

**DISEÑO A NIVEL DE SIMULACIÓN DE UN COMPENSADOR DE DISPERSIÓN
CROMÁTICA BASADO EN ESTRUCTURAS MACH ZEHNDER PARA REDES DWDM A
2,5 Gbps**



**Andrés Geovany Salazar Rodríguez
Sergio Fernando Chaves Salamanca**

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
GNTT – Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones
Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de Comunicaciones
Popayán, Abril de 2015**

**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 para optar al título de Ingeniero en Electrónica y
Telecomunicaciones

**Andrés Geovany Salazar Rodríguez
Sergio Fernando Chaves Salamanca**

Director: PhD (c). José Giovanni López Perafán

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Telecomunicaciones

GNTT – Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones

Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de Comunicaciones

Popayán, Abril de 2015

Quiero expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a quienes colaboraron en la realización de este trabajo, por la orientación, motivación y apoyo recibido a lo largo de mi carrera:

A Dios creador del universo, dueño de mi vida que me ha permitido obtener este logro.

A mis padres, Gerardo Giovanni Chaves Urrutia y María del Pilar Salamanca Cobo y a mi hermano Adrián Eduardo Chaves Salamanca, por su apoyo incondicional y por enseñarme que no hay límites; que todo lo que me proponga lo puedo alcanzar porque todo depende de mí.

A mi tía Gladys Ximena Salamanca Cobo por sus valiosos consejos.

A mi compañero de Tesis Andrés Giovanni Salazar, con quien compartimos momentos difíciles pero con dedicación esfuerzo y paciencia alcanzamos nuestro objetivo.

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma, colaboraron o participaron en la realización de esta investigación, hago extensivo mi más sincero agradecimiento.

SERGIO FERNANDO CHAVES SALAMANCA

Dios mío, al meditar en las cosas que me has dado mi alma se llena de emoción, no sé cómo expresarte mi agradecimiento por este logro “Mi corazón es para ti”. A mi madre Teresa, hermana Carolina, Sobrina Camila y a toda mi familia, a mis amigos Jhon y Carlos, mi gratitud y amor profundo por su apoyo y acompañamiento en este recorrido, recordando aquellos que ya partieron, especialmente a quien fue mi padre y orientador Herney Castillo.

Gracias por siempre y este logro es de todos.

ANDRÉS GEOVANY SALAZAR RODRIGUEZ

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar queremos agradecer a nuestro director, PhD. José Giovanni López Perafán, quien compartió sus conocimientos y experiencias con nosotros para contribuir en este proceso de formación profesional.

También agradecemos al grupo GNTT y de manera muy especial al Ingeniero Gustavo Gómez por sus grandes aportes y orientación tanto a nivel científico como personal, los cuales enriquecieron en gran medida el trabajo de grado realizado.

Finalmente, nuestros más sinceros agradecimientos a todas las personas, familiares compañeros y amigos que de una u otra forma con sus consejos y sugerencias aportaron constantemente para conseguir este logro.

Mil gracias a todos ustedes, por el acompañamiento.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DWDM, EFECTOS LINEALES, TIPOS DE COMPENSADORES Y FUNCIONAMIENTO DEL MZI.....	3
1.1 Sistemas WDM.....	3
1.1.1 Sistema CWDM.....	4
1.1.2 Sistema DWDM.....	5
1.2 Factores para el Diseño de un Sistema DWDM.....	9
1.2.1 Transmisor	10
1.2.1.1 Fuentes ópticas.....	10
1.2.1.2 Modulación del haz de luz.....	11
1.2.1.3 Potencia de transmisión óptica.....	11
1.2.1.4 Formatos de modulación.....	12
1.2.1.5 Espaciamiento entre canales ópticos	12
1.2.1.6 Velocidad de transmisión	13
1.2.2 Medio de transmisión óptico	13
1.2.2.1 Fibra óptica	13
1.2.2.2 Distancia del enlace óptico.....	14
1.2.2.3 Amplificador	14
1.2.2.4 Regenerador	16
1.2.3 Receptor.....	17
1.2.3.1 Factor Q.....	17
1.2.3.2 BER	18
1.2.3.3 OSNR	19
1.2.3.4 Diagrama del Ojo	19
1.2.3.5 Formula básica para encontrar la potencia en recepción	20
1.3 Efectos Lineales	21
1.3.1 Atenuación	22
1.3.2 Dispersión por Modo de Polarización	22
1.3.3 Dispersión Cromática	24
1.3.3.1 ITU-T G.652.....	25
1.3.3.2 ITU-T G.653.....	25
1.3.3.3 ITU-T G.655.....	25
1.4 Tipos de Compensadores para la CD.....	27
1.4.1 Interferómetro Mach Zehnder	28
1.4.1.1 Configuración Push Pull.....	31
1.4.1.2 Configuración Asimétrica	32

2	METODOLOGÍA Y ESCENARIO DE SIMULACIÓN	33
2.1	Simulador	33
2.2	Metodología de Simulación.....	34
2.2.1	Creación del Escenario y Casos de Estudio para la Simulación	34
2.2.1.1	Escenario de Simulación.....	35
1.	Formato de Modulación NRZ-OOK.....	36
2.	Formato de Modulación RZ-OOK	37
2.2.1.2	Casos de Estudio	38
a.	Caso 1	38
b.	Caso 2.....	39
2.2.2	Parámetros Técnicos de los Escenarios de Simulación	39
2.2.3	Ejecución de la Simulación	46
2.2.3.1	Plan de Pruebas	46
2.2.3.2	Proceso de Simulación	46
2.2.4	Análisis y Validación de los Resultados de la Simulación	46
3	ANÁLISIS Y DISEÑO DEL MÓDULO COMPENSADOR DE CD BASADO EN ESTRUCTURAS MZI.....	48
3.1	Funcionamiento en Simulación del Dispositivo MZI Dual-arm Ideal	51
3.2	Diseño del Módulo Compensador de CD.....	53
3.3	Retardo del Módulo Compensador de CD	56
4	ANÁLISIS DE LA CD EN UNA RED DWDM A 2.5Gbps SIN Y CON COMPENSACION UTILIZANDO FORMATOS DE MODULACION NRZ-OOK/RZ-OOK	59
4.1	Caso de Estudio 1	59
4.1.1	Red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps sin el Compensador de CD	59
4.1.2	Red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps con el Compensador de CD	59
4.1.3	Análisis de los Resultados Obtenidos de la Red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps sin y con el Módulo Compensador de CD.....	60
4.1.4	Análisis de la CD	63
4.1.4.1	Distancia Máxima del Medio de Transmisión Óptico sin el Compensador de CD.....	64
4.1.4.2	Cálculo de la CD total en la red óptica	65
4.1.4.3	Desempeño de la red óptica sin y con el compensador de CD.....	66
4.1.4.4	Distancia Máxima Límite de la Red Óptica con el Módulo Compensador de CD y el EDFA.....	68
4.2	Caso de Estudio 2	70
4.2.1	Red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps sin el Compensador de CD	70
4.2.2	Red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps con el Compensador de CD	71

4.2.3	Análisis de los Resultados Obtenidos de la Red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps sin y con el Módulo Compensador de CD	72
4.2.4	Análisis de la CD	74
4.2.4.1	Distancia Máxima del Medio de Transmisión Óptico sin el Compensador de CD.....	74
4.2.4.2	Cálculo de la CD total en la red óptica	76
4.2.4.3	Desempeño de la red óptica con y sin la compensación de la CD	76
4.2.4.4	Distancia Máxima Límite de la Red Óptica con el Módulo Compensador de CD y el EDFA.....	78
4.3	Análisis de Resultados Finales de los Dos Casos de Estudio.....	80
5	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	83
5.1	Conclusiones.....	83
5.2	Recomendaciones.....	84
5.3	Trabajos Futuros	84
	BIBLIOGRAFÍA.....	85
	ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
	ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
	ACRÓNIMOS.....	XV

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
CAPÍTULO 1	
Figura 1.1 Sistema DWDM para largas distancias [18]	6
Figura 1.2 Representación del espectro electromagnético para establecer las longitudes de onda en los sistemas CWDM y DWDM [14].....	7
Figura 1.3 Sistema de comunicación óptico [15].....	9
Figura 1.4 Comparación del Ancho Espectral de un Diodo Láser y LED [17].....	11
Figura 1.5 Estructura Básica de una Fibra Óptica [15].....	14
Figura 1.6 Esquema de funcionamiento de un amplificador óptico semiconductor [18]....	15
Figura 1.7 Relación entre la distribución de ruido Gaussiana y la BER [22].....	18
Figura 1.8 Definición de la OSNR [58]	19
Figura 1.9 Diagrama de Ojo [29].....	20
Figura 1.10 Clasificación Efectos Lineales [34].....	21
Figura 1.11 Atenuación a diferentes longitudes de onda y banda de trabajo [56].....	22
Figura 1.12 Efecto de la PMD [20].....	23
Figura 1.13 Límites de la PMD a distintas velocidades de transmisión de datos [35].....	24
Figura 1.14 Efecto de la CD [35].....	25
Figura 1.15 Dispersión en función de la longitud de onda para los tipos de fibras más utilizadas [33].....	26
Figura 1.16 Variación de la dispersión según los materiales y el tipo de guía de onda para los tipos de fibra más comunes [20].....	27
Figura 1.17 Métodos de Compensación de Dispersión [31]	28
Figura 1.18 Diagrama básico del Mach Zehnder [32].....	29
Figura 1.19 Esquema de modulación externa [33]	30
Figura 1.20 Arquitectura del MZI [32].....	30
Figura 1.21 Función de transferencia del MZI en configuración Simétrica [32].....	31
Figura 1.22 Función de transferencia del MZI en configuración Asimétrica [32].....	32
CAPÍTULO 2	
Figura 2.1 Escenario y Casos de simulación	35

Figura 2.2 Escenario de simulación de una red DWDM a 2,5Gbps.....	35
Figura 2.3 Diagrama 1. Diagrama del Ojo, Diagrama 2. Espectro Óptico; de una señal con formato de modulación NRZ-OOK [2]	36
Figura 2.4 Diagrama 1. Diagrama del Ojo; Diagrama 2. Espectro Óptico; de una señal con formato de modulación RZ-OOK para un ciclo de trabajo del 33% [2]	37
Figura 2.5 Caso de estudio NRZ-OOK sin módulo compensador de CD	38
Figura 2.6 Caso de estudio NRZ-OOK con módulo compensador de CD	38
Figura 2.7 Caso de estudio RZ-OOK sin módulo compensador de CD	39
Figura 2.8 Caso de estudio RZ-OOK con módulo compensador de CD.....	39

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 Comparación de espectros ópticos de los dispositivos Mach Zehnder.....	48
Figura 3.2 Bloque MZI Dual-arm Ideal y estructura interna [45]	49
Figura 3.3 Función de transferencia del MZI Dual-arm Ideal.....	49
Figura 3.4 Simulación del MZI Dual-arm Ideal en un sistema Back To Back.....	51
Figura 3.5 Espectro óptico de las dos ramas del MZI Dual-arm Ideal, en un sistema Back To Back	52
Figura 3.6 Escenario para cada arreglo MZI Dual-arm Ideal en pre-compensación	54
Figura 3.7 Diagrama del módulo compensador de CD.....	55
Figura 3.8 Escenario de simulación del módulo compensador de CD en un sistema Back to Back, para encontrar el retardo en sus dos componentes MZI	56

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 Escenario de simulación de la red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps sin el compensador de CD.....	60
Figura 4.2 Escenario de simulación de la red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps utilizando el compensador de CD diseñado.....	60
Figura 4.3 Esquema del espectro óptico de la red sin (Back to Back) y con el módulo compensador de CD Vs Frecuencia	61
Figura 4.4 Diagrama de ojo de la red sin compensación (Back to Back) (a), Diagrama del ojo de la red con el módulo compensador de CD (b)	61

Figura 4.5 (a) Pulso eléctrico de la señal antes del compensador de CD, (b) Pulso eléctrico de la señal después del compensador de CD.....	63
Figura 4.6 Escenario de simulación de la red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps sin la compensación de la CD.....	64
Figura 4.7 Distancia máxima del medio de transmisión óptico sin el módulo compensador de CD	65
Figura 4.8 Diagrama del ojo sin compensar la CD para una distancia de 63Km a la frecuencia de trabajo de 193,4THz	66
Figura 4.9 Diagrama del ojo con compensación de la CD para una distancia de 63Km a la frecuencia de trabajo de 193,4THz	66
Figura 4.10 Escenario de simulación de la red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps para determinar la distancia máxima compensada por el módulo.....	68
Figura 4.11 Distancia máxima que puede alcanzar el medio de transmisión óptico al utilizar el compensador de CD	68
Figura 4.12 Diagrama del ojo con compensación de la CD a 86km y frecuencia de trabajo de 193,4THz.....	68
Figura 4.13 Distancia máxima límite que puede alcanzar en el medio de transmisión óptico amplificando la señal compensada	69
Figura 4.14 Diagrama del ojo de la señal compensada a 107km y amplificada a la frecuencia de trabajo de 193,4THz	69
Figura 4.15 Escenario de simulación de la red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps sin el compensador de CD.....	71
Figura 4.16 Escenario de simulación de la red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps utilizando el modulo compensador de CD	71
Figura 4.17 Esquema del espectro óptico de la red sin (Back to Back) y con el módulo compensador de CD vs Frecuencia	72
Figura 4.18 Diagrama de ojo de la red sin compensación (Back to Back) (a), Diagrama del ojo de la red con el módulo compensador de CD (b)	72
Figura 4.19 (a) Pulso eléctrico de la señal antes del compensador de CD, (b) Pulso eléctrico de la señal después del compensador de CD.....	74
Figura 4.20 Escenario de simulación de la red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps sin la compensación de la CD.....	75

Figura 4.21 Distancia máxima del medio de transmisión óptico sin el módulo compensador de CD	75
Figura 4.22 Diagrama del ojo sin compensar la CD para una distancia de 63Km a la frecuencia de trabajo de 193,4THz	76
Figura 4.23 Diagrama del ojo con compensación de la CD para una distancia de 63Km a la frecuencia de trabajo de 193,4THz	76
Figura 4.24 Escenario de simulación de la red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps para determinar la distancia máxima compensada por el módulo.....	78
Figura 4.25 Distancia máxima que puede alcanzar el medio de transmisión óptico utilizando el compensador de CD	78
Figura 4.26 Diagrama del ojo con compensación de la CD a la frecuencia de trabajo de 193,4THz.....	78
Figura 4.27 Distancia máxima límite que puede alcanzar en el medio de transmisión óptico amplificando la señal compensada	79
Figura 4.28 Diagrama del ojo de la señal compensada y amplificadas a la frecuencia de trabajo de 193,4THz	79

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
CAPÍTULO 1	
Tabla 1.1 Parámetros básicos de un sistema CWDM para redes MAN [14].....	5
Tabla 1.2 Parámetros de una sistema DWDM para redes MAN y de larga distancia [14] ..	9
Tabla 1.3 Parámetros típicos del amplificador tipo EDFA para longitudes de onda de 980- 1480nm [21].....	15
Tabla 1.4 Parámetros típicos que caracterizan a los amplificadores ópticos tipo, EDFA, Raman y SOA [18].....	16
Tabla 1.5 Parámetros típicos para niveles de sensibilidad en fotodiodos PIN y ADP [22]	17
Tabla 1.6 Máxima tolerancia de la PMD a diferentes velocidades de transmisión de datos	23
CAPÍTULO 2	
Tabla 2.1 Parámetros ópticos y geométricos de la fibra con recomendación ITU-T G.652D [24][27][47].....	40
Tabla 2.2 Parámetros ópticos y geométricos de la fibra con recomendación ITU-T G.655 [24][47]	41
Tabla 2.3 Frecuencias centrales y espaciamiento entre canales	41
Tabla 2.4 Planes de frecuencia para un espaciamiento entre canales de 100 GHz	42
Tabla 2.5 Parámetros ópticos de una red DWDM a 2,5Gbps para cortas distancias [23].	43
Tabla 2.6 Parámetros ópticos de una red DWDM a 2,5Gbps para largas distancias [23].	44
Tabla 2.7 Parámetros de diseño para un sistema DWDM a 2,5Gbps de largas distancias	45
Tabla 2.8 Parámetros para el diseño de la red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps [Anexo A] .	45
CAPÍTULO 3	
Tabla 3.1 Comparación y elección del MZI de mayor rendimiento	49
Tabla 3.2 Límites del ancho de banda y retardo del MZI Dual-arm Ideal.....	51
Tabla 3.3 Parámetros de prueba del sistema Back to Back con MZI Dual-arm Ideal	52

Tabla 3.4 Resultados del espectro óptico de las dos ramas del MZI.....	52
Tabla 3.5 Comparación entre los arreglos MZI Dual-arm Ideal	55
Tabla 3.6 Resultados para determinar el mejor retardo en la configuración del módulo compensador de CD.....	57

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1 Resultados de la configuración Back to Back para las diferentes frecuencias de trabajo	62
Tabla 4.2 Variación de la CD total en la red óptica, para cada frecuencia de trabajo	65
Tabla 4.3 Desempeño de la Red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps sin y con la compensación de la CD para una distancia de 63Km.....	67
Tabla 4.4 Mejora del Factor Q y el Jitter producto de la compensación de la CD.....	67
Tabla 4.5 Desempeño total de la Red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps compensado el fenómeno de la CD y corrigiendo el efecto de la atenuación	70
Tabla 4.6 Resultados de la configuración Back to Back para las diferentes frecuencias de trabajo	73
Tabla 4.7 Desempeño de la Red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps con y sin la compensación de la CD para una distancia de 63Km.....	77
Tabla 4.8 Mejora del Factor Q y el Jitter producto de la compensación de la CD.....	77
Tabla 4.9 Desempeño total de la Red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps compensado el fenómeno de la CD y corrigiendo el efecto de la atenuación	80
Tabla 4.12 Resultados finales comparando los sistemas DWDM NRZ-OOK/RZ-OOK sin y con el módulo compensador de CD para distintos porcentajes de desempeño	82

ACRÓNIMOS

APD	<i>Avalanche Photodiode</i> , Fotodiodo de Avalancha.
BER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit.
CD	<i>Chromatic Dispersion</i> , Dispersión cromática.
CWDM	<i>Coarse wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda Ligeramente.
DCF	<i>Dispersion Compensating Fibers</i> , Fibras Compensadoras de Dispersión.
DGD	<i>Differential Group Delay</i> , Retardo Diferencial de Grupo.
DPSK	<i>Differential Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial.
DQPSK	<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase por Cuadratura Diferencial.
DSF	<i>Dispersion-Shifted Fiber</i> , Fibra de Dispersión Desplazada.
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División en Longitud de Onda Densa.
EAM	<i>Electro Absorption Modulator</i> , Modulador de Electro-Absorción.
EDC	<i>Electronic Dispersion Compensator</i> , Compensador de Dispersión Electrónica.
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> , Amplificador de Fibra Dopada con Erbio.
erfc	<i>Complementary Error Function</i> , Función de Error Complementaria.
ESNR	<i>Electrical Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido Eléctrica.
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i> , Fibras de Rejillas de Bragg.
FWM	<i>Four Wave Mixing</i> , Mezcla de Cuatro Ondas.
GVD	<i>Group Velocity Dispersion</i> , Dispersión de Velocidad de Grupo.
ISP	<i>Internet Service Provider</i> , Proveedor de Servicios de Internet.
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> , Unión Internacional de las Telecomunicaciones.

LD-Chirp	<i>Length Dispersion-Chirp</i> , Longitud de Dispersión del Chirp
LED	<i>Light-Emitting Diodes</i> , Diodo Emisor de Luz.
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i> , Red de Área Metropolitana.
MZI	<i>Mach Zehnder Interferometer</i> , Interferómetro Mach Zehnder.
NF	<i>Noise Figure</i> , Figura de Ruido
NRZ	<i>Non Return to Zero</i> , No Retorno a Cero.
NZDSF	<i>Non Zero Dispersion Shifted Fiber</i> , Fibra Óptica de Dispersión Desplazada No Nula.
OADM	<i>Optical Add /Drop Multiplexers</i> , Modulador de Extracción e Inserción Óptico.
ODC	<i>Optical Dispersion Compensator</i> , Compensador de Dispersión Óptica.
OFA	<i>Optical Fiber Amplifier</i> , Amplificador de Fibra Óptica.
OOK	<i>On Off Keying</i> , Modulación de Intensidad.
OPM	<i>Optical Performance Monitoring</i> , Monitoreo del Desempeño Óptico.
OSNR	<i>Optical Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido Óptica.
PIN	<i>Positive Intrinsic Negative Photodiode</i> , Fotodiodo Positivo Intrínseco Negativo.
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i> , Dispersión por Modo de Polarización.
SOA	<i>Semiconductor Optical Amplifier</i> , Amplificador Óptico Semiconductor.
SPM	<i>Self-Phase Modulation</i> , Auto-Modulación de Fase.
RZ	<i>Return to Zero</i> , Retorno a Cero.
SMF	<i>Single Monomodo Fiber</i> , Fibra Monomodo.
VBS	<i>Variable Bandwidth Simulation</i> , Técnica de Ancho de Banda Variable.
XPM	<i>Cross Phase Modulation</i> , Modulación de Fase Cruzada.

INTRODUCCIÓN

Actualmente la demanda de información es muy alta por parte de los usuarios y es por ello que se hace necesario implementar en las redes de comunicaciones ópticas, dispositivos que permitan mejorar la calidad y el procesamiento de los datos. También es importante hacer un uso adecuado de los formatos de modulación para combatir los efectos lineales y no lineales del canal de comunicación. De acuerdo a lo mencionado anteriormente, hoy en día el formato de Modulación de intensidad (OOK, *On-Off Keying*) por ser el más sencillo y comúnmente utilizado en la transmisión de datos por medios ópticos, alcanzó sus límites. De esta manera, surgen nuevos formatos con el fin de aumentar la calidad en los enlaces de los sistemas ópticos, que permiten aprovechar la infraestructura de red existente. Es así, como para poder obtener una red totalmente óptica y eficiente, se necesita dejar atrás la conversión de los datos de información de una señal Eléctrica-Óptica-Eléctrica (E/O/E) y de esta manera, minimizar las degradaciones que se presentan en dicha red, en especial el fenómeno de la Dispersión Cromática (CD, *Chromatic Dispersion*) [1].

Los diferentes formatos de modulación existentes que actualmente presentan un buen desempeño en la transmisión de datos en las redes de comunicaciones ópticas DWDM, respecto al esquema de modulación clásico OOK, son: el formato de Modulación de Desplazamiento de Fase Diferencial (DPSK, *Differential Phase Shift Keying*), el formato de Modulación de Desplazamiento de Fase Diferencial por Cuadratura (DQPSK, *Differential Quadrature Phase Shift Keying*), entre otros. Por lo tanto, se han realizado investigaciones con el fin de transmitir datos a grandes velocidades utilizando los canales ya existentes de las redes DWDM que operan desde los 2.5Gbps. Una de las posibilidades para disminuir el efecto de la CD, es utilizar bien los formatos de modulación nombrados anteriormente con la ayuda de dispositivos lógicos ópticos, que son indispensables en las redes que requieren transmisión de datos a alta velocidad [2][56].

La aplicación de la lógica Booleana en el estudio de las comunicaciones ópticas, facilita el análisis y diseño de dispositivos ópticos, para el buen funcionamiento de las redes ópticas que requieren alto rendimiento y fiabilidad en la transmisión de paquetes de información, por ejemplo: en el tratamiento y reconocimiento de ráfagas o paquetes de datos, conmutación de paquetes, regeneración de las longitudes de onda que transportan información y la codificación/decodificación de información.

Con la utilización e implementación de compuertas lógicas AND, XOR y arreglos entre ellas, Amplificadores Ópticos de Semiconductor (SOA, *Semiconductor Optical Amplifier*), Moduladores de Electro-Absorción (EAM, *Electro Absortion Modulator*), esquemas que utilizan Modulación de Fase Cruzada (XPM, *Cross Phase Modulation*), y esquemas realizados a través de Rejillas de Bragg (FBG, *Fiber Bragg Grating*), se ha logrado realizar trabajos en diferentes ámbitos como son: módulos de amplificación de potencia óptica, dispositivos o fuentes generadoras de las longitudes de onda, entre otras, que han

contribuido al mejoramiento y desarrollo de diferentes arquitecturas de las redes ópticas para transmisión de datos a velocidades a partir de los 2,5Gbps hasta 40Gbps [1][3][5].

Los trabajos e investigaciones que se han realizado con los diferentes dispositivos lógicos, arreglos de Interferómetros Mach Zehnder (MZI, *Mach Zehnder Interferometer*) y amplificadores de potencia, poseen muchas ventajas prácticas y eficientes en el bajo consumo de energía, baja latencia, mejoramiento en la modulación de las señales portadoras, alta estabilidad y sobre todo la integración de dispositivos para que un sistema DWDM mejore su desempeño [42][49].

Para el desarrollo de este trabajo de grado, se utilizan los siguientes formatos de modulación: OOK -No Retorno a Cero (NRZ, *Non Return to Zero*) y el formato OOK-Retorno a Cero (RZ, *Return to Zero*), para realizar un análisis comparativo entre ellos en presencia y ausencia de un módulo compensador de CD, diseñado a partir de MZIs que permita disminuir el fenómeno de la dispersión en una red DWDM a 2,5Gbps.

1 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DWDM, EFECTOS LINEALES, TIPOS DE COMPENSADORES Y FUNCIONAMIENTO DEL MZI

En los sistemas DWDM, al realizar una mala elección de los esquemas de modulación y de los dispositivos que se requieren en dicha red, presentan inconvenientes o dificultades en la transmisión de información. La Unión Internacional de las Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunication Union*), propone que entre nodos de una red de comunicación óptica, se llevan a cabo diferentes procesos de: amplificación, control, transmisión, recepción, codificación, decodificación, modulación, demodulación y la conmutación de paquetes de datos, por lo cual se requiere hacer un buen diseño del sistema, para obtener una red confiable y eficiente [4].

Debido a la gran cantidad de información, altas velocidades en la transmisión de datos e incremento de las distancias entre los nodos de una red DWDM, se generan desfases en las señales portadoras y traslape en las señales moduladas que transportan la información hacia el receptor de datos, generados por los diferentes Efectos Lineales como son: la Atenuación, Ruido, CD y Dispersión por Modo de Polarización (PMD, *Polarization Mode Dispersion*) y los Efectos No Lineales como: XPM, Mezcla de Cuatro Ondas (FWM, *Four Wave Mixing*), Modulación de Auto-Fase (SPM, *Self-Phase Modulation*), entre otros, presentes en cada canal óptico y considerando también el deterioro de la información debido a los fenómenos físicos intrínsecos que afectan el medio de transmisión óptico [7].

En el desarrollo de este capítulo, se dan a conocer las características más importantes de un sistema DWDM, como son: La descripción modular, el despliegue en las redes interurbanas de alta velocidad o Redes de Área Metropolitana (MAN, *Metropolitan Area Network*), los efectos lineales que afectan considerablemente la transmisión de datos en este sistema y las características fundamentales de los dispositivos MZI.

En el desarrollo de este trabajo de grado, se hace énfasis en los efectos lineales, específicamente en la CD y NO en los efectos no lineales, ya que la CD es el fenómeno que se busca compensar.

1.1 Sistemas WDM

Un sistema WDM, utiliza la técnica de multiplexación para combinar dos o más señales ópticas a través de portadoras que tienen diferente longitud de onda que viajan por un medio de transmisión óptico, de esta manera se explota el ancho de banda que ofrece este medio [15].

El incremento del ancho de banda en las redes de telecomunicaciones, genera la necesidad de aumentar la capacidad en los sistemas de comunicación óptica por medio de técnicas de multiplexación y demultiplexación eficientes.

WDM, ha demostrado ser eficiente para transmitir información a grandes velocidades y sin perturbaciones de la señal, sin embargo, para tráficos de información mayor a 10Gbps, es necesaria la utilización de grandes potencias para transmitir datos, debido a que empiezan a aparecer los efectos lineales y no lineales los cuales causan degradaciones en estos [8].

