sistema	10Gbps
Tecnología de Red	DWDM unidireccional
Banda de operación	Banda C (1530 - 1560nm)
Ventana	Alrededor de 1550 nm
Tipo de fibra	SMF-28e+ (Corning)
Número de canales	4 canales
Espaciamiento entre canales	25, 50 y 100GHz
Equipos de amplificación	EDFA
Técnica de compensación	DCF
CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR	
Formatos de modulación	RZ-PDPSK y RZ-DQPSK
Tipo de modulación	Externa con Mach-Zehnder
Potencia del Tx del láser	0 a 6dBm
Tipo de laser	Laser de onda continua
Frecuencias centrales nominales	De acuerdo a la tabla 2.2
CARACTERÍSTICAS DE LA FIBRA ÓPTICA SMF-28e+ (Corning)	
Coefficiente de dispersión	8 y 17 ps/nm * Km
Coefficiente de atenuación	0,275 dB/Km
CARACTERÍSTICAS DE LA DCF	
Sub-técnica de compensación	Pre-compensación
	Post-compensación
	Compensación simétrica
Coefficiente de dispersión	-100 ps/nm * Km
Atenuación	0,55 dB/Km
CARACTERÍSTICAS DEL RECEPTOR	
Sensibilidad del Rx	-30 dBm
BER y Factor Q	10 ⁻¹² y 16.94 dB

Tabla 2.3 Características y parámetros del modelo de red.

2.2 Metodología de Simulación.

Se escoge una metodología fundamentada en el modelo simplificado de red para generar un escenario de simulación, con el fin de realizar un análisis comparativo para el desempeño de una red DWDM a 10Gbps, que implementa fibras DCF como técnica de compensación para la CD; además, ésta requiere el desarrollo de una serie de etapas o pasos para plasmar el modelo simplificado de red en un escenario de simulación, el cual, mediante la herramienta OptSim de Rsoft permite evaluar el desempeño de la red, para ello se tiene en cuenta los parámetros de monitoreo en redes DWDM y de esta forma alcanzar los objetivos propuestos en el presente trabajo. Por tal razón, las etapas escogidas para desarrollar la metodología de simulación se fundamentan en los documentos [40] [41], las cuales son:

- Generación de un escenario de simulación y casos de estudio.
- Ejecución de la simulación.
- Plan de evaluación y pruebas.
- Análisis comparativo de los resultados obtenidos en la simulación.
- Especificación de las características y elección del modo de operación de la herramienta de simulación.

A continuación, se explica cada una de estas etapas:

2.2.1 Generación de un escenario de simulación y casos de estudio.

Para realizar el análisis comparativo del desempeño de una red DWDM a 10Gbps, frente a técnicas de compensación ópticas de la dispersión cromática, se define un escenario de simulación como se muestra en la figura 2.2, del cual se generan múltiples casos de estudio; se debe tener en cuenta que para cada caso se varía la modulación y la técnica de compensación de la CD.

En cuanto a la selección de la técnica de compensación óptica de la CD, se tiene en cuenta lo desarrollado en las secciones 1.3 y 1.4, en las que se da como resultado la implementación de DCM basados en DCF.

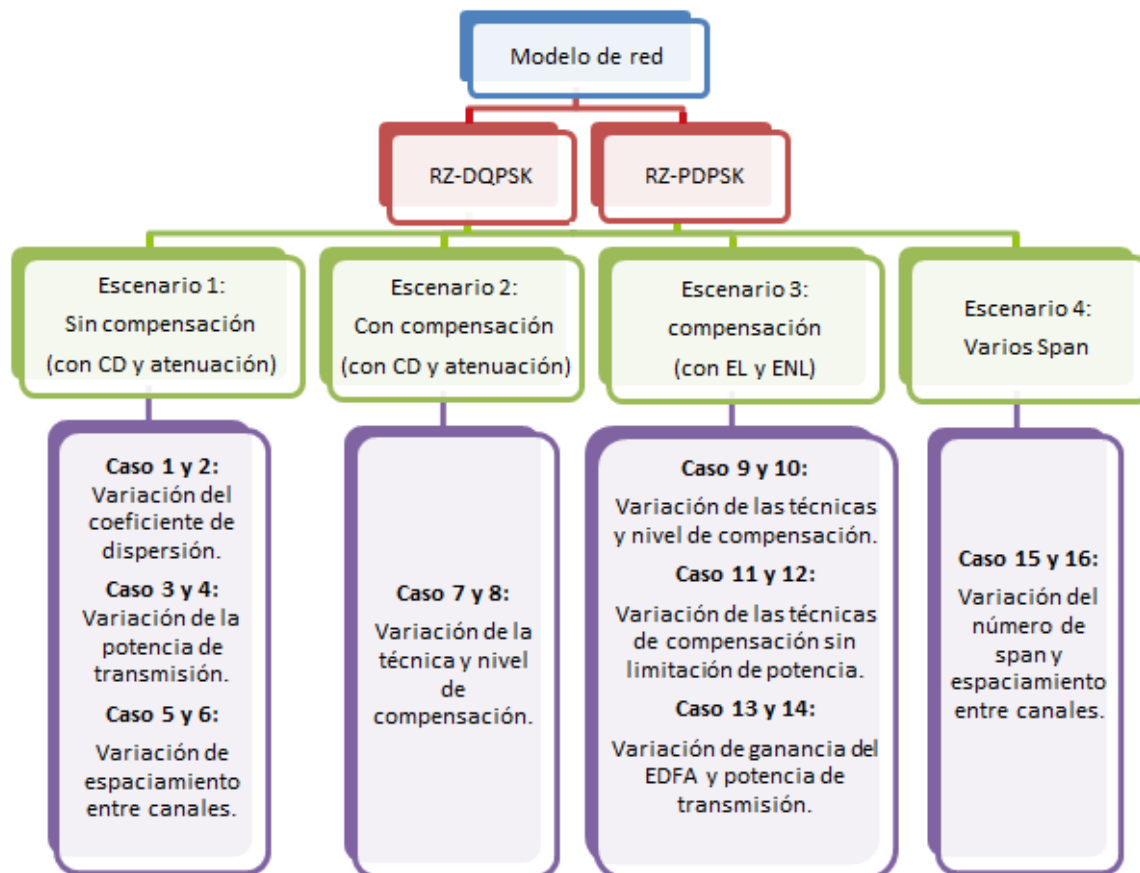


Figura 2.2 Escenarios de simulación y casos de estudio.

En la figura 2.3 se expone el esquema de referencia para la simulación, en la que se considera una topología punto a punto unidireccional entre el transmisor y receptor a una velocidad de 10Gbps, también, se definen los parámetros fijos y variables los cuales nos dan los diferentes casos de estudio de la red DWDM.

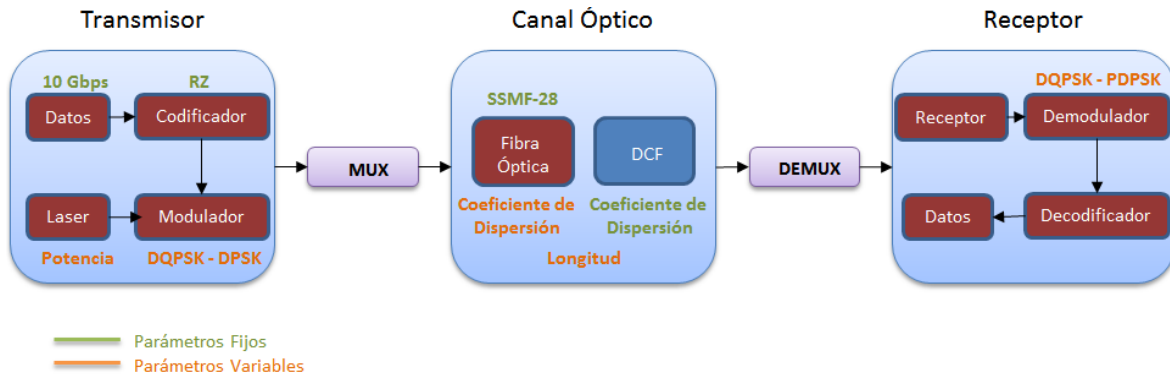


Figura 2.3 Esquema de simulación.

Parámetros Fijos:

- En el transmisor: codificación, velocidad de transmisión, número de canales.
- En el Canal: coeficiente de dispersión de la DCF y atenuación.

Parámetros Variables:

- En el transmisor: potencia del láser, modulación, espaciamiento entre canales.
- En el Canal: longitud de SMF-28e+, longitud de DCF, coeficiente de dispersión de la SMF-28e+, nivel de compensación de la CD (%).

❖ **Casos de estudio.**

Para el análisis del desempeño de los formatos de modulación, el escenario general cuenta con una velocidad de transmisión de datos de 10Gbps, implementando 4 canales y manteniendo los parámetros de operación dentro de los rangos definidos en la tabla 2.3.

Para evaluar el desempeño de los DCM basados en DCF y compensar la CD sobre los formatos de modulación RZ-PDPSK y RZ-DQPSK, se presentan dieciséis configuraciones basadas en el esquema del escenario de simulación (figura 2.3), descritas a continuación:

- **Casos 1 al 6:** escenario de simulación en ausencia de técnicas de compensación.
 - Formatos de Modulación: RZ-DQPSK y RZ-PDPSK.
 - Con efecto de CD y atenuación.
 - Tasa de transmisión: 10Gbps.
 - Fibra: Corning SMF-28e+.
 - Variación del coeficiente de dispersión, potencia de transmisión y espaciamiento entre canales.

- **Caso 7 y 8:** escenario de simulación con técnicas de compensación.
 - Formatos de Modulación: RZ-PDPSK y RZ-DQPSK.
 - Con efecto de CD y atenuación.
 - Tasa de transmisión: 10Gbps.
 - Fibra: Corning SMF-28e+.
 - Variación de la técnica y nivel de compensación.
- **Casos 9 al 14:** escenario de simulación con técnicas de compensación.
 - Formato de Modulación: RZ-PDPSK y RZ-DQPSK.
 - Con efectos lineales y no lineales.
 - Tasa de transmisión: 10Gbps.
 - Fibra: Corning SMF-28e+.
 - Variación de la técnica de compensación con y sin limitación de potencia, nivel de compensación, ganancia del amplificador y potencia de transmisión.
- **Caso 15 y 16:** escenario de simulación con varios span.
 - Formato de Modulación: RZ-PDPSK y RZ-DQPSK.
 - Con efectos lineales y no lineales.
 - Tasa de transmisión: 10Gbps.
 - Fibra: Corning SMF-28e+.
 - Variación del número de span y espaciamiento entre canales.

Adicionalmente, se analiza el nivel de compensación bajo los regímenes de dispersión normal (compensación menor al 100% de la CD) y cero (compensación igual al 100% de la CD); teniendo en cuenta que en la práctica no se lleva a cabo un régimen de dispersión normal, dado que los operadores de fibra óptica no compensan al 100% debido a la relación costo-eficiencia, por lo que es preferible compensar a un porcentaje menor.

2.2.2 Ejecución de la simulación.

Los diferentes casos de estudio descritos en la sección 2.2.1, se evalúan mediante la herramienta OptSim que proporciona una interfaz flexible para el diseño, análisis y evaluación del desempeño de redes ópticas ofreciendo la visualización de datos; además, para la ejecución de la simulación se establece el número de muestras y el tiempo de simulación óptimo, que permiten obtener resultados confiables evitando tiempos de simulación muy extensos; para el presente trabajo, cada simulación se fija en 70ns y 128 muestras correspondientes a 2^n , siendo $n=7$.

2.2.3 Plan de evaluación y pruebas.

De acuerdo a la descripción planteada, se realiza la simulación y análisis de resultados en los capítulos 3 y 4, abordando el efecto de la CD, su compensación con DCF, máxima distancia alcanzable y el desempeño de la red mediante parámetros de monitoreo óptico, tales como: BER y Factor Q, que según la recomendación UIT-T Serie G Suplemento 39, sugiere una $BER= 10^{-12}$, correspondiente a un factor $Q \approx 7.03$ (factor $Q \approx 16.94$ dB) [42].

A continuación, se propone un plan de evaluación, un diagrama de flujo para el proceso de simulación y un análisis de resultados.

- Se analiza el comportamiento del escenario de simulación en ausencia de las técnicas de compensación, con efectos de CD y atenuación, en los formatos de modulación RZ-PDPSK y RZ-DQPSK, teniendo en cuenta los parámetros variables antes mencionados.
- Se analiza el comportamiento del escenario de simulación utilizando técnicas de compensación óptica de la CD y atenuación, en los formatos de modulación RZ-PDPSK y RZ-DQPSK, teniendo en cuenta los parámetros variables antes mencionados.
- Se analiza el comportamiento del escenario de simulación con efectos lineales y no lineales de la fibra, utilizando técnicas de compensación ópticas de la CD para los formatos de modulación RZ-PDPSK y RZ-DQPSK, teniendo en cuenta los parámetros variables antes mencionados.

En la figura 2.4, se expone el diagrama de flujo iterativo que ilustra los pasos para una correcta simulación.

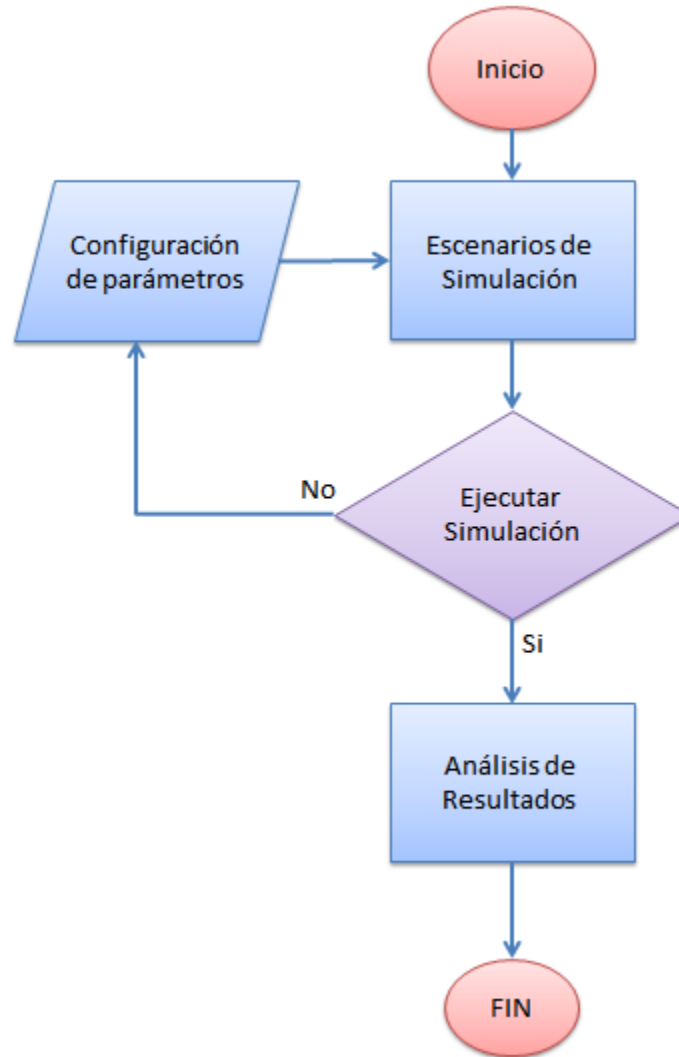


Figura 2.4 Diagrama de flujo para el escenario de simulación.

2.2.4 Análisis comparativo de los resultados obtenidos en la simulación.

Para analizar comparativamente los casos de estudio definidos en la sección 2.2.1, se tienen en cuenta los siguientes puntos:

- Distancia máxima alcanzable por un enlace de la red.
- Análisis de los efectos lineales: atenuación y CD.
- Verificación de los parámetros de monitoreo óptico.

Entonces, para el proceso de simulación se lleva a cabo los siguientes pasos:

- Implementación del escenario de simulación.
- Implementación de los casos de estudio derivados del escenario de simulación.
- Ejecución de la simulación.
- Análisis de los resultados obtenidos.

2.2.5 Especificación de las características y elección del modo de operación de la herramienta de simulación.

Para la simulación y diseño de redes de comunicaciones ópticas, existen numerosas herramientas que permiten evaluar su desempeño, dentro de éstas se destaca OptSim, la cual es una herramienta robusta que permite la evaluación de redes ópticas, brindando a sus usuarios una interfaz gráfica de medición con facilidades de visualización; además, permite visualizar valores de simulación esperados teóricamente y actúa como un conjunto de instrumentos virtuales de laboratorio. Debido a las características de este software y la adquisición de la licencia por parte de la Universidad del Cauca, se decide utilizar dicha herramienta para el desarrollo del presente trabajo. Teniendo en cuenta que OptSim es utilizado para un amplio rango de aplicaciones, se pueden destacar:

- Optimización de los enlaces.
- Análisis de las pérdidas, efectos lineales y no lineales.
- Investigación de nuevos esquemas de modulación.

Esta herramienta trabaja en dos modos de simulación: modo bloque y modo muestra [43].

- El modo bloque, es la técnica de simulación tradicional y se caracteriza porque la secuencia de entrada se evalúa por bloque hasta el punto de salida.
- El modo muestra es útil para escoger entre diferentes tipos de variaciones de diseño en un enlace de una red; además, se caracteriza porque la señal de datos pasa entre componentes y representa una muestra única en cada instante de tiempo, lo cual optimiza el uso de la memoria de la secuencia en cada punto de interés. Este modo tiene dos tipos de simulación con el fin de aumentar la precisión, los cuales se explican a continuación:

- ✓ Técnica de propagación espectral (SPT, *Spectral Propagation Technique*): las señales ópticas se propagan en la red como espectros de potencia, teniendo en cuenta las pérdidas de los componentes y el ruido; cada componente es caracterizada por una función de transferencia que no toma en cuenta las no linealidades de la fibra; además, es posible verificar los parámetros de diseño que se han configurado desde el punto del espectro óptico y permite evaluar en cualquier punto de la red.

- ✓ Técnica de ancho de banda variable (VBS, *Variable Bandwidth Simulation*): en esta técnica las señales se propagan como muestras en el dominio del tiempo, sobre un ancho de banda variable proporcionado por el usuario; además, simula el rendimiento de los sistemas en las opciones: "VBS Full", que tiene en cuenta todos los efectos de las fibras tanto lineales como no lineales; "VBS Linear Fiber", que considera únicamente los efectos lineales y "VBS Loss Only Fiber", que solo tiene en cuenta la atenuación de la fibra.

Para el actual trabajo se usa el modo muestra y la técnica VBS, debido a que resulta ser la más apropiada para implementar y analizar los múltiples casos de estudio nombrados en la sección 2.2.1.

En el presente capítulo se determina un modelo simplificado de red, el cual se integra a una metodología de simulación en la que se desarrolla una serie de etapas, permitiendo diseñar un plan de evaluación y pruebas; de este modo se garantiza, no solo los resultados adecuados para cada caso de simulación, sino también la contribución al cumplimiento de los objetivos planteados. Por otra parte, se realizó una descripción de la herramienta de simulación OptSim siendo ésta robusta, flexible, con una interfaz gráfica amigable y de fácil configuración para obtener resultados específicos; finalmente, se decide trabajar el simulador OptSim en modo muestra, ya que se puede analizar la CD y la atenuación introducida por la fibra de manera independiente.

En el siguiente capítulo se desarrolla la metodología de simulación planteada, con el fin de evaluar mediante la herramienta de simulación OptSim, el desempeño de los formatos de modulación y la técnica de compensación óptica para la CD, frente a las modulaciones propuestas.

CAPÍTULO 3. SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS PARA LA CD EN REDES DWDM.

El fin del presente capítulo es analizar y evaluar a nivel de simulación, el desempeño de los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK, en una red DWDM a 10Gbps y su tolerancia frente a la CD, esto se lleva a cabo mediante escenarios de simulación con parámetros de desempeño definidos en la sección 2.2.3, correspondientes a una BER = 10^{-12} y a un factor Q ≈ 16.94 dB; inicialmente, dichos parámetros se tienen en cuenta con el fin de diseñar una red, eligiéndola como una red básica sin compensación y, posteriormente, verificar los efectos que tiene las técnicas de compensación ópticas sobre ésta.

La red básica permite escoger un valor máximo de longitud de fibra SMF-28e+, sin la implementación de técnicas de compensación cumpliendo los parámetros de desempeño, cabe resaltar, que según la tolerancia del formato de modulación se obtienen diferentes valores de longitud. Esta longitud es importante debido a la necesidad de alcanzar mayores distancias, haciendo necesario la implementación de técnicas de compensación, las cuales introducen una mayor atenuación incurriendo en posibles caídas de la red, por lo cual, este trabajo de grado realiza un análisis teniendo en cuenta el peor caso posible cumpliendo con los parámetros de desempeño, para proporcionar un buen comportamiento de la red.

Igualmente, se muestran los resultados de las simulaciones frente a las técnicas de compensación ópticas de la CD; estas simulaciones se realizan teniendo en cuenta los parámetros fijos, parámetros variables, parámetros de desempeño y casos de estudio definidos en el capítulo 2. También, se debe tener en cuenta que el objetivo de este trabajo es el análisis de la CD, por lo tanto, en la herramienta de simulación OptSim hay un módulo de propiedades de la fibra que permite activar o desactivar los efectos que influyen en ésta (pestaña de control avanzado), entonces, es necesario ignorar los efectos no lineales y de PMD como se visualiza en la figura 3.1 en la que se muestran los parámetros Fiber Non-Linearity, Raman Crosstalk y Fiber PMD en "Off".

Parameter	Value
Fiber Non-Linearity	"Off" ▼
Raman Crosstalk	"Off" ▼
Fiber PMD	"Off" ▼
Fiber Birefringence	"On" ▼
Polarization original frame recovering	"On" ▼

Figura 3.1 Parámetros de control avanzado de las fibras.

Además, los parámetros Fiber Birefringence (Birrefringencia de la fibra) y Polarization original frame recovering (Recuperación de la polarización inicial) se encuentran en "ON", ya que las fibras ópticas son birrefringentes, dado que hay factores internos y externos que generan asimetrías en los índices de refracción del revestimiento y el núcleo [44].

La birrefringencia es muy útil en los dispositivos ópticos ya que representa la división del haz de luz no polarizado que entra a un medio anisotrópico¹¹ en dos haces linealmente polarizados; uno de ellos se comporta de acuerdo a la ley de Snell llamado rayo ordinario, mientras que el otro no lo hace y se denomina rayo extraordinario. Ambas ondas se propagan con diferente velocidad y se caracterizan por diferentes índices de refracción [44].

El segundo parámetro hace referencia a la recuperación de la polarización inicial, este interruptor activa o desactiva la rotación de la polarización inducida por la birrefringencia; si se encuentra en "ON" significa que al final de la sección de fibra se hace girar para recuperar toda la rotación inducida por la birrefringencia durante la propagación. Por consiguiente, si esta función se usa cuando los otros fenómenos relacionados con la polarización (no linealidad y PMD) se desactivan, la polarización del campo óptico de salida es exactamente el mismo que el campo óptico de entrada [45].

3.1 Escenario 1: simulación en ausencia de técnicas de compensación para la dispersión cromática.

En el presente escenario de simulación se realiza un análisis en ausencia de las técnicas de compensación ópticas para la CD, con el fin de determinar una red básica en la cual se halla la máxima distancia alcanzable, teniendo en cuenta los parámetros de desempeño ($BER=10^{-12}$ y un factor $Q=16.94dB$), efectos de la dispersión cromática y atenuación sobre los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK. Esta red básica sirve como referencia para evaluar el desempeño de las técnicas de compensación ópticas de la CD.

Inicialmente, se realiza una evaluación de los parámetros de desempeño variando la longitud de la SMF-28e+; posteriormente, se varía el coeficiente de dispersión para comprobar que a mayor longitud de la fibra se obtiene mayor dispersión acumulada, por lo que los parámetros de desempeño disminuyen (BER y factor Q), lo anterior, se hace dejando otros parámetros fijos (espaciamiento entre canales, potencia de transmisión, técnica de formación de pulsos), para ver únicamente el efecto del coeficiente de dispersión. A continuación, en la figura 3.2 se muestra la configuración del escenario de simulación en ausencia de las técnicas de compensación ópticas para la CD.

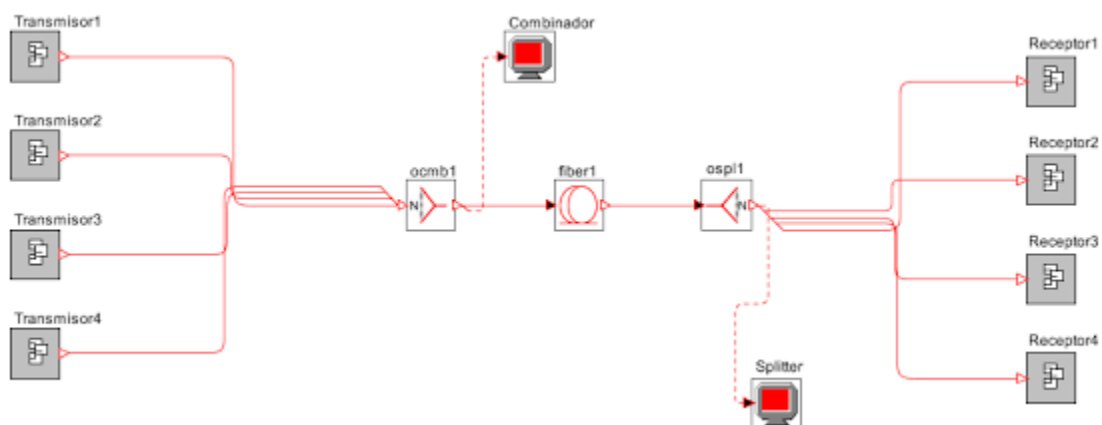


Figura 3.2 Escenario de simulación en ausencia de técnicas de compensación para la CD.

