

ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE MITIGACIÓN FRENTE A LA DISPERSIÓN POR EL MODO DE POLARIZACIÓN (PMD) EN REDES DWDM A 40Gbps



Ing. Andrés Felipe Mamián Jiménez

Universidad del Cauca

Facultad De Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

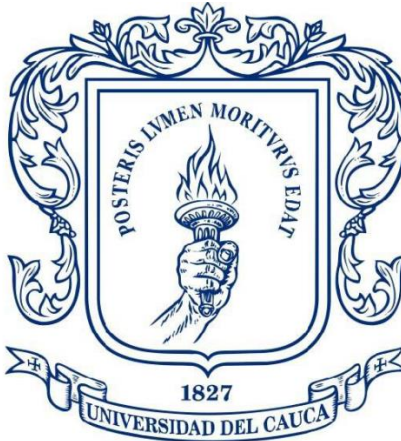
Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Telecomunicaciones

Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones – GNTT

Popayán, Septiembre de 2018

ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE MITIGACIÓN FRENTE A LA DISPERSIÓN POR EL MODO DE POLARIZACIÓN (PMD) EN REDES DWDM A 40Gbps



Trabajo de Grado de Maestría para optar al título de Magíster en
Electrónica y Telecomunicaciones

Ing. Andrés Felipe Mamián Jiménez

Director: Mag. Alejandro Toledo Tovar

Universidad del Cauca

Facultad De Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Telecomunicaciones

Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones – GNTT

Popayán, Septiembre de 2018

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN A REDES DWDM, CARACTERIZACIÓN, EFECTOS, TÉCNICAS DE MITIGACIÓN DE LA PMD y PARÁMETROS DE DESEMPEÑO	3
1.1 Redes de Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa DWDM	3
1.1.1 Multiplexación por División de Longitud de Onda–WDM	3
1.2 Características Adicionales	6
1.2.1 Frecuencias Centrales Nominales para Sistemas WDM	6
1.2.2 Características de la Fibra Óptica Mono-modo	7
1.2.3 Dispositivos de Amplificación y Compensación.....	7
1.2.3.1 Amplificadores de Fibra Dopada de Erbio (EDFA)	7
1.2.3.2 Fibra Compensadora de Dispersión Cromática (DCF)	9
1.2.4 Características de las redes DWDM.....	10
1.3 Dispersión por el Modo de Polarización (PMD).....	11
1.3.1 Birrefringencia	13
1.4 Técnicas de Modulación.....	16
1.4.1 Modulador Mach-Zehnder (MZM).....	17
1.4.2 Interferómetro Mach-Zehnder (MZI)	18
1.4.3 Funcionamiento del MZI	19
1.4 Modulaciones ópticas y Formatos de Modulación	21
1.4.1 Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK, <i>Phase Shift Keying</i>).....	22
1.4.2 Modulación por Desplazamiento de Fase Cuaternaria o en Cuadratura (QPSK, <i>Quadrature Phase Shift Keying</i>)	23
1.4.3 Código de línea con Retorno a Cero (RZ, <i>Return to Zero</i>)	24
1.4.4 Código de línea Sin Retorno a Cero (NRZ, <i>Non Return to Zero</i>)	24
1.4.5 Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase en Cuadratura con Retorno a Cero/Sin Retorno a Cero (RZ/NRZ DQPSK, <i>Return to Zero/Non Return to Zero Differential Quadrature Phase Shift Keying</i>)	25
1.4.5.1 Transmisor DQPSK.....	26

1.4.5.2 Receptor DQPSK	27
1.5 Compensador PMDC basado en estructuras Mach-Zehnder.....	28
1.5.1 Configuración Push Pull	32
1.5.2 Configuración Asimétrica.....	32
1.6 Parámetros de Desempeño.....	33
1.6.1 Diagrama del Ojo.....	33
1.6.2 Tasa de Error de Bit (BER).....	35
1.6.3 Factor de Calidad Q.....	35
1.6.4 Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR, Optical Signal to Noise Ratio).....	36
1.6.5 Jitter.....	37
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y ESCENARIO DE SIMULACIÓN	38
2.1 Herramienta de Simulación	38
2.2 Metodología de Simulación	39
2.2.1 Definición de los escenarios de simulación y casos de estudio	39
2.2.1.1 Escenario de Simulación	40
2.2.1.2 Casos de estudio.....	40
2.2.2 Identificación de los parámetros técnicos de los escenarios de simulación.....	43
2.2.3 Ejecución de la Simulación.....	44
2.2.3.1 Plan de Pruebas	44
2.2.4 Análisis de los resultados de la simulación	45
CAPÍTULO 3. SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS FORMATOS DE MODULACIÓN, EL COMPENSADOR PMDC Y SU MITIGACIÓN FRENTE A LA PMD	46
3.1 Escenario 1: NRZ-DQPSK	46
3.1.1 Caso de estudio 1: Variación de la Longitud	47
3.1.2 Caso de estudio 2: Compensación de Dispersión Cromática.....	49
3.1.2.1 Máxima tolerancia a la Dispersión Cromática	49
3.1.2.2 Efecto de compensación de Dispersión Cromática	50
3.1.3 Caso de estudio 3: Variación coeficiente PMD.....	55
3.1.4 Caso de estudio 4: Aplicación del compensador PMDC	58
3.1.4.1 Análisis del compensador PMDC basado en estructuras MZI.....	58

3.1.4.2	Funcionamiento en Simulación del Dispositivo MZI Dual-arm Ideal.....	59
3.1.4.3	Módulo Compensador de PMD	60
3.1.4.4	Análisis de la PMD utilizando el compensador PMDC	62
3.2	Escenario 2: RZ-DQPSK.....	65
3.2.1	Caso de estudio 1: Variación de la Longitud	66
3.2.2	Caso de estudio 2: Compensación de Dispersión Cromática.....	67
3.2.2.1	Máxima tolerancia a la Dispersión Cromática	67
3.2.2.2	Efecto de compensación de Dispersión Cromática	69
3.2.3	Caso de estudio 3: Variación coeficiente PMD.....	73
3.2.4	Caso de estudio 4: Aplicación del compensador PMDC	76
3.2.4.1	Análisis del compensador PMDC basado en estructuras MZI.....	76
3.2.4.2	Funcionamiento en Simulación del Dispositivo MZI Dual-arm Ideal.....	76
3.2.4.3	Módulo Compensador de PMD	77
3.2.4.4	Análisis de la PMD utilizando el compensador PMDC	80
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LAS		
TÉCNICAS ESTUDIADAS Y SU TOLERANCIA FRENTE A LA PMD		83
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS		
FUTUROS.....		87
5.1	Conclusiones.....	87
5.2	Recomendaciones.....	88
5.3	Trabajos futuros	88
ANEXO A.....		89
ANEXO B		97
REFERENCIAS.....		107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Espaciamiento de los Canales CWDM.....	5
Figura 1.2	Distribución de los canales DWDM en el espectro óptico	5
Figura 1.3	Comparación entre espectro óptico CWDM y DWDM.....	6
Figura 1.4	Esquema básico de un dispositivo EDFA.....	8
Figura 1.5	Representación de la PMD	11
Figura 1.6	Sección transversal de fibra óptica ilustrando las causas de birrefringencia.....	14
Figura 1.7	Esquema de propagación de dos modos de polarización en una fibra óptica birrefringente.....	14
Figura 1.8	Concatenación aleatoria de elementos birrefringentes como representación de una fibra.....	15
Figura 1.9	Función de transmisión MZI	18
Figura 1.10	Diagrama esquemático básico de un MZI	18
Figura 1.11	Camino posibles de entrada de un MZI.....	19
Figura 1.12	Incidencia del fotón sobre el primer camino inferior	20
Figura 1.13	Modulación PSK.....	22
Figura 1.14	Diagrama de constelaciones modulación QPSK.....	23
Figura 1.15	Código de línea RZ	24
Figura 1.16	Código de línea NRZ.....	24
Figura 1.17	Diagrama de Constelaciones Modulación DQPSK.....	26
Figura 1.18	Transmisor configuración paralelo	27
Figura 1.19	Demodulador y receptor balanceado para DQPSK.....	27
Figura 1.20	Estructura transmisor (RZ – NRZ)/DQPSK	28
Figura 1.21	Métodos de Compensación de Dispersión.....	29
Figura 1.22	Diagrama básico del Mach Zehnder.....	29
Figura 1.23	Esquema de modulación externa.....	30
Figura 1.24	Arquitectura del MZI	31
Figura 1.25	Función de transferencia del MZI en configuración Simétrica.....	32
Figura 1.26	Función de transferencia del MZI en configuración Asimétrica	33

Figura 1.27 Diagrama del ojo con y sin efectos de la PMD	34
Figura 1.28 Parámetros del Diagrama del Ojo	34
Figura 1.29 Definición del umbral óptimo de decisión	36
Figura 2.1 Casos de simulación	39
Figura 2.2 Esquema Escenario General de Simulación Escenario	40
Figura 2.3 Caso de estudio 1	41
Figura 2.4 Caso de estudio 2	41
Figura 2.5 Caso de estudio 3	42
Figura 2.6 Caso de estudio 4	42
Figura 2.7 Diagrama de flujo del proceso de simulación	45
Figura 3.1 Escenario 1, formato de modulación NRZ-DQPSK Back to Back	46
Figura 3.2 Diagrama del Ojo y Espectro Óptico en Configuración Back to Back a 40 Gbps para el formato de modulación NRZ-DQPSK	47
Figura 3.3 Distancia Máxima de red de cuatro canales espaciados entre sí 100 GHz, caso de estudio 1	48
Figura 3.4 Máxima tolerancia a la dispersión cromática	49
Figura 3.5 Diagrama del ojo con efecto de la Dispersión Cromática	50
Figura 3.6 Esquemático Escenario 1 NRZ-DQPSK con 4 canales, Pre- compensación con DCF	51
Figura 3.7 Esquemático Escenario 1 NRZ-DQPSK con 4 canales, Post- compensación con DCF	51
Figura 3.8 Efecto de compensación de la dispersión cromática para una potencia de -5 dBm	52
Figura 3.9 Efecto de compensación de la dispersión cromática para una potencia de 0 dBm	53
Figura 3.10 Efecto de compensación de la dispersión cromática para una potencia de 5 dBm	53
Figura 3.11 Efecto de compensación de la dispersión cromática para una potencia de 10 dBm	53
Figura 3.12 Efecto de compensación de la dispersión cromática para una potencia de 15 dBm	54

Figura 3.13 Diagrama del ojo para el formato de modulación NRZ-DQPSK para una distancia de 6.1 Km a 40Gbps	54
Figura 3.14 PMD para una potencia de -5dBm y una distancia de 6.1 Km	55
Figura 3.15 PMD para una potencia de 0dBm y una distancia de 6.1 Km	56
Figura 3.16 PMD para una potencia de 5dBm y una distancia de 6.1 Km	56
Figura 3.17 PMD para una potencia de 10dBm y una distancia de 6.1 Km	56
Figura 3.18 PMD para una potencia de 15dBm y una distancia de 6.1 Km	57
Figura 3.19 Diagrama del ojo para el formato de modulación NRZ-DQPSK para una distancia de 6.1 Km a 40Gbps	57
Figura 3.20 Comparación de espectros ópticos de los dispositivos Mach Zehnder	58
Figura 3.21 Bloque MZI Dual-arm Ideal y estructura interna	59
Figura 3.22 Configuración esquemática del MZI Dual-arm Ideal en el sistema NRZ-DQPSK Back to Back	59
Figura 3.23 Escenario para cada arreglo MZI Dual-arm Ideal en pre-compensación	61
Figura 3.24 Escenario de simulación NRZ-DQPSK para 4 canales, 6,1Km de longitud, Post-compensación con DCF y compensador PMDC	63
Figura 3.25 Variación PMD para el formato NRZ-DQPSK con compensador PMDC	63
Figura 3.26 Degradación de Diagrama del Ojo para el formato NRZ-DQPSK con compensador PMDC	64
Figura 3.27 Escenario 2, formato de modulación RZ-DQPSK Back to Back.....	65
Figura 3.28 Diagrama del Ojo y Espectro Óptico en Configuración Back to Back a 40 Gbps para el formato de modulación RZ-DQPSK	66
Figura 3.29 Distancia Máxima de red de cuatro canales espaciados entre sí 100 GHz, caso de estudio 1	67
Figura 3.30 Máxima tolerancia a la dispersión cromática	68
Figura 3.31 Diagrama del Ojo con efecto de la Dispersión Cromática	68
Figura 3.32 Esquemático Escenario 2 RZ-DQPSK con 4 canales,	

Pre-compensación con DCF	69
Figura 3.33 Esquemático Escenario 2 RZ-DQPSK con 4 canales, Post-compensación con DCF	70
Figura 3.34 Efecto de compensación de la dispersión cromática para una potencia de -5 dBm	71
Figura 3.35 Efecto de compensación de la dispersión cromática para una potencia de 0 dBm	71
Figura 3.36 Efecto de compensación de la dispersión cromática para una potencia de 5 dBm	71
Figura 3.37 Efecto de compensación de la dispersión cromática para una potencia de 10 dBm	72
Figura 3.38 Efecto de compensación de la dispersión cromática para una potencia de 15 dBm	72
Figura 3.39 Diagrama del ojo para el formato de modulación RZ-DQPSK para una distancia de 12 Km a 40 Gbps	73
Figura 3.40 PMD para una potencia de -5 dBm y una distancia de 9 Km	74
Figura 3.41 PMD para una potencia de 0 dBm y una distancia de 8.5 Km	74
Figura 3.42 PMD para una potencia de 5 dBm y una distancia de 8.5 Km	74
Figura 3.43 PMD para una potencia de 10 dBm y una distancia de 9 Km	75
Figura 3.44 PMD para una potencia de 15 dBm y una distancia de 12 Km	75
Figura 3.45 Diagrama del ojo para el formato de modulación RZ-DQPSK a una distancia de 12 Km, para una potencia de 15dBm a 40Gbps.....	76
Figura 3.46 Configuración esquemática del MZI Dual-arm Ideal en el sistema RZ-DQPSK Back to Back	77
Figura 3.47 Escenario para cada arreglo MZI Dual-arm Ideal en pre-compensación.....	78
Figura 3.48 Escenario de simulación RZ-DQPSK para 4 canales, 12 Km de longitud, Post-compensación con DCF y compensador PMDC	80

Figura 3.49 Variación PMD para el formato RZ-DQPSK con compensador PMDC	81
Figura 3.50 Degradación de Diagrama del Ojo para el formato RZ-DQPSK con compensador PMDC	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Parámetros típicos en redes CWDM y DWDM	4
Tabla 1.2 Parámetros de la fibra óptica mono-modo.....	8
Tabla 1.3 Retardo Diferencial de Grupo (DGD).....	12
Tabla 1.4 Restricciones de transmisión vs tasas de línea	15
Tabla 1.5 Análisis comparativo de los formatos de modulación de interés	26
Tabla 2.1 Parámetros de la Fibra Corning SMF-28.....	43
Tabla 2.2 Características del escenario de Modulación	44
Tabla 3.1 Comparación y elección del MZI de mayor rendimiento	58
Tabla 3.2 Resultados del espectro óptico de las dos ramas del MZI	59
Tabla 3.3 Comparación entre los arreglos MZI Dual-arm Ideal	61
Tabla 3.4 Resultados del espectro óptico de las dos ramas del MZI	77
Tabla 3.5 Comparación entre los arreglos MZI Dual-arm Ideal	79
Tabla 4.1 Análisis comparativo de los formatos de modulación (RZ-NRZ)/DQPSK y aplicación del compensador PMDC a 40 Gbps ..	83

ACRÓNIMOS

ASK:	Modulación por Desplazamiento de Amplitud (Amplitude Shift Keying)
BER:	Tasa de Error de Bit (Bit Error Ratio)
BPSK:	Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria (Binary Phase Shift Keying)
CD:	Dispersión Cromática (Chromatic Dispersion)

CWDM:	Multiplexación por División de Longitud de Onda Amplia (Coarse Wavelength Division Multiplexer)
DCF:	Fibra Compensadora de Dispersión (Dispersion Compensating Fiber)
DGD:	Retardo Diferencial de Grupo (Differential Group Delay)
DPSK:	Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial (Differential Phase Shift Keying)
DQPSK:	Modulación por Desplazamiento por Cuadratura Diferencial de Fase (Differential Quadrature Phase Shift Keying)
DWDM:	Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa (Dense Wavelength Division Multiplexing)
EDC:	Compensación Electrónica de Dispersión (Electronic Dispersion Compensation)
FACTOR Q:	Factor de Calidad (quality factor)
FSK:	Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (Frequency-shift keying)
FWM:	Mezcla de cuarta onda (Four Wave Mixing)
ITU:	Unión Internacional de Telecomunicaciones (International Telecommunication Union)
MAN:	Redes de Área Metropolitana (Metropolitan Area Network)
MZDI:	Interferómetro de retardo Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Delay Interferometer)
MZM:	Modulador Mach-Zehnder (Modulator Mach-Zehnder)
NRZ:	No Retorno a Cero (Non Return to Zero)
ODC:	Compensador de Dispersión óptica (Optical Dispersion Compensator)
OOK:	Codificación Encendido Apagado (On-Off Keying)
OPM:	Parámetros de Monitoreo Óptico (Optical Performance Monitoring)
OSNR:	Relación Señal a Ruido Óptico (Optical Signal Noise Ratio)
PMD:	Dispersión por Modo de Polarización (Polarization Mode Dispersion)
PoISK:	Modulación por Desplazamiento de Polarización (Polarization Shift Keying)
PSK:	Modulación por Desplazamiento de Fase (Phase Shift Keying)

QPSK:	Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (Quadrature Phase Shift Keying)
RZ:	Retorno a Cero (Return to Zero)
SPM:	Modulación de autofase (Self Phase Modulation)
SPT:	Técnica de Propagación Espectral (Spectral Propagation Technique)
SSFM:	Fibra Monomodo Estándar (Standard Single Mode Fiber)
STM:	Módulo de Transporte Sincrónico (Synchronous Transport Module)
VBS:	Simulación de Ancho de Banda Variable (Variable Bandwidth Simulation Technique)
WAN:	Redes de Área Amplia (Wide Area Network)
WDM:	Multiplexación por División de Longitud de Onda (Wavelength Division Multiplexing)
XPM:	Modulación de Fase Cruzada (Cross-Phase Modulation)

INTRODUCCIÓN

El crecimiento y la evolución de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TICs) en los últimos años, ha generado una exigencia cada vez mayor de ancho de banda, por parte de los usuarios, haciendo necesaria la implementación de redes ópticas de 40 Gbps y por lo tanto el surgimiento de las redes WDM (*Wavelength Division Multiplexing*, Multiplexación por División de Longitud de Onda) y en complemento DWDM (*Dense Wave División Multiplexing*, Multiplexación por División en Longitudes de Ondas Densas), que brindan a largas distancias mayor capacidad de transmisión, a su vez requieren del uso de formatos de modulación avanzados para enfrentar diferentes efectos y fenómenos que puedan llegar a degradar la señal, tales como: la PMD (*Polarization Mode Dispersion*, Dispersión por Modo de Polarización), la CD (*Chromatic Dispersion*, Dispersión Cromática), la atenuación, el ruido, la SPM (*Self Phase Modulation*, Modulación de auto Fase), la XPM (*Cross Phase Modulation*, Modulación de Fase Cruzada), la FWM (*Four Wave Mixing*, Mezcla de Cuatro Ondas), entre otras. Dentro de estas degradaciones, se resalta la PMD, la cual es uno de los problemas más graves para las redes de comunicaciones basadas en fibra óptica de muy alta velocidad y especialmente para los que operan a 40 Gbps [1].

En redes de comunicaciones de alta velocidad que trabajan con velocidades de datos superiores a los 10 Gbps y más altas, la distorsión de la señal causada por la PMD es una de las mayores limitaciones que se tiene en transmisiones de larga distancia; esto conduce a la degradación del desempeño del sistema como el ancho de banda de los pulsos ópticos, especialmente en las líneas de transmisión que existen actualmente. Los altos niveles de PMD de las redes de fibra óptica, son un gran problema ya que la PMD de las fibras instaladas fluctúa con el tiempo, de acuerdo con las influencias ambientales [2].

El deterioro causado por la PMD cambia estocásticamente con la longitud de onda y el tiempo, es decir, que no se puede predecir un deterioro del sistema para una longitud de onda o un tiempo específico. En general, no se puede caracterizar la PMD de una red con una precisión anticipada, ya que una medición muestreada es solo una porción del ensamblaje estadístico [2].

El principal objetivo para determinar la tolerancia a la PMD de una red de transmisión óptico, es encontrar hasta que nivel el enlace de fibra óptica puede ser operativo con una disponibilidad y parámetros de desempeño deseados; a pesar del deterioro causado por la PMD la forma establecida para hacer frente a este problema, es determinar la tolerancia del sistema con respecto al DGD (*Differential Group Delay*, Retardo de Grupo Diferencial), en el que un valor típico para este, podría ser aproximadamente del 10% del periodo de bit [3].

El presente trabajo, centra su estudio en el análisis y verificación en cuál de las dos técnicas (utilización de formatos de modulación avanzados – DQPSK (*Differential Quadrature Phase Shift Keying*, Modulación por Desplazamiento por

Cuadratura Diferencial de Fase) y el compensador (PMDC)) de mitigación frente a la PMD en redes DWDM a 40Gbps, presenta mejor desempeño.

Para la realización del trabajo de grado y el abordaje de los temas necesarios para el mismo, el contenido se divide en cinco capítulos:

En el **capítulo 1**: se presentan las características de las redes ópticas DWDM, caracterización y efectos de la PMD, formato de modulación DQPSK, compensador PMDC y parámetros de desempeño.

En el **capítulo 2**: se define la metodología y escenarios de simulación que se llevaran a cabo, con el fin de realizar el análisis comparativo de los formatos de modulación estudiados, frente a la PMD.

En el **capítulo 3**: se presenta el análisis y la evaluación de las técnicas seleccionadas en la investigación para disminuir el impacto de la PMD a nivel de simulación.

En el **capítulo 4**: se presenta el análisis comparativo del desempeño de los formatos de modulación estudiado y su tolerancia frente a la PMD.

Finalmente, en el **capítulo 5**, se presentan las conclusiones del trabajo de grado, recomendaciones y trabajos futuros a desarrollar en esta área.

El objetivo general de este trabajo de investigación es analizar y verificar cuál de las dos técnicas (utilización de formatos de modulación avanzados - DQPSK y el compensador (PMDC)) de mitigación frente a la PMD en redes DWDM a 40Gbps, presenta mejor desempeño, para dar cumplimiento a este objetivo se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar, analizar y simular cada una de las técnicas mencionadas, frente a la mitigación de la PMD, en redes DWDM a 40 Gbps, este objetivo se cumple en la realización de los capítulos 2 y 3.
- Analizar comparativamente los parámetros de desempeño¹ de cada una de las técnicas mencionadas.
- Proponer, si es posible, una mejora de las técnicas evaluadas, ya sea de manera individual o por combinación entre ellas.

El segundo y tercer objetivo se cumplen en el desarrollo del capítulo 4.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN A REDES DWDM, CARACTERIZACIÓN, EFECTOS, TÉCNICAS DE MITIGACIÓN DE LA PMD Y PARÁMETROS DE DESEMPEÑO

En este capítulo se tratarán las definiciones teóricas de las redes DWDM, así como también la naturaleza de la PMD, conceptos fundamentales de las técnicas de mitigación escogidas para este trabajo y demás fundamentación teórica necesaria para el desarrollo del presente proyecto de investigación.

1.1 REDES DE MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA DENSA –DWDM

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) es una técnica de multiplexación muy similar a la WDM, que se utiliza en medios de transmisión electromagnéticos, la cual consiste en transmitir por una fibra óptica varias señales portadoras, utilizando distintas longitudes de onda de un haz de luz para cada una de ellas. Cada portadora óptica forma un canal óptico, que podrá ser tratado independientemente del resto de canales que comparten el medio (fibra óptica) y contener tipo de tráfico diferente, de esta manera se puede multiplicar el ancho de banda efectivo de la fibra óptica, así como facilitar comunicaciones bidireccionales. Se trata de una técnica de transmisión muy atractiva para los operadores de telecomunicaciones, ya que les permite aumentar su capacidad sin tener más cables [4].

1.1.1 Multiplexación por División de Longitud de Onda –WDM

WDM es una técnica que multiplexa varias señales sobre una sola fibra óptica mediante portadoras ópticas de diferentes longitudes de onda en la misma dirección y al mismo tiempo, usando luz procedente de un láser o un LED [5].

El principio de funcionamiento de WDM se basa en el transporte de varios flujos de información, cada uno codificado sobre longitud de onda distinta y multiplexados dentro de una única fibra. De este modo se logra incrementar de manera considerable la capacidad de fibra.

En WDM se distinguen típicamente cuatro familias de sistemas: DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) de ultra larga distancia, DWDM de larga distancia, DWDM metropolitano, y CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing). Las cuatro familias de sistemas WDM utilizan componentes ópticos distintos, siendo más complejos y costosos los que soportan mayores capacidades por canal y mayores distancias de transmisión [1], [6].

En DWDM de larga y ultra larga distancia el espaciamiento de frecuencias actual es de 50-100 GHz (0,4-0,8 nm), en DWDM metropolitano de 100-200 GHz (0,8-1,6 nm), y en CWDM de 2.500 GHz (20 nm). En cuanto al número de longitudes de onda, mientras en DWDM se utilizan hasta 160 y en DWDM metropolitano hasta 40, en CWDM se suelen utilizar hasta 18 [6].

Mientras los sistemas DWDM de larga y ultra larga distancia soportan canales de hasta 40 Gbps, la mayoría de los sistemas DWDM metropolitanos soportan hasta 10 Gbps y los CWDM actuales tienen su límite en 2,5 Gbps. En cuanto a las distancias que se suelen cubrir, los sistemas DWDM de ultra larga distancia alcanzan hasta unos 4.000 Km sin regeneración electro-óptica, los de larga distancia hasta unos 800 Km, los DWDM metropolitanos hasta unos 300 Km, y los CWDM hasta unos 80 Km [6].

A diferencia del CWDM, en DWDM se consigue mayor número de canales ópticos reduciendo la dispersión cromática de cada canal mediante el uso de un láser de mayor calidad, fibras de baja dispersión o mediante el uso de módulos DCM (Dispersion Compensation Modules); de esta manera es posible combinar más canales reduciendo el espacio entre ellos. Actualmente se pueden conseguir 40, 80 ó 160 canales ópticos separados entre sí 100 GHz, 50 GHz ó 25 GHz, respectivamente [1].

La tecnología DWDM se caracteriza por un espaciado de canal más estrecho que CWDM y en general, los transmisores empleados en aplicaciones DWDM requieren un mecanismo de control que les permita cumplir con los requisitos de estabilidad de frecuencia de la aplicación, en contraste con transmisores CWDM, que generalmente no están controlados a este aspecto. La rejilla de frecuencias definida por esta recomendación admite una variedad de espaciamientos de canales fijos que van desde 12.5 GHz hasta 100 GHz y más amplios (múltiplos enteros de 100 GHz).

En la tabla 1.1, se definen algunos parámetros típicos sugeridos por el estándar ITU-T G.694.1 [7] y G.694.2 [8].

Tabla 1.1 Parámetros típicos en redes CWDM y DWDM [9].

CARACTERÍSTICAS	CWDM	DWDM MAN/WAN	DWDM Largo Alcance
Espaciamiento de los canales	20 nm (2500 Ghz)	0.8 nm (100 Ghz)	0.4 nm (50 Ghz)
Ventanas utilizadas	Q, 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 – 40 Gbps
Distancias típicas	Hasta 80 Km	Cientos de Km	Miles de Km
Costos	Bajo	Medio	Alto

CWDM es una tecnología robusta desarrollada para incrementar la capacidad en la fibra multimodo de las Redes de Área Local (LAN – Local Area Network). En la actualidad, la recomendación ITU-T G.694.2 define 18 canales de longitud de onda en 5 diferentes ventanas, con espaciamientos de 20nm (2500GHz) y con capacidades típicas de los 50Mbps a los 2.5Gbps, como se aprecia en la figura 1.1.

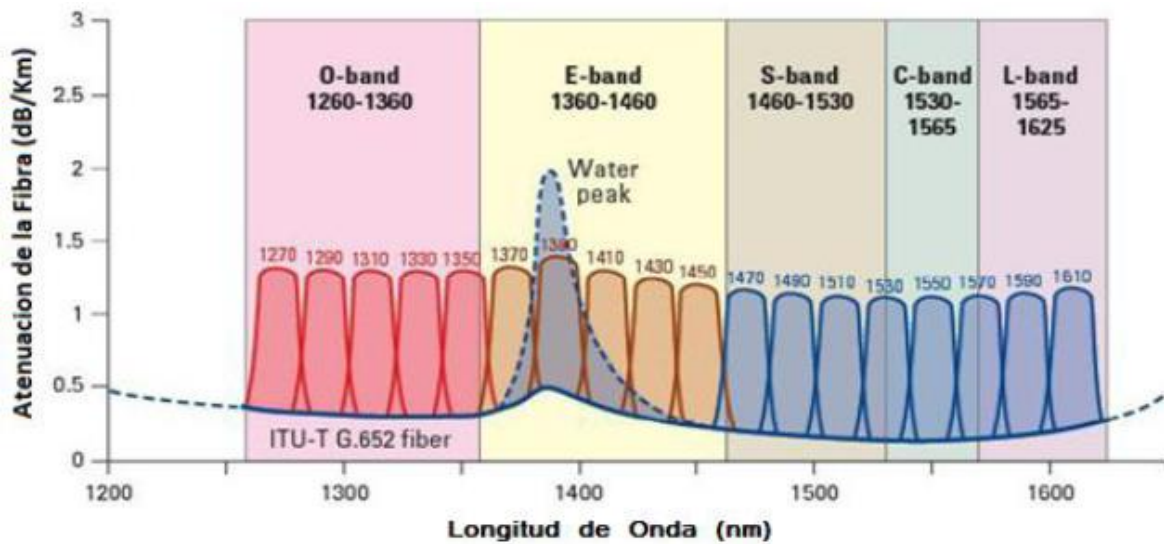


Figura 1.1 Espaciamento de los Canales CWDM, recomendación ITU-T G.694.2 [10]

Algunas de las características principales que presenta la tecnología CWDM, comparada con DWDM, es que, al ser una tecnología simple, permite un bajo costo de implementación, bajo consumo de potencia, bajo requerimiento en el espaciamento de los canales y un ahorro significativo de costos en la expansión de las redes. No obstante, algunas limitaciones fundamentales son su baja capacidad y su poco rango de operación en la implementación de sistemas modernos de fibra óptica [10].

En la figura 1.2, se aprecia la distribución de los canales a través del espectro óptico. Para DWDM, la recomendación ITU-T G.694.1 define la utilización de las ventanas desde los 1525nm a los 1565nm, así como espaciamentos típicos entre canales de 0.4nm (50GHz), 0.8nm (100GHz) y 1.6nm (200GHz) con velocidades de transmisión de datos del orden de los 2.5Gbps a los 10Gbps.

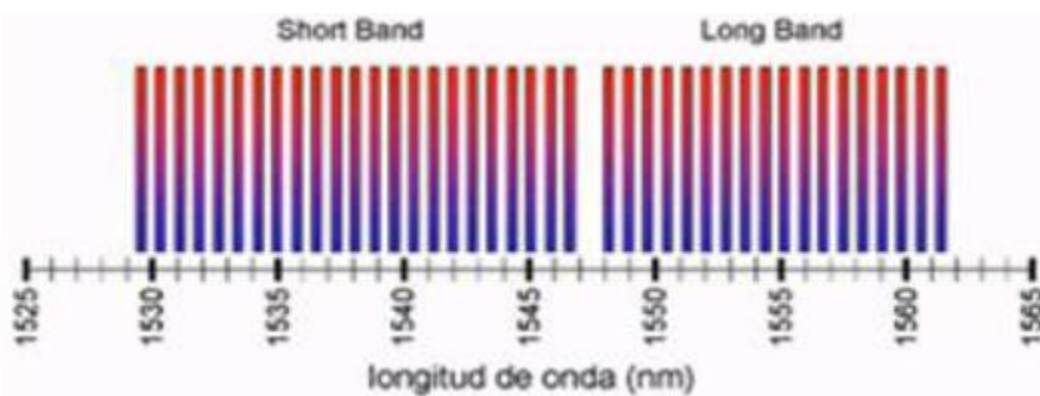


Figura 1.2 Distribución de los canales DWDM en el espectro óptico [25].

Algunas de las ventajas de DWDM es la de aprovechar al máximo la capacidad disponible en el sistema, disponer de distancias máximas en los enlaces mediante la implementación de amplificadores tipo EDFA y el bajo incremento en el costo debido a la implementación de nuevos canales. Sin embargo, no es una solución costo-eficiente para un número reducido de canales [11]. La figura 1.3, compara la utilización del espectro DWDM con respecto a CWDM.

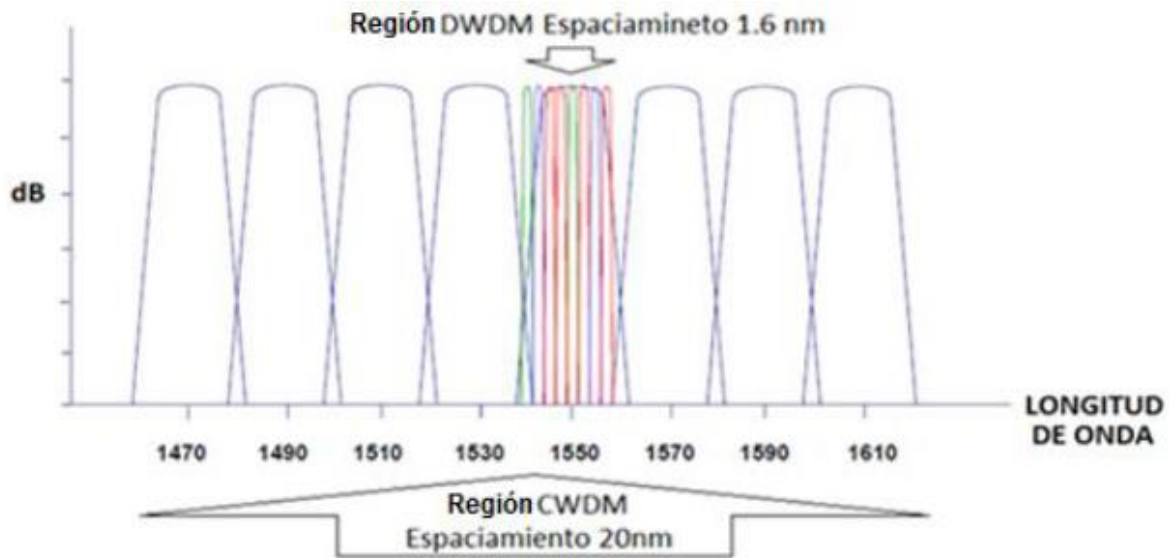


Figura 1.3 Comparación entre espectro óptico CWDM y DWDM [12].

Un sistema WDM consiste, a grandes rasgos, en un transmisor WDM, una serie de segmentos de fibra y un receptor WDM. El transmisor WDM está formado por láseres de diferentes longitudes de onda, que son multiplexados, amplificados y transmitidos por el enlace de fibra. Este enlace está formado por una secuencia de segmentos (span's), donde típicamente cada segmento mide entre 80 Km y 120 Km dependiendo del tipo de atenuación de la fibra óptica utilizada.

1.2 CARACTERÍSTICAS ADICIONALES

Debido a que algunas de las características de la red no se determinaron con la información de los operadores, serán definidas mediante el uso de los estándares relacionados a WDM de la ITU-T como son G.694.1 [7] para definir las λ s a diferentes espaciamientos del canal y G.652 para los parámetros de la fibra SMF-28 [13]. Así mismo se detallan los dispositivos de amplificación y compensación comúnmente implementados sobre redes WDM dentro del contexto nacional.

1.2.1 Frecuencias Centrales Nominales para Sistemas WDM

Para definir los paquetes de longitudes de onda para distintos espaciamientos del canal se emplea el estándar de la ITU-T G.694.1 [7].

- Espaciamientos de 12.5 GHz:

$$193.1+n \times 0.0125 \quad (1.1)$$

- Espaciamientos de 25 GHz:
 $193.1+n \times 0.025 \quad (1.2)$

- Espaciamientos de 50 GHz:
 $193.1+n \times 0.05 \quad (1.3)$

- Espaciamientos de 100 GHz:
 $193.1+n \times 0.1 \quad (1.4)$

De lo anterior y mediante la ecuación (1.5), se puede determinar la longitud de onda para la frecuencia específica.

$$\lambda[nm] = \frac{2.99792458 \times 10^8 [m/s]}{f[THz]} \quad (1.5)$$

Donde n en las ecuaciones (1.1) a (1.4) es cualquier entero positivo o negativo, incluyendo el 0 y 193.1 es la frecuencia de referencia en THz.

1.2.2 Características de la Fibra Óptica Mono-modo

Mediante el uso del estándar ITU-T G.652 [13], se puede describir las características geométricas, mecánicas y los atributos de transmisión para la fibra óptica mono-modo, aunque dicha fibra fue inicialmente optimizada para trabajar en la región de los 1310nm, también puede ser implementada en la región de los 1550nm. En la tabla 1.2, se detallan algunas características fundamentales y relevantes para el desarrollo de este proyecto.

1.2.3 Dispositivos de Amplificación y Compensación

Debido a la necesidad de realizar amplificación y compensación en redes WDM, es pertinente para el desarrollo del presente trabajo de investigación estudiar este tipo de dispositivos, entendiendo su funcionamiento y definiendo sus características de operación, las cuales a nivel de simulación brindan resultados más próximos al entorno real.

1.2.3.1 Amplificadores de Fibra Dopada de Erblio (EDFA)

Los dispositivos EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) de ganancia constante son los más comúnmente utilizados por los operadores nacionales, estos equipos presentan una ganancia constante a través del espectro y no contienen elementos adicionales tales como tramos de fibra dopados. Por otra parte, los dispositivos EDFA de tipo físicos, son equipos amplificadores que utilizan una fibra óptica dopada como medio de ganancia para amplificar una señal. Dichos dispositivos

presentan una amplia ganancia en el espectro, la cual es más que suficiente para amplificar canales a altas tasas de velocidad de transmisión de datos.

Tabla 1.2 Parámetros de la fibra óptica mono-modo ITU-T G.652 [13].

ATRIBUTO	DETALLE	VALOR
Diámetro de campo modal	Longitud de onda	1310 nm
	Rango de valores nominales	8.6 μm - 9.5 μm
	Tolerancia	$\pm 0.6 \mu\text{m}$
Diámetro de revestimiento	Nominal	125 μm
	Tolerancia	$\pm 1 \mu\text{m}$
Coeficiente de dispersion cromática	λ_{0min}	1300 nm
	λ_{0max}	1324 nm
	S_{0max}	0.092 ps/nm ² .Km
Coeficiente de atenuación	Máximo a 1310 nm	0.4 dB/Km
	Máximo a 1550 nm	0.35 dB/Km
	Máximo a 1625 nm	0.4 dB/Km
Coeficiente de PMD	M	20 cables
	Q	0.01%
	Máximo PMD _Q	0.20 ps/Km ^{1/2}
Coeficientes de atenuación en enlaces concatenados	1260 nm – 1360 nm	0.5 dB/Km
	1530 nm – 1565 nm	0.275 dB/Km
	1565 nm – 1625 nm	0.35 dB/Km
Coeficiente de dispersión cromática en enlaces concatenados	D ₁₅₅₀	17 ps/nm.Km
	S ₁₅₅₀	0.056 ps/nm ² .Km

Un solo dispositivo EDFA puede ser utilizado para amplificar simultáneamente muchos canales con diferentes longitudes de onda, manteniendo ciertos niveles de potencia deseados mediante la implementación de ecualizadores dado que no todos los canales se amplifican por igual, dependiendo dicha amplificación de la longitud de onda de la señal, el número de señales presentes y la potencia de la señal de entrada [14]. En la figura 1.4, se aprecia el esquema básico de un amplificador EDFA de tipo físico.

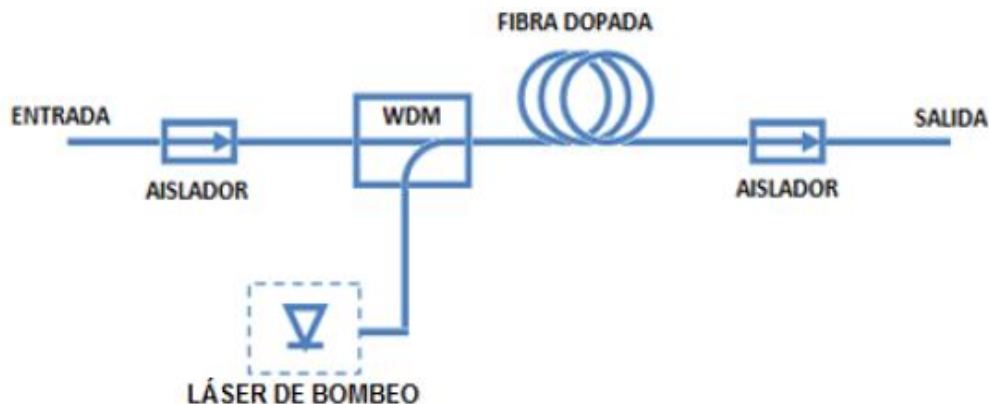


Figura 1.4 Esquema básico de un dispositivo EDFA [15].