Por otro lado, las demandas de aumento en la capacidad de transmitir información en las redes MAN son cada vez mayores, debidas a la introducción de nuevos servicios y aplicaciones, donde las redes de acceso y las troncales para largas distancias que hacen interfaz con las redes MAN; requieren hacer eficiente el ancho de banda.

Los sistemas WDM, tienen la capacidad de adaptarse a cualquier entorno de red por su gran flexibilidad, robustez, transparencia y sobre todo el gran ancho de banda que sirve para ofrecer una diversidad de servicios y protocolos de red. Sin embargo, estos sistemas ópticos tienen sus desventajas en sus inicios, porque no estaban desplegados comúnmente en el área comercial y sus dispositivos tenían un costo muy elevado [4][6].

Dado lo anterior, se presentan dos evoluciones del sistema que se adaptan específicamente a un entorno metropolitano. Entre ellos están: la Multiplexación por División de Longitud de Onda Ligeras (CWDM, *Coarse wavelength Division Multiplexing*) y DWDM para cortas y largas distancias.

1.1.1 Sistema CWDM

Se utilizó en un principio, para transportar señales de video en fibra óptica multi-modo, fue estandarizado por la ITU-T, en la norma G.694.2 [13].

Este sistema utiliza la separación de longitudes de onda de 20nm en un rango de 1270 a 1610nm, de esta manera, puede transportar hasta 18 longitudes de onda y soportar velocidades de canal de hasta 2.5Gbps, para distancias no superiores a los 80 km, por un medio óptico mono-modo como lo indica la recomendación de la ITU-T G.652 [27].

Los sistemas CWDM, tienen mayor espaciamiento entre canal para las longitudes de onda con respecto a sistemas DWDM. Por lo tanto, este sistema puede utilizar una fuente láser con un mayor ancho de banda espectral y con un haz de luz no tan confinado o compacto como los que requieren los sistemas DWDM, lo cual significa que la longitud de onda puede continuar en banda por el medio de transmisión óptico así tenga esta imperfección de fabricación y sin importar los cambios de temperatura que se somete la fuente láser [18].

Este sistema utiliza la regeneración optoelectrónica entre cada canal óptico que transporta información, debido, a que este sistema esta acondicionado para trabajar en redes MAN, donde la información debe atravesar nodos de la red para llegar a su destino. Por lo tanto, la técnica de regenerar la información en CWDM, es más simple y menos cara que utilizar amplificadores.

La técnica de regenerar, se utiliza para compensar la dispersión que causa el deterioro de la información, es decir, que se debe realizar una reconstrucción, amplificación y temporización de esta; a diferencia de realizar una amplificación óptica, que implica, la utilización de Fibras Compensadoras de Dispersión (DCF, *Dispersion Compensation Fiber*) las cuales son muy costosas y requieren una etapa de pre-amplificación, debido a la alta atenuación que introduce [14].

En la tabla 1.1, se describen los parámetros básicos de un sistema CWDM.

Parámetro	CWDM MAN
Distancia típica (Km)	80 kilómetros
Bandas de operación	O,E,S,C,L
Canales de transmisión por fibra óptica	4-16
Espaciamiento entre canales	20nm (25GHz)
Velocidad de transmisión por canal óptico	2.5Gbps
Velocidad de transmisión por fibra óptica	20-40Gbps
Amplificación	Ninguna
Costos	Bajos

Tabla 1.1 Parámetros básicos de un sistema CWDM para redes MAN [14]

1.1.2 Sistema DWDM

Las redes DWDM, han crecido en el campo de las telecomunicaciones durante los últimos 17 años, permitiendo grandes avances en los equipos que conforman la arquitectura de una red de telecomunicaciones óptica como son: los amplificadores de fibra óptica, equipos moduladores y demoduladores de señales ópticas, las fuentes láser que generan las diferentes longitudes de onda y la técnica DWDM. Esto ha permitido, incrementar la capacidad de los sistemas de transmisión ópticos, sin alterar la arquitectura de redes ya existentes [4].

Los sistemas que conforman una red DWDM, se distinguen de otras redes de alta velocidad, por ser más flexibles, robustas, tener mayor aprovechamiento del ancho de banda y ser eficientes en el transporte de grandes cantidades de información, aumentando considerablemente su capacidad de un punto a otro de la red de fibra óptica. Esto se debe, gracias a la posibilidad de transmitir varias señales ópticas (longitudes de onda) dentro de un mismo medio de transmisión y a las altas tasas de transmisión de datos que soporta cada una de ellas, en las bandas C y L [4][10].

Esto quiere decir, que el sistema DWDM se caracteriza por utilizar la multiplexación y demultiplexación de diferentes longitudes de onda óptica, generada por un haz de luz de una fuente láser coherente, donde cada señal óptica es tratada de forma independiente,

de acuerdo a la velocidad de datos (tráfico que manejan) y la modulación que utilicen. De esta manera, se logra una alta capacidad, un gran ancho de banda que facilita las comunicaciones direccionales y bidireccionales en los sistemas DWDM para soportar todos los servicios que brindan los operadores de diferentes compañías; como los Proveedores de Servicios de Internet (ISP, *Internet Service Provider*), que satisfacen la demanda por el aumento de usuarios que hacen uso de todos los servicios que incorpora la red de alta velocidad DWDM, como son: video, audio, datos y multimedia de alta definición, entre otros [7][15].

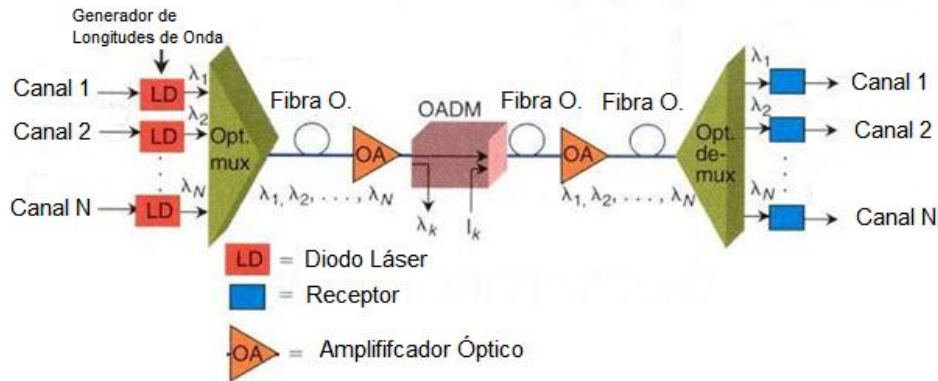


Figura 1.1 Sistema DWDM para largas distancias [18]

La Figura 1.1 muestra el esquema básico de un sistema DWDM para largas distancias, constituido por equipos transmisores generadores de longitudes de ondas (fuente emisora de luz coherente o diodo láser), un multiplexor óptico DWDM, el medio de transmisión (fibra óptica), amplificadores ópticos, Multiplexores de Extracción e Inserción de Señales Ópticas (OADM, *Optical Add /Drop Multiplexers*), demultiplexor óptico DWDM y los receptores de cada canal o longitud de onda.

Para la generación de señales ópticas, el equipo que se utiliza es un transmisor láser mono-modo o diodo láser, el cual inserta un haz de luz coherente a una longitud de onda determinada y estabilizada sobre cada canal. Posteriormente, cada longitud de onda ingresa al multiplexor óptico DWDM para combinar las diferentes señales transmitidas, y enviarlas al medio de transmisión. Cada señal óptica portadora al viajar por el medio de transmisión experimenta pérdidas debido a los efectos lineales y no lineales. Es así, como para minimizar estos efectos, el medio de transmisión está equipado con amplificadores ópticos para compensar la atenuación, DCF y OADM. Finalmente, las señales ópticas multiplexadas llegan al receptor que utiliza filtros ópticos (demultiplexores ópticos DWDM), que se encargan de separar o combinar un determinado número de canales ópticos, con diferentes longitudes de onda, que contienen la información correcta, las cuales son entregadas a los foto-detectores respectivos [18].

De acuerdo a lo anterior, DWDM actualmente tiene grandes ventajas, debido a que el sistema de telecomunicaciones óptico se desempeña eficientemente ya que presta sus

servicios de red al aprovechar todo el ancho de banda que ofrece el medio de transmisión, lo que permite aumentar la capacidad del sistema, gran cobertura y la flexibilidad de adaptarse a cualquier entorno de red ya existente, sin modificar su arquitectura, gracias a la utilización de los multiplexores OADM.

Además, DWDM se caracteriza porque los dispositivos que utiliza como: amplificadores ópticos de alta ganancia, para un rango definido de longitudes de onda, al ser acoplados en línea con el medio de transmisión, actúan como repetidores, eliminando de esta manera, los regeneradores de señal eléctrico-óptico-eléctrico [15].

Es de notar, que los sistemas DWDM, han evolucionado enormemente abarcando distancias cada vez mayores y mejorando la capacidad respecto al sistema CWDM, debido a que el espaciamiento entre las longitudes de onda que maneja es menor, lo que permite aumentar el número de canales para mejorar el transporte de información. La separación y asignación de los canales de información (longitudes de onda), a través de un medio de transmisión de fibra óptica, se establecen de acuerdo a las recomendaciones G.694.1 [12] y G.694.2, definidas por la ITU.

La recomendación ITU-T G.694.1, indica que la separación entre canales debe ser inferior a 100GHz y maneja típicamente separaciones de 12,5GHz, 25GHz, 50GHz, 100GHz. Además, hacen uso de una separación de 200GHz.

En la Figura 1.2 se muestra el espectro electromagnético de los sistemas ópticos CWDM y DWDM:

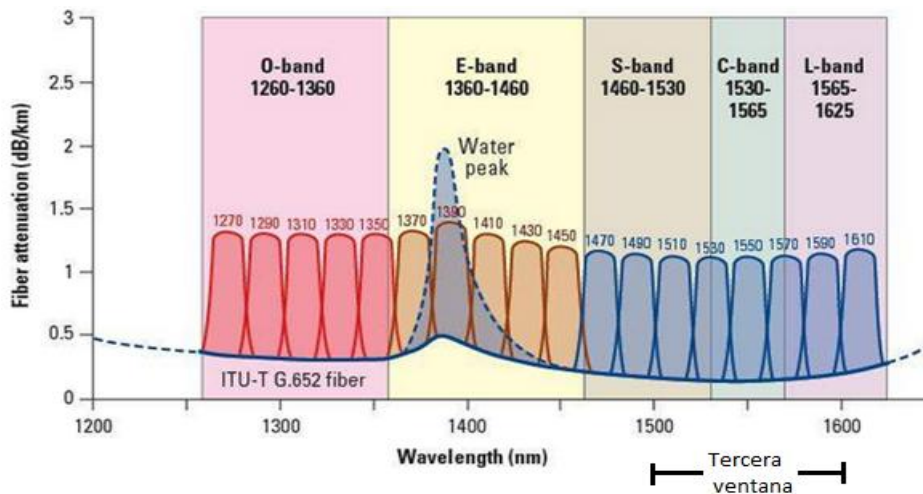


Figura 1.2 Representación del espectro electromagnético para establecer las longitudes de onda en los sistemas CWDM y DWDM [14]

Como se observa en la Figura 1.2, las 5 bandas espectrales que están definidas por la ITU, establecen que las comunicaciones ópticas que abarcan largas distancias deben utilizar un rango de los 1260 a 1625nm. Estas bandas, se designan según las características de la fibra óptica, para realizar el diseño de una red y determinar el rendimiento del sistema [18].

A continuación, se define las regiones o bandas que utilizan los sistemas de comunicaciones ópticos:

- Banda original (O-band), 1260 a 1360nm
- Banda extendida (E-band), 1360 a 1460nm
- Banda corta (S-band), 1460 a 1530nm
- Banda convencional (C-band), 1530 a 1565nm
- Banda larga (L-band), 1565 a 1625nm

La ITU-T en su recomendación G.694.1, establece que los sistemas DWDM trabajen en la región del espectro electromagnético que se define en la tercera ventana, los cuales abarcan longitudes de onda desde los 1500nm a 1625nm, donde se encuentran las bandas de operación S, C y L. Específicamente, este sistema trabaja con longitudes de onda de 1530nm a 1625nm, limitadas por las bandas C y L como se muestra en la Figura 1.2 [12][14].

DWDM, utiliza dispositivos que generan longitudes de onda cercanas a los 1550nm. La recomendación de la ITU-T G.692 [16], establecen 43 canales ópticos en un rango de 1530nm a 1565nm con un espaciamiento entre canales de 100GHz y para un control de tráfico por cada canal óptico mayor a 2,5Gbps.

En la actualidad, DWDM evoluciona enormemente para manejar grandes volúmenes de información, para esto, los sistemas ópticos comerciales trabajan con 16,40 y 80 canales, y se espera que más adelante se implementen para 128 canales.

Los sistemas DWDM, utilizan un espaciado entre canales de 100 y 50 GHz para 40 y 80 canales ópticos respectivamente. Cada canal tiene un determinado ancho de banda alrededor de la longitud de onda central y no utiliza una única longitud de onda. Por esta razón, la separación de los canales por frecuencia es importante, porque indica que tan próximo están entre si y cada banda se separa una de otra por una zona o banda de guarda en el orden de los GHz, para evitar interferencias y solapamiento entre los canales ópticos adyacentes [9][14][16].

Las redes DWDM metropolitanas se diferencian de las redes de ultra larga distancia, principalmente, porque disminuyen costos en la infraestructura de red óptica, debido a que no necesitan demasiados dispositivos (principalmente varios amplificadores ópticos) ya que con su arquitectura en anillo, permiten ofrecer flexibilidad, protección de canal y de línea. Para ultra largas distancias, se utilizan longitudes de onda que deben estar dentro del ancho de banda de los Amplificadores de Fibra Dopados con Erblio (EDFA, *Erbium-Doped Fiber Amplifier*), que operan en las bandas C y L como se muestra en la Figura 1.2 [11][14].

En la Tabla 1.2, se describen los parámetros y las diferencias básicas de un sistema DWDM MAN/Ultra largo alcance.

Parámetro	DWDM MAN / WAN	DWDM Ultra Largo Alcance
Distancia (Km)	Cientos de kilómetros	Miles de kilómetros
Bandas de operación	O,E,S,C,L (Típicamente la C y L)	S,C,L
Canales de transmisión por fibra óptica	32-80	80-160
Espaciamiento entre canales	0.8nm(100GHz)	0.4nm(50GHz)
Velocidad de transmisión por canal óptico	10Gbps	10-40Gbps
Velocidad de transmisión por fibra óptica	100-1000Gbps	Mayores a 1Tbps
Amplificadores	EDFA	EDFA, Raman
Costos	Bajo-Medio	Medio-Alto

Tabla 1.2 Parámetros de una sistema DWDM para redes MAN y de larga distancia [14]

De acuerdo a la Tabla 1.2, se puede decir que los sistemas DWDM para ultra largas distancias, disponen de un ancho de banda mayor que permiten la utilización de más longitudes de onda a diferencia de los sistemas DWDM metropolitanos; por esta razón, es posible, que los sistemas DWDM metropolitanos utilicen filtros, amplificadores, fuentes ópticas entre otros dispositivos de menor complejidad y de costos mucho más bajos.

1.2 Factores para el Diseño de un Sistema DWDM

Los medios de transmisión ópticos, actualmente han logrado ser los más evolucionados para transmitir información a grandes tasas de velocidad en el orden de los Gbps.

En un sistema de comunicaciones óptico se realiza codificación, modulación y multiplexación de los datos de información que se transmiten, lo que permite una gran eficiencia, en la calidad de la trasmisión y recepción de datos, Figura 1.3 [8][15].

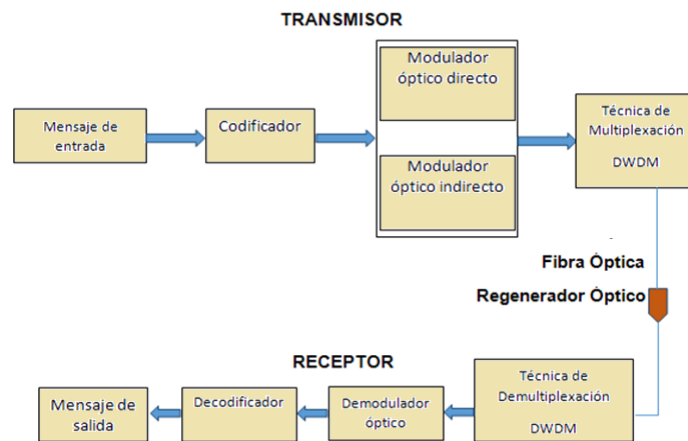


Figura 1.3 Sistema de comunicación óptico [15]

A continuación, se describen los dispositivos y los parámetros que definen una conexión de un sistema de comunicaciones óptico punto a punto, que consta de los siguientes dispositivos de red como son: el transmisor, medio de transmisión óptico, regenerador y receptor.

1.2.1 Transmisor

En un sistema de comunicaciones óptico, el transmisor cumple la función principal de convertir una señal eléctrica generada por una fuente en una señal óptica, cuando se transmite la señal de información esta es codificada por un protocolo de comunicaciones (SONET, ATM, entre otros, etc.), que se encarga de organizar y dar forma a la señal que se enviará; luego, esta se modula en los formatos RZ-OOK y NRZ-OOK como se propuso en un principio y posteriormente se realiza la multiplexación, para ser transmitidas por un medio óptico, donde este se encarga de encaminar la onda portadora que lleva la información hacia el receptor o destino [1][7][15].

El módulo del transmisor está compuesto por: una fuente óptica, codificador, modulador y los parámetros que caracterizan a cada dispositivo.

1.2.1.1 Fuentes ópticas

Generalmente, los sistemas de comunicaciones ópticos para transmitir datos utilizan fuentes ópticas como son: Los láseres semiconductores y Diodos Emisores de Luz (LEDs, *Light-Emitting Diodes*).

El diodo LED es utilizado generalmente en sistemas de comunicaciones que utilizan como medio de transmisión la fibra óptica multi-modo; además, es usado especialmente para transmitir a velocidades de datos inferiores a los 2,5Gbps porque su tiempo de respuestas está en los 7ns. Por otro lado, los sistemas de comunicaciones que trabajan con fibra óptica mono-modo, utilizan láser, debido a dos razones:

- Estos sistemas, necesitan transmitir a altas velocidades y un tiempo de respuesta mucho menor que los diodos emisores de luz. Este tiempo está alrededor de los 0,1ns.
- Presentan una mayor eficiencia de acoplamiento, debido a que su haz de luz está más confinado, es decir, produce un haz más coherente que el de una fuente LED.

Las fuentes láser, con relación a la generación de la señal portadora de información la podemos clasificar en: fuente láser sintonizable y fuente láser no sintonizable. Respecto a la primera, esta se encarga de generar diferentes longitudes de onda, mientras que la segunda, tiene restricción, debido a que solo puede generar una sola longitud de onda [14][15][17].

En la Figura 1.4, se muestra un ejemplo de la comparación del ancho espectral del diodo láser y el LED.

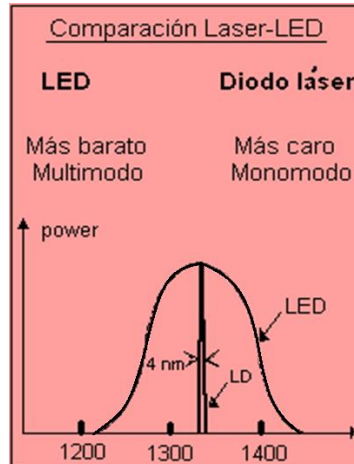


Figura 1.4 Comparación del Ancho Espectral de un Diodo Láser y LED [17]

1.2.1.2 Modulación del haz de luz

Una fuente de luz puede ser modulada mediante la utilización de un modulador directo o indirecto.

- **Modulador Directo:** controla de forma directa la alimentación de la fuente LED o Láser y es modulada instantáneamente por el mismo, antes de ser transmitida la señal de información.
- **Modulador Indirecto:** se encarga de controlar el índice de refracción de un cristal y de llevar a cabo el proceso de modulación de la señal luz, que es alimentada por un láser de longitud de onda continua.

En la técnica de modulación directa, al trabajar a altas velocidades de transmisión de datos, genera degradación en la señal de información debido a efectos lineales y no lineales que cambian o alteran la fase en la señal modulada. Por lo anterior, en el presente trabajo de grado se utilizará el modulador indirecto, ya que puede trabajar a altas velocidades y largas distancias sin degradar mucho la señal de información y así obtener un alto desempeño y estabilidad en sistemas DWDM [15][19][20].

1.2.1.3 Potencia de transmisión óptica

Se define como el flujo de energía que atraviesa un determinado punto o espacio en un tiempo específico, es decir, la cantidad necesaria de energía que debe suministrar la fuente óptica a la señal portadora de información para que viaje a través del medio óptico en un tiempo determinado.

La potencia de transmisión óptica puede variar en un sistema de comunicaciones óptico, dependiendo de la aplicación que se desee realizar con la fuente láser, las distancias que

se quieran cubrir en el enlace y el formato de modulación a utilizar. De esta manera, la potencia de la fuente láser aumenta o disminuye el suministro del nivel de energía que debe inyectar para la transmisión de la señal o señales portadoras de información, donde varía desde algunos micro-watts hasta más de 100 mili-watts. El valor típico o general de potencia que usualmente se utiliza en las fuentes láser para redes ópticas, oscila entre los 0- 7dBm; para un rango de potencia que está definido desde 1mW hasta aproximadamente 10mW en estas fuentes láser, como por ejemplo: el diodo láser (Fabry-Perot), su potencia de inyección es de 2mW hasta 10mw aproximadamente, sin embargo, hay diodos láser que solo pueden inyectar una potencia de 1mW como mínimo [14][20].

1.2.1.4 Formatos de modulación

Los formatos de modulación en los sistemas de comunicaciones ópticos, permiten disminuir en cierto porcentaje algunas degradaciones generadas por los efectos lineales y no lineales en las señales de transmisión de datos, debido a las altas velocidades y el recorrido de largas distancias de estas.

La modulación más utilizada o difundida en los sistemas de comunicaciones ópticos es la Modulación OOK de baja complejidad, más sencillo de implementar y de bajo costo, debido a que requiere de un bajo ancho de banda eléctrico en los transmisores y receptores. Actualmente, estos formatos de modulación alcanzan sus límites en las comunicaciones ópticas, porque crece considerablemente la demanda en la transmisión de datos a altas velocidades (mayores a los 10Gbps) para largas distancias superiores a los 80Km. Por lo tanto, se han implementado esquemas de modulación más robustos como son: DPSK, DQPSK, entre otros [2,60].

En un sistema DWDM, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos a la hora de seleccionar un formato de modulación: La tolerancia al fenómeno o efecto que se desea contrarrestar y la velocidad de transmisión de información [14][60].

1.2.1.5 Espaciamiento entre canales ópticos

El espaciamiento entre los canales en un sistema de comunicaciones óptico, es de gran importancia en el diseño de un sistema que requiera alta velocidad en la transmisión de datos para bajas, mediana y largas distancias; indica que tan espaciadas están las longitudes de ondas centrales respecto a los canales adyacentes (espaciamiento entre canales), para evitar interferencias y solapamientos entre los canales ópticos que transmiten diferente información. De esta manera, un canal óptico en un sistema DWDM se define, como el ancho de banda que se encuentra alrededor de una longitud de onda central asociado a un láser para la transmisión de las señales portadoras de información [12][18].

Por lo tanto, este parámetro nos ayuda a determinar qué tanta información puede transmitirse dependiendo del espaciamiento que exista entre los canales ópticos. De esta

manera, se puede establecer con que potencia, distancia y formato de modulación, entre otros parámetros, se deben utilizar para una buena recepción de los datos de información.

1.2.1.6 Velocidad de transmisión

Es un parámetro importante porque permite identificar en qué sistema de comunicación óptico de la familia WDM se debe trabajar, además de las distancias máximas alcanzables a las que se pueden acceder, para transmitir la información con una velocidad adecuada. Así mismo, se define con que equipos pasivos o activos se puede utilizar para el control o manejo de los efectos lineales y no lineales, que degradan las señales de información cuando viajan por el medio de transmisión óptico.

En la actualidad, las velocidades que se han logrado en los sistemas de comunicaciones ópticos son cada vez mayores y están en continua evolución. En los sistemas de comunicaciones DWDM se han logrado velocidades de transmisión desde los 2,5Gbps hasta 100Gbps [7][14].

1.2.2 Medio de transmisión óptico

Es el encargado que los datos que transporta la señal portadora lleguen de manera adecuada al receptor. En este caso, se refiere a la fibra óptica, un medio de transmisión que se diferencia de otros, como por ejemplo el coaxial, por las altas velocidades de información que puede transportar por un canal óptico, el cual consta de un filamento o hilo de vidrio dopado de tierras raras con diámetros de longitud muy pequeños en el orden de las micras. Esta transporta grandes volúmenes de información y es inmune a campos electromagnéticos los cuales se encargan de adicionar ruido en la información.

Todo medio de transmisión, por lo general degrada la información que se transmite debido a las propiedades físicas propias del medio y a las distorsiones generadas por los efectos lineales. Para minimizar estos efectos, se debe utilizar o seleccionar un formato de modulación, donde su función principal es contrarrestar las distorsiones generadas por estos. Además, el medio de transmisión, está sujeto a la distancia del enlace que conforma un sistema de comunicaciones óptico, dependiendo de este factor o parámetro, el medio de transmisión debe utilizar dispositivos de amplificación o regeneración, para reconstruir las señales portadoras de datos y equilibrar las pérdidas que se presentan en el enlace [7][14].

1.2.2.1 Fibra óptica

Después de realizar la modulación de la señal, esta es multiplexada y posteriormente transmitida a través del canal de fibra óptica la cual se determina por su apertura numérica y se clasifica en multi-modo y mono-modo. La fibra óptica multi-modo, tiene un haz de luz que se propaga por reflexiones luminosas y puede generar pérdidas en la señal de 0,7 dB/Km. La fibra óptica mono-modo, tiene menores pérdidas en la propagación de la transmisión de la señal portadora, alrededor de 0,35 dB/Km. Por tanto,

los sistemas DWDM la utilizan debido a que esta ofrece mayor capacidad de transporte de información, destacándose la Fibra Mono-Modo Estándar (SSMF, *Standard Single Mode Fiber*) del fabricante Corning® company, de la cual se observaran sus características principales más adelante [15][19].



Figura 1.5 Estructura Básica de una Fibra Óptica [15]

Los medios de comunicaciones ópticos, son hechos con base a una preforma de vidrio, que está constituida por diferentes mezclas de componentes como son: el Titanio (Ti), Fosforo (P), Boro (B), Germanio (Ge), Indio (In), Galio (Ga), y con dopajes de tierras raras, que se encargan de generar impurezas en la preforma. De esta manera, se puede controlar, incrementar o disminuir el índice de refracción en la fibra óptica que se desea para una determinada aplicación [15].

1.2.2.2 Distancia del enlace óptico

Este factor, está ligado a la distancia que existe entre el transmisor y receptor de un sistema de comunicaciones óptico y repercute en la señal portadora de información, debido a la atenuación y la dispersión que esta produce. Estos dos fenómenos se estudian más adelante cuando se aborde el estudio de los efectos lineales.

1.2.2.3 Amplificador

Los Amplificadores de Fibra Óptica (OFA, *Optical Fiber Amplifier*), se clasifican como componentes ópticos activos, es decir, un dispositivo que tiene una función electrónica activa, para el suministro de la potencia adecuada a una señal. Por esta razón, el amplificador no hace la conversión de señales eléctricas a ópticas y viceversa; solamente se encarga de amplificar la señal que viaja por el medio de transmisión; para recuperar la potencia de la señal óptica perdida [14][18][20].

A continuación, se describen las características de los tipos de amplificadores que usualmente se utilizan para amplificar señales que se transmiten en los enlaces de un sistema de comunicaciones óptico.

➤ Amplificador de Fibra Dopado con Erblio

Son los que mejor desempeño tienen frente a otros dispositivos de amplificación que también están dopados con tierras raras, debido a que este tiene una buena optimización en el suministro de energía (varias decenas de mW). Por lo tanto, se logra conseguir bajos niveles en la señal óptica de entrada y permiten alcanzar ganancias muy altas hasta de 50dB.