¹¹ Es aquel medio en el que sus propiedades varían dependiendo de la dirección en que se evalúen.

Luego, se establece un coeficiente de dispersión de $17\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$ que es el característico de la fibra SMF-28e+, posteriormente, se varía la potencia de transmisión con el fin de verificar que el rango de variación dado por la recomendación, no presenta mayores variaciones en el desempeño de la red, para los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK; finalmente, se varía el espaciamento entre canales, para ver la tolerancia que tienen los formatos de modulación frente a la dispersión cromática y la interferencia intercanal¹², todo lo anterior se realiza manteniendo los parámetros fijos mencionados.

3.1.1 Caso 1: simulación en ausencia de técnicas de compensación de la CD, variando el coeficiente de dispersión cromática para el formato RZ-DQPSK.

En el presente caso de estudio, se realiza un análisis en ausencia de las técnicas de compensación ópticas para la CD sobre el formato RZ-DQPSK. Inicialmente, se evalúan los parámetros de desempeño con una separación de canales de 100GHz y una potencia de transmisión de 5dBm ¹³, variando la longitud de la fibra SMF-28e+ en un rango de 60 a 500km presentando incrementos de 5Km, con el fin de determinar la máxima distancia alcanzable teniendo en cuenta los efectos de dispersión cromática y atenuación; posteriormente, se realiza la variación del coeficiente de dispersión de 17 a $8\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$, para ver el efecto del coeficiente de dispersión y comprobar que a mayor longitud de la fibra se obtiene mayor dispersión acumulada, por lo que los parámetros de desempeño disminuyen (BER y factor Q). A continuación, se evalúan los parámetros de desempeño con un $D(\lambda) = 17\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$ (anexo B).

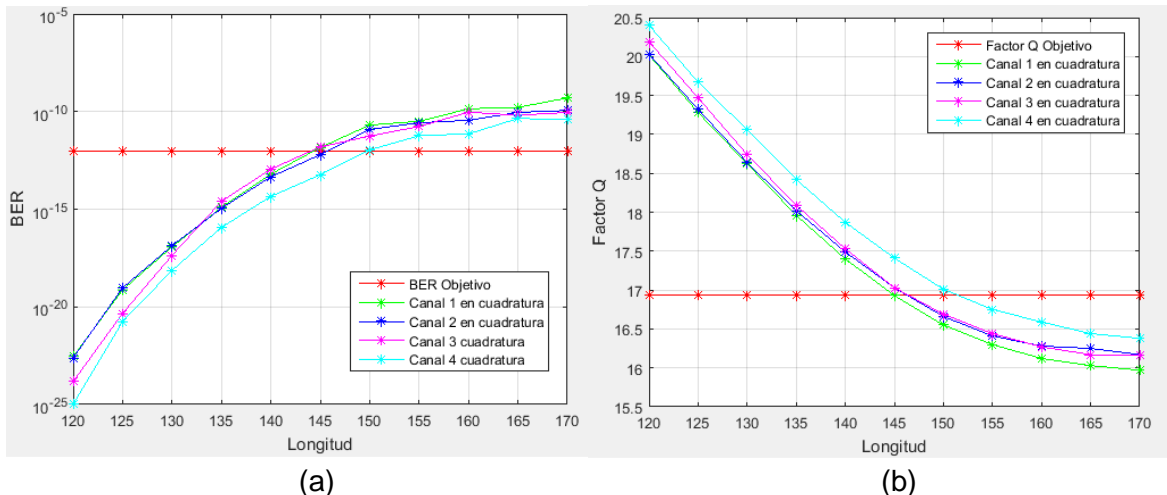


Figura 3.3 Parámetros de desempeño en cuadratura para RZ-DQPSK y $D(\lambda) = 17\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$: (a) BER vs Longitud, (b) Factor Q vs Longitud.

La figura 3.3, permite evidenciar que la máxima distancia que el enlace alcanza en cuadratura (canal Q), con una dispersión de $17\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$ es de 145Km cumpliendo los requerimientos de $\text{BER}=10^{-12}$ y factor $Q=16.94\text{dB}$. Por otro lado, la figura 3.4 evidencia que la máxima distancia que el enlace alcanza en fase (Canal I), con el mismo coeficiente es de 140Km cumpliendo con los parámetros de desempeño.

¹² Interferencia entre canales.

¹³ Según la recomendación ITU-T G.691 la potencia de transmisión se encuentra en un rango de 0-6dBm, por consiguiente, se establece el valor de 5dBm porque es un valor comercial implementado por diversos operadores [35] [37].

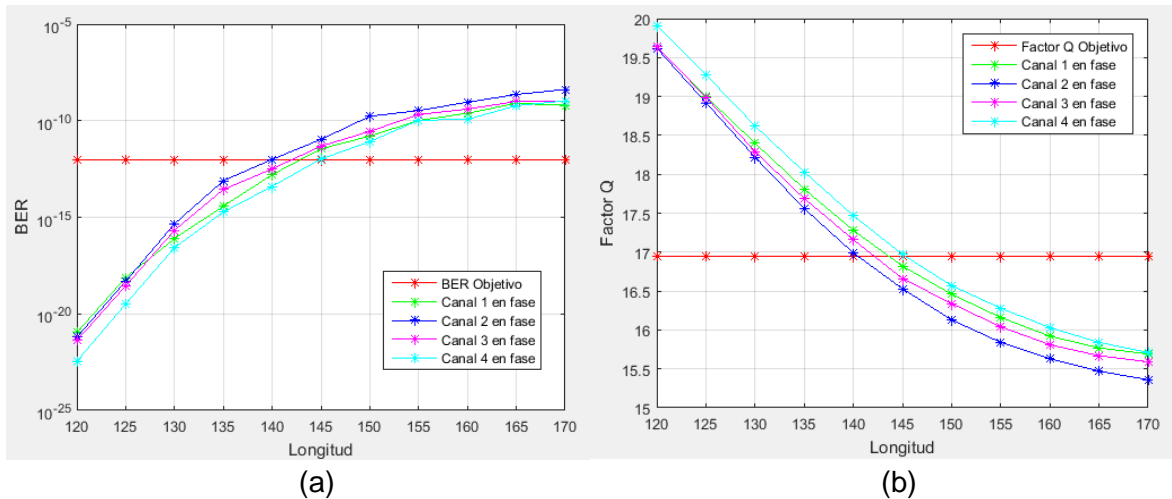


Figura 3.4 Parámetros de desempeño en fase para RZ-DQPSK y $D(\lambda) = 17\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$: (a) BER vs Longitud, (b) Factor Q vs Longitud.

Al realizar una comparación entre la figura 3.3 y 3.4 se verifica que aunque los cuatro canales presentan un comportamiento similar, debido a que son transmitidos por el mismo medio y alterados en similar proporción, el canal 2 en fase alcanza una menor distancia, por consiguiente, en la figura 3.5 se muestran los resultados arrojados por el simulador para este canal a una distancia de 140Km ya que representa el peor caso, además, expone que la señal experimenta cambios de fase (jitter), y a medida que este aumenta se disminuye la posibilidad de que la señal sea detectada de forma óptima. Cabe resaltar, que el nivel de potencia que llega a recepción es de -34.26dBm el cual es menor al umbral definido en la tabla 2.3, por lo que es necesario el uso de amplificadores ópticos para compensar la pérdida de potencia.

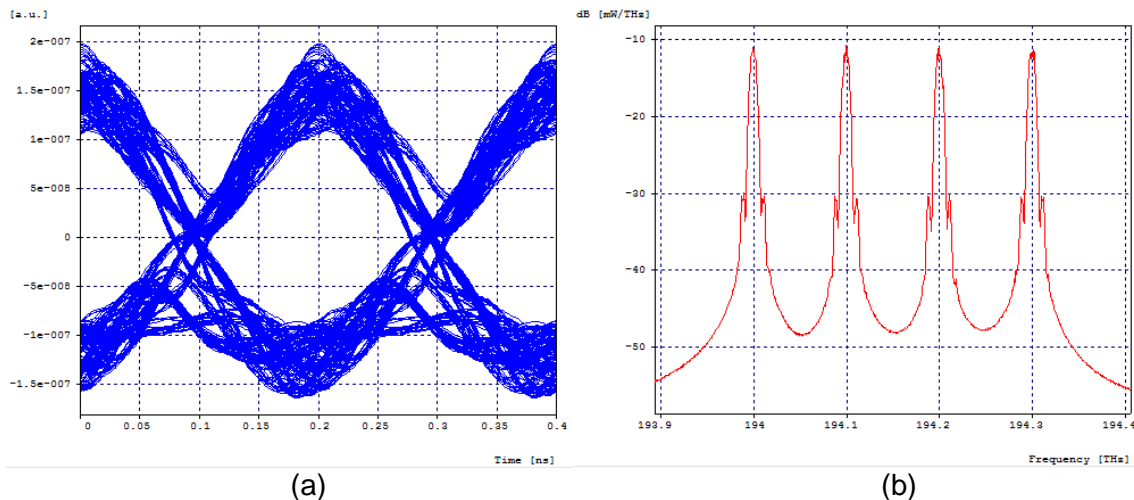


Figura 3.5 (a) Diagrama de ojo del canal 2 en fase y (b) Espectro de frecuencia a una distancia de 140 Km para RZ-DQPSK y $D(\lambda) = 17\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$.

Por otro lado, se evalúan los parámetros de desempeño siguiendo el mismo procedimiento anterior, pero variando el coeficiente de dispersión cromática de la fibra de un valor de 17 a $8\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$.

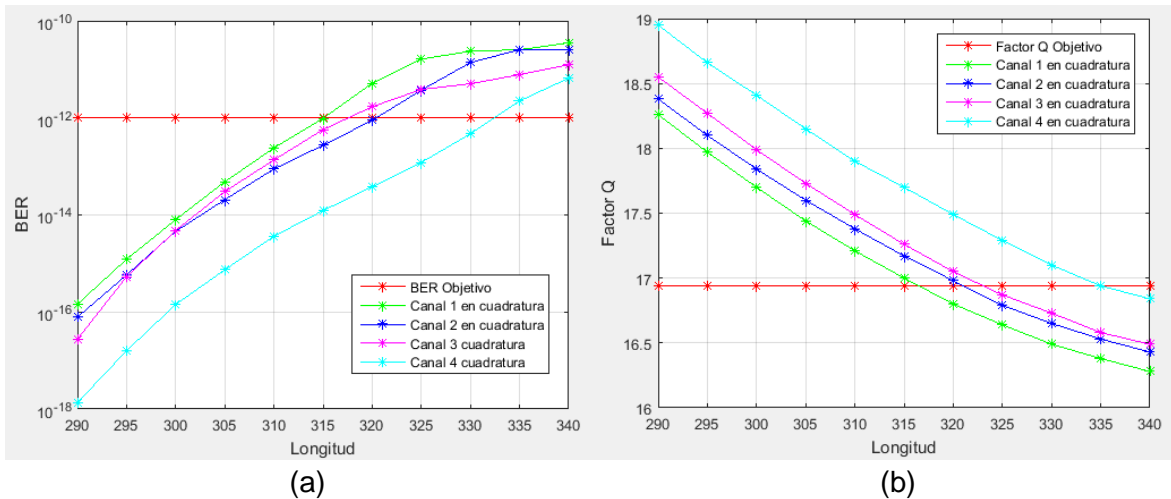


Figura 3.6 Parámetros de desempeño en cuadratura con $D(\lambda) = 8\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$: (a) BER vs Longitud y (b) Factor Q vs Longitud, para RZ-DQPSK.

A partir de los resultados consignados en el anexo B se realiza el análisis comparativo para un coeficiente de dispersión de $8\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$. La figura 3.6, indica que la máxima distancia que el enlace alcanza en cuadratura (canal Q), es de 315Km cumpliendo los requerimientos de $\text{BER}=10^{-12}$ y factor $Q=16.94\text{dB}$, en cambio, la figura 3.7 indica que en fase (canal I), es de 308Km cumpliendo los parámetros de desempeño.

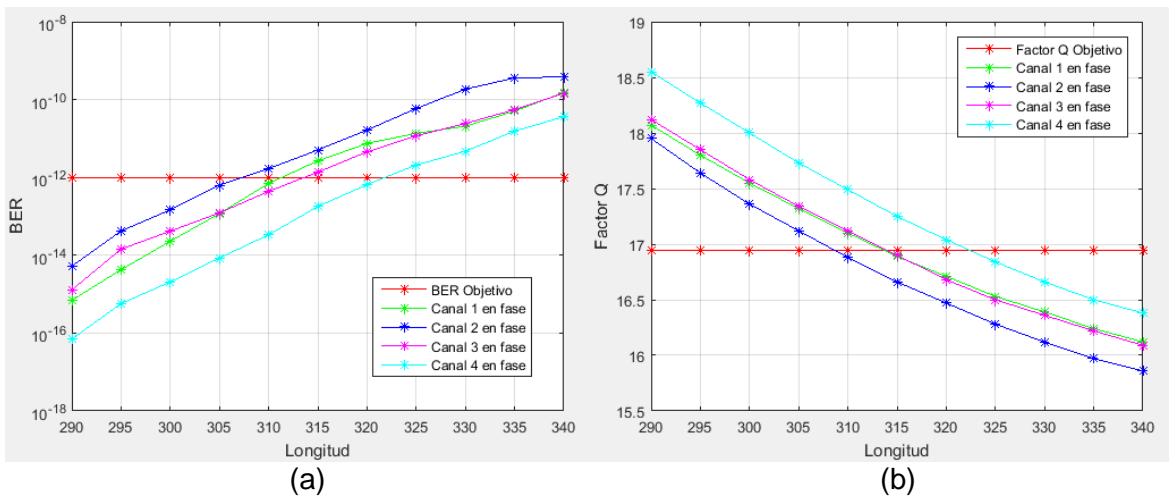


Figura 3.7 Parámetros de desempeño en fase para RZ-DQPSK y $D(\lambda) = 8\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$: (a) BER vs Longitud, (b) Factor Q vs Longitud.

Al realizar una comparación entre la figura 3.6 y 3.7 se verifica que los cuatro canales presentan un comportamiento similar, por tal razón, se escoge el canal 2 en fase ya que alcanza una menor distancia representando el peor caso, por lo tanto, la figura 3.8 expone los resultados arrojados por OptSim para este canal a una distancia de 308Km, distancia en la cual se obtiene un nivel de potencia de -80.63dBm (menor a -30dBm), haciendo necesario el uso de amplificadores ópticos para compensar la pérdida de potencia.

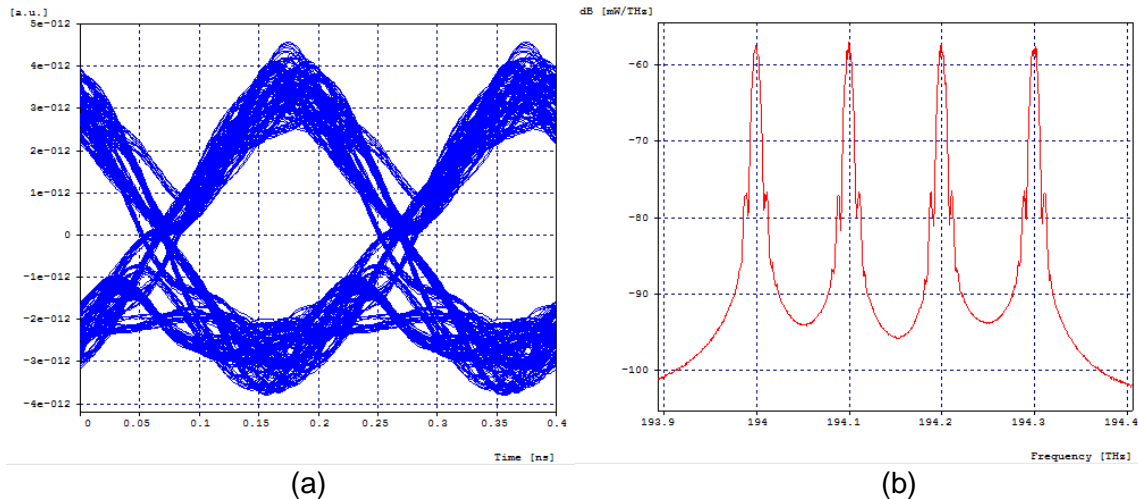
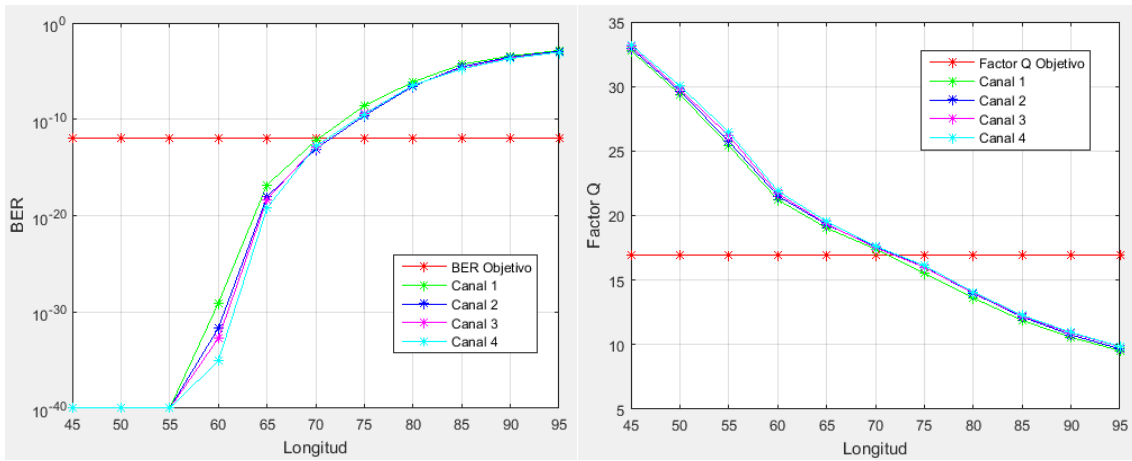


Figura 3.8 (a) Diagrama de ojo del canal 2 en fase y (b) Espectro de Frecuencia a una distancia de 308 Km para RZ-DQPSK y $D(\lambda) = 8\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$.

Finalmente, en este caso de estudio se puede concluir que a menor coeficiente de dispersión cromática es posible alcanzar una mayor distancia, aunque, se debe tener en cuenta que a medida que aumenta la longitud de fibra se presentan mayores pérdidas por atenuación lo que hace necesario la implementación de amplificadores ópticos. A continuación, se realiza un análisis de la incidencia de este parámetro sobre el formato de modulación RZ-PDPSK.

3.1.2 Caso 2: simulación en ausencia de técnicas de compensación de la CD, variando el coeficiente de dispersión cromática para el formato RZ-PDPSK.

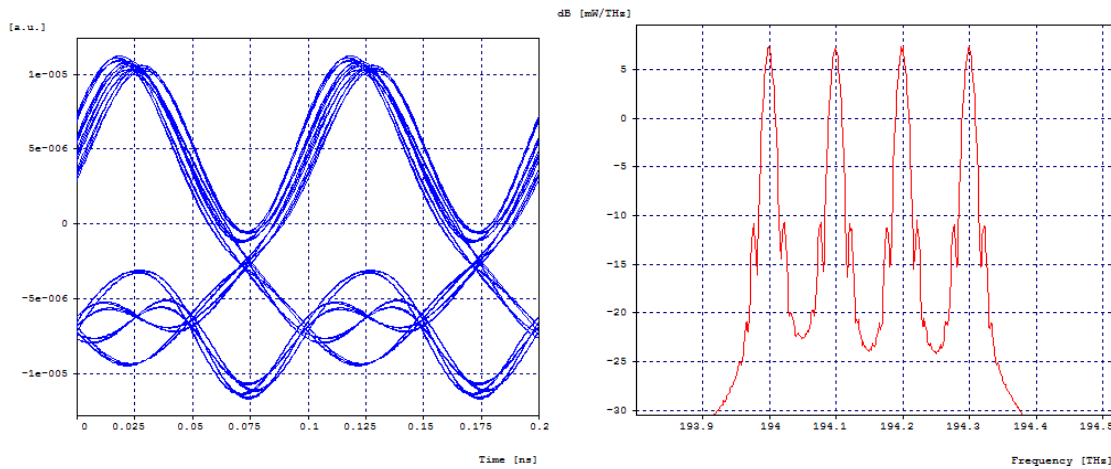
En el presente caso de estudio se realiza un análisis similar al desarrollado en el caso 1, modificando la modulación a RZ-PDPSK; por lo tanto, es necesario mantener los mismos parámetros fijos (separación de canales, potencia de transmisión), y variar la longitud de la SMF-28e+ junto al coeficiente de dispersión cromática, para determinar la máxima distancia alcanzable y verificar el impacto de la variación de estos parámetros; igualmente, comprobar que a mayor longitud de la fibra se obtiene mayor dispersión acumulada. A continuación, se evalúan los parámetros de desempeño con un $D(\lambda) = 17\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$.



(a) (b)
Figura 3.9 Parámetros de desempeño para RZ-PDPSK con $D(\lambda) = 17\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$:
 (a) BER vs Longitud y (b) Factor Q vs Longitud.

El análisis de este caso de estudio se encuentra basado en los resultados consignados en el anexo C. La figura 3.9 evidencia que la máxima distancia que el enlace alcanza es de 70Km cumpliendo los parámetros de desempeño ($\text{BER}=10^{-12}$ y factor $Q=16.94\text{dB}$), sin implementar compensación de la CD; sin embargo, al compararlo con el formato de modulación RZ-DQPSK con una fibra de coeficiente de dispersión de $17\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$, se prueba que el alcance del presente formato es mucho menor.

Para este formato de modulación se define el canal 1 como el peor caso ya que alcanza una menor distancia, por lo cual, la figura 3.10 expone los resultados para éste a una distancia de 70Km, que al igual que en los diagramas anteriores se observa jitter causado por el ensanchamiento de los pulsos, además, de un espectro de frecuencia con un nivel de potencia en recepción de -14.63dBm el cual es mayor al umbral del receptor, por lo que no se hace necesario el uso de amplificadores ópticos.



(a) (b)
Figura 3.10 (a) Diagrama de ojo del canal 1 y (b) Espectro de frecuencia a una distancia de 70Km con $D(\lambda) = 17\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$ para RZ-PDPSK.

A continuación, se evalúan los parámetros de desempeño, siguiendo el mismo procedimiento anterior, pero variando el coeficiente de dispersión cromática de la fibra de un valor de 17 a $8\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$.

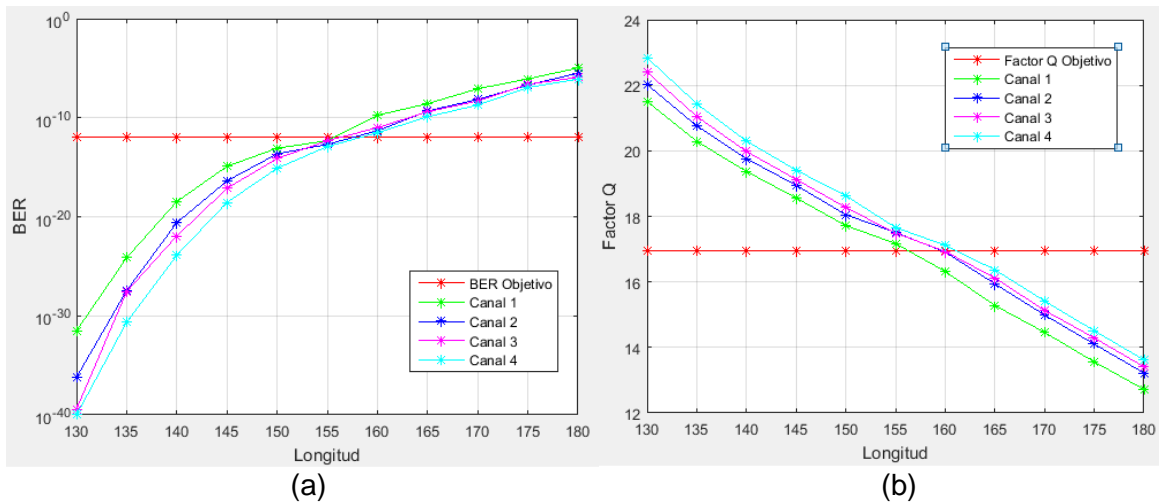


Figura 3.11 Parámetros de desempeño para RZ-PDPSK y $D(\lambda) = 8\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$: (a) BER vs Longitud y (b) Factor Q vs Longitud.

La figura 3.11 permite evidenciar que la máxima distancia que el enlace alcanza es de 156Km, la cual cumple con los parámetros mínimos de desempeño ($\text{BER}=10^{-12}$ y factor $Q=16.94\text{dB}$), sin implementar compensación de la CD, sin embargo, al compararlo con el formato de modulación RZ-DQPSK con coeficiente de dispersión de $8\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$ se verifica que el alcance del presente formato es mucho menor. También, se puede verificar que el canal 1 alcanza una menor distancia representando el peor caso, por lo cual, la figura 3.12 muestra el diagrama de ojo y espectro de frecuencia de éste a una distancia de 156Km, en este caso el nivel de potencia también es menor que el umbral del receptor, tomando un valor de -38.26dBm , por lo que se hace necesario el uso de amplificadores para compensar la pérdida de potencia.