Los equipos utilizados para este caso de estudio, son los amplificadores de ganancia constante *Corning Pure Gain 1500 Compact* [16], debido a que son equipos implementados por uno de los operadores anteriormente analizados, los cuales presentan ganancia constante de 23dB, una potencia máxima de salida de 21dBm y una figura de ruido de 5.2dB. Mediante la ecuación (1.6), se puede determinar la máxima distancia teórica del tramo de fibra que puede ser amplificada mediante la utilización de estos dispositivos.

$$G \propto \alpha \times D \quad (1.6)$$

Donde G, es la ganancia de los amplificadores EDFA, α es la constante de atenuación que introduce la fibra SMF-28 para longitudes de onda alrededor de los 1550 y D es la distancia máxima por span.

1.2.3.2 Fibra Compensadora de Dispersión Cromática (DCF)

Uno de los métodos comúnmente implementados para compensar la CD, son los módulos de compensación de fibra negativa DCF (Dispersion Compensating Fiber). Dichos dispositivos, son módulos de fibra que poseen una alta dispersión, típicamente de 80 a 100 ps/nm*Km, de esta forma utilizando solo un porcentaje muy pequeño de la longitud de la fibra SSMF-28 del sistema, se puede compensar totalmente los efectos de la dispersión de velocidad grupal GVD acumulada sobre la línea de transmisión. Por otra parte, dado que las pérdidas de la DCF son equivalentemente altas, típicamente 0,6 dB/km, se debe ajustar la potencia para mantener una Relación Señal a Ruido (SNR) aceptable al final de la línea de transmisión [17].

Existen tres modos básicos de compensar la CD: Modo Pre-Compensación, en donde se compensa el efecto de la CD antes del tramo de fibra; Modo Post-Compensación, en donde se compensa el efecto de la CD después del tramo de fibra; y el Modo de Compensación Simétrica, en el cual se compensa la CD antes y después del tramo de fibra.

Mediante la ecuación (1.7), se puede determinar la longitud de la fibra DCF que debe implementarse en el modelo para compensar el efecto de la Dispersión Cromática:

$$D_1 L_1 + D_2 L_2 = 0 \quad (1.7)$$

Donde,

$D_1 =$ Coeficiente de dispersión de la Fibra SMF – 28

$L_1 =$ Longitud de la fibra smf28e

$D_2 =$ Dispersión del tramo de fibra DCF

$L_2 =$ Longitud de la fibra DCF

1.2.4 Características de las redes DWDM

El sistema DWDM tiene ciertas características de nivel físico. A continuación, se describen las funciones principales [18]:

1. El transponder, o trasladador de longitud de onda, acepta la entrada en la forma de un láser estándar monomodo o multimodo. La entrada puede venir de distintos medios físicos y con diferentes tipos de tráfico. La longitud de onda de cada señal de entrada es mapeada a una longitud de onda DWDM.
2. Luego se produce una combinación de señales; para esto se usan los multiplexores. Las longitudes de onda DWDM del transponder son multiplexadas en una sola señal óptica y enviada a la fibra. El sistema puede incluir la posibilidad de aceptar señales ópticas directas al multiplexor, que pueden venir, por ejemplo, de un satélite.
3. Hay alguna pérdida inherente asociada a la multiplexación y la demultiplexación. Esta pérdida depende del número de canales, pero se puede mitigar con amplificadores ópticos que amplían todas las longitudes de onda a la vez sin conversión eléctrica. Para esto se utiliza un postamplificador a la salida del sistema.
4. El siguiente paso es la transmisión de señales que se hace por la fibra óptica. Sin embargo, los efectos de diafonía y la degradación o pérdida de la señal óptica deben ser considerados en la transmisión por la fibra. Estos efectos pueden ser minimizados mediante el control de las variables, tales como el espaciado entre canales, la tolerancia de la longitud de onda y los niveles de potencia del láser. En un enlace óptico se usan amplificadores ópticos para darle ganancia a la señal.
5. Un preamplificador refuerza la señal antes de que entre en un extremo del sistema.
6. Inmediatamente viene la separación de las señales recibidas. En el lado del receptor, tales señales multiplexadas deben ser separadas en lambdas (longitudes de onda) individuales. Aunque esta tarea parece ser simplemente el opuesto de la combinación de señales, en la actualidad es técnicamente más difícil.
7. Finalmente está la recepción de señales. La señal demultiplexada es recibida por un fotodetector y cada lambda individual es mapeada según el tipo de salida requerido. Si el cliente tiene servicio de fibra óptica, sus equipos deben contar con interfaces para recibir la señal.

1.3 DISPERSIÓN POR EL MODO DE POLARIZACIÓN (PMD)

La PMD se clasifica dentro de los efectos lineales; los cuales son degradaciones ópticas que no dependen de la potencia de transmisión. Es un problema significativo encontrado en un gran número de redes ópticas, con especial incidencia en las redes de alta velocidad (10 Gbps) y larga distancia, la PMD produce ensanchamientos de los pulsos ópticos transmitidos por una fibra óptica, lo que provoca interferencia entre símbolos, por lo tanto, un aumento de la tasa de bit erróneo (BER) [19]. La PMD ocurre cuando dos polarizaciones diferentes de una señal de luz transmitida, se propagan con una diferencia de velocidad a través de la fibra como se muestra en la Figura 1.5 [19].

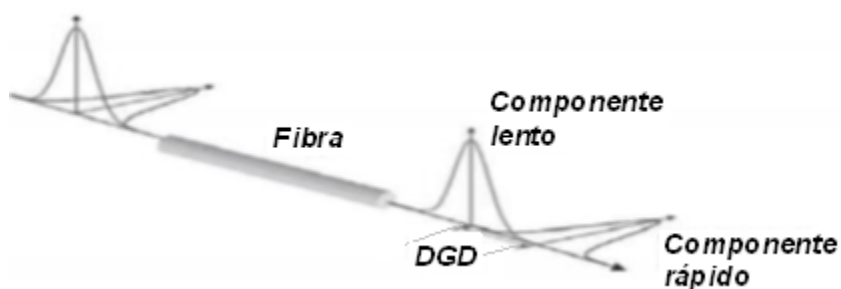


Figura 1.5 Representación de la PMD [19]

El principal problema, es que el núcleo de la fibra no es perfectamente circular, lo que origina dispersión a un grado tal que puede dejar a la señal en un estado que difícilmente pueda ser leído. Cuando la luz viaja en una fibra mono-modo hacia el receptor, tiene dos modos de polarización que viajan en dos ejes, y se mueven formando un ángulo recto uno del otro. En una fibra ideal las dos polarizaciones se propagan a la misma velocidad de fase, pero en realidad cualquier asimetría, curvatura o torsión hace que las dos polarizaciones se propaguen a diferente velocidad [20]; este efecto puede ser causado por problemas relacionados con la fabricación como imperfecciones en la fibra o asimetrías geométricas, por estrés mecánico, cambios de temperatura, movimientos de la fibra o también por los materiales mismos como el efecto de birrefringencia [19]. Esta propiedad se da por una pequeña diferencia en el índice de refracción en una pareja particular de estados de polarización ortogonal, es decir, que la velocidad de la luz depende de la ruta que toma a lo largo de la fibra [20].

El efecto de la PMD, se simula mediante el método waveplates¹. La fibra es modelada por una serie de elementos de fibra (waveplates), concatenados de igual longitud L_p . La orientación del Principal Estado de Polarización (PMD, Principal States of Polarization) de cada waveplate, es una variable aleatoria. En cambio, la DGD $\Delta\tau_p$, introducida en cada waveplate, es la misma para cada uno

¹ PLACAS DE ONDA- Teoría de waveplate (Geometric Interpretation of Waveplate-Induced Polarization Transformation in Stokes Space)- <http://www.av.it.pt/anp/doc/papers/conferences/2006/seon-nelson.pdf>

de ellos, y es proporcional al coeficiente PMD (δ_{PMD} en ps \sqrt{Km}) de la fibra simulada y la longitud del waveplate L_p , mediante la ecuación (1.8) [40]:

$$\Delta\tau_p = \sqrt{\frac{3\pi}{8}} \delta_{PMD} \sqrt{L_p} \quad (1.8)$$

Además, la longitud de los waveplates L_p está relacionada con la longitud del “fiber beat” L_B y la longitud de la fibra correlacionada L_C , por la ecuación (1.9) [40]:

$$L_C = -\frac{L_p}{\ln\left|\cos\left(\frac{L_p}{L_B}\right)\right|} \quad (1.9)$$

La DGD $\Delta\tau$ resultante al final del span de la fibra, es una variable aleatoria con una distribución Maxwelliana y una función de densidad de probabilidad, que es tomada de la ecuación (1.10) [40]:

$$P(\Delta\tau, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\Delta\tau^2}{q^3} e^{-\frac{\Delta\tau^2}{2q^2}} \text{ con } 0 < \Delta\tau < +\infty \quad (1.10)$$

Donde:

$$q^2 = \frac{\pi}{8} \delta_{PMD}^2 L_{fibra} \quad (1.11)$$

La DGD promedio es: $\langle \Delta\tau \rangle = \delta_{PMD} \sqrt{L_{fibra}}$

Y la varianza es: $\sigma_{\Delta\tau} = \sqrt{\left(\frac{3\pi}{8} - 1\right)} \cdot \delta_{PMD} \sqrt{L_{fibra}}$

La tabla 1.3 muestra los valores máximos de DGD típicos comunes inducidos por la fibra.

Tabla 1.3 Retardo Diferencial de Grupo (DGD) [41]

Máxima PMD _Q [ps/Km ^{1/2}]	Longitud de enlace	Máxima DGD inducida por fibra	Tasas de bit del canal
No específica			Hasta 2.5 Gbps
0.5	400	25	10 Gbps
	40	19	10 Gbps
	2	7.5	40 Gbps
0.20	3000	19	10 Gbps
	80	7	40 Gbps
0.10	>4000	12	10 Gbps
	400	5	40 Gbps

1.3.1 Birrefringencia

La Birrefringencia o doble refracción, es una propiedad de los materiales transparentes o molecularmente ordenados, de desdoblar un rayo de luz incidente en dos rayos linealmente polarizados de manera perpendicular entre sí, provocado por la existencia de la dependencia del índice de refracción con respecto a la orientación. La primera de las dos direcciones sigue las leyes normales de la refracción y se llama rayo ordinario, la otra tiene una velocidad y un índice de refracción variables y se llama rayo extraordinario; ambas ondas están polarizadas perpendicularmente. Muchos sólidos transparentes son ópticamente isotrópicos, esto quiere decir que su índice de refracción es igual en todas las direcciones a través de la estructura cristalina. Por otro lado, existen los sólidos en donde su comportamiento óptico no es uniforme, a estos se les denomina materiales anisótropos [21].

El término anisotropía se refiere a la no uniformidad espacial de la distribución de sus propiedades, lo que resulta en diferentes valores obtenidos en mediciones en diferentes partes del mismo. Los materiales anisótropos que exhiben diferencias de su índice de refracción con respecto a la orientación del eje óptico del cristal, se denominan birrefringentes [21].

La birrefringencia está cuantificada por la relación de la ecuación (1.12) [20]:

$$\Delta_n = n_e - n_o \quad (1.12)$$

Donde n_o es el índice de refracción del rayo ordinario y n_e es el índice de refracción del rayo extraordinario [20].

Esta expresión se vuelve verdadera en cualquier parte o fragmento de un cristal anisótropo, con excepción de la luz propagada a través del eje óptico del cristal, porque el índice de refracción puede variar, el valor absoluto de esta diferencia puede determinar el total de la cantidad de birrefringencia, pero el signo puede ser negativo o positivo. La determinación del signo de la birrefringencia, se hace por métodos analíticos. La birrefringencia no es un valor fijo, este puede variar con la orientación del cristal, relativa con el ángulo de incidencia de la iluminación [21].

Aunque la birrefringencia es una propiedad de muchos cristales anisótropos, como la calcita y el cuarzo, también puede surgir de otros factores como el orden estructural, estrés físico, deformación, la tensión, entre otros. La birrefringencia intrínseca, es el término usado para describir lo que ocurre naturalmente a los materiales que poseen asimetría en su índice de refracción, dependiente de la dirección [21].

En contraste a la fibra ideal, mostrado en lado izquierdo de la Figura 1.6, una fibra real exhibe diferentes tipos de imperfecciones; de derecha a izquierda: torsión o curvatura, impurezas en la fibra, y asimetría de la fibra. Las imperfecciones son parte inherente del proceso de fabricación de la fibra y son en parte causado por

las condiciones ambientales y la calidad del despliegue ó instalación de la fibra. La simetría en la configuración de las fibras es casi constante en el tiempo lo cual causa una PMD constante. La curvatura y tensión de la fibra puede variar en el tiempo debido a los cambios de la temperatura y aún mostrar fluctuaciones diurnas (Día/Noche) de la torsión y causar variaciones de la PMD. Las vibraciones pueden causar cambios dinámicos en la curvatura, y como resultado variar la PMD en fibras que se instalan cerca de líneas de un tren, asimismo las fibras aéreas pueden mostrar un cambio en la tensión y curvatura debido al movimiento causado por el viento [20].

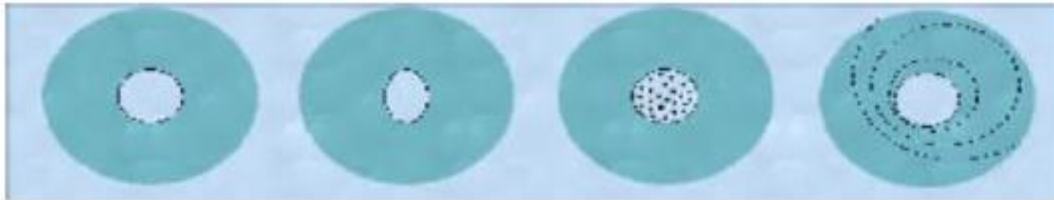


Figura 1.6 Sección transversal de fibra óptica ilustrando las causas de birrefringencia [20]

Todos estos efectos contribuyen a que la PMD no sea constante, por lo que el máximo PMD que puede ocurrir, solamente puede ser aproximado. Con respecto a la PMD, es importante entender que la causa real de la degradación de la señal es el retardo diferencial de grupo (también denominado la PMD instantánea), y que el término PMD es realmente la media del valor de la DGD (Differential Group Delay) [22], a una longitud de onda y en un tiempo determinado. Cuando la luz es acoplada en una fibra, toma diferentes rutas conforme viaja a través de ella, la Figura 1.7 muestra como el retardo diferencial de grupo, es la diferencia en el tiempo de los componentes del pulso de luz que viaja a través de la fibra dependiendo de las rutas que tomen [20].

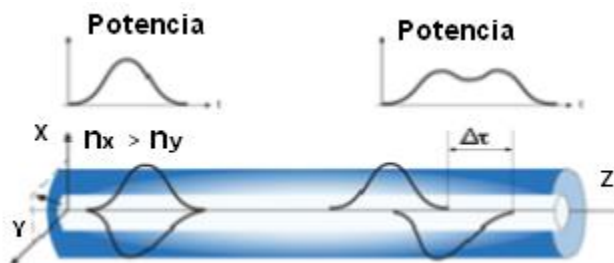


Figura 1.7 Esquema de propagación de dos modos de polarización en una fibra óptica birrefringente [22]

Típicamente, la situación representada en la Figura 1.7, se produce cuando el pulso óptico de entrada está polarizado entre el eje X e Y que le da un componente de polarización a lo largo de ambos ejes x (en la Figura 1.7 se polariza a 45 grados con respecto a los ejes X e Y) [22]. En el punto final de la fibra se presentará una diferencia de tiempo de las dos partes del pulso de luz, a esto se denomina el retraso diferencial de grupo (DGD), es proporcional a la raíz cuadrada de la distancia de propagación L , como lo muestra la ecuación (1.13) [1].

En un tipo especial de fibra, conocido como PMF-Polarization Maintaining Fiber, las diferentes partes de los pulsos de luz viajan por diferentes rutas, pero no cambian esta ruta durante todo su recorrido por la fibra. Este tipo de fibra puede ser fácilmente compensada en su DGD (PMD), mediante el uso de un polarizador para filtrar una parte del pulso de luz, ya sea la parte marcada con X o la otra parte representada en la Figura 1.8 (La Figura 1.8 representa un tramo de fibra siempre y cuando la fibra fuera PMF). Una fibra de telecomunicaciones real puede representarse como una serie de elementos de fibras birrefringentes del tipo ilustrado en la Figura 1.8, concatenados con una orientación aleatoria de los ejes [20]. La ecuación (1.13) modela el comportamiento de la DGD debido a la PMD:

$$\Delta\tau = D_{PMD}\sqrt{L} \tag{1.13}$$

Donde D_{PMD} es el parámetro PMD de la fibra, típicamente medido en ps/\sqrt{km} , y es una medida de la intensidad y frecuencia de las imperfecciones (Tabla 1.4) [1].

Tabla 1.4 Restricciones de transmisión vs tasas de línea [1]

	10G	40G	100G
Reducción del intervalo de bit	100ps	25ps	10ps
Aumento BW Eléctrico	1	4	4
Ocupación del espectro óptico	1	~4	~10
Tolerancia CD(ps/nm.Km)	1	1/16	1/100
Tolerancia PMD(ps/Km^{1/2})	1	1/4	1/10
Margen de Ruido	0dB	-6dB	-10dB



Figura 1.8 Concatenación aleatoria de elementos birrefringentes como representación de una fibra [20]

PMD es un factor restrictivo y limitante, para redes DWDM a partir de 10 Gbps, y puede limitar la distancia a la cual la luz puede ser transmitida por una fibra. El impacto de PMD también depende de la velocidad de transmisión de la señal transmitida, ya que la cantidad de errores de bit, es directamente influenciada por la cantidad de PMD presente en la fibra óptica, por lo tanto, es importante reducir la tasa de símbolos usando técnicas de modulación avanzadas [1].

1.4 TÉCNICAS DE MODULACIÓN

En las comunicaciones ópticas digitales, al igual que en el resto de sistemas de transmisión digital, una función esencial en la comunicación es modular la señal transmitida con la información que se desea propagar por el canal. Los formatos de modulación empleados en comunicaciones ópticas no difieren en esencia de los empleados en otros sistemas: usamos la amplitud, la frecuencia o la fase de la portadora en cuestión para codificar la información.

Se emplea generalmente un diodo láser de semiconductor como fuente de luz, la cual puede salir modulada directamente del láser o pasar por una etapa de modulación externa a la fuente. Así pues, existen básicamente dos grandes grupos de tecnologías de modulación óptica ampliamente extendidas en la actualidad: generación de la portadora óptica con láseres modulados directamente (modulación directa), o mediante dispositivos externos al láser que modulen la luz radiada por los mismos antes de su acople a fibra (modulación externa).

En esta sección revisaremos los principales métodos y tecnologías de modulación de la portadora óptica centrándonos principalmente en la modulación externa, dentro de la cual se encuentran ubicados los moduladores Mach-Zehnder que pretendemos caracterizar en el presente documento [23].

La DML (*Directly Modulated Lasers*, Modulación Directa de los Láseres), es el camino más fácil para imprimir la información digital de la fuente sobre la portadora óptica. Los datos que se desean transmitir modulan la corriente de conducción del láser DML, y a través de ella se consigue generar una modulación de intensidad, de fase o de frecuencia.

La generación de IM (*Intensity Modulation*, Modulación de Intensidad), mediante un DML, se basa en generar una corriente eléctrica que alimente al láser sincronizada con los datos digitales. Los bits "1" encienden el láser mientras que los bits "0" estarán sincronizados con un valor de la corriente por debajo de su corriente umbral, de manera que este no emita potencia óptica alguna. Sin embargo, la generación de una modulación de frecuencia a través de un DML se basa en modificar la densidad de portadores de carga en la cavidad resonante del láser. Por lo tanto, debemos generar una corriente con un valor de pico suficientemente elevado como para modificar la temperatura y la concentración de portadores de carga en la unión p-n. Ambos hechos inciden sobre el índice de refracción de la cavidad y consecuentemente sobre la longitud de onda de emisión. Así los cambios sobre la corriente del láser se traducen en variaciones en la frecuencia de emisión del láser.

En la última década el límite de la modulación directa se encontraba en torno a los 2.5 Gb/s en los láseres de semiconductor, pero a día de hoy los DMLs están ampliamente capacitados para superar dichas velocidades. Varios resultados se han obtenido por encima de los 10 Gb/s, e incluso se han llegado a alcanzar los

40 Gb/s. El principal inconveniente de los DMLs es el elevado factor *chirp*² que presentan (modulación de fase residual). El *chirp* expande el espectro óptico emitido e incrementa la distorsión de la señal causada por la iteración de la misma con la dispersión cromática y las no linealidades de la fibra. Por otro lado, los ruidos procedentes de la fuente láser como el ruido RIN o ruido de fase provocarán que se obtenga una señal de peor calidad que la que conseguiríamos con la modulación externa [23].

En la modulación externa el láser genera una intensidad óptica constante en el tiempo (láser de onda continua) que pasa posteriormente por un dispositivo óptico externo al que se hace llegar la señal moduladora. A la salida, la radiación estará modulada con la forma deseada y se acoplará a la fibra. La modulación externa suele ser necesaria en los sistemas donde los DMLs se quedan cortos en prestaciones. Ninguno de los problemas derivados de la modulación directa, como el *chirping* o el derivado del comportamiento de los modos longitudinales de un láser, estarán aquí presentes. La modulación externa provee de una señal de mejor calidad.

Los moduladores empleados en la modulación externa se basan en la variación que sufren las propiedades de un material con la aplicación de determinadas señales de distinta naturaleza. Los dos tipos más empleados son los electroópticos (EOM) y los de electroabsorción (EAM). En los primeros es una señal eléctrica la que origina un cambio en el índice de refracción del material. Los segundos están basados en la absorción de luz cuando ésta atraviesa un semiconductor y sobre éste actúa un campo eléctrico. El tercer tipo de moduladores existentes, y que en la actualidad son los que tienen un uso menos extendido, son los acusticoópticos (AOM). En éstos, una onda acústica da lugar a un cambio periódico en el índice de refracción de la cavidad del modulador. Los moduladores más extendidos tanto por sus prestaciones como por su economía de diseño son los de tipo electroóptico. Es dentro de este grupo donde ubicamos a los moduladores MachZehnder en los que centramos nuestro estudio [23].

1.4.1 Modulador Mach-Zehnder (MZM)

Los moduladores Mach-Zehnder trabajan bajo el principio de interferencia, en la Figura 1.9 se muestra la estructura del modulador: la luz que entra al dispositivo es dividida en dos caminos en la entrada del acoplador; uno de estos caminos tiene un modulador de fase que hace que los campos ópticos adquieran alguna fase diferencial relativa con respecto al otro, controlado por la aplicación de voltaje $V_{1,2}$. Estos dos campos se interfieren en un acoplador de salida, teniendo lugar así la modulación de la intensidad de la fuente láser [24].

² Modulación de fase residual dada por la relación entre los cambios de fase asociados con los cambios instantáneos de intensidad en una modulación de intensidad, el factor *chirp* puede ser nulo, positivo o negativo; a partir de este último se denominan las técnicas de *pre-chirping* positivo y negativo correspondientemente.

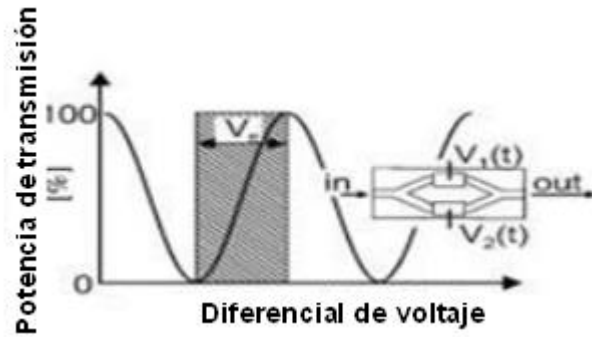


Figura 1.9 Función de transmisión MZI [24]

Los MZMs se implementan comúnmente en Niobato de Litio (LiNbO₃), también pueden encontrarse moduladores fabricados en Arsenuro de Galio (GaAs) o en Fosforo de Indio (InP). Los MZIs, sobre todo los que están basados en LiNbO₃, muestran características de modulación independientes de la longitud de onda y unas pérdidas de inserción más bajas que los EAMs (alrededor de 5 dB). Como contrapartida, trabajan a mayor tensión que los EAMs (hasta 6V), lo que hace necesario el uso de amplificadores de banda ancha, complejos de fabricar para regímenes binarios superiores a 10 Gbps [24].

1.4.2 Interferómetro Mach-Zehnder (MZI)

El Interferómetro MZI (*Mach-Zehnder Interferometer*, Interferómetro Mach-Zehnder), es un dispositivo particularmente simple que demuestra la interferencia por división de amplitud. Se trata de un dispositivo óptico integrado, cuyo funcionamiento se basa en un fenómeno de interferencia de ondas, controlado por una serie de señales de control. Dependiendo de la fase relativa adquirida por el haz a lo largo de los dos caminos, el segundo *beam splitter* reflejará el haz con una eficiencia entre el 0 y el 100%. Entre sus múltiples aplicaciones, podemos enumerar las siguientes: conmutación óptica, conversión de longitud de onda, funciones de lógica digital, regeneración óptica de señales, entre muchas otras. Una mirada rápida de su composición es posible apreciarla en la Figura 1.10 [25].

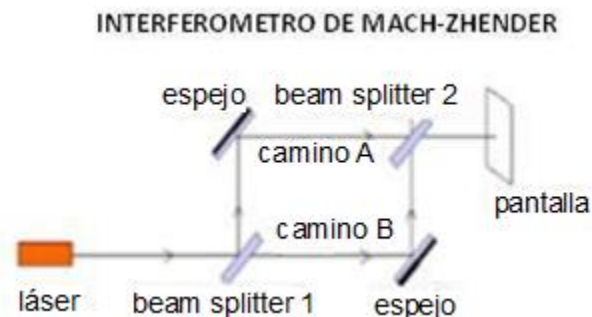


Figura 1.10 Diagrama esquemático básico de un MZI [25]

1.4.3 Funcionamiento del MZI

La estructura básica de un interferómetro de MZI, consta de dos acopladores direccionales de 3dB (un *splitter* y un combinador con $\alpha = 0.5$) interconectados mediante dos caminos de diferentes longitudes, siendo la diferencia Δl . La señal introducida por una de las entradas se divide en dos replicas iguales al atravesar el *splitter*. Debido a la diferencia de caminos se introduce un desfase en una de las réplicas. Dependiendo de la longitud de onda de la señal se tendrá una interferencia constructiva o destructiva a la salida al combinarse las señales. A continuación, se hace una explicación paso por paso de su funcionamiento [25].

El primer *beam splitter* (BS) del MZI, es color plata en su parte superior. Para un fotón que incide en este BS desde el camino superior (Figura 1.11a.), la componente reflejada de su estado de superposición presentara un desfase de 180° , comparado con el haz incidente. Esto es debido a la interfaz aire-vidrio, que es el cambio de bajo a alto índice de refracción. La componente de transmisión no sufrirá cambio en su fase. Para un fotón incidente desde el camino inferior (Figura 1.11b) sus componentes de transmisión y de reflexión no sufrirán cambio de fase [25].

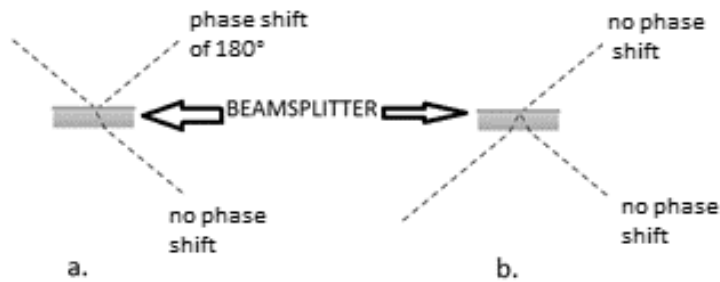


Figura 1.11 Caminos posibles de entrada de un MZI [25]

Si $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ y $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ representan los caminos superior e inferior respectivamente, se supone el estado inicial del fotón en $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ camino inferior (Figura 1.11). Para el primer BS ecuación (1.14) puede ser representado como una matriz de 2x2 [25]:

$$BS_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} e^{i\pi} & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.14)$$

El haz inferior no presenta cambio en su fase. Así, el BS ecuación (1.15) crea un estado de superposición para el fotón como se observa en la Figura 1.12 [25].

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \end{pmatrix} \quad (1.15)$$

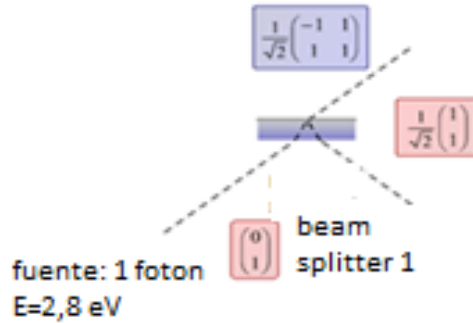


Figura 1.12 Incidencia del fotón sobre el primer camino inferior [25]

Es incorrecto afirmar, que esta superposición implica que el fotón se divide en dos fotones separados, cada uno de ellos con la mitad de la intensidad del fotón original. La intensidad está dada por los modulados al cuadrado de los estados cuánticos, y así no contienen información de la fase. Lo que se observa es la interferencia entre dos caminos, lo cual solo es posible debido a la fase relativa entre ellos [25].

El segundo BS es color plata en su parte inferior. Este BS es representado matemáticamente por la ecuación (1.16) [25]:

$$BS_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & e^{i\pi} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (1.16)$$

Después de pasar a través de todo el interferómetro, es claro que el estado del fotón cambia de fase de 180° a través de las reflexiones de los espejos, y se obvia en la representación matemática ecuación (1.17) para simplificar expresiones [25].

$$BS_2 \times BS_1 \times |in \rangle \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \times \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.17)$$

El cambio de fase en el camino inferior puede ser matemáticamente representado como $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\Phi} \end{pmatrix}$. Así, el cambio en la fase da lugar a un nuevo estado de superposición (ecuación 1.18):

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\Phi} \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ e^{i\Phi} \end{pmatrix} \quad (1.18)$$

El estado del protón después del paso a través de todo el interferómetro, pero antes de la detección es modelado por la ecuación (1.19) [25]:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ e^{i\Phi} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + e^{i\Phi} \\ 1 - e^{i\Phi} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \left((1 + e^{i\Phi}) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + (1 - e^{i\Phi}) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right) \quad (1.19)$$

Asumiendo que la diferencia de longitud entre los caminos que conectan los dos acopladores, es ΔL y que únicamente en el puerto de entrada superior del primer

BS, hay señal presente, se muestra que la función de transferencia de MZI está dado por ecuación (1.20) [25]:

$$\begin{pmatrix} T_{11}(f) \\ T_{12}(f) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{sen}^2 \left(\beta * \frac{\Delta L}{2} \right) \\ \text{cos}^2 \left(\beta * \frac{\Delta L}{2} \right) \end{pmatrix} \quad (1.20)$$

Siendo $\beta * \Delta L$ la diferencia de fase entre el fotón que se propaga por el camino inferior con respecto al fotón que se propaga por el camino superior. Consecuentemente, la diferencia de longitud entre los dos brazos del MZI, es el parámetro que caracteriza la función de transferencia del dispositivo [25].

1.4 MODULACIONES ÓPTICAS Y FORMATOS DE MODULACIÓN

La fibra óptica se ha convertido en una de las tecnologías más avanzadas que se utilizan como medio de transmisión, debido a su gran capacidad de transporte, presentando ventajas incomparables frente a otros medios como el cobre o el aire, óptimas propiedades de ancho de banda y mínimas pérdidas [26]. Este hecho ha provocado cambios sustanciales en las arquitecturas de las redes ópticas, principalmente por las grandes prestaciones alcanzadas por las soluciones WDM que han permitido un gran aumento en su capacidad de transporte [27].

Para transmitir información a través de un sistema por fibra óptica, es necesario someter la señal de información a un proceso de modulación que consiste en modificar los parámetros de una onda en función de una señal moduladora. La portadora es aquella onda a la que se le modifica alguno de sus parámetros; y la onda en la cual se transporta la información alterando alguno de los parámetros de la portadora se le llama modulada [28].

Es posible modificar cuatro parámetros distintos (en la onda portadora): amplitud, frecuencia, fase y estado de polarización. De acuerdo al parámetro elegido, se tienen cuatro tipos de modulación digital: ASK (*Amplitude Shift Keying*, modulación en amplitud), FSK (*Frequency Shift Keying*, modulación en frecuencia), PSK (*Phase Shift Keying*, modulación en fase) y PolSK (*Polarization Shift Keying*, modulación del estado de polarización) [28].

Debido a la necesidad de mayores capacidades de transporte por fibra y la reducción de costos por bit de la información transmitida extremo a extremo, los formatos avanzados de modulación óptica se han convertido en clave para el diseño de sistemas WDM [29]. De ellos se destaca la modulación en fase (PSK), con su variación DQPSK, que presenta un mejor comportamiento y tolerancia ante la dispersión cromática y los efectos no lineales, logrando así mayores distancias y una mejora en la sensibilidad del receptor [30], aumentando su uso en sistemas de transmisión ópticos de alta velocidad para grandes distancias [20].

En el marco de los sistemas de comunicación ópticas, se ha demostrado que el uso del formato de modulación DPSK mejora las prestaciones para comunicaciones ópticas de larga distancia en comparación con los formatos OOK, mejorando la sensibilidad del receptor y la tolerancia a los efectos no lineales [30].

A continuación, se describen algunos formatos de modulación de interés en nuestro trabajo de investigación.

1.4.1 Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK, *Phase Shift Keying*)

En la modulación de fase, los datos binarios son modulados sobre la portadora, esta se basa en la diferencia de fase en los valores discretos 0 y 1 la cual es π . Esta técnica se denomina desplazamiento de fase (PSK) o BPSK por PSK binaria [31], existen 2 grupos para esta modulación: cuando en la información se codifica el valor del salto de fase la cual se conoce como PSK convencional, y PSK Diferencial (DPSK, *Differential Phase Shift Keying*), donde la información está contenida en el valor del salto de fase con relación al anterior [28], DPSK tiene algunas ventajas en comparación con PSK. Puesto que la información se almacena en el cambio de fase y no en la propia fase lo cual puede ser utilizado en sistemas donde no se conoce fase [32], [38], [34], ver figura 1.13. La señal moduladora está dada por ecuación (1.21), donde A es la amplitud de la portadora, f_c es la frecuencia de la portadora, T_b es el intervalo de señalización y θ_k el desfase inicial constante:

$$X_{PSK}(t) = A \sum_{i=-\infty}^{\infty} \cos(2\pi f_c t - \theta_k) h(t - iT_b) \quad (1.21)$$

donde:

$$\theta_k = \begin{cases} 0 & \text{si se transmite un "1"} \\ \pi & \text{si se transmite un "0"} \end{cases}$$

$$h(t) = \prod(t/T_b)$$

La señal modulada puede representarse de la siguiente manera:

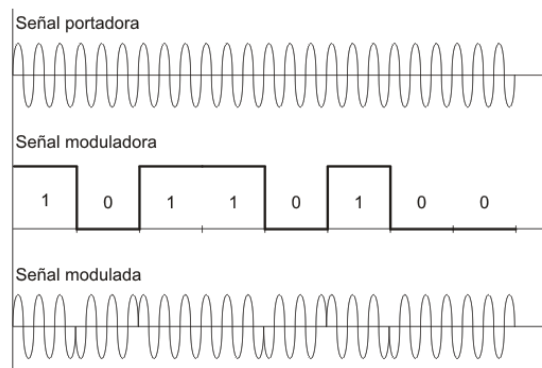


Figura 1.13 Modulación PSK [46]

1.4.2 Modulación por Desplazamiento de Fase Cuaternaria o en Cuadratura (QPSK, *Quadrature Phase Shift Keying*)

En QPSK, los bits de información se codifican en la fase de la portadora óptica y la amplitud de la señal permanece constante [39], en esta modulación la señal portadora puede tener 4 fases de salida en combinaciones de 00, 01, 10, 11. Un modulador QPSK el bit I (componente en fase) con tensiones de -1 o +1 se multiplica por la portadora y el bit Q (componente en cuadratura) por la misma con un desfase de 90° [36].

Una señal QPSK puede ser representada como indican las ecuaciones (1.22) y (1.23), según [39], [42], [44]:

$$x(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta(k)), kT \leq t \leq (k+1)T \quad (1.22)$$

donde:

$$\theta(k) = \begin{cases} \pi/4 & \text{si } (I(k), Q(k)) = (0,0) \\ 3\pi/4 & \text{si } (I(k), Q(k)) = (1,0) \\ 5\pi/4 & \text{si } (I(k), Q(k)) = (1,1) \\ 7\pi/4 & \text{si } (I(k), Q(k)) = (0,1) \end{cases} \quad (1.23)$$

La figura 1.14 representa el diagrama de constelaciones para una modulación QPSK, donde la diferencia entre dos puntos de constelación es un bit, este sistema de codificación recibe el nombre de Código de Gray [36].

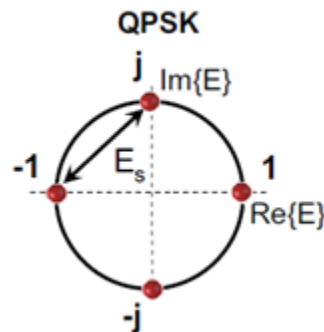


Figura 1.14 Diagrama de constelaciones modulación QPSK [36]

Uno de los requerimientos importantes para la implementación de este formato de modulación es la de modificar el receptor debido a que la señal no puede ser detectada directamente, por tal motivo un DI (*Delay Interferometer*, Interferómetro de Retraso) es insertado en el trayecto óptico del receptor para convertir una modulación de fase diferencial en una modulación de intensidad [43].

1.4.3 Código de línea con Retorno a Cero (RZ, *Return to Zero*)

Una de las principales características de las señales moduladas RZ es un espectro óptico relativamente amplio, lo que genera una tolerancia de dispersión reducida y una eficiencia espectral reducida. La forma RZ permite impulsos con una mayor robustez a la fibra, los efectos no lineales y la PMD. El pulso RZ ocupa sólo una parte de la ranura de bits, por lo que tiene un ciclo de trabajo menor que 1 y un amplio espectro [44]. Es un sistema de codificación usado en telecomunicaciones en el cual la señal que representa a cada bit retorna a cero en algún instante dentro del tiempo del intervalo de bit. Por lo tanto, las secuencias largas de “unos” o de “ceros” ya no plantean problemas para la recuperación del reloj en el receptor.

No es necesario enviar una señal de reloj adicional a los datos. Esta codificación tiene el problema de utilizar el doble de ancho de banda para conseguir transmitir la misma información que los Códigos NRZ. Ver figura 1.15.

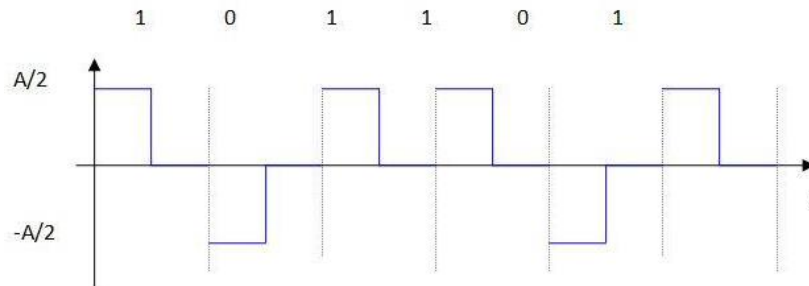


Figura 1.15 Código de línea RZ [45]

1.4.4 Código de línea Sin Retorno a Cero (NRZ, *Non Return to Zero*)

Los códigos que siguen la estrategia NRZ, comparten la propiedad de que el nivel de tensión se mantiene constante durante la duración del bit; es decir, no hay transiciones (no hay retorno al nivel cero de tensión). Por ejemplo, la ausencia de tensión se puede utilizar para representar un 0 binario, mientras que un nivel constante y positivo de tensión puede representar el 1. En telecomunicaciones, se denomina NRZ porque el voltaje no vuelve a cero entre bits consecutivos de valor uno [44]. Ver figura 1.16.

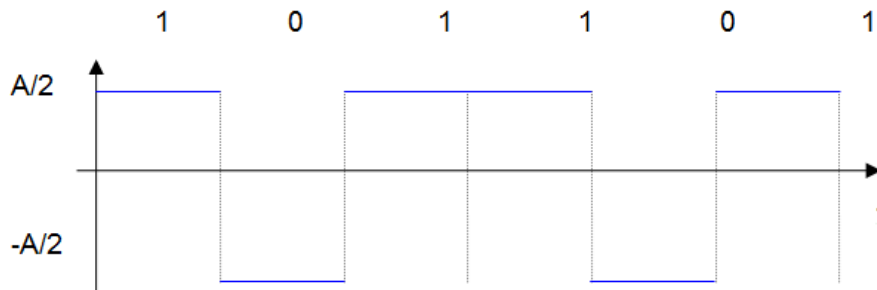


Figura 1.16 Código de línea NRZ [45]

1.4.5 Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase en Cuadratura Con Retorno a Cero/Sin Retorno a Cero (RZ/NRZ DQPSK, *Return to Zero/Non Return to Zero Differential Quadrature Phase Shift Keying*)

La Modulación por Desplazamiento por Cuadratura Diferencial de fase (DQPSK–*Differential Quadrature Phase Shift Keying*), es un formato de modulación multinivel, que transporta más de un bit por símbolo [43].