Los amplificadores EDFA, utilizan las transiciones de bombeo de 530, 665, 800, 980 y 1480nm. Estos usualmente trabajan con las transiciones de bombeo de 980-1480nm, debido a que cuando se inyecta la señal óptica de entrada con una longitud de onda como por ejemplo de 1480nm hacia el amplificador EDFA, generan una señal de respuesta o salida aumentada muchas veces en su intensidad, es decir, totalmente amplificada, lo cual se logra gracias a que el componente Erblio excita a varios niveles de energía, cuando son estimulados con una fuente de bombeo de 1480nm [18][20][21].

La Tabla 1.3, indica los parámetros típicos que utiliza el Amplificador tipo EDFA, para trabajar con las longitudes de onda de bombeo de 980-1480nm:

Parámetros del EDFA	Longitud de Onda 980 [nm]	Longitud de Onda 1480 [nm]
Eficiencia de Bombeo [dB/mW]	10	5
Figura de Ruido [dB]	3-4,5	5,5
Potencia de Salida [dBm]	5	20
Ganancia [dB]	50	40
Potencia de Bombeo [mW]	10-20	50-200

Tabla 1.3 Parámetros típicos del amplificador tipo EDFA para longitudes de onda de 980-1480nm [21]

➤ Amplificador Óptico Semiconductor

El SOA, trabaja como un láser. Está compuesto por tres capas de material semiconductor como se muestra en la Figura 1.6, donde la capa intermedia contiene la región activa.

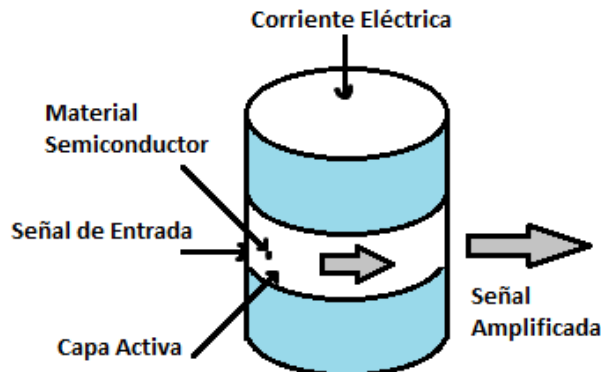


Figura 1.6 Esquema de funcionamiento de un amplificador óptico semiconductor [18]

La Figura 1.6, representa los elementos de un amplificador óptico semiconductor. Para que se amplifique la señal óptica, se debe inyectar una corriente eléctrica que excite los niveles de energía de los electrones del material semiconductor de la región central. Una vez realizada esta operación, al dispositivo se le inyecta una señal que transporta fotones para que estos realicen estimulación en los electrones dentro del material semiconductor. Durante la estimulación, se generan colisiones entre estos, donde se

expulsa otro fotón que simplemente pasa a coincidir con el fotón que causó la emisión. De esta manera, se determina la cantidad de fotones que representa una sección de una señal, la cual se duplica y así es como ocurre la amplificación de la señal.

Es así, como este tipo de amplificadores no alcanza a proporcionar una amplificación como la que realiza los amplificadores EDFA, sin embargo, se utilizan para amplificar señales de longitudes próximas y un poco distantes de los 1300nm [18][20][26].

➤ **Amplificador Raman**

El Amplificador Raman, se encarga de inyectar con una bomba láser, una señal de corta longitud de onda. Está en unión con la señal portadora, viajan a través del medio de transmisión óptico, donde esparcen algunos átomos de la fibra óptica, generando pérdidas de energía en estos y a su vez ganando fotones a la señal portadora, dando como resultado una señal portadora amplificada [18].

Este tipo de amplificadores se utiliza en aplicaciones específicas por ser muy costosos, debido a que requieren de una fuente de bombeo más potente que la de los EDFA, pero se pueden utilizar, en configuraciones híbridas con amplificadores EDFA [20].

La Tabla 1.4, muestra la comparación de los tres tipos de amplificadores más usados en los enlaces ópticos:

Parámetro	Amplificador EDFA	Amplificador Raman	Amplificador óptico Semiconductor
Ganancia [dB]	30	20-25	10-20
Potencia de Salida	Alta	Alta	Baja
Potencia de Entrada	Moderada	Alta	Alta
Cross-talk	Bajo	Bajo	Muy alto
Aplicación	Redes MAN y de larga distancia	Redes de larga distancia	Redes de corta distancia

Tabla 1.4 Parámetros típicos que caracterizan a los amplificadores ópticos tipo, EDFA, Raman y SOA [18]

1.2.2.4 Regenerador

Para la regeneración de las señales que se transmiten por un medio óptico, se consideran tres tipos de regeneradores [15]:

- El regenerador 1R, puede comportarse totalmente óptico u opto-electrónico, según en la red que se transmita la señal de información. El regenerador opto-electrónico, se encarga de convertir la señal óptica en una señal de pulsos eléctricos, donde este modula el haz de la señal óptica de la fuente luminosa, para reconstruir la potencia que se transmite en principio. Por el contrario, el regenerador óptico, se encarga de realizar la amplificación de la señal óptica, sin la conversión óptico-eléctrica, empleando el EDFA. Una desventaja, es que este

regenerador puede amplificar los ruidos que se filtran en la señal de información a medida que viaja por el canal o medio óptico.

- El regenerador 2R, se encarga de amplificar la señal y reconstruye la señal envolvente. Está constituido por un regenerador 1R y un comparador de señales. Agrega gran cantidad de fluctuaciones de frecuencia a la señal que se transmite. En la actualidad está en fase experimental.
- Regenerador 3R, donde su función es amplificar, recuperar, y sincronizar la señal envolvente. De esta manera, se eliminan los ruidos que adquiere la señal cuando viaja por el medio de transmisión óptico. El regenerador 3R, es básicamente un regenerado 2R con etapas donde se emplea procesamiento de la señal, para recuperar la sincronización del reloj y la señal de información.

1.2.3 Receptor

El receptor en sistemas DWDM, utiliza la foto-detección para recuperar y demodular las señales de información que se demultiplexaron. El proceso de la foto-detección en el receptor, consiste en convertir la señal óptica en pulsos eléctricos decodificados, para esto utiliza un Fotodiodo Positivo Intrínseco Negativo (PIN, *Positive Intrinsic Negative Photodiode*) o un Fotodiodo de Avalancha (APD, *Avalanche Photo Diodes*), donde el fotodiodo PIN responde con mayor eficiencia y rapidez respecto al APD. Sin embargo, este tiene mayor sensibilidad para la detección de señales en recepción [15].

Según la recomendación ITU-TO.201 [22], para sistemas de comunicaciones ópticos, establece un rango de niveles de entrada óptica o niveles de sensibilidad que puede manejar el receptor para distintas velocidades de datos, ver Tabla 1.5.

Fotodiodo de recepción para velocidades binarias múltiples	Nivel de sensibilidad [Gbps]	Velocidad de trasmisión [Gbps]
Diodo PIN	-6 a -13	10,7
Diodo APD	-9(por definir)	
Fotodiodo de recepción para velocidades binarias únicas		
Diodo PIN	-6 a -13	9,95 hasta 10,7
Diodo APD	-9 (por definir)	
		-18 a -25

Tabla 1.5 Parámetros típicos para niveles de sensibilidad en fotodiodos PIN y ADP [22]

1.2.3.1 Factor Q

El Factor Q, es un parámetro de monitoreo de especial importancia para obtener un buen desempeño en las redes de fibra óptica, por lo que se va a trabajar en el desarrollo del presente proyecto con un gran énfasis.

De acuerdo a la recomendación ITU-T O.201, se define como la Relación Señal/Ruido Eléctrica (ESNR, *Electrical Signal to Noise Ratio*), en el circuito de decisión de un receptor de señal digital.

Este factor, se utiliza para determinar el desempeño de un sistema de comunicaciones óptico, donde la recomendación ITU-T G.sup39 [24] establece que para una BER de $1e-12$, corresponde un Factor Q aproximado de 7,03 y se puede expresar así:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad (1.1)$$

Donde;

μ_0 = Nivel medio de tensión de nivel "0".

μ_1 = Nivel medio de tensión de nivel "1".

σ_0 = Desviación típica de la distribución de ruido en el nivel "0".

σ_1 = Desviación típica de la distribución de ruido en el nivel "1".

1.2.3.2 BER

La Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*), en los sistemas de comunicaciones ópticos, permite medir la cantidad de bits errados respecto a los transmitidos en la recepción de datos. Usualmente es afectado por fenómenos como la dispersión e incremento del ruido en el medio de transmisión óptico, entre otros. Estos efectos negativos, se pueden contrarrestar usando métodos, diseños y técnicas en la compensación de la dispersión del enlace óptico, incrementando la potencia, y reduciendo las perdidas en esta [22][23].

Matemáticamente la BER se puede expresar de la siguiente manera:

$$BER = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu - \mu_0}{\sqrt{2} \sigma_0} \right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_1 - \mu}{\sqrt{2} \sigma_1} \right) \quad (1.2)$$

En la Figura 1.7, se puede apreciar la relación que existe entre la distribución de ruido Gaussiano y la BER.

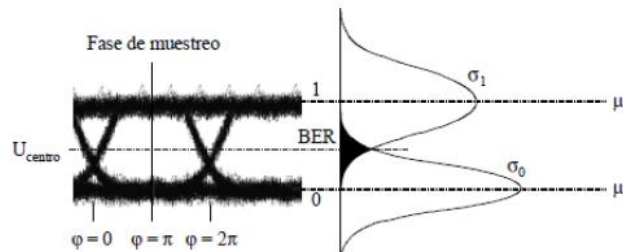


Figura 1.7 Relación entre la distribución de ruido Gaussiana y la BER [22]

También existe una relación entre la BER y el Factor Q, la cual se puede expresar según la ecuación (1.3):

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

La recomendación ITU-T G.698.1 [23], establece que para sistemas DWDM con velocidades de 2,5Gbps, con separación entre canales de 100Ghz, utiliza un valor máximo de BER de 1e-12.

1.2.3.3 OSNR

La Relación Señal a Ruido Óptico (OSNR, *Optical Signal to Noise Ratio*), es muy importante y está directamente relacionada con la BER. Esta dada en dB y mide la relación de la potencia de la señal con respecto a la potencia de ruido en un canal óptico [57].

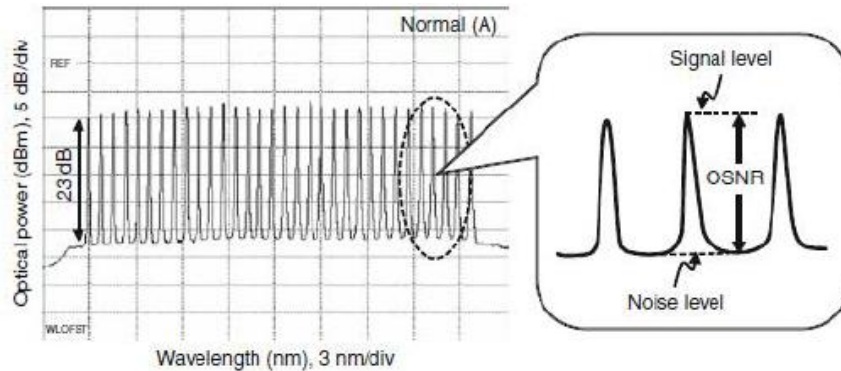


Figura 1.8 Definición de la OSNR [58]

La Figura 1.8, muestra la degradación de la señal óptica que la ocasionan diversos factores como por ejemplo: las características de la fibra (atenuación, PMD y CD), características de transmisión (formatos de modulación, separación entre canales, entre otros) y características de otros elementos de red como son amplificadores y filtros.

Matemáticamente, la OSNR se puede expresar como:

$$OSNR = 10 \log \frac{P_i}{N_i} + 10 \log \frac{B_n}{B_r} \quad (1.4)$$

Donde;

P_i = Potencia óptica de la señal.

B_n = Ancho de banda equivalente de ruido.

N_i = Valor promedio de la potencia de ruido.

B_r = Ancho de banda óptico de referencia, con un valor típico de 0.1nm.

La ITU-T recomienda una OSNR en el rango de 0dB a 42dB para potencias <25dBm [22].

1.2.3.4 Diagrama del Ojo

Es de gran importancia, ya que permite analizar las formas de onda, que se transmiten en un canal óptico y deducir parámetros que determinan la calidad de la señal como son: el Factor Q y la BER. Además, se puede observar la superposición de las combinaciones de "1s" y "0s" en un rango de tiempo [29].

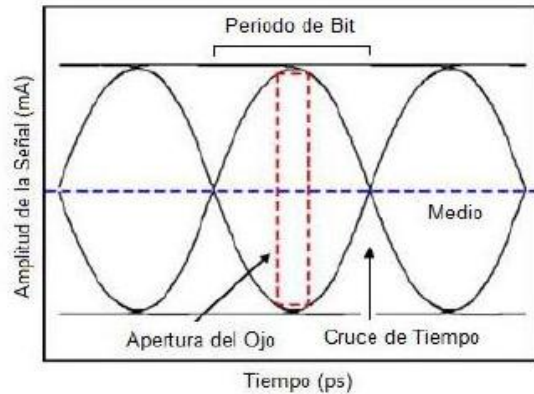


Figura 1.9 Diagrama de Ojo [29]

En la Figura 1.9, se puede apreciar dos tipos de cruces: de tiempo, el cual indica la apertura y cierre del ojo y de amplitud, el cual muestra el nivel de voltaje, que produce la apertura y cierre del ojo para un periodo de bit.

1.2.3.5 Formula básica para encontrar la potencia en recepción

La expresión (1.5), sirve para determinar la potencia en recepción que debe tener una señal portadora, pero no determina un balance de potencia total del enlace óptico; debido a que se debe incluir el margen de seguridad en el cálculo de la atenuación máxima (A_{max}) si no se ha incluido en principio y las penalidades del enlace óptico.

$$Prx = Ptx - Amax \quad (1.5)$$

Donde;

Prx =Potencia de recepción (dBm).

Ptx = Potencia de transmisión (dBm).

Amax = Atenuación máxima (dB).

Para determinar el balance de potencia de un enlace de comunicaciones óptico, se deben incluir las siguientes penalidades, debido al fenómeno de reflexión y dispersión:

- La penalidad por reflexión, se debe a la pérdida por reflexión en la interfaz fibra-fotodiodo de recepción, se considera un valor no mayor de 0,5dB.
- La penalidad por dispersión, se considera la degradación en sensibilidad de recepción, debida a la deformación de los pulsos por dispersión. Para determinar esta degradación, se hace uso de la ecuación (1.6) recomendada por la ITU-T:

$$Pd [dB] = 3,86 * (Dc * W * L * R)^2 \quad (1.6)$$

Donde;

Dc = Coeficiente de dispersión cromática en (ps/nm*Km).

W = Ancho espectral de la fuente de luz en (nm) a -3dB.

L = Longitud del enlace en (Km).

R = Velocidad de bits en (bits/s).

Por lo general la penalidad de dispersión, está dada por el fabricante de fibra óptica, donde consideran como un valor practico o típico en el orden de 0,5dB [23].

De acuerdo a todos los factores analizados, el balance de potencia total de un enlace óptico queda determinado por la expresión (1.7) [59]:

$$Pr(min) [dBm] = Ptx - (Amax + Pn) \quad (1.7)$$

Donde;

Pr (min) = Sensibilidad mínima que debe detectar el receptor (dBm).

Ptx = Potencia de transmisión (dBm).

Amax = Atenuación máxima (dB).

Pn = Penalidades totales del enlace (dB).

1.3 Efectos Lineales

En los sistemas de comunicación por fibra óptica, se encuentran diferentes efectos; los cuales condicionan de alguna manera la velocidad de transmisión de datos y las distancias que se pueden abarcar. Entre ellos están los efectos: No Lineales y los Lineales [14].

Como se mencionó al inicio del capítulo, se tendrán en cuenta solamente los efectos lineales, en especial la dispersión cromática, ya que éste efecto en particular, es el que se desea compensar. Figura 1.10.

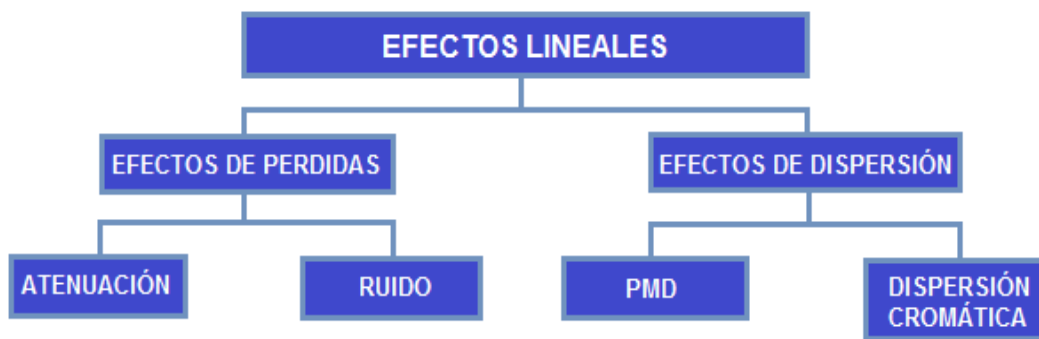


Figura 1.10 Clasificación Efectos Lineales [34]

Los efectos lineales, son degradaciones que se presentan en la transmisión sobre fibra óptica, que limitan el desempeño de las redes. Al tener tasas de transmisión altas, menor es la tolerancia a estos efectos [34].

1.3.1 Atenuación

La atenuación o pérdida, es la disminución de la potencia de la señal cuando se transmite sobre un enlace de fibra óptica. Es un factor muy importante a tener en cuenta ya que establece la distancia máxima que la señal puede viajar en un enlace óptico, para obtener una buena recepción de esta. Diferentes factores la originan, entre ellas: La radiación, La absorción, Scattering o esparcimiento del material y Pérdidas por curvatura [25].

La atenuación en un enlace de fibra óptica se muestra en la ecuación (1.8):

$$A(\lambda) = 10 \log(P1(\lambda)/P2(\lambda)) \quad (1.8)$$

Donde;

λ = Longitud de onda en particular.

P1 (λ) = Potencia de la señal transmitida.

P2 (λ) = Potencia de la señal recibida.

La longitud de onda está directamente relacionada con la frecuencia ($\lambda = c/f$, donde $c = 3 \cdot 10^8$ m/s).

Dependiendo del tipo de fibra, en redes DWDM, se han conseguido manejar coeficientes de atenuación menor o igual a 0,2dB/km y con grandes anchos de banda.

En la Figura 1.11, se aprecia la atenuación a diferentes longitudes de onda y su banda de trabajo, mostrando que en la banda C se presenta la menor atenuación por debajo de los 0,2dB/km [25][56].

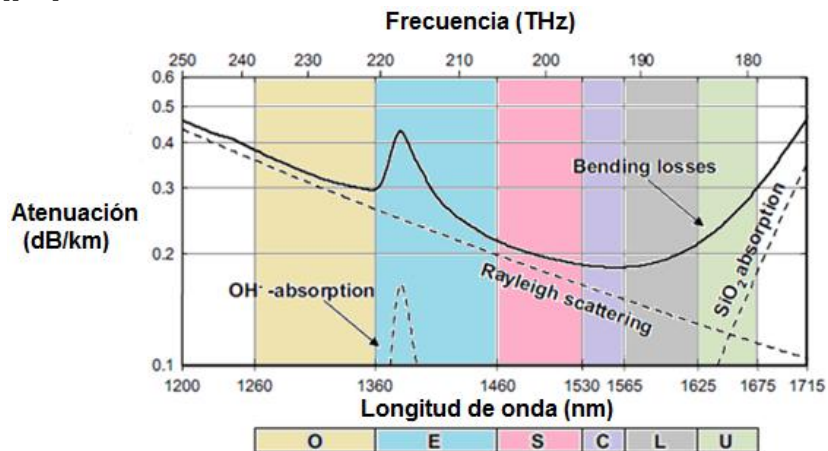


Figura 1.11 Atenuación a diferentes longitudes de onda y banda de trabajo [56]

1.3.2 Dispersión por Modo de Polarización

Es uno de los efectos que limita en gran medida la calidad y la capacidad de transmisión sobre los enlaces de fibra óptica a altas velocidades (superiores a 2,5Gbps).

La PMD se presenta cuando un rayo de luz incidente se divide formando dos señales ortogonales polarizadas entre sí, las cuales viajan a distintas Velocidades de Grupo (GVD, *Group Velocity Dispersion*) también conocido como Retardo Diferencial de Grupo (DGD, *Differential Group Delay*) y diferente polarización (esto se lo conoce como la Birrefringencia o Doble Refracción), dando como resultado diferencias entre ellas que al ser recombinadas presentan un ensanchamiento de la señal, aumentando así la probabilidad de la BER [20][36], como se muestra en la Figura 1.12.

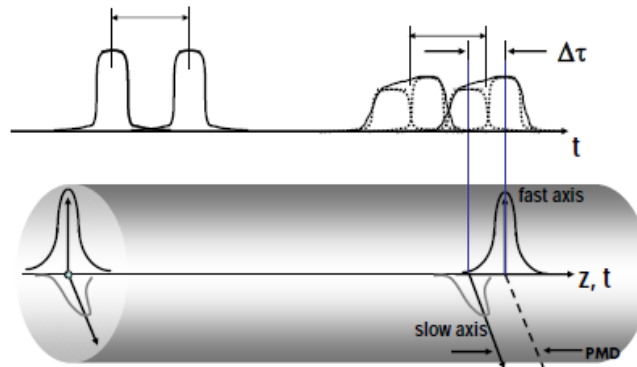


Figura 1.12 Efecto de la PMD [20]

La DGD se convierte en la opción de medida de la PMD ya que esta es difícil de calcular, se mide en picosegundos (ps) y da como resultado una PMD máxima cuya unidad es ps/ $\sqrt{\text{km}}$.

En la Tabla 1.6, se pueden observar los valores máximos de tolerancia de la PMD para diferentes velocidades de transmisión de datos, apreciando que a mayor velocidad menor es la tolerancia a este fenómeno [61].

VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN (Gbps)	PMD _{MAX} (ps)
2.5	40
10	10
40	2.5

Tabla 1.6 Máxima tolerancia de la PMD a diferentes velocidades de transmisión de datos

La birrefringencia en la fibra, se presenta por la no simetría en el núcleo de la misma, debido a imperfecciones en la fabricación o por factores externos, que producen curvaturas, cambios de temperatura, tensiones, entre otros; haciendo que el índice de refracción cambie. Está cuantificada por la siguiente relación:

$$\Delta N = n1 - n2 \quad (1.9)$$

Donde;

n1 y n2, son los índices de refracción de las dos señales ortogonales.

Los coeficientes de PMD para fibras actuales, tienen valores por debajo de los 0,5ps/√km. Por ejemplo, para la fibra óptica G.652 (fibra estándar SSMF), se tiene un valor máximo típico de PMD de 0,2ps/√km [35].

La Figura 1.13, muestra los límites recomendados para tener una comunicación eficiente cuando se ve afectada por la PMD.

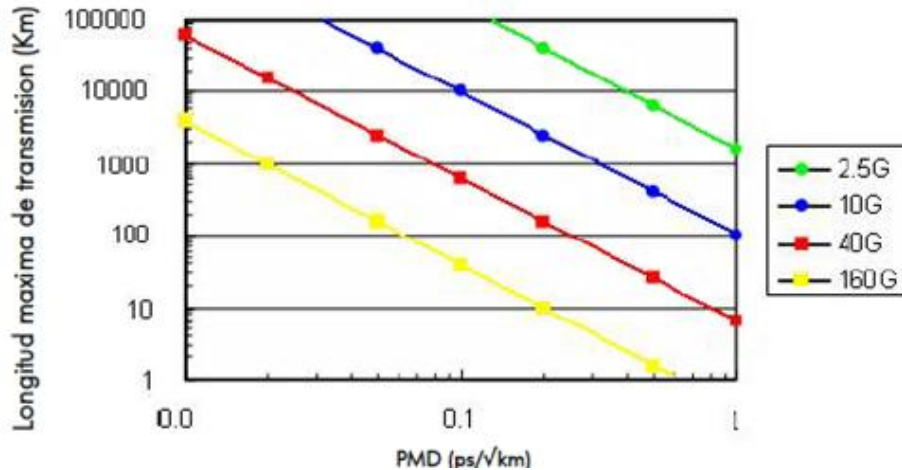


Figura 1.13 Límites de la PMD a distintas velocidades de transmisión de datos [35]

Como se aprecia en la Figura 1.13, para un sistema a 2,5Gbps con un coeficiente de PMD de 0,2ps/√km, se puede alcanzar distancias de enlace de hasta 40000km.

La PMD varía aleatoriamente con el tiempo y longitud de onda, por lo que es más difícil de compensar que la dispersión cromática [35][61].

1.3.3 Dispersión Cromática

Se define, como la máxima dispersión que se puede tolerar en una distancia límite y está dada por la ecuación (1.10):

$$L(dis)[Km] = (tolerancia\ de\ dispersión\ (ps/nm)) / (coeficiente\ de\ dispersión\ (ps/nmKm)) \quad (1.10)$$

Para calcular el límite de dispersión, se deben tener en cuenta los siguientes datos: una tolerancia de dispersión máxima aproximada de 12800ps/nm, los coeficientes de dispersión dados por los fabricantes de fibra óptica y las recomendaciones establecidas por la ITU-T G.652 y G.655 [28].

Entonces, comparando el valor de distancia límite ($L(dis)[Km]$) y la distancia del enlace, se puede decidir en el diseño de un sistema de comunicaciones óptico, la utilización o no, de un módulo compensador de dispersión en el enlace [18].

La CD, es un efecto lineal que causa limitaciones en la calidad de los sistemas de comunicaciones ópticas, ya que los pulsos ópticos al atravesar por un medio producen ensanchamiento de los mismos y por ende, generan solapamiento entre los pulsos contiguos, dando como resultado la difícil detección de la información en recepción (los pulsos se extienden en el tiempo), Figura 1.14. Este ensanchamiento depende básicamente de la GVD con que se propaga la información y la longitud de onda λ [14][25].

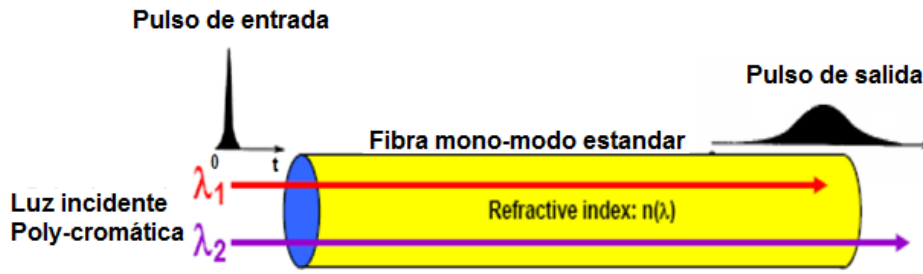


Figura 1.14 Efecto de la CD [35]

La ITU define a través de las recomendaciones ITU-T de la serie G, tres tipos de fibra mono-modo donde se aprecia claramente los diferentes coeficientes de dispersión cromática (D [ps/nm-km]) para cada una de ellas [33].

1.3.3.1 ITU-T G.652

Esta recomendación, hace referencia a las fibras mono-modo estándar SSMF, utilizadas por sus bajas pérdidas a 1550nm (banda C) y su bajo costo. Presentan, un coeficiente de dispersión cromática de aproximadamente 17ps/nm-km, útil para sistemas DWDM. Además, no presenta efectos no lineales. Entre este tipo de fibras están la: SMF-28 (Corning) y Allware (Lucent) [27][33].

1.3.3.2 ITU-T G.653

Esta recomendación, hace referencia a la fibra de dispersión desplazada (DSF, *Dispersion Shifted Fiber*), la cual presenta una dispersión cromática nula en la banda C, pero su atenuación aumenta en comparación a la fibra SMF y también se ve afectada por los fenómenos no lineales [30][33].