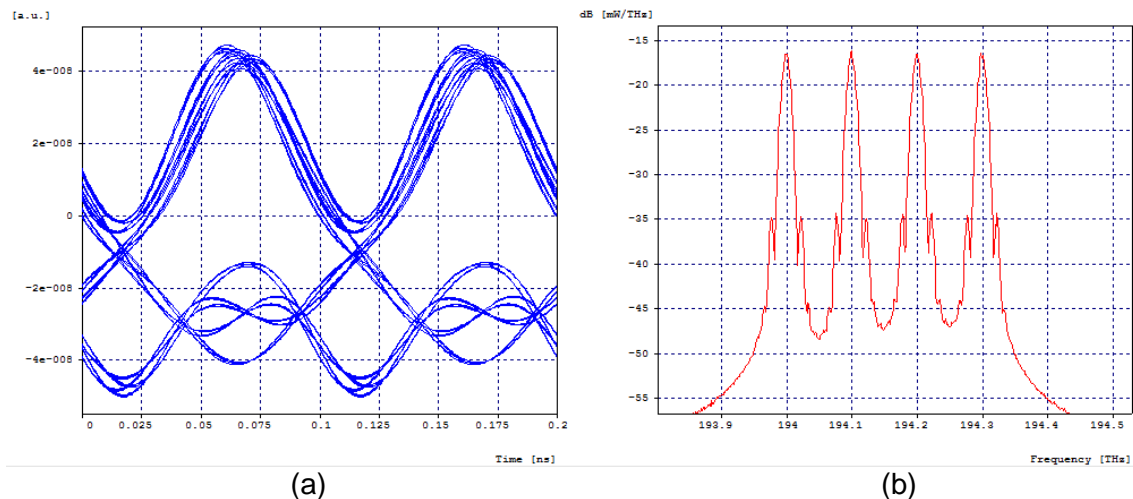


Figura 3.12 (a) Diagrama de ojo del canal 1 y (b) Espectro de frecuencia a una distancia de 156Km con $D(\lambda) = 8\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$ para RZ-PDPSK.

A continuación, en la tabla 3.1 se presenta un resumen de la máxima distancia alcanzada, eligiendo como red básica las configuraciones con coeficiente de dispersión cromática de $17\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$, que corresponde a distancias de 140 y 70Km para RZ-DQPSK y RZ-PDPSK respectivamente, casos que tienen en cuenta efectos de CD y atenuación para una separación de canales de 100GHz y una potencia de transmisión de 5dBm, bajo los parámetros mínimos de desempeño de redes DWDM a 10Gbps.

Formato de modulación	D (λ) (ps/nm*Km)	Canal	Longitud SFM-28e+ (Km)	BER	Factor Q (dB)	Potencia (dBm)
RZ-DQPSK (cuadratura)	17	1	145	6.20×10^{-13}	17.03	-35.62
RZ-DQPSK (fase)	17	2	140	1.00×10^{-12}	16.99	-34.26
RZ-DQPSK (cuadratura)	8	1	315	2.73×10^{-13}	17.17	-82.54
RZ-DQPSK (fase)	8	2	308	1.12×10^{-12}	16.98	-80.63
RZ-PDPSK	17	1	70	5.93×10^{-13}	17.41	-14.63
RZ-PDPSK	8	1	156	6.44×10^{-13}	17.01	-38.26

Tabla 3.1 Medidas de distancia, BER, factor Q, potencia en recepción, del escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK.

Finalmente, teniendo en cuenta los casos 1 y 2 se concluye que a menor coeficiente de dispersión cromática de la fibra es posible alcanzar una mayor distancia, esto se debe a que a mayor coeficiente los pulsos se ensanchan más rápido traslapándose con los adyacentes; igualmente, se debe tener en cuenta si es o no necesaria la implementación de amplificadores ópticos para que la potencia llegue por encima del umbral del receptor, dado que a medida de que aumenta la distancia se genera una mayor atenuación.

Cabe resaltar, que a pesar de que con $8\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$ se logran alcanzar mayores distancias, para el análisis de los siguientes casos se fija el coeficiente de dispersión en $17\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$ debido a que es el característico de la SMF-28e+; además, no es conveniente tomar un valor menor, ya que en un entorno real se deben tener en cuenta otras degradaciones de la fibra (las cuales pueden ocasionar caídas de la red), en las que el impacto de sus efectos pueden ser minimizados por la CD, como es el caso de la PMD, la SPM, la XPM y la FWM [30] [31].

A continuación, se realiza una evaluación de los parámetros de desempeño variando la longitud de la fibra SMF-28e+ y la potencia de transmisión en un rango de 0-6dBm, dejando otros parámetros fijos para los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK; además, se muestran los resultados de un solo canal para cada modulación, ya que los cuatro presentan un comportamiento similar, la elección de éste se encuentra basada teniendo en cuenta los anteriores resultados, escogiendo el canal que representa el peor caso.

3.1.3 Caso 3: simulación en ausencia de técnicas de compensación de la CD, variando la potencia de transmisión para el formato RZ-DQPSK.

El objetivo de este caso de estudio, es comprobar que las variaciones de potencia dentro del rango establecido por la recomendación ITU-T G.691 de 0-6dBm, no son significativos para el desempeño de la red sobre los formatos de modulación estudiados en este trabajo, por lo tanto, es válido escoger una potencia de transmisión de 5dBm para el análisis de los todos los escenarios ya que éste es un valor comercial. En los resultados obtenidos se comprueba que los parámetros de desempeño tanto de BER como del factor Q, presentan un comportamiento con variaciones mínimas, lo anterior, se hace dejando otros parámetros fijos (el espaciamiento entre canales, técnica de formación de pulsos, coeficiente de dispersión), para ver únicamente el efecto de la potencia de transmisión.

A continuación, se evalúan los parámetros de desempeño con una separación de canales de 100GHz, variando la longitud de la fibra SMF-28e+ en un rango de 60 a 500km, presentando incrementos de 5Km y variación de la potencia de transmisión en un rango de 0 a 6dBm con incrementos de 1dBm, para el formato de modulación RZ-DQPSK; además, en las figuras 3.13 y 3.14, se presentan los resultados para el canal 2 en fase¹⁴. Los resultados de las simulaciones de este caso se encuentran consignados en el anexo D.

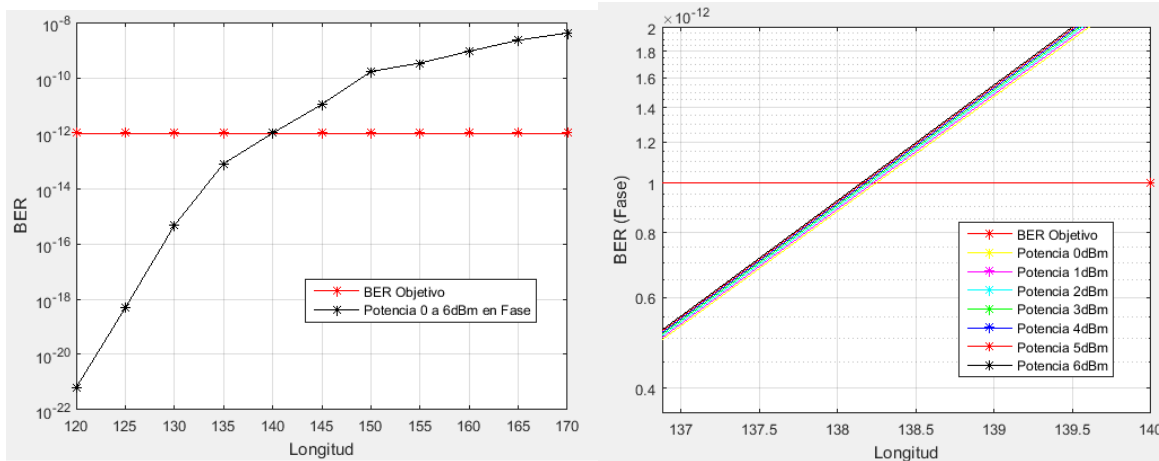


Figura 3.13 Parámetros de desempeño en fase para RZ-DQPSK y variación de potencia de transmisión: BER vs Longitud.

¹⁴ Se escoge el canal 2 en fase ya que éste fue el que presentó un menor desempeño para esta modulación en el Caso 1 (sección 3.1.1).

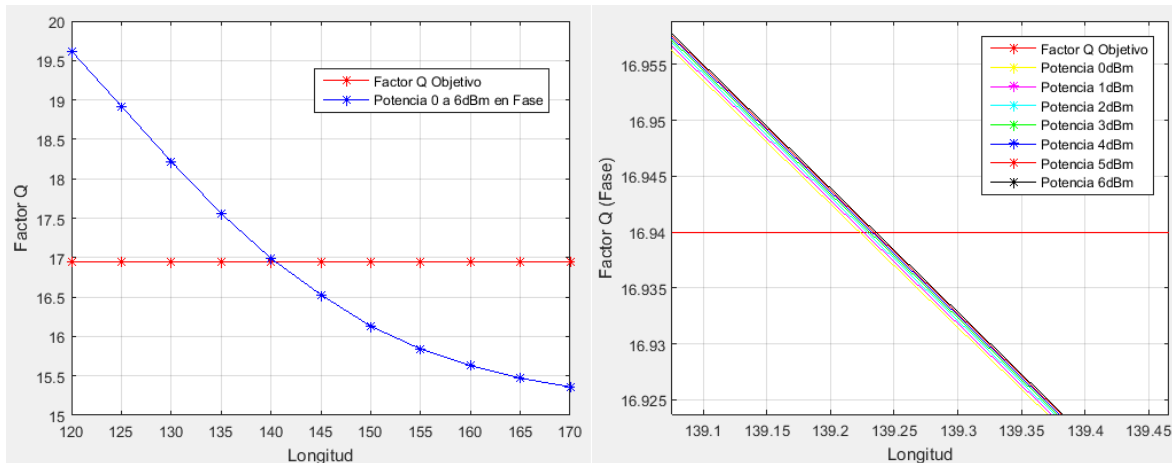


Figura 3.14 Parámetros de desempeño en fase para RZ-DQPSK y variación de potencia de transmisión: factor Q vs Longitud.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este caso de estudio y expuestos en las figuras 3.13 y 3.14, se comprueba que los parámetros de desempeño tanto de BER como del factor Q, presentan un comportamiento con variaciones mínimas cuando se presentan cambios en el nivel de potencia, esto se debe a que el rango de variación es muy pequeño.

3.1.4 Caso 4: simulación en ausencia de técnicas de compensación de la CD, variando la potencia de transmisión para el formato RZ-PDPSK.

Al igual que en el caso 3, el objetivo de éste es comprobar que las variaciones de potencia dentro del rango establecido por la recomendación ITU-T G.691 de 0-6dBm, no son significativos para el desempeño de la red, lo anterior, se hace dejando otros parámetros fijos (el espaciado entre canales, técnica de formación de pulsos, coeficiente de dispersión), para ver únicamente el efecto de la potencia de transmisión.

A continuación, se evalúan los parámetros de desempeño con una separación de canales de 100GHz, variando la longitud de la fibra SMF-28e+ en un rango de 60 a 500km presentando incrementos de 5Km, y variando la potencia de transmisión en un rango de 0 a 6dBm presentando incrementos de 1dBm, para el formato de modulación RZ-PDPSK; en la figura 3.15 y 3.16, se presentan los resultados para el canal 1, ya que éste fue el que presentó un menor desempeño para esta modulación en el caso 2 (sección 3.1.2). Los resultados de las simulaciones presentados en las figuras de este caso, se encuentran consignados en el anexo E.

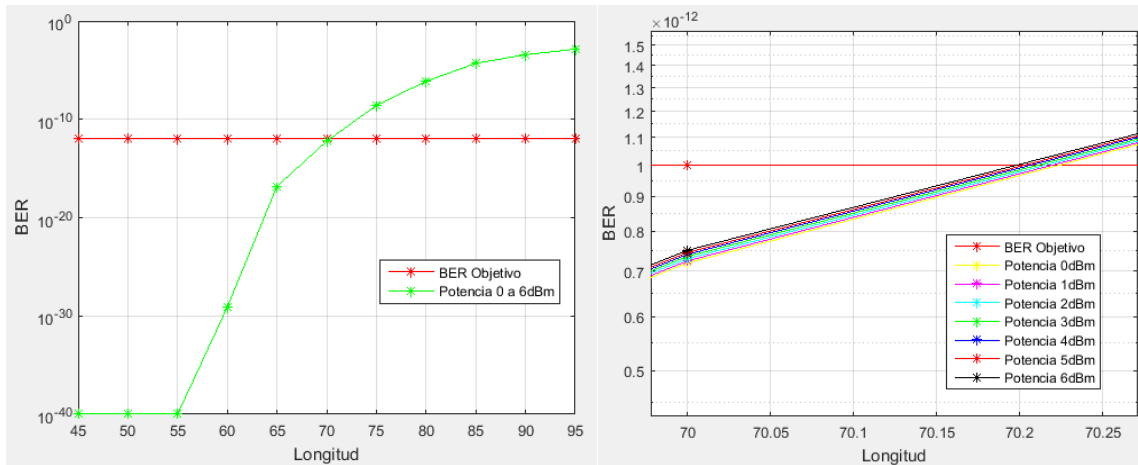


Figura 3.15 Parámetros de desempeño para RZ-PDPSK y variación de potencia de transmisión: BER vs Longitud.

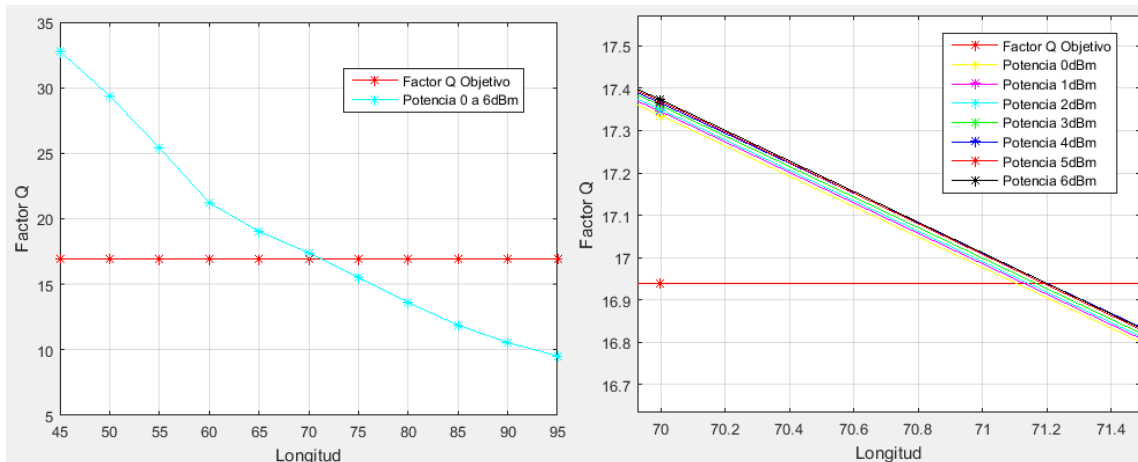


Figura 3.16 Parámetros de desempeño para RZ-PDPSK y variación de potencia de transmisión: Factor Q vs Longitud.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este caso de estudio y expuestos en las figuras 3.15 y 3.16, se comprueba que los parámetros de desempeño tanto de BER como del factor Q, presentan un comportamiento con variaciones mínimas cuando se presentan cambios en el nivel de potencia, esto se debe a que el rango de variación es muy pequeño.

La limitación del desempeño de la red es menor cuando la potencia de transmisión aumenta, pero este incremento se debe mantener dentro del rango establecido en la recomendación ITU-T G.691, debido a que los valores elevados de potencia incurrirán en la aparición de efectos no lineales en la red [31] [35] [37]. Finalmente, en los casos 3 y 4 se verifica que al realizar una variación del nivel de potencia dentro del rango 0-6dBm (1 a 3.98mW), los parámetros de BER y factor Q no presentan cambios significativos; por lo cual, para el análisis de los siguientes casos se establece un nivel de potencia en 5dBm, ya que es un valor comercial implementado por diversos operadores y se encuentra dentro del rango de operación de la recomendación.

A continuación, en los casos 5 y 6 se realiza una evaluación de los parámetros de desempeño variando la longitud de la fibra SMF-28e+ y la separación entre canales, como se estableció en la tabla 2.2, dejando otros parámetros fijos para los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK; además, se muestran los resultados de un solo canal para cada modulación ya que los cuatro presentan un comportamiento similar (la elección de éste se encuentra basada, teniendo en cuenta los resultados del caso 1 y caso 2). El estudio de estos casos se realiza para verificar cual formato tolera menos espaciado entre canales, con el fin de concluir si alguno de los dos es más eficiente espectralmente, dado que al disminuir este parámetro se puede transmitir un mayor volumen de información.

3.1.5 Caso 5: simulación en ausencia de técnicas de compensación de la CD, variando el espaciado entre canales para el formato RZ-DQPSK.

En este caso de estudio se evalúan los parámetros de desempeño variando la separación de canales entre 25, 50 y 100GHz, tomando una frecuencia de referencia en 194.0THz; además, se varia la longitud de la fibra SMF-28e+ en un rango de 120 a 170km (rango de resultados de los anteriores casos), presentando incrementos de 5Km para el formato de modulación RZ-DQPSK. Cabe resaltar, que los resultados obtenidos a través de la herramienta de simulación se encuentran consignados en el anexo F.

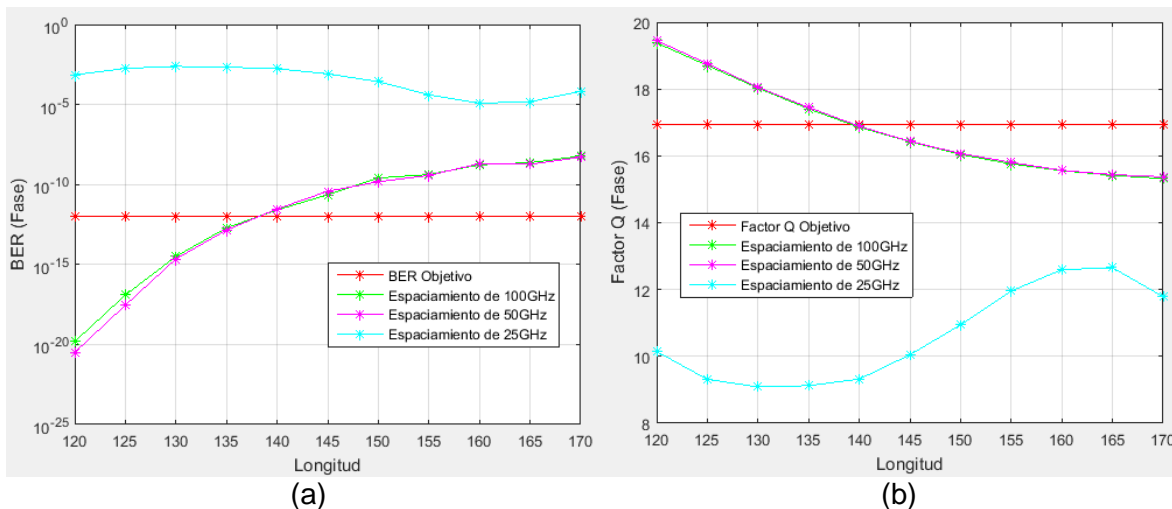


Figura 3.17 Parámetros de desempeño en ausencia de técnicas de compensación ópticas y diferentes separación de canales para RZ-DQPSK: (a) BER vs Longitud y (b) factor Q vs Longitud.

En la figura 3.17 se evidencia que los valores de 50 y 100GHz son óptimos para la red básica definida hasta el momento, dado que estos valores presenta un comportamiento similar, debido a que el enlace solo tiene en cuenta la dispersión cromática y la atenuación, por lo tanto, una separación de canales de 50GHz se presenta como la más favorable ya que permite transmitir un mayor número de longitudes de onda. Por otro lado, se demuestra que este formato no tolera una separación de 25GHz ya que presenta un gran deterioro en la señal de información, lo que se evidencia en las figuras 3.18 y 3.19.

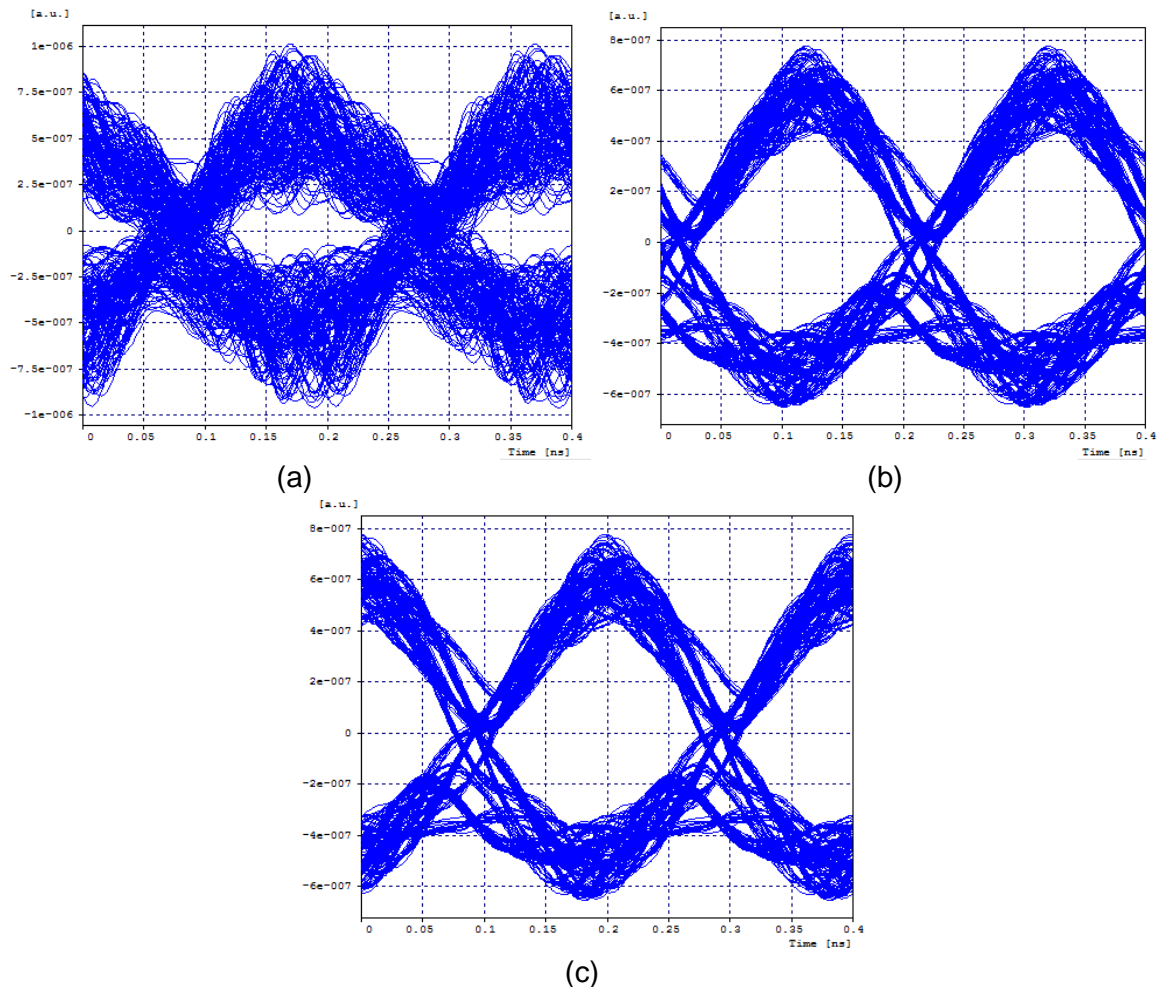


Figura 3.18 Diagramas de ojo con separación de (a) 25GHz, (b) 50GHz y (c) 100GHz para RZ-DQPSK.

Como se mencionó anteriormente, la CD provoca que las señales se propaguen a diferentes velocidades sobre la fibra, por lo que se produce un ensanchamiento de los pulsos, el cual se ve reflejado en un desplazamiento de fase o Jitter. Al analizar los diagramas de ojo en la figura 3.18 se observa ISI, que se genera al disminuir el espaciamiento entre canales, por lo tanto, una separación muy pequeña no es óptima ya que el diagrama pierde su forma haciendo más difícil la identificación de los pulsos en recepción.

Igualmente, en la figura 3.19 se distinguen los espectros de frecuencia en recepción, en los que cada canal llega sobre una frecuencia diferente dependiendo del espaciamiento entre ellos; también, se observa que el espectro correspondiente a una separación de 25GHz presenta un mayor deterioro haciendo más difícil la recuperación de la señal, esto se debe a que los pulsos se encuentran más cerca, por lo tanto, al recorrer cierta distancia del enlace la CD los ensancha provocando que se traslapen a una menor longitud.