Es una modulación de fase diferencial con 2 bits por símbolo, diferenciados por un salto de fase de $\pi/2$: (0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$); su implementación más común es la utilización de dos MZM, en configuración en paralelo, que operan como moduladores de fase [24], [46].

DQPSK es la versión de cuatro niveles de DPSK. La cual transmite dos bits para cada símbolo (combinaciones de bits es 00, 01, 11 y 10). DQPSK tiene un espectro óptico más estrecho, tolera más la dispersión (tanto cromática y de modo de polarización), permite un filtrado óptico más fuerte, y permite un espaciado de canal más cerrado. Particularmente, para sistemas se 40Gbps, el formato DQPSK permite manejar 50 GHz de espaciado espectral entre canales [43].

En DQPSK, la información de símbolo se codifica como el cambio de fase de un periodo de símbolo al siguiente en lugar de como una fase absoluta. La señal transmitida puede ser representada como se indican en las ecuaciones (1.24) y (1.25) según [39], [42]:

$$x(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta(k)), kT \leq t \leq (k+1)T \quad (1.24)$$

donde:

$$\theta(k) - \theta(k-1) = \begin{cases} 0 & \text{si } (I(k), Q(k)) = (0,0) \\ \pi/2 & \text{si } (I(k), Q(k)) = (1,0) \\ \pi & \text{si } (I(k), Q(k)) = (1,1) \\ 3\pi/2 & \text{si } (I(k), Q(k)) = (0,1) \end{cases} \quad (1.25)$$

En la figura 1.17 se observa el diagrama de constelaciones de la modulación DQPSK, en el cual, el número de símbolos es el doble y la distancia entre los puntos de cada constelación es reducida a la mitad que en DPSK, donde dicha reducción requiere al menos una OSNR de 3 dB por encima, para conservar la misma BER [43].

DQPSK: 2 símbolos/bit

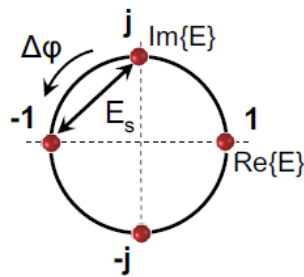


Figura 1.17 Diagrama de Constelaciones Modulación DQPSK [47]

A continuación, se detalla la tabla 1.5 comparativa entre los formatos de modulación anteriormente mencionados.

Tabla 1.5 Análisis comparativo de los formatos de modulación de interés

Formato de modulación	Diagrama de constelación	Funcionamiento
PSK		Los datos binarios son modulados sobre la portadora, esta se basa en la diferencia de fase en los valores discretos 0 y 1 la cual es π .
QPSK	<p>QPSK</p>	Los bits de información se codifican en la fase de la portadora óptica y la amplitud de la señal permanece constante [39], en esta modulación la señal portadora puede tener 4 fases de salida en combinaciones de 00, 01, 10, 11.
DQPSK	<p>DQPSK: 2 símbolos/bit</p>	Es una modulación de fase diferencial con 2 bits por símbolo, diferenciados por un salto de fase de $\pi/2$: (0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$). La cual transmite dos bits para cada símbolo (combinaciones de bits es 00, 01, 11 y 10).

1.4.5.1 Transmisor DQPSK

Existen diferentes configuraciones de modulación para obtener el formato DQPSK, entre ellas se destacan 3, configuración simple, serie, paralelo (Figura 1.18), siendo esta última su mejor implementación.

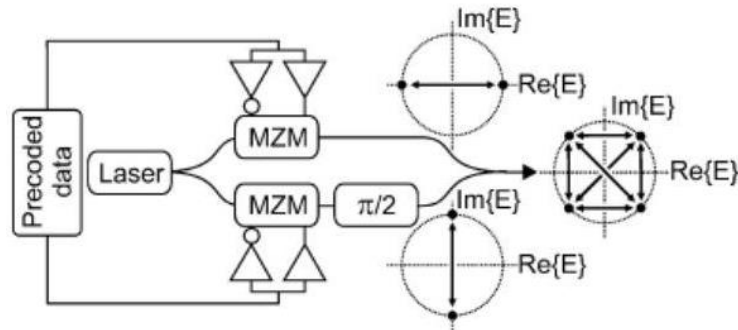


Figura 1.18 Transmisor configuración paralelo [46].

Para esta configuración se dispone de un láser de emisión continua, un divisor de potencia para separar la luz en dos caminos de igual intensidad, se utilizan dos MZM como moduladores de fase y en uno de estos se dispone de un conmutador óptico de fase de $\pi/2$, al final un acoplador produce la señal de salida, en esta configuración se obtiene desplazamientos de fase en π , independiente de las perturbaciones de la señal de polarización [46].

1.4.5.2 Receptor DQPSK

Un receptor puede demodular una señal DPSK sin necesidad de una portadora, tomando como referencia la fase del último bit recibido. Para la estructura del demodulador DPSK y DQPSK, típicamente están constituidos por MZDI (*Mach Zehnder Delay Interferometer*, interferómetros de retardo Mach Zehnder), los cuales introducen retardos de un periodo de bit. Para DQPSK se puede construir con dos demoduladores DPSK, donde la diferencia de fase es fijada por los MZDI, para la detección de las componentes en fase (I) y en cuadratura (Q) de la señal, siendo el desplazamiento de fase del MZDI es de 45° para la componente en I y de -45° para la componente en Q [37]. Ver figura 1.19.

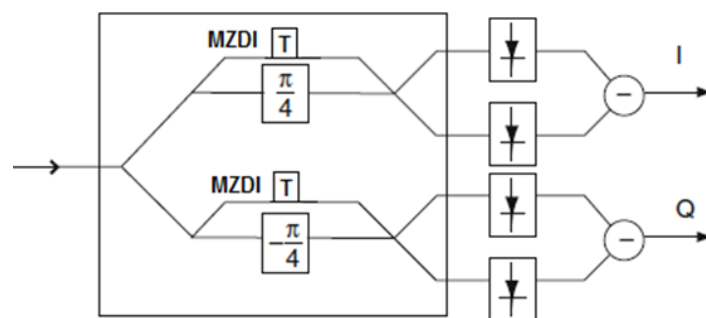


Figura 1.19 Demodulador y receptor balanceado para DQPSK [37]

La modulación RZ-DQPSK puede obtenerse mediante la adición de un modulador Mach-Zehnder pulso *carver* RZ, a la salida del transmisor DQPSK, como puede apreciarse en la Figura 1.20. El uso de un pulso *carver* mejora la tolerancia ante la

Dispersión Cromática y ayuda a reducir el *chirp* residual en la señal modulada [47].

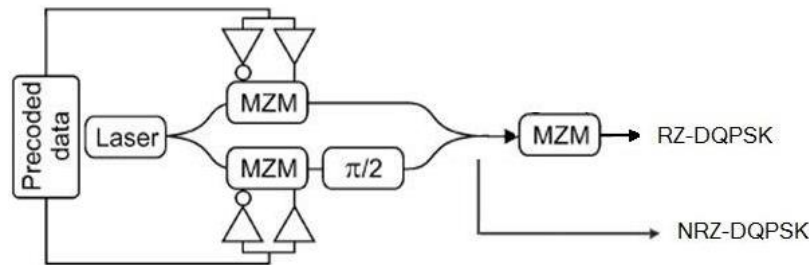


Figura 1.20 Estructura transmisor (RZ – NRZ)/DQPSK [47], [48]

Comparado con DPSK, DQPSK incrementa la eficiencia espectral, tolerancia ante la PMD y CD, el espectro óptico es más estrecho, sin embargo, el diseño del transmisor es más complejo ya que requiere de dos moduladores de fase y uno de intensidad [49].

1.5 COMPENSADOR PMDC BASADO EN ESTRUCTURAS MACH ZEHNDER

Uno de los factores que degrada la señal de información cuando esta viaja por la fibra óptica es la PMD, y es por ello que se busca tratar este fenómeno por medio de componentes fotónicos, que permitan realizar una gestión de la PMD dentro de la red óptica y poder controlarla. Los EDC (*Electronic Dispersion Compensator*, Compensadores de Dispersión Electrónico) tienen la ventaja de poder ser implementados en una red existente, sin embargo, se debe llevar a cabo después de la foto detección, lo que no le permite distinguir la fase de la luz entrante y como consecuencia se presentará deficiencia en la relación señal-a-ruido cuando se quiere compensar gran cantidad de dispersión. Por ultimo están los ODC (*Optical Dispersion Compensator*, Compensadores de Dispersión Óptica) los cuales presentan beneficios tales como la compensación sintonizable, tanto en términos de longitud de onda como en valor de dispersión, facilitando la escalabilidad en redes ópticas ya existentes. Los ODC a diferencia de los DCF y EDC, pueden compensar directamente la fase, las distorsiones de amplitud, adaptarse a grandes velocidades, eliminar componentes costosos y reducir el consumo de energía lo que lo hace más atractivo a la hora de implementarlo [50], [51].

En la Figura 1.21, se aprecian tres métodos para compensar la PMD:

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

- ✓ Línea de transmisión: son muy utilizadas las DCF y las FBG para compensar la PMD obteniendo buenos resultados.
- ✓ Post-Chirp: se realiza en el lado del receptor utilizando la compensación electrónica y la ecualización.

En cualquiera de ellos, se puede realizar una compensación del tipo ODC, el cual presenta mayores ventajas respecto a los EDC y DCF como se dijo anteriormente [50].

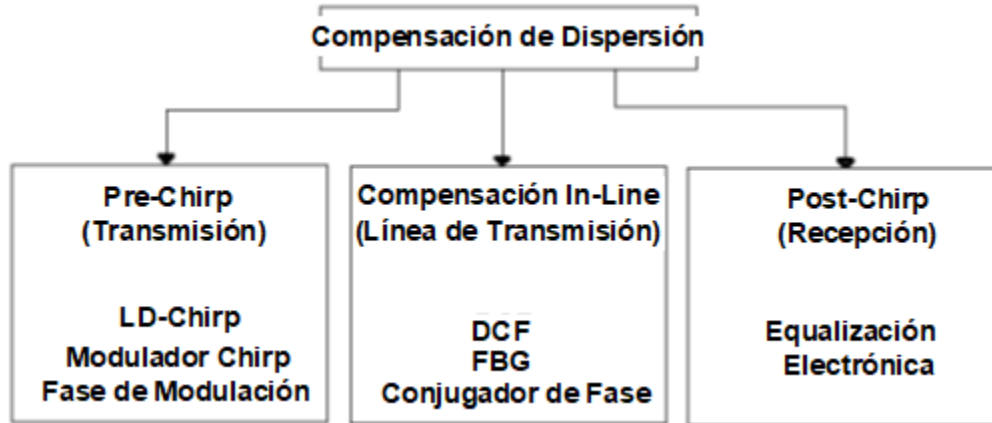


Figura 1.21 Métodos de Compensación de Dispersión [50]

El módulo compensador de PMD a diseñar en este trabajo de investigación, se hará a partir de un elemento clave llamado el MZI. A continuación, se tratarán conceptos específicos del MZI como módulo compensador.

El MZI es un dispositivo muy útil para fines de procesamiento óptico de señales. Puede ser empleado como filtro óptico y compensador sintonizable de PMD, dependiendo de su configuración [52], [53].

El MZI es un componente óptico pasivo y su principio de funcionamiento se basa en el desfase por diferencia de caminos ópticos entre sus ramas. Se pueden diseñar a partir de espejos o por guías de onda, donde estas últimas son más útiles y prácticas para fines de procesamiento óptico de señales [54], [55]. La Figura 1.22 muestra el diagrama básico de un Mach Zehnder, por guía de onda:

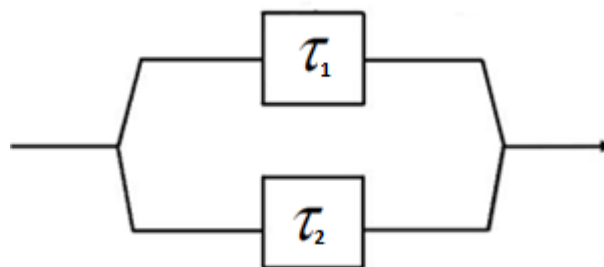


Figura 1.22 Diagrama básico del Mach Zehnder [56]

El Mach Zehnder actúa como un modulador externo y es de gran importancia debido a que presenta mejoras con respecto a los moduladores de Electro Absorción, entre ellas se tiene que [56]:

- Permite que el láser trabaje con un nivel constante de alimentación, lo que hace que su vida útil sea mayor.
- Se obtiene una mayor velocidad de modulación, porque no se basa en movimiento de electrones.
- Se disminuye el *chirp* (modulación de frecuencia residual y no deseada a la salida del transmisor óptico, que depende en gran medida de la modulación de intensidad directa), permitiendo una mejor recepción de la señal.

Dado que los receptores captan las variaciones de amplitud de la señal, se opta por el cambio de modulación de fase por una modulación de amplitud. Para ello se utiliza el Mach Zehnder como Interferómetro, haciendo que la modulación de fase perturbe a cada brazo del modulador y así obtener a la salida una modulación de amplitud, cuando las señales de cada rama se junten [52], [56].

Los láseres modulados externamente, están formados por una fuente, un generador de pulsos eléctricos, con un formato de codificación RZ o NRZ, un láser y un modulador externo Mach Zehnder [58], como se muestra en la Figura 1.23 (modelo tomado de la herramienta de simulación OptSim™ de Synopsys).

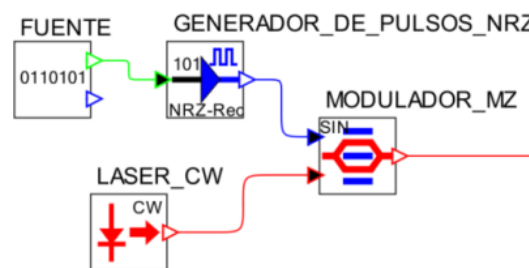


Figura 1.23 Esquema de modulación externa [58]

En la Figura 1.24, se aprecia la arquitectura interna de un MZI, las guías de onda al estar bajo la influencia de electrodos en cada una de sus ramas, producen un efecto llamado electro-óptico, el cual induce un cambio en el índice de refracción, dependiendo de la tensión eléctrica aplicada a cada brazo.

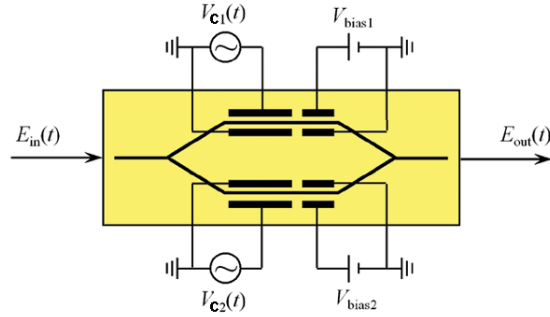


Figura 1.24 Arquitectura del MZI [56]

La señal de entrada se divide entre las dos ramas del MZI y en cada una de ellas, se aplica un cambio de fase dependiente de la tensión aplicada a cada brazo. E_{in} y E_{out} , se refieren al campo eléctrico de la onda de luz a la entrada y salida del MZI respectivamente. V_{e1} y V_{e2} , corresponden al voltaje aplicado a cada electrodo presente en las ramas del MZI, llamado también Voltaje Bias, que permite al modulador trabajar en la zona lineal. Así mismo, V_{c1} y V_{c2} hacen referencia a la sensibilidad de los electrodos en cada rama, es decir, obtener un cambio de fase de π radianes en la señal óptica, aplicando una tensión a cada brazo [56], [59].

El cambio de fase, se puede encontrar con la ecuación (1.26):

$$\theta = \pi(V_e - V_c) \quad (1.26)$$

Dado esto, a la salida del MZI se tiene (ecuación 1.27):

$$E_{out} = E_{in}[(1-\alpha)e^{i\theta_1} + \alpha e^{i\theta_2}] \quad (1.27)$$

Donde α = es la relación de división interferométrico.

Para el caso ideal se tiene que este parámetro es de $\frac{1}{2}$, por lo que se tendría lo siguiente (ecuación 1.28):

$$E_{out} = \frac{1}{2}E_{in}(e^{i\theta_1} + \alpha e^{i\theta_2}) \quad (1.28)$$

La potencia será (ecuación 1.29):

$$P = \frac{1}{2}E_{out}^2 = \frac{1}{2}E_{in}^2\{[(1-\alpha)\cos\theta_1 + \alpha\cos\theta_2]^2 + [-(1-\alpha)\sin\theta_1 - \alpha\sin\theta_2]^2\} \quad (1.29)$$

Teóricamente, por los dos brazos del MZI debería viajar la misma cantidad de señal, pero en la práctica esto no se da. Siempre por una rama se tendrá más señal que por la otra, es por esto que se incluye el parámetro α , para modelar la diferencia de caminos y así representar la cantidad de señal que transita por cada brazo del MZI.

Dado lo anterior, cuando la diferencia de fase entre las dos señales sea de 180° a la salida del MZI se garantiza que la mínima señal obtenida es distinta de cero [56].

En los MZI, se presentan dos tipos de configuración básicos:

1.5.1 Configuración Push Pull

En este tipo de configuración, la señal que transita por cada brazo, presenta la misma amplitud, pero con diferente fase. Se debe aplicar un voltaje Bias y datos sobre uno de sus brazos y en el otro, realizar lo inverso, es decir, datos inversos y tensión de Bias invertida, ecuación (1.30):

$$V_{e1} = -V_{e2} \quad (1.30)$$

Al recombinarse las señales en la salida, se obtendrá una modulación de intensidad sin *chirp*, dado que en cada brazo los cambios de fase son iguales en magnitud, pero con signo contrario.

De la expresión (1.29), usando la expresión (1.30) y $\alpha=1$, se puede obtener la siguiente función de transferencia para este tipo de configuración, ver Figura 1.25:

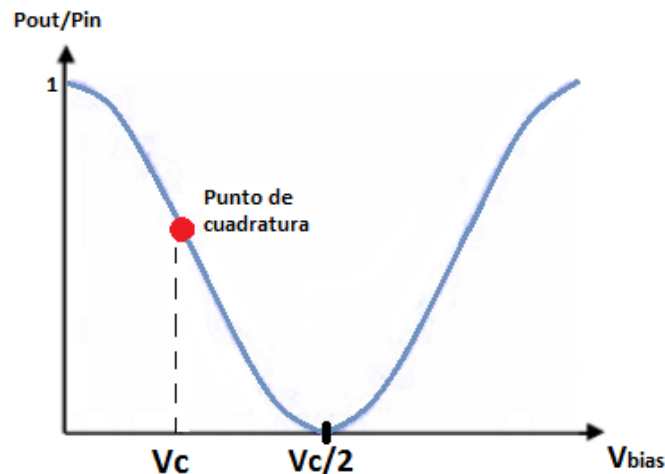


Figura 1.25 Función de transferencia del MZI en configuración Simétrica [56]

En la Figura 1.25, la función de transferencia supone una división igual de potencia entre sus ramas, por tanto, una relación de extinción infinita (expresa la eficiencia con que la potencia óptica transmitida se modula a través de la fibra. Tiene un valor típico entre 20-40 dB. A mayor valor, mejor eficiencia), pero eso no ocurre realmente en la práctica, es muy difícil conseguir una división igual de potencia por ambas ramas, ya que el reparto de esta nunca será exactamente la misma. Así, la relación de extinción a la salida tiene valores típicos finitos entre 20 dB y 40 dB [56], [59], [60].

1.5.2 Configuración Asimétrica

En la configuración asimétrica, el voltaje Bias o tensión de polarización, se aplica solo a una de sus ramas.

Análogamente a la configuración simétrica, usando la expresión (1.29), la función de transferencia para esta configuración es la mostrada en la Figura 1.26:

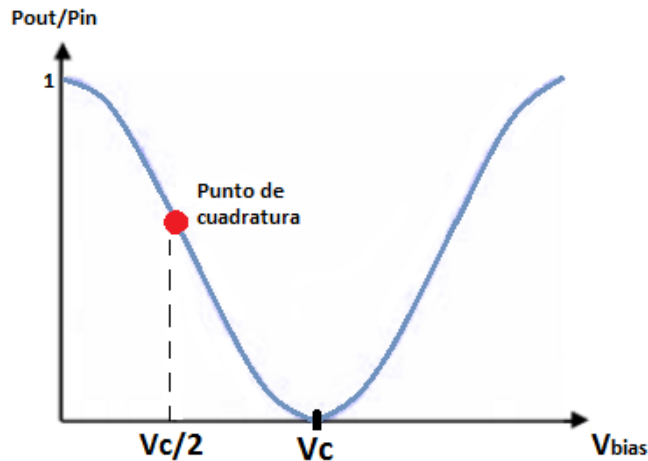


Figura 1.26 Función de transferencia del MZI en configuración Asimétrica [56]

En la Figura 1.25 y Figura 1.26, se puede apreciar que, en el centro de la zona lineal, se ubica el punto de cuadratura, donde el MZI ofrece la máxima linealidad. Para el caso simétrico se requiere de un voltaje V_c y para el asimétrico, un voltaje $V_c/2$ entre las ramas. También se observa, que las funciones de transferencia son las mismas para las dos configuraciones, pero con una diferencia entre ellas, y es que la configuración asimétrica requiere una tensión doble con respecto a la otra para cancelar la señal a la salida, dado que utiliza un solo brazo [56], [57], [59], [60].

1.6 PARÁMETROS DE DESEMPEÑO

El monitoreo de desempeño de las redes juega un papel esencial en la futura evolución y en el despliegue de la industria óptica, ya que una de las claves del éxito de las redes de nueva generación será asegurar Calidad de Servicio (QoS) y ofrecer servicios ópticos dinámicos y diferenciados [61]. Los parámetros de desempeño se evalúan mediante el Monitoreo de Desempeño Óptico (OPM).

1.6.1 Diagrama del Ojo

La BER, OSNR son parámetros de medición que proporcionan información acerca de la calidad del enlace y del desempeño de la transmisión; viéndose involucrado el funcionamiento de los equipos de recepción, transmisión, cable y demás; pero en determinados casos y para diversos inconvenientes, muchos de estos parámetros de medición no son apropiados para encontrar el origen del problema, por esto, se hace necesario e indispensable el uso del diagrama de ojo, ya que

permite el análisis de las formas de onda de los pulsos que se propagan en el canal de transmisión y del cual se pueden deducir parámetros de medición como BER y factor Q [61].

El diagrama de ojo, muestra en un rango de tiempo la superposición de las distintas combinaciones posibles de unos y ceros. Dichas señales transmitidas por el enlace, permiten obtener las características de los pulsos que se propagan por el medio de comunicación (fibra óptica) [61].

El diagrama del ojo es una muy buena herramienta, usada para analizar la calidad de las señales, esta puede ser implementada en el monitoreo de la PMD, ya que es posible hacer análisis cualitativos y cuantitativos para llegar a concluir la existencia o no de la PMD, además de su efecto sobre la señal, como se puede ver en la Figura 1.27 [62].

De acuerdo a lo anterior, se decide implementar esta herramienta como ayuda en el presente Proyecto.

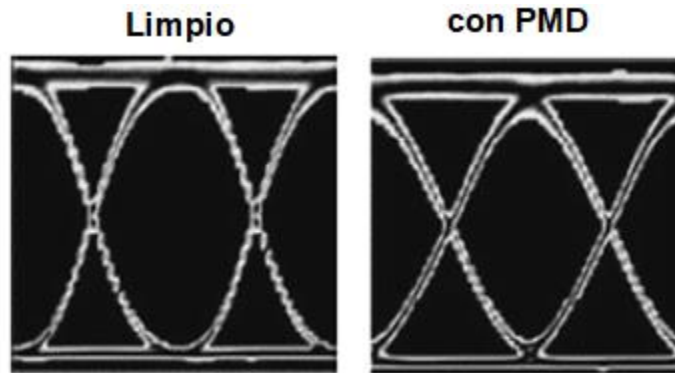


Figura 1.27 Diagrama del ojo con y sin efectos de la PMD [62]

En la figura 1.28 el eje Y muestra el nivel de amplitud de la señal, que compromete el desempeño del sistema por los efectos tales como la atenuación, la ISI y el margen de ruido, dependiendo de su apertura; en el eje X o eje de tiempo se tiene la incidencia del sincronismo, del jitter y las distintas regiones específicas o máscaras del diagrama del ojo, en donde cualquier señal que se propague hace referencia a problemas y errores en la transmisión [43], [63].

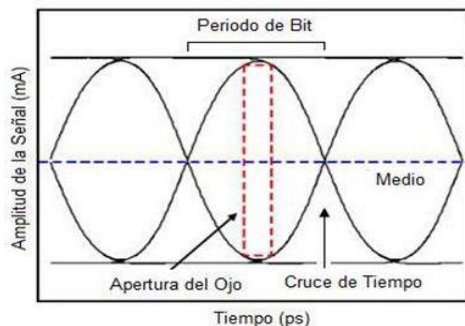


Figura 1.28 Parámetros del Diagrama del Ojo [47].

1.6.2 Tasa de Error de Bit (BER)

El nivel de la tasa de errores durante la transmisión, se caracterizan con un parámetro denominado BER (Bit Error Rate) [64].

En las redes digitales de transmisión, el concepto de BER tiene tres acepciones que son equivalentes entre sí [64]:

- a) Relación entre el número de bits erróneos recibidos y el número de bits transmitidos (ecuación 1.31):

$$BER = \frac{N^{\circ} \text{ de bits erróneos recibidos}}{N^{\circ} \text{ de bits transmitidos}} \quad (1.31)$$

- b) Número de errores ocurridos durante la transmisión de un bit.
c) Probabilidad de que se reciba un bit erróneo, cuando se ha recibido un cierto número de bits. Una forma de expresarlo sería (ecuación 1.32):

$$BER = [p(0/1)] \quad (1.32)$$

Donde $[p(1/0)]$ representaría la probabilidad de recibir un cero, cuando en realidad se ha transmitido un uno; y $[p(0/1)]$ representaría la probabilidad de recibir un uno cuando en realidad se ha transmitido un cero [64].

1.6.3 Factor de Calidad Q

El factor Q, es una medida de cuan ruidoso es un pulso con fines de diagnóstico de la calidad del enlace [65].

Se define como la Relación Señal a Ruido Eléctrica (ESNR - Electrical Signal to Noise Ratio) en la entrada de un circuito de decisión de un receptor de señal digital. Se supone que, en condiciones ideales, el factor Q está dado por los niveles lógicos μ_0 y μ_1 , y por la distribución del ruido Gaussiano en torno a los niveles "1" y "0", definidos por las desviaciones típicas σ_0 y σ_1 , como se aprecia en las ecuaciones (1.33) y (1.34).

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad (1.33)$$

$$Q(\text{decibelios}) = 20 \times \log_{10} Q(\text{lineal}) \quad (1.34)$$

En la práctica, hay una serie de factores que causan distorsiones cuyo efecto es que la forma de la distribución deja de ser Gaussiano, no obstante, esas distorsiones afectan principalmente a las regiones superiores de la distribución, mientras que con la distribución de Gauss se puede efectuar una aproximación muy precisa de los extremos. Donde la región en que se superponen la

distribución, representa la probabilidad de que se produzcan errores como se aprecia en la figura 1.29 [7].

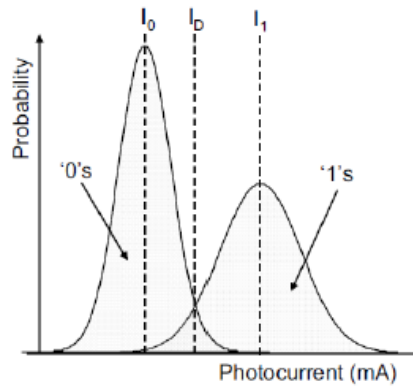


Figura 1.29 Definición del umbral óptimo de decisión [7].

1.6.4 Relación Señal a Ruido óptica (OSNR, Optical Signal to Noise Ratio)

Se define como la medida de la relación de la potencia de la señal con respecto a la potencia de ruido en un canal óptico. La importancia de este parámetro se debe a que nos indica la degradación que sufre la señal óptica debido a las atenuaciones que se presentan dentro del sistema [66].

La OSNR (en dB) puede calcularse con la ecuación (1.35) [43]:

$$OSNR = 10 \log \frac{P_i}{N_i} + 10 \log \frac{B_m}{B_r} \quad (1.35)$$

donde:

P_i = Potencia óptica de la señal.

B_m = Ancho de banda.

N_i = Valor promedio de la potencia de ruido medido en el ancho de banda B_m .

B_r = Ancho de banda óptico de referencia típicamente seleccionado para 0.1 nm.

1.6.5 Jitter

Corresponde básicamente a una desviación de fase respecto de la posición ideal en el tiempo de una señal digital que se propaga en un canal de transmisión.

El Jitter es un efecto indeseable en sistemas de comunicaciones, que puede degradar completamente la calidad y desempeño del enlace, causando errores de recepción, ya que el receptor no podría recobrar el reloj de sincronismo en el extremo receptor, además puede producir interferencia intersimbólica (ISI), entre los pulsos que se propagan por el canal, generando un desplazamiento de las señales que componen el pulso mezclando las mismas, imposibilitando de esta manera el reconocimiento de los niveles respectivos de la señal en el receptor [63].

El presente capítulo se propuso una base teórica para el diseño de una red DWDM y la caracterización de los aspectos más importantes del estudio para proyecto a realizar, por lo tanto, se tiene que:

- Dentro de las degradaciones más significativas a tener en cuenta, se tiene la PMD, que es sin lugar a duda el impedimento más grande que puede tener las redes de 10 Gbps o mayores velocidades de transmisión.
- Para medir la viabilidad de la implementación de redes ópticas con velocidades iguales o superiores a 10 Gbps, se caracterizaron el formato de modulación RZ-DQPSK, y el compensador PMDC ya que son técnicas de modulación avanzadas que presentan un mejor desempeño frente a los efectos lineales y no lineales.
- Se describieron de manera general y se caracterizaron los formatos de modulación; RZ-DQPSK, objeto de estudio del presente proyecto de grado, para su posterior análisis comparativo de desempeño en redes DWDM y su tolerancia frente a la PMD.
- Se establecen los parámetros de desempeño del sistema con respecto a los formatos de modulación estudiados e implementados como lo son BER; Factor Q, Diagrama de Ojo.

Posteriormente, en el capítulo siguiente se definirá una metodología de simulación que se fundamentará en el modelo simplificado de red, para generar escenarios de simulación acorde a los esquemas de modulación y técnicas escogidas, también la visualización de los efectos provocados por el fenómeno de la PMD, en las redes ópticas DWDM de 40Gbps.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y ESCENARIO DE SIMULACIÓN

En este capítulo se describe la metodología de simulación y su adaptación a este proyecto de investigación para aportar al alcance del objetivo analizar la incidencia de la PMD y su compensación en un sistema de comunicaciones punto a punto basado en fibra óptica a nivel físico, que incluye aspectos como: esquemas de modulación y multiplexación, velocidad de transmisión, condiciones de canal basado en fibra óptica para redes de larga distancia, parámetros de dispersión y atenuación, condiciones de recepción y medición de parámetros del sistema. Para este propósito se utiliza la herramienta de simulación OptSim® de Rsoft.

2.1 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

En la actualidad, existen múltiples programas de simulación de redes ópticas, que permiten el análisis de sistemas de comunicaciones basados en óptica a nivel físico, a nivel de red, entre otros en la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, los estudiantes de pregrado y postgrado utilizan la licencia para trabajar con OptSim® de Rsoft en la elaboración de los trabajos de grado y proyectos de investigación.

Este software permite el diseño y evaluación de estos sistemas, brindando a sus usuarios una interface gráfica de medición flexible, que actúa como un conjunto de instrumentos virtuales de laboratorio. Debido a la robustez de este software en los últimos años, se ha empleado en diferentes investigaciones y en distintas asignaturas del Departamento de Telecomunicaciones, por esta razón se utilizará para el desarrollo del presente proyecto de investigación [40].

Este software, define dos modos de simulación, dependiendo del tipo de resultados que se deseen [40]:

1. Modo Bloque: es una técnica de simulación tradicional, en la cual la secuencia de entrada se evalúa por bloque hasta el punto de salida.
2. Modo Muestra: se implementa muestra a muestra, de tal forma que la señal de datos pasa entre componentes y representa una muestra única en cada instante de tiempo. Este modo provee dos tipos de simulación:
 - Técnica de Propagación Espectral (SPT, *Spectral Propagation Technique*): las señales se propagan en la red como espectro de potencia, teniendo en cuenta las pérdidas de los componentes y el ruido. Además, es posible evaluar en cualquier punto de la red, los espectros, niveles de potencia y la relación señal a ruido óptica (OSNR).
 - Técnica de Ancho de Banda Variable (VBS, *Variable Bandwidth Simulation*): las señales se propagan como muestras en el dominio del tiempo sobre un ancho de banda variable. Si se simula en la opción “VBS Full” se tendrán en

cuenta todos los efectos de las fibras tanto lineales como no lineales, por otro lado, al simular con la opción “VBS *Linear Fiber*” se considerará únicamente los efectos lineales y si se requiere simular el efecto de la atenuación se escoge la opción “VBS *Loss Only Fiber*”.

2.2 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Para realizar el análisis comparativo del desempeño de los formatos de modulación NRZ-DQPSK, RZ-DQPSK con la aplicación del compensador PMDC en una red DWDM a 40 Gbps y su tolerancia frente a la PMD, es necesario seguir una metodología de simulación que está constituida por una serie de pasos, los cuales conllevan al cumplimiento de los objetivos propuestos en este proyecto. Las fases que definen el proceso de simulación aplicado son:

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

2.2.1 Definición de los escenarios de simulación y casos de estudio

Para cumplir con el objetivo de este proyecto de investigación: realizar el análisis de cuál de las dos técnicas (formatos de modulación NRZ-DQPSK, RZ-DQPSK y el compensador PMDC) de mitigación frente a la PMD en redes DWDM a 40 Gbps presenta el mejor desempeño, se plantean dos escenarios de simulación, en el cual se diseñan cuatro casos de estudio, cada uno de ellos con configuraciones específicas como se observa en la figura 2.1.

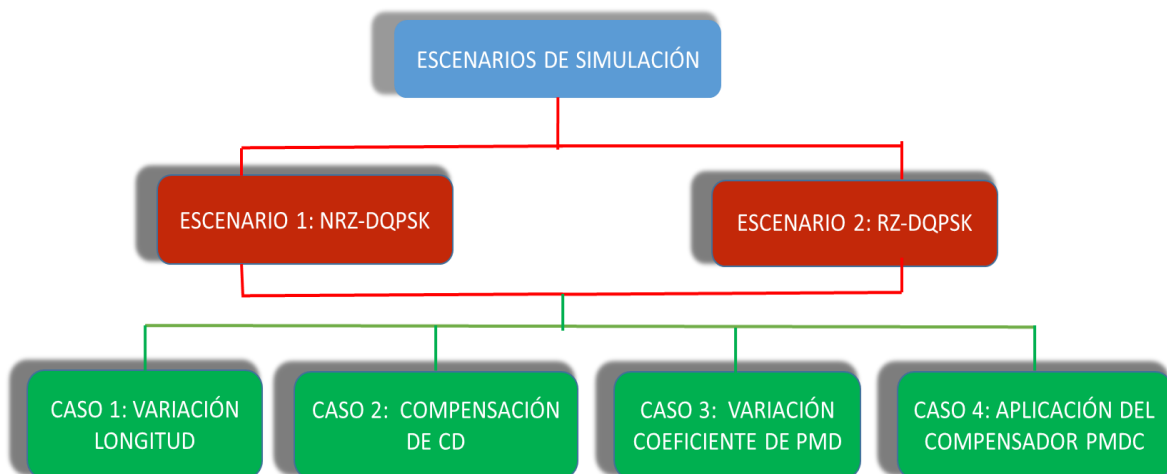


Figura 2.1 Casos de simulación

Cada uno de estos casos, son explicados en el desarrollo de esta metodología de simulación.

2.2.1.1 Escenario de simulación

Teniendo en cuenta que se deben generar condiciones en la red para analizar el desempeño de los formatos de modulación NRZ-DQPSK y RZ-DQPSK, se definen dos escenarios de simulación, basados en un sistema DWDM, que está compuesto por tres elementos básicos: transmisor, medio de transmisión, y receptor, la topología establecida es punto a punto, como se aprecia en la Figura 2.2, la cual representa el esquema general o base de los escenarios de simulación.

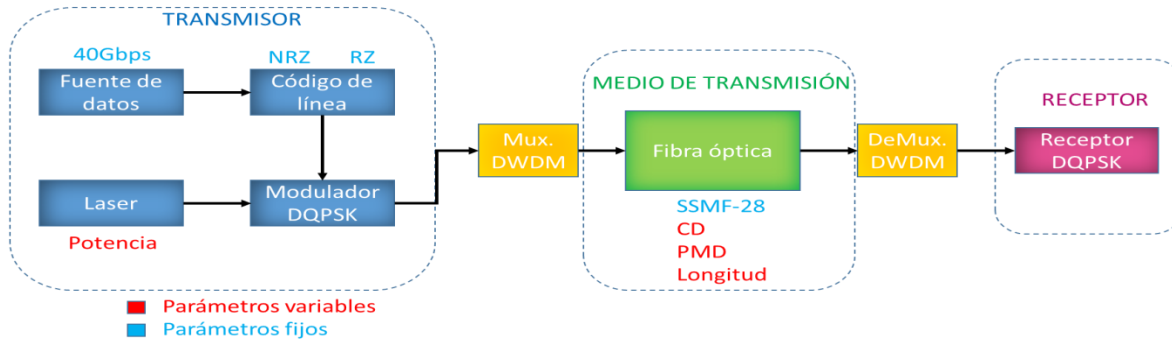


Figura 2.2 Esquema Escenario General de Simulación Escenario

Las mediciones realizadas serán la CD, la PMD y la longitud de la fibra; como parámetros variables en el medio de transmisión, estas mediciones serán evaluadas por los valores arrojados de los parámetros de desempeño mediante la utilización de componentes estimadores de Factor Q y Diagrama del Ojo ubicados en el receptor del sistema DWDM.

En cada uno de los escenarios se determinan como parámetros fijos y variables los siguientes:

Parámetros variables:

- **En el transmisor:** la potencia del transmisor (P_{TX}).
- **En el canal:** la longitud de la fibra, coeficiente de CD y PMD.

Parámetros fijos:

- **En el transmisor y receptor:** el formato de modulación y el número de canales.
- **En el canal:** el tipo de fibra: SMF-28.

Escenarios de simulación: Se definen dos escenarios de simulación, el escenario 1 conformado por el formato NRZ-DQPSK y el escenario 2 por RZ-DQPSK.

2.2.1.2 Casos de estudio:

Se han definido cuatro casos de estudio para cada escenario de simulación:

- **Caso de estudio 1, Variación de la longitud:**

Para una transmisión a 40 Gbps de una red DWDM, en los formatos de modulación NRZ-DQPSK y RZ-DQPSK, se realiza una serie de simulaciones en donde se modifica el parámetro de la potencia de transmisión (P_{TX}), con el fin de conseguir la red de mayor alcance posible.

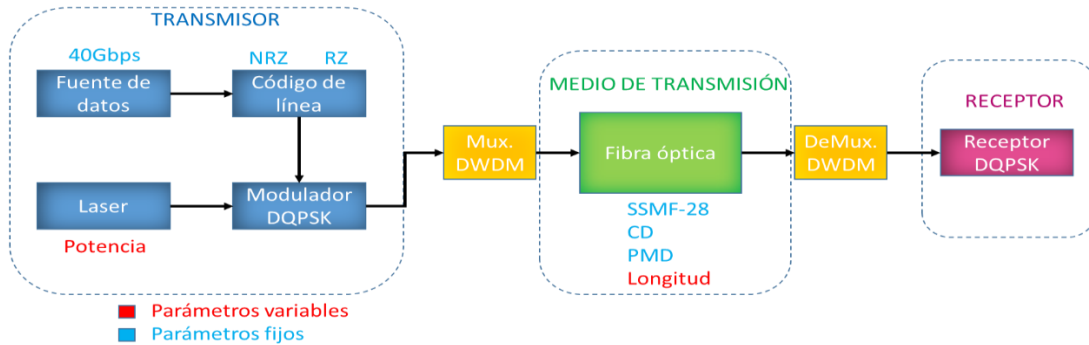


Figura 2.3 Caso de estudio 1

- **Caso de estudio 2, Compensación de dispersión cromática:**

Teniendo en cuenta la distancia máxima alcanzada para cada valor de potencia de transmisión (P_{TX}) en el caso de estudio 1, se procede a realizar la compensación de dispersión cromática, debido a que una vez compensada la CD se asegura que la única dispersión que limita la transmisión óptima es causada por la PMD.