1.3.3.3 ITU-T G.655

Esta recomendación, hace referencia a la fibra de dispersión desplazada No nula (NZ-DSF, *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber*), la cual surge para resolver problemas de la anterior recomendación, con un coeficiente de dispersión de 4,2ps/nm-km en la banda C y así contrarrestar efectos no lineales. Tienen como desventaja que son de mayor costo que las SMF [28][33].

En la Figura 1.15, se aprecia la dispersión en función de la longitud de onda, para los tipos de fibras descritos anteriormente, teniendo en la banda C valores de dispersión entre 15 y 17ps/nm-km aproximadamente para una fibra SSMF.

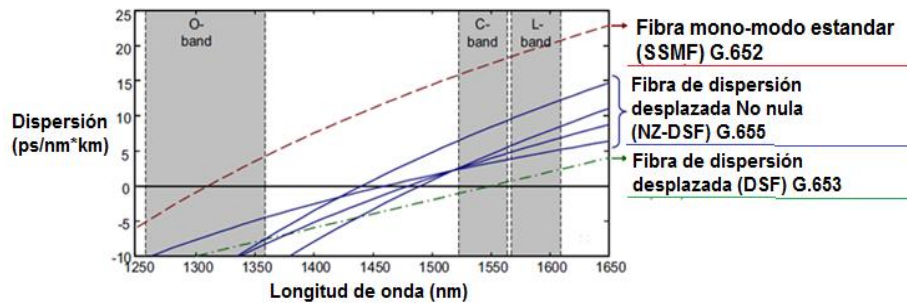


Figura 1.15 Dispersión en función de la longitud de onda para los tipos de fibras más utilizadas [33]

En los sistemas de fibra óptica se tiene un factor Δt , relacionado directamente con el coeficiente de CD, el ancho de banda y la longitud de la fibra, que limita la tasa de transmisión máxima según la ecuación (1.11):

$$\Delta t = D(\lambda) * \Delta \lambda * L \quad (1.11)$$

Donde;

- Δt = Valor máximo de dispersión cromática.
- $D(\lambda)$ = Coeficiente de dispersión cromática.
- $\Delta \lambda$ = Ancho de banda espectral.
- L = Longitud de la fibra.

La tasa de transmisión máxima BR viene dada por la ecuación (1.12):

$$BR < \left(\frac{1}{4} * \Delta t\right) \quad (1.12)$$

Donde;

Para estimar el valor de $D(\lambda)$ se tiene:

$$D(\lambda) = \lambda * \left(\frac{S_0}{4}\right) * \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)\right]^4 \quad (1.13)$$

Donde;

- λ_0 = Longitud de onda cuando el coeficiente de dispersión cromática es cero ($D(\lambda) = 0$).
- S_0 = Pendiente de dispersión, indica el cambio de dispersión con la longitud de onda.

Estos dos parámetros, los da la hoja de especificaciones de la fibra (fabricante) [37].

La dispersión cromática de una fibra depende de dos componentes: El Material y La Guía de Onda.

La dispersión del material depende del silicio y de las características de dispersión de los dopantes (características inherentes del material), esto hace que sea difícil ajustar la dispersión de la fibra. Dado esto, se trabaja en la guía de onda, ya que en ella se puede tratar y/o compensar la dispersión.

La dispersión de guía de onda, depende de las dimensiones de la guía y de la longitud de onda λ , cuando se transmite o propaga luz sobre ella. Al tener un cambio de λ , se tiene un cambio de distribución de luz y por tanto un cambio de velocidad, lo que causa este tipo de dispersión [20].

En la Figura 1.16 se muestra la variación de la dispersión según los materiales y la guía de onda para las fibras DSF, NZDSF y SMF.

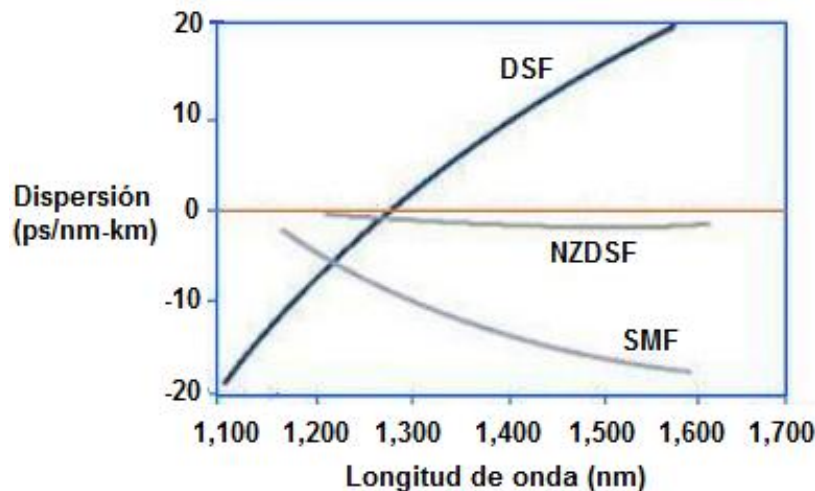


Figura 1.16 Variación de la dispersión según los materiales y el tipo de guía de onda para los tipos de fibra más comunes [20]

1.4 Tipos de Compensadores para la CD

Uno de los factores que más degrada la señal de información cuando esta viaja por la fibra óptica es la CD, y es por ello que se busca tratar este fenómeno por medio de componentes fotónicos, que permitan realizar una gestión de la CD dentro de la red óptica y poder controlarla. De acuerdo a esto, existen diferentes tipos de compensadores de CD, entre ellos están las DCF muy utilizadas, pero como inconveniente tienen las altas pérdidas, alta PMD y alta latencia que limita su uso en altas velocidades. Los Compensadores de Dispersión Electrónico (EDC, *Electronic Dispersion Compensator*) 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 presentara deficiencia en la relación señal-a-ruido cuando se quiere compensar gran cantidad de dispersión. Por ultimo están los Compensadores de Dispersión Óptica (ODC, *Optical Dispersion Compensator*) 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 [31][38].

En la Figura 1.17, se aprecian tres métodos para compensar la CD:

- Pre-Chirp: se realiza en el lado del transmisor y se tiene en cuenta la Longitud de Dispersión del Chirp (LD-Chirp, *Length Dispersion*) 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 CD 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 [31].

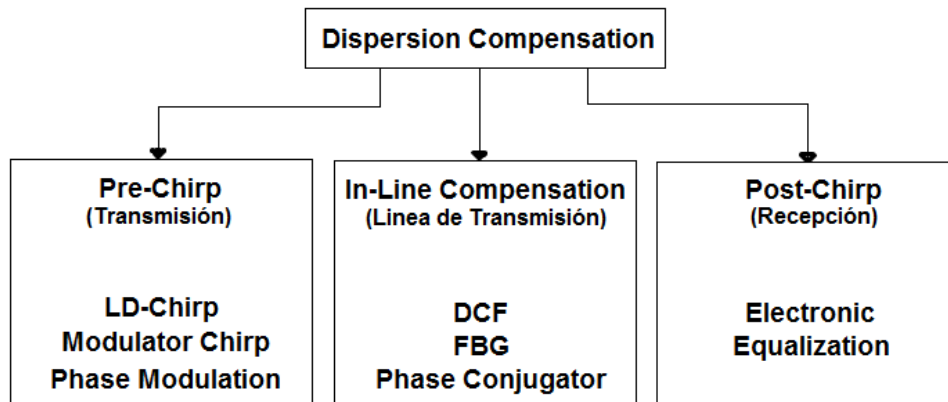


Figura 1.17 Métodos de Compensación de Dispersión [31]

El módulo compensador de CD a diseñar en este trabajo de grado, se hará a partir de un elemento clave llamado el Interferómetro Mach Zehnder “MZI”.

El MZI es un dispositivo muy útil para fines de procesamiento óptico de señales. Puede ser empleado como filtro óptico y compensador sintonizable de CD, dependiendo de su configuración [39][40].

1.4.1 Interferómetro Mach Zehnder

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 implementan comúnmente en Niobato de Litio (LiNbO_3), otros en Arsenuro de Galio (GaAs) o Fósforo de Indio (InP). 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 [53][54]. La Figura 1.18 muestra el diagrama básico de un Mach Zehnder, por guía de onda:

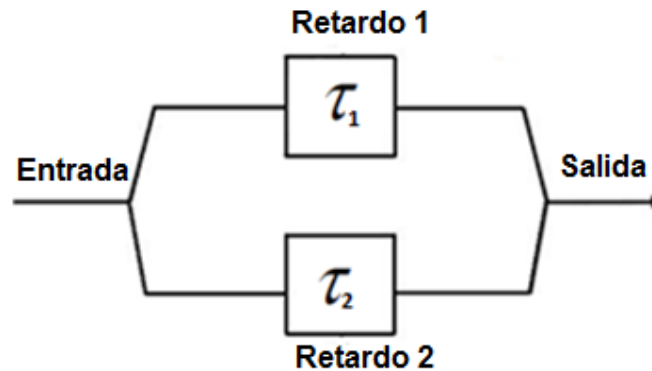


Figura 1.18 Diagrama básico del Mach Zehnder [32]

El Mach Zehnder actúa como un modulador externo y es de gran importancia debido a que presentan ventajas con respecto a los moduladores de Electro Absorción, entre ellas se tiene que [32]:

- 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 pretende cambiar la modulación de fase en 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 [32][39].

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 [33], como se muestra en la Figura 1.19 (modelo tomado de la herramienta de simulación OptSim™ de Synopsys).

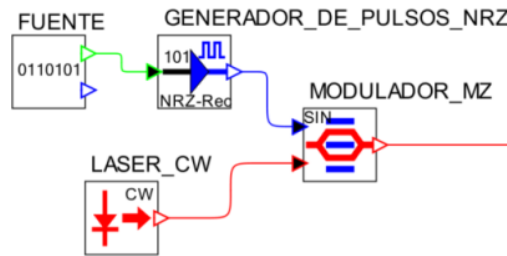


Figura 1.19 Esquema de modulación externa [33]

En la Figura 1.20, 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.

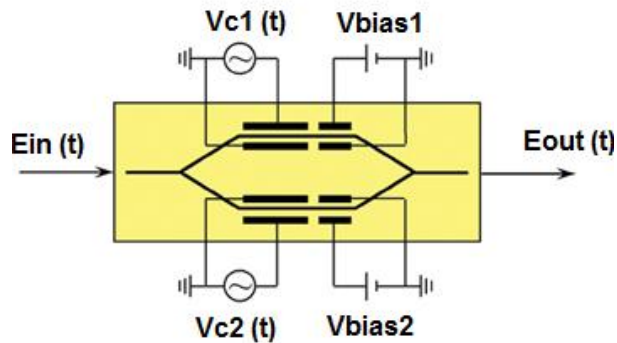


Figura 1.20 Arquitectura del MZI [32]

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 [32][41].

El cambio de fase, se puede encontrar con la ecuación (1.14):

$$\theta = \pi(V_e - V_c) \quad (1.14)$$

Dado esto, a la salida del MZI se tiene:

$$E_{out} = E_{in}[(1 - \alpha)e^{j\theta_1} + \alpha e^{j\theta_2}] \quad (1.15)$$

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:

$$E_{out} = \frac{1}{2} E_{in} (e^{j\theta 1} + \alpha e^{j\theta 2}) \quad (1.16)$$

La potencia será:

$$P = \frac{1}{2} E_{out}^2 = \frac{1}{2} E_{in}^2 \{ [(1 - \alpha) \cos \theta 1 + \alpha \cos \theta 2]^2 + [-(1 - \alpha) \sin \theta 1 - \alpha \sin \theta 2]^2 \} \quad (1.17);$$

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 [32].

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

1.4.1.1 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.

$$V_{e1} = -V_{e2} \quad (1.18)$$

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 (1.17), usando la expresión (1.18) y $\alpha=1$, se puede obtener la siguiente función de transferencia para este tipo de configuración, ver Figura 1.21:

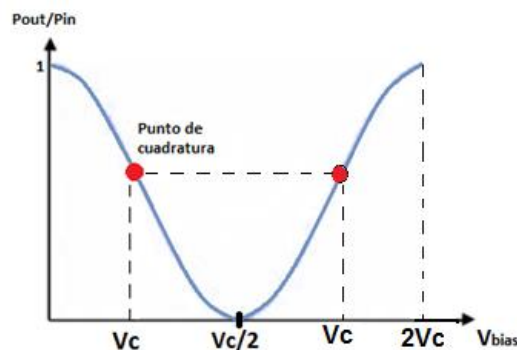


Figura 1.21 Función de transferencia del MZI en configuración Simétrica [32]

En la Figura 1.21, la función de transferencia supone una división igual de potencia entre sus ramas y 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 20-40dB. 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 20dB y 40dB [32][41][52].

1.4.1.2 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 (1.17), la función de transferencia para esta configuración es:

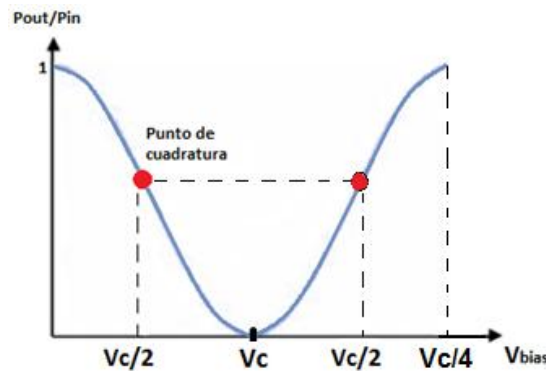


Figura 1.22 Función de transferencia del MZI en configuración Asimétrica [32]

En la Figura 1.21 y Figura 1.22, 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 [32][41][52].

2 METODOLOGÍA Y ESCENARIO DE SIMULACIÓN

En este capítulo, se define la metodología de simulación para el diseño de un compensador de CD basado en estructuras Mach Zehnder para redes DWDM a 2,5Gbps. Primero se genera un escenario de un enlace óptico DWDM a 2,5Gbps definiendo los dispositivos y sus parámetros, y luego se evalúa respecto a los formatos de modulación NRZ-OOK/RZ-OOK, para finalmente observar el desempeño del sistema de comunicaciones óptico en presencia y ausencia de un compensador de CD, a través del análisis de resultados empleando la herramienta de simulación OptSim™ de Synopsys.

2.1 Simulador

Para el desarrollo de este trabajo de grado, se utiliza la herramienta de simulación OptSim™ de Synopsys; la cual brinda un fácil manejo y despliegue de los dispositivos ópticos, para el diseño y evaluación de cualquier sistema óptico en un amplio rango de aplicaciones y soluciones de tipo ingenieril. Además, cuenta con una interfaz gráfica agradable para el usuario, que permite interactuar con la herramienta de una manera rápida y segura para la visualización de los resultados finales en un determinado tiempo o periodo de simulación.

La herramienta de simulación cuenta con dos técnicas como son: la Técnica de Ancho de Banda Variable (VBS, *Variable Bandwidth Simulation*), que se realiza en el dominio del tiempo y la Técnica de Propagación Espectral (SPT, *Spectral Propagation Technique*), en el dominio de la frecuencia. Además cuenta, con dos modos de simulación (modo bloque y modo muestra) de acuerdo al resultado que se desea obtener, es decir, que depende de los equipos virtuales de medición y de los dispositivos ópticos para efectuar una detección de los resultados que arroje la simulación en un diseño de red óptica en particular [43].

A continuación, se realiza una breve descripción de las técnicas de propagación y de los modos de simulación que se nombraron anteriormente:

- **VBS:** permite realizar una simulación que depende del dominio del tiempo y un ancho de banda variable, donde las señal que se propagan a través de un medio de transmisión óptico, genera como resultado en la recepción de datos muestras en el dominio del tiempo. Esta técnica de la herramienta OptSim™ de Synopsys, sirve para determinar cómo se comporta la señal captada en la recepción de datos (óptica o eléctrica) [43].
- **SPT:** permite realizar una simulación en el dominio del espectro de frecuencia, donde la señal óptica al propagarse a través del medio de transmisión óptico lo hace en forma de espectros de potencia. Este a su vez adiciona a la señal las pérdidas de los dispositivos y el ruido. Además, permite medir los espectros, la OSNR y los niveles de potencia, en cualquier punto de la red óptica que se está simulando [43].

- **Modo bloque:** este modo trabaja con la señal de datos entre los dispositivos. De esta manera, se representa el tiempo estimado de simulación en un bloque de datos [43].
- **Modo muestra:** un dispositivo se encarga de transmitir una nueva muestra de la señal de datos a otro dispositivo, en el transcurso de tiempo de la simulación efectuada. De esta manera, la señal de datos al pasar entre los dispositivos representa al final de la simulación una muestra única en cada instante de tiempo [43].

En el desarrollo de este trabajo de grado de acuerdo a lo anterior, se utiliza, la técnica VBS y el modo muestra; debido, a que permiten visualizar los resultados de forma conjunta e independiente a su vez, siempre y cuando se estipulen diferentes valores por lo menos el de un parámetro variable de un dispositivo pasivo o activo que pertenece a la red óptica a simular.

2.2 Metodología de Simulación

Para alcanzar los objetivos propuestos en el desarrollo de este trabajo de grado, en el diseño a nivel de simulación de un módulo compensador de dispersión cromática basado en estructuras Mach-Zehnder para redes DWDM a 2,5Gbps, es necesario adoptar una metodología de simulación que conlleva a cumplir una serie de pasos, los cuales permiten alcanzar el análisis, desarrollo y finalización del proyecto. A continuación se definen los pasos o proceso de simulación [44].

- Creación del escenario y casos de estudio para la simulación.
- Caracterización de los parámetros técnicos de acuerdo al escenario de simulación.
- Parámetros de diseño del Módulo Compensador de CD basado en MZI
- Ejecución de la simulación.
- Análisis de los resultados de simulación.

2.2.1 Creación del Escenario y Casos de Estudio para la Simulación

Para el diseño a nivel de simulación de un compensador de dispersión cromática basado en estructuras MZI para redes DWDM a 2,5Gbps, se debe crear en primera instancia un escenario de simulación de una red DWDM punto a punto sin compensación como referencia para observar el comportamiento de los efectos lineales en esta.

Al utilizar los formatos de modulación RZ-OOK/NRZ-OOK, se pueden crear dos casos de estudio y realizar la comparación con el fin de determinar cuál de ellos tiene mejor comportamiento frente a los efectos lineales en una red óptica.

En cada caso, se estudia principalmente el comportamiento de los efectos lineales como son: el fenómeno de la CD y la atenuación, que se encargan de degradar la información

en la recepción de datos. En la Figura 2.1 se indica cómo se lleva a cabo la secuencia de simulación de los escenarios para cada caso.

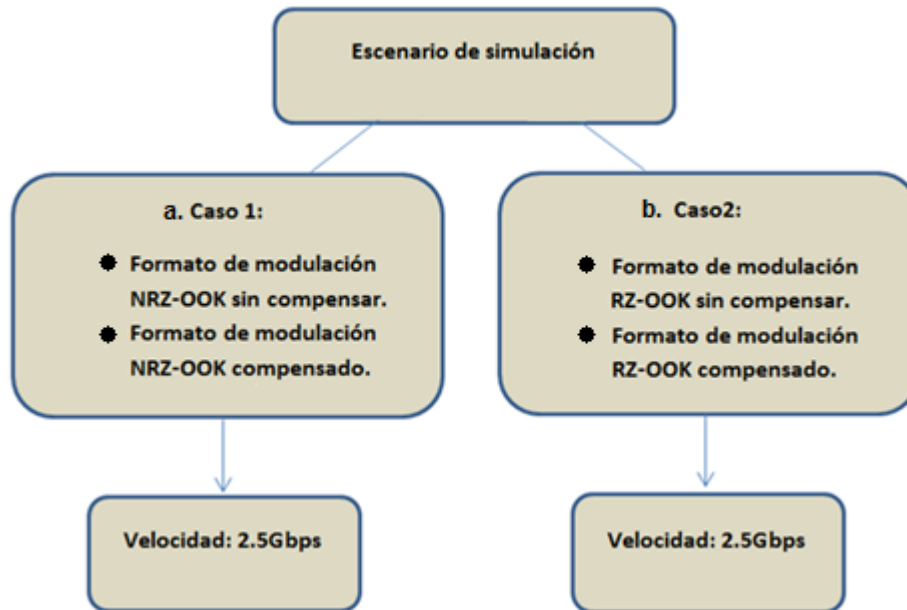


Figura 2.1 Escenario y Casos de simulación

2.2.1.1 Escenario de Simulación

Para generar el escenario de simulación, se establece una conexión en el enlace del sistema DWDM a 2,5Gbps de forma unidireccional. De esta manera, se analiza el comportamiento de la red óptica, respecto a los formatos de modulación RZ-OOK/NRZ-OOK; es decir, se definen dos escenarios para cada caso, donde se varía únicamente el formato de modulación. La velocidad de datos para cada canal óptico, se mantendrá constante, al igual que la potencia de transmisión (1mW).

El esquema mostrado en la Figura 2.2, representa la configuración de una red DWDM punto a punto a 2,5Gbps, que se conforma por tres partes básicas como son: transmisor, medio de transmisión y receptor.

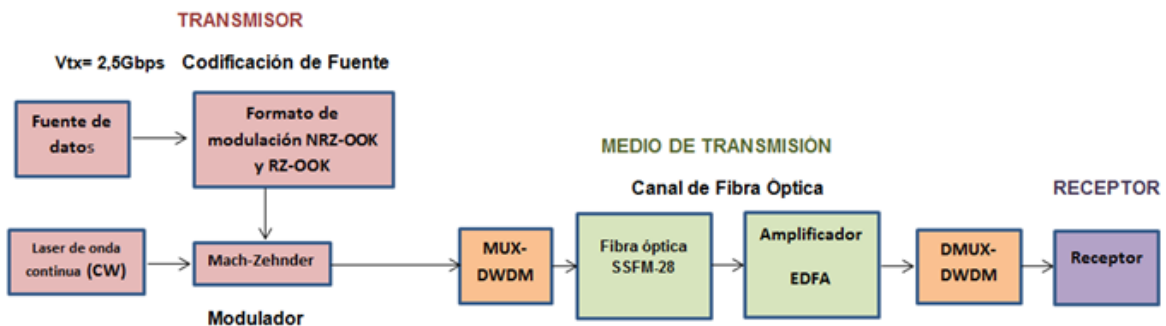


Figura 2.2 Escenario de simulación de una red DWDM a 2,5Gbps

En el desarrollo de este trabajo de grado, el objetivo es implementar en la red óptica que se aprecia en la Figura 2.2, un módulo encargado de compensar la CD basado en arreglos de dispositivos MZI. Se determinan las ventajas y desventajas que brinda el sistema en la recepción de información, realizando el Monitoreo de Desempeño Óptico (OPM, *Optical Performance Monitoring*).

Se tienen en cuenta los formatos de modulación nombrados anteriormente, debido a que han sido dominantes durante un largo tiempo y por esto, son de muy buena referencia a modo comparativo respecto a otros formatos. Presentan bajos costos, ya que requieren un menor ancho de banda y transceptores muchos más simples que el necesario para otros formatos de modulación, como por ejemplo DPSK.

A continuación se nombran algunas de las características principales que diferencian a este tipo de formatos de modulación.

1. Formato de Modulación NRZ-OOK

Este formato se caracteriza por los siguientes aspectos:

- Inmune al ruido de fase [2].
- Posee un transceptor simple respecto a otros formatos de modulación [2].
- Puede implementarse para medianas, largas y muy largas distancias, mejorando la calidad de desempeño de una red óptica, siempre y cuando se configure el sistema de una manera adecuada, quiere decir, utilizar bien los recursos (potencias, voltajes, ganancias) de los amplificadores, transmisores, receptores, y dispositivos pasivos que conforman la red DWDM [2].

En la Figura 2.3, se puede apreciar el Diagrama del Ojo y el espectro óptico de una señal NRZ-OOK ideal, este tipo de formato se caracteriza por tener un espectro óptico más compacto respecto a los demás formatos de modulación existentes, pero no implica que es el más adecuado para contrarrestar los efectos lineales presentes en la red óptica DWDM, como por ejemplo: el fenómeno de la CD [2][25][27][46].

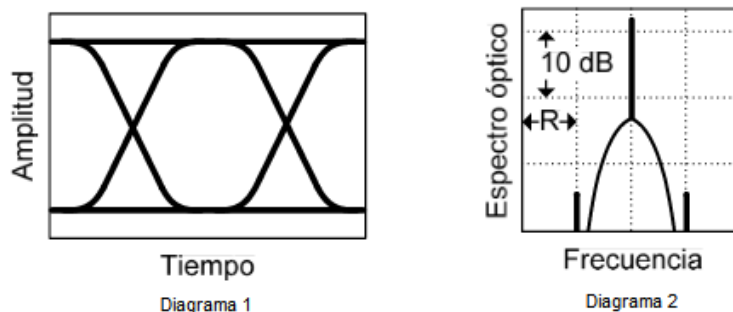


Figura 2.3 Diagrama 1. Diagrama del Ojo, Diagrama 2. Espectro Óptico; de una señal con formato de modulación NRZ-OOK [2]

2. Formato de Modulación RZ-OOK

La generación de señales RZ de manera electrónica, son adecuados para velocidades de 10Gbps. Para velocidades de datos superiores, se utilizan moduladores, en este caso los moduladores Mach-Zehnder por tener mejor estabilidad, respecto a los EAM; debido a las características de absorción variable en estos y al Chirp que introduce en la señal. Este formato tiene un espectro óptico más ancho, lo que conlleva a una menor eficiencia espectral.

El formato RZ-OOK, para ciclos de trabajo que aumentan en un 33%, 50% y 66%, va reduciendo el lóbulo principal, mientras que los lóbulos laterales van aumentando de forma gradual, generando interferencia entre canales adyacentes en sistemas DWDM, siempre y cuando la separación entre canales no sea la adecuada.

En la Figura 2.4, se puede apreciar el Diagrama del Ojo y el espectro óptico de una señal RZ-OOK ideal, para un ciclo de trabajo del 33%. [2][25][27][46]

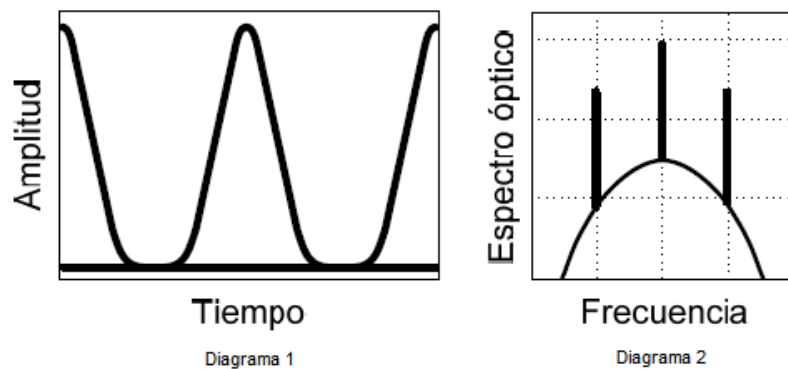


Figura 2.4 Diagrama 1. Diagrama del Ojo; Diagrama 2. Espectro Óptico; de una señal con formato de modulación RZ-OOK para un ciclo de trabajo del 33% [2]

En la Figura 2.2, se muestra el escenario de simulación general de una red DWDM a 2,5Gbps, se desprenden 2 casos de estudio de acuerdo a los formatos de modulación NRZ-OOK/RZ-OOK; donde se establecen a continuación los parámetros estables y variables que caracterizan a esta red óptica.

En el sistema DWDM, se encuentran una serie de parámetros fijos y otros variables. En cuanto a los parámetros fijos están:

- En el transmisor: la velocidad de transmisión de datos y el número de canales.
- En el receptor: los niveles de sensibilidad.
- En el canal: la clase de fibra óptica SSMF-28, la potencia en la etapa preamplificadora EDFA.

Entre los parámetros variables se encuentran:

- En el transmisor: la potencia (si es necesario) y las longitudes de onda por cada canal.
- En el canal: la longitud de la fibra óptica, la ganancia del dispositivo EDFA para las señales ópticas que llegan al receptor (si es necesario).

A continuación, se muestran los esquemas de los casos de estudio, para el respectivo análisis de este trabajo de grado, donde serán implementados y simulados a través de la herramienta de simulación OptSim™ de Synopsys.