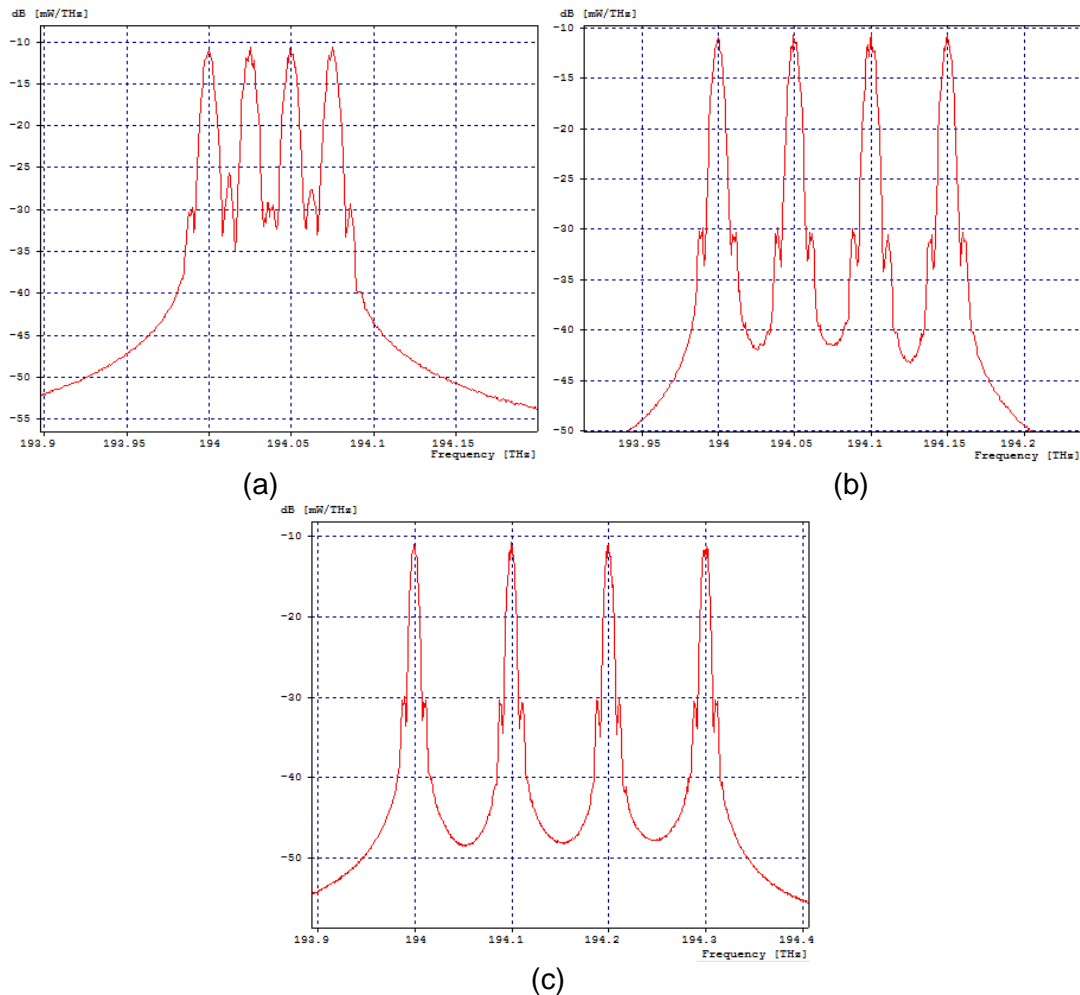


Figura 3.19 Espectros de frecuencia con separación de (a) 25GHz, (b) 50GHz y (c) 100GHz para RZ-DQPSK.

3.1.6 Caso 6: simulación en ausencia de técnicas de compensación de la CD, variando el espaciamiento entre canales para el formato RZ-PDPSK.

En el presente caso de estudio, se realiza una evaluación de los parámetros de desempeño variando la longitud de la fibra principal y la separación entre canales, para el formatos de modulación RZ-PDPSK, con el fin de verificar si éste tolera un espaciamiento entre canales menor al definido por la recomendación, dado que al disminuir este parámetro se puede logra una mayor eficiencia espectral, por lo tanto, sería posible transmitir mayor información.

A continuación, se evalúan los parámetros de desempeño con el fin de evidenciar la tolerancia de este formato frente a la variación del espaciamiento entre canales (25, 50 y 100GHz), tomando una frecuencia de referencia en 194.0THz; además, se varia la longitud de la fibra SMF-28e+ en un rango de 45 a 95km (rango de resultados de los anteriores casos), presentando incrementos de 5Km. Para este caso los resultados se consignaron en el anexo G.

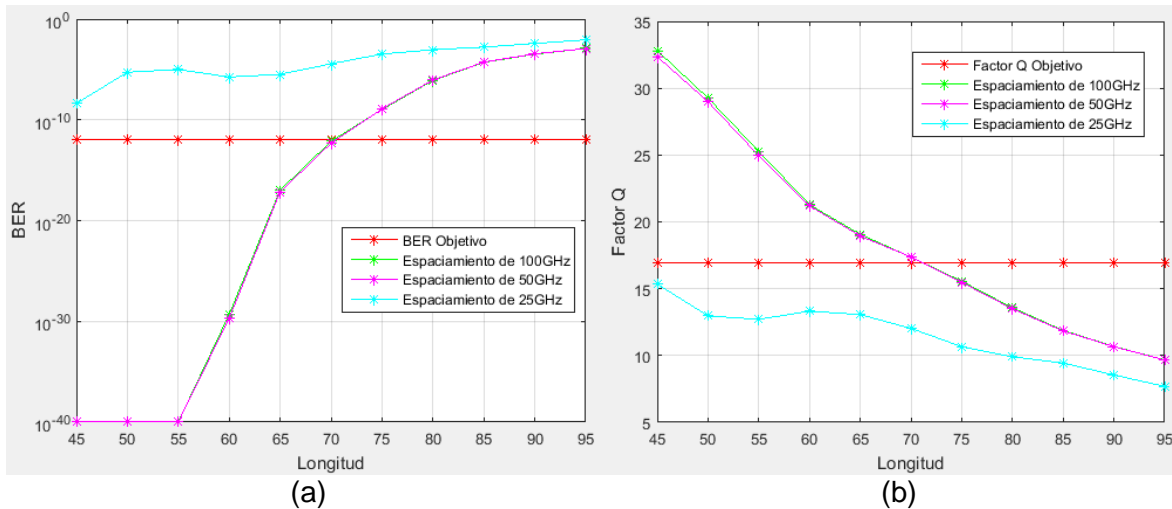


Figura 3.20 Parámetros de desempeño en ausencia de técnicas de compensación óptica y diferentes separación de canales para RZ-PDPSK: (a) BER vs Longitud y (b) factor Q vs Longitud.

Según los resultados arrojados por la figura 3.20 se puede concluir que el formato RZ-PDPSK soporta una separación de canales de 50GHz (solo con efectos de CD y atenuación), presentando un comportamiento similar a 100GHz, mientras que a 25GHz se evidencia un gran deterioro en el desempeño de la red; de acuerdo con lo anterior, se tienen los valores de 50 y 100GHz como óptimos para la red básica definida hasta el momento, siendo 50GHz más favorable dado que permite transmitir un mayor número de longitudes de onda. También, en la figura 3.21 y 3.22 se comprueba la degradación que sufre la señal cuando se va disminuyendo el espaciamiento entre los canales, aunque a 50 y 100GHz no se distingue mayor diferencia.

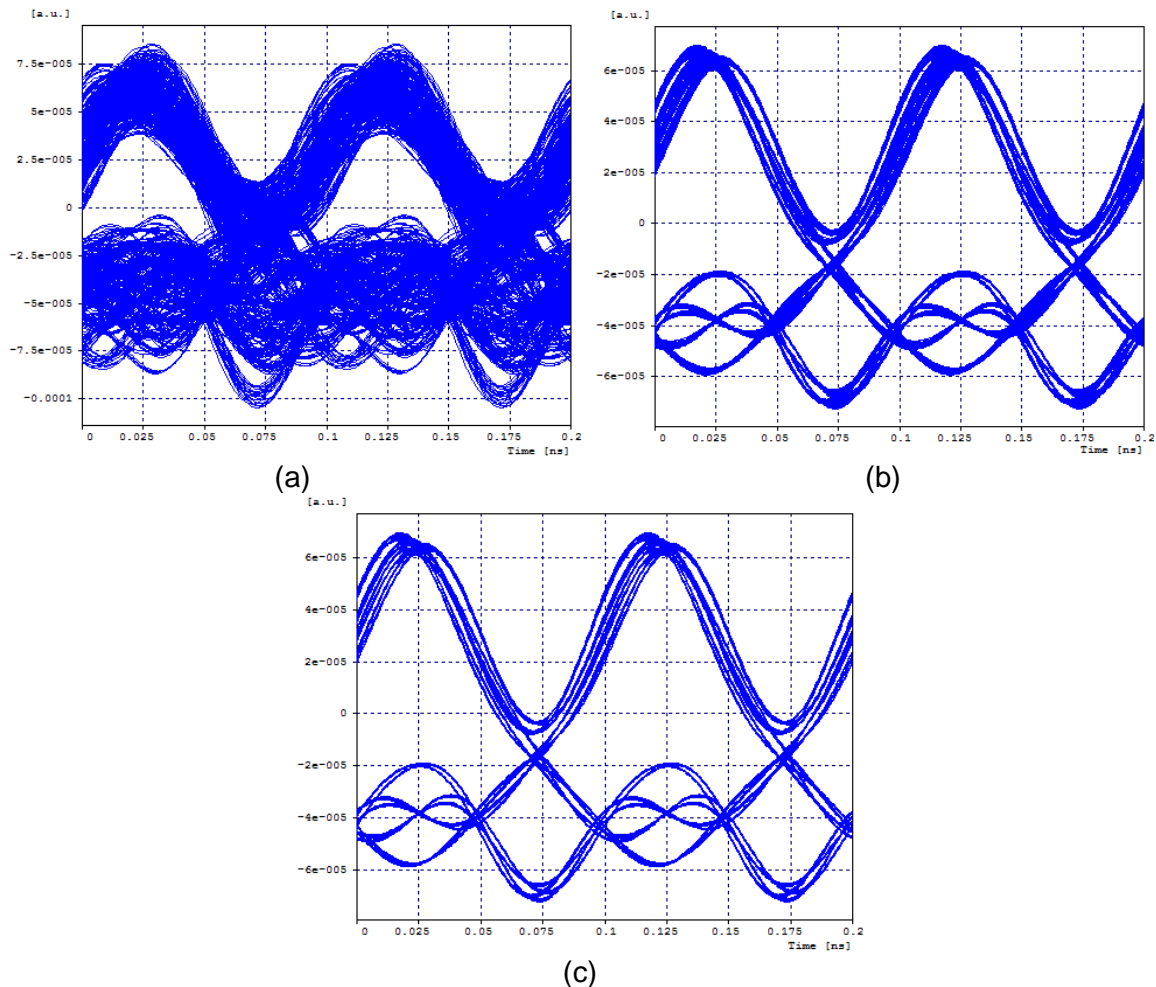


Figura 3.21 Diagramas de ojo con separación de (a) 25GHz, (b) 50GHz y (c) 100GHz para RZ-PDPSK.

A partir de la figura 3.21 se comprueba la degradación de los pulsos a medida que se disminuye la separación de los canales, en ese sentido, en los diagramas con separación de 50 y 100GHz no se puede observar mucha diferencia, pero a medida que la separación disminuye el ojo se va cerrando, lo que indica una notable degradación de la señal haciendo cada vez más difícil la interpretación de los pulsos.

Igualmente, en la figura 3.22 se comprueba que cada canal llega sobre una frecuencia diferente dependiendo del espaciamiento entre ellos; también, se observa que el espectro correspondiente a una separación de 25GHz presenta un mayor deterioro, haciendo más difícil la recuperación de la señal, esto se debe a que los pulsos se encuentran más cerca, por lo tanto, al recorrer cierta distancia del enlace la CD los ensancha provocando que se traslapen a una menor longitud.

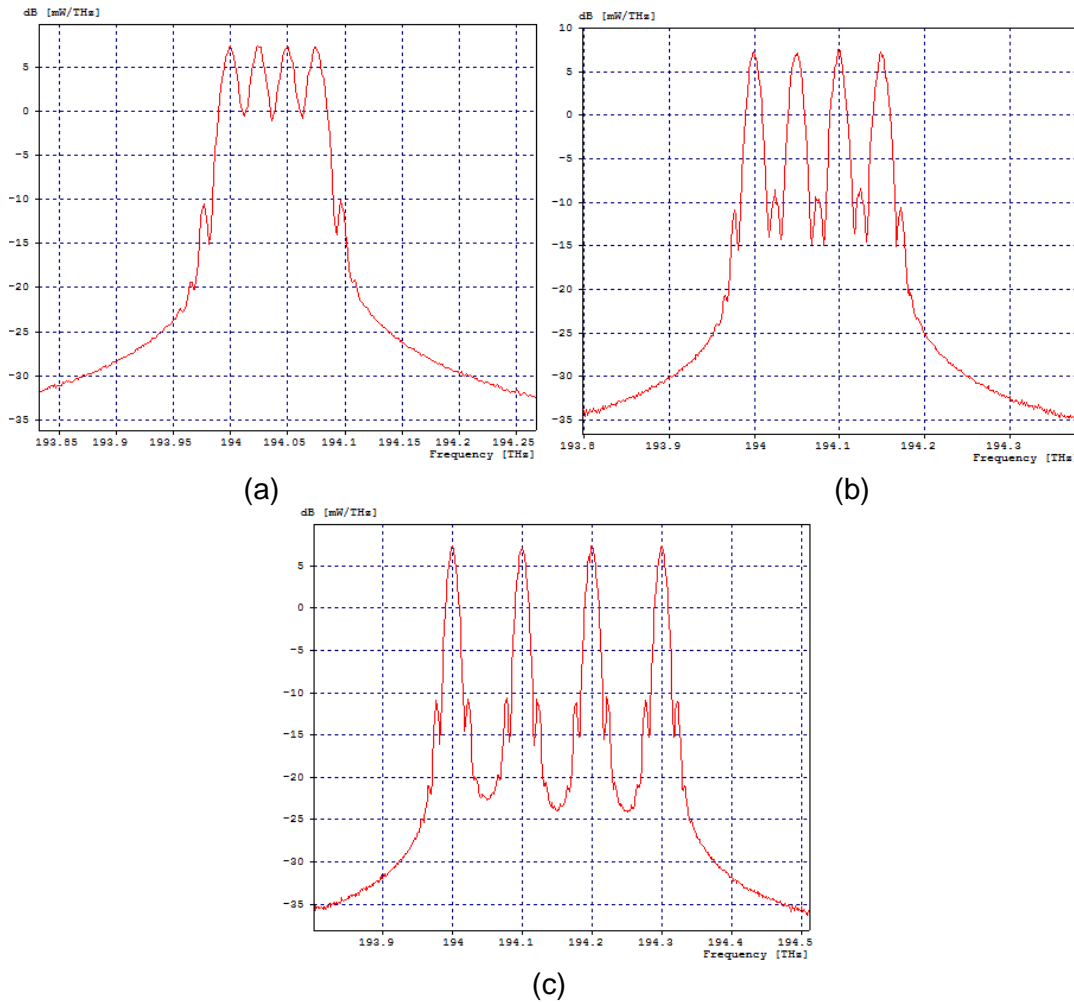


Figura 3.22 Espectros de frecuencia con separación de (a) 25GHz, (b) 50GHz y (c) 100GHz para RZ-PDPSK.

A pesar de que en los casos 5 y 6 se comprueba que los formatos estudiados soportan una separación de canales de 50GHz para una red solo con efectos de CD y atenuación, para los siguientes escenarios se define una separación de 100GHz debido a que este valor corresponde a redes DWDM a 10Gbps. Lo anterior, se hace con el fin de ver el impacto de este parámetro sobre una red que sea comparable con una real, por lo que en el escenario 3 se evalúa si considerando los efectos lineales y no lineales, los formatos también toleran la separación de 50GHz como en este caso.

A continuación, con el objetivo de analizar el desempeño de las diferentes técnicas de compensación óptica para la CD en redes DWDM, se establece la longitud de la fibra SMF-28e+ para cada formato de modulación, este valor viene dado por la red básica y los resultados arrojados en la tabla 3.1, por lo tanto, se define una longitud de fibra de 140 y 70Km para RZ-DQPSK y RZ-PDPSK respectivamente.

3.2 Escenario 2: simulación con técnicas de compensación óptica para la dispersión cromática.

En el presente escenario de simulación, se realiza un análisis de las técnicas de compensación óptica de la CD con el fin de determinar su efecto en la red básica, teniendo en cuenta los parámetros de desempeño ($BER=10^{-12}$ y factor $Q=16.94\text{dB}$), efectos de la dispersión cromática y atenuación.

Inicialmente, se realiza una evaluación de los parámetros de desempeño variando el nivel de compensación de la CD, bajo los regímenes de dispersión normal (compensación menor al 100% de la CD) y cero (compensación igual al 100% de la CD); posteriormente, se varía la configuración de los amplificadores entre Booster, inline y pre-amplificación (como se expone en la figura 3.23), para definir cuál tiene un mejor desempeño, lo anterior, se hace dejando algunos parámetros fijos (el espaciamiento entre canales, potencia de transmisión, técnica de formación de pulsos, dispersión cromática, distancia de la SMF-28e+), para ver únicamente el efecto de la amplificación y el nivel de compensación.

Finalmente, por medio de este escenario de simulación se establece la técnica de compensación que represente la mejor forma de compensar la CD, para los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK; también, este escenario tiene el fin de evaluar el nivel de compensación y la configuración del amplificador teniendo en cuenta los parámetros fijos establecidos en el transcurso de este capítulo y los definidos en la tabla 2.3.

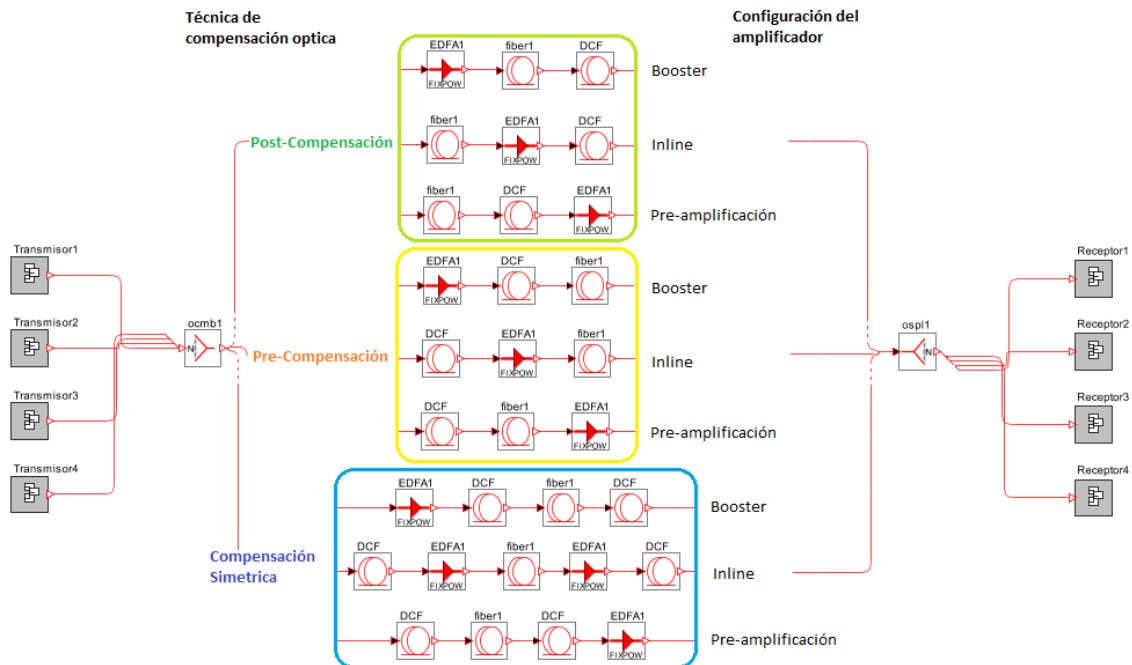


Figura 3.23 Escenarios de simulación con técnicas de compensación óptica y configuraciones del amplificador EDFA.

3.2.1 Caso 7: simulación con técnicas de compensación óptica de la CD, para el formato RZ-DQPSK.

En el presente caso de estudio se realiza un análisis de las técnicas de compensación óptica de la CD para RZ-DQPSK, con el fin de determinar su efecto en la red básica definida en el caso 1, teniendo en cuenta los parámetros mínimos de desempeño (definidos en la sección 2.2.3), efectos de la dispersión cromática y atenuación; inicialmente, se realiza una variación del nivel de compensación entre 25, 50, 75 y 100%; posteriormente, se varía la configuración de los amplificadores entre Booster, inline y pre-amplificación, para definir cuál tiene un mejor desempeño. El objetivo es establecer un escenario con la mejor técnica de compensar la CD para RZ-DQPSK (los resultados de este caso de estudio se encuentran consignados en el anexo H).

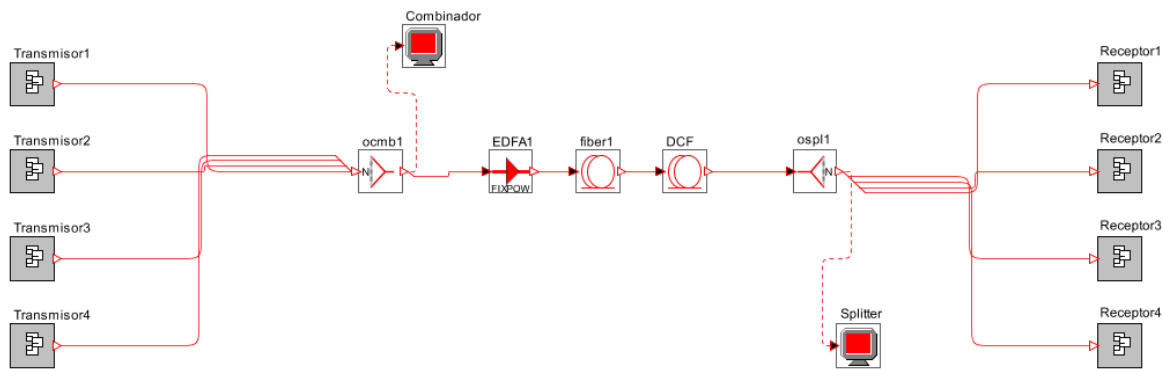


Figura 3.24 Escenario de simulación con técnicas de post-compensación para la CD y amplificación Booster.

En la figura 3.24 la técnica de post-compensación se encuentra con un amplificador en configuración Booster, en la cual el EDFA se sitúa a continuación de una fuente óptica y antes de la fibra; cabe resaltar, que para este caso de estudio la configuración del amplificador se varía para ver cuál y con qué sub-técnica de compensación los formatos presentan un óptimo desempeño. Inicialmente, se analiza el amplificador en Booster; posteriormente, se varía la configuración del EDFA a Inline, que sitúa el amplificador entre los span de fibra óptica; finalmente, se analiza pre-amplificación, configuración en la cual el EDFA se ubica antes del receptor.

En este caso de estudio se evalúan los parámetros de desempeño con una separación de canales de 100GHz manteniendo fija la longitud de la fibra SMF-28e+ en 140Km (según los resultados del caso 1), y variando el nivel de compensación de la CD lo cual se logra mediante la variación de longitud de DCF. Primero, la longitud de la fibra compensadora para un régimen cero, se halla a partir de la ecuación 2.4; después, el nivel de compensación de la CD al 25, 50 y 75% (régimen normal), se halla de acuerdo a los cálculos presentados en la tabla 3.2.

$$D_{DCF}L_{DCF} + L_{FOP}D_{FOP} = 0 \quad (2.4)$$

$$17 \frac{ps}{nm * km} \times 140km - 100 \frac{ps}{nm * km} \times L_{DCF} = 0, \quad L_{DCF} = 23.8 km$$

Nivel de Compensación (%)	Longitud DCF	Longitud DCF [Km]
100	$l_{DCF(100\%)}$	23.8
75	$l_{DCF(75\%)} = l_{DCF(100\%)} * 0.75$	17.8
50	$l_{DCF(50\%)} = l_{DCF(100\%)} * 0.50$	11.9
25	$l_{DCF(25\%)} = l_{DCF(100\%)} * 0.25$	5.9

Tabla 3.2 Nivel de compensación y longitud de DCF para RZ-DQPSK.

A continuación, se evalúan los parámetros de desempeño con la técnica de post-compensación para diferentes configuraciones del amplificador y niveles de compensación.