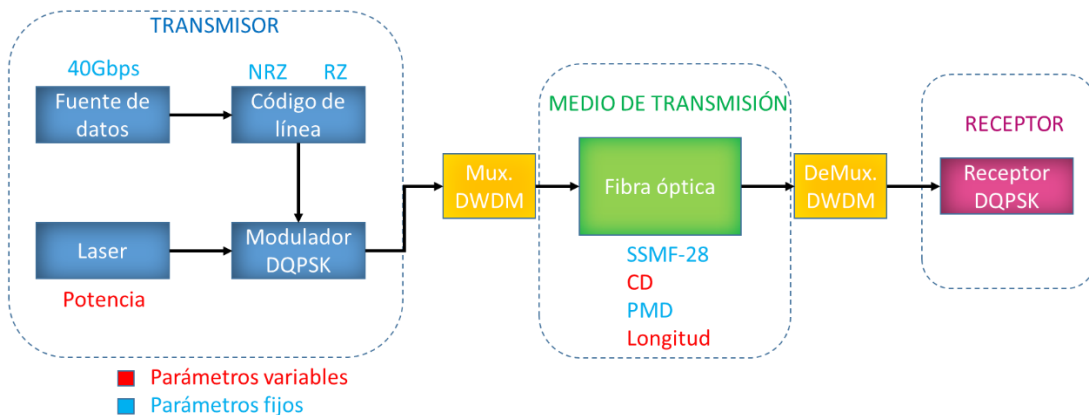


Figura 2.4 Caso de estudio 2

- **Caso de estudio 3, Variación coeficiente PMD:**

Para una transmisión a 40 Gbps de una red DWDM, en los formatos de modulación NRZ-DQPSK y RZ-DQPSK, se realiza una serie de simulaciones partiendo de los resultados obtenidos en el caso 1 y caso 2, en donde se realizarán variaciones de longitud y coeficiente de PMD, manteniendo una dispersión cromática ya compensada, para que el efecto de la PMD sobre la

distorsión del pulso y el desvanecimiento de la señal pueda ser observado [67], verificando así el comportamiento del enlace con el objetivo de obtener valores óptimos de desempeño, como son la BER y factor Q.

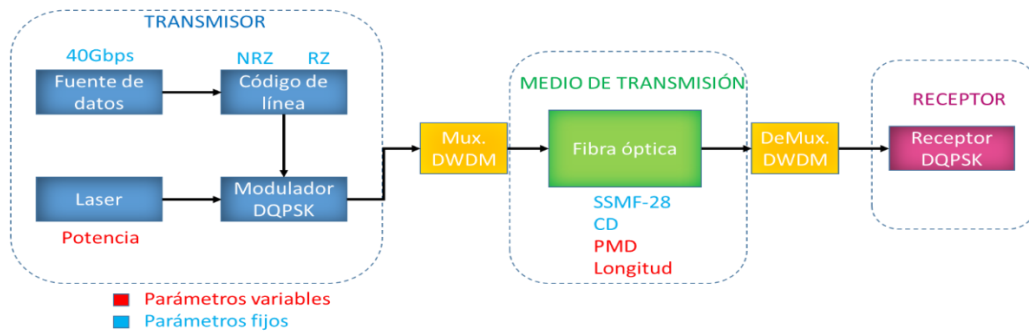


Figura 2.5 Caso de estudio 3

- **Caso de estudio 4, Aplicación del compensador PMDC:**

Una vez examinados los tres casos anteriores, se procede a conectar el compensador PMDC sobre el formato que mejor desempeño haya tenido en cuanto a longitud del enlace, potencia de transmisión óptima, compensación de CD y tolerancia a la PMD, las anteriores mediciones son analizadas con base a los parámetros de calidad objetivo óptimos de desempeño.

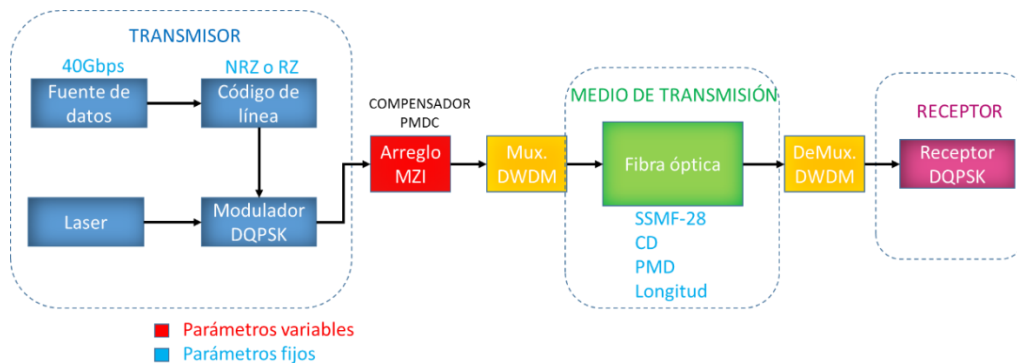


Figura 2.6 Caso de estudio 4

2.2.2 Identificación de los parámetros técnicos de los escenarios de simulación.

Teniendo en cuenta la caracterización de los formatos de modulación NRZ-DQPSK y RZ-DQPSK y el compensador PMDC realizada en el capítulo 1, se procede a configurar los dos escenarios de simulación, donde se reflejen las propiedades principales de estos formatos, para posteriormente efectuar su implementación a nivel de simulación de tal manera que permita realizar el análisis comparativo del desempeño de los formatos de modulación NRZ-DQPSK y RZ-DQPSK, así como la aplicación del compensador PMDC en redes DWDM a 40 Gbps y su tolerancia frente a la PMD, para cumplir con estándares mínimos de desempeño.

Para la implementación de los escenarios de simulación se parte del trabajo previo realizado en [43], en el que se realizó un estudio de diferentes formatos de modulación empleando una velocidad de transmisión de 2.5 Gbps y se estableció un modelo basado en las características de redes de varios operadores nacionales de telecomunicaciones. Dicho modelo consiste en una topología de anillo de 3 nodos, con distancia igual entre los nodos. Para el presente trabajo de investigación, el análisis de simulación se hace sobre uno de los tramos entre dos nodos, y se asume que los efectos presentes entre cualquier par de nodos tendrán un comportamiento similar.

La caracterización de los escenarios de simulación se fundamenta en:

Emplear la fibra óptica SMF-28, ya que es el tipo de fibra óptica con mayor implementación en redes DWDM comerciales [68], ligadas a las características mostradas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Parámetros de la Fibra Corning SMF-28 [68].

ATRIBUTO	DETALLE	VALOR
Diámetro de campo modal	Rango de valores nominales	8.6 – 9.5 μm
	Tolerancia	$\pm 0.6\mu m$
Diámetro de revestimiento	Nominal	125 μm
	Tolerancia	$\pm 1\mu m$
Atenuación	1310 nm	$\leq 0.4dB/Km$
	1550 nm	$\leq 0.35dB/Km$
PMD	Valor de diseño para enlace	0.2ps/Km ^{1/2}
	Máximo de Fibra Individual	0.2ps/Km ^{1/2}
Coefficiente de Dispersión Cromática	1310 nm y 1550nm	16ps/nm * Km

Trabajar canales en la banda C (1530-1560 nm), alrededor de los 1550 nm, banda de operación en la que la fibra G.652, presenta atenuación mínima. Considerar un rango amplio de potencias de transmisión, entre -5 dBm y 25 dBm, y una sensibilidad del receptor de -30 dBm. Tener en cuenta que, en el contexto nacional, las distancias típicas de los enlaces oscilan entre los 80 Km y los 120 Km, en casos donde se pueden encontrar casos de longitud fija (100 km) [69].

Según [69], [70], en el contexto nacional los equipos más utilizados son OSN de HUAWEI en sus series OptiX OSN, responsables de manejar las señales ópticas STM-64.

Después de realizar la especificación de las características de la transmisión, los escenarios de simulación se pueden resumir en Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Características del escenario de Modulación

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
PARÁMETRO	VALORES
Velocidad del Sistema	40 Gbps
Tecnología de Red	DWDM
Banda	Banda C (1530-1560 nm)
Ventana	Alrededor de 1550 nm
Estándar Utilizado	G.652.b
Tipo de Fibra	SMF-28
Espaciamiento de los canales WDM	100GHz (0.8 nm)
Número de canales implementados	4 canales (193.4, 193.5 , 193.6, 193.7 THz)
Atenuación para 1550 nm	0.2 dB/Km
Coefficiente PMD	0.2 ps/Km ^{1/2}
Coefficiente de Dispersión 1550 nm	16 ps/nm.Km
CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR	
Formato de Modulación	NRZ-DQPSK, RZ-DQPSK
Tipo de Modulación	Externa con Mach-Zehnder
Potencia de Tx del Láser	-5dBm a 25dBm
CARACTERÍSTICAS DEL RECEPTOR	
Sensibilidad del Rx	-30 dBm
Factor Q	30 dB
VER	1e-30

2.2.3 Ejecución de la simulación

En los siguientes capítulos, se realizará la ejecución de la simulación y análisis de resultados. En el capítulo 3 se aborda el análisis de los efectos que impone la PMD a cada uno de los formatos de modulación que son el caso de estudio del presente proyecto (NRZ-DQPSK, RZ-DQPSK) además del desempeño del sistema mediante los parámetros de monitoreo óptico (OPM). Para tal fin se propone un plan de pruebas, un proceso de simulación mediante la herramienta Optsim, en donde se podrá realizar una visualización detallada y un análisis de resultados.

2.2.3.1 Plan de pruebas

Para realizar el proceso de simulación se tiene en cuenta los parámetros OPM, tales como: BER y factor Q, establecidos en la recomendación ITU-T G.652 de los cuales sugieren una BER de 1e-9 para un rendimiento aceptable del enlace [71], sin embargo, para el presente trabajo de grado, de acuerdo a los valores mínimos implementados por algunos operadores nacionales, se define una BER de 1e-30 y un factor Q de 30 dB [43]. Con el fin de verificar los casos de estudio definidos en la primera fase de la metodología se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Verificación de la máxima distancia alcanzable (Considerando la DGD máxima permitida).

- Verificación de los efectos de la PMD.
- Verificación del coeficiente PMD máximo alcanzable (Considerando la DGD máxima permitida).
- Verificación de los parámetros de monitoreo óptico OPM.

2.2.4 Análisis de los resultados de la simulación

Como se citó anteriormente, en los diferentes casos de estudio se analizará la máxima distancia alcanzable por el enlace (por tolerancia y desempeño), el efecto de la compensación de CD, el efecto de la PMD, el máximo coeficiente de PMD permitido por tolerancia y los parámetros de desempeño, se tiene en cuenta el cumplimiento de los parámetros recomendados para un rendimiento que permite la optimización de recursos de red, los cuales son una BER = $10e-30$ y Q = 30 dB. En conclusión, para el proceso de simulación se llevarán a cabo los siguientes pasos:

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

En la Figura 2.7 se observa de forma gráfica el algoritmo que contiene los pasos para una correcta simulación, los resultados y el respectivo análisis de estos se desarrollan en capítulos posteriores.

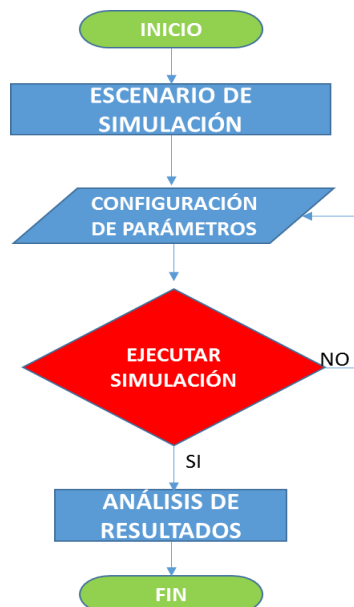


Figura 2.7 Diagrama de flujo del proceso de simulación.

CAPÍTULO 3. SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS FORMATOS DE MODULACIÓN, EL COMPENSADOR PMDC Y SU MITIGACIÓN FRENTE A LA PMD

En el capítulo 1, se estudió el fundamento teórico de los formatos de modulación NRZ-DQPSK y RZ-DQPSK, el compensador PMDC, al igual que las redes DWDM, la caracterización y los efectos de la PMD, en el capítulo 2, se definieron dos escenarios de simulación de los formatos estudiados, cada escenario consta de cuatro casos de estudio, cada uno de estos con sus configuraciones pertinentes.

En el presente capítulo, se desarrolla el proceso de simulación, mediante la herramienta Optsim® de Rsoft descrita en el capítulo 2, enfocando el análisis al efecto lineal: PMD, que afecta el desempeño de las redes DWDM, para cada uno de los casos de estudio, mediante el análisis de los parámetros de desempeño, de acuerdo con la metodología planteada en el capítulo 2.

3.1 Escenario 1: NRZ-DQPSK

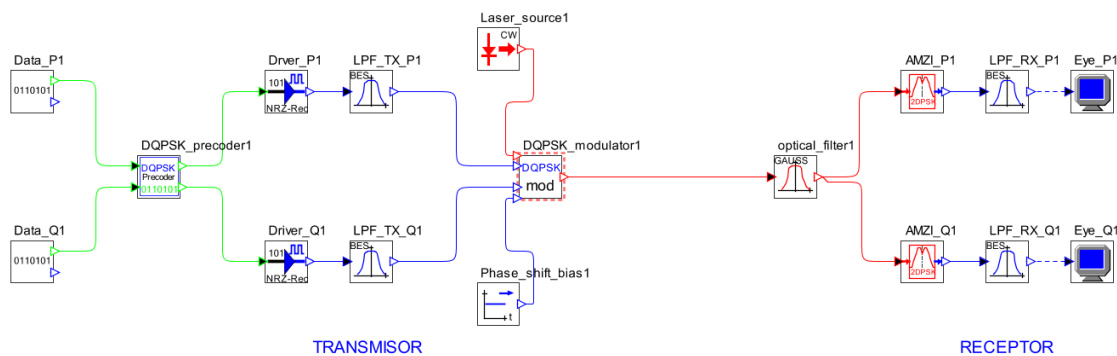


Figura 3.1 Escenario 1, formato de modulación NRZ-DQPSK Back to Back

La figura 3.1, muestra el escenario 1 en la herramienta de simulación OptSim, para el formato de modulación NRZ-DQPSK. Una de las particularidades de la implementación de este formato de modulación es su complejidad y gran cantidad de elementos utilizados tanto en el transmisor como en el receptor. El transmisor requiere: un modulador Mach-Zehnder, un modulador DQPSK, una fuente y un precodificador de datos. En el receptor, los datos primero son filtrados y luego la señal resultante se divide en dos (fase y cuadratura) y se introduce en un par de receptores DPSK, con el fin de realizar la detección de los componentes en fase y cuadratura de la señal DQPSK.

El escenario 1 de modulación se presenta en configuración Back to Back, la cual permite el ajuste de los parámetros tanto del transmisor como del receptor con el fin de comprobar la correcta modulación y demodulación de la señal a transmitir.

En las figuras 3.2 (a) y (b), se aprecian las condiciones iniciales de funcionamiento del formato de modulación NRZ-DQPSK, con respecto al diagrama del ojo y el

espectro óptico alrededor de los 193.5 THz; valor de frecuencia acorde a la recomendación de la ITU-T G.694.1 [7] para redes DWDM a una velocidad de 40 Gbps.

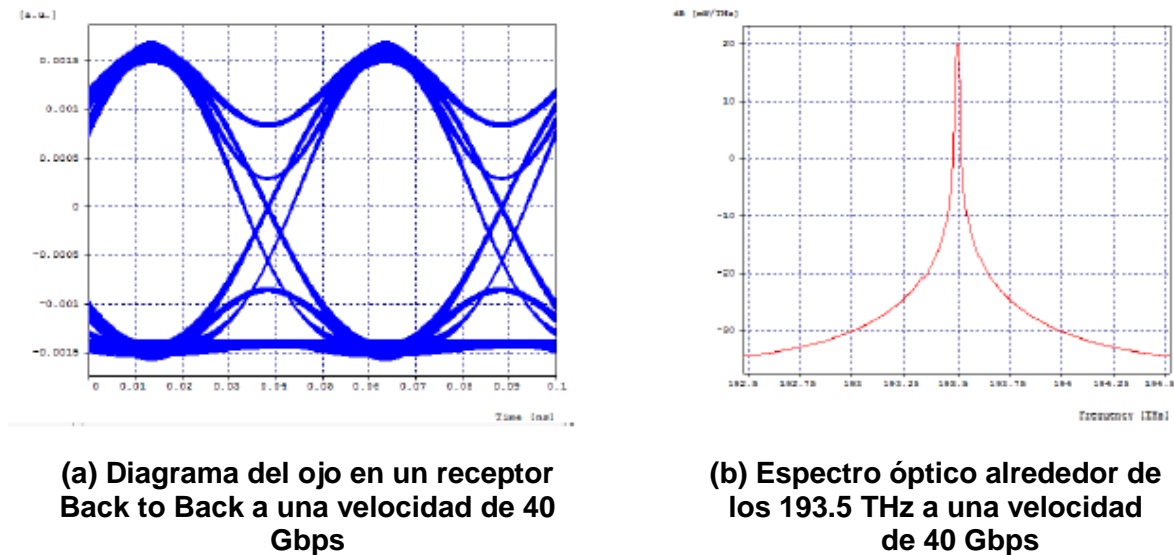


Figura 3.2 Diagrama del Ojo y Espectro Óptico en Configuración Back to Back a 40 Gbps para el formato de modulación NRZ-DQPSK

Una vez se obtienen las señales moduladas correctamente con una velocidad de transmisión fija de 40 Gbps se introduce fibra SMF-28, posteriormente se analiza el comportamiento de cada uno de los 4 casos de estudio evaluando que todos cumplan los parámetros de calidad objetivo y con la recomendación de la ITU-T G.652.

3.1.1 Caso de estudio 1: Variación de la longitud

Se hace el análisis de un sistema WDM con cuatro longitudes de onda diferentes transmitidas sobre una fibra estándar SMF-28, a una velocidad de 40 Gbps, en el que se implementa el formato de modulación NRZ-DQPSK.

La distancia máxima se mide con el fin de conseguir la red de mayor alcance posible, con potencia de transmisión óptima y segmentos de red lo más largos posible, dado que potencias altas de transmisión y segmentos de red muy cortos no son económicamente viables para redes metropolitanas.

Las variaciones se realizan considerando los valores de los parámetros de calidad, BER, factor Q y sensibilidad en el receptor, así como también se fijan los valores de los coeficientes de CD y PMD definidos en el capítulo 2, tabla 2.2.

Para la configuración del sistema se fija el espaciamiento típico entre canales en 100 GHz para redes DWDM MAN/WAN [71] y se varía la distancia del enlace para

diferentes valores de potencia de transmisión (-5 dBm, 0 dBm, 5 dBm, 10 dBm, 15 dBm).

En la Figura 3.3 (Anexo A, Tabla 6)³, se muestran los valores de las distancias máximas alcanzadas, para los diferentes valores de potencia, en un enlace de fibra SMF-28, la línea azul indica los valores que cumplen con los parámetros de calidad objetivo, definidos en la tabla 2.2, mientras que los datos en color rojo corresponden a distancias que cumplen con los parámetros de calidad establecidos en la recomendación ITU-T G.652 (BER y Factor Q).

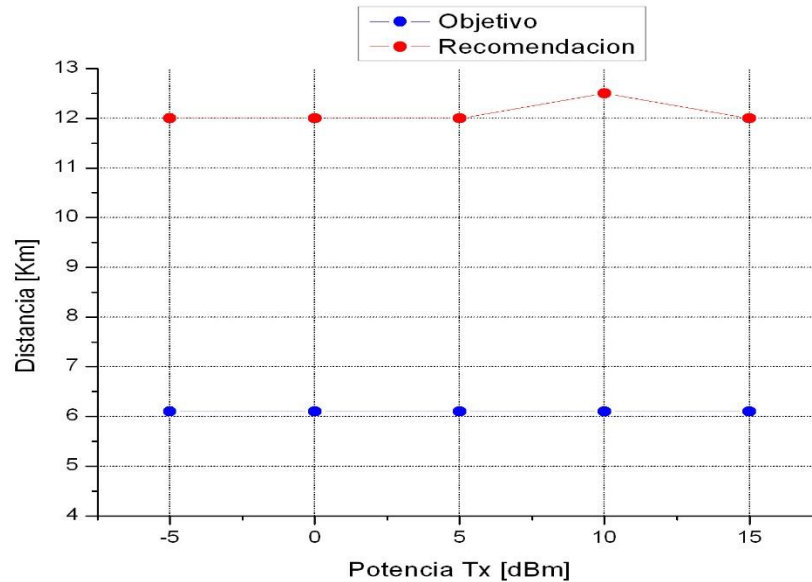


Figura 3.3 Distancia Máxima de red de cuatro canales espaciados entre sí 100 GHz, caso de estudio 1.

Como se puede observar en la figura 3.3, la distancia máxima alcanzada por un segmento de red se mantiene constante alrededor de los 6.1Km al variar la potencia entre los valores -5 a 15 dBm, las mediciones se hicieron para cada valor de potencia variando las distancias entre un intervalo de 5 Km hasta 6.1 Km, el aumento de la longitud mayor a 6.1 Km provoca mayores degradaciones en los parámetros de calidad y por consiguiente no cumplen con los parámetros objetivo.

Adicionalmente se puede apreciar que sin importar el valor de la potencia el alcance máximo es el mismo, de tal manera que, para reducir costos de implementación de equipos, se recomienda utilizar una potencia de 0 dBm, con la que se alcanza una distancia máxima de 6.1 Km.

³ Algunas de las figuras presentadas en el presente trabajo de grado, son resultado de los datos tomados en las simulaciones y que se registran en las tablas de los anexos.

3.1.2 Caso de estudio 2: Compensación de Dispersión Cromática

Para analizar el efecto de la dispersión cromática, se realizan las siguientes mediciones:

- Se determina la máxima tolerancia a la dispersión cromática.
- Se determina el efecto de compensación de dispersión cromática.

3.1.2.1 Máxima tolerancia a la Dispersión Cromática

La máxima tolerancia del formato de modulación a la CD se puede calcular mediante la máxima longitud alcanzada para un Span de fibra y la máxima constante de CD soportada por el sistema, de tal manera que se mantengan los parámetros de calidad objetivos, de la siguiente manera, ecuación (3.1):

$$CD_{max} = L_{max} D_{max} \quad (3.1)$$

donde CD_{max} es la máxima CD total soportada por el sistema, L_{max} es la distancia máxima por Span y D_{max} es la constante de dispersión máxima soportada por el sistema.

Esta medida se realiza para la distancia máxima alcanzada para los diferentes valores de potencia, fijados en -5, 0, 5, 10, 15 dBm, se varía el coeficiente de dispersión cromática de la fibra y se registran los valores encontrados para cada potencia, la línea azul en la Figura 3.4 (Anexo A, tabla 7), muestra la máxima tolerancia a la dispersión cromática.

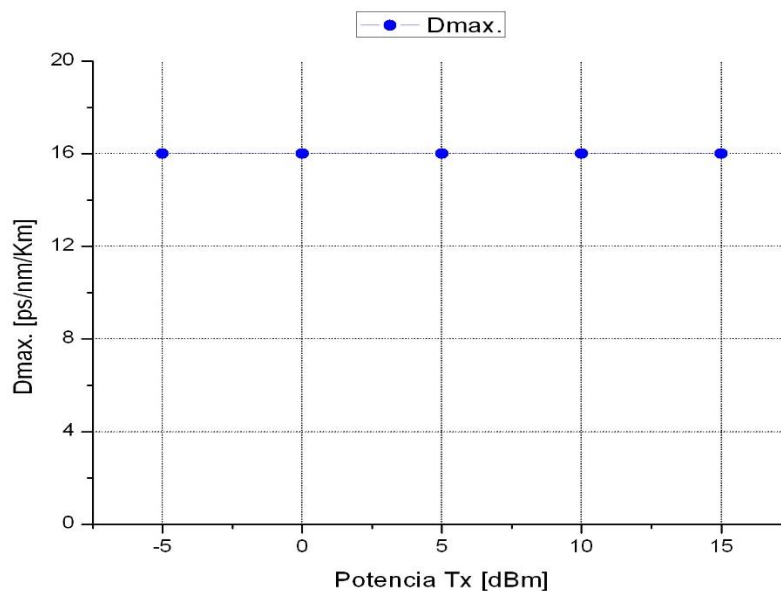


Figura 3.4 Máxima tolerancia a la dispersión cromática

A continuación, para el sistema NRZ-DQPSK, con una velocidad de 40 Gbps operando a una potencia de 0 dBm y a una distancia de 6.1 Km, se puede observar el efecto negativo de la dispersión cromática mediante los diagramas de ojo presentados en las figuras 3.5 (a) y 3.5 (b) obtenidos para los coeficientes de CD de 2 ps/nm.km y 18 ps/nm.km respectivamente.

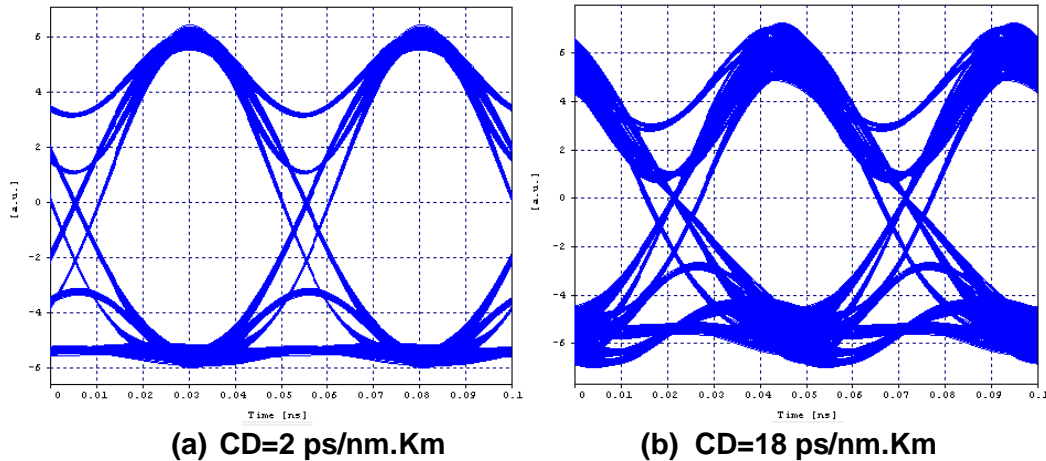


Figura 3.5 Diagrama del ojo con efecto de la Dispersión Cromática

Al variar la dispersión cromática en el sistema de un valor de 2 ps/nm.Km a 18 ps/nm.Km se obtiene un aumento del nivel de la BER de $1e-40$ a $2.57e-24$, y también el factor Q es afectado disminuyendo en 10.24 dB de 30.56 dB a 20.32 dB respectivamente, generando una implicación directa para determinar la máxima tolerancia a la dispersión cromática (Anexo A, tabla 8).

3.1.2.2 Efecto de compensación de Dispersión Cromática

En la Figura 3.6, se muestra el esquemático para 4 canales con modulación NRZ-DQPSK y una pre-compensación en donde la fibra DCF se antepone a la Fibra SMF-28 y la figura 3.7 muestra el esquemático para 4 canales con modulación NRZ-DQPSK para una post-compensación en donde la fibra DCF se implementa después de la Fibra SMF-28.

Para realizar las simulaciones del esquemático de las figuras 3.6 y 3.7 se configuraron las frecuencias de transmisión desde 193.0 THz a 193.3 THz, con un espaciado de 100 GHz, también, se tuvo en cuenta el efecto de la dispersión cromática de 16 ps/nm.Km típico de la fibra utilizada, la longitud del enlace se configuró a 6.1 Km, debido a que esta distancia es la máxima obtenida según la figura 3.3 para cada valor de potencia, además se implementó una fibra mono modo Corning SMF-28, amplificador EDFA, ya que este es el amplificador de fibra dopada más empleado en la actualidad y tiene la posibilidad de amplificar señales en la tercera ventana (1550nm), la configuración de bombeo que se estableció fue Dual, Fibras DCF para compensar la CD y así poder medir con seguridad el efecto de la PMD sobre el formato de modulación y el canal óptico.

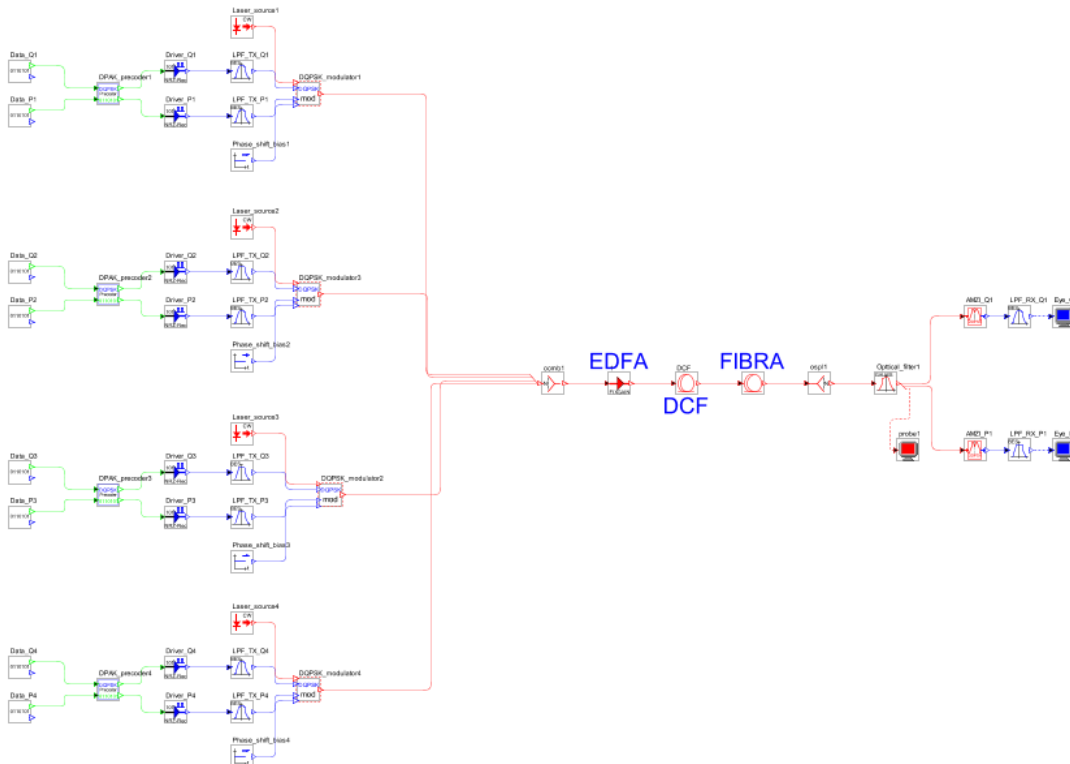


Figura 3.6 Esquemático Escenario 1 NRZ-DQPSK con 4 canales, Pre-compensación con DCF

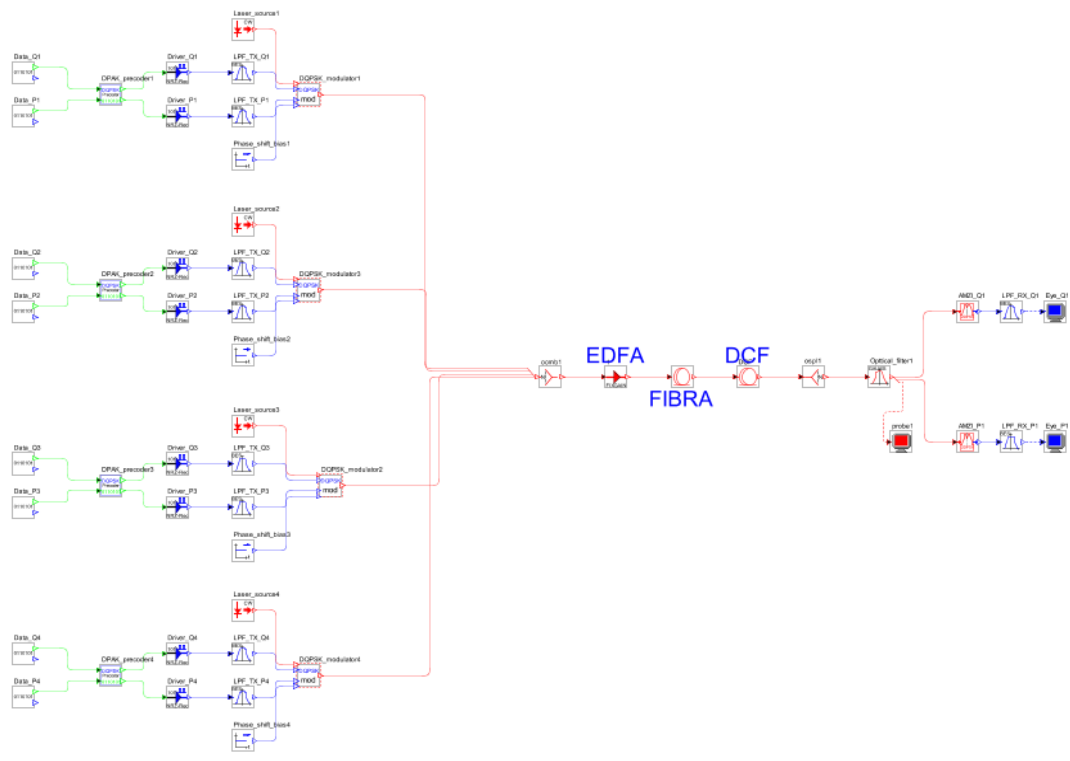


Figura 3.7 Esquemático Escenario 1 NRZ-DQPSK con 4 canales, Post-compensación con DCF

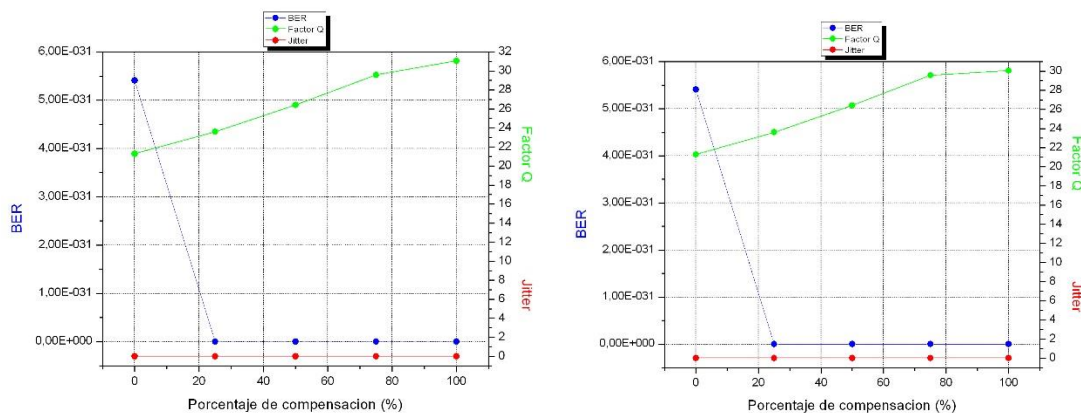
Para determinar el valor de la distancia a utilizar en los tramos de fibra DCF, se utilizó la ecuación (1.7), así, despejando L_2 se obtiene la ecuación(3.2):

$$L_2 = \frac{D_1 L_1}{D_2} \quad (3.2)$$

Donde $D_1 = 16 \text{ ps/nm.Km}$ y $D_2 = 100 \text{ ps/nm.Km}$, valores típicos de las fibras SMF-28 y DCF respectivamente y para una longitud máxima de $L_1 = 6.1 \text{ Km}$ encontrada en el caso de estudio 1, los anteriores valores se reemplazaron en la ecuación (3.3), obteniendo un resultado de $L_2 = 0.976 \text{ Km}$, valor de longitud máxima de DCF asignado para la compensación al 100%. La longitud de la fibra DCF varía entre los valores de 0.732 Km, 0.488 Km, 0.244 Km y 0 Km para 75%, 50%, 25% y 0% de compensación respectivamente.

Con el fin de determinar los efectos de compensar la dispersión cromática para el valor de distancia máxima alcanzada y las diferentes potencias de transmisión (-5, 0, 5, 10 y 15 dBm), se procede a realizar compensación al 100, 75, 50, 25 y 0%, mediante las técnicas de pre-compensación (a) y post-compensación (b), los valores medidos de BER, Factor Q y Jitter se registran desde la figura 3.8 (a), (b) a la figura 3.12 (a) (b), (Anexo A, tablas 13 (a), (b) a 17 (a), (b)).

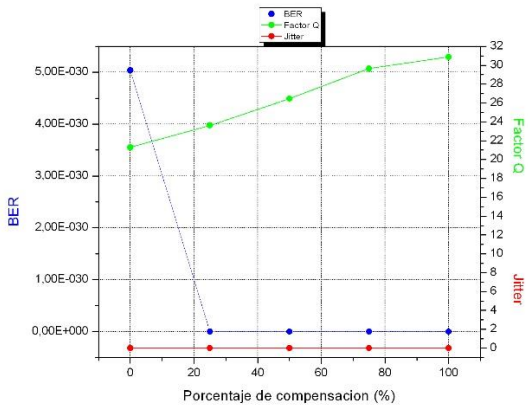
El efecto de compensar, se ve reflejado en una mejora de los parámetros de calidad para cada una de las potencias, como se observan en las gráficas 3.8 a 3.12. En ellas se puede analizar que a partir del 25% de compensación de CD el factor Q aumenta a medida que incrementa la potencia alcanzando el valor objetivo alrededor de 30 dB cuando se compensa al 100%, mientras que el BER tiende a estabilizarse a partir del 25% y se mantiene constante hasta una compensación del 100%, por otro lado, el Jitter no presenta cambio alguno y permanece invariable en todo el intervalo de compensación.