2.2.1.2 Casos de Estudio

Para estos casos de estudio, se mantienen fijos los siguientes parámetros: Velocidad y potencia de transmisión.

a. Caso 1

- **Sistema DWDM NRZ-OOK sin compensar a 2,5Gbps**

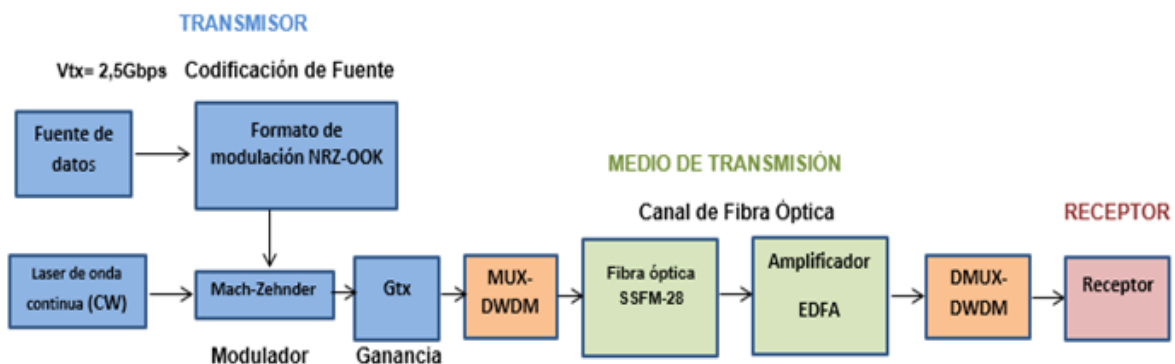


Figura 2.5 Caso de estudio NRZ-OOK sin módulo compensador de CD

- **Sistema DWDM NRZ-OOK compensado a 2,5Gbps**

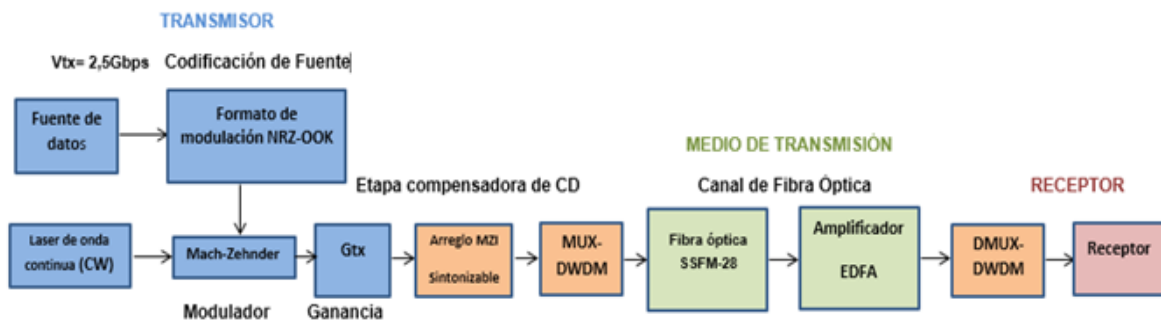


Figura 2.6 Caso de estudio NRZ-OOK con módulo compensador de CD

b. Caso 2

➤ Sistema DWDM RZ-OOK sin compensar a 2,5Gbps

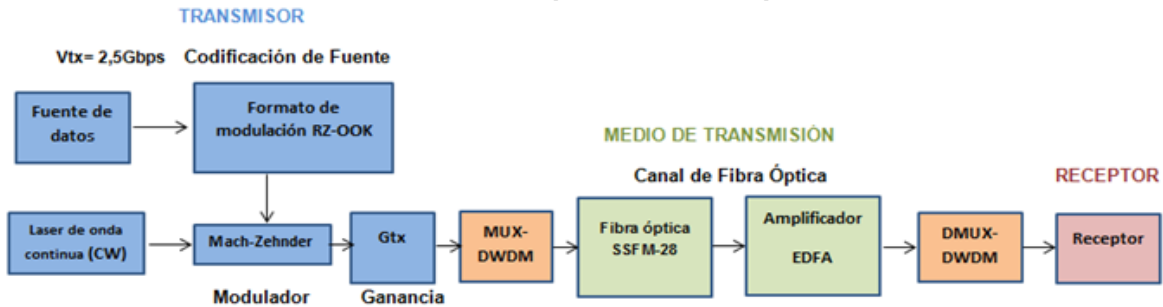


Figura 2.7 Caso de estudio RZ-OOK sin módulo compensador de CD

➤ Sistema DWDM RZ-OOK compensado 2,5Gbps

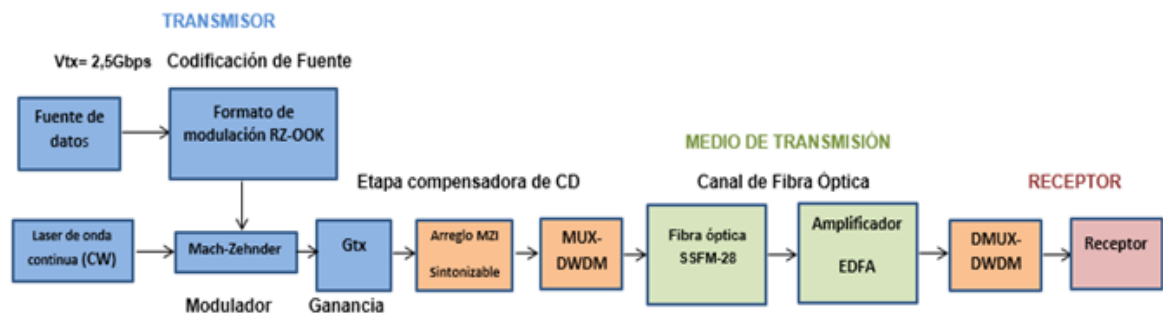


Figura 2.8 Caso de estudio RZ-OOK con módulo compensador de CD

2.2.2 Parámetros Técnicos de los Escenarios de Simulación

Los casos de estudio uno (1) y dos (2) ya establecidos anteriormente, se diferencian por utilizar cada uno un formato de modulación diferente en el enlace óptico DWDM a 2,5Gbps, con el fin de observar el comportamiento con y sin el compensador de CD que se quiere diseñar y sus efectos.

El análisis del comportamiento de los efectos lineales presentes en la red óptica DWDM a 2,5Gbps se verifica en la recepción de datos, donde se asume que estos efectos están presentes en todo el sistema óptico sin variación alguna, a no ser que se realicen cambios o modificaciones en la distancia del enlace, potencia de transmisión, ganancias en la transmisión o recepción y la velocidad de datos de transmisión óptica.

Es fundamental conocer las características y los parámetros que define un fabricante de medios de transmisión ópticos o las normas establecidas por la ITU-T, encargadas de la estandarización en el sector de las comunicaciones ópticas para los medios de transmisión. En este análisis, se utiliza la fibra óptica SSMF-28, debido a que es el medio de transmisión óptico más utilizado en nuestro país, es bajo en costos y de mayor comercialización para redes DWDM.

Los parámetros ópticos y geométricos generales que definen a las fibras ópticas mono-modo, establecidas por el estándar ITU-T G.652D/ITU-T G.655 para redes ópticas DWDM, se muestran en las tablas 2.1 y 2.2.

Parámetro Ópticos	Detalles	Valores Fibra Cableada
Atenuaciones	Atenuación para 1310nm	0.37 dB/Km
	Atenuación para 1383nm	0.37 dB/Km
	Atenuación para 1550nm	0.24 a 0.3 dB/Km
	Atenuación para 1625nm	0.23 dB/Km
	Atenuación para 1285-1625nm	0.40 dB/Km
Punto de discontinuidad máxima	1310-1550nm	≤ 0.05dB
Coefficiente de dispersión cromática (CD)	1285-1330nm	≤ 3.5 ps/nm.Km
	1550nm	≤ 18.0 ps/nm.Km
	1625nm	≤ 22.0 ps/nm.Km
	1310-1550nm	17 ps/nm.Km
PMD	Máximo por fibra individual	≤ 0.20 ps/√km
Pendiente de dispersión cero (S₀)	1550nm	0.056 ps/nm ² .Km
Parámetros Geométricos		
Diámetro de campo modal 1310nm	Valores	9.20± 0.40 μm
Diámetro de campo modal 1550nm	Valores	10.40± 0.50 μm
Error de concentricidad núcleo/cladding	Valor	≤ 0.4 μm
Diámetro cladding	Valor nominal	125.0± 0.50 μm
Error concentricidad coating/cladding	Valor	≤ 12 μm

Tabla 2.1 Parámetros ópticos y geométricos de la fibra con recomendación ITU-T G.652D [24][27][47]

Parámetro Ópticos	Detalles	Valores Fibra Cableada
Atenuaciones	Atenuación para 1550nm	0.24 dB/Km
	Atenuación para 1625nm	0.26 dB/Km
Punto de discontinuidad máxima	1550nm	≤ 0.05dB
Coefficiente de dispersión cromática (CD)	1530-1565nm	≤ 2.0 - 6.0 ps/nm.Km
	1550nm	4 ps/nm.Km
	1565-1625nm	≤ 4.5 – 11.2 ps/nm.Km
PMD	Máximo por fibra individual	≤ 0.10 ps/√km
	Valor de diseño del enlace (M=20, Q=0.01%)	≤ 0.08 ps/√km
	Valor típico	≤ 0.08 ps/√km

Pendiente de dispersión cero (So)	1550nm	0.092 ps/nm ² .Km
Parámetros Geométricos		
Diámetro de campo modal 1550nm	Valores	9.60± 0.40 μm
Error de concentricidad núcleo/cladding	Valor	≤ 0.6 μm
Diámetro cladding	Valor nominal	125.0± 1.0 μm
Error concentricidad coating/cladding	Valor	≤ 12 μm
Área efectiva	Valor	65 - 72 μm ²

Tabla 2.2 Parámetros ópticos y geométricos de la fibra con recomendación ITU-T G.655 [24][47]

En las Tablas 2.1 y 2.2, se definen los parámetros ópticos y geométricos de dos tipos de fibra óptica, comparándolas para determinar cuál es la mejor opción para el enlace óptico descrito anteriormente. Por tanto, se nombran las ventajas y desventajas de dichas fibras:

- La fibra con recomendación ITU-T G.652D, tiene un menor costo comercial y un mejor rendimiento, para trabajar con longitudes de onda definidas entre los 1310nm hasta los 1530nm, pero al operar a partir de los 1550nm, no es muy eficiente, debido a las altas dispersiones que afectan la señal, lo que conlleva al uso de métodos, técnicas, y diseños para compensar la CD presente en el canal óptico [24][27][47].
- La fibra óptica con recomendación ITU-T G.655, es la más costosa y adecuada para transmitir en los sistemas ópticos, debido a que contrarresta el fenómeno de la CD por sí misma y esto conlleva a no utilizar equipos, técnicas y diseño de módulos para compensar dicho fenómeno. Sin embargo, es afectada al transmitir en largas distancias [24][47].

Se define trabajar con la fibra óptica ITU-T G.652D, ya que presenta menores costos y trabaja con mayores distancias respecto a la fibra de recomendación ITU-T G.655, a velocidades de hasta 10 Gbps [24][47].

De acuerdo a la recomendación establecida por la ITU-T G694.1 [12][25][48], se definen las frecuencias centrales en (THz), dadas las expresiones para cada espaciamento entre canales, teniendo en cuenta un valor de n positivo o negativo incluido el cero (0), como se muestra en la Tabla 2.3.

Espaciamento por canal [GHz]	Expresión [THz]
12.5	193.1+(n*0.0125)
25	193.1+(n*0.025)
50	193.1+(n*0.05)
100	193.1+(n*0.1)

Tabla 2.3 Frecuencias centrales y espaciamento entre canales

Según esta recomendación, los planes de frecuencia en que debe trabajar los sistemas DWDM se decidió, por las longitudes de onda en la banda de operación convencional C (1530 a 1565nm) y tomando un espaciamiento entre canales de 100 GHz, ver Tabla 2.4.

Longitudes de onda [nm]	Frecuencia [THz]
$\lambda_1=1552.52438$	193.1; n=0
$\lambda_2=1551.72079$	193.2; n=1
$\lambda_3=1550.91804$	193.3; n=2
$\lambda_4=1550.11612$	193.4; n=3

Tabla 2.4 Planes de frecuencia para un espaciamiento entre canales de 100 GHz

Nota: para determinar la longitud de onda λ , se debe tener en cuenta, la velocidad de la luz en el vacío ($C=2,99792458 \times 10^8$ m/s) y la frecuencia central en THz, como se define en la ecuación (2.1):

$$\lambda[nm] = (2.99792458 \times 10^8 [m/s]) / (f[THz]) \quad (2.1)$$

La recomendación ITU-T G.Sup39 [24], establece que la máxima atenuación para sistemas ópticos concatenados que utilizan longitudes de onda a partir de los 1550nm es de 0.275 dB/Km y 0.55 dB/Km para 1310nm. Por otro lado, el Data-Sheet (ficha de datos) de fibra óptica Corning© SMF-28 establece una máxima atenuación ≤ 0.18 dB/Km sin concatenación.

En los enlaces de una red óptica DWDM, la distancia se puede estimar entre 70Km a 120Km aproximadamente [25].

Las tablas 2.5 y 2.6, definen los parámetros de una red DWDM a 2,5Gbps con formato de modulación NRZ y con un espaciamiento entre canales de 100GHz, para aplicaciones de corta y larga distancia.

Aplicación para cortas distancias (pocos y cientos de kilómetros)	
Parámetro	Dato
Información general	
Espaciamiento mínimo del canal [GHz]	100
Formato de modulación	NRZ/RZ a 2,5Gbps
Máxima BER	1e-12
Tipo de fibras	G.652, G.653, G.655
Transmisor	
Máxima potencia de salida media del canal [dBm]	+4
Máxima frecuencia central [THz]	196.2 banda C y 191.5 banda L
Mínima frecuencia central [THz]	191.5 banda C y 186.0 banda L
Variación máxima espectral	± 12.5 a ± 20

[GHz]	
Extinción de radio mínima del canal [dB]	8.2
Receptor	
Máxima potencia de entrada media del canal [dBm]	0
Mínima sensibilidad del ADP en recepción [dBm]	-18
Máxima penalización del trayecto óptico [dBm]	1.5
Transmisor a Receptor	
Máxima pérdida de inserción en el canal [dB]	16.5
Mínima pérdida de inserción en el canal [dB]	4
Máxima CD [ps/nm]	950
Máximo DGD [ps]	120

Tabla 2.5 Parámetros ópticos de una red DWDM a 2,5Gbps para cortas distancias [23]

Aplicación para largas distancias (cientos y miles de kilómetros)	
Parámetro	Dato
Información general	
Espaciamiento mínimo del canal [GHz]	100
Formato de modulación	NRZ/RZ a 2,5Gbps
Máxima tasa de error de bit (BER)	1e-12
Tipo de fibras	G.652, G.653, G.655
Transmisor	
Máxima potencia de salida media del canal [dBm]	+4
Mínima potencia de salida media del canal [dBm]	0
Máxima frecuencia central [THz]	196.2 banda C y 191.5 banda L
Mínima frecuencia central [THz]	191.5 banda C y 186.0 banda L
Variación máxima espectral [GHz]	± 12.5 a ± 20
Mínima relación de extinción del canal [dB]	8.2
Receptor	
Máxima potencia de entrada media del canal [dBm]	-9
Mínima sensibilidad en recepción [dBm]	-28
Máxima penalización del	2.5

trayecto óptico [dBm]	
Transmisor a Receptor	
Máxima pérdida de inserción en el canal [dB]	25.5
Mínima pérdida de inserción en el canal [dB]	13
Máxima dispersión cromática [ps/nm]	1400. En caso que la velocidad de datos está restringida a 2,488Gbps, se aplica una CD de 1600ps/nm.
Máximo retardo diferencial de grupo [ps]	120

Tabla 2.6 Parámetros ópticos de una red DWDM a 2,5Gbps para largas distancias [23]

A partir de las definiciones del sistema DWDM descritas en el Capítulo 1, los parámetros del transmisor, medio de transmisión, receptor y las características de los formatos de modulación definidos en este capítulo, se puede apreciar en la Tabla 2.7 el resumen de los parámetros necesarios que se utilizan para el diseño y análisis de los casos de simulación, para una red óptica de larga distancia.

Parámetros de diseño de un sistema DWDM a 2,5Gbps de larga distancia		
Parámetro óptico	Dato	Unidad
General del sistema óptico		
Tipo de sistema de comunicaciones óptico	DWDM	
Velocidad de transmisión de datos	2,5	[Gbps]
Banda de operación	Banda convencional - C (1530 -1565)	[nm]
Ventana trabajo	Tercera ventana a partir de los 1550	[nm]
Espaciamiento entre canales ópticos	100	[GHz]
Canales ópticos de prueba	4 canales (1552,52438 -1551,72079 - 1550,91804 - 1550,11612)	[nm]
Medio de transmisión óptico mono-modo		
Tipo de fibra óptica	SSFM-28	
Estándar del medio de transmisión óptico	ITU-T G.652D	
Máxima atenuación de la fibra óptica sin concatenar	0.18	[dB/Km]
Atenuación para sistemas ópticos DWDM concatenados	0.275	[dB/Km]
Rango de Atenuación para	0.24 a 0.3	[dB/Km]

1550nm		
Coeficiente de dispersión comercial para 1550nm	17	[ps/nm.Km]
Máxima dispersión cromática	1600 (95km)	[ps/nm]
Transmisor óptico		
Formato de modulación	NRZ-OOK/RZ-OOK	
Potencia en el transmisor	0 - 7	[dBm]
Receptor óptico		
BER (tasa de error de bit)	1e-12	-
Factor Q	7,03	-
Sensibilidad del fotodiodo de Rx(ADP)	-18 a -25	[dBm]
Mínima sensibilidad en recepción	-28	[dBm]

Tabla 2.7 Parámetros de diseño para un sistema DWDM a 2,5Gbps de largas distancias

Dado lo anterior, en la Tabla 2.8 se muestran los dispositivos necesarios a utilizar en el diseño de la red óptica DWDM NRZ-OOK/RZ-OOK (Figura 2.5 y 2.7) y la configuración de los parámetros que se fija para cada uno de ellos.

Dispositivos y parámetros fijos para el diseño de una red óptica DWDM NRZ-OOK y a 2,5Gbps sin compensar la CD		
Dispositivo	Parámetro	Dato
Transmisor		
Fuente de datos binaria	Velocidad de trasmisión [Gbps]	2,5
Driver NRZ	Modulación rectangular con formato NRZ	
Láser CW	Potencia de transmisión del láser [dBm]	0
	Centro de emisión de longitudes de onda [nm]	$\lambda_4=1550,1161$ $\lambda_3=1550,9180$ $\lambda_2=1551,7207$ $\lambda_1=1552,5243$
	Centro de emisión de frecuencias [THz]	$f_4 =193.4$ $f_3 =193.3$ $f_2 =193.2$ $f_1 =193.1$
Modulador externo MZ	Perdidas [dB]	3
Medio de transmisión óptico		
Fibra Óptica SMF-28	Atenuación [dB/Km]	0,275
	CD [ps/nm.Km]	17
Receptor		
Receptor tipo ADP	Sensibilidad [dBm]	-25
Amplificador EDFA (configuración por defecto)	Potencia[dBm]	0
	Ganancia[dB]	6
	N.F[dB]	4,5

Tabla 2.8 Parámetros para el diseño de la red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps [Anexo A]

2.2.3 Ejecución de la Simulación

En la ejecución de la simulación, se determinó el tiempo de simulación y el número de muestras, para obtener resultados confiables y así, evitar tiempos muy extensos en las simulaciones. Por tanto, se fija un tiempo de 70 ns y un número de muestras de 128.

En los siguientes capítulos y de acuerdo a la metodología planteada, se realiza el diseño del módulo compensador de CD, ejecución de la simulación y análisis de resultados.

2.2.3.1 Plan de Pruebas

En el proceso de la simulación, se debe tener en cuenta las características y los parámetros que definen a una red DWDM establecidos por las recomendaciones de la ITU-T, así mismo la de los fabricantes de dispositivos y de medios de transmisión ópticos. De esta manera, se llevara a cabo el OPM, que consiste en verificar o analizar el rendimiento de la señal en el dominio óptico.

De acuerdo a lo anterior, para conseguir un rendimiento adecuado en un sistema de comunicaciones DWDM, la recomendación ITU-T G.Sup39, establece o sugieren un Factor Q superior a 7,03 (correspondiente a valores de BER por debajo de $1e-12$) para obtener una transmisión libre de errores. De esta manera, podemos realizar en los casos de estudio, 1 y 2, un análisis para:

- Comprobar si se logra llevar el enlace óptico a una máxima distancia límite.
- Verificar la CD.
- Comprobar la BER, Factor Q, Jitter, niveles de sensibilidad, entre otros.

Lo anterior se realiza, con el fin de determinar si es factible o no la inclusión de un módulo compensador de CD basado en estructuras MZI en un sistema DWDM.

2.2.3.2 Proceso de Simulación

El proceso de simulación lleva a cabo las siguientes tareas:

- Creación y ejecución de los casos de estudio de la simulación.
- Obtener, almacenar, procesar y analizar los resultados obtenidos.
- Validación de los casos de estudio de la simulación.

2.2.4 Análisis y Validación de los Resultados de la Simulación

Para llevar a cabo esta tarea, se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- La máxima distancia alcanzable.
- Análisis de los efectos lineales.
- OPM.

Estos aspectos son importantes, ya que permiten apreciar el rendimiento del sistema con y sin el modulo compensador de CD, analizando el comportamiento de la dispersión cromática y sus efectos en la red DWDM, para obtener una máxima distancia alcanzable.

En el presente capítulo, se efectúa una metodología de simulación, con el fin de cumplir con los objetivos del proyecto de investigación y así garantizar que los resultados conseguidos sean válidos para cada escenario de simulación.

3 ANÁLISIS Y DISEÑO DEL MÓDULO COMPENSADOR DE CD BASADO EN ESTRUCTURAS MZI

La implementación de un módulo compensador de CD es muy importante para el desempeño de una red óptica, 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 diseñar un módulo capaz de compensar este fenómeno.

Para el presente trabajo de grado, se propone realizar el diseño de un módulo compensador de CD basado en estructuras MZI, para redes DWDM a 2,5Gbps.

A continuación, se muestra el proceso de diseño del Módulo Compensador de Dispersión Cromática basado en MZI, por ser 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 la compensación de la CD se refiere [10][42][49][50].

Se inicia, buscando en la literatura sobre los MZI, sus características, ventajas y desventajas, configuraciones, entre otros, como se definió en el Capítulo 1, Ítem 1.4 y luego se explora en la herramienta de simulación OptSim™ de Synopsys, para encontrar entre los diferentes Mach Zehnder que ella presenta, cuál puede ser empleado en el diseño y obtener buenos resultados.

En primer lugar, se hace uso de la herramienta de simulación, la cual permite tomar como referencia un elemento clave que es el MZI. La herramienta 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 3.1 y Tabla 3.1.

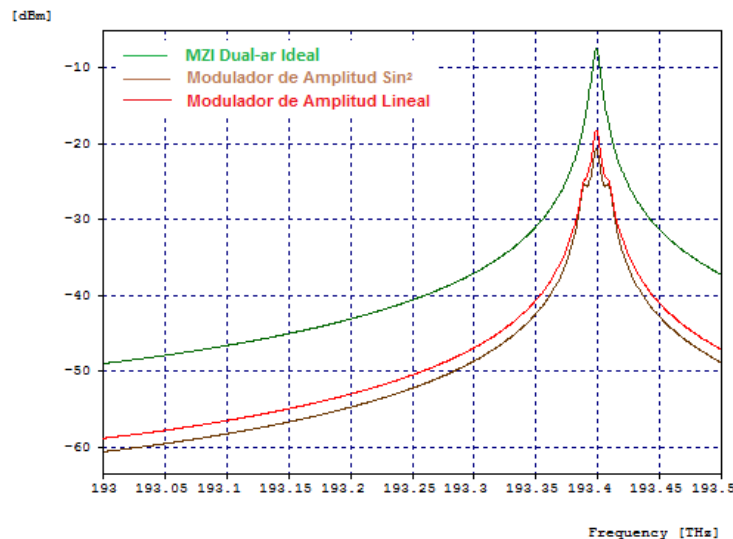


Figura 3.1 Comparación de espectros ópticos de los dispositivos Mach Zehnder

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

Tabla 3.1 Comparación y elección del MZI de mayor rendimiento

Claramente, se observa en la Tabla 3.1 y en la Figura 3.1, 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 del capítulo para el diseño, será el MZI Dual-arm Ideal, que además presenta un fácil manejo dado su configuración, como se puede observar en la Figura 3.2.

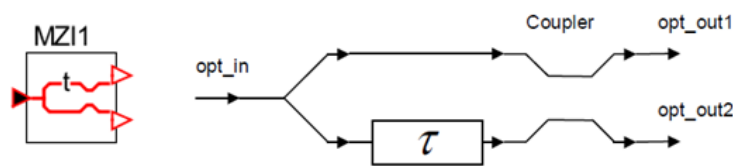


Figura 3.2 Bloque MZI Dual-arm Ideal y estructura interna [45]

En la Figura 3.2, se aprecia el dispositivo MZI ideal de doble rama, donde una de ellas presenta un retardo τ dado en picosegundos (ps), generando así un desplazamiento de la longitud de onda λ . La señal óptica llega y se divide por igual entre la rama inferior y superior del interferómetro, al atravesar la señal por la rama inferior se verá afectada por un retardo τ . Cuando la señal de una de las ramas llega al acoplador, introduce un desfase de $\pi/2$ respecto a la otra rama. Así entonces, el acoplador toma dichas señales y las encamina hacia los puertos de salida 1 y 2, donde se produce en uno de ellos una señal con interferencia constructiva y en el otro puerto una señal con interferencia destructiva [40][45].

La función de transferencia de dicho dispositivo, muestra el comportamiento de cada una de las salidas, ver Figura 3.3.

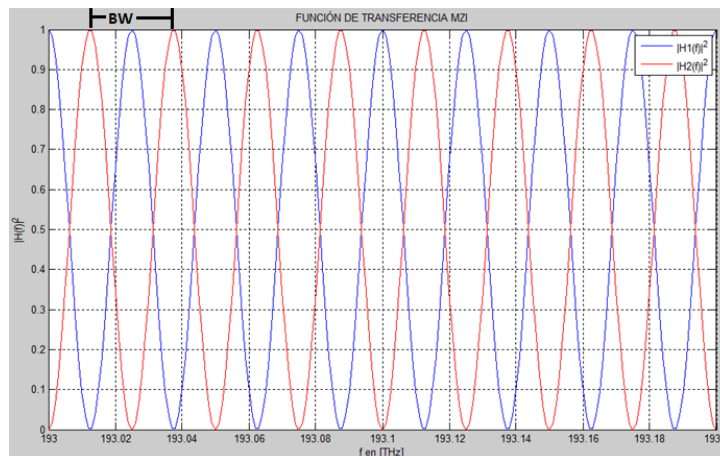


Figura 3.3 Función de transferencia del MZI Dual-arm Ideal

La Figura 3.3, muestra la función de transferencia realizada en la herramienta de simulación MATLAB R2012a, para el dispositivo MZI Dual-arm Ideal, trabajando a una frecuencia de sintonización de 193.1THz y un retardo de 40ps (como prueba). En ella se puede observar la función de transferencia para cada brazo del Interferómetro, $|H_1(f)|^2$ y $|H_2(f)|^2$, teniendo como resultado una salida de señal máxima y otra de señal mínima respectivamente, corroborando así lo dicho anteriormente.

Teniendo como parámetro inicial el retardo, se puede encontrar el ancho de banda del dispositivo a partir de la expresión (3.1):

$$BW = 1/\tau \quad (3.1)$$

Donde;

τ = Retardo de acuerdo al ancho de banda VBS establecido en los parámetros de simulación.