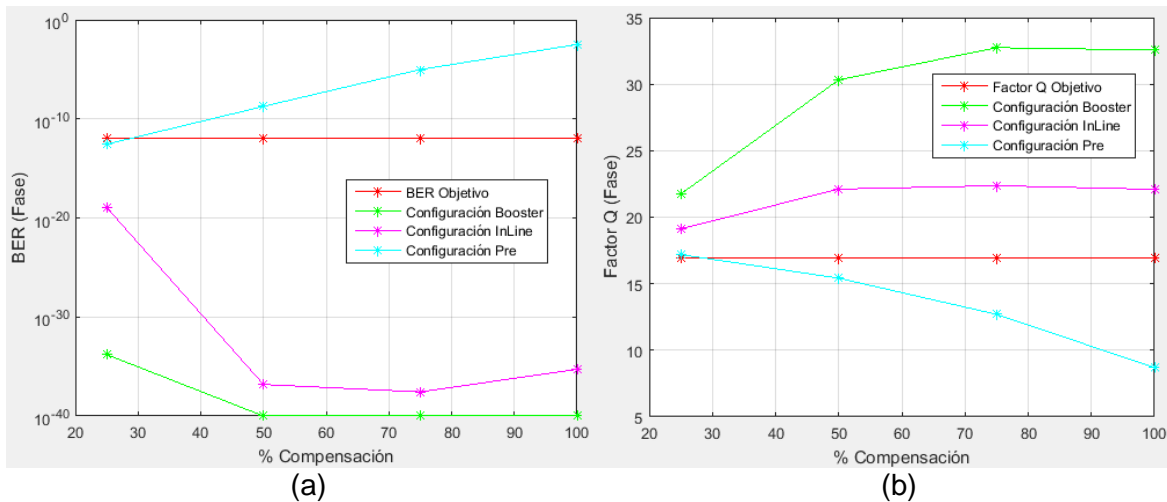


Figura 3.25 Parámetros de desempeño con técnica de post-compensación y diferentes configuraciones del amplificador para RZ-DQPSK en fase: (a) BER vs %Compensación y (b) factor Q vs %Compensación.

Post-compensación						
Nivel de compensación (%)	Booster		Inline		Pre-amplificación	
	G [dB]	P _{RX} [dBm]	G [dB]	P _{RX} [dBm]	G [dB]	P _{RX} [dBm]
25	8	-29.50	8	-29.45	8	-29.41
50	11	-29.78	11	-29.73	11	-29.60
75	15	-29.02	14	-29.98	14	-29.66
100	18	-29.32	18	-29.27	17	-29.56

Tabla 3.3 Ganancias y potencias de recepción para diferentes niveles de post-compensación sobre RZ-DQPSK.

A partir de la figura 3.25 (anexo H), se concluye que para la técnica de post-compensación el EDFA en Booster es la configuración más adecuada ya que presenta un óptimo desempeño, mientras que al implementar otra configuración el desempeño de la red se ve afectado dado que se disminuyen los valores de BER y factor Q. Además, la tabla 3.3 evidencia que para obtener un nivel de potencia en recepción por encima del umbral (-30dBm), es necesario implementar amplificadores EDFA con diferente ganancia según el porcentaje de compensación aplicado.

Por otro lado, se analizan los parámetros de desempeño con la técnica de pre-compensación para diferentes configuraciones del amplificador y niveles de compensación. En la figura 3.26 se evidencia que la configuración del EDFA en pre-amplificación es la que presenta un menor desempeño con valores de BER y factor Q mínimos, mientras que la configuración Booster e inline presentan un desempeño similar; además, en la tabla 3.4 se comprueba que para esta técnica también se hace necesario la implementación de amplificadores, para obtener un nivel de potencia en recepción por encima del umbral.

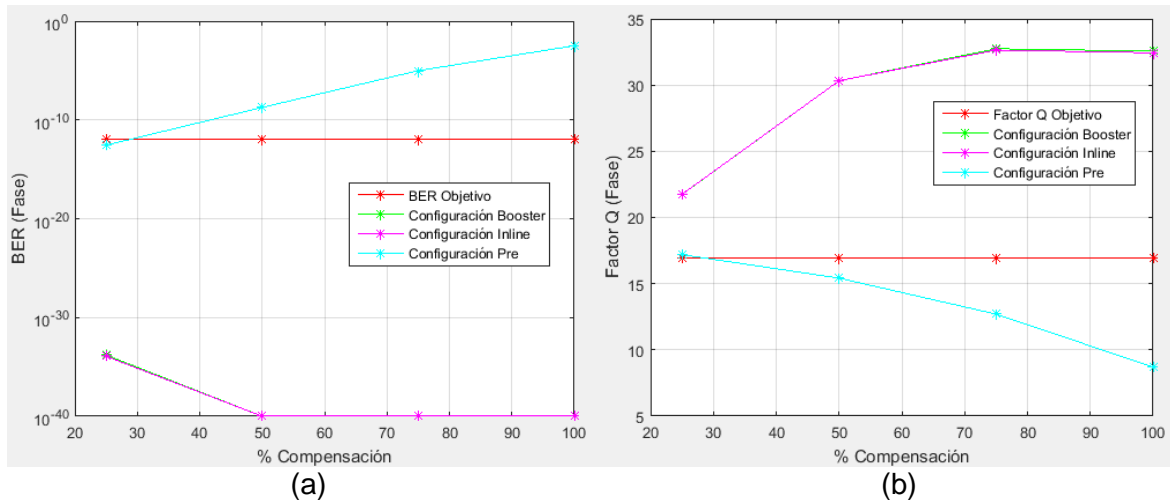


Figura 3.26 Parámetros de desempeño con técnica de pre-compensación y diferentes configuraciones del amplificador para RZ-DQPSK en fase: (a) BER vs %Compensación y (b) factor Q vs %Compensación.

Pre-compensación						
Nivel de compensación (%)	Booster		Inline		Pre-amplificación	
	G [dB]	P _{RX} [dBm]	G [dB]	P _{RX} [dBm]	G [dB]	P _{RX} [dBm]
25	8	-29.50	8	-29.50	8	-29.41
50	11	-29.78	11	-29.80	11	-29.60
75	15	-29.02	15	-29.03	14	-29.66
100	18	-29.32	18	-29.32	18	-29.56

Tabla 3.4 Ganancias y potencias de recepción para diferentes niveles de pre-compensación sobre RZ-DQPSK.

También, se evalúan los parámetros de desempeño con la técnica de compensación simétrica, para diferentes configuraciones del amplificador y porcentajes de compensación.

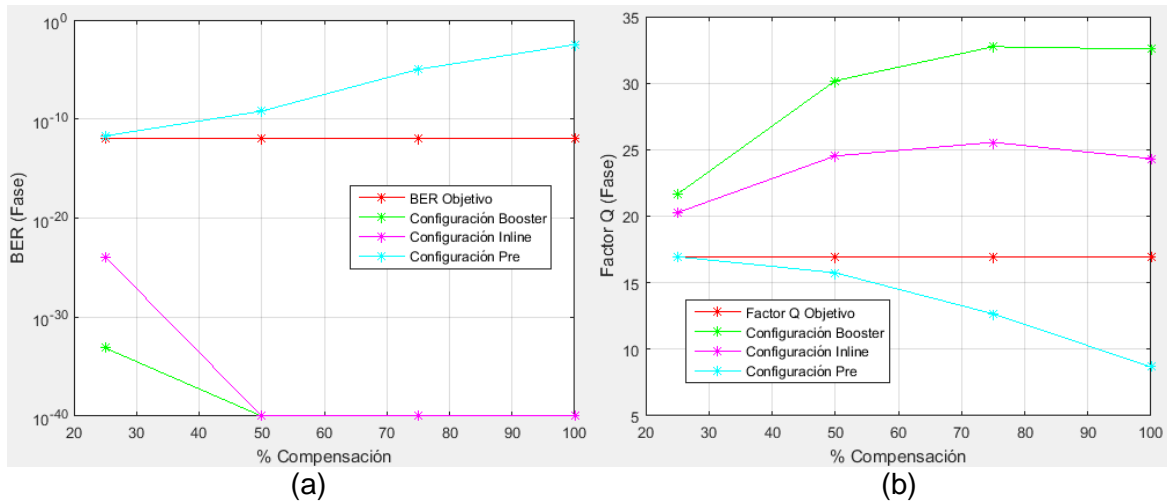


Figura 3.27 Parámetros de desempeño con técnica de compensación simétrica y diferentes configuraciones del amplificador para RZ-DQPSK en fase: (a) BER vs %Compensación y (b) factor Q vs %Compensación.

Compensación simétrica						
Nivel de compensación (%)	Booster		Inline		Pre-amplificación	
	G [dB]	P _{RX} [dBm]	G [dB]	P _{RX} [dBm]	G [dB]	P _{RX} [dBm]
25	8	-29.45	4x2	-29.42	8	-29.34
50	11	-29.75	6x2	-28.70	11	-29.56
75	15	-29.04	8x2	-28.01	15	-28.66
100	18	-29.32	9x2	-29.31	18	-28.56

Tabla 3.5 Ganancias y potencias de recepción para diferentes niveles de compensación simétrica sobre RZ-DQPSK.

En la figura 3.27 se verifica el comportamiento de los parámetros de desempeño para la técnica de compensación simétrica de la CD, evidenciándose que la configuración del EDFA en pre-amplificación es la que presenta un menor desempeño al igual que en post-compensación y pre-compensación, mientras que la configuración Booster e inline presentan un desempeño similar para la BER, pero Booster tiene un mejor comportamiento en el factor Q. Además, en la tabla 3.5 se muestra que para esta técnica de compensación en configuración inline es necesario la implementación de dos amplificadores (como se muestra en la figura 3.23), los cuales manejan la misma ganancia.

A continuación, se realiza una comparación de las técnicas de compensación ópticas con configuración Booster (ya que presento un mejor desempeño en la tres técnicas), con el fin de escoger el mejor caso para compensar la CD sobre el formato de modulación RZ-DQPSK. Cabe resaltar, que esta comparación y la elección del mejor caso de compensación, se hace teniendo en cuenta los efectos de dispersión cromática y atenuación.

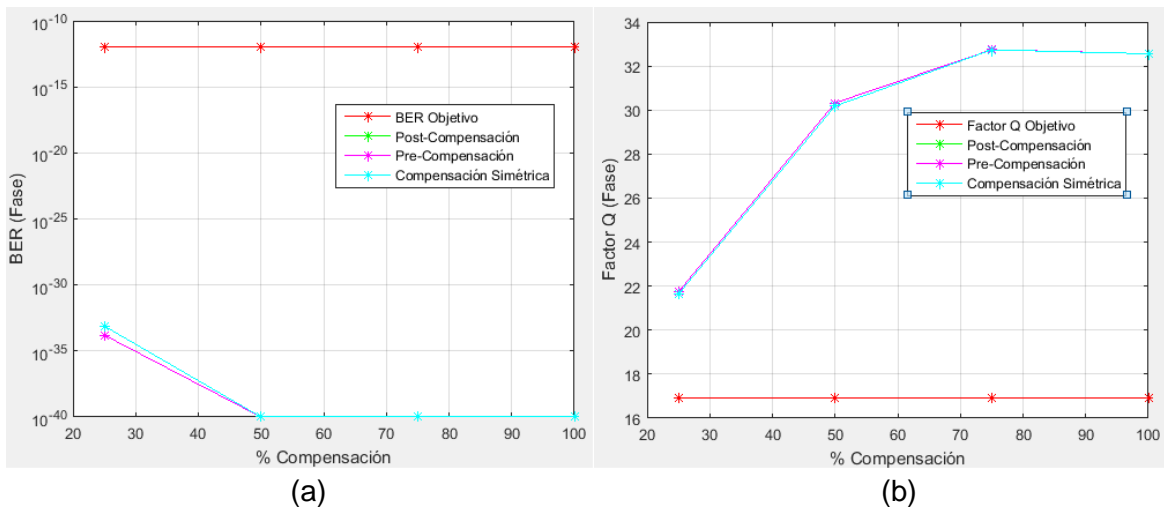


Figura 3.28 Parámetros de desempeño con técnicas de compensación ópticas y configuración del amplificador Booster para RZ-DQPSK: (a) BER vs %Compensación y (b) factor Q vs %Compensación.

Finalmente, en este caso de estudio no es posible definir la mejor compensación de la CD para el formato de modulación RZ-DQPSK, ya que la figura 3.28 evidencia que las técnicas de compensación con configuración Booster presentan un desempeño similar. Además, para definir la mejor compensación no se puede tener en cuenta el nivel de amplificación implementado dado que en todos los casos éste no varía significativamente (tabla 3.3, 3.4 y 3.5), por tal razón, es necesario evaluar la compensación de la CD para este formato en otro escenario el cual tiene en cuenta los efectos no lineales y de PMD (caso 9).

3.2.2 Caso 8: simulación con técnicas de compensación ópticas para la CD, para el formato RZ-PDPSK.

En el presente caso de estudio se realiza un análisis de las técnicas de compensación ópticas de la CD para RZ-PDPSK, con el fin de determinar su efecto en la red básica definida en el caso 2. Este análisis se realiza teniendo en cuenta los parámetros mínimos de desempeño (sección 2.2.3), efectos de dispersión cromática y atenuación; inicialmente, se varía el nivel de compensación entre 25, 50, 75 y 100%; posteriormente, se varía la configuración de los amplificadores entre Booster, inline y pre-amplificación; finalmente, se realiza una comparación entre ellas, con el objetivo de establecer un escenario que represente el mejor caso de las técnicas de compensación ópticas para este formato. A continuación, en la figura 3.29 se ilustra un escenario de simulación con técnica de post-compensación óptica para la CD.

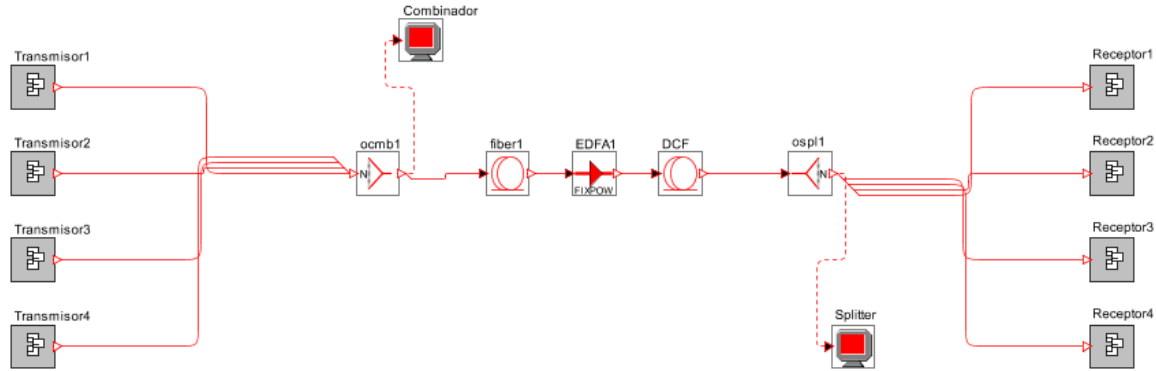


Figura 3.29 Escenario de simulación con técnica de post-compensación para la CD y amplificación inline.

Cabe resaltar que en la figura 3.29, la técnica de post-compensación se encuentra con un amplificador en configuración inline, que sitúa el amplificador entre los span de fibra óptica, igualmente, se realiza el análisis para la configuración Booster y pre-amplificación.

En este caso de estudio se evalúan los parámetros de desempeño con una separación de canales de 100GHz, manteniendo fija la longitud de la fibra SMF-28e+ en 70Km (definida en el caso 2), y variando el porcentaje de compensación de la CD lo cual se logra mediante la variación de longitud de DCF. Primero, la longitud de la fibra compensadora para un régimen cero, se halla a partir de la ecuación 2.4; después, el nivel de compensación de la CD al 25, 50 y 75% (régimen normal), se halla de acuerdo a los cálculos presentados en la tabla 3.6.

$$D_{DCF}L_{DCF} + L_{FOP}D_{FOP} = 0 \quad (2.4)$$

$$17 \frac{ps}{nm * km} \times 70km - 100 \frac{ps}{nm * km} \times L_{DCF} = 0, \quad L_{DCF} = 11.9 km$$

Nivel de Compensación (%)	Longitud DCF	Longitud DCF [Km]
100	$l_{DCF(100\%)}$	11.9
75	$l_{DCF(75\%)} = l_{DCF(100\%)} * 0.75$	8.9
50	$l_{DCF(50\%)} = l_{DCF(100\%)} * 0.50$	5.9
25	$l_{DCF(25\%)} = l_{DCF(100\%)} * 0.25$	3

Tabla 3.6 Porcentaje de compensación y longitud de DCF para RZ-PDPSK.

A continuación, se evalúan los parámetros de desempeño con las técnicas de compensación óptica, para diferentes configuraciones del amplificador y porcentajes de compensación.

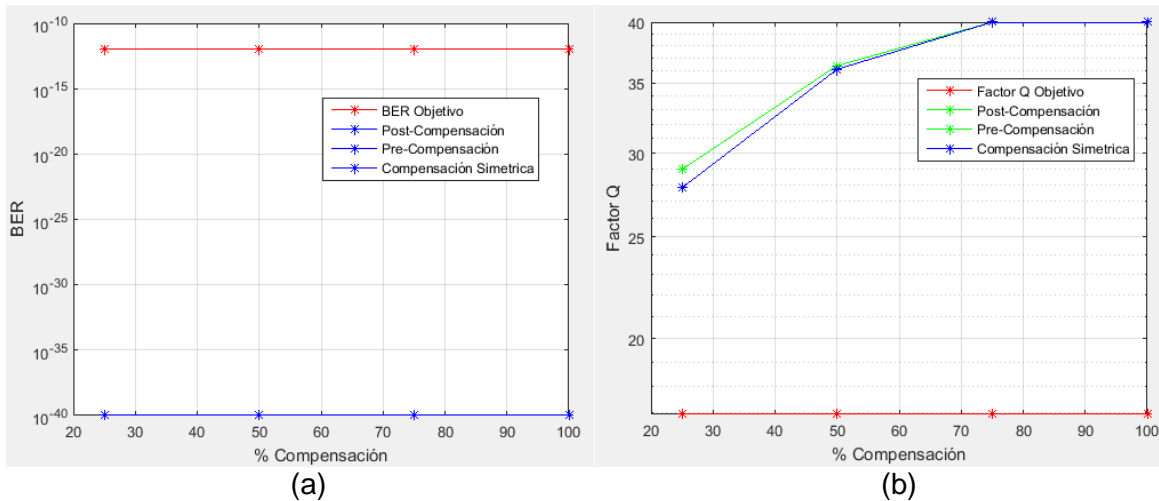


Figura 3.30 Parámetros de desempeño con técnicas de compensación ópticas y diferentes configuraciones del amplificador para RZ-PDPSK: (a) BER vs %Compensación y (b) factor Q vs %Compensación.

Técnicas de compensación			
Nivel de compensación (%)	Post-compensación	Pre-compensación	Compensación simétrica
	$P_{RX} [dBm]$	$P_{RX} [dBm]$	$P_{RX} [dBm]$
25	-16.27	-16.27	-16.18
50	-17.84	-17.84	-16.67
75	-19.57	-19.57	-19.53
100	-21.16	-21.16	-21.09

Tabla 3.7 Potencias de recepción para las técnicas con diferentes niveles de compensación en RZ-PDPSK.

Finalmente, en este caso de estudio no es posible definir la mejor compensación para RZ-PDPSK ya que en la figura 3.30 (anexo I), se evidencia que las tres técnicas tienen un comportamiento similar, lo que se debe a que no es necesario la implementación de amplificadores, dado que las potencias que llegan en recepción siempre se encuentran por encima del umbral (tabla 3.7). Por lo anterior, el análisis de las técnicas de compensación y la configuración del EDFA se lleva a cabo en el caso de estudio del caso 10 (sección 3.3.2), el cual tiene en cuenta los parámetros definidos anteriormente (escenario 1, escenario 2 y tabla 2.3), además de los efectos no lineales y de PMD.

3.3 Escenario 3: simulación con efectos lineales y no lineales.

En el presente escenario de simulación se realiza un análisis con el fin de determinar un escenario final el cual sea comparable con uno real, mediante el estudio de las técnicas de compensación de la CD con configuración del EDFA, teniendo en cuenta los efectos lineales y no lineales de la fibra. Inicialmente, se tienen en cuenta los parámetros fijos definidos en el transcurso de este capítulo y se analiza el impacto que causan los efectos no lineales y de PMD en la red básica; posteriormente, se halla la máxima distancia de SMF-28e+ con diferente longitud de fibra compensadora con el fin de ver el impacto que tienen las técnicas de compensación sin tener en cuenta las limitaciones de potencia.

Finalmente, se realiza un análisis de la máxima distancia alcanzable mediante la implementación de amplificadores, y de un aumento en la potencia de transmisión por encima de la definida por la recomendación UIT-T G.691, teniendo en cuenta que la potencia de recepción sea mayor al umbral y que se cumplan los parámetros mínimos de desempeño. La variación de estos parámetros se hace con el fin de ver el impacto de los valores grandes de ganancia ya que los amplificadores introducen ruido, además, verificar la influencia de potencias elevadas en los efectos no lineales.

Cabe resaltar, que el objetivo de este escenario es analizar el impacto que causa la CD junto a otros efectos de la fibra en la red, por lo cual, es necesario activar los efectos no lineales y de PMD, en la pestaña de control avanzado de los parámetros de la fibra en OptSim como se ilustra en la figura 3.31, en la que se cambian los parámetros Fiber Non-Linearity, Raman Crosstalk y Fiber PMD de “off” a “On”.

Parameter	Value
Fiber Non-Linearity	"On" ▼
Raman Crosstalk	"On" ▼
Fiber PMD	"On" ▼
Fiber Birefringence	"On" ▼
Polarization original frame recovering	"On" ▼

Figura 3.31 Parámetros de control avanzado de las fibras con efectos lineales y no lineales.

También, los parámetros Fiber Birefringence y Polarization original frame recovering se encuentran en “On” ya que las fibras ópticas son birrefringentes, dado que hay factores internos y externos que generan asimetrías en los índices de refracción del revestimiento y el núcleo; además, el segundo parámetro tiene el propósito de permitir el análisis de los efectos en la polarización inducidos por la PMD y las no linealidades.

3.3.1 Caso 9: simulación con efectos lineales y no lineales, para el formato RZ-DQPSK.

En el presente caso de estudio se realiza un análisis de las técnicas de compensación ópticas de la CD con configuración Booster definidas en el caso 7 (sección 3.2.1), teniendo en cuenta los efectos lineales y no lineales de la fibra, con el fin de escoger el mejor caso para compensar la CD sobre el formato de modulación RZ-DQPSK y determinar un escenario el cual sea comparable con uno real. Este análisis se realiza teniendo en cuenta los parámetros mínimos de desempeño ($BER=10^{-12}$ y factor $Q=16.94dB$), manteniendo los parámetros fijos establecidos en el transcurso de este capítulo (longitud SMF-28e+, separación de canales, potencia de transmisión, técnica de formación de pulsos) y los definidos en la tabla 2.3 para evaluar únicamente el efecto de las técnicas de compensación ópticas. A continuación, en la figura 3.32 se exponen los resultados consignados en el anexo J.

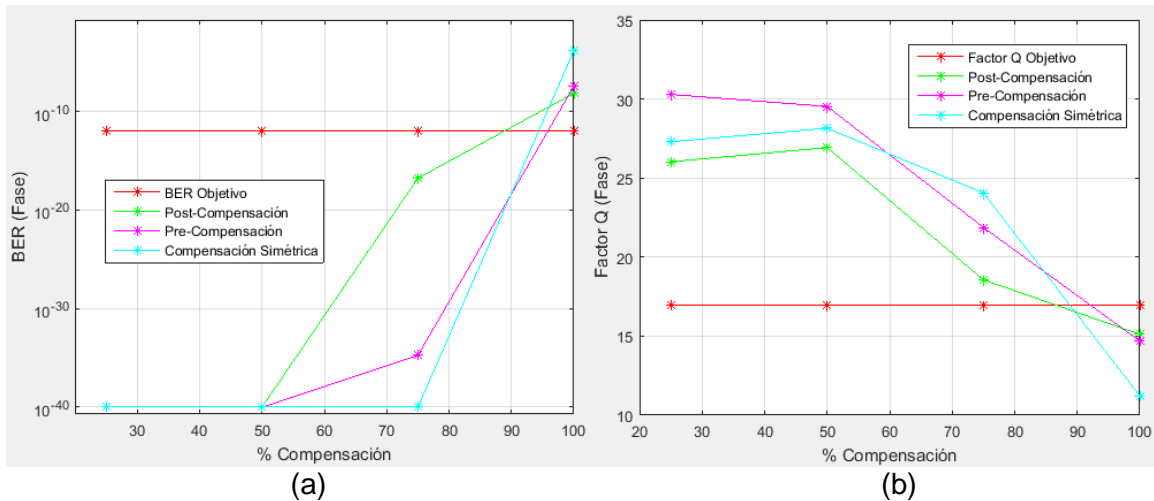


Figura 3.32 Parámetros de desempeño con técnicas de compensación ópticas y configuración Booster para RZ-DQPSK teniendo en cuenta los efectos lineales y no lineales: (a) BER vs %Compensación y (b) factor Q vs %Compensación.

Nivel de Compensación (%)	Mejor técnica de compensación con amplificación Booster
25	Pre-compensación
50	Pre-compensación
75	Compensación simétrica
100	Post-compensación

Tabla 3.8 Mejor técnica según el nivel de compensación para RZ-DQPSK en configuración Booster.

A partir de la figura 3.32 y la tabla 3.8 se evidencia que según el nivel de compensación evaluado, cierta técnica presenta un mejor desempeño comparada con las demás, pero en general, la técnica de compensación simétrica en Booster presenta un óptimo desempeño para todos los porcentajes de compensación, entonces, se llega a la conclusión que ésta es la adecuada para el formato RZ-DQPSK.