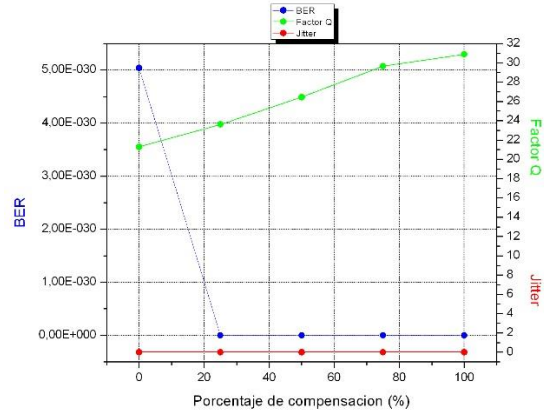
(a) Pre-compensación para una distancia de 6.1 Km

(b) Post-compensación para una distancia de 6.1 Km

Figura 3.8 Efecto de compensación de la dispersión cromática para una potencia de -5 dBm

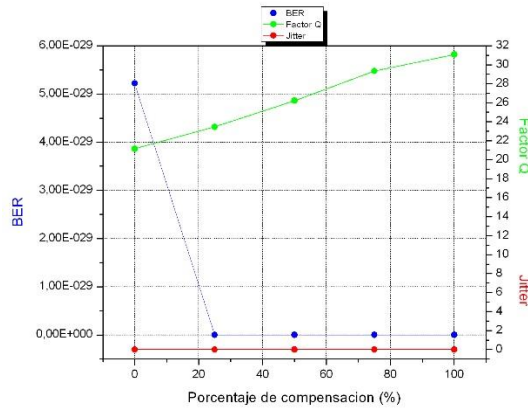


(a) Pre-compensación para una distancia de 6.1 Km

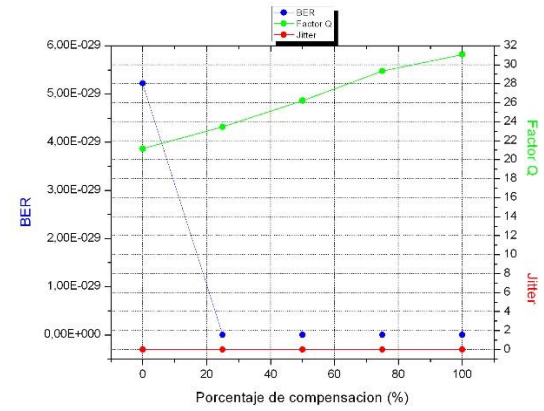


(b) Post-compensación para una distancia de 6.1 Km

Figura 3.9 Efecto de compensación de la dispersión cromática para una potencia de 0 dBm

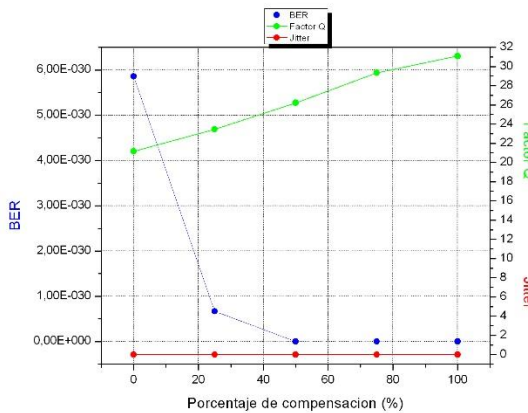


(a) Pre-compensación para una distancia de 6.1 Km

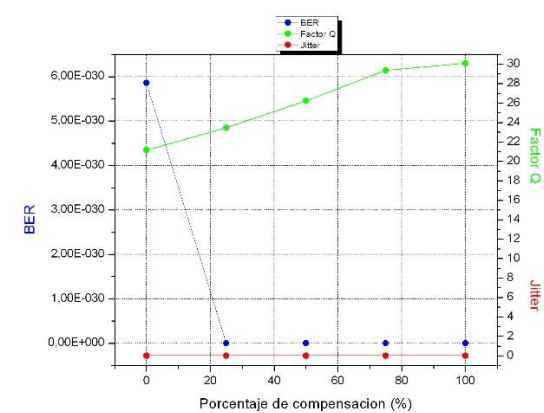


(b) Post-compensación para una distancia de 6.1 Km

Figura 3.10 Efecto de compensación de la dispersión cromática para una potencia de 5dBm

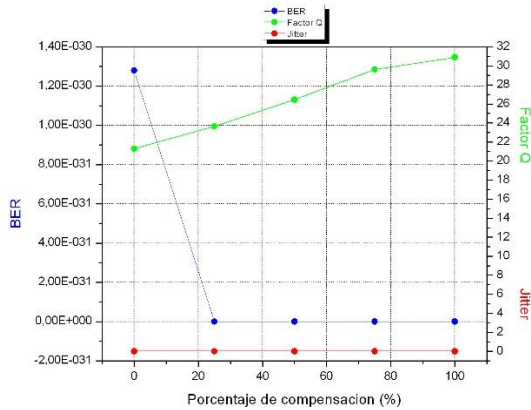


(a) Pre-compensación para una distancia de 6.1 Km

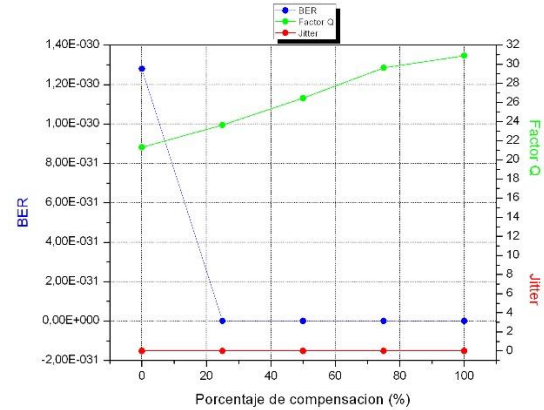


(b) Post-compensación para una distancia de 6.1 Km

Figura 3.11 Efecto de compensación de la dispersión cromática para una potencia de 10dBm



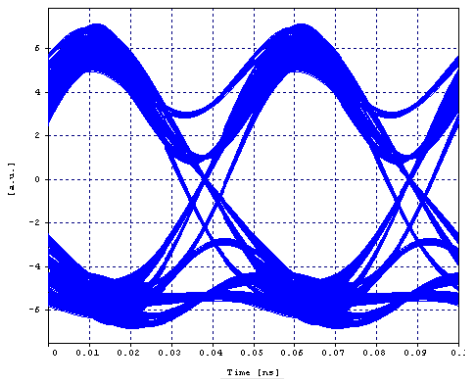
(a) Pre-compensación para una distancia de 6.1 Km



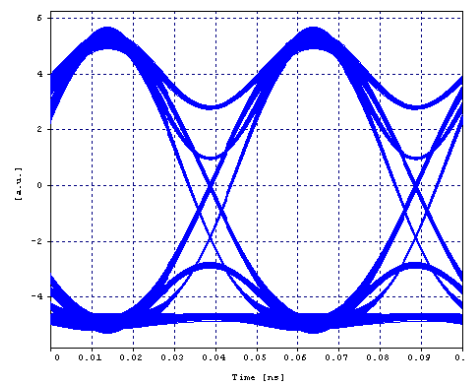
(b) Post-compensación para una distancia de 6.1 Km

Figura 3.12 Efecto de compensación de la dispersión cromática para una potencia de 15dBm

Como puede apreciarse en la figura 3.13 (a) sin compensación de la CD y figura 3.13 (b) compensación de la CD al 100 %, donde se hace evidente la mejora introducida al sistema al realizar compensación de la dispersión mediante el uso de fibra compensadora de dispersión DCF y con una potencia en el transmisor de 15 dBm para 6.1Km.



a) Sin compensación de la CD



b) Compensación de la CD al 100%

Figura 3.13 Diagrama del ojo para el formato de modulación NRZ-DQPSK para una distancia de 6.1 Km a 40Gbps

Debido a que las mejoras de los parámetros de calidad son significativas después de realizar compensación, se concluye que la dispersión cromática degrada considerablemente el desempeño de la red y realizar compensación es fundamental para mejorar su rendimiento, por lo tanto, el formato NRZ-DQPSK a 40 Gbps, presenta una baja tolerancia ante el efecto lineal de dispersión cromática y realizar compensación es primordial para mejorar su rendimiento.

Los procesos de pre y post-compensación mostrados en las figuras 3.8 a 3.12 no aseguran cuál de los dos fue el de mejor desempeño ya que los parámetros de calidad fueron prácticamente equivalentes entre ellos, de esta manera se obtienen buenos resultados de los parámetros de desempeño compensando así la CD con cualquiera de las dos técnicas.

3.1.3 Caso de estudio 3: Variación coeficiente PMD

La Dispersión por Modo de Polarización es una limitante en los sistemas de transmisión por fibra óptica de alta velocidad (≥ 10 Gbps) y de larga distancia, debido a que ensancha y distorsiona los pulsos cuando componentes ortogonales de polarización se propagan a distintas velocidades.

Una vez compensada la CD en el caso de estudio 2 se asegura que la dispersión presente en la fibra se debe solo a la PMD, de esta manera se procede a examinar si el formato de modulación en cuestión es un buen candidato para mitigar la PMD y para esto se necesita saber cuál es la máxima tolerancia de PMD el cual puede resistir el enlace.

Teniendo en cuenta la configuración esquemática de la figura 3.7 y con el fin de determinar cuál es la máxima tolerancia del formato de modulación NRZ-DQPSK frente a esta degradación lineal, se realizan variaciones cercanas al valor típico (del orden de $0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$), del parámetro PMD para las fibras SMF-28 que oscila entre 0 y $1 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$, hasta conseguir un valor límite que cumpla con los parámetros de calidad objetivo, adicionalmente se tomaron valores mayores con el fin de verificar el comportamiento del sistema ante estas variaciones, los resultados se muestran en las figuras 3.14 a 3.18 (Anexo A, tablas 18 a 22).

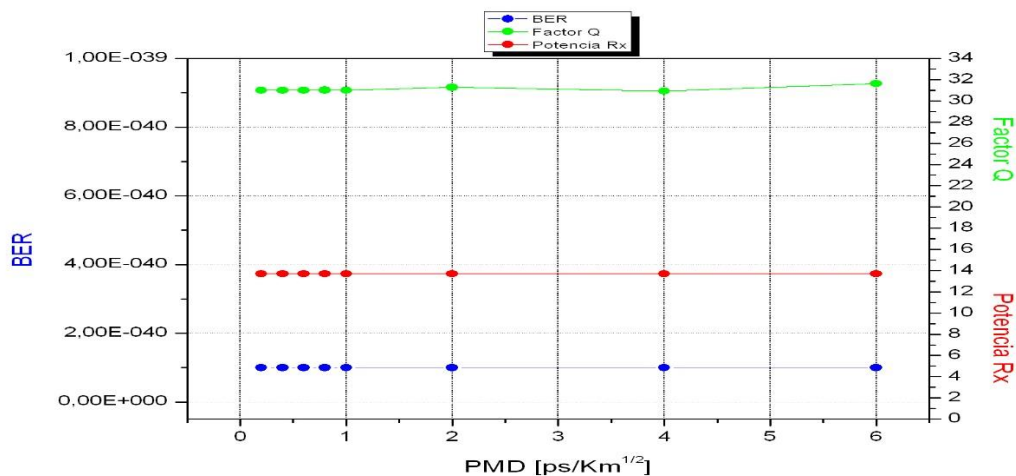


Figura 3.14 PMD para una potencia de -5 dBm y una distancia de 6.1 Km

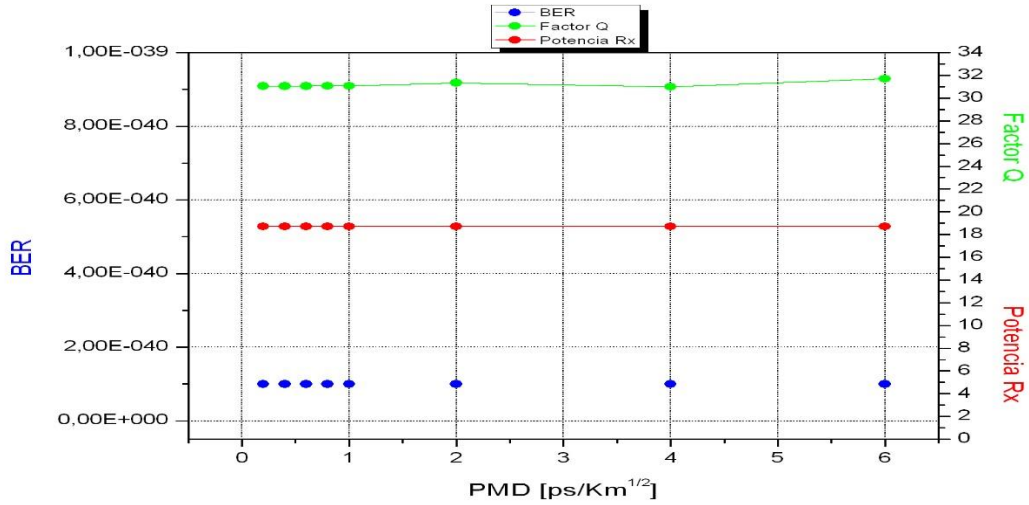


Figura 3.15 PMD para una potencia de 0 dBm y una distancia de 6.1 Km

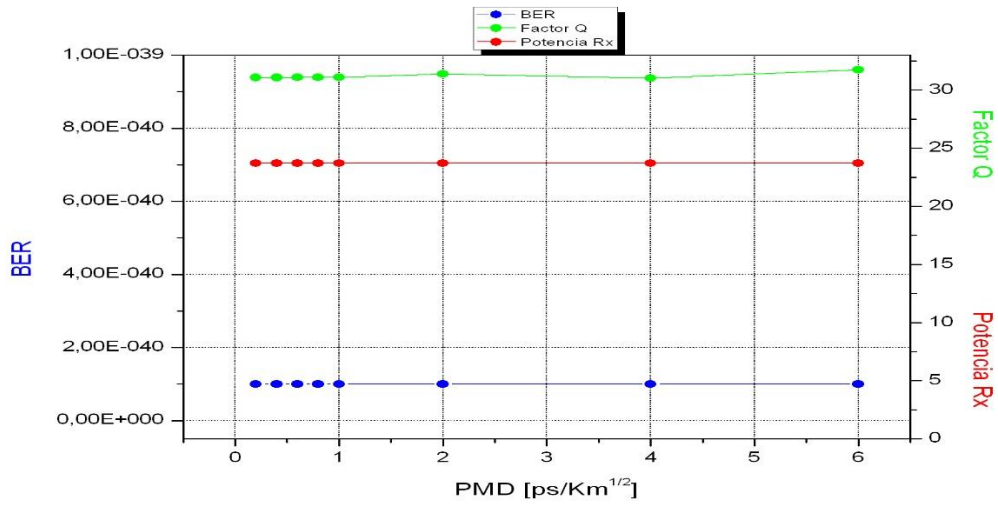


Figura 3.16 PMD para una potencia de 5 dBm y una distancia de 6.1 Km

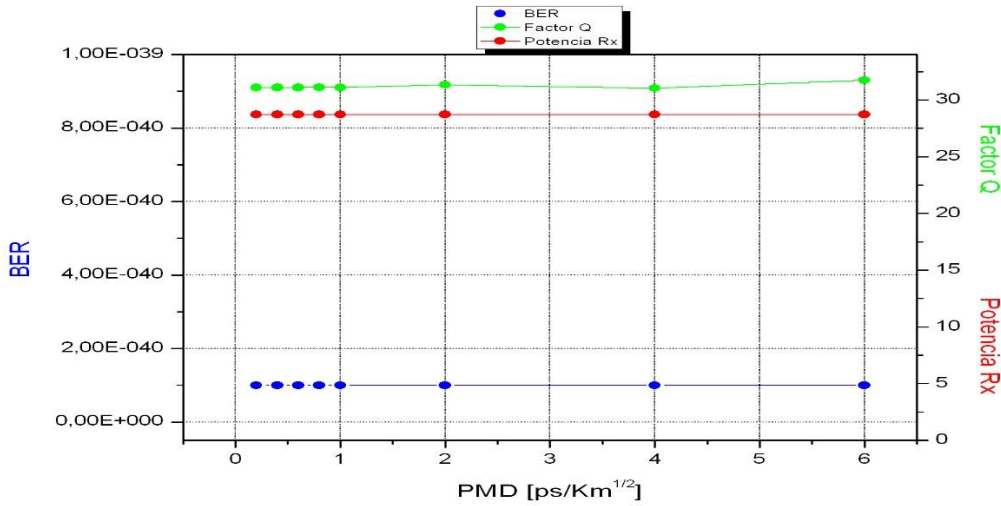


Figura 3.17 PMD para una potencia de 10 dBm y una distancia de 6.1 Km

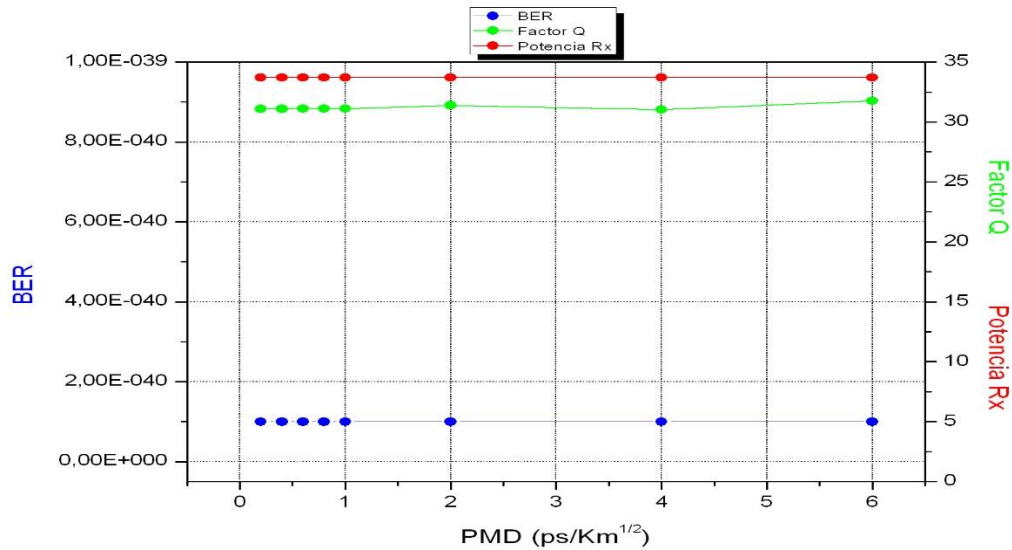


Figura 3.18 PMD para una potencia de 15 dBm y una distancia de 6.1 Km

Como se puede observar en las figuras 3.14 a 3.18, los parámetros de monitoreo óptico no cambian de manera significativa ante el aumento de la PMD dentro de los valores típicos, es más, en el intervalo de 0 a 1 ps/km^{1/2} que es en donde se encuentra el valor representativo de la fibra SMF-28 igual a 0.2 ps/km^{1/2} los parámetros permanecieron prácticamente constantes. Además, el formato sobrepasa este intervalo siendo casi insignificante la variación de los parámetros hasta el valor de PMD igual 6 ps/km^{1/2}, una vez se exceda este valor los parámetros empiezan degradarse (Anexo A, tablas 18 a 22), tal como se comprueba con el diagrama de la figura 3.19, por lo tanto, se puede concluir que el formato de modulación NRZ-DQPSK a 40 Gbps, es altamente tolerante ante el efecto lineal PMD.

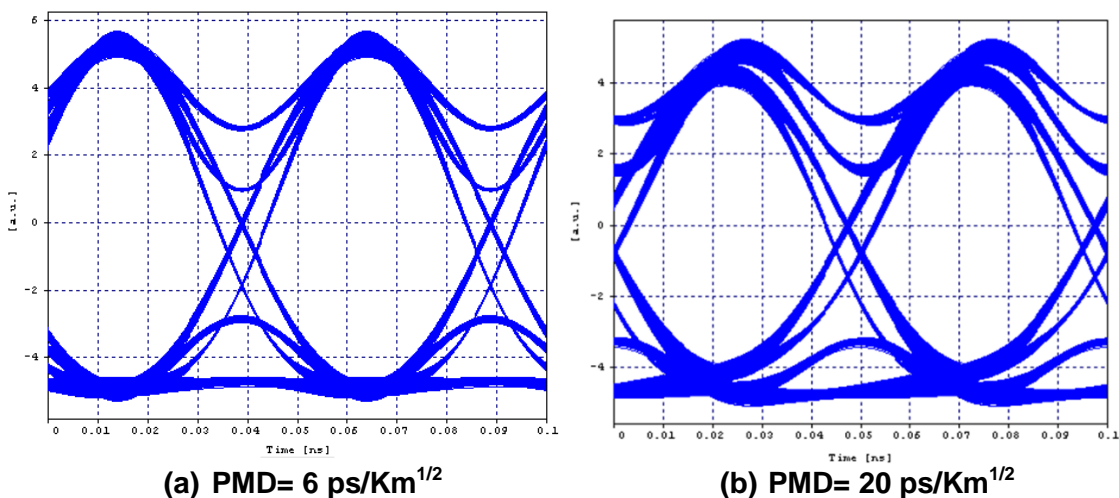


Figura 3.19 Diagrama del ojo para el formato de modulación NRZ-DQPSK para una distancia de 6.1 Km a 40Gbps

3.1.4 Caso de estudio 4: Aplicación del compensador PMDC

La implementación de un módulo compensador de PMD es muy importante para el desempeño de una red óptica, ya que permite regenerar la señal de datos transmitida, dando como resultado una mejora en la recepción de estos, los cuales sufren degradaciones al viajar por el medio de transmisión. Por tanto, surge la necesidad de aplicar un módulo capaz de compensar este fenómeno.

3.1.4.1 Análisis del compensador PMDC basado en estructuras MZI

El módulo compensador de PMD está basado en estructuras MZI, un dispositivo de alto rendimiento (alta velocidad de procesamiento de datos, bajas pérdidas de inserción, alta relación de extinción, y fácil producción) en cuanto a efectos de dispersión se refiere y así lo describen algunos autores en sus trabajos [57], [73], [72], [74], [75].

La herramienta de simulación brinda una gama de dispositivos Mach Zehnder electro-ópticos, con los cuales se realizan pruebas para determinar su rendimiento, analizando sus espectros ópticos, tomando los valores por defecto de cada uno de ellos, ver Figura 3.20 y Tabla 3.1.

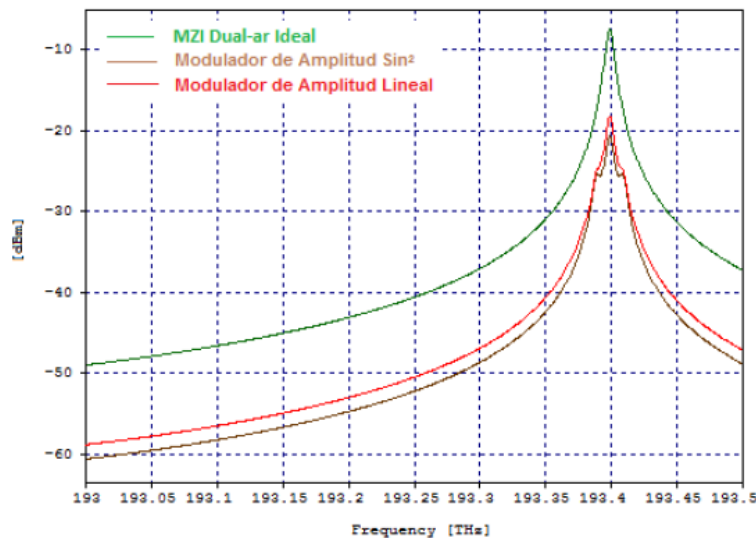


Figura 3.20 Comparación de espectros ópticos de los dispositivos Mach Zehnder [57].

Tabla 3.1 Comparación y elección del MZI de mayor rendimiento

Dispositivo	Potencia [dBm]	OSNR [dB]
Modulador de Amplitud Sin ²	-18.8210	40.3796
Modulador de Amplitud Lineal	-17.0578	41.0580
MZI Dual-arm Ideal	-8.23291	42.0769

Claramente, se observa en la Tabla 3.1 y en la Figura 3.20, que el MZI Dual-arm Ideal es el que mejor rendimiento presenta respecto a los demás, por su amplitud en la señal, mayor OSNR, potencia y por ser el pulso óptico un poco más delgado. Por tanto, el dispositivo a utilizar en el transcurso de esta sección, será el MZI Dual-arm Ideal, que además presenta un fácil manejo dado su configuración, como se puede observar en la Figura 3.21

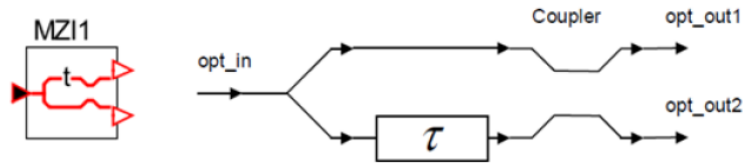


Figura 3.21 Bloque MZI Dual-arm Ideal y estructura interna [76]

3.1.4.2 Funcionamiento en Simulación del Dispositivo MZI Dual-arm Ideal

Para el diseño del módulo que se requiere, se hace necesario primero que todo observar en la herramienta de simulación el comportamiento del MZI Dual-arm Ideal en un sistema Back to Back, ver Figura 3.22.

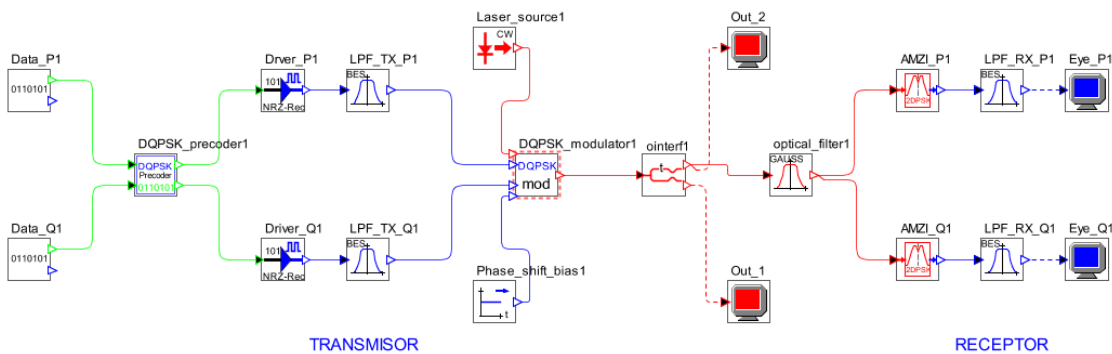


Figura 3.22 Configuración esquemática del MZI Dual-arm Ideal en el sistema NRZ-DQPSK Back to Back

Los resultados arrojados por la simulación de la configuración de la figura 3.22 se muestran en la tabla 3.2:

Tabla 3.2 Resultados del espectro óptico de las dos ramas del MZI

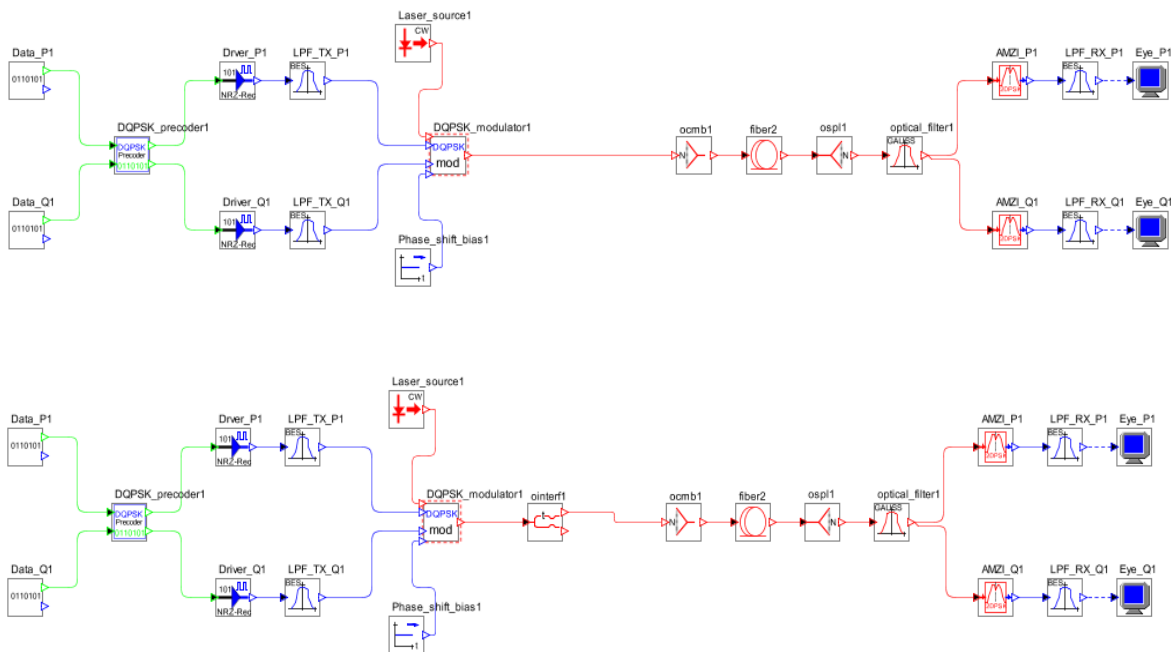
	Potencia [dBm]	OSNR [dB]
Salida 1	-21.4365	28.1194
Salida 2	-10.7672	29.3534

Claramente la tabla 3.2 nos muestra que la salida 2 del MZI tiene mayor potencia y mayor OSNR, por lo tanto, se demuestra que una de las salidas tiene mayor señal y será la que se utilice de aquí en adelante

3.1.4.3 Módulo Compensador de PMD

El Módulo, se configura en base a pruebas simuladas en la herramienta OptSim™ de Synopsys, debido a que la literatura referente al dispositivo MZI Dual-arm Ideal no presenta información clara acerca de las expresiones matemáticas para realizar el cálculo de las potencias en las salidas del mismo, las cuales son fundamentales, por lo tanto, para lograr el fin que se requiere fue muy útil la información brindada en los documentos [72], [74], [77], [78] para iniciar con el análisis del dispositivo, ya que muestran las ventajas que este posee a la hora de compensar el fenómeno de dispersión haciendo uso de arreglos en cascada y a nivel de simulación.

Primero que todo se toma como referencia el sistema mostrado en la Figura 3.1. Luego, ubicamos los diferentes arreglos que se pueden realizar con el MZI Dual-arm Ideal en la parte de transmisión “pre-compensación” (dado que se tiene hasta ahí, una red pura y sin degradaciones de la señal, lo que permite observar mejor el comportamiento del módulo compensador) para realizar la comparación entre ellos y así determinar cuál presenta el mejor desempeño en la red, ver Figura 3.23.



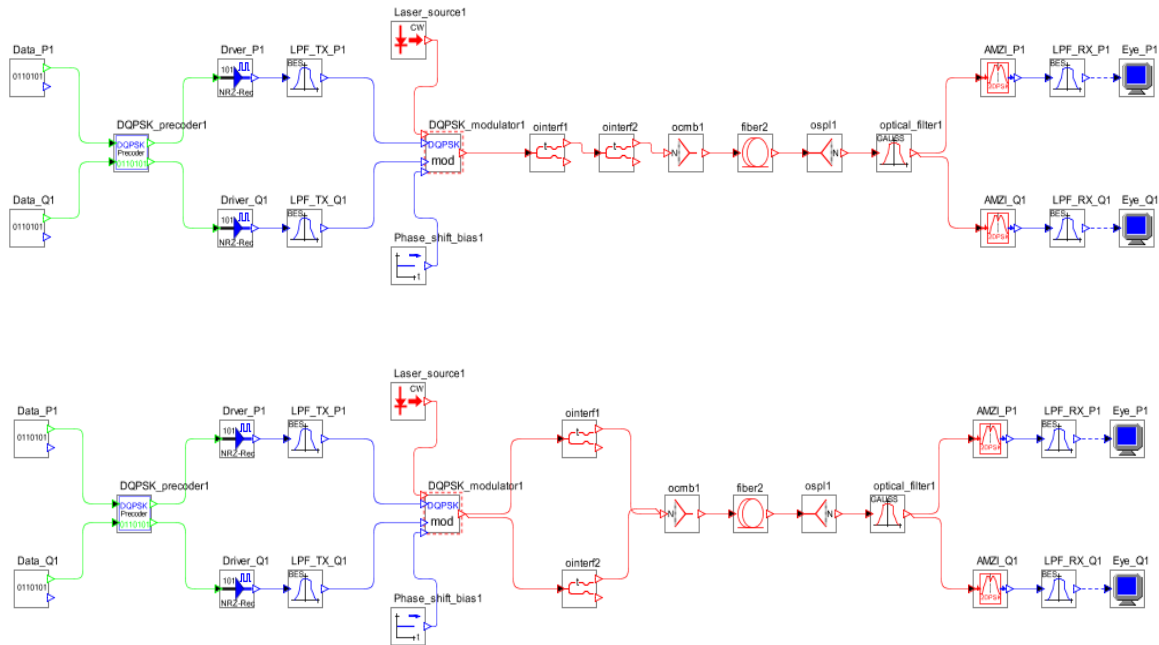
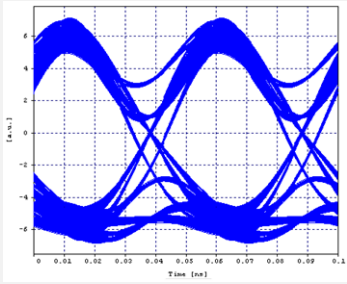
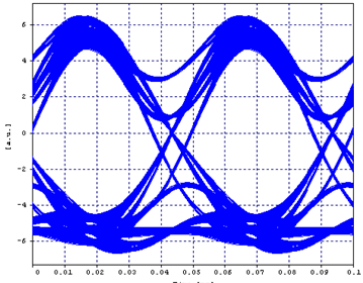
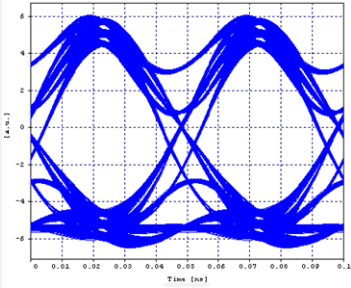
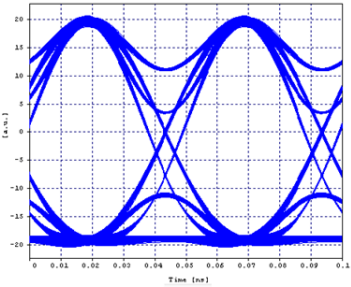


Figura 3.23 Escenario para cada arreglo MZI Dual-arm Ideal en pre-compensación

En la Tabla 3.3, se muestran los resultados de los diferentes arreglos realizados con el MZI Dual-arm Ideal.

Tabla 3.3 Comparación entre los arreglos MZI Dual-arm Ideal

Configuración de red a 6.1 km (como prueba)	Diagrama del Ojo	Parámetros
Sin módulo compensador		<p>BER= 6.96e-30 Factor Q= 21.23dB</p>
1 MZI Dual-arm Ideal		<p>BER= 8.6e-33 Factor Q= 21.64dB</p>

<p>Arreglo serie (2 MZI Dual-arm Ideal)</p>		<p>BER= 5.59e-34 Factor Q= 21.69dB</p>
<p>Arreglo paralelo (2 MZI Dual-arm Ideal)</p>		<p>BER= 1e-40 Factor Q= 36.16dB</p>

Se puede apreciar claramente en la Tabla 3.3, que al utilizar un arreglo en paralelo mejora considerablemente la BER y el Factor Q respecto a los otros arreglos (también se puede observar la mejora en los diagramas de ojo), por lo que se elige esta configuración para el esquema del módulo compensador de PMD. Presenta una gran ventaja en la implementación, ya que puede ser sintonizado con una sola tensión de control, debido a que los MZI trabajan en forma paralela y con los mismos parámetros, lo que permite tener circuitos de excitación menos complejos y también un consumo de energía más bajo [52].

3.1.4.4 Análisis de la PMD utilizando el compensador PMDC

En esta sección se implementará el compensador PMDC conformado por un arreglo en paralelo de 2 MZI Dual –arm Ideal, tal como se demostró en la sección anterior en la cual se evidenció que fue la configuración que arrojó los mejores resultados.

Continuando con el proceso y teniendo en cuenta de cada uno de los resultados presentados en los casos de estudio anteriores se aplica el compensador PMDC a la configuración de la figura 3.7, en donde se tiene una distancia máxima de 6.1Km, además compensa la CD al 100% y es tolerante a una PMD = 6 ps/Km^{1/2} demostrado con parámetros de calidad equivalentes a los parámetros objetivo.

La figura 3.24, muestra la configuración esquemática del formato NRZ-DQPSK para 4 canales con post-compensación de CD e implementando el compensador PMDC para cada canal en el transmisor.

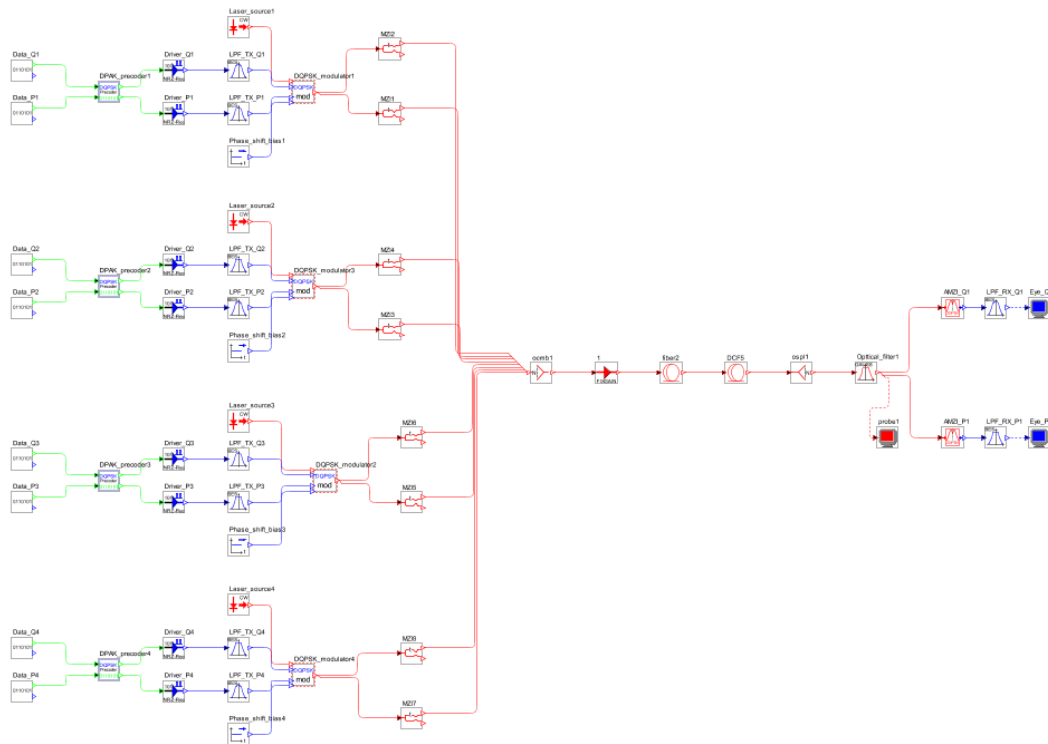


Figura 3.24 Escenario de simulación NRZ-DQPSK para 4 canales, 6,1Km de longitud, Post-compensación con DCF y compensador PMDC

Los resultados arrojados por la simulación de la figura 3.24 se pueden observar en la figura 3.25:

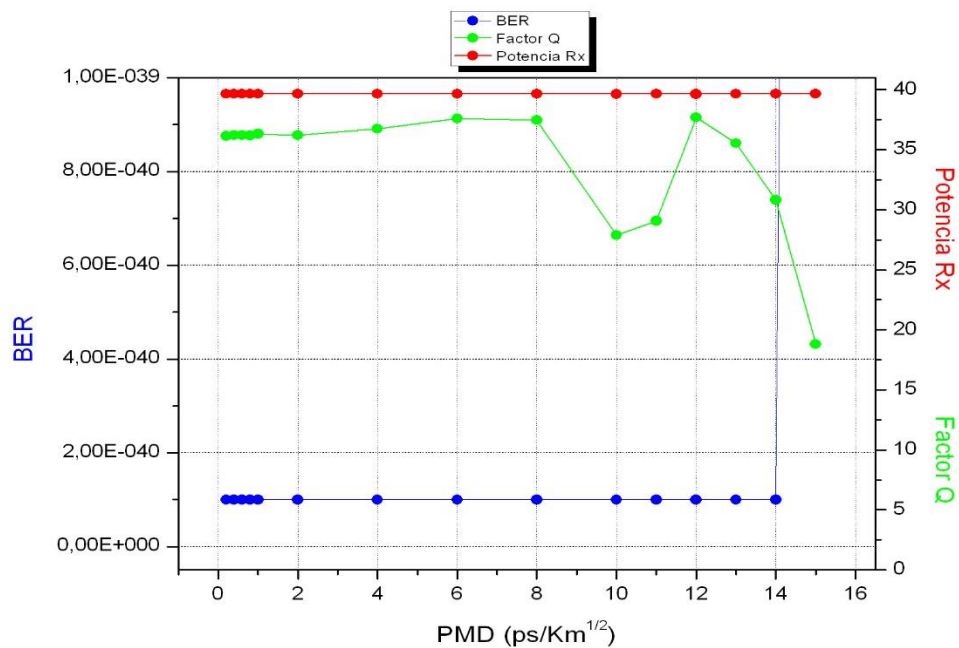


Figura 3.25 Variación PMD para el formato NRZ-DQPSK con compensador PMDC

Según los resultados mostrados en la figura 3.25, el valor de la PMD alcanzó un máximo de $14 \text{ ps/Km}^{1/2}$ en donde los parámetros se mantuvieron aproximadamente constantes dentro de los parámetros de calidad objetivo. A partir de dicho valor el factor Q empieza a degradarse llegando a un valor aproximado de 19 dB a $15 \text{ ps/Km}^{1/2}$, de igual manera el BER se dispara alcanzando un valor de $1.08\text{e-}17$ a $15 \text{ ps/Km}^{1/2}$ (este punto no se aprecia en la gráfica debido a que si se cambia el intervalo de los ejes no se apreciaba adecuadamente la información de los demás parámetros), valores que no cumplen con los parámetros de calidad objetivo. En la figura 3.26 se muestra la degradación que sufre el sistema de transmisión cuando la PMD excede los $14 \text{ ps/Km}^{1/2}$. Ver (Anexo A, tabla 23).

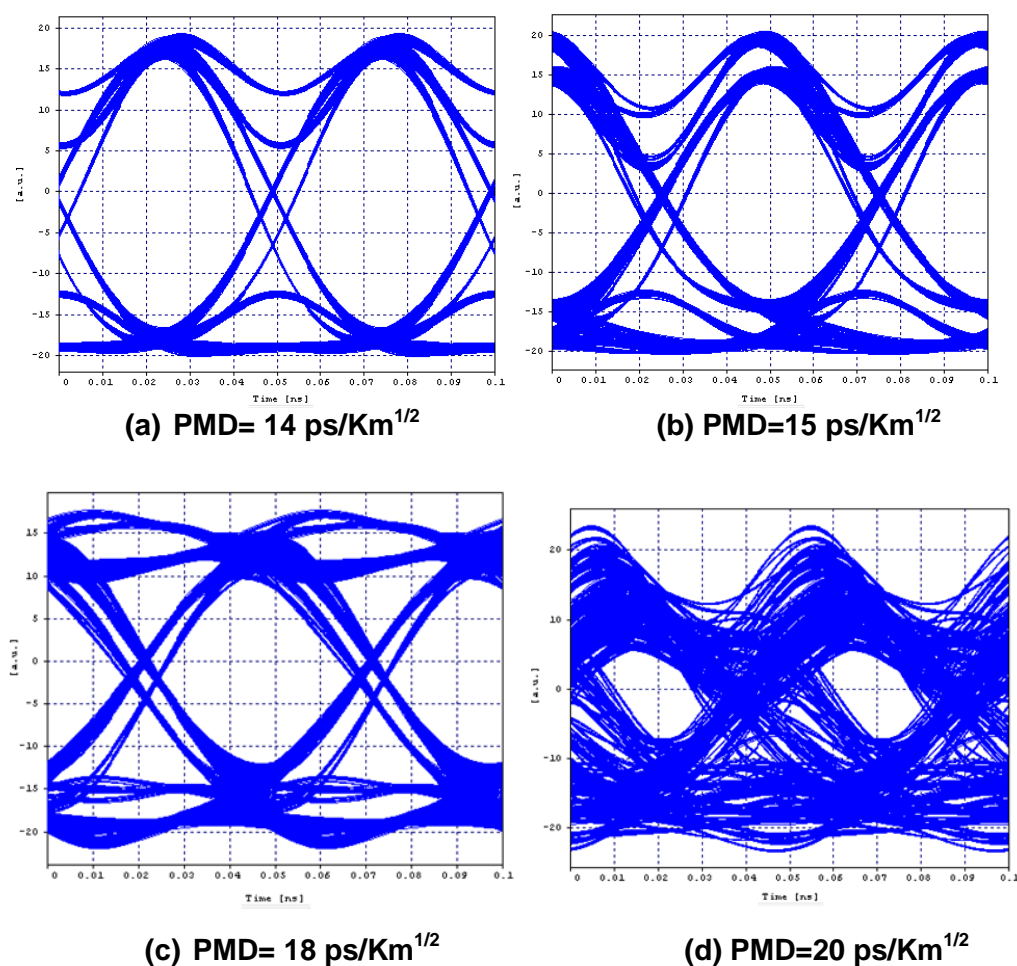


Figura 3.26 Degradación de Diagrama del Ojo para el formato NRZ-DQPSK con compensador PMDC

En la figura 3.26, los parámetros de calidad se ven afectados negativamente una vez la PMD sobrepasa el valor máximo, degradando simultáneamente el Diagrama del Ojo.