BW = Establece el ancho de banda, de las bandas de paso en las dos funciones de transferencia que se verán a continuación:

$$|H1(f)|^2 = \frac{1}{2} \{1 + \cos[2\pi(f - ftune)\tau]\} = \cos^2\{\pi(f - ftune)\tau\} \quad (3.2)$$

$$|H2(f)|^2 = \frac{1}{2} \{1 - \cos[2\pi(f - ftune)\tau]\} = \sin^2\{\pi(f - ftune)\tau\} \quad (3.3)$$

Donde;

ftune = Frecuencia de sintonización o frecuencia central de una banda de paso.

De la expresión 3.1 y tomando el retardo con un valor de prueba de 40ps, se obtiene un $BW = 25\text{GHz}$ el cual también se puede apreciar en la Figura 3.3.

Tanto el retardo como el ancho de banda, presentan unos valores mínimos y máximos [45]. Para el cálculo, se tienen las expresiones (3.4), (3.5), (3.6) y (3.7):

$$\tau_{min} = [0.8/VBS_{BW}] \quad (3.4)$$

Donde;

τ_{min} = Retardo mínimo.

VBS_{BW} = Ancho de banda de simulación.

$$\tau_{max} = [(1/20) * Tsim] \quad (3.5)$$

Donde;

τ_{max} = Retardo máximo.

Tsim = Tiempo de simulación.

$$BW_{min} = [20 * (1/Tsim)] \quad (3.6)$$

Donde;

BW_{min} = Ancho de banda mínimo.

$$BW_{max} = [1.25 * VBS_{BW}] \quad (3.7)$$

Donde;

BW_{max} = Ancho de banda máximo.

La Tabla 3.2, muestra los datos obtenidos de los límites del retardo y del ancho de banda dados por la herramienta de simulación, para iniciar con el estudio del MZI Dual-arm Ideal, a partir, del ancho de banda de simulación VBS_{BW} y del tiempo de simulación T_{sim} , los cuales se configuran en los parámetros globales de la herramienta OptSim™ de Synopsys. Es importante tener en cuenta el retardo ya que el óptimo funcionamiento del dispositivo depende en gran medida de este valor.

VBS _{BW} [THz]	T _{sim} [ns]	τ _{min} [ps]	τ _{max} [ps]	BW _{min} [GHz]	BW _{max} [GHz]
0.5	204.8	1.6	10240	0.09766	625

Tabla 3.2 Límites del ancho de banda y retardo del MZI Dual-arm Ideal

3.1 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 3.4.

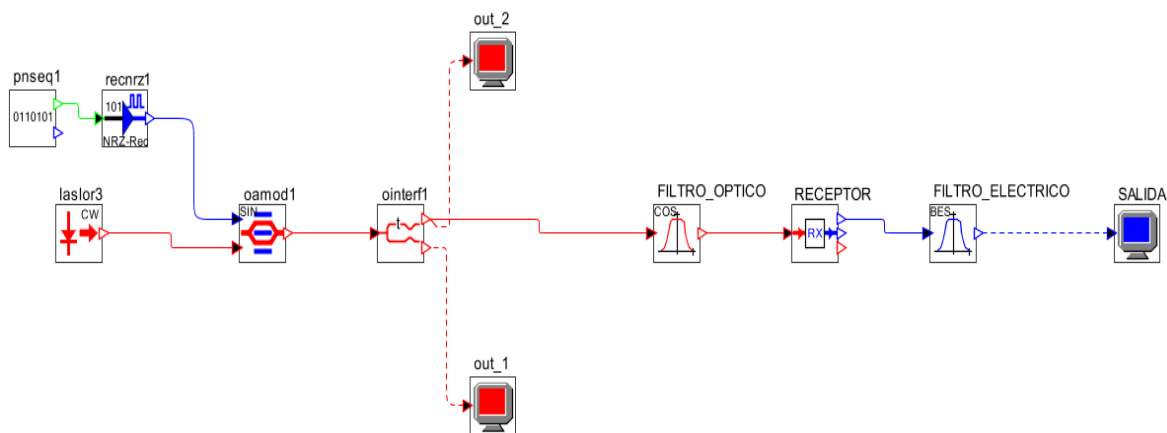


Figura 3.4 Simulación del MZI Dual-arm Ideal en un sistema Back To Back

Como se puede observar en la Figura 3.4, a través de analizadores de espectro óptico, se aprecia el comportamiento de las salidas en el dispositivo MZI (out_1 y out_2), cuando se ve afectado por una señal óptica modulada en su entrada. Para ello, se configura el dispositivo con los parámetros que se muestran en la Tabla 3.3.

Parámetros del sistema Back To Back con el Dispositivo MZI Dual-arm Ideal		
Parámetros	Dato	Unidad
Velocidad de transmisión de datos	2,5	[Gbps]
Longitud de onda	193.4	[THz]
Formato de modulación	NRZ-OOK	
Potencia en el transmisor	1	[mW]
Tipo de modulación	Modulación externa con Mach Zehnder	
Retardo en el MZI	40 (como prueba)	[ps]

Tabla 3.3 Parámetros de prueba del sistema Back to Back con MZI Dual-arm Ideal

A continuación, se observan los espectros en cada una de las salidas del MZI Dual-arm Ideal, ver Figura 3.5.

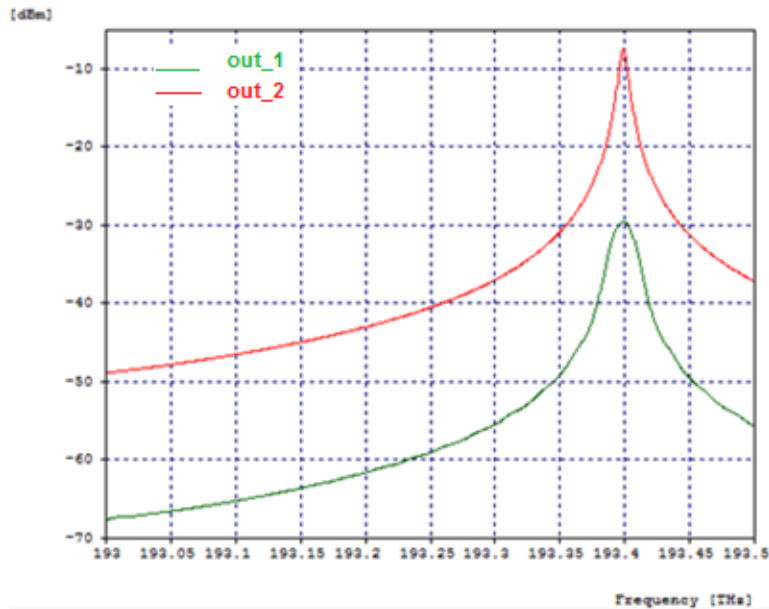


Figura 3.5 Espectro óptico de las dos ramas del MZI Dual-arm Ideal, en un sistema Back To Back

En la Figura 3.5, se muestran los dos espectros del MZI, la línea verde indica el espectro óptico de la salida 1 (out_1) la cual no presenta τ y la línea roja el espectro óptico de la salida 2 (out_2) la cual presenta en su rama un τ . Claramente, por la salida 2 se presenta una mayor amplitud de la señal con respecto a la salida 1, además el pulso se ve más confinado, tiene una mayor potencia y su OSNR también es mayor, Tabla 3.4.

	Potencia [dBm]	OSNR [dB]
Salida 1	-25.7937	37.8884
Salida 2	-7.1366	42.0328

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

Por lo tanto, se demuestra con lo anterior, que una de las salidas tiene mayor señal respecto a la otra, como se mostró también en la Función de Transferencia (Figura 3.3), y será quien se utilice de aquí en adelante.

3.2 Diseño del Módulo Compensador de CD

El diseño, se hace estrictamente en base a pruebas simuladas en la herramienta OptSim™ de Synopsys, debido a que la literatura referente al dispositivo MZI Dual-arm Ideal con el cual se está desarrollando el actual diseño, 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 para lograr el fin que se requiere. Sin embargo, fue muy útil la información brindada en los documentos [42][49][51][55] para iniciar con el análisis del dispositivo, ya que muestran las ventajas que este posee a la hora de compensar el fenómeno de la CD, haciendo uso de arreglos en cascada y a nivel de simulación.

De acuerdo a lo visto en este capítulo y en el Capítulo 1 y 2, se procede a realizar el diseño del Módulo Compensador de CD en la herramienta de simulación.

Se toma como referencia el sistema mostrado en la Figura 2.2 (Capítulo 2), excluyendo al amplificador EDFA del medio de transmisión, para que no interfiera en las pruebas. Luego, se ubican 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 que se quiere diseñar), para realizar la comparación entre ellos y así determinar cuál presenta el mejor desempeño en la red, ver Figura 3.6.

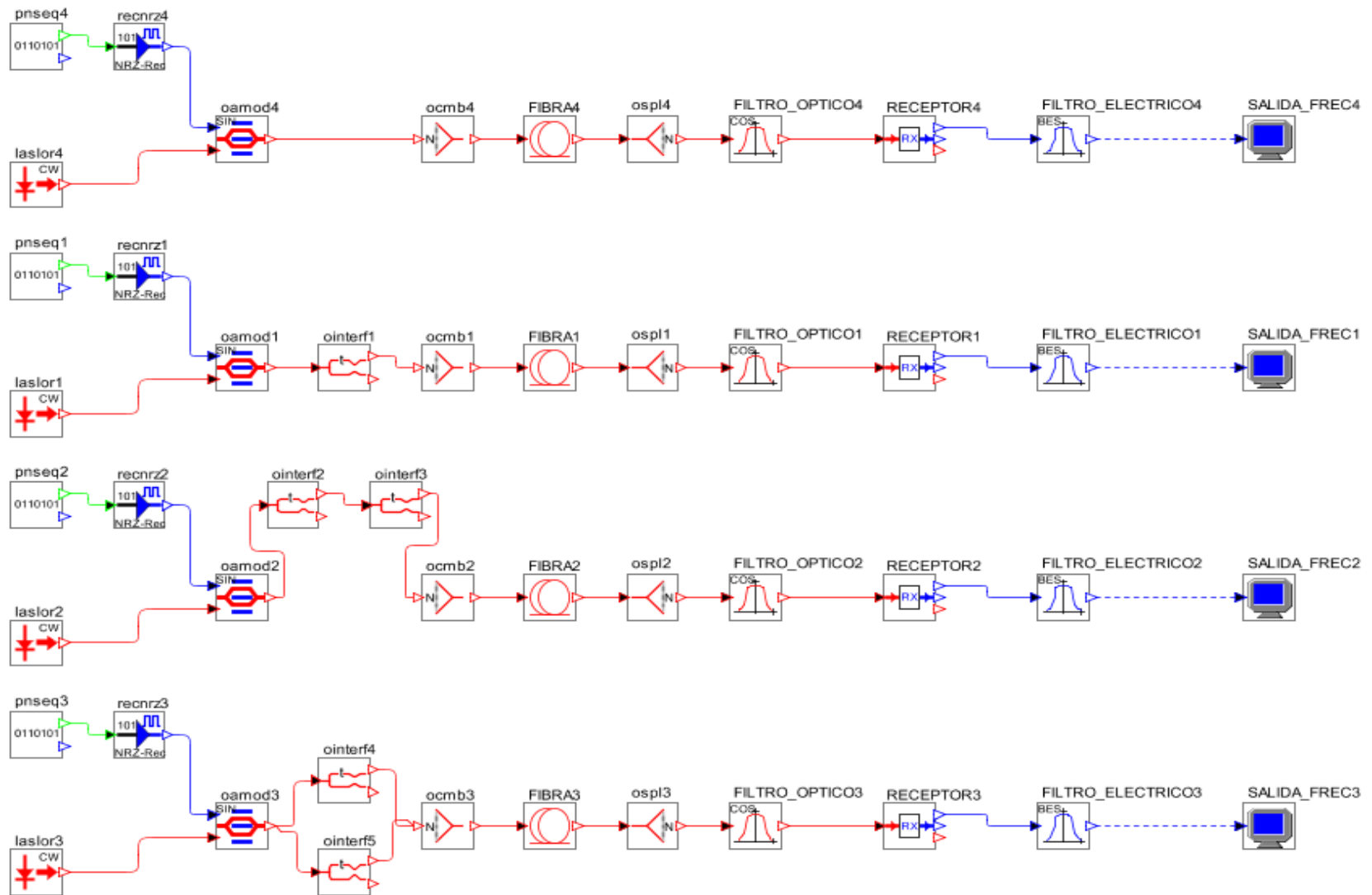


Figura 3.6 Escenario para cada arreglo MZI Dual-arm Ideal en pre-compensación

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

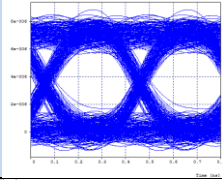
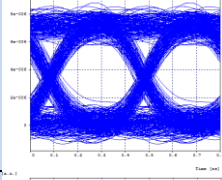
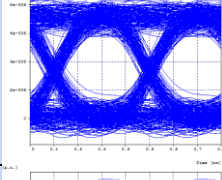
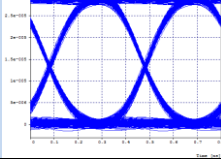
Configuración de red a 63 km (como prueba)	Diagrama de Ojo	BER
Sin módulo compensador		1.1380e-11
1 MZI Dual-arm Ideal		7.5583e-12
Arreglo serie (2 MZI Dual-arm Ideal)		5.0192e-12
Arreglo paralelo (2 MZI Dual-arm Ideal)		1e-40

Tabla 3.5 Comparación entre los arreglos MZI Dual-arm Ideal

Se puede apreciar claramente en la Tabla 3.5, que al utilizar un arreglo en paralelo mejora considerablemente la BER 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 diseño del módulo compensador de CD. 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 [42], ver Figura 3.7.

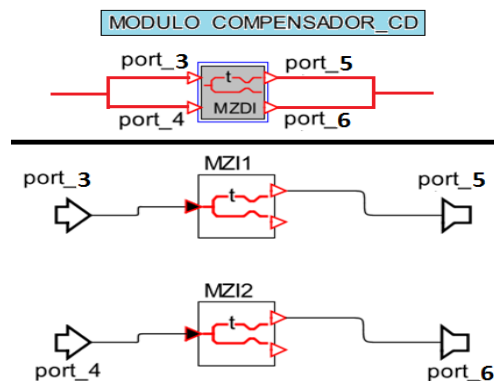


Figura 3.7 Diagrama del módulo compensador de CD

El diseño que se presenta en la Figura 3.7, es un arreglo entre dos MZI Dual-arm Ideal, conectados entre sí a su entrada, de tal manera que cuando la señal viaje por cada MZI se amplifique y así, a la salida del módulo se obtendrá una señal resultante de mayor intensidad, ya que sus salidas se suman al unirse.

Cabe destacar el funcionamiento de este módulo, debido a que es capaz de ofrecer mayor rendimiento (por utilizar dispositivos pasivos ópticos), bajos costos de implementación, eficiencia y por ser de fácil configuración, lo cual lo hace muy utilizable para compensar la CD en redes ópticas DWDM a largas distancias.

Para configurar el módulo, es importante definir bien el retardo en cada dispositivo interno, ya que este valor es fundamental para el óptimo desempeño del mismo.

3.3 Retardo del Módulo Compensador de CD

El retardo es un parámetro importante para el desempeño del módulo diseñado, ya que dependiendo de su valor genera una señal constructiva o destructiva por la salida del compensador de CD. En la expresión (3.1), se aprecia la relación entre el retardo y el ancho de banda y en la Tabla 3.2, los valores límites de cada uno de ellos que se deben tener en cuenta para realizar un buen diseño del módulo. Teniendo en cuenta estos valores, se realizan pruebas en la herramienta de simulación en un sistema Back to Back, tomando diferentes datos del retardo para los dos dispositivos MZI que componen el módulo (se configuran de igual manera, para lograr una mayor potencia cuando sus salidas se suman), con el fin de obtener el mejor comportamiento del compensador de CD, ver Figura 3.10.

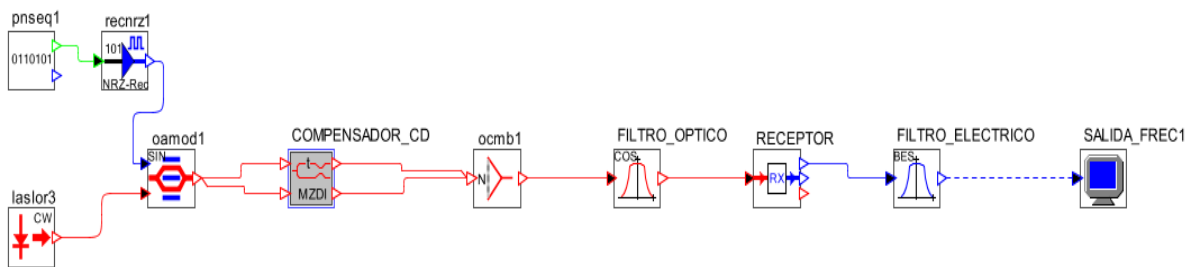


Figura 3.8 Escenario de simulación del módulo compensador de CD en un sistema Back to Back, para encontrar el retardo en sus dos componentes MZI

En la Tabla 3.6, se muestran los diferentes valores que tiene el retardo dentro de sus límites y se analiza el Diagrama de Ojo, BER, Factor Q y Jitter, para encontrar el mejor valor y configurar el módulo diseñado para obtener un óptimo rendimiento.

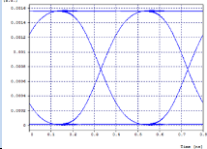
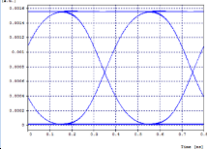
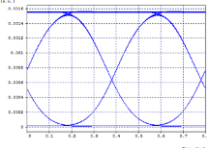
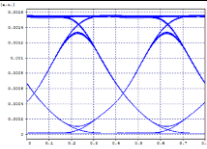
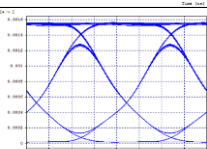
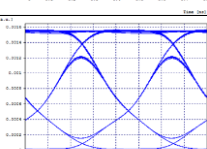
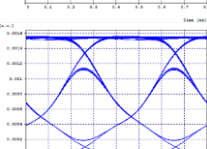
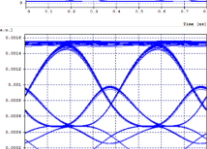
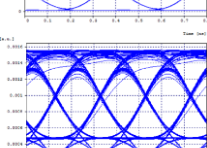
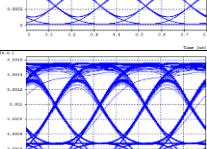
Retardo [ps]	Ancho de banda [GHz]	Diagrama de Ojo	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
1.6	625		1e-40	40.00000	0.063061
40	25		1e-40	40.00000	0.065975
100	10		1e-40	37.74630	0.075349
200	5		6.68579e-36	22.11458	0.100725
220	4.54		8.46115e-22	19.72618	0.104007
240	4.16		2.06206e-14	17.66313	0.105093
260	3.57		1.21065e-9	15.54930	0.106837
500	2		0.0227501	6.02060	0.111755
1000	1		0.0227501	6.02060	0.112675
10240	0.097		0.0227501	6.02060	0.113237

Tabla 3.6 Resultados para determinar el mejor retardo en la configuración del módulo compensador de CD

Como se aprecia en la Tabla 3.6, a medida que se va incrementando el valor del retardo disminuye el ancho de banda, lo cual genera dispersión en la señal a transmitir (ver diagramas de ojo) y se obtienen valores de BER por encima de lo que estipula la ITU en su recomendación G.Sup39.

Dado lo anterior, se toma el valor de retardo de 40ps, debido a que presenta un Ojo bien definido, sin degradaciones y con muy buenos valores de BER, Factor Q y Jitter. Así mismo, se puede observar que el retardo de 1.6ps presenta buenos resultados, pero a diferencia del retardo de 40ps, este tiene un ancho de banda muy elevado que no es útil, ya que el módulo compensador de CD para filtrar la frecuencia que se desea dejar pasar (frecuencia de sintonización de los MZI internos) no necesita mucho ancho de banda y es por ello que se toma ese valor de retardo. Esto genera menos costos de implementación, mayor aprovechamiento del ancho de banda y mayor rendimiento del Módulo Compensador de CD en el sistema.

En el Capítulo 4, se realiza el análisis comparativo entre los sistemas NRZ-OOK y RZ-OOK con y sin compensar la CD, para determinar en la red, el rendimiento del módulo diseñado anteriormente.

4 ANÁLISIS DE LA CD EN UNA RED DWDM A 2.5Gbps SIN Y CON COMPENSACION UTILIZANDO FORMATOS DE MODULACION NRZ-OOK/RZ- OOK

En este capítulo, se realiza el análisis de las redes de comunicaciones ópticas DWDM NRZ-OOK/RZ-OOK a 2,5Gbps a través del OPM, donde se verifica el comportamiento de las señales de datos transmitidas en un determinado periodo de tiempo, que se ven afectadas al viajar por el medio de transmisión óptico debido a las degradaciones causadas por el fenómeno de la CD.

Para el correspondiente estudio de las señales que transportan los datos de información, se debe partir de los dos diseños de red básicos sin compensar la CD (ver Figura 2.5 y Figura 2.7); estableciendo en estos la distancia máxima que puede alcanzar el enlace de fibra óptica sin compensación de la CD. De acuerdo a lo dicho anteriormente y con la utilización de algunos parámetros definidos en el Capítulo 2; se crean los escenarios de simulación de las redes de comunicaciones ópticas en la herramienta OptSim™ de Synopsys. Estos escenarios, serán los modelos para analizar el impacto de la CD y determinar la distancia máxima alcanzable en estas redes, cuando se adapte el módulo compensador de CD diseñado en el Capítulo 3, utilizando en lo posible los mínimos recursos de potencias, ganancias y Figura de Ruido (NF, *Noise Figure*) que caracterizan a los dispositivos activos (Láser CW y amplificador EDFA) que conforman estos sistemas.

4.1 Caso de Estudio 1

En este caso, se realiza el análisis de la red DWDM NRZ-OOK en ausencia (Figura 2.5) y presencia (Figura 2.6) del módulo compensador de CD, para evaluar el rendimiento de estos escenarios y observar el impacto que tiene este compensador dentro de la red óptica.

4.1.1 Red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps sin el Compensador de CD

La Figura 4.1, muestra el escenario de simulación de la red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps sin el compensador de CD. Esta red de comunicaciones óptica, se diseñó con algunos de los parámetros técnicos definidos en el Capítulo 2 y las recomendaciones ITU-T G.698.1 – ITU-T G.Sup39, donde establecen que se debe trabajar con una BER aproximada de $1e-12$ y un Factor Q mínimo aproximado de 7.03, para velocidades de 2,5Gbps, con separación entre canales de 100Ghz.

4.1.2 Red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps con el Compensador de CD

Esta red de comunicaciones óptica, se diseñó análogamente al modelo de red que se muestra en la Figura 4.1, con el fin de compensar el fenómeno de la CD al adaptar el módulo compensador de dispersión en cada canal de transmisión y configurados en modo de pre-compensación, ver Figura 4.2.

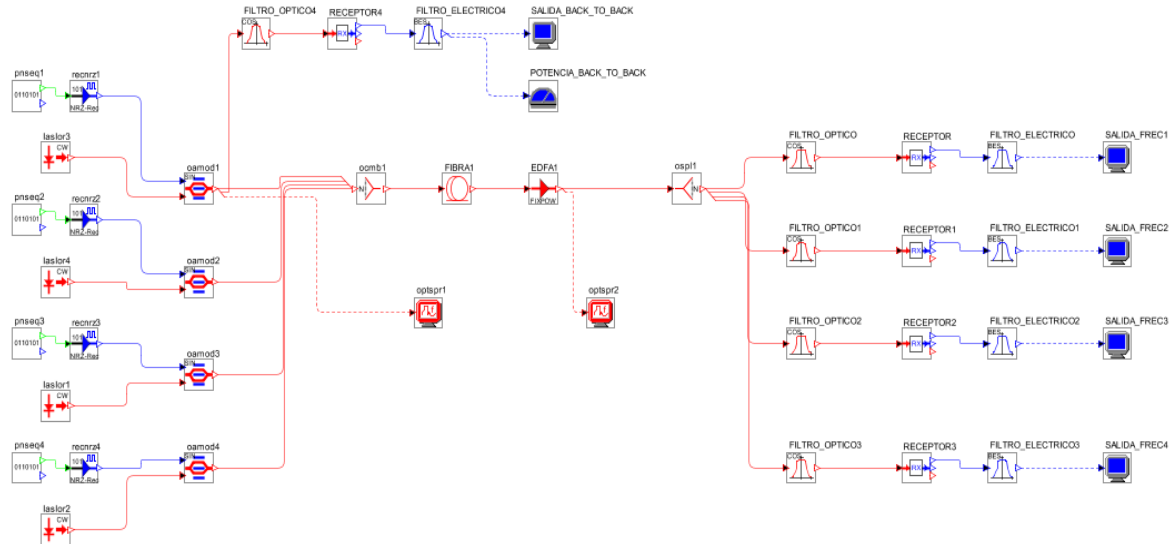


Figura 4.1 Escenario de simulación de la red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps sin el compensador de CD

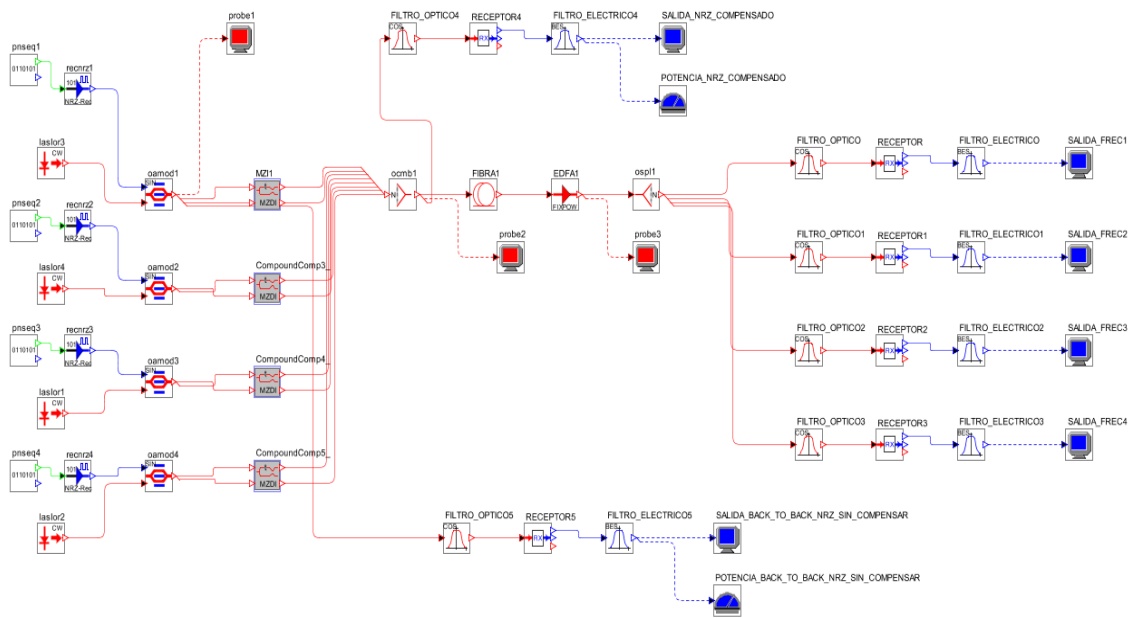


Figura 4.2 Escenario de simulación de la red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps utilizando el compensador de CD diseñado

A continuación, se realizan los análisis correspondientes a los escenarios mostrados anteriormente (Figura 4.1 y 4.2).

4.1.3 Análisis de los Resultados Obtenidos de la Red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps sin y con el Módulo Compensador de CD

Para determinar el comportamiento de los escenarios de red descritos en el ítem 4.1.1 y 4.1.2, primero se debe analizar si la señal de datos a transmitir presenta una adecuada

modulación. Luego, se procede a realizar una configuración Back to Back, que consiste en hacer una conexión entre una de las salidas de los canales de transmisión que conforman la red (modulador externo MZ) con un receptor (ver Figura 4.1) y por otro lado se realiza la misma configuración, pero con el modulo compensador de CD (ver Figura 4.2), para observar el comportamiento de la señal en los dos escenarios.