Técnica de compensación con configuración Booster						
Nivel de compensación (%)	Post-compensación		Pre-compensación		Compensación simétrica	
	G [dB]	P _{RX} [dBm]	G [dB]	P _{RX} [dBm]	G [dB]	P _{RX} [dBm]
25	8	-29.71	8	-30.13	8	-30.22
50	11	-30.64	11	-30.92	11	-31.59
75	15	-33.60	15	-30.91	15	-31.98
100	18	-35.28	18	-31.68	18	-31.58

Tabla 3.9 Ganancias y potencias de recepción para los niveles de compensación en Booster sobre RZ-DQPSK teniendo en cuenta EL y ENL¹⁵.

¹⁵ Efectos lineales y efectos no lineales.

Al comparar la tabla 3.9 con las tablas 3.3, 3.4 y 3.5, se evidencia que se mantienen las mismas ganancias en los amplificadores pero la potencia disminuye en un rango de 0 a 6dBm, lo que se debe a las degradaciones causadas por los efectos no lineales, las cuales también se evidencian en los parámetros de desempeño (figura 3.33). Estos valores de ganancias se mantienen iguales que en el caso 7 (sección 3.2.1), dado que su variación no representa un aumento de potencia significativo en recepción, pero si un decremento de los parámetros de desempeño.

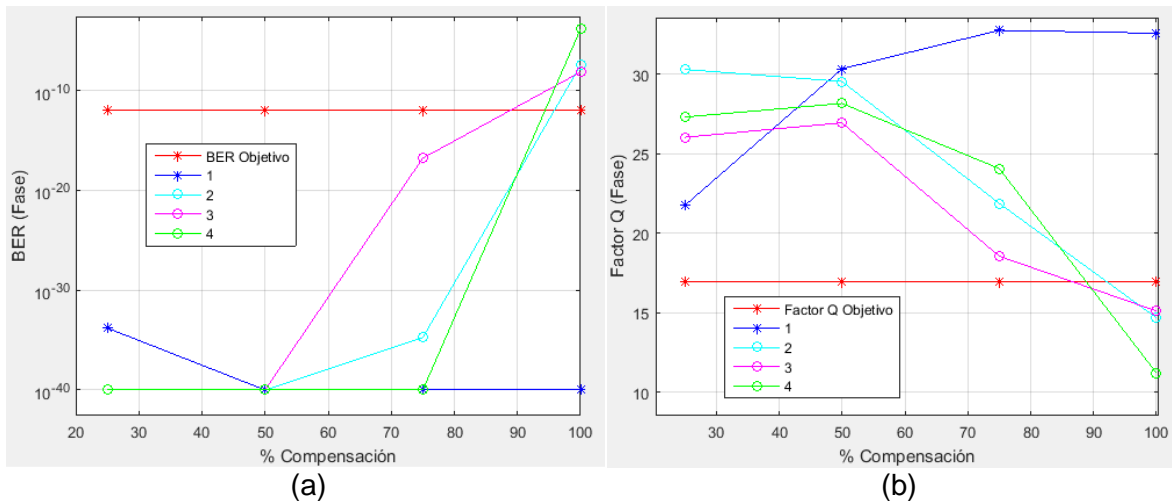


Figura 3.33 Parámetros de desempeño con técnicas de compensación ópticas y configuración Booster para RZ-DQPSK: (a) BER vs %Compensación y (b) factor Q vs %Compensación. (1) Con efectos de CD y atenuación, (2) pre-compensación con EL y ENL, (3) post-compensación con EL y ENL, (4) compensación simétrica con EL y ENL.

Teniendo en cuenta la relación costo-eficiencia, se llega a la conclusión que una compensación al 100% no es óptima, dado que requiere mayor longitud de DCF lo que incrementa los costos, además, es conveniente dejar dispersión residual para minimizar el impacto de otros efectos de la fibra.

3.3.2 Caso 10: simulación con efectos lineales y no lineales, para el formato RZ-PDPSK.

En el presente escenario de simulación se realiza un análisis de las técnicas de compensación ópticas de la CD, teniendo en cuenta los efectos lineales y no lineales de la fibra con el fin de determinar la mejor técnica de compensación para el formato RZ-PDPSK; este análisis se hace teniendo en cuenta los parámetros mínimos de desempeño, manteniendo los parámetros fijos establecidos en el transcurso de este capítulo y los definidos en la tabla 2.3 para evaluar únicamente el efecto de las técnicas de compensación ópticas.

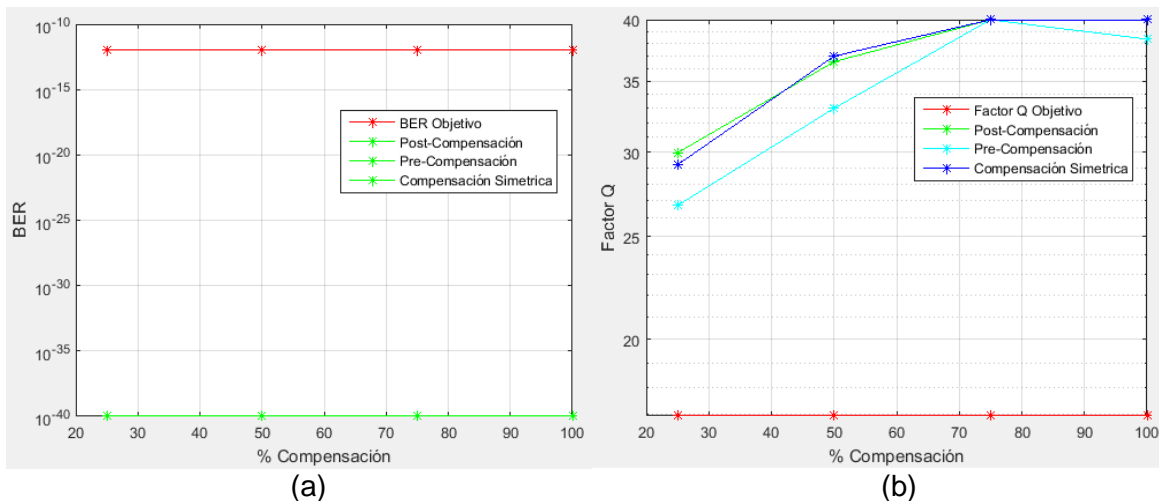


Figura 3.34 Parámetros de desempeño con técnicas de compensación ópticas para RZ-PDPSK teniendo en cuenta los efectos lineales y no lineales: (a) BER vs %Compensación y (b) factor Q vs %Compensación.

Técnicas de compensación			
Nivel de compensación (%)	Post-compensación	Pre-compensación	Compensación simétrica
	$P_{RX} [dBm]$	$P_{RX} [dBm]$	$P_{RX} [dBm]$
25	-16.20	-16.39	-16.21
50	-17.77	-17.98	-17.93
75	-19.50	-19.64	-19.68
100	-21.09	-21.21	-21.22

Tabla 3.10 Potencias de recepción para las técnicas con diferentes niveles de compensación, teniendo en cuenta los EL y ENL sobre RZ-PDPSK.

En la figura 3.34 (anexo K), se evidencia que las tres técnicas tienen un comportamiento similar en este caso de estudio, lo que se debe a que no es posible realizar variaciones de la configuración del amplificador, dado que las potencias que llegan en recepción siempre se encuentran por encima del umbral (tabla 3.10), por esta razón el análisis de las técnicas de compensación y la configuración del EDFA se lleva a cabo en el caso 14 (sección 3.3.6), en el cual se halla una máxima distancia para cada porcentaje de compensación.

3.3.3 Caso 11: simulación con efectos lineales y no lineales, variando longitud de DCF para el formato RZ-DQPSK.

En el presente caso de estudio, se halla la máxima distancia de SMF-28e+ con diferente longitud de fibra compensadora que varía entre 0 y 30Km con incrementos de 2Km, teniendo en cuenta los parámetros mínimos de desempeño; este análisis se realiza con el fin de ver el impacto que tienen las técnicas de compensación ópticas de la CD, sin tener en cuenta las limitaciones de potencia para el formato de modulación RZ-DQPSK.

No se tiene en cuenta la limitación de potencia, con el propósito de verificar que a mayor longitud de fibra compensadora debería obtenerse una mayor distancia del enlace, lo que no es posible dado que a mayor distancia del enlace se produce una mayor atenuación, por lo tanto, se hace necesario la implementación de amplificadores los cuales degradan la señal ya que introducen ruido, por lo cual, después de cierto valor de ganancia los amplificadores se vuelven ineficientes.

Para este análisis se mantienen los parámetros fijos de:

- Potencia de transmisión: 5dBm.
- Coeficiente de dispersión cromática: $D(\lambda)_{SMF-28e+} = 17\text{ps/nm} * \text{Km}$ y $D(\lambda)_{DCF} = -100\text{ps/nm} * \text{Km}$.
- Separación de canales: 100GHz.

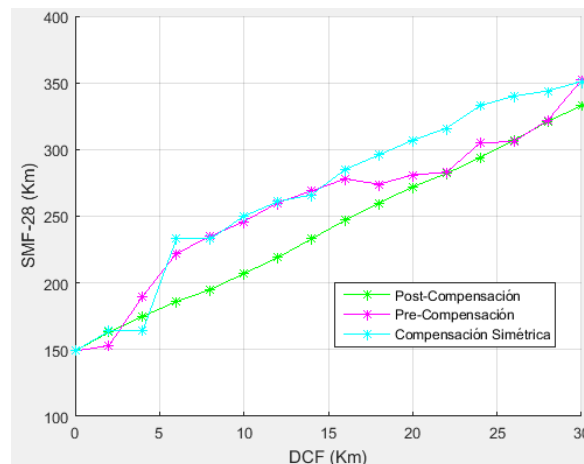


Figura 3.35 Máxima distancia del enlace variando la longitud de DCF sin limitación de potencia para RZ-DQPSK.

A partir de la figura 3.35 (anexo L), se comprueba que a mayor longitud de DCF se alcanza una mayor distancia del enlace teniendo en cuenta los parámetros mínimos de desempeño ($BER=10^{-12}$ y $Q=16.94\text{dB}$), ya que no se tiene en cuenta las limitaciones de potencia; además, de acuerdo con estos resultados se concluye que la compensación simétrica es la óptima para este formato, ya que generalmente alcanza mayores distancias con una misma cantidad de fibra compensadora, comparada con post-compensación y pre-compensación. Cabe resaltar, que el nivel de compensación que se obtienen en la figura 3.35 según la longitud de DCF y de SMF-28e+ varía entre 7 y 53% para las diferentes técnicas de compensación.

3.3.4 Caso 12: simulación con efectos lineales y no lineales, variando longitud de DCF para el formato RZ-PDPSK.

En el presente escenario de simulación se halla la máxima longitud de SMF-28e+ con diferente longitud de fibra compensadora, manteniendo los parámetros fijos nombrados en el caso 11 (sección 3.3.3); este análisis se realiza con el fin de ver el impacto que tienen las técnicas de compensación ópticas de la CD, sin tener en cuenta las limitaciones de potencia para el formato de modulación RZ-PDPSK.

Para conservar la misma longitud de fibra compensadora que en el caso 11, se realiza el análisis de la variación de DCF entre 0 y 30 Km con incrementos de 2Km, obteniendo un nivel de compensación que varía entre 13 y 71% (anexo M); además, se verifica que para esta modulación se presenta un mayor nivel de compensación, dado que las longitudes del enlace alcanzadas teniendo en cuenta los parámetros mínimos de desempeño son mucho menores comparadas con RZ-DQPSK.

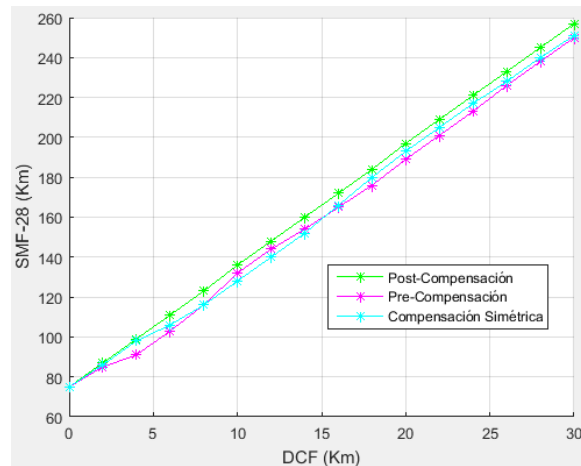


Figura 3.36 Máxima distancia del enlace variando la longitud de DCF sin limitación de potencia para RZ-PDPSK.

En la figura 3.36, se verifica que al no tener en cuenta la limitación de potencia y aumentar la longitud de fibra compensadora se obtiene una mayor distancia del enlace, lo que comprueba que las técnicas de compensación contrarrestan la degradación causada por la CD mejorando los parámetros de desempeño, por lo cual, es posible alcanzar una mayor distancia comparado con un enlace en el que no se implementa compensación; además, se puede concluir que las técnicas tienen un comportamiento similar, pero post-compensación muestra un mejor desempeño. Cabe resaltar, que las distancias alcanzadas por este formato siguen siendo mucho menores en comparación con RZ-DQPSK (figura 3.35 y 3.36).

Finalmente, en la figura 3.36 se puede visualizar que la longitud máxima de SMF-28e+, sin implementar técnicas de compensación y teniendo en cuenta todos los efectos de la fibra es de 74Km, valor a tener en cuenta en el caso 14 (sección 3.3.6), para realizar el análisis de la mejor técnica de compensación con configuración del amplificador para RZ-PDPSK.

A continuación, se realiza un análisis de los formatos de modulación teniendo en cuenta la limitación de potencia, con el fin de ver la influencia de ésta en la red y como afecta la longitud del enlace; este análisis se realiza mediante la variación de la ganancia del EDFA y la potencia de transmisión, para comprobar que valores altos de estos parámetros degradan el desempeño de la red.

3.3.5 Caso 13: simulación con efectos lineales y no lineales, analizando la potencia de recepción para el formato RZ-DQPSK.

En el presente caso de estudio se realiza un análisis de la máxima distancia alcanzable, teniendo en cuenta que la potencia de recepción sea mayor al umbral y que se cumplan los parámetros mínimos de desempeño, mediante la implementación de amplificadores EDFA o de un aumento en la potencia de transmisión por encima de la definida por la recomendación UIT-T G.691. Este análisis se realiza con fin de ver el impacto que causa la implementación de amplificadores en los parámetros de desempeño y las potencias de transmisión altas (mayores a 5dBm), en los efectos no lineales para el formato de modulación RZ-DQPSK.

Inicialmente, se realiza un aumento en la ganancia del EDFA analizando su influencia en los parámetros de desempeño y en la potencia de recepción sobre una longitud de SMF-28e+ de 158Km, se escoge este valor ya que es la máxima longitud alcanzable teniendo en cuenta la variación de la ganancia del amplificador y potencia de recepción por encima del umbral; posteriormente, sobre esta longitud de fibra principal se analiza el impacto que causan las ganancias de los amplificadores en la potencia y en los parámetros de desempeño.

Amplificación Booster sin compensación, SMF-28e+=158Km			
Ganancia [dB]	P _{RX} [dBm]	BER	Q [dB]
8	-31.441652	1.58969x10 ⁻²⁶	20.528055
9	-30.332966	1.43397x10 ⁻³⁸	22.676100
10	-29.608921	1.98870x10 ⁻¹⁷	19.052559
11	-29.262095	3.23262x10 ⁻⁸	14.839747
12	-29.062592	0.000177727	11.172186
13	-29.385763	0.0227501	6.020600
14	-29.062007	0.0227501	6.020600

Tabla 3.11 Variación de la ganancia del EDFA en configuración Booster sin implementar técnica de compensación.

Según los resultados de la tabla 3.11 se define la máxima ganancia del amplificador en 10dB para el formato RZ-DQPSK, ya que valores de ganancia mayores generan un mínimo incremento en la potencia de recepción y un decremento considerable en los parámetros de desempeño. De acuerdo a lo anterior, se comprueba que no es óptimo la implementación de amplificadores con grandes ganancias, dado que estos introducen ruido en la señal ocasionando un decremento de la OSNR y, al ser este parámetro proporcional y directamente relacionado con el factor Q, éste también presenta una disminución considerable, lo que a su vez influye en el aumento de bits errados que llegan al receptor.

A continuación, se comprueba la degradación causada por los amplificadores en configuración Booster al aumentar la ganancia de 10 a 12dB; esta degradación se percibe en el diagrama de ojo dado que se cierra haciendo más difícil la identificación de los pulsos (figura 3.37), además, se presenta un aumento en las irregularidades de los canales (figura 3.38), aunque éste no se ve reflejado en un aumento del nivel de potencia en recepción.

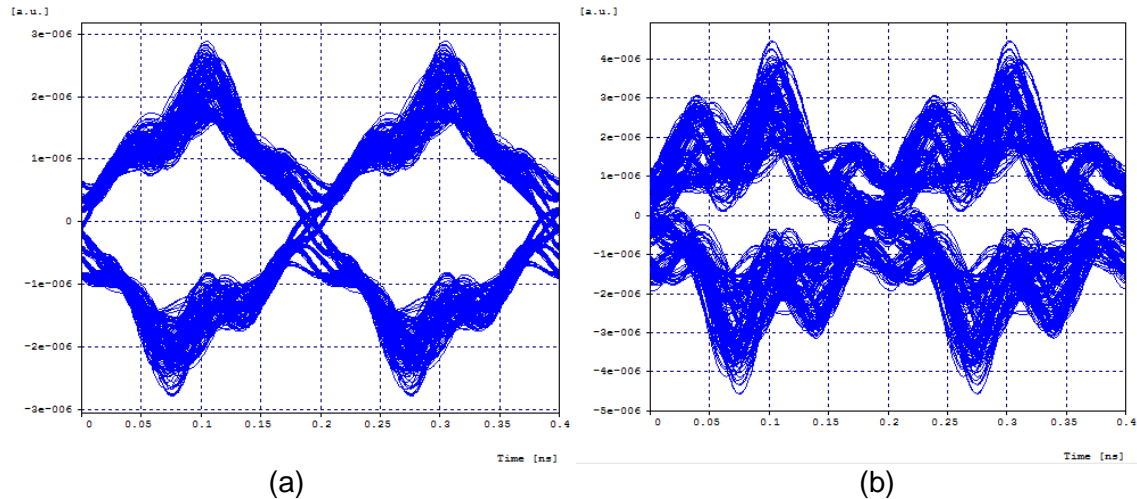


Figura 3.37 Diagrama de ojo para RZ-DQPSK sin compensación y con amplificador en Booster (a) $G=10\text{dB}$ y (b) $G=12\text{dB}$.

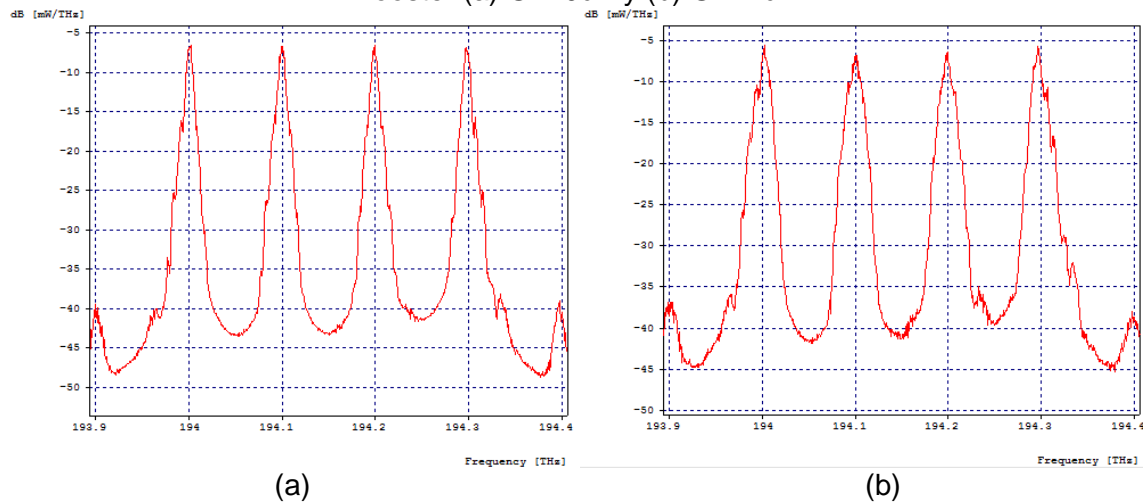


Figura 3.38 Espectros de frecuencia para RZ-DQPSK sin compensación y con amplificador en Booster (a) $G=10\text{dB}$ y (b) $G=12\text{dB}$.

Dado que se presenta un incremento en la máxima distancia alcanzable, sin implementar compensación óptica al comparar un enlace con efecto de CD y atenuación (140Km), y con todos los efectos de la fibra (158Km), se puede concluir que algunos efectos contrarrestan la degradación causada por la CD; en particular, la SPM introduce cierto 'chirp' el cual es de signo opuesto al generado por la CD, por lo cual, se puede compensar la dispersión a partir de esta no linealidad. A continuación, en la tabla 3.12 se presentan las longitudes de DCF para diferentes porcentajes de compensación de fibra principal, cuando ésta tiene una longitud de 158Km.

Longitud de SMF-28e+=158Km	
Nivel de compensación (%)	Longitud de DCF [Km]
20	5.4
40	10.8
60	16.1
80	21.5
100	26.9

Tabla 3.12 Nivel de compensación y longitud de DCF para 158Km de SMF-28e+.

A partir de la figura 3.39, se verifica que al implementar cierto nivel de compensación y limitar el enlace a una potencia de recepción mayor a -30dBm, se debe disminuir la longitud de SMF-28e+ ya que la DCF mejora el desempeño de la red incrementando los valores de los parámetros de desempeño, pero introduce una atenuación del doble por kilómetro comparada con la fibra principal. Cabe resaltar, que al mantener la longitud de DCF y disminuir la longitud de SMF-28e+ se obtiene una compensación entre el 21 y 155% (anexo N), con un buen diagrama de ojo y espectro de frecuencia en recepción (figura 3.40).

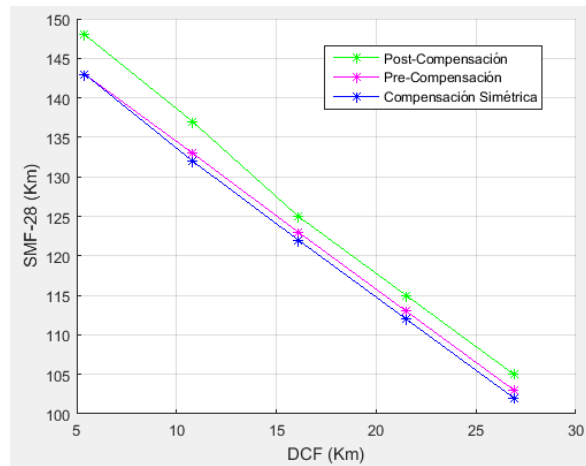


Figura 3.39 Disminución de fibra principal limitando en potencia para RZ-DQPSK, con compensación y ganancia del amplificador de 10dB.

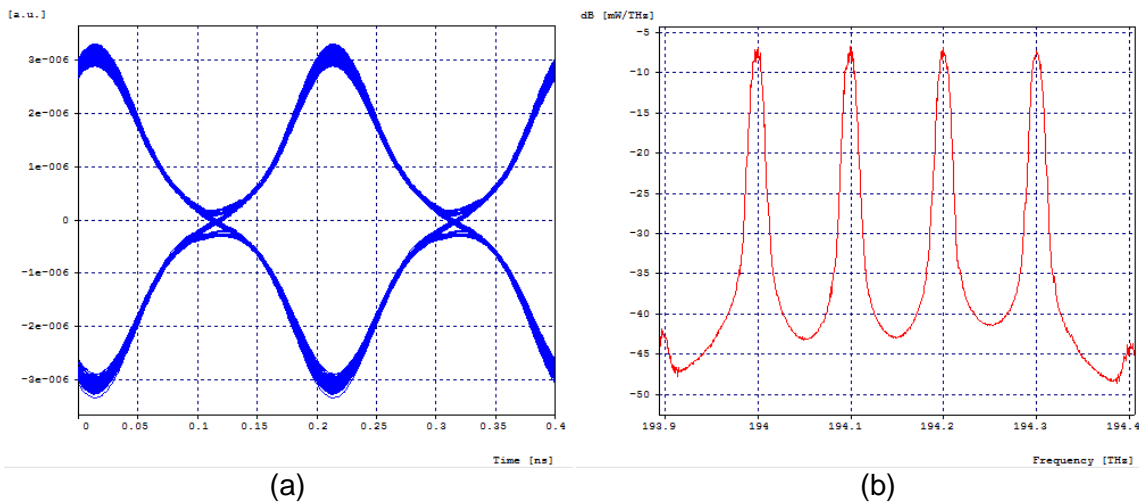


Figura 3.40 Diagrama de ojo y espectro de frecuencia limitando el enlace en potencia.

A continuación, se realiza un análisis de la variación de la potencia de transmisión, con el fin de verificar como los valores elevados de ésta pueden impactar negativamente el enlace dado que pueden excitar los efectos no lineales. Para este análisis se escoge una longitud de fibra SMF-28e+ de 158Km.

Variación de P_{TX} sin compensación (SMF-28e+=158Km)			
P_{TX} [dBm]	P_{RX} [dBm]	BER	Q [dB]
5	-39.161891	8.09225×10^{-12}	16.626170
10	-34.232326	1.34864×10^{-17}	18.654530
15	-29.554374	8.03055×10^{-21}	19.930809
20	-29.016765	0.0227501	6.020600

Tabla 3.13 Variación de potencia de transmisión sin implementar técnicas de compensación sobre RZ-DQPSK.