En conclusión, se puede decir que el compensador PMDC aplicado al formato de modulación NRZ-DQPSK a 40 Gbps en post-compensación con DCF al 100% mitiga la PMD de manera satisfactoria hasta los $14 \text{ ps/Km}^{1/2}$, aumentando el desempeño del formato en cuestión. Comparando con los resultados obtenidos de la figura 3.7 antes de implementar el compensador, ésta nos arroja una tolerancia de PMD máxima igual a $6 \text{ ps/Km}^{1/2}$, inferior al de la figura 3.24 con compensador PMDC. La tolerancia de PMD máxima del formato NRZ-DQPSK con el compensador PMDC supera aproximadamente en el 135% de la tolerancia del formato sin el compensador, manteniendo una relación equivalente del doble de una respecto a la otra.

3.2 ESCENARIO 2: FORMATO DE MODULACIÓN RZ-DQPSK

El escenario 2 de modulación se presenta en configuración Back to Back, la cual permite el ajuste de los parámetros tanto del transmisor como del receptor con el fin de comprobar la correcta modulación y demodulación de la señal a transmitir.

La figura 3.27, muestra el escenario 2 en la herramienta de simulación OptSim, para el formato de modulación RZ-DQPSK. Una de las particularidades de la implementación de este formato de modulación es su complejidad y gran cantidad de elementos utilizados tanto en el transmisor como en el receptor. El transmisor requiere: un modulador Mach-Zehnder con un pulso carver para el patrón de código de línea, un modulador DQPSK, una fuente y un precodificador de datos. En el receptor, los datos primero son filtrados y luego la señal resultante se divide en dos (fase y cuadratura) y se introduce en un par de receptores DPSK, con el fin de realizar la detección de los componentes en fase y cuadratura de la señal DQPSK.

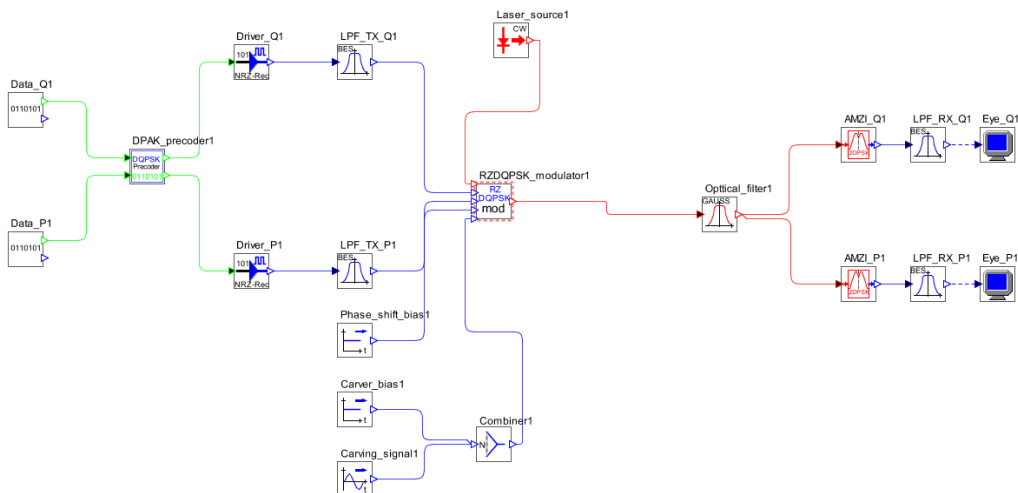
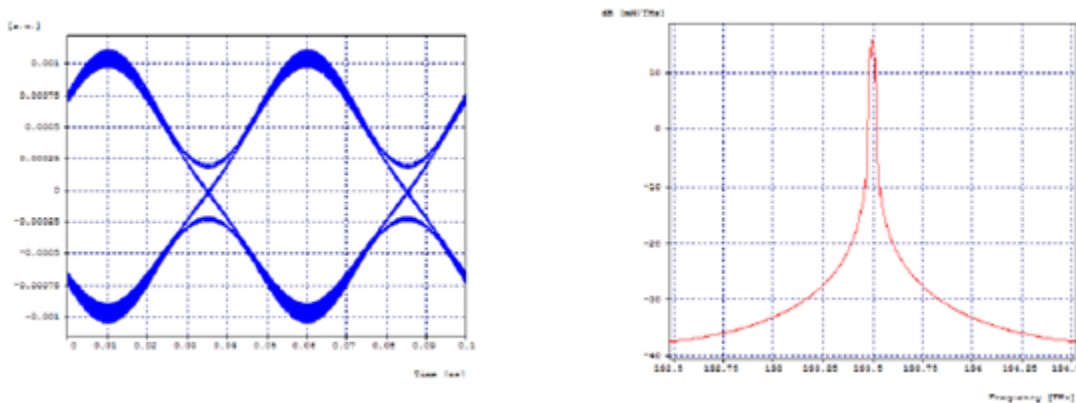


Figura 3.27 Escenario 2, formato de modulación RZ-DQPSK Back to Back

En las figuras 3.28 (a) y (b), se aprecian las condiciones iniciales de funcionamiento del formato de modulación RZ-DQPSK, con respecto al diagrama

del ojo y el espectro óptico alrededor de los 193.5 THz; valor de frecuencia acorde a la recomendación de la ITU-T G.694.1 [7] para redes DWDM a una velocidad de 40 Gbps.



(a) Diagrama del ojo en un receptor Back to Back velocidad 40 Gbps

(b) Espectro óptico alrededor de los 193.5THz velocidad 40 Gbps

Figura 3.28 Diagrama del Ojo y Espectro Óptico en Configuración Back to Back a 40 Gbps para el formato de modulación RZ-DQPSK

Una vez se obtienen las señales moduladas correctamente, se introduce la fibra SMF-28 y se fija la velocidad de transmisión en 40 Gbps, posteriormente se analiza el comportamiento de cada uno de los 4 casos de estudio evaluando que todos cumplan los parámetros de calidad objetivo y con la recomendación de la ITU-T G.652.

3.2.1 Caso de estudio 1: Variación de la longitud

Se hace el análisis de un sistema WDM con cuatro longitudes de onda diferentes transmitidas sobre una fibra estándar SMF-28, a una velocidad de 40Gbps, en el que se implementa el formato de modulación RZ-DQPSK.

La distancia máxima se mide con el fin de conseguir la red de mayor alcance posible, con potencia de transmisión óptima y segmentos de red lo más largos posible, dado que potencias altas de transmisión y segmentos de red muy cortos no son económicamente viables para redes metropolitanas.

Las variaciones se realizan considerando los valores de los parámetros de calidad, BER, factor Q y sensibilidad en el receptor definidos en el capítulo 2, tabla 2.2.

Para la configuración del sistema se fija el espaciamento típico entre canales en 100 GHz para redes DWDM MAN/WAN [73] y se varía la distancia del enlace para diferentes valores de potencia de transmisión (-5 dBm, 0 dBm, 5 dBm, 10 dBm, 15 dBm).

En la Figura 3.29 (Anexo B, Tabla 7), se muestran los valores de las distancias máximas alcanzadas, para los diferentes valores de potencia, en un enlace de

fibra SMF-28, la línea azul indica los valores que cumplen con los parámetros de calidad objetivo, definidos en la tabla 2.2, mientras que los datos en color rojo corresponden a distancias que cumplen con los parámetros de calidad establecidos en la recomendación ITU-T G.652 (BER y Factor Q).

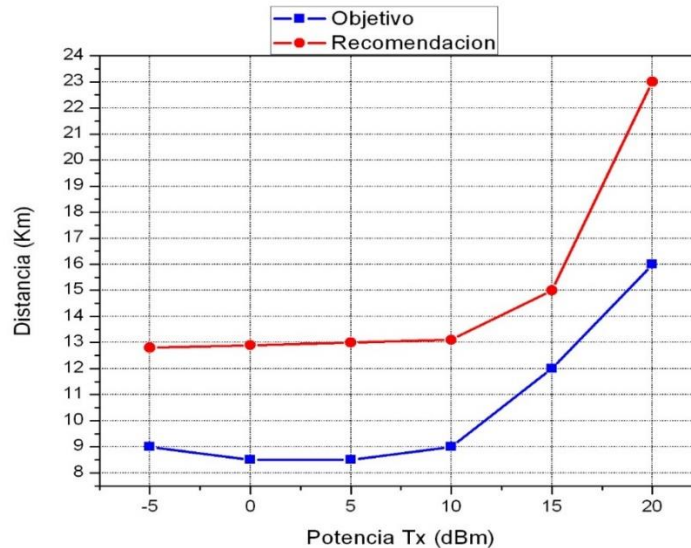


Figura 3.29 Distancia Máxima de red de cuatro canales espaciados entre sí 100 GHz, caso de estudio 1.

Como se puede observar en la figura 3.29, la distancia máxima alcanzada por un segmento aumenta a medida que se incrementa la potencia de transmisión, sin embargo, alcanzar una distancia de 16 Km a una potencia de 20 dBm no es económicamente viable, además, para distancias superiores a los 23 Km los parámetros de calidad se degradan considerablemente.

Con estos resultados se concluye que el formato RZ-DQPSK comparado con el formato NRZ-DQPSK alcanza una mayor distancia a una potencia máxima de transmisión igual a 15dBm a velocidad de 40Gbps, manteniendo una relación del doble de longitud entre ellas.

3.2.2 Caso de estudio 2: Compensación de Dispersión Cromática

Para analizar el efecto de la dispersión cromática, se realizan las siguientes mediciones:

- Se determina la máxima tolerancia a la dispersión cromática.
- Se determina el efecto de compensación de dispersión cromática.

3.2.2.1 Máxima tolerancia a la Dispersión Cromática

Esta medida se realiza para la distancia máxima alcanzada para los diferentes valores de potencia, fijándolos en -5, 0, 5, 10, 15 dBm, se varía el coeficiente de

dispersión cromática de la fibra y se registran los valores encontrados para cada potencia, la línea azul en la figura 3.30 (Anexo B, tabla 8), muestra la máxima tolerancia a la dispersión cromática.

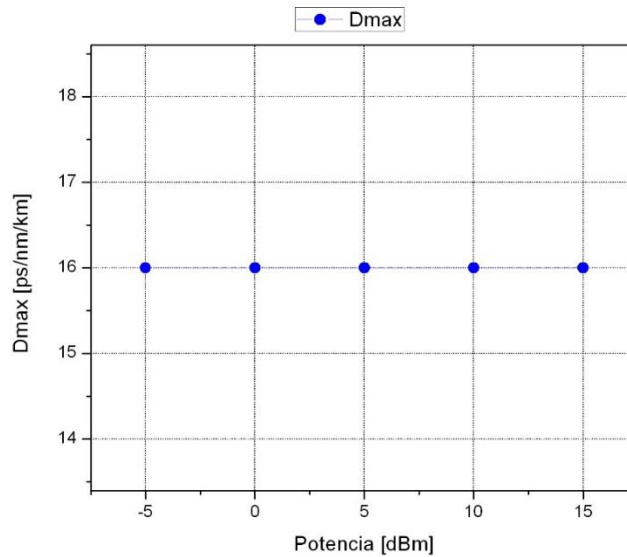


Figura 3.30 Máxima tolerancia a la dispersión cromática

La dispersión cromática es un fenómeno que afecta significativamente también el formato RZ-DQPSK a 40Gbps, por ejemplo, para una potencia de 15 dBm y una distancia de 12 Km, la figura 3.31 (a) muestra el diagrama del ojo con un coeficiente de dispersión igual a 2 ps/nm.Km, comparado con el diagrama del ojo de la Figura 3.31 (b) con un coeficiente de dispersión de 18 ps/nm.Km, es notorio el efecto negativo de la dispersión cromática en el desempeño del sistema.

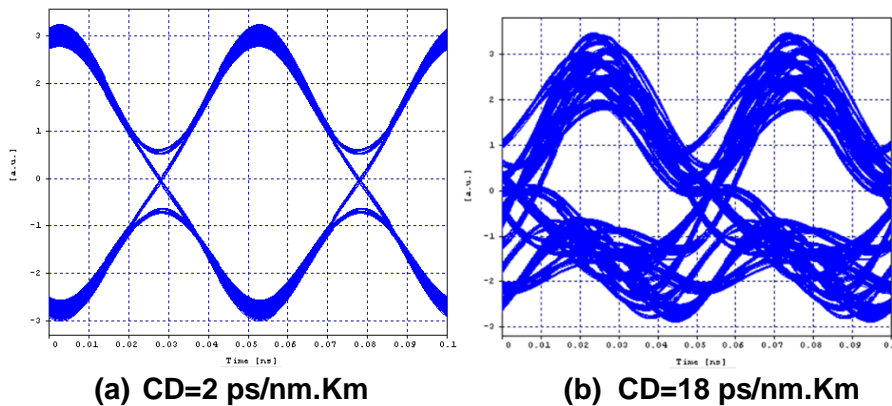


Figura 3.31 Diagrama del Ojo con efecto de la Dispersión Cromática

Al variar el valor de la dispersión cromática, el parámetro BER con CD= 2ps/nm.Km es de $1e-40$ y un factor Q= 29.99 dB, y a medida que aumenta el coeficiente de CD=18 ps/nm.Km, el BER aumenta considerablemente a un valor de $9.25e-20$ y el factor Q disminuye hasta 19.11 dB, generando una implicación

directa para determinar la máxima tolerancia a la dispersión cromática. (Anexo B, tabla 12).

3.2.2.2 Efecto de compensación de Dispersión Cromática

En la Figura 3.32, se muestra el esquemático para 4 canales con modulación NRZ-DQPSK y una pre-compensación en donde la fibra DCF se antepone a la fibra SMF28 y la figura 3.33 muestra el esquemático para 4 canales con modulación RZ-DQPSK para una post-compensación en donde la fibra DCF se implementa después de la Fibra smf28e.

Para realizar las simulaciones del esquemático de las figuras 3.32 y 3.33 se configuraron las frecuencias de transmisión desde 194.0 THz a 194.3 THz, con un espaciamento de 100 GHz, también, se tuvo en cuenta el efecto de la dispersión cromática de 16ps/nm.Km típico de la fibra utilizada, las longitudes tomadas fueron las máximas para cada valor de potencia como se muestra en la figura 3.30, además se implementó una fibra mono modo Corning smf28e, amplificador EDFA, ya que este es el amplificador de fibra dopada más empleado en la actualidad y tiene la posibilidad de amplificar señales en la tercera ventana (1550nm), la configuración de bombeo que se estableció fue Dual, Fibras DCF para compensar la CD y así poder medir con seguridad el efecto de la PMD sobre el formato de modulación y el canal óptico. Para determinar el valor de la distancia a utilizar en los tramos de fibra DCF, se utilizó la siguiente ecuación (3.2).

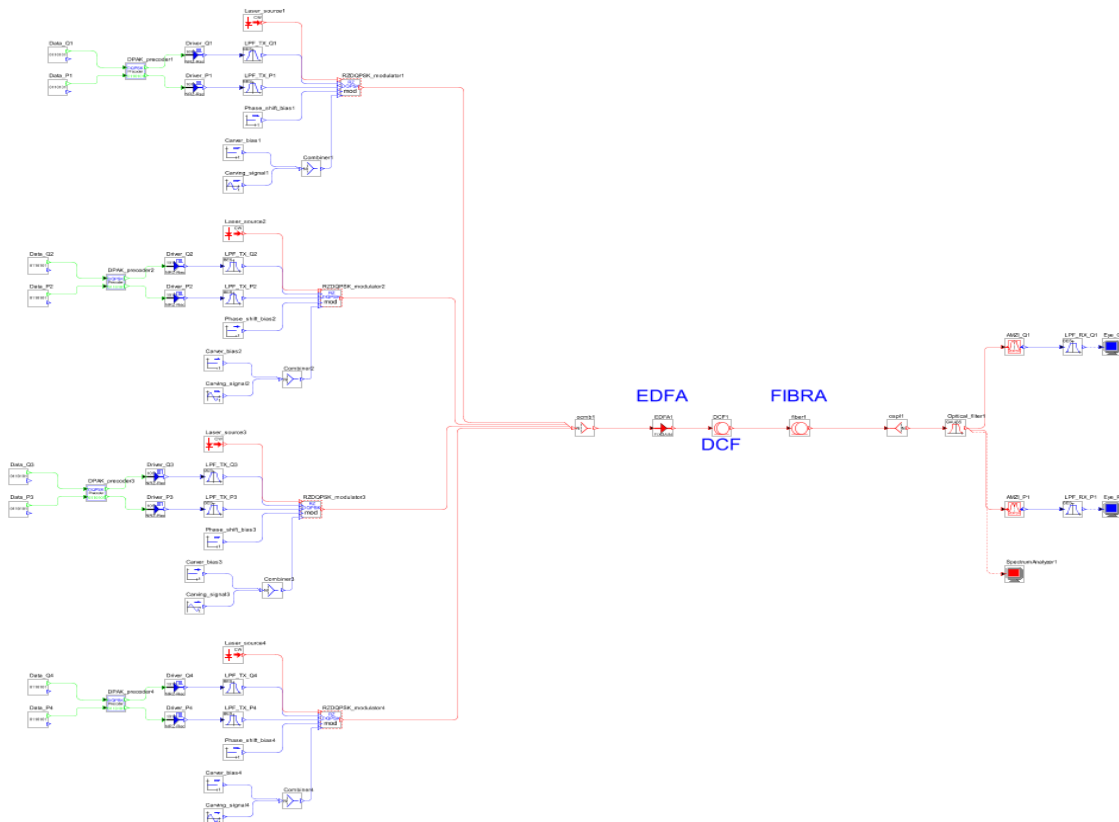


Figura 3.32 Escenario 2, RZ-DQPSK con 4 canales, Pre-compensación con DCF

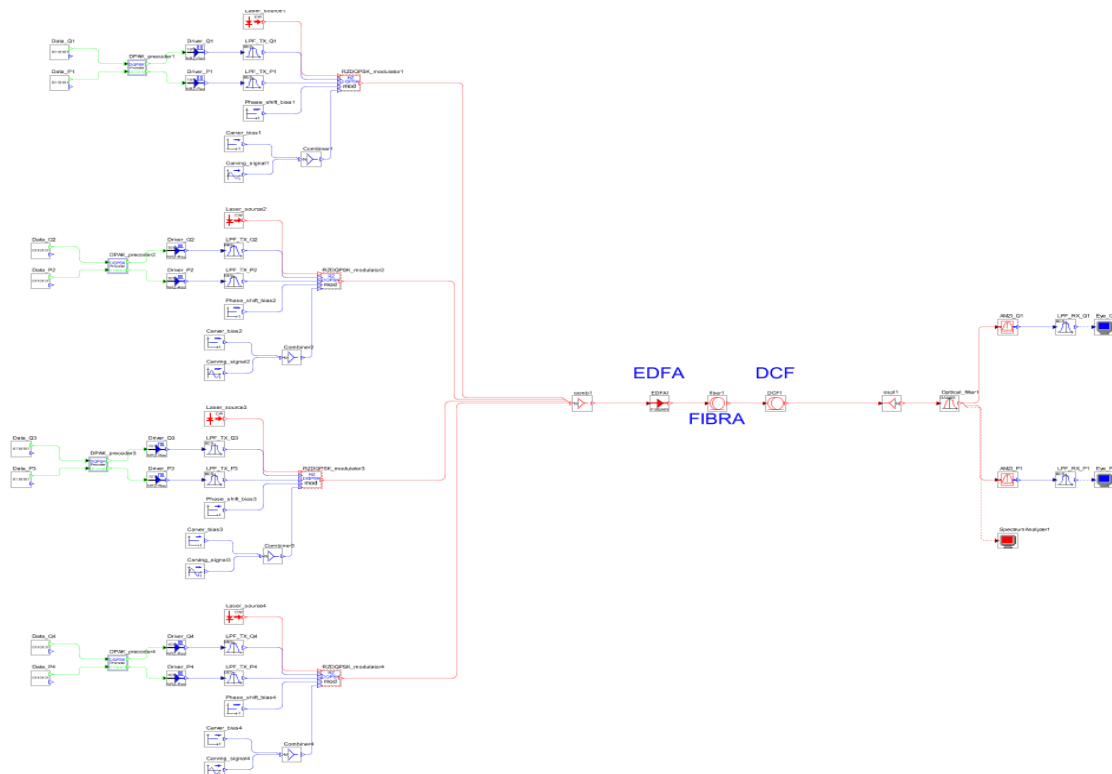
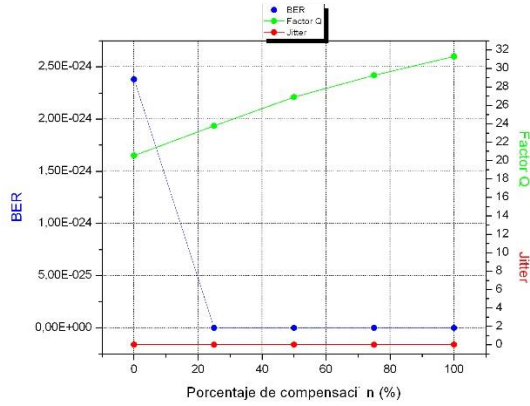


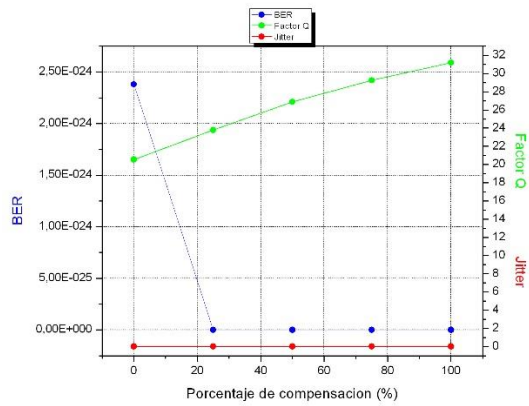
Figura 3.33 Esquemático Escenario 2 RZ-DQPSK con 4 canales, Post-compensación con DCF

Con el fin de determinar los efectos de compensar la dispersión cromática para los valores de distancia máxima alcanzada y las diferentes potencias de transmisión (-5, 0, 5, 10 y 15 dBm), se procede a realizar compensación al 100, 75, 50, 25 y 0%, mediante las técnicas de pre-compensación (a) y post-compensación (b), los valores medidos de BER, Factor Q y Jitter se registran desde la figura 3.34 (a), (b) a la figura 3.38 (a) (b), (Anexo B, tablas 13 (a),(b) a 17 (a),(b)).

El efecto de compensar, se ve reflejado en una mejora de los parámetros de calidad para cada una de las potencias, como se observan en las gráficas 3.34 a 3.38. En ellas se puede analizar que a partir del 25% de compensar la CD el factor Q aumenta a medida que incrementa la potencia alcanzando el valor objetivo alrededor de 30dB cuando se compensa al 100%, mientras que el BER tiende a estabilizarse a partir del 25% y permanece constante hasta una compensación del 100%, por otro lado, el Jitter no presenta cambio alguno y permanece constante en todo el intervalo de compensación.

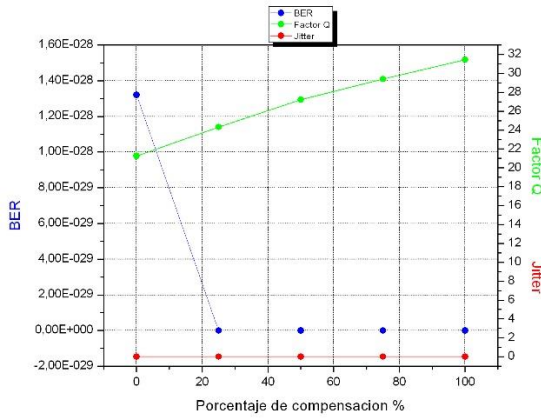


(a) Pre-compensación para una distancia de 9 Km

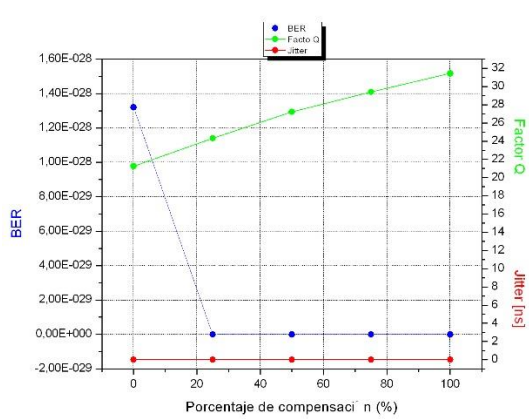


(b) Post-compensación para una distancia de 9 Km

Figura 3.34 Efecto de compensación de la dispersión cromática para una potencia de -5 dBm

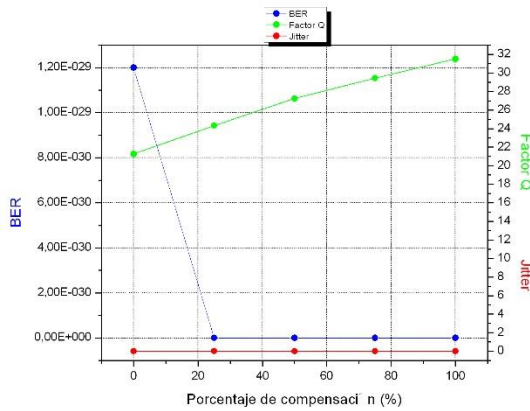


(a) Pre-compensación para una distancia de 8.5 Km

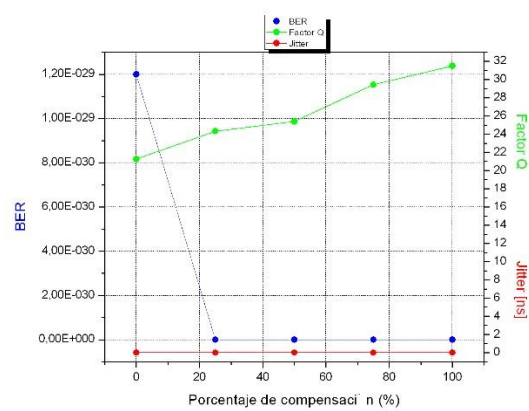


(b) Post-compensación para una distancia de 8.5 Km

Figura 3.35 Efecto de compensación de la dispersión cromática para una potencia de 0dBm

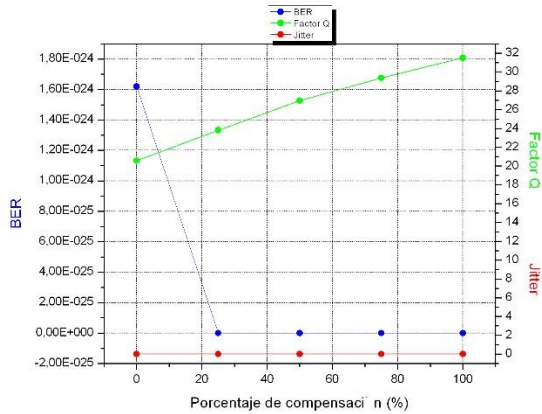


(a) Pre-compensación para una distancia de 8.5 Km

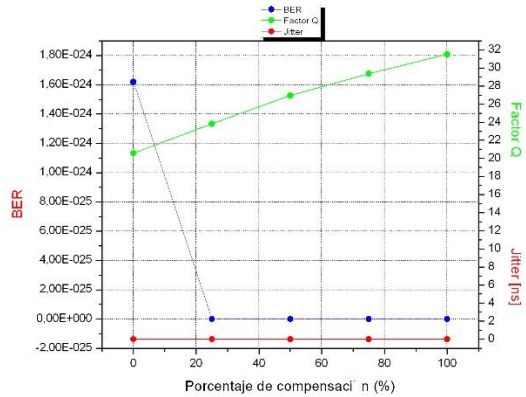


(b) Post-compensación para una distancia de 8.5 Km

Figura 3.36 Efecto de compensación de la dispersión cromática para una potencia de 5dBm

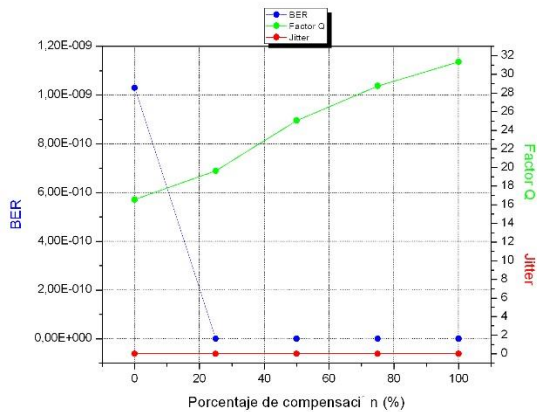


(a) Pre-compensación para una distancia de 9 Km

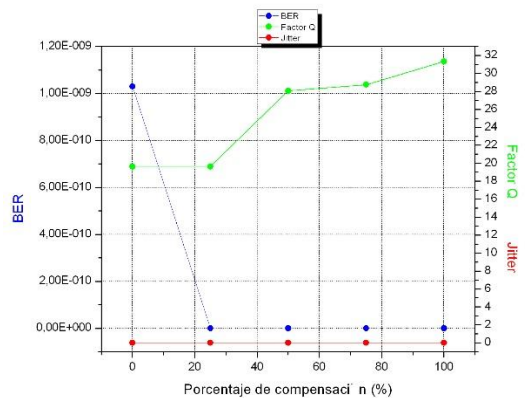


(b) Post-compensación para una distancia de 9 Km

Figura 3.37 Efecto de compensación de la dispersión cromática para una potencia de 10dBm



(a) Pre-compensación para una distancia de 12 Km



(b) Post-compensación para una distancia de 12 Km

Figura 3.38 Efecto de compensación de la dispersión cromática para una potencia de 15dBm

Como puede apreciarse en las en la figura 3.39 (a) sin compensación de la CD y figura 3.39 (b) compensación de la CD al 100 %, donde se hace evidente la mejora introducida al sistema al realizar compensación de la dispersión mediante el uso de fibra compensadora de dispersión DCF y con una potencia en el transmisor de 15 dBm para 12Km.

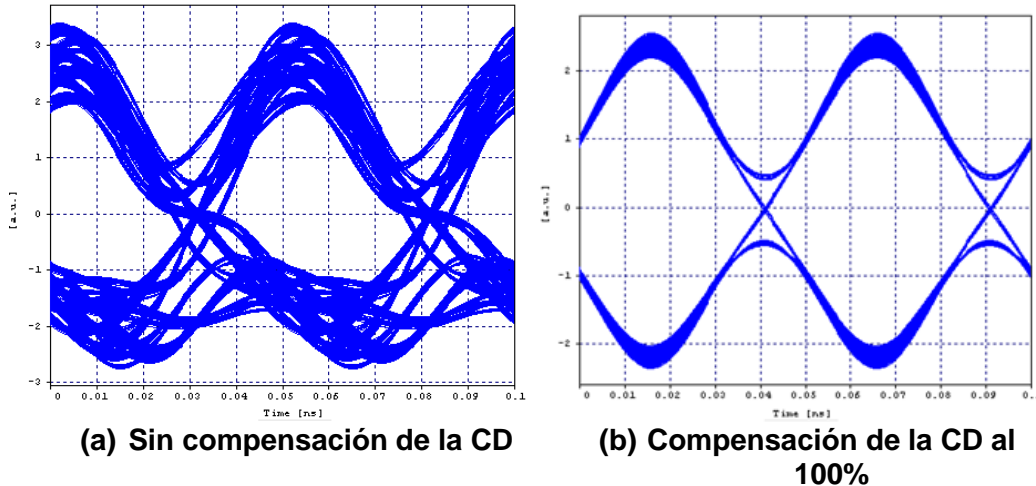


Figura 3.39 Diagrama del ojo para el formato de modulación RZ-DQPSK para una distancia de 12 Km a 40Gbps

Debido a que las mejoras de los parámetros de calidad son significativas después de realizar compensación, se concluye que la dispersión cromática degrada considerablemente el desempeño de la red y realizar compensación es fundamental para mejorar su rendimiento, por lo tanto, el formato RZ-DQPSK a 40Gbps, presenta una baja tolerancia ante el efecto lineal de dispersión cromática y realizar compensación es primordial para mejorar su rendimiento.

Los procesos de pre y post-compensación mostrados en las figuras 3. 34 a 3.38 no me aseguran cuál de los dos fue el de mejor desempeño ya que los parámetros de calidad fueron prácticamente equivalentes entre ellos, de esta manera se obtienen buenos resultados de los parámetros de desempeño compensando así la CD con cualquiera de las dos técnicas.

3.2.3 Caso de estudio 3: Variación coeficiente PMD

Una vez compensada la CD en el caso de estudio 2 se asegura que la dispersión presente en la fibra se debe solo a la PMD, de esta manera, se procede a examinar si el formato de modulación en cuestión es un buen candidato para mitigar la PMD y para esto se necesita saber cuál es la máxima tolerancia de PMD el cual puede resistir el enlace.

Teniendo en cuenta la configuración esquemática de la figura 3.33 y con el fin de determinar cuál es la máxima tolerancia del formato de modulación RZ-DQPSK frente a esta degradación lineal, se realizan variaciones cercanas al valor típico (del orden de $0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$), del parámetro PMD para las fibras SMF-28 que oscila entre 0 y $1 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$, hasta conseguir un valor límite que cumpla con los parámetros de calidad objetivo, adicionalmente se tomarán valores mayores con el fin de verificar el comportamiento del sistema ante estas variaciones, los resultados se muestran en las figuras 3.40 a 3.44 (Anexo B, tablas 18 a 22).

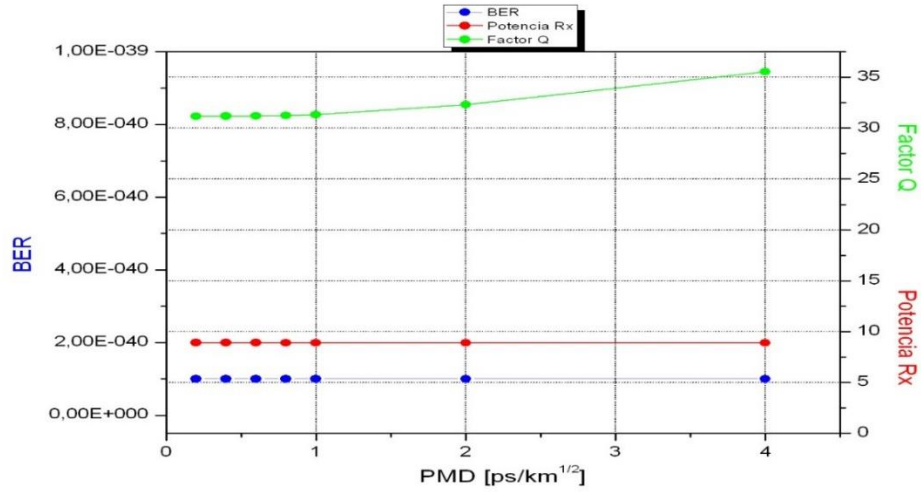


Figura 3.40 PMD para una potencia de -5dBm y una distancia de 9 Km

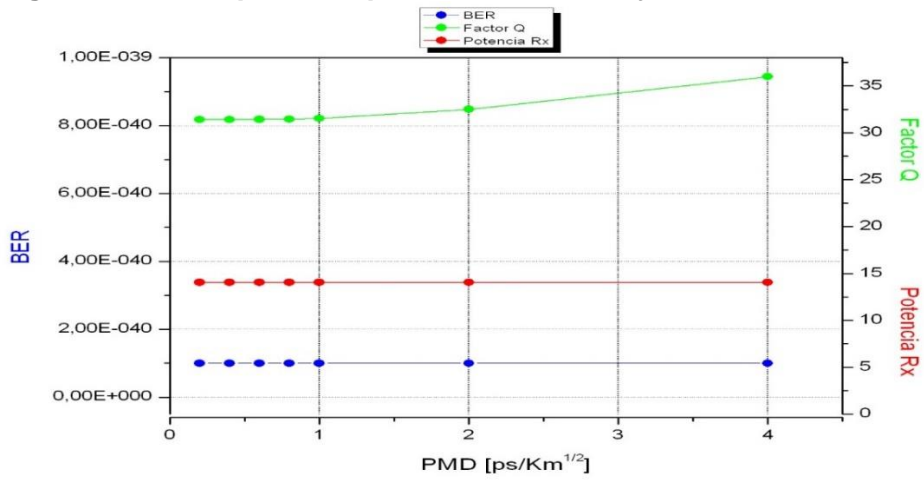


Figura 3.41 PMD para una potencia de 0dBm y una distancia de 8.5 Km

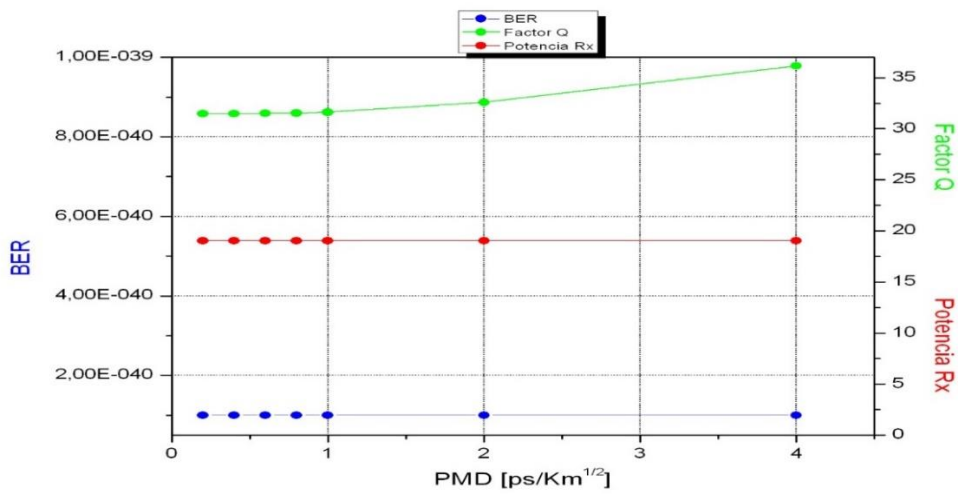


Figura 3.42 PMD para una potencia de 5dBm y una distancia de 8.5 Km

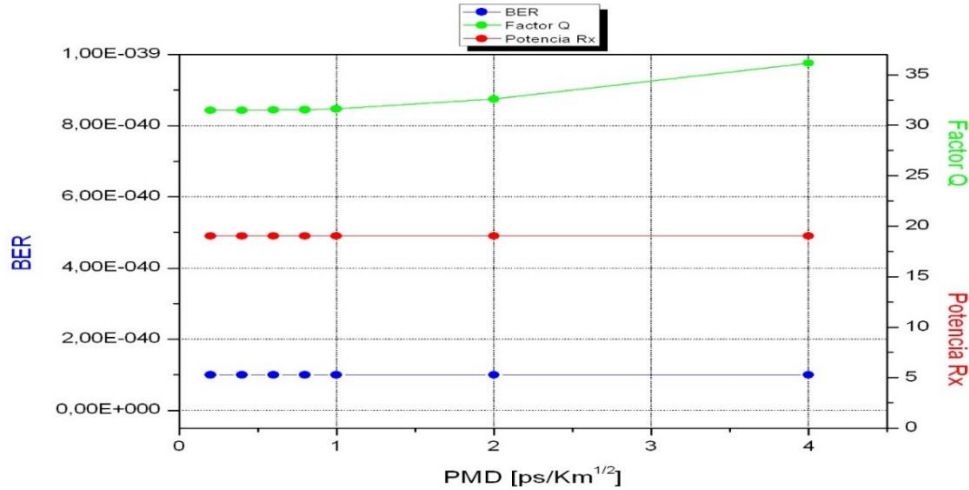


Figura 3.43 PMD para una potencia de 10dBm y una distancia de 9 Km

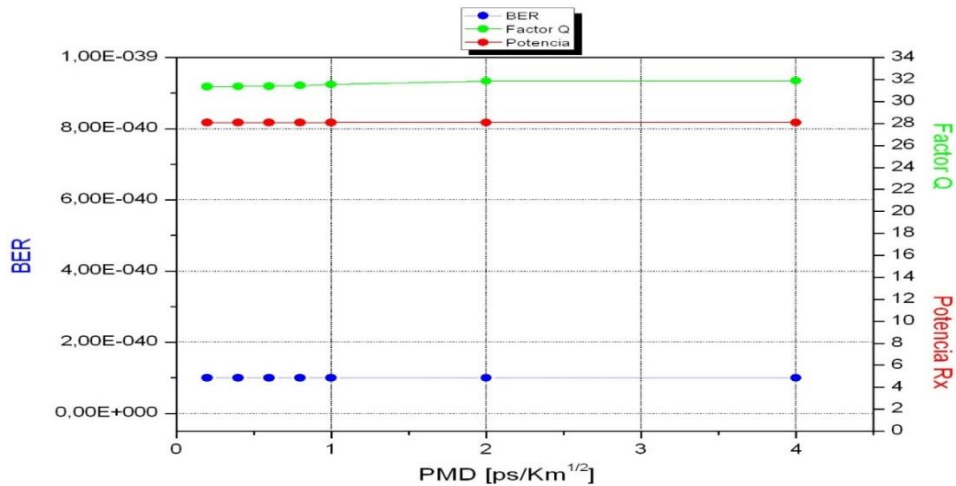


Figura 3.44 PMD para una potencia de 15dBm y una distancia de 12 Km

Como se puede observar en las figuras 3.40 a 3.44, los parámetros de monitoreo óptico no cambian de manera significativa ante el aumento de la PMD dentro de los valores típicos, es más, en el intervalo de 0 a 1 ps/km^{1/2} que es en donde se encuentra el valor representativo de la fibra SMF-28 igual a 0.2 ps/km^{1/2} los parámetros permanecieron prácticamente constantes. Además, el formato sobrepasa este intervalo siendo casi insignificante la variación de los parámetros hasta el valor de PMD igual 4 ps/km^{1/2}, una vez se exceda este valor los parámetros empiezan degradarse (Anexo B, tabla 22), tal como se comprueba con el diagrama de la figura 3.45, por lo tanto, se puede concluir que el formato de modulación RZ-DQPSK a 40 Gbps, es altamente tolerante ante el efecto lineal PMD.