Las Figuras 4.3 y 4.4 muestran el espectro óptico de la red Back to Back y los diagramas de ojo, en ausencia y presencia del módulo compensador de CD a una frecuencia de 193,4THz.

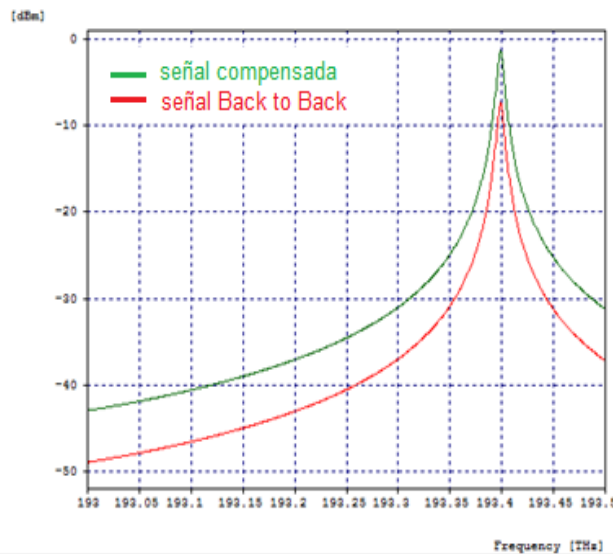


Figura 4.3 Esquema del espectro óptico de la red sin (Back to Back) y con el módulo compensador de CD Vs Frecuencia

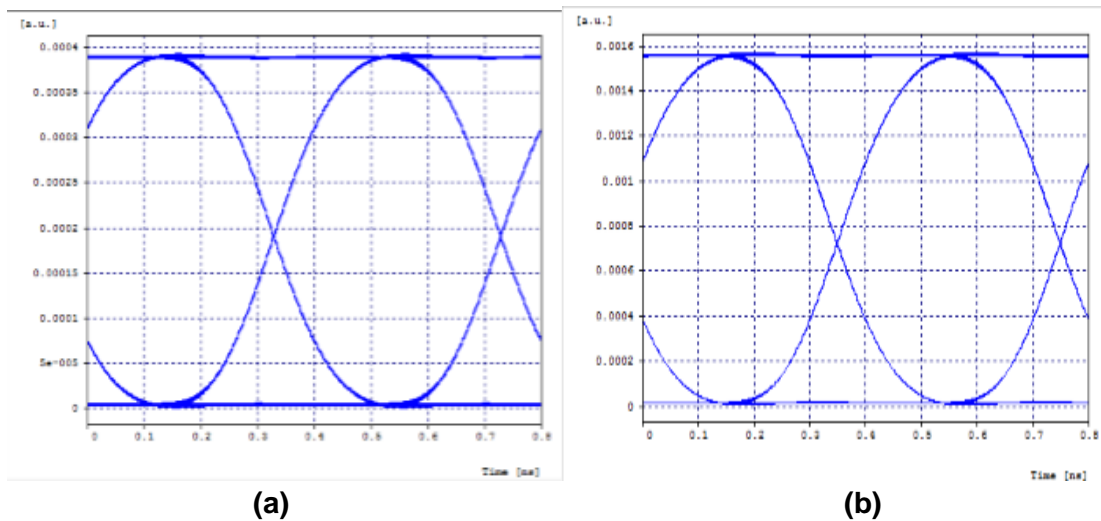


Figura 4.4 Diagrama de ojo de la red sin compensación (Back to Back) (a), Diagrama del ojo de la red con el módulo compensador de CD (b)

Como se puede observar en la Figura 4.3, el espectro de la señal compensada es de mayor intensidad respecto a la no compensada (Back to Back) y la Figura 4.4, muestra la eficiente modulación de la señal en el sistema, sin y con el módulo compensador de CD, sin el medio de transmisión. Al utilizar el módulo compensador, se obtiene una mejor definición del diagrama de ojo (b) respecto al no compensado (a).

Lo anterior demuestra la importancia de utilizar el módulo compensador de CD diseñado, ya que brinda el mejor desempeño, como se observa en la Tabla 4.1.

Frecuencia [THz]	Red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps	BER	Facto Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia [dBm]
193,4	Configuración sin compensación (Back to Back)	1e-40	40.000000	0.07128	-7.29
	Configuración con el módulo compensador de CD	1e-40	40.000000	0.06593	-1.29
193,3	Configuración sin compensación (Back to Back)	1e-40	40.000000	0.06883	-7,28
	Configuración con el módulo compensador de CD	1e-40	40.000000	0.06836	-1.27
193,2	Configuración sin compensación (Back to Back)	1e-40	40.000000	0.06943	-7,26
	Configuración con el módulo compensador de CD	1e-40	40.000000	0.06822	-1.31
193,1	Configuración sin compensación (Back to Back)	1e-40	40.000000	0.06759	-7,29
	Configuración con el módulo compensador de CD	1e-40	40.000000	0.06845	-1.29

Tabla 4.1 Resultados de la configuración Back to Back para las diferentes frecuencias de trabajo

De acuerdo a la Tabla 4.1, se puede decir que para cada frecuencia de trabajo del sistema, se obtiene aproximadamente un incremento en potencia de 6dB cuando se utiliza el módulo compensador de CD, respecto a la no presencia del mismo. Además, la BER y el Factor Q se mantienen con valores ideales y el Jitter en presencia del módulo, disminuye lo que indica un mejor comportamiento del sistema.

Para comprobar que el compensador está cumpliendo su función, se analiza el pulso eléctrico de la señal antes y después del compensador en un sistema Back to Back, como se observa en la Figura 4.5.

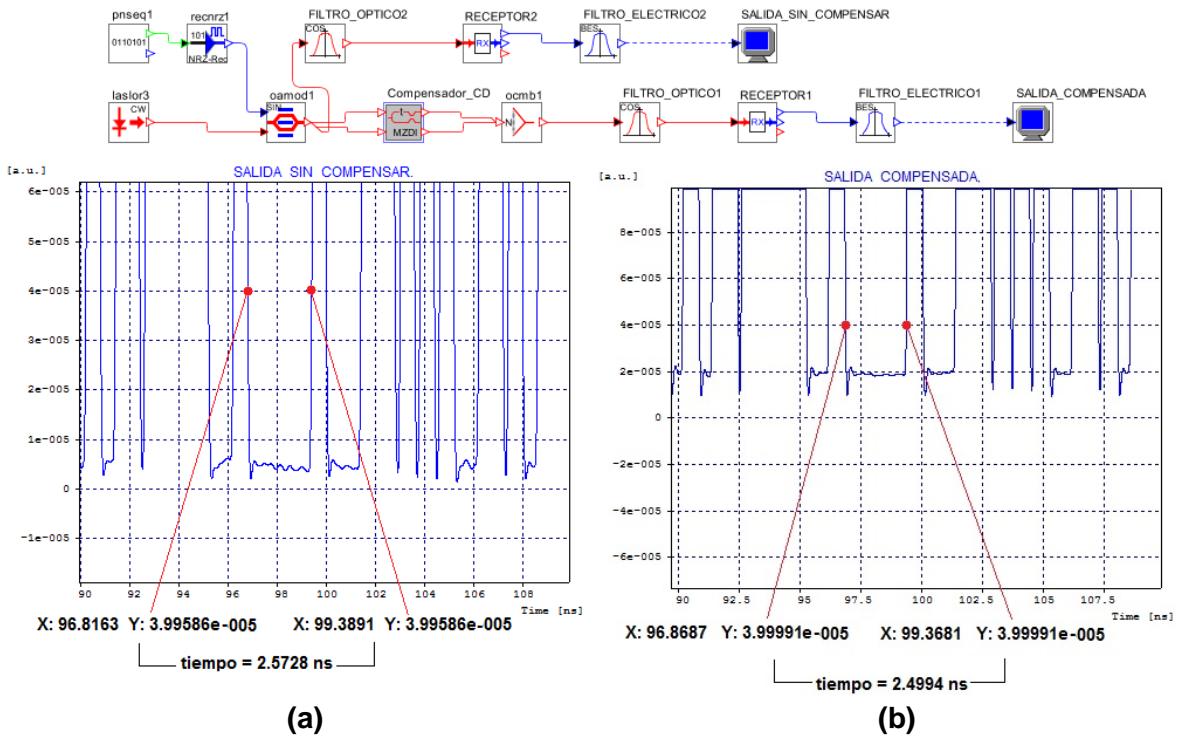


Figura 4.5 (a) Pulso eléctrico de la señal antes del compensador de CD, (b) Pulso eléctrico de la señal después del compensador de CD

En la Figura 4.5, se observa que el pulso medido (en un solo canal de transmisión a 194.1THz), no se ensancha cuando está presente el compensador de CD en un tiempo determinado, por el contrario este se reduce un poco, lo que demuestra que se está compensando el fenómeno de la dispersión cromática, debido a que el tiempo es menor respecto al tiempo del pulso de la señal no compensada, en una misma amplitud.

A continuación, se procede a realizar el análisis de la CD en la red óptica sin y con el módulo compensador de CD.

4.1.4 Análisis de la CD

Para el análisis de la CD, se configura la red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps de acuerdo a los parámetros definidos en la Tabla 2.8 (Capítulo 2). Entonces se procede a realizar el estudio del desempeño de la red óptica para cada escenario de simulación de la siguiente manera.

- Distancia máxima del medio de transmisión óptico sin el compensador de CD
- Cálculo de la CD total en la red óptica
- Desempeño de la red óptica sin y con el compensador de la CD
- Distancia máxima límite de la red óptica utilizando el módulo compensador de CD y amplificador EDFA.

4.1.4.1 Distancia Máxima del Medio de Transmisión Óptico sin el Compensador de CD

Este parámetro, define cuál va ser la distancia máxima que se puede utilizar en el enlace de fibra óptica sin compensar la CD en la red. De este modo, se establece un punto de referencia para el estudio del impacto que tiene este fenómeno en las señales de datos que se transmiten por el medio óptico.

Para realizar este análisis, se configura el escenario de simulación de la red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps sin el módulo compensador de CD, ver Figura 4.6.

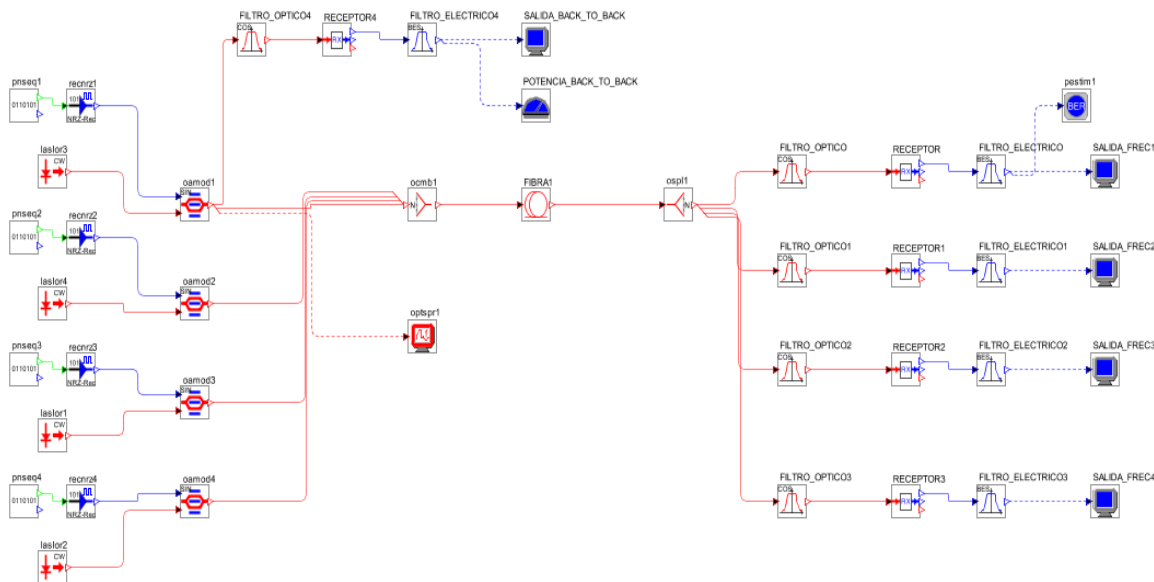


Figura 4.6 Escenario de simulación de la red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps sin la compensación de la CD

En la Figura 4.6, se excluye del medio de transmisión óptico el amplificador tipo EDFA, para determinar el impacto de la CD en la red.

Por lo tanto, se procede a variar gradualmente la distancia del enlace de fibra óptica entre 0-100Km, para encontrar hasta donde se puede transmitir las señales de los datos de una manera viable, sin utilizar una técnica o método que compense el fenómeno de la CD.

La Figura 4.7, muestra el comportamiento del medio de transmisión óptico, de acuerdo a la variación de la Distancia vs BER.

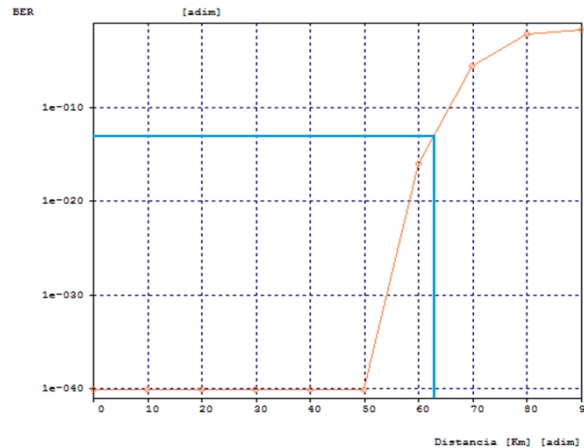


Figura 4.7 Distancia máxima del medio de transmisión óptico sin el módulo compensador de CD

Como se puede apreciar en la Figura 4.7, para una distancia de 63Km se pueden transmitir las señales de datos a una BER aproximada de 1e-12. De esta manera, se obtiene la distancia límite del medio de transmisión óptico sin compensar la CD, que sirve para los posteriores estudios del fenómeno de la dispersión.

4.1.4.2 Cálculo de la CD total en la red óptica

Para el cálculo de la CD total o acumulada en la red óptica, se relaciona la distancia máxima ($L = 63\text{Km}$) que puede alcanzar la red sin la utilización de una técnica que compense la CD, un coeficiente de CD de $17 \text{ ps/nm}^2\text{Km}$ y la pendiente de dispersión cero para longitudes de onda que trabajan en los 1550nm ($S_0 = 0,056 \text{ ps/nm}^2\text{Km}$ aproximadamente).

Por lo tanto, dependiendo de la longitud de onda que se asignó a cada canal de transmisión y reemplazando los valores anteriores en la expresión (4.1), se podrá determinar el valor de la dispersión total en la red.

$$D_{Total}(\lambda_{1,2,3,4}) = L[CD + S_0 * ((\lambda_{1,2,3,4} \text{ nm}) - 1550\text{nm})] \quad (4.1)$$

La tabla 4.2 muestra los resultados de la variación de la CD total en la red dependiendo del canal de transmisión que se utilice.

Frecuencia de trabajo [THz]	Canales (Longitud de Onda) [nm]	Dispersión Total [ps/nm]
193.4	$\lambda_4=1550.11612$	1071.409671
193.3	$\lambda_3=1550.91804$	1074.238845
193.2	$\lambda_2=1551.72079$	1077.070947
193.1	$\lambda_1=1552.52438$	1079.906013

Tabla 4.2 Variación de la CD total en la red óptica, para cada frecuencia de trabajo

De la Tabla 4.2, se puede decir que la variación de la CD total en la red óptica, está por debajo del rango límite de dispersión para velocidades de 2,5Gbps (1600ps/nm, dado que la velocidad para este trabajo de investigación está restringida a 2,5Gbps), de acuerdo a los parámetros de la Tabla 2.6 (Capítulo 2).

4.1.4.3 Desempeño de la red óptica sin y con el compensador de CD

Para verificar la degradación que causa la CD, se realizan varias pruebas piloto en el enlace óptico DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps (sin EDFA), sin y con el módulo compensador de CD en los diferentes canales de transmisión, con el fin de obtener los resultados de BER y Factor Q definidos por la ITU-T Sup39, de las señales en la recepción de datos y de esta manera realizar un análisis comparativo entre la respuesta de la señal compensada y no compensada, a través de los esquemas de diagrama del ojo correspondientes a cada una de ellas, para determinar el impacto que causa este fenómeno en el desempeño de la red óptica.

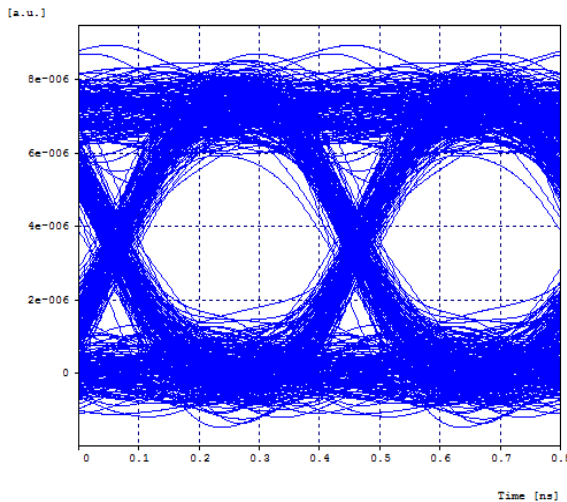


Figura 4.8 Diagrama del ojo sin compensar la CD para una distancia de 63Km a la frecuencia de trabajo de 193,4THz

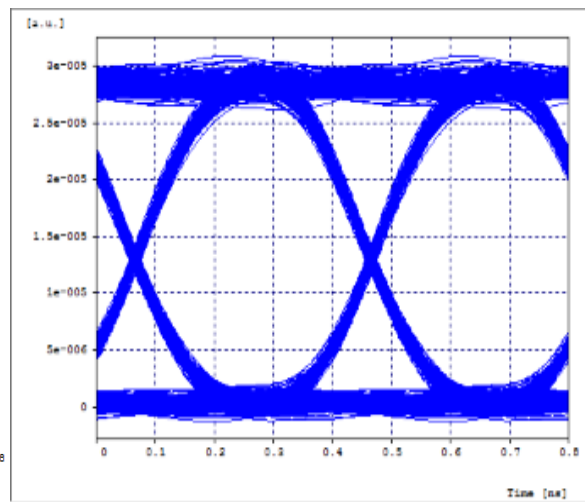


Figura 4.9 Diagrama del ojo con compensación de la CD para una distancia de 63Km a la frecuencia de trabajo de 193,4THz

Comparando la Figura 4.9 respecto a la Figura 4.8, se aprecia un óptimo desempeño del sistema al observar en el diagrama del ojo su apertura y buena definición, debido al buen cruce de amplitud y tiempo que presenta en un determinado periodo de bit. Esta mejora se logró al incorporar en la red DWDM (Figura 4.1) el módulo compensador de CD (Figura 4.2).

De esta manera, se consigue corregir en la recepción de los datos de la red óptica, un alto porcentaje del deterioro progresivo que sufre la señal de información al viajar a través del medio de transmisión óptico de 63Km afectado por las degradaciones que la CD genera, como son: el ruido, atenuación, entre otros.

La Tabla 4.3, muestra los resultados del desempeño de la red óptica sin y con la compensación del fenómeno de la CD para cada uno de los canales.

Red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps	Frecuencia de trabajo [THz]	Canales (Longitud de Onda) [nm]	BER	Facto Q [dB]	Jitter [ns]
Sin compensar la CD para una distancia de 63Km.	193.4	$\lambda_4=1550.11612$	4.2564e-12	16.811241	0.0798989
	193.3	$\lambda_3=1550.91804$	2.3513e-12	16.920854	0.0877872
	193.2	$\lambda_2=1551.72079$	2.3561e-13	17.255970	0.0775511
	193.1	$\lambda_1=1552.52438$	7.5784e-13	17.213938	0.0759464
Compensando la CD para una distancia de 63Km.	193.4	$\lambda_4=1550.11612$	1e-40	28.25385	0.0796715
	193.3	$\lambda_3=1550.91804$	1e-40	28.372757	0.0772908
	193.2	$\lambda_2=1551.72079$	1e-40	27.987873	0.0771479
	193.1	$\lambda_1=1552.52438$	1e-40	28.634105	0.0757476

Tabla 4.3 Desempeño de la Red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps sin y con la compensación de la CD para una distancia de 63Km

La Tabla 4.3, muestra los diferentes valores próximos o cercanos de la BER objetivo (1e-12) en la recepción del sistema de cada una de señales que transportan los datos sin compensar la CD, al igual que los resultados de las mismas señales compensando el fenómeno de la CD. Las señales compensadas alcanzan una BER de 1e-40 ideal, que es un óptimo resultado y permite alcanzar mayores distancias.

Por lo tanto al utilizar el módulo compensador de CD en la red óptica, se logra aumentar el Factor Q, mientras que el Jitter disminuye en cada una de las señales como muestra la Tabla 4.4, lo que permite obtener un sistema más eficiente y con mejoras en cuanto al fenómeno de la CD.

Canales (Longitud de Onda) [nm]	Mejora del Factor Q compensando la CD [dB]	Disminución del Jitter compensando la CD [ns]
$\lambda_4=1550.11612$	11.442606	0.0002274
$\lambda_3=1550.91804$	11.451903	0.0104964
$\lambda_2=1551.72079$	10.731903	0.0004032
$\lambda_1=1552.52438$	11.013553	0.0001988

Tabla 4.4 Mejora del Factor Q y el Jitter producto de la compensación de la CD

La Tabla 4.4, muestra los resultados cuando se realiza la diferencia entre la señal no compensada y la compensada respecto al Factor Q y el Jitter. Estos resultados, permiten verificar la mejora en el desempeño de la red óptica cuando se realiza la compensación del fenómeno de la CD, a través del módulo empleado.

4.1.4.4 Distancia Máxima Límite de la Red Óptica con el Módulo Compensador de CD y el EDFA

Para encontrar la distancia máxima que puede lograr la red óptica al utilizar el módulo compensador de CD, esta se configura de acuerdo al escenario de la Figura 4.2, donde se excluye al EDFA del medio de transmisión, como se muestra en la Figura 4.10.

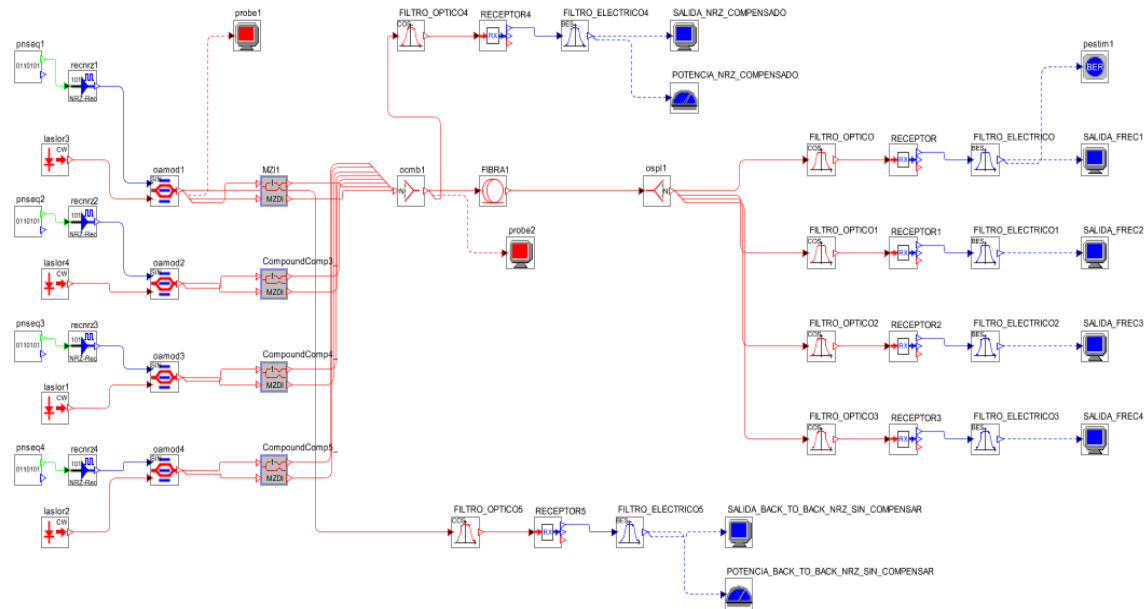


Figura 4.10 Escenario de simulación de la red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps para determinar la distancia máxima compensada por el módulo

La Figura 4.10 muestra la configuración del escenario de simulación, que permite analizar el desempeño del módulo compensador de CD en la red óptica, con el fin de determinar hasta donde es viable la transmisión de las señales de los datos con baja dispersión. Para esto, se realiza un análisis de los resultados de simulación de la Distancia vs BER y el diagrama de le ojo, ver Figuras 4.11 y 4.12.

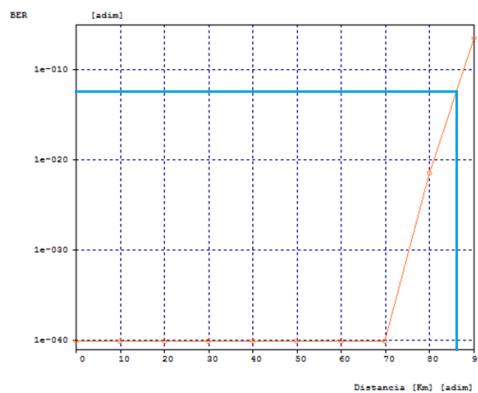


Figura 4.11 Distancia máxima que puede alcanzar el medio de transmisión óptico al utilizar el compensador de CD

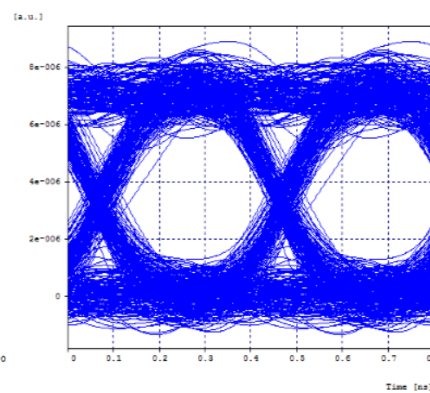


Figura 4.12 Diagrama del ojo con compensación de la CD a 86km y frecuencia de trabajo de 193,4THz

En la Figura 4.10, se puede observar que para una distancia de 86Km se logra transmitir las señales de los datos a una BER aproximada de $1e-12$ cuando se compensa la CD, donde el efecto de la atenuación causado por el fenómeno de la CD comienza a ser notable, como se aprecia en la Figura 4.12. Sin embargo, este diagrama del ojo presenta simetría en el cruce de tiempo y amplitud, lo que garantiza que esta señal puede ser tratada para corregir el efecto que causa esta degradación y así obtener una adecuada recepción de los datos.

Entonces para corregir el efecto de la atenuación, se adapta en el medio de transmisión óptico el amplificador tipo EDFA, como se muestra en la Figura 4.2, donde es recomendable operar a baja potencia en el dispositivo, para evitar la excitación de los efectos no lineales en la red óptica.

Por lo tanto se configura al amplificador tipo EDFA por defecto de acuerdo a la Tabla 2.8, que corresponden a los valores de los parámetros mínimos que utiliza el dispositivo. De esta manera se realiza la simulación, para determinar hasta donde es viable transmitir amplificando las señales de los datos compensados en la red óptica. De acuerdo, a los resultados obtenidos en las variaciones de la Distancia vs BER y el comportamiento del diagrama del ojo, se halla la distancia máxima límite en la red.

La Figura 4.13, muestra que para una distancia de 107Km se logra una BER aproximada de $1e-12$ en las señales, donde el efecto de la atenuación comienza a ser notable de nuevo, como se aprecia en la Figura 4.14.