De acuerdo a los resultados consignados en la tabla 3.13 se define la máxima potencia de transmisión en 15dBm, ya que para valores mayores se presenta un mínimo incremento en la potencia de recepción, y un decremento considerable en los parámetros de desempeño haciendo que no sea optimo la implementación de grandes potencias; además, según la recomendación UIT-T G.691 las potencias elevadas excitan los efectos no lineales, introduciendo grandes degradaciones que se visualizan en los parámetros de desempeño.

También, en la figura 3.41 se comprueba la degradación causada a potencias mayores a 15dBm, dado que el diagrama de ojo se encuentra totalmente cerrado haciendo imposible la identificación de los pulsos, además, en el espectro de frecuencia se verifica el impacto de los efectos no lineales, ya que éste presenta ciertos picos los cuales pueden interferir con los canales verdaderos y solo llegar reconocer en recepción un canal o ninguno.

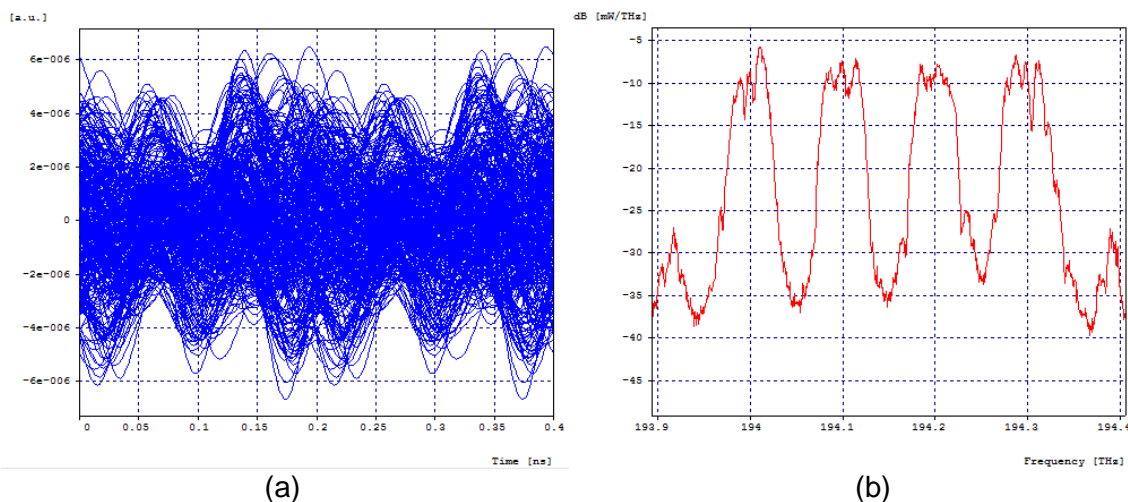


Figura 3.41 Potencia de transmisión de 20dBm para RZ-DQPSK: (a) Diagrama de ojo y (b) Espectro de frecuencia.

Finalmente, según los resultados de este caso de estudio se puede concluir que para obtener un buen desempeño de la red, se debe mantener cierto rango de potencia durante todo el enlace, para no excitar los efectos no lineales los cuales degradan los pulsos de la señal de información.

A continuación, se realiza un análisis de las técnicas de compensación para el formato de modulación RZ-PDPSK, variando la configuración del amplificador con el fin de definir la mejor técnica de compensación sobre este formato.

3.3.6 Caso 14: simulación con efectos lineales y no lineales, analizando la potencia de recepción para el formato RZ-PDPSK.

En este caso de estudio se realiza un análisis de las sub-técnicas de compensación de la CD con configuración del amplificador, teniendo en cuenta que la potencia de recepción sea mayor al umbral y que se cumplan los parámetros mínimos de desempeño. Inicialmente, se implementan amplificadores EDFA para definir la mejor forma de compensar la CD; posteriormente, se realiza un aumento en la potencia de transmisión con el fin de ver el impacto que causa la variación de este parámetro en el desempeño de la red.

Del caso 12 (sección 3.3.4), se tiene que la máxima distancia alcanzable sin técnicas de compensación y con todos los efectos de la fibra es de 74Km, longitud a compensar entre los niveles de 0 y 100% con incrementos de 20%. Cabe resaltar, que para los niveles menores al 40% no es necesario la implementación de amplificadores, dado que la potencia que llega a recepción es mayor al umbral (entre -15 y -27dBm), por lo cual, solo es posible hacer el análisis para la mejor configuración del amplificador para los porcentajes de 60, 80 y 100%, en los cuales el valor de la ganancia del EDFA depende de la potencia en recepción (anexo O). A continuación, en la tabla 3.14 se presentan las longitudes de DCF para diferentes niveles de compensación de fibra principal.

Longitud de SMF-28e+=74Km	
Nivel de compensación (%)	Longitud de DCF [Km]
20	2.5
40	5
60	7.6
80	10
100	12.6

Tabla 3.14 Nivel de compensación y longitud de DCF para 74Km de SMF-28e+.

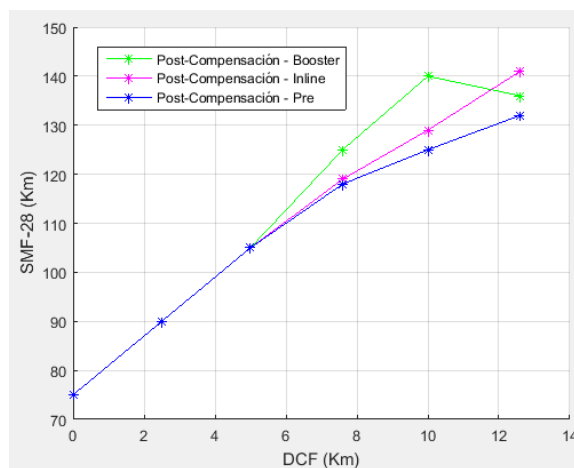


Figura 3.42 Post-compensación para las configuraciones del amplificador.

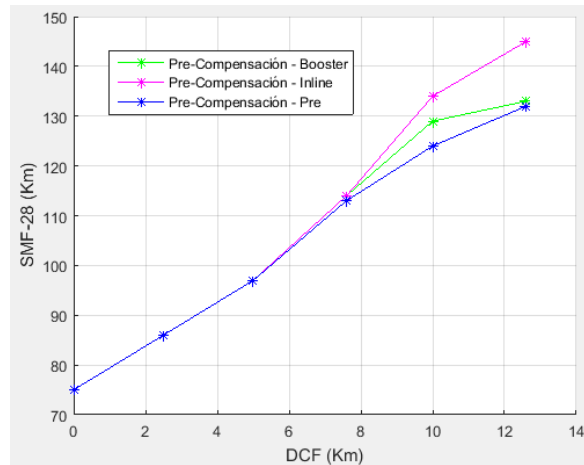


Figura 3.43 Pre-compensación para las configuraciones del amplificador en RZ-PDPSK.

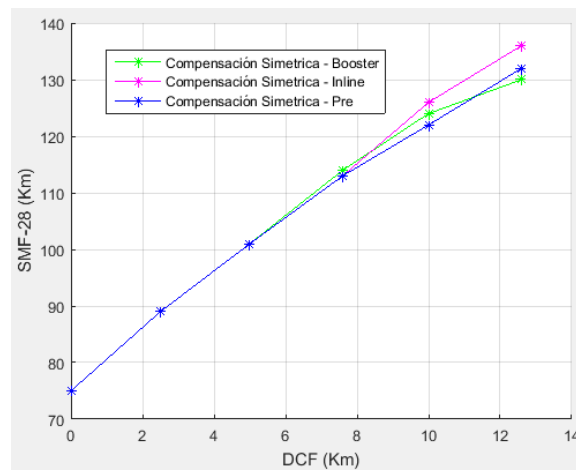


Figura 3.44 Compensación simétrica para las configuraciones del amplificador en RZ-PDPSK.

A partir de la figura 3.42 se define que el EDFA en pre-amplificación presenta un menor desempeño alcanzando una menor distancia, mientras que en Booster se obtiene el mejor desempeño para la técnica de post-compensación. Por otro lado, de acuerdo a las figuras 3.43 y 3.44 se define que para las técnicas de pre-compensación y compensación simétrica, el mejor caso de configuración del amplificador es Inline dado que con éste se alcanzan mayores distancias, teniendo en cuenta los parámetros mínimos de desempeño y que la potencia de recepción sea mayor al umbral.

A continuación, se realiza una comparación de la mejor configuración del amplificador para cada técnica de compensación óptica de la CD, sobre el formato de modulación RZ-PDPSK, con el fin de definir la mejor técnica de compensación la cual es implementada en el escenario final.

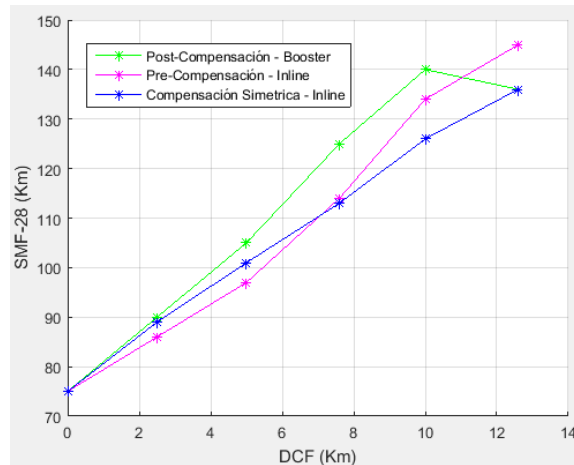


Figura 3.45 Mejor configuración del EDFA para las técnicas de compensación en RZ-PDPSK.

A partir de la figura 3.45 se puede concluir que la técnica de post-compensación en Booster presenta mejores resultados para el formato RZ-PDPSK, alcanzado mayores distancias con la misma longitud de fibra compensadora y cumpliendo los parámetros mínimos de desempeño.

Por otro lado, se realiza un análisis de la potencia de recepción variando la potencia de transmisión para un enlace con longitud de fibra principal de 74Km, sin la implementación de DCF teniendo en cuenta los efectos lineales y no lineales de la fibra, cabe resaltar, que en este caso las potencias de transmisión se encuentran en el rango de 5 a 20dBm, por lo que en recepción oscilan entre -3 y -15dBm (tabla 3.15), entonces, no es necesaria la implementación de amplificadores.

Variación de P_{TX} sin compensación (SMF-28e+=74Km)			
P_{TX} [dBm]	P_{RX} [dBm]	BER	Q [dB]
5	-15.709118	2.45491×10^{-14}	17.518726
10	-10.610423	9.26478×10^{-27}	21.086640
15	-6.144143	1.98248×10^{-20}	19.254341
20	-3.925147	0.0227501	6.020600

Tabla 3.15 Variación de la potencia de transmisión sin implementar técnicas de compensación para RZ-PDPSK.

Según la recomendación UIT-T G.691 las potencias de transmisión elevadas (13-15dBm), excitan los efectos no lineales introduciendo grandes degradaciones que se visualizan en los parámetros de desempeño, lo cual se comprueba en este caso de simulación (tabla 3.15), en el que se llega a la conclusión que la máxima potencia de transmisión es de 15dBm para el formato RZ-PDPSK, ya que los valores de potencia mayores presentan un gran deterioro de la red. Además, al comparar estos resultados con los presentados en la tabla 3.13 (caso 13), se comprueba que los dos formatos soportan el mismo nivel de potencia de transmisión, también, se evidencia que al aumentar ésta de 15 a 20dBm el formato RZ-DQPSK no presenta un incremento considerable en la potencia de recepción, lo que si ocurre en RZ-PDPSK.

A continuación, se realiza un análisis del escenario final en el cual se implementan varios span, donde cada uno está conformado por un amplificador en configuración Booster, un tramo de SMF-28e+ y fibra DCF. Cabe resaltar, que el fin de este análisis es hallar la máxima distancia alcanzable para cada formato de modulación.

3.4 Escenario 4: simulación implementado varios span.

Hasta el momento, se han analizado distintos factores y efectos que intervienen en la transmisión de una señal sobre fibra óptica considerando un solo span. A continuación, se realiza un análisis con aspectos más reales en un enlace de comunicaciones, es decir, un enlace que cuente con varios span, en el que se implementan los parámetros definidos en el transcurso de este proyecto (parámetros fijos establecidos en el transcurso de este capítulo y los definidos en la tabla 2.3), con el fin de obtener una máxima distancia para cada formato de modulación con resultados más reales comparados con un escenario a grandes distancias (red DWDM). Inicialmente, se implementa una sub-técnica de compensación junto a una configuración del amplificador que represente el mejor caso para compensar la CD, sobre los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK; posteriormente, se varía la separación entre canales de 100 a 50GHz implementando las longitudes de onda definidas en el plan de frecuencias de la tabla 2.2, para evaluar únicamente el efecto de la separación de canales y poder definir si considerando todos los aspectos, bajo el escenario propuesto el enlace puede soportar una separación de canales menor a 100GHz, que es la definida por la recomendación ITU-T G694.1 para una red DWDM a 10Gbps.

Cabe resaltar, que en este caso de estudio se evalúa una separación de 50 y 100GHz dado que el valor de 25GHz ya fue descartado en el caso 5 y caso 6 (secciones 3.1.5 y 3.1.6), debido a que ninguno de los dos formatos soporta este espaciamiento cuando el enlace solo se encuentra afectado por la CD y atenuación.

3.4.1 Caso 15: simulación implementando varios span para el formato de modulación RZ-DQPSK

En este caso de estudio se realiza un análisis teniendo en cuenta todos los efectos de la fibra e implementando varios span; inicialmente, se halla la máxima distancia alcanzable para el formato de modulación RZ-DQPSK con una separación de canales de 100GHz, el cual es el valor implementado hasta el momento; posteriormente, esta separación de canales se disminuye a 50GHz manteniendo los mismos parámetros para ver la influencia de ésta en la calidad del enlace, además de verificar si este formato de modulación a una velocidad de 10Gbps es capaz de soportar una separación de canales menor a la definida por la recomendación.

A continuación, en la tabla 3.16 se expone la longitud máxima alcanzable al implementar varios span, con técnicas de compensación y porcentajes necesarios de DCF para mantener en recepción los parámetros mínimos de desempeño; cabe resaltar, que todos los span manejan amplificación en Booster ya que según los resultados del caso 7 (sección 3.2.1), es la mejor configuración para el formato de modulación RZ-DQPSK, además, estos amplificadores manejan una ganancia de 10dB excepto el del ultimo span en el que su ganancia varía entre 11 y 15dB (esta ganancia es mayor a la máxima definida en el caso 13), dado que al tener varios span un aumento de ganancia en el último no ocasiona un gran deterioro en la BER y el factor Q, mientras que si se presenta un aumento en la potencia de recepción.

Numero de span	Técnica de compensación	Nivel de compensación (%)	Longitud máxima [Km]
6	Post-compensación	50	294
	Pre-compensación		
	Comp. Simétrica		
5	Post-compensación	46	270
	Pre-compensación	45	
	Comp. Simétrica		
4	Post-compensación	37	244
	Pre-compensación	40	
	Comp. Simétrica		
3	Post-compensación	21	216
	Pre-compensación	32	
	Comp. Simétrica	35	
2	Post-compensación	15	196
	Pre-compensación	22	
	Comp. Simétrica	25	

Tabla 3.16 Longitud máxima alcanzable con varios span de fibra y una separación de canales de 100GHz para RZ-DQPSK.

La figura 3.46 (anexo P), expone la máxima distancia alcanzable del enlace para diferentes números de span implementando compensación; además, a partir de ésta se concluye que la técnica de post-compensación es la más eficiente para el formato de modulación RZ-DQPSK, dado que utiliza un menor nivel de compensación para la misma longitud de SMF-28e+ para obtener un buen comportamiento de la red cumpliendo con los parámetros de desempeño, comparada con pre-compensación y compensación simétrica.

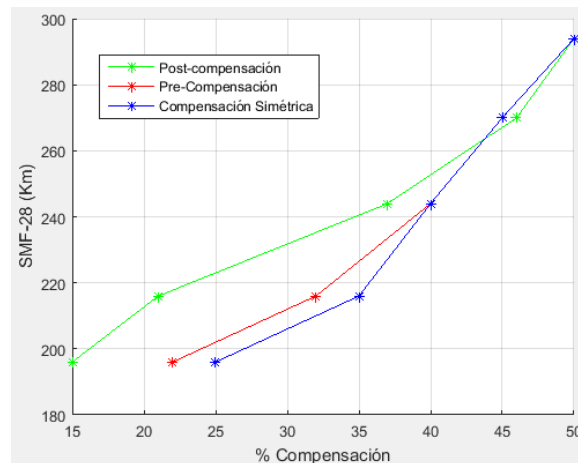


Figura 3.46 Máxima longitud a diferentes porcentajes de compensación para RZ-DQPSK implementado varios span.

Debido a que la técnica de post-compensación presenta un mejor comportamiento en función de la relación costo-eficiencia ya que implementa menos DCF, se procede a realizar una disminución de la separación entre canales a 50GHz sobre esta técnica, utilizando los valores de longitud de onda de 194, 194.05, 194.1 y 194.15nm para transmitir la información, con el fin de ver la influencia de este parámetro en el enlace. En la tabla 3.17 se expone la longitud máxima de SMF-28e+ dependiendo del número de span y el porcentaje de compensación necesario para mantener los parámetros mínimos de desempeño.

A partir de las tablas 3.16 y 3.17, se realiza una comparación entre los resultados de la transmisión de información en un enlace con separación de canales de 50 y 100GHz (figura 3.47), en la que se concluye que al implementar una menor separación se disminuye la distancia y es necesario aumentar el nivel de compensación, pero se obtiene una mejora en la eficiencia espectral ya que se pueden transmitir un mayor número de canales (se aumentan el número de longitudes de onda en las que se puede transmitir).

Técnica de post-compensación		
Numero de span	Nivel de compensación (%)	Longitud máxima [Km]
6	58	282
5	58	255
4	38	236
3	33	207
2	27	190

Tabla 3.17 Longitud máxima alcanzable con varios span de fibra y una separación de canales de 50GHz para RZ-DQPSK.

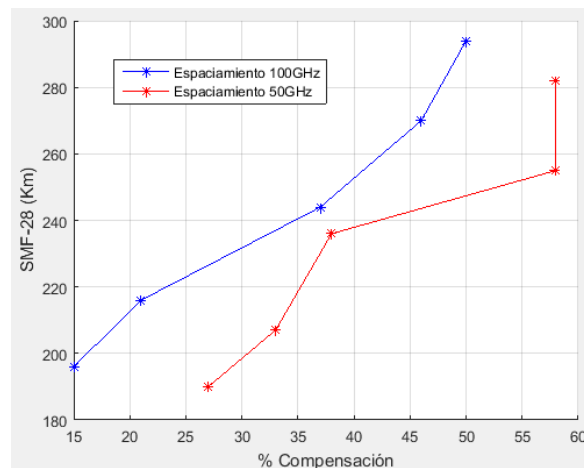


Figura 3.47 Máxima distancia alcanzable a espaciamientos de 50 y 100GHz, para RZ-DQPSK implementado varios span.

Debido a que los canales se encuentran más cerca los pulsos se traslapan a una menor longitud a causa de la CD generando un aumento en la ISI, además, otros efectos de la fibra también influyen deteriorando el espectro de frecuencia, entonces, es necesario realizar una disminución en la longitud del enlace y un aumento en el nivel de compensación para que sea posible detectar los 4 canales de transmisión, por lo anterior, en recepción (figura 3.48), se obtiene un buen diagrama de ojo con valores de BER y factor Q del orden de 1×10^{-40} y 23dB respectivamente cuando se implementan 5 y 6 span,

además, un espectro de frecuencia en el cual se logra detectar los canales de transmisión y se verifica la degradación de los efectos no lineales ya que presenta mayores irregularidades comparado con la figura 3.19b (espectro de frecuencia con separación de 50GHz, con efectos de CD y atenuación).

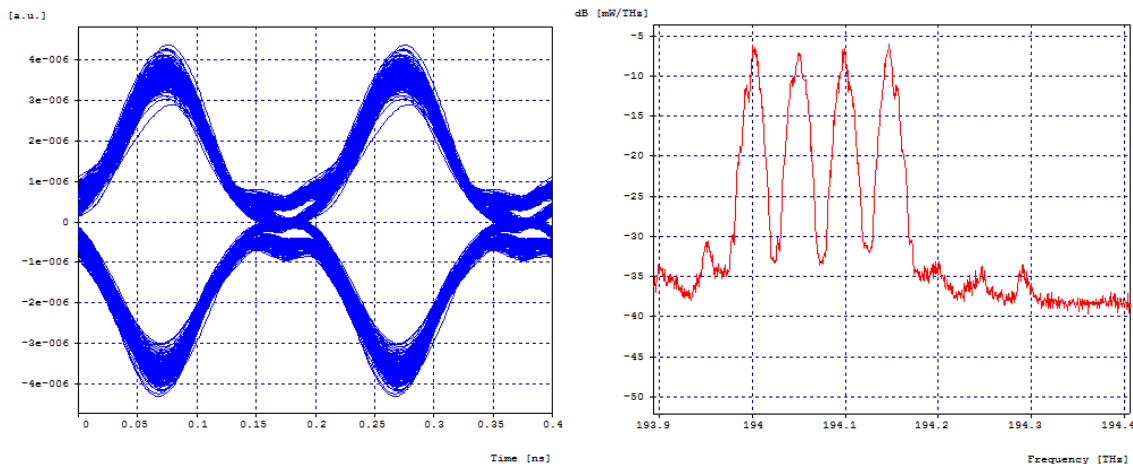


Figura 3.48 (a) Diagrama de ojo y (b) espectro de frecuencia para RZ-DQPSK a una separación de canales de 50GHz para 5 span.

Finalmente, se concluye que el formato de modulación RZ-DQPSK si soporta una separación de canales de 50GHz, pero con una disminución en la longitud total del enlace. A continuación, se realiza un análisis sobre el formato de modulación RZ-PDPSK con el fin de hallar la máxima distancia del enlace implementando varios span, también, se realiza una disminución del espaciamiento entre canales con el fin de determinar si este formato de modulación lo soporta.

3.4.2 Caso 16: simulación implementando varios span para el formato de modulación RZ-PDPSK.

En este caso de estudio se realiza un análisis teniendo en cuenta todos los efectos de la fibra e implementando varios span; inicialmente, se halla la máxima distancia alcanzable para el formato de modulación RZ-PDPSK con una separación de canales de 100GHz implementando la técnica de post-compensación en Booster, dado que presenta un mejor desempeño para este formato (caso 14); posteriormente, esta separación de canales se disminuye a 50GHz manteniendo las mismas características que en 100GHz, para ver la influencia que tiene una disminución de este parámetro en la calidad del enlace, además de verificar si este formato de modulación a una velocidad de 10Gbps es capaz de soportar una separación de canales menor.

Técnica de post-compensación		
Numero de span.	Nivel de compensación (%)	Longitud máxima [Km]
6	79	300
5	77	265
4	73	236
3	70	210
2	65	182

Tabla 3.18 Longitud máxima alcanzable con varios span de fibra y una separación de canales de 100GHz para RZ-PDPSK.

En la tabla 3.18 (anexo Q), se expone la longitud máxima alcanzable al implementar varios span, con la técnica de post-compensación y los porcentajes necesarios de DCF para mantener en recepción los parámetros mínimos de desempeño; cabe resaltar, que todos los span manejan amplificación Booster ya que según los resultados del caso 14 (sección 3.3.6), es la mejor configuración para el formato de modulación RZ-PDPSK, además, estos amplificadores manejan una ganancia de 11dB excepto el ultimo span en el que su ganancia varía entre 15 y 17dB.

Por otro lado, al realizar una disminución en la separación de los canales de 100 a 50GHz se llega a la conclusión de que este formato de modulación no soporta una separación menor a la dada por la recomendación, lo anterior se verifica en la figura 3.49 en la que se presentan los resultados en recepción sobre un escenario en el que se omite los efectos causados por la fibra (configuración back-to-back), obteniéndose un diagrama de ojo ideal, pero un espectro en donde los canales se encuentran muy juntos haciendo difícil la detección de estos.

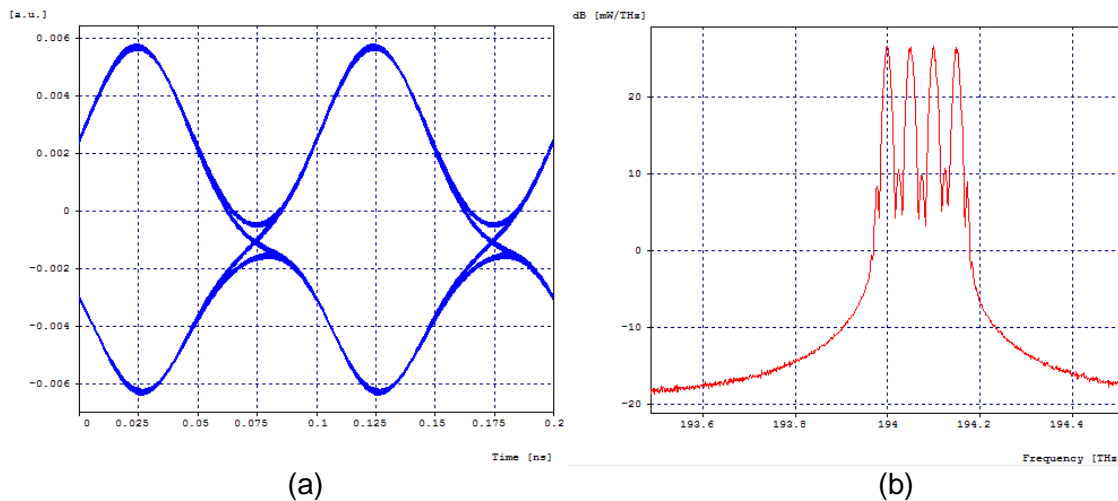


Figura 3.49 (a) Diagrama de ojo y (b) espectro de frecuencia para RZ-PDPSK, configuración back-to-back y una separación de canales de 50GHz.