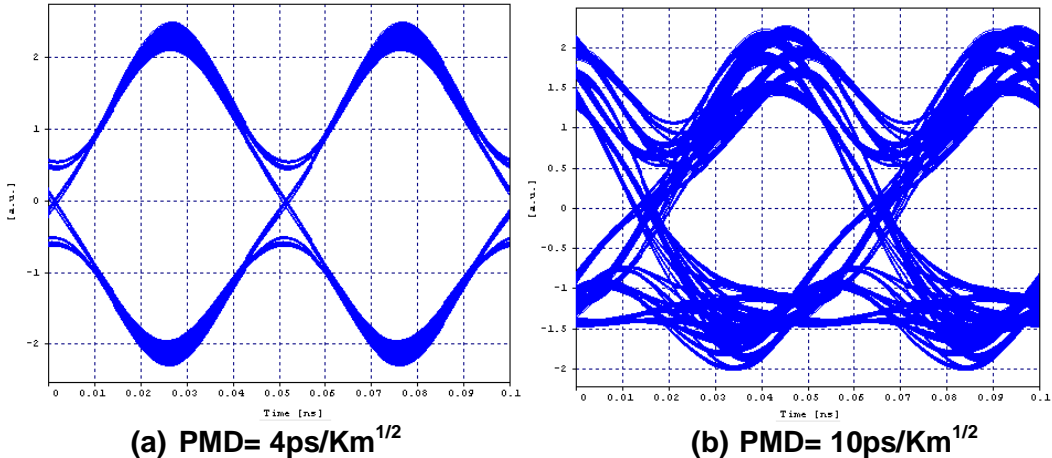


Figura 3.45 Diagrama del ojo para el formato de modulación RZ-DQPSK a una distancia de 12 Km, para una potencia de 15dBm a 40Gbps

3.2.4 Caso de estudio 4: Aplicación del compensador PMDC

La implementación de un módulo compensador de PMD es muy importante para el desempeño de una red óptica, ya que permite regenerar la señal de datos transmitida, dando como resultado una mejora en la recepción de estos, los cuales sufren degradaciones al viajar por el medio de transmisión. Por tanto, surge la necesidad de aplicar un módulo capaz de compensar este fenómeno.

3.2.4.1 Análisis del compensador PMDC basado en estructuras MZI

En la sección 3.1.4.1 se demostró que el dispositivo a utilizar será el MZI Dual-arm Ideal ya que presenta un fácil manejo dado su configuración y además posee una mayor potencia y OSNR. Por lo tanto, de igual manera, en la presente sección se utilizará el mismo dispositivo teniendo en cuenta sus características anteriormente mencionadas.

3.2.4.2 Funcionamiento en Simulación del Dispositivo MZI Dual-arm Ideal

Para el diseño del módulo que se requiere, se hace necesario primero que todo observar en la herramienta de simulación el comportamiento del MZI Dual-arm Ideal en un sistema Back to Back, ver Figura 3.46.

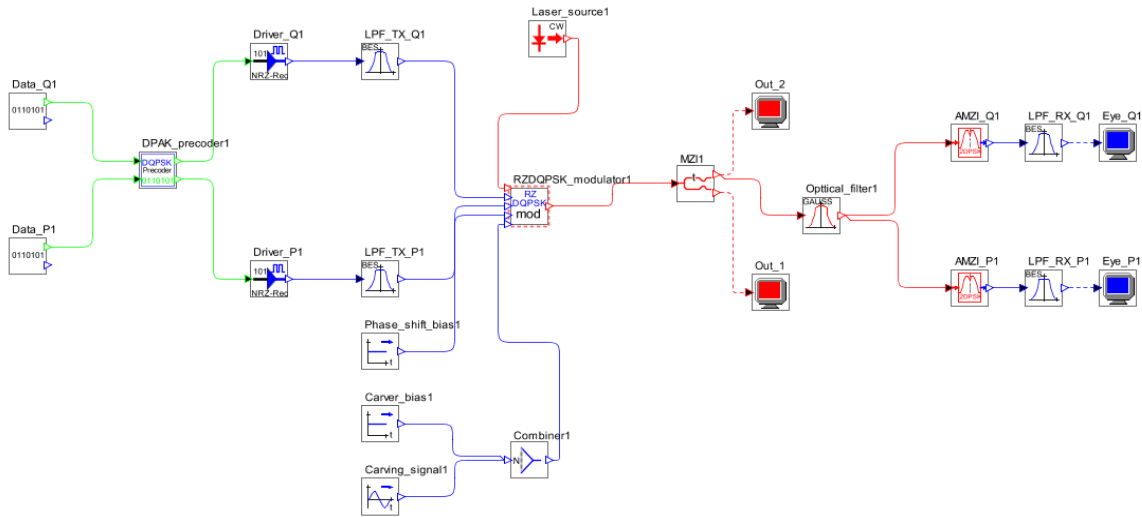


Figura 3.46 Configuración esquemática del MZI Dual-arm Ideal en el sistema RZ-DQPSK Back to Back

Los resultados arrojados por la simulación de la configuración de la figura 3.46 se muestran en la tabla 3.4:

Tabla 3.4 Resultados del espectro óptico de las dos ramas del MZI

	Potencia [dBm]	OSNR [dB]
Salida 1	0.2572	29.4228
Salida 2	9.2930	29.7240

Claramente la tabla 3.4 nos muestra que la salida 2 del MZI tiene mayor potencia y mayor OSNR, por lo tanto, se demuestra que una de las salidas tiene mayor señal y será la que se utilice de aquí en adelante.

3.2.4.3 Módulo Compensador de PMD

El Módulo, se configura en base a pruebas simuladas en la herramienta OptSim™ de Synopsys. Primero que todo se toma como referencia el sistema mostrado en la Figura 3.27. Luego, ubicamos los diferentes arreglos que se pueden realizar con el MZI Dual-arm Ideal en la parte de transmisión “pre-compensación” (dado que se tiene hasta ahí, una red pura y sin degradaciones de la señal, lo que permite observar mejor el comportamiento del módulo compensador) para realizar la comparación entre ellos y así determinar cuál presenta el mejor desempeño en la red, ver Figura 3.47.

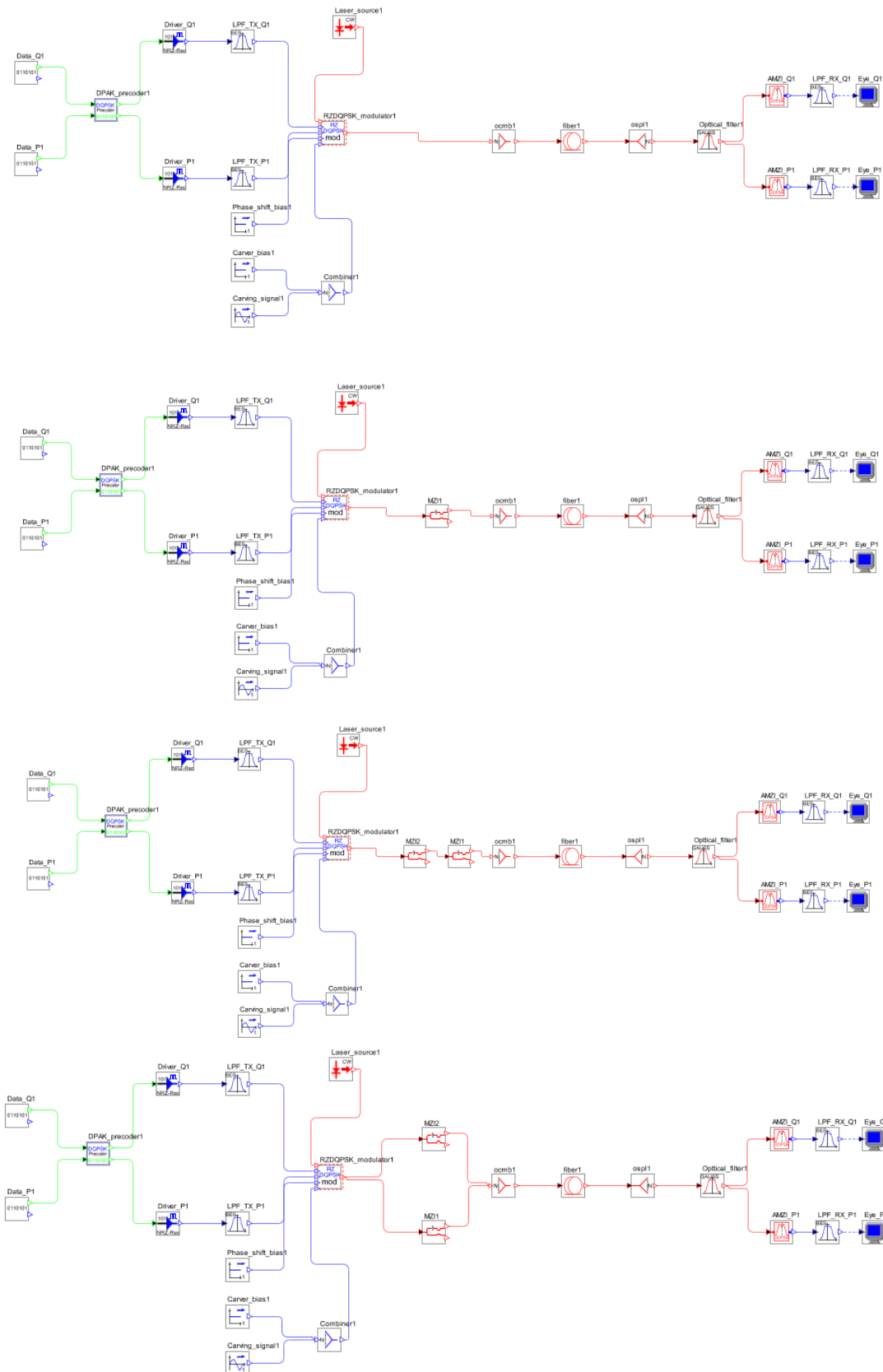
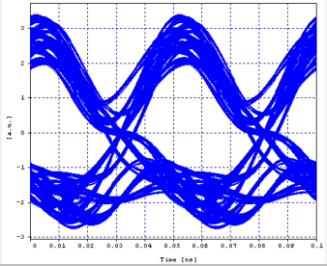
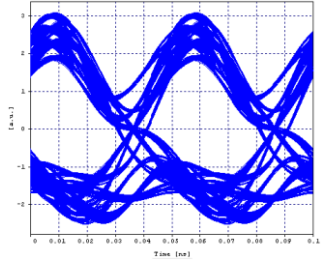
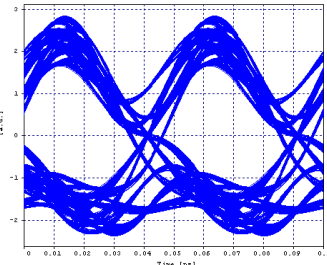
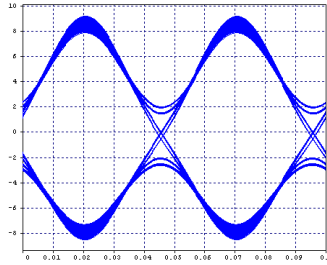


Figura 3.47 Escenario para cada arreglo MZI Dual-arm Ideal en pre-compensación

En la Tabla 3.5, se muestran los resultados de los diferentes arreglos realizados con el MZI Dual-arm Ideal.

Tabla 3.5 Comparación entre los arreglos MZI Dual-arm Ideal

Configuración de red a 12 km (como prueba)	Diagrama del Ojo	Parámetros
Sin módulo compensador		<p>BER= 1.09e-11 Factor Q= 16.54dB</p>
1 MZI Dual-arm Ideal		<p>BER= 1.27e-12 Factor Q= 16.92dB</p>
Arreglo serie (2 MZI Dual-arm Ideal)		<p>BER= 2.87e-13 Factor Q= 17.18dB</p>
Arreglo paralelo (2 MZI Dual-arm Ideal)		<p>BER= 1e-40 Factor Q= 35.63dB</p>

Se puede apreciar claramente en la Tabla 3.5, que al utilizar un arreglo en paralelo mejora considerablemente la BER y el Factor Q respecto a los otros arreglos (también se puede observar la mejora en los diagramas de ojo), por lo que se elige esta configuración para el esquema del módulo compensador de PMD. Presenta

una gran ventaja en la implementación, ya que puede ser sintonizado con una sola tensión de control, debido a que los MZI trabajan en forma paralela y con los mismos parámetros, lo que permite tener circuitos de excitación menos complejos y también un consumo de energía más bajo [72].

3.2.4.4 Análisis de la PMD utilizando el compensador PMDC

En esta sección se implementará el compensador PMDC conformado por un arreglo en paralelo de 2 MZI Dual –arm Ideal, tal como se demostró en la sección anterior en la cual se evidenció que fue la configuración que arrojó los mejores resultados.

Continuando con el proceso y teniendo en cuenta de cada uno de los resultados presentados en los casos de estudio anteriores se aplica el compensador PMDC a la configuración de la figura 3.33, en donde se tiene una distancia máxima de 6.1Km, además compensa la CD al 100% y es tolerante a una PMD = 4ps/Km^{1/2} demostrado con parámetros de calidad equivalentes a los parámetros objetivo.

La figura 3.48, muestra la configuración esquemática del formato RZ-DQPSK para 4 canales con post-compensación de CD e implementando el compensador PMDC para cada canal en el transmisor.

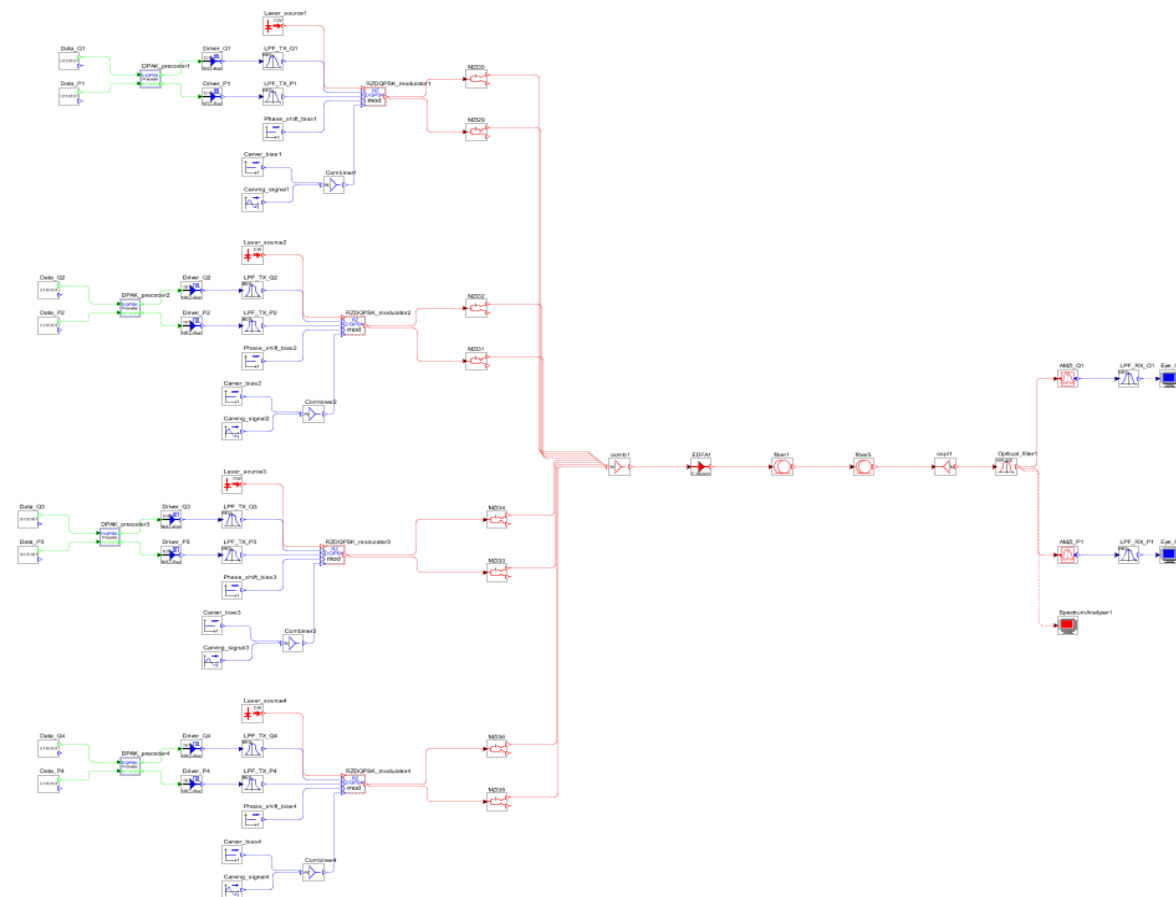


Figura 3.48 Escenario de simulación RZ-DQPSK para 4 canales, 12Km de longitud, Post-compensación con DCF y compensador PMDC

Los resultados arrojados por la simulación de la figura 3.48 se pueden observar en la figura 3.49:

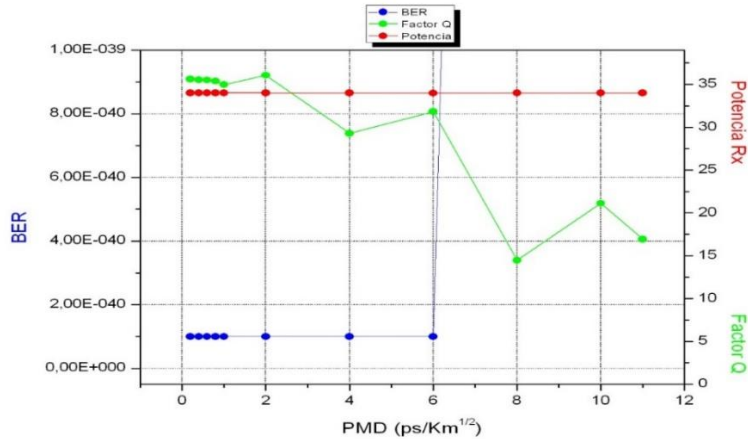
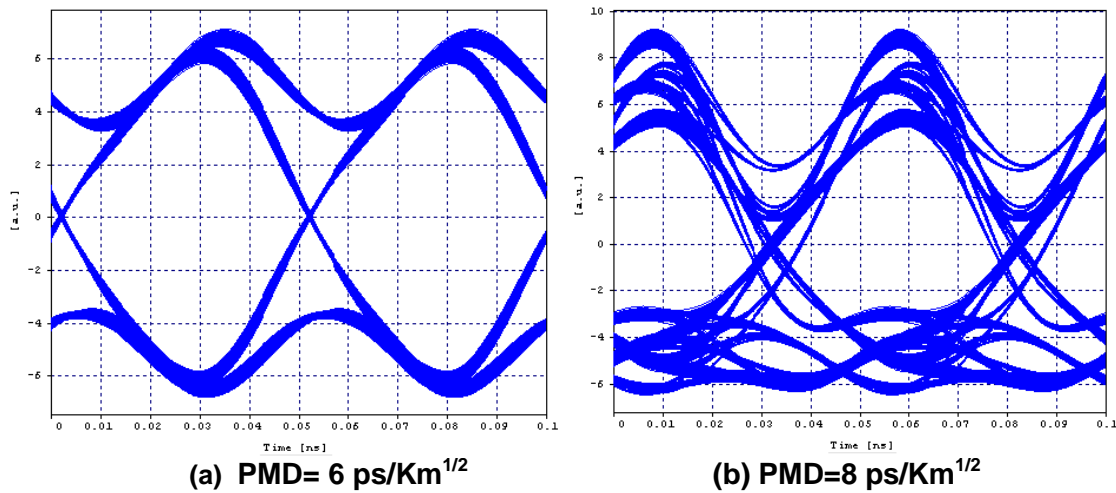
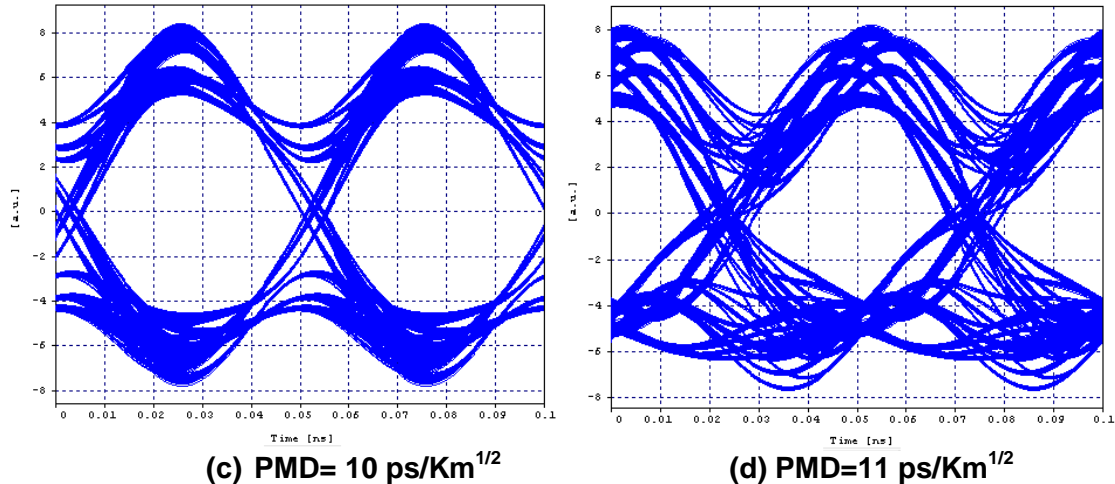


Figura 3.49 Variación PMD para el formato RZ-DQPSK con compensador PMDC

Según los resultados mostrados en la figura 3.49, el valor de la PMD alcanzó un máximo de 6ps/Km^{1/2} en donde los parámetros se mantuvieron aproximadamente constantes dentro de los parámetros de calidad objetivo. A partir de dicho valor el factor Q empieza a degradarse llegando a un valor aproximado de 16 dB a 11 ps/Km^{1/2}, de igual manera el BER se dispara alcanzando un valor exagerado de 1.74e-12dB a 11 ps/Km^{1/2} (este punto no se aprecia en la gráfica debido a que si se cambia el intervalo de los ejes no se apreciaba adecuadamente la información de los demás parámetros), valores que no cumplen con los parámetros de calidad objetivo. En la figura 3.50 se muestra la degradación que sufre el sistema de transmisión cuando la PMD excede los 6 ps/Km^{1/2}. Ver (Anexo B, tablas 23).





(c) PMD= 10 ps/Km^{1/2} (d) PMD=11 ps/Km^{1/2}
Figura 3.50 Degradación de Diagrama del Ojo para el formato RZ-DQPSK con compensador PMDC

En la figura 3.50, los parámetros de calidad se ven afectados negativamente una vez la PMD sobrepasa el valor máximo de ps/Km^{1/2}, degradando simultáneamente el Diagrama del Ojo.

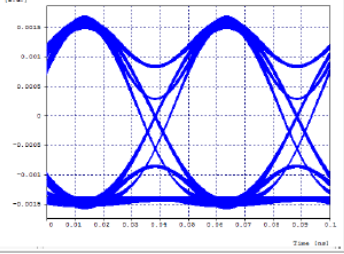
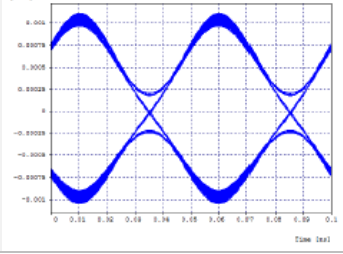
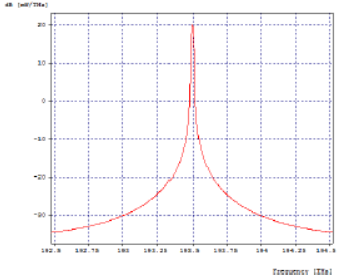
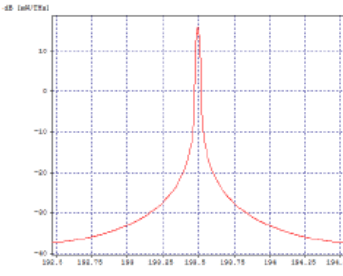
En conclusión, se puede decir que el compensador PMDC aplicado al formato de modulación NRZ-DQPSK a 40 Gbps en post-compensación con DCF al 100% mitiga la PMD de manera satisfactoria hasta los 6ps/Km^{1/2}, aumentando el desempeño del formato en cuestión. Comparando con los resultados obtenidos de la figura 3.33 antes de implementar el compensador, ésta nos arroja una tolerancia de PMD máxima igual a 4ps/Km^{1/2}, inferior al de la figura 3.48 con compensador PMDC. La tolerancia de PMD máxima del formato RZ-DQPSK con el compensador PMDC supera aproximadamente en el 50% de la tolerancia del formato sin el compensador, manteniendo una relación de 1.5 de una respecto a la otra.

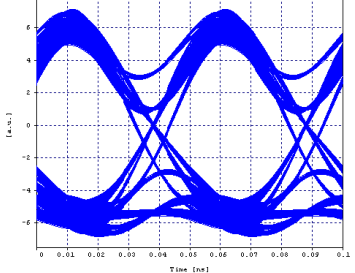
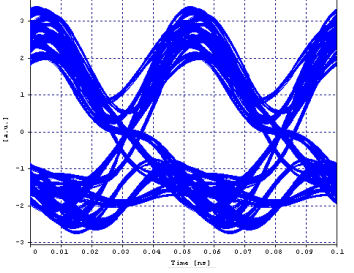
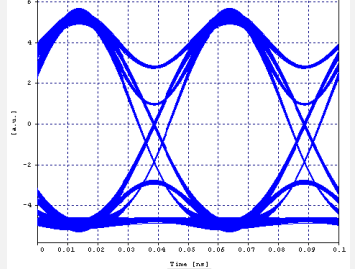
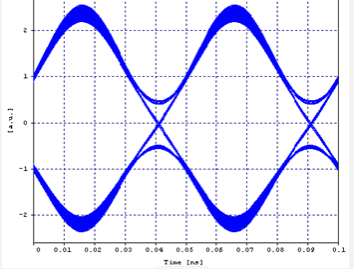
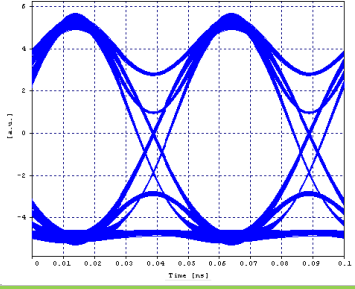
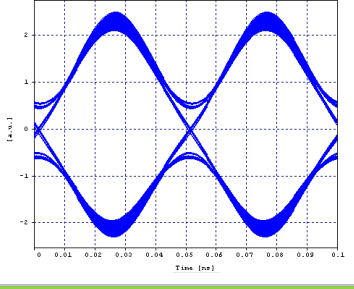
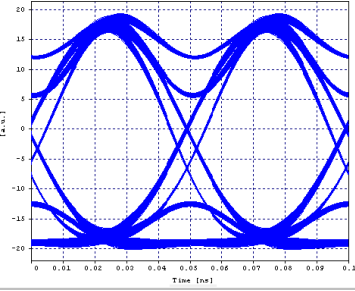
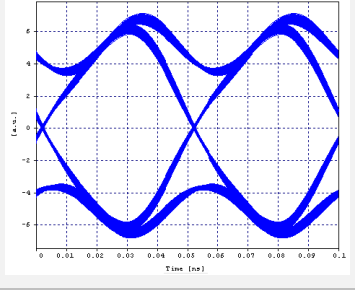
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LAS TÉCNICAS ESTUDIADAS Y SU TOLERANCIA FRENTE A LA PMD

En el capítulo 3, se muestran los resultados de una serie de simulaciones, acorde a lo definido en el capítulo 2; especificando dos escenarios de simulación, de los formatos estudiados NRZ-DQPSK y RZ-DQPSK, y cada escenario consta de 4 casos de estudio, cada uno de estos con sus configuraciones pertinentes.

En el presente capítulo se muestra el análisis comparativo de las técnicas estudiadas, a partir de los resultados y evaluación de las simulaciones, obtenidos en el capítulo 3, con lo cual, se pudo determinar algunos factores que inciden en el desempeño de los formatos de modulación y su tolerancia frente a la PMD, como se observa en la Tabla 4. 1, en la que se resume el comportamiento de los formatos de modulación y aplicación del compensador PMDC sobre la red óptica a una velocidad de transmisión de 40 Gbps a medida que se variaron los parámetros simulación, lo anterior se realiza con el fin de establecer cual presenta un mejor desempeño, tolerancia y/o mitigación en una red DWDM a 40 Gbps.

Tabla 4.1 Análisis comparativo de los formatos de modulación (RZ-NRZ)/DQPSK y aplicación del compensador PMDC a 40 Gbps

Ventaja ■ Desventaja ■	NRZ-DQPSK	RZ-DQPSK
Diagrama del Ojo back to back		
Espectro óptico back to back		
Distancia máxima alcanzada a una P_{TX} de 15 dBm	6.1 Km	12 Km
Tolerancia a la CD	BAJO	BAJO
Valor máximo de CD	16 ps/nm.Km	16 ps/nm.Km

<p>Diagrama del Ojo sin compensar la CD</p>		
<p>Diagrama del Ojo compensando la CD con DCF</p>		
<p>Tolerancia a la PMD sin el PMDC</p>	<p>ALTO</p>	<p>ALTO</p>
<p>Valor Máximo de la PMD sin el PMDC</p>	<p>6 ps/Km^{1/2}</p>	<p>4 ps/Km^{1/2}</p>
<p>Diagrama del Ojo sin el PMDC</p>		
<p>Tolerancia a la PMD aplicando el PMDC</p>	<p>ALTO</p>	<p>ALTO</p>
<p>Valor máximo de la PMD aplicando el PMDC</p>	<p>14 ps/Km^{1/2}</p>	<p>6 ps/Km^{1/2}</p>
<p>Diagrama del Ojo aplicando el PMDC</p>		

Una vez realizado el análisis individual de cada uno de los casos de estudio, se pudo determinar algunos factores que inciden significativamente en el desempeño de los formatos de modulación, con respecto a los efectos lineales de dispersión, dentro de los cuales se resaltan para:

Escenario 1, NRZ-DQPSK:

- El formato de modulación es tolerante frente al efecto lineal de la PMD, el formato presenta un buen comportamiento, donde esta no presenta degradaciones en el sistema.
- El sistema es poco tolerante variaciones de potencia de transmisión, ya que se hacen presentes degradaciones que afectan el alcance del sistema.
- Este formato es altamente susceptible a la dispersión cromática, donde esta degrada considerablemente el sistema, tal como se aprecia en la Figura 3.13.
- El formato es sensible al efecto de compensación de la dispersión cromática, donde se evidencian mejoras en el desempeño del sistema.
- La aplicación del compensador PMDC al formato fue muy útil ya que mejoró su desempeño aumentando el valor límite máximo de PMD en la que éste fenómeno no degrada el sistema.

Escenario 2, RZ-DQPSK:

- El efecto que presenta la PMD no es considerable para el sistema, es decir es altamente tolerante ante esta degradación.
- El sistema soporta altas variaciones de potencia de transmisión, siendo el aumento de esta con la cual se puede lograr mayores distancias, pero a pesar de manejar altas potencias esto no es económicamente viable, ya que no se consiguen aumentos significativos en las distancias que alcanza el enlace.
- Este formato es altamente susceptible a la dispersión cromática, donde esta degrada el sistema hasta el punto de que no se logran conseguir enlaces económicamente viables.
- Al realizar compensación de la dispersión cromática, se presentan mejoras en los parámetros de calidad del sistema, sin embargo, esto implica el uso de más dispositivos incrementando los costos y la complejidad de implementación del mismo.
- La aplicación del compensador PMDC al formato mejoró su desempeño aumentando el valor límite máximo de PMD en la que éste fenómeno no degrada el sistema.

Finalmente se concluye que los dos formatos muestran características similares, ya que ambos presentan mejoras al compensar la CD con DCF, tienen el mismo

valor máximo de tolerancia a la CD, aunque el valor máximo de tolerancia a la PMD es mayor para el formato NRZ-DQPSK, la tolerancia de esta para el formato RZ-DQPSK no afecta el sistema ya que sobrepasa de manera significativa el valor típico tolerable de la fibra utilizada (SMF-28) en la transmisión. Con el estudio mencionado anteriormente el único parámetro de peso en el que la balanza se desequilibra a favor del formato RZ-DQPSK es la distancia máxima de alcance del enlace, debido a que la longitud máxima del formato RZ-DQPSK supera en el doble a la longitud máxima del formato NRZ-DQPSK manteniendo una relación 2:1 entre ellos.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros. Las conclusiones son resultado de los objetivos y el trabajo desarrollado para alcanzarlos, las recomendaciones y trabajos futuros son producto de la metodología y ejecución de la simulación.

5.1 CONCLUSIONES

- Se comprobó que la dispersión cromática es el efecto lineal que más afecta el desempeño de los formatos estudiados. Además, se pudo determinar que realizar compensación de la dispersión cromática es fundamental para mejorar el desempeño de los formatos de modulación para sistemas de fibra óptica.
- Mediante los resultados obtenidos en simulación, se pudo comprobar que el formato de modulación RZ-DQPSK, muestra un mejor desempeño respecto a los parámetros de monitoreo óptico (OPM), que el formato NRZ-DQPSK debido a que presenta mejor comportamiento ante las degradaciones ópticas.
- Para obtener mejores resultados en cuanto a longitud y parámetros OPM es necesario compensar al 100% la dispersión cromática y mejorar la sensibilidad del receptor.
- Los dos formatos de modulación estudiados sirven como técnicas de mitigación de la PMD manteniendo las propiedades y características de la fibra utilizada ya que sobrepasan los valores típicos máximos de PMD que tolera el medio de transmisión óptico.
- La implementación del compensador PMDC basado en estructuras Mach Zehnder fue muy útil para las dos modulaciones, ya que mejoró los parámetros OPM ampliando el rango del valor máximo de tolerancia a la PMD para cada formato.
- Se puede decir que el formato RZ-DQPSK sobresale sobre el formato NRZ-DQPSK, a pesar de que ambos presentan comportamientos similares frente a la degradación de la PMD el primer formato alcanza una mayor longitud de enlace de casi el doble, siendo así un formato que contribuye a una mejor solución en cuanto a la relación costo-eficiencia para ser implementado en redes de fibra óptica.
- La metodología usada en la realización del presente trabajo de investigación que consistió en el análisis teórico y comportamiento a nivel

de simulación de cada una de las técnicas aplicadas sirvió para evaluar los parámetros de monitoreo óptico objetivo adecuados de acuerdo a las recomendaciones de la ITU-T, ofreciendo así cumplir con los objetivos planteados en el presente trabajo desarrollado.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar escenarios de simulación de tipo incremental, ya que permite ver la evolución de los mismos e ir ajustando valores para cada parámetro, lo que lleva a la obtención de una solución de diseño apropiada.
- 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 230 y 20 ns de tiempo de simulación.
- El presente proyecto de tesis a nivel de maestría, es de gran utilidad para el desarrollo de nuevos proyectos de telecomunicaciones, especialmente en el área de fibra óptica y para los operadores de redes que deseen aumentar la capacidad de sus redes DWDM, implementando los formatos de modulación analizados.

5.3 TRABAJOS FUTUROS

A través del cumplimiento de los objetivos del trabajo de grado, fue posible identificar nuevas investigaciones a partir de estos formatos de modulación:

- Analizar el desempeño de los formatos de modulación, para diferentes tipos de fibras comerciales.
- Analizar el desempeño de los formatos de modulación a una velocidad de 100 Gbps y su tolerancia frente a la PMD.
- Analizar el desempeño de los formatos de modulación (RZ-NRZ)/DQPSK para el uso de amplificadores, enlaces concatenados y efectos de la PMD.
- Trabajar con distintos métodos de compensación como PMDC, DCF junto con los formatos de modulación avanzados Multiplexación de Polarización (NRZ-RZ)/DQPSK (*POLMUX (NRZ-RZ)/DQPSK*) para mejorar el desempeño de los formatos de modulación a altas velocidades.
- Diseñar e implementar diferentes tipos de compensadores PMDC a los formatos de modulación avanzados a 40 y 100Gbps.

ANEXO A. RESULTADOS DE SIMULACIÓN PARA EL ESCENARIO 1 (NRZ-DQPSK 40Gbps)

Tabla 1. Distancia máxima para una Potencia de transmisión de -5 dBm.

Distancia (Km)	BER	Factor Q (dB)	P _{RX} [dBm]
5.5	3.90e-36	22.07	-7.62
5.6	6.95e-35	21.92	-7.67
5.7	6.61e-34	21.78	-7.69
5.8	8.81e-33	21.64	-7.70
5.9	7.31e-32	21.51	-7.74
6.0	8.06e-31	21.36	-7.74
6.1	6.76e-30	21.23	-7.73
6.2	5.09e-29	21.10	-7.76

Tabla 2. Distancia máxima para una Potencia de transmisión 0dBm

Distancia (Km)	BER	Factor Q (dB)	P _{RX} [dBm]
5.5	3.90e-36	22.07	-2.62
5.6	6.95e-35	21.92	-2.67
5.7	6.61e-34	21.78	-2.69
5.8	8.81e-33	21.64	-2.70
5.9	7.31e-32	21.51	-2.74
6.0	8.10e-31	21.36	-2.74
6.1	6.76e-30	21.23	-2.73
6.2	5.09e-29	21.09	-2.76

Tabla 3. Distancia máxima para una potencia de transmisión de 5 dBm.

Distancia (Km)	BER	Factor Q (dB)	P _{RX} [dBm]
5.5	3.90e-36	22.07	2.38
5.6	6.95e-35	21.92	2.33
5.7	6.61e-34	21.78	2.31
5.8	8.81e-33	21.64	2.30
5.9	7.31e-32	21.51	2.26
6.0	8.06e-31	21.36	2.25
6.1	6.76e-30	21.23	2.27
6.2	5.09e-29	21.10	2.24

Tabla 4. Distancia máxima para una potencia de transmisión de 10 dBm.

Distancia (Km)	BER	Factor Q (dB)	P _{RX} [dBm]
5.5	3.90e-36	22.07	7.38
5.6	6.95e-35	21.92	7.33
5.7	6.61e-34	21.78	7.31
5.8	8.81e-33	21.64	7.30

5.9	7.31e-32	21.51	7.26
6.0	8.06e-31	21.36	7.25
6.1	6.76e-30	21.23	7.27
6.2	5.09e-29	21.10	7.24

Tabla 5 Distancia máxima para una potencia de transmisión de 15 dBm.

Distancia (Km)	BER	Factor Q (dB)	P _{RX} [dBm]
5.0	1e-40	22.81	12.47
5.1	1e-40	22.65	12.46
5.2	5.4e-40	22.51	12.42
5.3	1.79e-38	22.35	12.41
5.4	2.40e-37	22.21	12.42
5.5	3.90e-36	22.07	12.38
5.6	6.95e-35	21.92	12.33
5.7	6.61e-34	21.78	12.31
5.8	8.81e-33	21.64	12.30
5.9	7.31e-32	21.51	12.26
6.0	8.1e-31	21.36	12.25
6.1	6.76e-30	21.23	12.27
6.2	5.01e-29	21.10	12.24

Tabla 6. Distancia máxima alcanzable, red de cuatro canales espaciados entre sí 100 GHz.