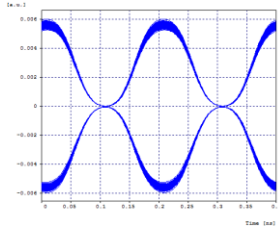
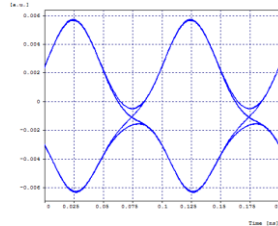
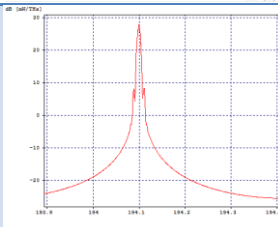
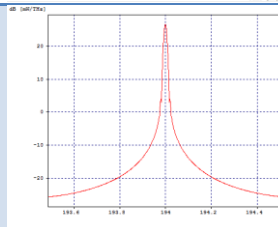
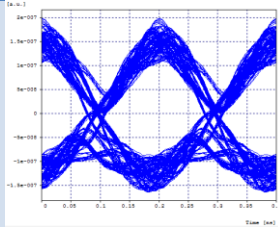
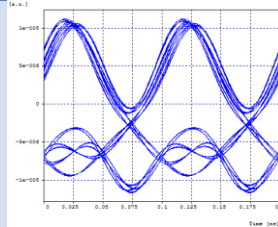
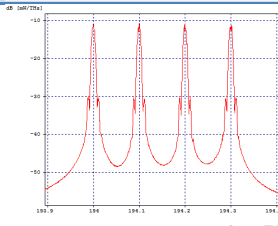
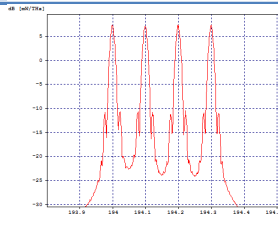
Además, se comprobó que las técnicas de compensación minimizan la dispersión cromática pero no es óptimo que ésta se compense en su totalidad, ya que la CD ayuda a contrarrestar otros efectos como es el caso de la PMD; igualmente, un aumento en la dispersión de la fibra influye en la minimización del impacto de la SPM, XPM y FWM. Lo anterior, se verifica en este escenario de simulación ya que los máximos porcentajes de compensación implementados fueron de 50 y 79% para RZ-DQPSK y RZ-PDPSK respectivamente, ya que porcentajes mayores disminuyen el desempeño de la red.

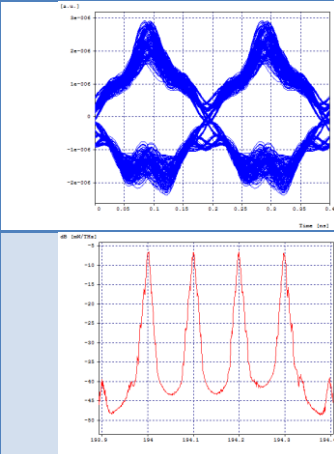
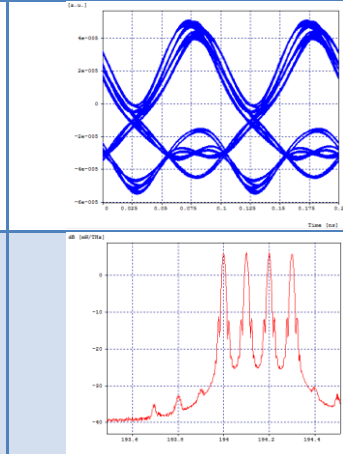
En el transcurso de este capítulo se realizó un análisis de los diferentes casos de estudio sobre los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK, por medio de distintas figuras (diagramas de ojo y espectros de frecuencia) obtenidas de la herramienta Optsim, además de gráficas y tablas realizadas con los resultados conseguidos. Lo anterior, se hizo con el fin de estudiar la influencia que tienen diferentes parámetros y como la variación de estos afectan el enlace, específicamente se analizó que tan robustos son los formatos de modulación mencionados contra la CD, y como la implementación de técnicas de compensación ópticas con diferentes configuraciones del EDFA pueden contrarrestar ese efecto, definiendo el mejor caso de compensación para cada formato.

A continuación, se realiza una comparación y análisis de los resultados expuestos en este capítulo, en el que se define cuál de los dos formatos presenta un mejor comportamiento y ofrece una mejor relación costo-eficiencia para un operador. La relación costo-eficiencia es una forma de análisis económico que compara los costos con los resultados, en este caso el costo se evalúa mediante la cantidad de componentes, mayor longitud de fibra, elementos con características que resulten en un mayor costo; en relación con la eficiencia la cual es medida mediante el desempeño de la red (BER y factor Q) y la distancia del enlace.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS COMPARATIVOS DEL DESEMPEÑO DE LOS FORMATOS DE MODULACIÓN FRENTE A TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS.

En este capítulo se presenta una comparación del análisis de los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK, sobre los diferentes casos de estudio evaluados en el capítulo 3, en el cual se determinaron algunos factores que inciden significativamente en el desempeño de los formatos, y su comportamiento frente a las técnicas de compensación ópticas. Por lo tanto, en la tabla comparativa 4.1 se resume el comportamiento de la red óptica sobre los formatos a una velocidad de transmisión de 10Gbps, a medida que se varían los parámetros frente a las técnicas de compensación ópticas de la CD; lo anterior, se realiza con el fin de establecer cual presenta un desempeño óptimo en una red DWDM a 10Gbps.

Técnica de formación de pulsos	RZ	
Modulación	DQPSK	PDPSK
Diagrama de ojo back-to-back		
Espectro de frecuencia back-to-back		
Longitud máxima con efectos de CD y atenuación, sobre un enlace con fibra Corning SMF-28e+ (caso 1 y caso 2)	Se alcanza una distancia del enlace de 140Km, con BER= 1×10^{-12} y factor Q=16.99dB	Se alcanza una distancia del enlace de 70Km, con BER= 1×10^{-13} y factor Q=17.41dB
Separación de canales con efectos de CD y atenuación (caso 5 y caso 6)		
		
	Soporta una separación de canales de 50 y 100GHz	Soporta una separación de canales de 50 y 100GHz

Mejor configuración de amplificación con efectos de CD y atenuación (caso 7 y caso 8)	EDFA en configuración Booster	No se define, dado que no es necesaria la implementación de amplificadores
Longitud máxima con todos los efectos de la fibra, sin técnicas de compensación Corning SMF-28e+ (caso 13 y caso 12)	Se alcanza una distancia del enlace de 158Km, con BER= 1.98×10^{-17} y factor Q=19.05dB	Se alcanza una distancia del enlace de 74Km, con BER= 9.48×10^{-13} y factor Q=17.06dB
		
Mejor técnica de compensación con todos los efectos de la fibra, sin tener en cuenta las limitaciones de potencia de recepción (caso 11 y caso 12)	Con la técnica de compensación simétrica se obtuvo un mejor desempeño (sin implementación de amplificadores)	Con la técnica de post-compensación se obtuvo un mejor desempeño (sin implementación de amplificadores)
Mejor técnica de compensación en configuración de amplificación y todos los efectos de la fibra (caso 9 y caso 14)	La mejor técnica en configuración Booster, está definida por el nivel de compensación (porcentaje de compensación)	La técnica de post-compensación en configuración de amplificación Booster, presenta mejores resultados
Longitud máxima con todos los efectos de la fibra e implementando varios span (caso 15 y caso 16)	Se alcanza una distancia del enlace de: 6 span: 294Km 5 span: 270Km 4 span: 244Km 3 span: 216Km 2 span: 196Km con parámetros de desempeño objetivos (BER= 1×10^{-12} y factor Q=16.94dB)	Se alcanza una distancia del enlace de: 6 span: 300Km 5 span: 265Km 4 span: 236Km 3 span: 210Km 2 span: 182Km con parámetros de desempeño objetivos (BER= 1×10^{-12} y factor Q=16.94dB)
Mejor técnica de compensación en configuración de amplificación y todos los efectos de la fibra, para	La técnica de post-compensación en configuración de amplificación Booster, presenta mejores resultados	La técnica de post-compensación en configuración de amplificación Booster, definida para un solo span

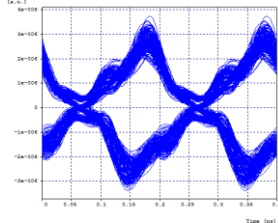
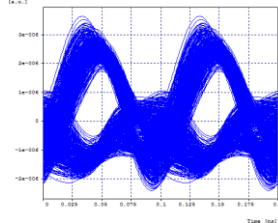
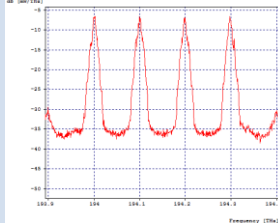
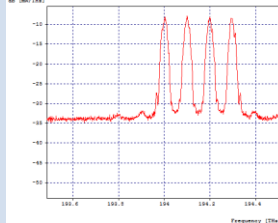
varios span (caso 15 y caso 14)		
Diagrama de ojo con 6 span		
Espectro de frecuencia con 6 span		
Separación de canales con todos los efectos de la fibra óptica. (caso 15 y caso 16)	Soporta una separación de canales de 50 y 100GHz	Soporta una separación de canales de 100GHz

Tabla 4.1 Análisis comparativo del desempeño de los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK en una red DWDM a 10Gbps, frente a las técnicas de compensación óptica de la CD.

Después de realizar el análisis de las técnicas de compensación óptica de la CD, para los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK, con velocidad de transmisión de 10Gbps, se determina:

- El formato de modulación RZ-DQPSK alcanza mayores distancias de enlace comparado con RZ-PDPSK, cuando la longitud solo se encuentra afectada por la dispersión y la atenuación, por lo tanto, el formato RZ-DQPSK tiene mayor tolerancia a los efectos de la dispersión cromática.
- El formato RZ-PDPSK es poco tolerante a la dispersión cromática, siendo ésta una de las degradaciones que más afecta el desempeño del formato, por lo cual se hace necesario tener un especial cuidado con la misma.
- La potencia de transmisión dentro del rango definido por la recomendación UIT-T G.691 (0-6dBm), no influye en el efecto causado por la CD y la atenuación, las cuales comprometen y limitan el desempeño de la red a una velocidad de 10Gbps.
- La mejor técnica de compensación para el formato RZ-DQPSK fue post-compensación con amplificación Booster, definida sobre un escenario de simulación con todos los efectos de la fibra, implementando varios span.
- La mejor técnica de compensación para el formato RZ-PDPSK fue post-compensación con amplificación Booster, definida sobre un escenario de simulación con todos los efectos de la fibra óptica implementando un solo span.
- El formato de modulación RZ-DQPSK, implementa menos porcentaje de compensación para alcanzar una longitud de SMF-28e+ cuando no se limita en potencia, en comparación con RZ-PDPSK cumpliendo los parámetros mínimos de desempeño.

- El formato de modulación RZ-DQPSK soporta mayores distancias que RZ-PDPSK pero se limita en potencia, dado que lo afecta en mayor medida la amplificación y el ruido introducido por los EDFA.
- El aumento del nivel de potencia de transmisión a valores que superen los 15dBm, afecta considerablemente los parámetros de calidad de los formatos estudiados, limitando la máxima distancia que puede alcanzar el enlace.
- La no implementación de DCF en el enlace limita la distancia máxima alcanzable, la cual se encuentra en el orden de los 70 y 150Km, para RZ-DQPSK y RZ-PDPSK respectivamente, comparado con distancias de hasta 300Km cuando se implementan varios span en una red DWDM.
- Se comprobó que el formato RZ-DQPSK soporta una separación de canales de 50GHz (menor a la definida por la recomendación), mientras que el formato RZ-PDPSK solo soporta una separación mínima de canales de 100GHz, con los parámetros de simulación definidos para este trabajo de grado.
- El formato RZ-DQPSK es más eficiente espectralmente comparado con RZ-PDPSK, pero al implementar una separación de canales de 50GHz es necesario aumentar el porcentaje de compensación, para contrarrestar en mayor medida la CD, dado que los pulsos se encuentran más cerca.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

El presente trabajo de grado, aborda desde una perspectiva analítica el desempeño de los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK, frente a técnicas de compensación ópticas de la CD para hacer una comparación objetiva, en la que se dio cumplimiento a cada uno de los objetivos planteados en la investigación. Es importante resaltar, que los resultados obtenidos pueden ser aplicados a un contexto y necesidad específica, lo cual es uno de los principales compromisos de la ingeniería.

En este capítulo, se presentan las conclusiones que son el resultado de los objetivos y análisis de las simulaciones; además, las recomendaciones y trabajos futuros, que son producto de la metodología y ejecución de la simulación, relacionados con el desarrollo de este proyecto de grado.

5.1 Conclusiones

- Mediante la caracterización de los formatos de modulación, se realizó un análisis comparativo de la implementación de estos en un modelo simplificado de red DWDM a 10Gbps, para determinar cuál de los formatos aporta la mejor solución en cuanto a la relación costo-eficiencia, para ser implementado en redes de fibra óptica. De acuerdo a lo anterior, se determinó la incidencia de las técnicas de compensación ópticas de la CD frente a los formatos de modulación.
- Mediante el análisis de los resultados obtenidos, se comprobó que la dispersión cromática es el efecto que más incide en el desempeño de los formatos estudiados, la cual se incrementa a medida que aumenta la longitud de fibra principal limitando la distancia del enlace. Además, se pudo determinar que realizar compensación de la dispersión cromática es fundamental para mejorar el desempeño de los formatos.
- Con los resultados obtenidos mediante la herramienta OptSim, se comprobó que el formato de modulación RZ-DQPSK presenta un mejor desempeño en una red DWDM a 10Gbps, respecto a los parámetros de BER y factor Q que el formato RZ-PDPSK, debido a que presenta un mejor comportamiento ante la CD.
- Mediante un análisis comparativo, se determinó que la técnica de post-compensación con amplificación Booster, presenta el mejor desempeño para los formatos de modulación estudiados en el actual trabajo de grado. Además, se comprobó que la CD se debe compensar hasta cierto límite, ya que no es recomendable eliminarla totalmente de la red óptica, debido a su implicación sobre otros efectos de la fibra.

5.2 Recomendaciones

A partir del presente trabajo de grado, se pueden desarrollar nuevos proyectos de telecomunicaciones en el área de fibra óptica, lo cual es indispensable para los operadores de redes que deseen implementar los formatos de modulación analizados en una red DWDM.

Se sugiere establecer una metodología de simulación para seguir un orden adecuado, con el fin de desarrollar un plan y obtener resultados acordes al contexto, sobre el cual se plantea el desarrollo del trabajo 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 70ns de tiempo de simulación.

5.3 Trabajos futuros

Mediante el cumplimiento de los objetivos del trabajo de grado, se identificaron nuevas investigaciones concernientes al análisis comparativo en el desempeño de una red DWDM con diferentes formatos de modulación, variación de parámetros y técnicas de compensación ópticas de la dispersión cromática, tales como:

- Analizar comparativamente el desempeño del formato de modulación RZ-PDPSK, a diferentes valores de retardo del brazo del interferómetro, frente a técnicas de compensación ópticas de la CD.
- Analizar comparativamente el desempeño del formato de modulación RZ-PDPSK, a diferentes valores de retardo del brazo del interferómetro, frente a técnicas de compensación electrónicas de la CD.
- Analizar comparativamente el desempeño de los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK a velocidades de transmisión mayores a 10Gbps, frente a técnicas de compensación ópticas de la CD.
- Analizar y evaluar el desempeño de diferentes formatos de modulación, ante variaciones de las propiedades de la DCF.
- Analizar comparativamente el desempeño de los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK, frente a técnicas de compensación electrónicas de la CD.
- Analizar comparativamente otros formatos de modulación de alto régimen binario, frente a técnicas de compensación de la CD.
- Analizar comparativamente si el formato de modulación RZ-PDPSK, soporta separación de canales menor a 100GHz, a diferentes valores de retardo del brazo del interferómetro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Escuela Superior de Ingenieros, "Formatos de Modulación Avanzados para Sistemas de Comunicaciones Ópticas Coherentes," Universidad de Sevilla, Sevilla, 2011.
- [2] Dirk van den Borne, *Robust Optical Transmission Systems*. Eindhoven, Brabante Septentrional: Proefschrift, 2008.
- [3] D. F. Alzate, "Retos en la Transmisión de 40/100Gb/s sobre Fibra Óptica," Universidad Pontificia Bolivariana, Medellin, 2011.
- [4] E. D. Paz C. Ararat, "Análisis del Desempeño de los Formatos (RZ-NRZ)/ DQPSK a 10 y 40 Gbps en una Red Metropolitana DWDM," Universidad del Cauca, Popayán, 2013.
- [5] J. F. Grijalba G. Gómez, "Análisis del Desempeño de Formatos de Modulación en Comunicaciones Ópticas sobre redes WDM," Universidad del Cauca, Popayán, .
- [6] G. A. Muñoz N. Córdoba, "Análisis Comparativo en el Desempeño de una Red DWDM a 10 Gbps al Usar Configuraciones Raman con Fibras DCF," Universidad del Cauca, Popayán, 2016.
- [7] F. R. Lasso S. L. Criollo, "Impacto de la Fibra Óptica Sobre el Desempeño de una Red WDM a 10Gb/s," Universidad del Cauca, Popayán, 2014.
- [8] D. F. Melo J. A. Ruiz, "Análisis de Desempeño de Diferentes Técnicas de Compensación Ópticas y Electrónicas para la Dispersión Cromática en Redes WDM," Universidad del Cauca, Popayan, 2012.
- [9] ITU-T Rec G.694.1, "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid," Telecommunication Standardization Sector of ITU, Febrero, 2012.
- [10] P. Mamyshev, C. Rasmussen, F. Liu B. Mikkelsen, "Partial DPSK (PDPSK) Transmission Systems," WO 2007/127208 A2, November 8, 2007.
- [11] J. Bennike, T. J. Schmidt C. Malouin, "Differential Phase-Shift Keying Receiver Design Applied to Strong Optical Filtering," 2007.
- [12] C. Rasmussen, P. Mamyshev, F. Liu B. Mikkelsen, "Partial DPSK with excellent filter tolerance and OSNR sensitivity," ELECTRONICS LETTERS, 2006.
- [13] S. Pavan, J. Patel, E. Ghillino D. Richards, "Improved Tolerance to the Combined Effect of In-Band Crosstalk and Chromatic Dispersion in Partial DPSK Systems," College of Staten Island, Staten Island, NY, 2010.

- [14] W. Idler, R. Dischler, A. Klekamp J. A. Lazaro, "BER depending tolerances of DPSK balanced receiver at 43Gb/s," Alcatel Research and Innovation, Stuttgart, 2004.
- [15] D.S. Gomez and N.J. Doran Partial DPSK with Optimised Filtering P. Moreno, "Experimental Verification of the Dispersion Tolerance Improvement of," Institute of Advanced Telecommunication, Swansea University,.
- [16] C. Huang, A. Rahman Q. Zhang, "Performance Optimization for 44 Gb/s Return-to-Zero Partial DPSK Transceiver with Pre-Emphasized Electrical Signal Driving Path," Minnesota State University, Mankato, 2012.
- [17] E. I. Rodríguez, "Requisitos de los Sistemas de Comunicaciones Ópticas de muy Alta Velocidad," Universidad Autonoma de Madrid, Madrid, 2009.
- [18] SHF Communication Technologies AG, "Application Note DQPSK Bit Error Test Solution," 2008.
- [19] T. Daisuke, K. Tomohiko O. Atsunobu, "43-Gbps RZ-DQPSK Transponder For Long-Haul Optical Transmission System," Yokogawa Technical Report English Edition, 2008.
- [20] J. Barrios L, A. Toledo T A. Escallón, "Incidencia de los Parametros que Afectan la Calidad de la Señal Óptica en el Desempeño de una Red Metropolitana WDM," Universidad de Pamplona, 2008.
- [21] S. M. Gómez, "Control de la dispersión cromática en guías ranuradas nanofotónicas," Centro de Tecnología Nanofotónica, Valencia, 2009.
- [22] W. B. Morocho Asimbaya C. E. Sangucho Morocho, "Diseño de la Red de Backhaul para una Nueva Salida de Cable Submarino, Utilizando la fibra Óptica del Oleoducto de Crudos Pesados a Disposicion del Estado Ecuatoriano," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2009.
- [23] J. A. Ruiz Toledo D. F. Melo Fernández, "Análisis de Desempeño de Diferentes Técnicas de Compensación Ópticas y Electrónicas para la CD en Redes WDM," Universidad Católica de Pereira, Pereira, 2012.
- [24] E. J. Gualda Manzano, "Optimización de las prestaciones de enlaces ópticos submarinos de gran capacidad y larga distancia mediante el control de la dispersión," Universitat Politecnica de Catalunya,.
- [25] V. Srikant, "Broadband dispersion and dispersion slope compensation in high bit rate and ultra long haul systems,".
- [26] M. Nakazawa T. Komukai, "Fabrication of Non-Linearly Chirped Fiber Bragg Gratings

- for Higher-Order Dispersion Compensation," Opt. Comm, 1998.
- [27] ITU-T Rec. G.652, "Characteristics of a single-mode optical fibre and cable," Telecommunication Standardization Sector of ITU, Noviembre, 2009.
- [28] Dr. A. kumar Garg, S. Punia O. Arora, "Symmetrical Dispersion Compensation For High Speed Optical Links," M.M University, Haryana, India, 2011.
- [29] Prof. L. Kumar, Prof. N. Malhotra R. Singh, "Dispersion compensation in Optical Fiber communication for 40 Gbps using dispersion compensating Fiber," International Journal for Science and Emerging, 2015.
- [30] Zhunjian Guo. (2007) Books.google.com.co. [Online]. <https://books.google.com.co/books?id=cLnsMxjbEqQC&pg=PA88&lpg=PA88&dq=isolating+effect+pmd&source=bl&ots=tT0DxRnwFD&sig=CAYefQsTmuPRnvVq0hBM3UByKB8&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiyqKXf157MAhUGqh4KHRJcAAIQ6AEIITAB#v=onepage&q=isolating%20effect%20pmd&f=false>, ultima vez visto: Abril, 2016.
- [31] A. Toledo Tovar, H. Ordóñez, J. P. Agredo J. G. López Perafán, "Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM," Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, 2011.
- [32] Corning Incorporated, "Corning SMF-28e+ Photonic Optical Fiber," M1100025, 2010.
- [33] UIT-T Rec. G.697, "Supervisión óptica para sistemas de multiplexación por división en longitud de onda densa," Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT, Febrero, 2012.
- [34] J. A. Dinamarca Ossa, "Análisis de Diagramas de Ojo," Universidad Técnica Federico Santa María, 2002.
- [35] Y.A. Díaz García J. Silva Chávez, "Análisis Comparativo del Desempeño en la Migración de una Red DWDM de a10 a 40 Gbps, ante las Variaciones de las Propiedades de una Fibra Compensadora de Dispersión (DCF)," Universidad del Cauca, Popayán, 2016.
- [36] A. Marín, "Optimización de procedimiento para medición de diagrama de ojo y BER con equipo de comunicación por fibra óptica," Universidad de Costa Rica, Costa Rica, 2009.
- [37] UIT-T Rec. G.691, "Interfaces ópticas para los sistemas monocal STM-64 y otros sistemas de la jerarquía digital síncrona con amplificadores ópticos," Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT, Marzo, 2006.
- [38] Draka Comteq Cable Solutions, "TeraLight Optical Fiber," 2010.

- [39] J. S. Velez Giraldo K. J. Hoyos Hormiga, "Impacto de las Propiedades de una Fibra Compensadora de Dispersion (DCF) en el Diseño de un Sistema WDM," Univesidad del Cauca, Popayan, 2013.
- [40] Departamento de Ingenieria de Telematica, "OPNET: Manual de Usuario," Universidad Politenica de Catalunya, Septiembre, 2004.
- [41] M. A. López Octaviano, G. Martínez Martínez, B. Reyes Martínez, M. Vázquez Hernández C. Domínguez Valente, "Simulacion Digital," Tecnologico de Estudios Superiores de Jocotitlan, Abril, 2008.
- [42] UIT-T Serie G Suplemento 39, "Consideraciones sobre el diseño e ingenieria de sistemas opticos," Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT, 2006.
- [43] Rsoft Design Group, Inc, "OptSim User Guide," 2010.
- [44] G. Nava Heredia, "Caracterización de Birrefringencia con Sistemas Láser de Fibra Óptica en Anillo," Univesidad Nacional Autonoma de Mexico, Mexico, 2011.
- [45] Rsoft Design Group, Inc, "OptSim Models Reference,".