P _{TX} [dBm]	Distancia (Km)	BER	Factor Q (dB)	P _{RX} [dBm]
-5 dBm	6.1	6.76e-30	21.23	-7.73
	12	7.99e-9	15.09	-5.12
0 dBm	6.1	6.76e-30	21.23	-2.73
	12	7.43e-9	15.07	-0.12
5 dBm	6.1	6.76e-30	21.23	2.27
	12	3.52e-9	15.26	4.86
10 dBm	6.1	6.76e-30	21.23	7.27
	12.5	9.03e-9	15.05	9.73
15 dBm	6.1	6.76e-30	21.23	12.27
	12	3.96e-9	15.28	11.05

Tabla 7. Máxima tolerancia a la dispersión cromática para una P=-5 dBm L=6.1Km

CD [ps/nm.Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
2	1e-40	31.10	-3.90	53.92
4	1e-40	29.42	-3.92	54.59
6	1e-40	27.73	-3.92	54.61
8	1e-40	26.21	-3.92	54.51
10	1e-40	24.75	-3.92	53.84
12	1e-40	23.52	-3.92	54.43
14	6.35e-39	22.36	-3.92	54.53
16	1.30e-30	21.28	-3.92	54.60
18	3.05e-24	20.29	-3.92	53.87

20	3.43e-20	19.39	-3.92	54.34
22	7.56e-17	18.56	-3.92	54.55
24	2.09e-14	17.76	-3.92	54.65
26	1.84e-12	17.02	-3.92	53.91

Tabla 8 Máxima tolerancia a la dispersión cromática para una P=0 dBm L=6.1Km

CD [ps/nm.Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
2	1e-40	30.56	1.09	53.90
4	1e-40	29.14	1.08	54.58
6	1e-40	27.72	1.08	54.61
8	1e-40	25.99	1.08	54.51
10	1e-40	24.74	1.08	53.83
12	1e-40	23.46	1.08	54.43
14	4.06e-39	22.33	1.08	54.53
16	1.90e-30	21.26	1.08	54.60
18	2.57e-24	20.32	1.07	53.88
20	4.58e-20	19.36	1.08	54.33
22	1.23e-16	18.51	1.08	54.55
24	1.37e-14	17.79	1.08	54.65
26	9.73e-13	17.06	1.08	53.91

Tabla 9. Máxima tolerancia a la dispersión cromática para una P=5 dBm L=6.1Km

CD [ps/nm.Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
2	1e-40	30.06	6.09	53.92
4	1e-40	28.23	6.09	54.65
6	1e-40	26.86	6.10	54.65
8	1e-40	25.68	6.10	54.38
10	1e-40	24.51	6.11	53.96
12	1e-40	23.38	6.10	54.67
14	6.21e-38	22.32	6.10	54.65
16	3.79e-31	21.45	6.09	54.37
18	6.51e-25	20.46	6.09	54.02
20	1.36e-20	19.54	6.09	54.74
22	1.10e-17	18.81	6.09	54.70
24	3.99e-15	17.99	6.09	54.34
26	3.81e-13	17.23	6.09	54.08

Tabla 10. Máxima tolerancia a la dispersión cromática para una P =10 dBm L=6.1Km

CD [ps/nm.Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
2	1e-40	28.15	11.09	53.93
4	1e-40	24.87	11.11	54.69
6	1e-40	24.06	11.14	54.63
8	1e-40	23.54	11.13	54.25
10	1e-40	22.98	11.12	54.24
12	1.46e-39	22.59	11.07	54.83
14	2.70e-34	21.90	11.07	54.53

16	9.86e-30	21.24	11.10	54.19
18	1.95e-26	20.63	11.10	54.42
20	8.57e-22	19.81	11.10	54.83
22	3.86e-19	19.10	11.09	54.48
24	2.64e-16	18.34	11.07	54.06
26	2.57e-14	17.64	11.06	54.50

Tabla 11. Máxima tolerancia a la dispersión cromática para una P =15 dBm L=6.1Km

CD [ps/nm.Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
2	1e-40	27.74	16.65	54.75
4	1e-40	24.95	16.56	53.88
6	3.32e-36	22.23	16.69	54.56
8	4.23e-28	20.98	16.66	54.51
10	3.32e-27	20.79	16.64	54.15
12	9.22e-30	21.26	16.71	54.55
14	2.31e-29	21.23	16.67	50.04
16	9.86e-30	21.29	16.68	54.53
18	2.61e-28	20.92	16.64	50.16
20	1.16e-28	20.97	16.63	50.41
22	9.45e-29	21.12	16.63	50.71
24	2.29e-29	21.18	16.61	51.04
26	5.55e-28	21.01	16.63	51.18

Tabla 12. Máxima tolerancia a la dispersión cromática

P _{TX} [dBm]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]	D _{MAX}	L [Km]	CD _{MAX} [ps/nm]
-5	1.30e-30	21.28	-3.92	54.60	16	6.1	96
0	1.90e-30	21.26	1.08	54.60	16	6.1	96
5	3.79e-31	21.45	6.09	54.37	16	6.1	94.4
10	9.86e-30	21.24	11.10	54.19	16	6.1	92.8
15	9.86e-30	21.29	16.68	54.53	16	6.1	49.6

Tabla 13 (b) Post-compensación para P= -5 dBm, L= 6.1 Km

%	Longitud DCF [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	0.976	1e-40	30.06	0,00078
75	0.732	1e-40	29,57	0,00090
50	0.488	1e-40	26,42	0,00117
25	0.244	1e-40	23,61	0,00145
0	0	5,41e-31	21,29	0,00169

Tabla 13 (a) Pre-compensación para P= -5 dBm, L= 6.1 Km

%	Longitud DCF [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	0.976	1e-40	31,05	0,00077
75	0.732	1e-40	29,58	0,00091
50	0.488	1e-40	26,42	0,00118
25	0.244	1e-40	23,61	0,00146

0	0	5,41e-31	21,29	0,00169
---	---	----------	-------	---------

Tabla 14. (b) Post-compensación para P= 0 dBm, L= 6.1 Km

%	Longitud DCF [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	0.976	1e-40	30,88	0,00079
75	0.732	1e-40	29,65	0,00092
50	0.488	1e-40	26,44	0,00118
25	0.244	1e-40	23,62	0,00146
0	0	5,04e-30	21,29	0,00170

Tabla 14. (a) Pre-compensación para P= 0 dBm, L=6.1 Km

%	Longitud DCF [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	0.976	1e-40	30,87	0,00079
75	0.732	1e-40	29,65	0,00092
50	0.488	1e-40	26,45	0,00118
25	0.244	1e-40	23,62	0,00146
0	0	5,04e-30	21,29	0,00170

Tabla 15. (b) Post-compensación para P= 5 dBm, L= 6.1 Km

%	Longitud DCF [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	0.976	1e-40	31,08	0,00079
75	0.732	1e-40	29,33	0,00093
50	0.488	1e-40	26,22	0,00120
25	0.244	1e-40	23,45	0,00149
0	0	5,22e-29	21,15	0,00171

Tabla 15. (a) Pre-compensación para P= 5 dBm, L= 6.1 Km

%	Longitud DCF [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	0.976	1e-40	31,08	0,00079
75	0.732	1e-40	29,33	0,00093
50	0.488	1e-40	26,22	0,00120
25	0.244	1e-40	23,45	0,00148
0	0	5,22e-29	21,15	0,00171

Tabla 16. (b) Post-ccompensación para P=10 dBm, L= 6.1 Km

%	Longitud DCF [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	0.976	1e-40	30,09	0,00078
75	0.732	1e-40	29,35	0,00091
50	0.488	1e-40	26,22	0,00119
25	0.244	1e-40	23,46	0,00147
0	0	5,86e-30	21,17	0,00170

Tabla 16. (a) Pre-compensación para P= 10 dBm, L= 6.1 Km

%	Longitud DCF [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	0.976	1e-40	31,09	0,00078
75	0.732	1e-40	29,35	0,00091
50	0.488	1e-40	26,22	0,00119
25	0.244	6,69e-31	23,46	0,00146
0	0	5,86e-30	21,17	0,00170

Tabla 17. (b) Post-compensación para P= 15 dBm, L= 6.1 Km

%	Longitud DCF [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	0.976	1e-40	30,89	0,00077
75	0.732	1e-40	29,63	0,00090
50	0.488	1e-40	26,44	0,00117
25	0.244	1e-40	23,63	0,00145
0	0	1,28e-30	21,31	0,00169

Tabla 17. (a) Pre-compensación para P= 15 dBm, L= 6.1 Km

%	Longitud DCF [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	0.976	1e-40	30,90	0,00077
75	0.732	1e-40	29,63	0,00090
50	0.488	1e-40	26,44	0,00117
25	0.244	1e-40	23,64	0,00144
0	0	1,28e-30	21,31	0,00169

PMD

Tabla 18. PMD para P= -5dBm y L= 6.1 Km

PMD [ps/√Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
0.2	1e-40	30,99	13,71	50,15
0.4	1e-40	30,99	13,71	50,15
0.6	1e-40	31,00	13,71	50,15
0.8	1e-40	31,01	13,71	50,15
1	1e-40	31,00	13,71	50,15
2	1e-40	31,28	13,71	50,15
4	1e-40	30,93	13,71	50,14
6	1e-40	31,63	13,71	50,15
8	1e-40	33,00	13,71	50,14
10	1e-40	34,37	13,71	50,14

Tabla 19 PMD para P= 0dBm y L= 6.1 Km

PMD [ps/√Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
0.2	1e-40	31,06	18,71	50,15
0.4	1e-40	31,05	18,71	50,15
0.6	1e-40	31,06	18,71	50,15

0.8	1e-40	31,07	18,71	50,15
1	1e-40	31,07	18,71	50,15
2	1e-40	31,35	18,71	50,15
4	1e-40	31,00	18,71	50,14
6	1e-40	31,71	18,71	50,15
8	1e-40	33,11	18,71	50,14
10	1e-40	34,52	18,71	50,14

Tabla 20 PMD para P= 5dBm y L= 6.1 Km

PMD [ps/√Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
0.2	1e-40	31,08	23,71	50,15
0.4	1e-40	31,07	23,71	50,15
0.6	1e-40	31,09	23,71	50,15
0.8	1e-40	31,10	23,71	50,15
1	1e-40	31,10	23,71	50,15
2	1e-40	31,38	23,71	50,15
4	1e-40	31,02	23,71	50,14
6	1e-40	31,74	23,71	50,15
8	1e-40	33,15	23,71	50,14
10	1e-40	34,58	23,71	50,14

Tabla 21 PMD para P= 10dBm y L= 6.1 Km

PMD [ps/√Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
0.2	1e-40	31,09	28,71	50,15
0.4	1e-40	31,09	28,71	50,15
0.6	1e-40	31,10	28,71	50,15
0.8	1e-40	31,11	28,71	50,15
1	1e-40	31,10	28,71	50,15
2	1e-40	31,34	28,71	50,15
4	1e-40	31,03	28,71	50,14
6	1e-40	31,74	28,71	50,15
8	1e-40	33,16	28,71	50,14
10	1e-40	34,60	28,71	50,14

Tabla 22 PMD para P=15dBm y L= 6.1 Km

PMD [ps/√Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
0,2	1e-40	31,09	33,71	50,15
0,4	1e-40	31,09	33,71	50,15
0,6	1e-40	31,10	33,71	50,15
0,8	1e-40	31,11	33,71	50,15
1	1e-40	31,10	33,71	50,15
2	1e-40	31,39	33,71	50,15
4	1e-40	31,04	33,71	50,14
6	1e-40	31,09	33,71	50,15
8	1e-40	33,17	33,71	50,14
10	1e-40	34,61	33,71	50,14

Tabla 23. PMD para P=15dBm y L= 6.1 Km con DCF al 100% con compensador MZI

PMD [ps/√Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
0,2	1e-40	36,16	39,66	50.24
0,4	1e-40	36,21	39,66	50.25
0,6	1e-40	36,21	39,66	50.24
0,8	1e-40	36,20	39,66	50.25
1	1e-40	36,32	39,66	50.25
2	1e-40	36,22	39,66	50.24
4	1e-40	36,75	39,66	50.24
6	1e-40	37,60	39,66	50.24
8	1e-40	37,46	39,66	50.21
10	1e-40	27,88	39,65	50.18
11	1e-40	29,07	39,66	50.21
12	1e-40	37,70	39,65	50.15
13	1e-40	35,55	39,66	50,24
14	1e-40	30,83	39,66	50,21
15	1.08e-17	18,80	39,66	50,19
18	8,09e-22	19,59	39,65	50,19
20	2.38e-5	12,36	39,65	50,10

ANEXO B. RESULTADOS DE SIMULACIÓN PARA EL ESCENARIO 2 (RZ-DQPSK 40Gbps)

Tabla 1. Distancia máxima para una potencia de transmisión de -5 dBm.

Distancia (Km)	BER	Factor Q (dB)	P _{RX} [dBm]
8.0	3.64e-35	21.92	-12.13
8.3	6.81e-33	21.57	-12.13
9.0	9.05e-27	20.6	-12.3
9.5	2.68e-23	19.9	-12.37
12.0	7.31e-12	16.6	-12.89
12.5	2.64e-10	15.93	-12.95
12.8	1.3e-9	15.6	-12.99

Tabla 2. Distancia máxima para una potencia de transmisión 0 dBm

Distancia (Km)	BER	Factor Q (dB)	P _{RX} [dBm]
8.0	7.12e-35	21.85	-7.11
8.2	2.39e-33	21.68	--7.07
8.5	8.9e-30	21.2	-7.13
12.5	1.47e-10	16.03	-7.9
12.9	2.2e-9	15.47	-8.02

Tabla 3. Distancia máxima para una potencia de transmisión de 5 dBm.

Distancia (Km)	BER	Factor Q (dB)	P _{RX} [dBm]
8.0	2.45e-34	21.91	-2.08
8.2	7.92e-33	21.64	-2.08
8.5	8.22e-31	21.39	-2.12
13	2.76e-9	15.4	-3.08

Tabla 4. Distancia máxima para una potencia de transmisión de 10 dBm.

Distancia (Km)	BER	Factor Q (dB)	P _{RX} [dBm]
8.0	1.02e-38	22.35	2.9
8.5	1.52e-34	21.85	2.94
8.8	1.22e-31	21.4	2.85
9	5.61e-30	15.99	2.81
13	2.5e-10	15.64	2.00
13.1	4.8e-10	15.84	1.98

Tabla 5. Distancia máxima para una potencia de transmisión de 15 dBm.

Distancia (Km)	BER	Factor Q (dB)	P _{RX} [dBm]
9.0	1e-40	22.67	7.99
9.5	1.41e-36	22.05	7.90
9.9	1.24e-32	21.59	7.81
10	3.97e-32	21.48	7.79
11	1.95e-24	20.21	7.59
12	5.62e-19	18.94	7.37
15	1.74e-9	15.57	6.8

Tabla 6. Distancia máxima para una potencia de transmisión de 20 dBm.

Distancia (Km)	BER	Factor Q (dB)	P _{RX} [dBm]
15	1e-40	23.09	11.57
15.9	5.61e-35	21.82	11.44
16	3.79e-34	21.79	11.39
23	1.04e-8	15.00	10.11

Tabla 7 Distancia máxima alcanzable, red de cuatro canales espaciados entre sí 100 GHz.

P_{TX} [dBm]	Distancia (Km)	BER	Factor Q (dB)	P_{RX} [dBm]
-5	9.0	9.05e-27	20.6	-12.3
	12.8	1.3e-9	15.6	-12.99
0	8.5	8.9e-30	21.2	-7.13
	12.9	2.2e-9	15.47	-8.02
5	8.5	8.22e-31	21.39	-2.12
	13	2.76e-9	15.4	-3.08
10	9	5.61e-30	15.99	2.81
	13.1	4.8e-10	15.84	1.98
15	12	5.62e-19	18.94	7.37
	15	1.74e-9	15.57	6.8
20	16	3.79e-34	21.79	11.39
	23	1.04e-8	15.00	10.11

Tabla 8. Máxima tolerancia a la dispersión cromática para una $P=-5$ dBm $L=9$ Km

CD [ps/nm.Km]	BER	Factor Q [dB]	P_{RX} [dBm]	$OSNR_{OUT}$ [dB]
2	1e-40	30.61	-7.28	53.20
4	1e-40	29.35	-7.39	53.21
6	1e-40	28.17	-7.33	53.24
8	1e-40	27.07	-7.32	53.33
10	1e-40	25.61	-7.34	53.23
12	1e-40	24.21	-7.33	53.75
14	1e-40	22.71	-7.34	53.62
16	1.41e-30	21.22	-7.34	53.29

18	8.14e-22	19.63	-7.34	53.18
20	7.67e-17	18.35	-7.33	53.28
22	9.92e-13	16.95	-7.34	53.01
24	1.58e-9	15.58	-7.34	53.14

Tabla 9. Máxima tolerancia a la dispersión cromática para una P= 0 dBm L=8.5Km

CD [ps/nm.Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
2	1e-40	30.43	-2.28	53.12
4	1e-40	29.59	-2.24	53.17
6	1e-40	27.67	-2.27	53.12
8	1e-40	26.90	-2.35	53.29
10	1e-40	25.68	-2.38	53.36
12	1e-40	24.32	-2.35	53.55
14	1e-40	22.77	-2.33	53.41
16	5.26e-30	21.33	-2.31	53.18
18	5.87e-23	19.89	-2.29	53.71
20	5.61e-17	18.40	-2.30	53.63
25	6.83e-9	15.17	-3.32	52.90

Tabla 10. Máxima tolerancia a la dispersión cromática para una P= 5 dBm L=8.5Km

CD [ps/nm.Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
2	1e-40	30.90	2.79	53.13
4	1e-40	29.55	2.73	53.14
6	1e-40	28.49	2.71	53.14
8	1e-40	26.32	2.70	53.28

10	1e-40	25.32	2.75	53.35
12	1e-40	24.52	2.78	53.56
14	1e-40	22.76	2.75	53.41
16	1.42e-31	21.31	2.75	53.20
18	1.56e-21	19.52	2.72	53.70
20	4.68e-16	18.21	2.68	53.69
24	1.24e-9	15.66	2.59	53.13

Tabla 11. Máxima tolerancia a la dispersión cromática para una P= 10 dBm L=9Km

CD [ps/nm.Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
2	1e-40	31.58	7.89	53.24
4	1e-40	29.37	7.69	53.21
6	1e-40	28.08	7.67	53.51
8	1e-40	26.81	7.69	53.49
10	1e-40	25.80	7.68	52.97
12	1e-40	24.17	7.65	52.74
14	1.83e-39	22.56	7.63	52.89
16	3.62e-30	21.21	7.65	53.08
18	9.28e-22	19.61	7.63	53.22
20	6.52e-16	18.07	7.62	53.43
22	1.97e-11	16.47	7.62	53.71

Tabla 12. Máxima tolerancia a la dispersión cromática para una P= 15 dBm L=12Km

CD [ps/nm.Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
2	1e-40	29.99	12.47	53.21

4	1e-40	29.54	12.54	52.86
6	1e-40	24.51	12.58	52.57
8	1e-40	27.36	12.66	53.38
10	1e-40	26.26	12.59	53.72
12	1e-40	23.51	12.51	53.14
14	1e-40	23.29	12.66	53.22
16	5.71e-31	21.32	12.58	53.63
18	9.25e-20	19.11	12.53	53.54
22	3.09e-10	15.93	12.52	53.20

Tabla 13 (b) Post-compensación para P= -5 dBm, L= 9 Km

%	Longitud DCF [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	1.44	1e-40	31.19	0,00044
75	1.08	1e-40	29.25	0,00049
50	0.72	1e-40	26.88	0,00070
25	0.36	1e-40	23.78	0,00105
0	0	2.38e-26	20.54	0,00152

Tabla 13 (a) Pre-compensación para P=-5 dBm, L= 9 Km

%	Longitud DCF [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	1.44	1e-40	31,28	0,00044
75	1.08	1e-40	29,26	0,00049
50	0.72	1e-40	26,88	0,00070
25	0.36	1e-40	23,77	0,00105
0	0	2.38e-26	20,54	0,00152

Tabla 14 (b) Post-compensación para P= 0 dBm, L=8.5 Km

%	Longitud DCF [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	1.36	1e-40	31,43	0,00044
75	1.02	1e-40	29,40	0,00047
50	0.68	1e-40	27,22	0,00067
25	0.34	1e-40	24,32	0,00098
0	0	1.32e-30	21,25	0,00141

Tabla 14 (a) Pre-compensación para P=0 dBm, L=8.5 Km

%	Longitud DCF [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	1.36	1e-40	31,44	0,00043
75	1.02	1e-40	29,41	0,00048
50	0.68	1e-40	27,22	0,00067
25	0.34	1e-40	24,31	0,00098
0	0	1.32e-30	21,25	0,00141

Tabla 15 (b) Post-compensación para P=5 dBm, L=8.5 Km

%	Longitud DCF [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	1.36	1e-40	31,5	0,00043
75	1.02	1e-40	29,43	0,00047
50	0.68	1e-40	25,38	0,00066
25	0.34	1e-40	24,33	0,00096
0	0	1.2e-30	21,26	0,00141

Tabla 15 (a) Pre-compensación para P=5 dBm, L=8.5 Km

%	Longitud DCF [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	1.36	1e-40	31,51	0,00043
75	1.02	1e-40	29,44	0,00048
50	0.68	1e-40	27,24	0,00068
25	0.34	1e-40	24,32	0,00098
0	0	1.2e-30	21,26	0,00141

Tabla 16 (b) Post-compensación para P=10 dBm, L= 9 Km

%	Longitud DCF [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	1.44	1e-40	31,51	0,00044
75	1.08	1e-40	29,36	0,00048
50	0.72	1e-40	26,94	0,00070
25	0.36	1e-40	23,82	0,00105
0	0	1.62e-26	20,57	0,00152

Tabla 16 (a) Pre-compensación para P=10 dBm, L=9 Km

%	Longitud DCF [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	1.44	1e-40	31,51	0,00044
75	1.08	1e-40	29,36	0,00049
50	0.72	1e-40	26,95	0,00070
25	0.36	1e-40	23,81	0,00105
0	0	1.62e-26	20,57	0,00152

Tabla 17 (b) Post-compensación para P=15 dBm, L=12 Km

%	Longitud DCF [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	1.92	1e-40	31,34	0,00043
75	1.44	1e-40	28,75	0,00053
50	0.96	1e-40	28,05	0,00055
25	0.36	8.72e-22	19,63	0,00168
0	0	1.03e-11	19,63	0,00223

Tabla 17 (a) Pre-compensación para P=15 dBm, L=12 Km

%	Longitud DCF [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	1.92	1e-40	31,34	0,00044
75	1.44	1e-40	28,75	0,00053
50	0.96	1e-40	25,04	0,00090
25	0.36	8.1e-22	19,63	0,00168
0	0	1.03e-11	16,55	0,00223

PMD**Tabla 18 PMD para P=-5dBm y L= de 9Km**

PMD [ps/ $\sqrt{\text{Km}}$]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
0.2	1e-40	31,16	8,90	48,98
0.4	1e-40	31,18	8,90	48,98
0.6	1e-40	31,21	8,90	48,98
0.8	1e-40	31,24	8,89	48,97
1	1e-40	31,33	8,89	48,97
2	1e-40	32,30	8,89	48,96
4	1e-40	35,54	8,89	48,97
6	1e-40	25,66	8,90	48,98
8	9.78e-9	15,10	8,90	49,00
10	4.4e-6	12.94	8,91	49,02

Tabla 19 PMD para P= 0dBm y L= 8.5 Km

PMD [ps/ $\sqrt{\text{Km}}$]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
0,2	1e-40	31,40	14,04	48.96
0,4	1e-40	31,40	14,04	48.96
0,6	1e-40	31,44	14,04	48.96

0,8	1e-40	31,46	14,04	48.97
1	1e-40	31,54	14,04	48.97
2	1e-40	32,50	14,04	49.01
4	1e-40	35.99	14,05	49.18
6	1e-40	26.81	14.05	49.04
8	1.78e-10	16.08	14.06	49.06
10	4.21e-6	13.02	14.06	49.07

Tabla 20 PMD para P= 5dBm y L= 8.5 Km

PMD [ps/√Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
0,2	1e-40	31,47	19,04	48,96
0,4	1e-40	31,48	19,04	48,96
0,6	1e-40	31,51	19,04	48,96
0,8	1e-40	31,53	19,04	48,97
1	1e-40	31,62	19,04	48,97
2	1e-40	32,59	19,04	48,98
4	1e-40	36,16	19.,04	49,01
6	1e-40	26.83	19.05	49,04
8	1.64e-10	16.08	19.06	49.06
10	4.22e-6	13.03	19.06	49.07

Tabla 21 PMD para P= 10dBm y L= 9 Km

PMD [ps/√Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
0,2	1e-40	31,47	23,90	48,98
0,4	1e-40	31,48	23,90	48,98
0,6	1e-40	31,52	23,90	48,97
0,8	1e-40	31,55	23,89	48,97
1	1e-40	31,64	23,89	48,97
2	1e-40	32,68	23,89	48,96
4	1e-40	36,22	23,89	48,96
6	1e-40	25,72	23,90	48,98
8	8e-9	15.11	23.90	49.00
10	4.33e-6	12.95	23.91	49.02

Tabla 22 PMD para P= 15dBm y L= 12 Km

PMD [ps/√Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
0,2	1e-40	31,35	28,08	49,13
0,4	1e-40	31,36	28,08	49,13
0,6	1e-40	31,39	28,08	49,14
0,8	1e-40	31,46	28,08	49,14
1	1e-40	31,56	28,09	49,15
2	1e-40	31,86	28,09	49,16
4	1e-40	31,89	28,09	49,19
6	5.18e-14	17.68	28.09	49.21
8	8.57e-8	14.36	28.09	49.19
10	2.59e-4	11.25	28.07	49.16

Tabla 23 PMD para P= 15dBm y L= 12 Km con DCF al 100% con compensador MZI

PMD [ps/√Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
0,2	1e-40	35,62	34,01	49.37
0,4	1e-40	35,54	34,01	49.38
0,6	1e-40	35,52	34,01	49.37
0,8	1e-40	35,39	34,01	49.38
1	1e-40	34.98	34,01	49.38
2	1e-40	36,06	34,01	49.39
4	1e-40	29,28	34,00	49.36
6	1e-40	31,83	33,99	49.29
8	8.6e-8	14,47	34,01	49.43
10	5,56e-30	21,12	34,00	49.30
11	1,74e-12	16,93	34,00	49.30

REFERENCIAS

- [1] D. Alzate, "Retos en la transmisión de 40/100 Gbps sobre fibra óptica", Revista en Telecomunicaciones e Informática, vol. 1, no. 2, pp. 23-60, Jul- Oct 2011.
- [2] A. Galtarossa, Polarization Mode Dispersion, Lyngby, Denmark: Board.
- [3] H. Rosenfeldt, "PMD Tolerance Testing of Optical Interfaces," [Online]. Disponible: <http://literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-7522EN.pdf>.
- [4] C. García, "DWDM y CWDM," 31 OCTUBRE 2012. [Online]. Disponible en: <https://sx-de-tx.wikispaces.com/DWDM+y+CWDM>.
- [5] S. Garrochamba, "Multiplexación por División de Longitud de Onda," abril 2012. [Online]. Disponible: <http://es.scribd.com/doc/89995790/Multiplexacion-por-division-de-longitud-de-onda#scribd>.
- [6] A. P. J. O. S. Marquez, Multiplexación por División de Onda (WDM), no publicado.
- [7] ITU-T Rec. G.694.1, "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid", TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU, Junio, 2002.
- [8] ITU-T Rec. G.694.2, "Características de los medios de transmisión – Características de los componentes y los subsistemas ópticos: Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda: Plan de multiplexación por división aproximada de longitud de onda", TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU, diciembre, 2003.
- [9] C. Astudillo, N. Hernández, "Sistemas Ópticos Multicanal", Presentación, Universidad Técnica Federico Santa María, 2007.
- [10] Communication Consultants, "Wavelength Division Multiplexing – CWDM vs DWDM", Presentación, Fargo, Julio, 2006.
- [11] Aplied Optoelectronics Centre, "WDM and DWDM Multiplexing", Presentación, School of Electronic and Communications Engineering, 2002.
- [12] M. Imran y R. Haddad. "Chirped RZ-DPSK Modulation Format in 40Gb/s WDM Transmission Systems". Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS). 2005.
- [13] ITU-T Rec. G.652, "Characteristics of a single-mode optical fiber and cable", TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU, junio, 2005.

- [14] F. Binti Mahad, A. Bin Mohd, "EDFA Gain Optimization for WDM System", University Technology Malaysia, *Elektrika* VOL. 11, NO. 1, pp. 34-37, 2009.
- [15] R. Hui, S. Zhang, B. Zhu, R. Huang, C. Allen, D. Demarest, "Advanced Optical Modulation Formats and Their Comparison in Fiber-Optic Systems", Technical Report, enero, 2004.
- [16] Avanex Corporation, "PureGain 1500, Fixed Gain, Compact EDFA with Control Electronics", datasheet, 2005.
- [17] A. Bertaina, J-L. Beylat, S. Bigo, M. W. Chbat, "Impacto de la Infraestructura de Fibra en la Transmisión por WDM", *Revista de Telecomunicaciones de Alcatel*, tercer trimestre, 1998.
- [18] I. D. T. S. E. A. M. Duilio Arnulfo Buelvas Peñarredonda, "Redes ópticas DWDM: Diseño e Implementación DWDM Optical Networks: Design and Implementation," *Visión Electrónica*, vol. 4, no. 1, pp. 70-80, enero - junio de 2010.
- [19] M. T. G. R. O. V. Ariel Leiva L., "Efectos de la Dispersión por Modo De Polarización (PMD) en la propagación de pulsos a través de Fibras Ópticas," *Revista De Ingeniería*, vol. 15, no. 3, pp. 336-343, 2007.
- [20] "Las Fibras Ópticas: Dispersión del Modo de Polarización," [Online]. Disponible: <http://lafibraoptica Peru.com/las-fibras-opticas-dispersion-del-modo-de-polarizacion/>.
- [21] K. R. S. T. J. F. M. W. D. Douglas B. Murphy, "Introduction to Optical Birefringence," [Online]. Disponible: <http://www.microscopyu.com/print/articles/polarized/birefringence-print.html>.
- [22] S. T. a. M. Edwards, AN INTRODUCTION TO THE FUNDAMENTALS OF PMD IN FIBERS, USA: CORNING, 2006.
- [23] M. Andrés, "Estudio y Caracterización de un Modulador Electroóptico Mach-Zehnder" Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación-Universidad Politécnica de Madrid, junio 2012. Disponible: <http://oa.upm.es/32771/1/Mach-Zehnder.pdf>
- [24] M. Haris, Advanced Modulation Formats for High-Bit-Rate Optical Networks, Ph. D., Georgia: Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Ago. 2008.
- [25] S. F. A. R. M. T. K. P. Zetie, "How does a Mach-Zehnder interferometer work?" [Online]. Disponible: https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall06/cos576/papers/zetie_et_al_mach_zehnder00.pdf.

[26] Ordenadores y Portátiles. Historia y beneficios de la fibra óptica en las comunicaciones [Online]. Disponible: <http://www.ordenadores-y-portatiles.com/fibra-optica.html>.

[27] G. Puerto; B. Ortega; J. Capmany; K. Ordoñez; C. Suárez. “Evolución de las redes de datos: Hacia una plataforma de comunicaciones completamente óptica”, Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia, Universidad Politécnica Valencia, Valencia España, 2008.

[28] P. Moreno. “Formatos de modulación avanzados para sistemas de comunicaciones ópticas coherentes”, Pregrado, Universidad de Sevilla, 2011.

[29] S. Zhang. “Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System”, M. S. thesis, The University of Kansas, 2005.

[30] F. Ramos Pascual. Moduladores ópticos DPSK [Online]. Disponible: <http://www.conectronica.com/Redes-Opticas/Moduladores-%C3%B3pticos-DPSK.html>.

[31] G. A. Mahdiraji; A. F. Abas. “Advanced Modulation Formats and Multiplexing Techniques for Optical Telecommunication Systems, Trends in Telecommunications Technologies”, Christos J. Bouras (Ed.), ISBN: 978-953-307-072-8, InTech 2010.

[32] A. B. Carlson “Communication Systems” Rensselaer Polytechnic Institute, Mc Graw Hill, 2002.

[33] L. W. Couch “Sistemas de Comunicación Digitales y Analógicos” University of Florida, Pearson Prentice Hall, 2008.

[34] J. E. Briceño Márquez “Principios de las Comunicaciones” Universidad de los Andes, Meridá 2005.

[35] TextosCientíficos. “Modulación”, [Online]. Disponible: <http://www.textoscientificos.com/redes/modulacion>.

[36] J.L. Rodríguez, S. Clavijo. “Modulación de Señales Digitales”, Universidad de Sevilla, 1995.

[37] D. M. García Satizabal; R. Santiago Sánchez, “Evaluación del Desempeño del Formato de Modulación CSRZ-DQPSK en una Red WDM”, Pregrado, Universidad del Cauca, 2012.

[38] F. Jacobsson. “DPSK Modulation Format for Optical Communication Using FBG Demodulador”, Department of Science and Technology, Linköpings Universitet, Norrköping, Sweden, 2004.

[39] L. Zhao; H. Shankar, "40G QPSK and DQPSK Modulation", Inphi Corporation, Sunnyvale, California, 2008.

[40] i. Rsoft-Desing Group, Optsim-Guide, Rsof Desing Group, 1989-2010.

[41] ITU-T Rec. G.652, "Characteristics of a single-mode optical fiber and cable", TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU, junio, 2005.

[42] Y. J. Chang, "Experimental Study of DQPSK in WDM Communication System" M.S. thesis, National Sun Yat-sen University, 2010.

[43] G. Gómez; J. F. Grijalba, "Análisis de Desempeño de Formatos de Modulación en Comunicaciones Ópticas sobre Redes WDM", Trabajo de grado Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, 2010.

[44] A. Garcia Perez, J. Andrade Lucio, O. G. Ibarra Manzano, M. Trejo Durán, H. Gutierrez Martín, "Efficient Modulation Formats For High Bit-Rate Fiber Transmission", Revista Acta Universitaria, Universidad de Guanajuato, Vol. 16, No. 2, pp. 17-26, 2006.

[45] B. Chomycz, "Planning Fiber Optic Networks", Ed. McGraw-Hill Professional. 2009.

[46] E. Iglesias Rodríguez, "Requisitos de los Sistemas de Comunicaciones Ópticas de muy Alta Velocidad", Pregrado, Universidad Autónoma de Madrid, 2009.

[47] D. van den Borne, "Robust Optical Transmission Systems – Modulation and Equalization", Ph.D. thesis, Eindhoven University of Technology, 2008.

[48] O. Atsunobu, T. Daisuke, K. Tomohiko, I. Shinji, "43 - Gbps RZ – DQPSK Transponder for Long-Haul Optical Transmission System", Yokogawa Technical Report English Edition, No. 46, pp. 3-6, 2008.

[49] O.Vassilieva, "40 Gb/s & 100 Gb/s Transport in the WAN", Webinar, Fujitsu Laboratories of America, Richardson, Texas, 2007.

[50] A. Abhishek Pal, "Performance Analysis Of WDM System With FBG & DCF As Compensator" Tesis de Maestría de Electrónica, Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones, Universidad de Thapar, Patiala, India, Julio de 2013.

[51] D. F. Melo Fernández, et al, "Análisis de Desempeño de Diferentes Técnicas de Compensación Ópticas y Electrónicas para la CD en Redes WDM," Entre Ciencia e Ingeniería, ISSN 0121–1129, Año 6, No. 11, pp.101-130, mayo 30 de 2012.

[52] E. Gómez, "Diseño de una compuerta lógica fotónica XOR que opera a 160Gbps utilizando un interferómetro tipo Mach-Zehnder" Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero en Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de México, Ciudad de México, México, agosto de 2009.

[53] R. Clavero Galindo, "Flip-Flops Ópticos basados en interferómetros Mach-Zehnder Activos con Realimentación" Tesis Doctoral, Departamento de Comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, mayo de 2007.

[54] H. Chen, "Development of an 80 Gbps InP-based Mach-Zehnder Modulator" Tesis de doctorado, Facultad de Electrónica e Informática, Universidad de Berlín, Berlín, Alemania, 2007.

[55] I. Suárez, et al, "Fabricación, caracterización y modelado de interferómetros Mach-Zehnder integrados en guías de onda de $\text{LiNbO}_3: \text{Zn}$," OPTOEL cuarta reunión española de optoelectrónica, pp. 1 - 6, 2005.

[56] J. Cardona, L. Fernández Campos, "Estudio de técnicas de modulación para enlaces ópticos" Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones con especialización en Sistemas de Telecomunicaciones, Escuela Politécnica Superior de Castelldefels, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España, febrero de 2010.

[57] A. Salazar, S. Chaves, "Diseño a nivel de simulación de un compensador de dispersión cromática basado en estructuras Mach Zehnder para redes DWDM a 2,5 Gbps", Trabajo de grado Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, febrero de 2015.

[58] C. del Río, P. Horche, "Fibras ópticas: Interacción dispersión-chirp en sistemas ópticos modulados directamente", Revista Óptica Pura y Aplicada, Opt. Pura Apl. 46(3), pp. 231-247, 2013.

[59] C. A. Obando Velazco, "New Methods For Measuring and Monitoring Chromatic Dispersion in Optical Communication System" Proyecto fin de carrera, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicaciones de Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España, 15 de febrero de 2010.

[60] A. J. Carmona, "Análisis de sistemas de predistorsión para moduladores electroópticos Mach-Zehnder usando el simulador Virtual Photonics Inc. (VPI)" Trabajo de fin de carrera, Escuela Politécnica Superior de Castelldefels, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España, febrero 24 de 2010.

[61] I. J. B. L. M. A. T. T. Ing. Andrés Escallón P., "INCIDENCE PARAMETERS WHICH AFFECT OPTICAL SIGNAL QUALITY ON," Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, vol. 2, No. 12, 2008.

[62] C. C. K. Chan, Optical Performance Monitoring, China: Academic Press, 2011.

[63] J. A. Dinamarca, "Análisis del Diagrama del Ojo", Reporte técnico, Universidad Técnica Federico Santa María, 2002.

[64] C. B. Pharos, "Diseño de sistemas ópticos para comunicaciones de alta capacidad (primera parte)," vol. 11, no. 2, pp. 37-50, nov. - dic. 2004.

[65] F. Apablaza, "Comunicaciones Ópticas Fundamentos - Capitulo 4," septiembre 2010. [Online]. Disponible: <http://es.slideshare.net/fapablaza/redes-de-transporte-pticas-c4-fam-ss>.

[66] D. Knipp, T. Chakma, "Optical Signal to Noise Ratio (OSNR)", International University Bremen, Spring, 2005.

[67] B. L. H.-. P. R. Hernday, MEASUREMENT OF POLARIZACION- MODE DISPERSION, HEWLETT- PACKARD COMPANY, 1995, pp. 27-33.

[68] ITU-T, Recommendation ITU-T G.652, ITU-T, 2009.

[69] G. G. -. J. F. Grijalba, Análisis del desempeño de formatos de modulación en comunicaciones ópticas sobre redes WDM, Popayán - Cauca.

[70] HUAWEI, Multi-Service Transfer Platform, HUAWEI TECHNOLOGIES CO., LTD.

[71] K. J. Hoyos Hormiga, J. S. Velez Giraldo "Impacto de las Propiedades de una Fibra Compensadora de Dispersion (DCF) en el Diseño de un Sistema WDM", Pregrado, Universidad del Cauca, 2013.

[72] R. Jones, et al, "Silicon Photonic Tunable Optical Dispersion Compensator," Optic Express, Vol.15, No.24, pp. 15836-15841, Nov, 2006.

[73] N. Chaudhary, R. Singh, "Simulative Investigation of Single Channel DWDM System with and without Dispersion Compensation Fiber at 40Gbps," IJAIR, Vol.2, ISSN: 2278-7844, pp. 127-134, 2013.

[74] G. Ducoumau, et al, "Fiber based Mach-Zehnder Interferometric structures: principles and characteristics for efficient modulation format conversion," Pro. Of SPIE, Vol.6019, pp. 60190A -1 - 60190A -9, 2005.

[75] Ma. Yunzhu, et al, "Novel optical filters configuration for dispersion compensation in high-speed WDM optical communication systems," IEEE, 1-4244-0463-0, 2006.

[76] OptSim, "Models Reference, Volumen I Sample Mode", RSoft, 2009.

[77] H. Kawashima, K. Nara, "Wideband Tunable Dispersion Compensator Using a 25-Stage PLC-MZI," *Revista Furukawa*, No.35, pp. 6-11, 2009.

[78] M. Secondini, "Optical Equalization: System Modeling and Performance Evaluation," *Journal of Lightwave Technology*, Vol.24, No.11, pp. 4013 - 4021, 2006