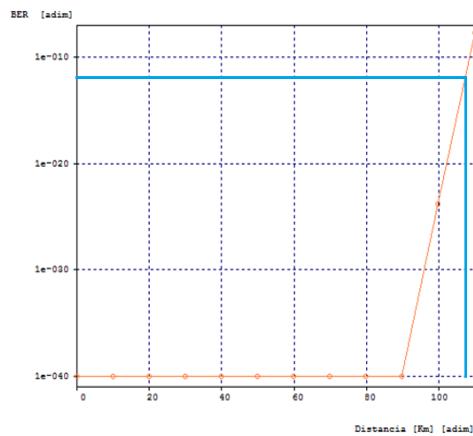


Figura 4.13 Distancia máxima límite que puede alcanzar en el medio de transmisión óptico amplificando la señal compensada

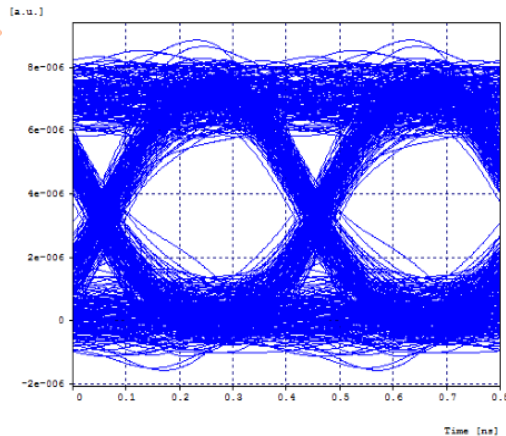


Figura 4.14 Diagrama del ojo de la señal compensada a 107km y amplificada a la frecuencia de trabajo de 193,4THz

Para minimizar dicho efecto y alcanzar mayores distancias en la red, se recomienda realizar variaciones gradualmente en la ganancia, NF y la potencia del dispositivo, así como también la potencia en el láser, hasta conseguir el valor deseado de distancia y BER en las señales de los datos que se requiera transmitir; en lo que concierne al análisis de esta investigación, no se realizan variaciones en los parámetros dichos anteriormente, ya que se quiere solamente demostrar el máximo rendimiento del módulo compensador de CD diseñado y el óptimo desempeño de los dispositivos activos (láser CW, EDFA) que

conforman esta red óptica a bajas potencias. De este modo se garantiza una optimización en los recursos que brindan estos dispositivos activos y además se establece un punto de referencia en esta investigación, para trabajos posteriores respecto al estudio de los efectos lineales, en especial la CD y su compensación.

La Tabla 4.5, muestra los resultados del desempeño de la red óptica utilizando el módulo compensador de CD y el amplificador EDFA para cada uno de los canales.

Red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps	Frecuencia de trabajo [THz]	Canales (Longitud de Onda) [nm]	BER	Facto Q [dB]	Jitter [ns]	Distancia Límite [Km]
Desempeño de la red óptica, utilizando el modulo compensador de CD.	193.4	$\lambda_4=1550.11612$	6.6704e-11	16.323482	0.0841836	86
	193.3	$\lambda_3=1550.91804$	7.4515e-12	16.587324	0.0804142	
	193.2	$\lambda_2=1551.72079$	9.6785e-11	16.135965	0.0853217	
	193.1	$\lambda_1=1552.52438$	1.5711e-11	16.585964	0.0816395	
Desempeño de la red óptica compensada, corrigiendo el efecto de la atenuación a través del EDFA.	193.4	$\lambda_4=1550.11612$	3.8250e-11	16.940416	0.0788262	107
	193.3	$\lambda_3=1550.91804$	1.0789e-12	17.000288	0.0790010	
	193.2	$\lambda_2=1551.72079$	3.4325e-12	16.820887	0.0780586	
	193.1	$\lambda_1=1552.52438$	3.8243e-12	16.324134	0.0784453	

Tabla 4.5 Desempeño total de la Red DWDM NRZ-OOK a 2,5Gbps compensado el fenómeno de la CD y corrigiendo el efecto de la atenuación

De los resultados de la Tabla 4.5 se puede concluir que:

- Con la utilización del módulo compensador de CD, se logra transmitir las señales de los datos de una manera fiable y sin dispersión aproximadamente hasta 23Km de más (63km+23km=86km). A partir de esta distancia, el efecto de la atenuación comienza a ser notable en las señales.
- El EDFA ayuda a corregir el efecto de la atenuación (cuando se alcanza la máxima distancia con el compensador de CD), lo que permite aumentar la distancia del medio de transmisión óptico hasta 21Km de más (86km+21km=107km), sin embargo a partir de esta distancia las señales de los datos comienzan a degradarse de nuevo.

4.2 Caso de Estudio 2

En este caso, se realiza el análisis de la red DWDM RZ-OOK en ausencia (Figura 2.7) y presencia (Figura 2.8) del módulo compensador de CD, para evaluar el rendimiento de estos escenarios y observar el impacto que tiene este compensador dentro de la red óptica.

4.2.1 Red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps sin el Compensador de CD

La Figura 4.15, muestra el escenario de simulación de la red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps sin el compensador de CD. Esta red de comunicaciones óptica, se diseñó análogamente a la red que se desarrolló en el caso de estudio 1 (ítem 4.1.1).

DISEÑO A NIVEL DE SIMULACIÓN DE UN COMPENSADOR DE DISPERSIÓN CROMÁTICA BASADO EN ESTRUCTURAS MACH ZEHNDER PARA REDES DWDM A 2,5 Gbps

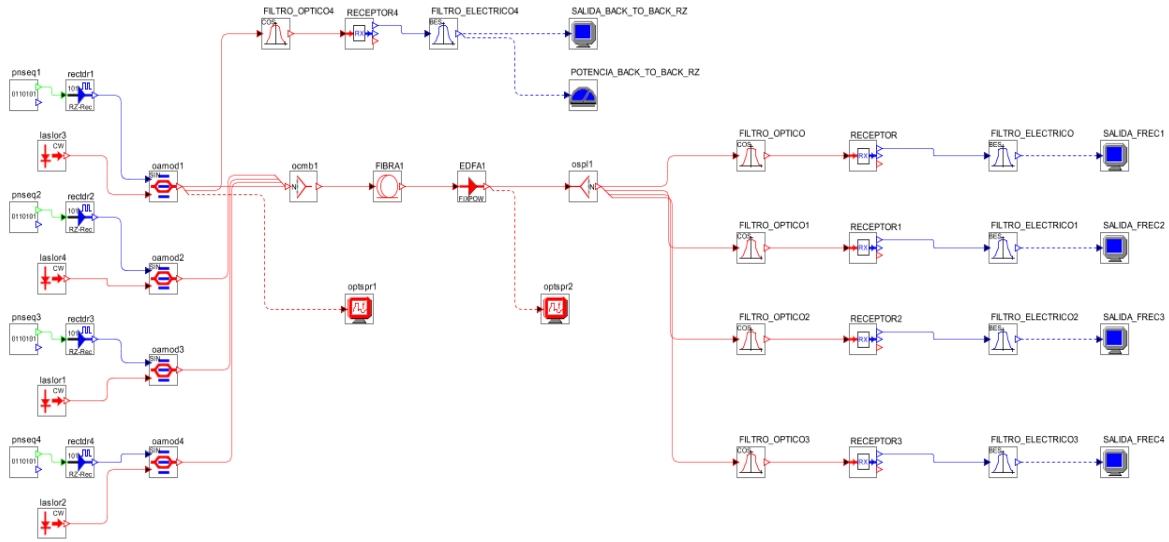


Figura 4.15 Escenario de simulación de la red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps sin el compensador de CD

4.2.2 Red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps con el Compensador de CD

Esta red de comunicaciones óptica, se diseñó análogamente al modelo de red que se muestra en la Figura 4.15, con el fin de compensar el fenómeno de la CD al adaptar el módulo compensador de dispersión en cada canal de transmisión y configurados en modo de pre-compensación, ver Figura 4.16.

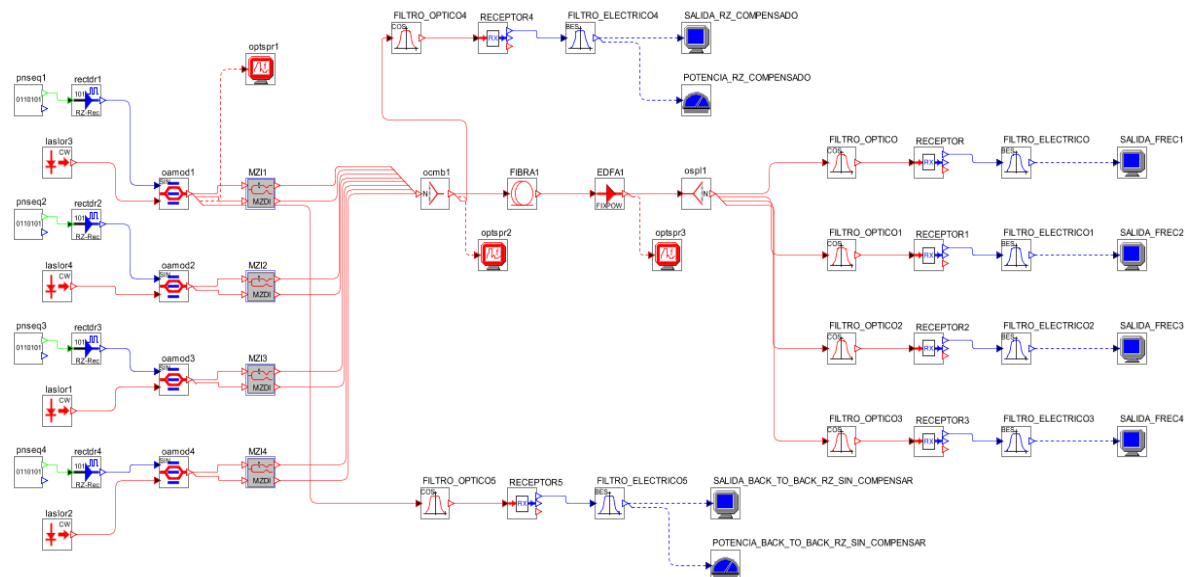


Figura 4.16 Escenario de simulación de la red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps utilizando el módulo compensador de CD

A continuación, se realizarán los análisis correspondientes a los escenarios mostrados anteriormente (Figura 4.15 y 4.16).

4.2.3 Análisis de los Resultados Obtenidos de la Red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps sin y con el Módulo Compensador de CD

Para determinar el comportamiento de los escenarios de red descritos en el ítem 4.2.1 y 4.2.2, se realiza el mismo procedimiento del ítem 4.1.3, donde los resultados de las señales de datos de todos los canales que conforman esta red óptica, están incluidos en la Tabla 4.6.

Las Figuras 4.17 y 4.18 muestran el espectro óptico de la red Back to Back y los diagramas de ojo, en ausencia y presencia del módulo compensador de CD a una frecuencia de 193,4THz.

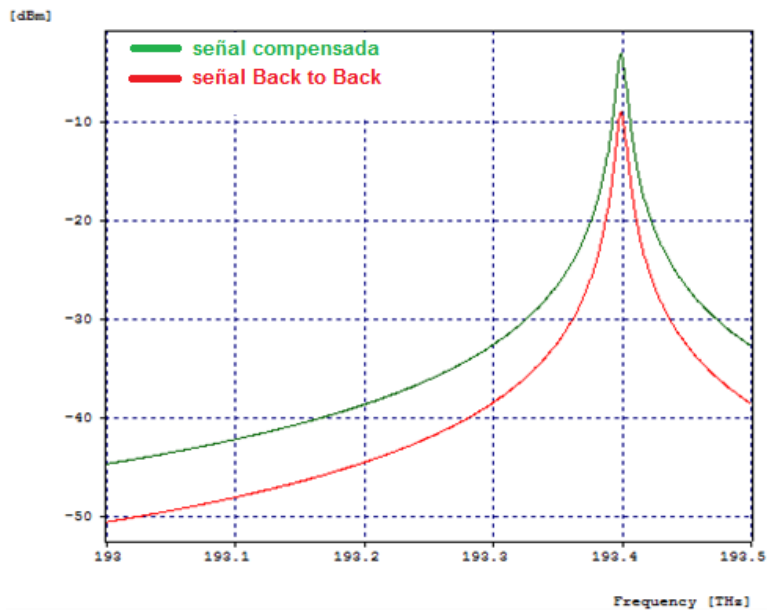


Figura 4.17 Esquema del espectro óptico de la red sin (Back to Back) y con el módulo compensador de CD vs Frecuencia

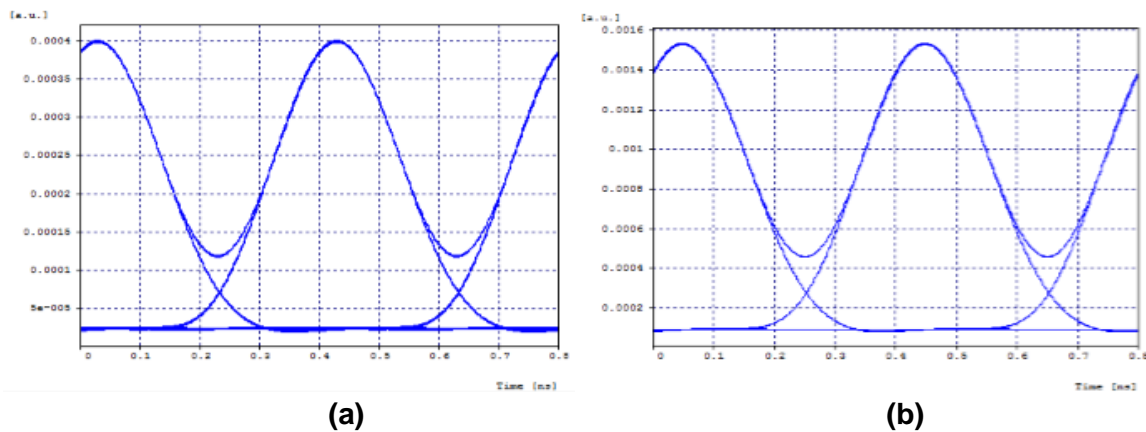


Figura 4.18 Diagrama de ojo de la red sin compensación (Back to Back) (a), Diagrama del ojo de la red con el módulo compensador de CD (b)

Como se puede observar en la Figura 4.17, el espectro de la señal compensada es de mayor intensidad respecto a la no compensada (Back to Back) y la Figura 4.18, muestra la eficiente modulación de la señal en el sistema, sin y con el módulo compensador de CD, sin el medio de transmisión. Al utilizar el módulo compensador, se obtiene una mejor definición del diagrama de ojo (b) respecto al no compensado (a).

Frecuencia [THz]	Red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps	BER	Facto Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia [dBm]
193,4	Configuración sin compensación (Back to Back)	1e-40	40.000000	0.000800	-8.96
	Configuración con el módulo compensador de CD	1e-40	40.000000	0.068395	-1.298
193,3	Configuración sin compensación (Back to Back)	1e-40	40.000000	0.000797	-8.24
	Configuración con el módulo compensador de CD	1e-40	40.000000	0.069025	-1.305
193,2	Configuración sin compensación (Back to Back)	1e-40	40.000000	0.000798	-8.25
	Configuración con el módulo compensador de CD	1e-40	40.000000	0.070516	-1.277
193,1	Configuración sin compensación (Back to Back)	1e-40	40.000000	0.000793	-8.24
	Configuración con el módulo compensador de CD	1e-40	40.000000	0.065477	-1.300

Tabla 4.6 Resultados de la configuración Back to Back para las diferentes frecuencias de trabajo

De acuerdo a la Tabla 4.6, se puede decir que para cada frecuencia de trabajo del sistema, se obtiene aproximadamente un incremento en potencia de 7dB cuando se utiliza el módulo compensador de CD, respecto a la no presencia del mismo. Además, la BER y el Factor Q se mantienen con valores ideales.

Para comprobar que el compensador está cumpliendo su función, se analiza el pulso eléctrico de la señal antes y después del compensador en un sistema Back to Back, como se observa en la Figura 4.19.

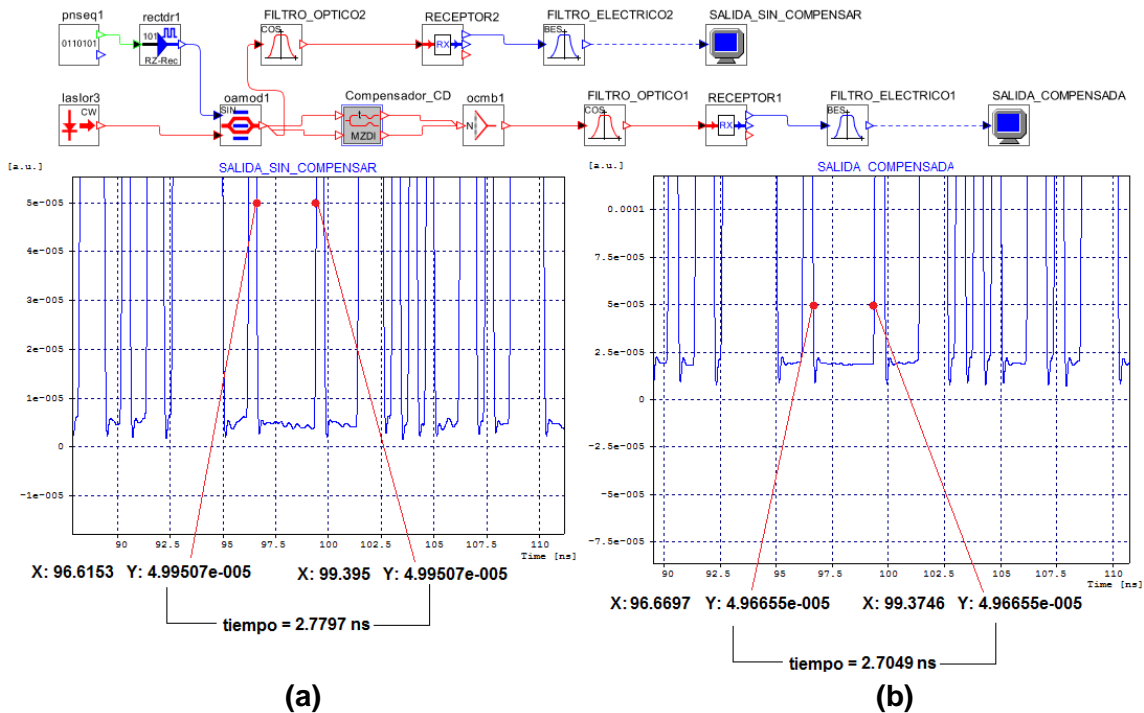


Figura 4.19 (a) Pulso eléctrico de la señal antes del compensador de CD, (b) Pulso eléctrico de la señal después del compensador de CD

En la Figura 4.19, se observa que el pulso medido (en un solo canal de transmisión a 194.1THz), no se ensancha cuando está presente el compensador de CD en un tiempo determinado, por el contrario este se reduce un poco, lo que demuestra que se está compensando el fenómeno de la dispersión cromática, debido a que el tiempo es menor respecto al tiempo del pulso de la señal no compensada, en una misma amplitud.

A continuación, se procede a realizar el análisis de la CD en la red óptica sin y con el módulo compensador de CD.

4.2.4 Análisis de la CD

Para el análisis de la CD en la red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps, se realiza de igual manera al procedimiento del ítem 4.1.4.

4.2.4.1 Distancia Máxima del Medio de Transmisión Óptico sin el Compensador de CD

Este parámetro, define cuál va ser la distancia máxima que se puede utilizar en el enlace de fibra óptica sin compensar la CD en la red. De este modo, se establece un punto de referencia para el estudio del impacto que tiene este fenómeno en las señales de datos que se transmiten por el medio de transmisión óptico.

Para realizar este análisis, se configura el escenario de simulación de la red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps sin el módulo compensador de CD, ver Figura 4.20.

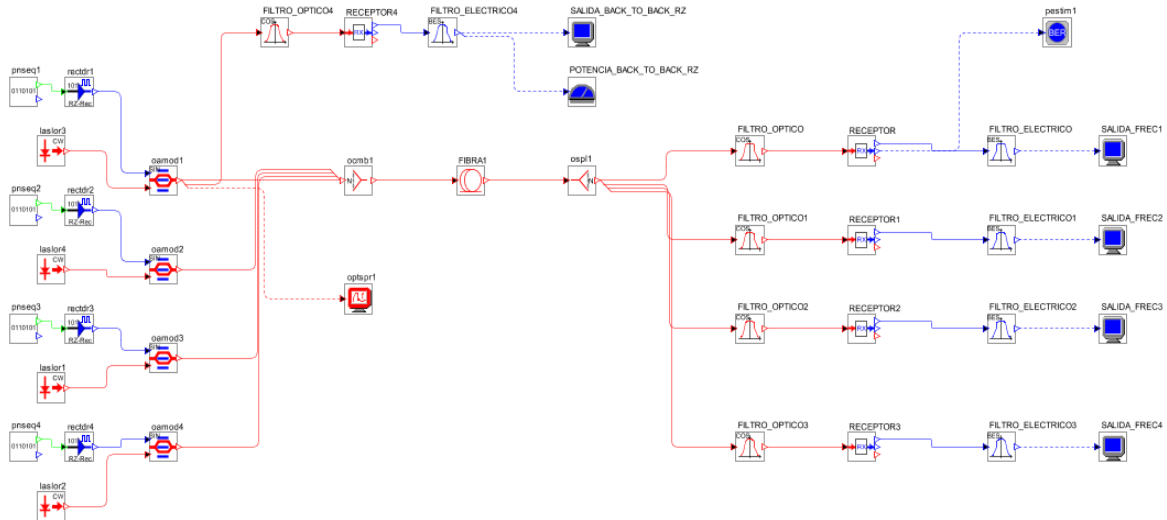


Figura 4.20 Escenario de simulación de la red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps sin la compensación de la CD

En el escenario de la Figura 4.20, se realiza el mismo procedimiento del ítem 4.1.4.1, para determinar el impacto de la CD en la red.

La Figura 4.21, muestra el comportamiento del medio de transmisión óptico, de acuerdo a la variación de la Distancia vs BER.

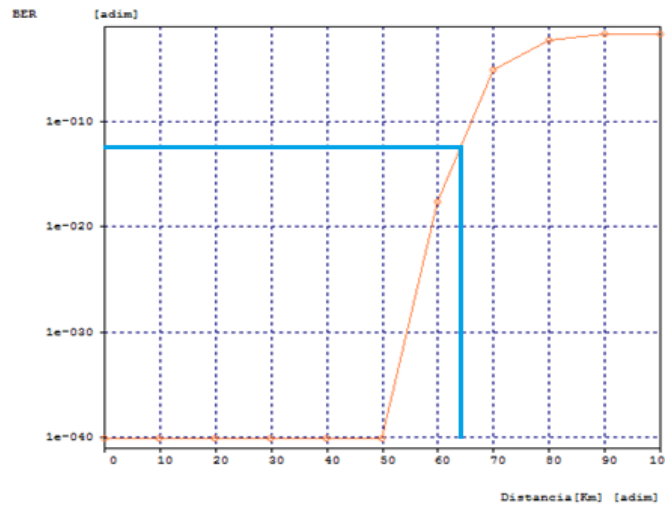


Figura 4.21 Distancia máxima del medio de transmisión óptico sin el módulo compensador de CD

Como se puede apreciar en la Figura 4.21, para una distancia de 63Km se pueden transmitir las señales de datos a una BER aproximada de $1e-12$, que coincide con el mismo resultado que se obtuvo en el análisis del caso de estudio 1, respecto a la distancia límite del medio de transmisión óptico sin compensar la CD.

4.2.4.2 Cálculo de la CD total en la red óptica

Por lo tanto, no se realizara el cálculo de la CD total o acumulada en la red óptica, debido a que la distancia máxima limite sin compensar la CD (63Km) coincide para las dos redes DWDM NRZ-OOK/RZ-OOK a 2,5Gbps. Entonces, la CD acumulada será la misma para los dos casos (Tabla 4.2).

4.2.4.3 Desempeño de la red óptica con y sin la compensación de la CD

Para verificar la degradación que causa la CD, se realizan varias pruebas piloto en la red óptica DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps (sin EDFA), sin y con el módulo compensador de CD en los diferentes canales de transmisión, con el fin de obtener los resultados de BER y Factor Q definidos por la ITU-T Sup39, de las señales en la recepción de datos y de esta manera realizar un análisis comparativo entre la respuesta de la señal compensada y no compensada, a través de los esquemas de diagrama del ojo correspondientes a cada una de ellas, para determinar el impacto que causa este fenómeno en el desempeño de la red óptica.

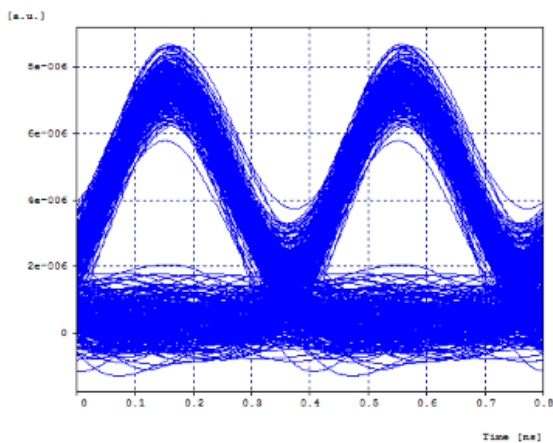


Figura 4.22 Diagrama del ojo sin compensar la CD para una distancia de 63Km a la frecuencia de trabajo de 193,4THz

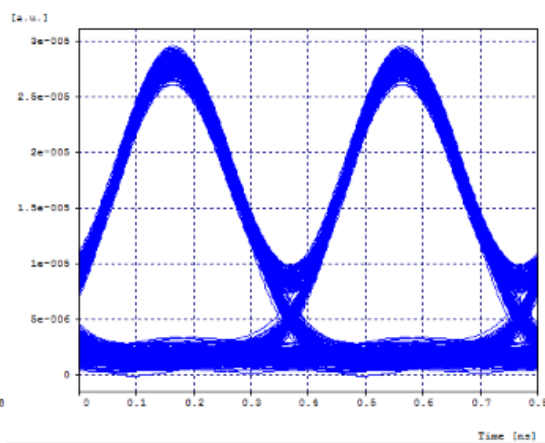


Figura 4.23 Diagrama del ojo con compensación de la CD para una distancia de 63Km a la frecuencia de trabajo de 193,4THz

Comparando la Figura 4.23 respecto a la Figura 4.22, se aprecia un óptimo desempeño del sistema al observar en el diagrama del ojo su apertura y buena definición, debido al buen cruce de amplitud y tiempo que presenta en un determinado periodo de bit. Esta mejora se logró al incorporar en la red DWDM (Figura 4.15) el módulo compensador de CD (Figura 4.16).

De esta manera, se consigue corregir en la recepción de los datos de la red óptica, un alto porcentaje del deterioro progresivo que sufre la señal de información al viajar a través del medio de transmisión óptico de 63Km afectado por las degradaciones que la CD genera, como son: el ruido, atenuación, entre otros.

La Tabla 4.7, muestra los resultados del desempeño de la red óptica sin y con la compensación del fenómeno de la CD para cada uno de los canales.

Red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps	Frecuencia de trabajo [THz]	Canales (Longitud de Onda) [nm]	BER	Facto Q [dB]	Jitter [ns]
Sin compensar la CD para una distancia de 63Km.	193.4	$\lambda_4=1550.11612$	2.1293e-11	16.558681	0.00659254
	193.3	$\lambda_3=1550.91804$	1.1577e-10	16.268941	0.00754055
	193.2	$\lambda_2=1551.72079$	1.5642e-12	16.867795	0.00728722
	193.1	$\lambda_1=1552.52438$	2.3570e-12	16.807333	0.00728894
Compensando la CD para una distancia de 63Km.	193.4	$\lambda_4=1550.11612$	1e-40	28.250484	0.00208706
	193.3	$\lambda_3=1550.91804$	1e-40	27.730400	0.00240715
	193.2	$\lambda_2=1551.72079$	1e-40	27.677784	0.00230955
	193.1	$\lambda_1=1552.52438$	1e-40	27.916550	0.00233690

Tabla 4.7 Desempeño de la Red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps con y sin la compensación de la CD para una distancia de 63Km

La Tabla 4.7, muestra los diferentes valores próximos o cercanos de la BER objetivo (1e-12) en la recepción del sistema de cada una de señales que transportan los datos sin compensar la CD, al igual que los resultados de las mismas señales compensando el fenómeno de la CD. Las señales compensadas alcanzan una BER de 1e-40 ideal, que es un óptimo resultado y permite alcanzar mayores distancias.

Por lo tanto al utilizar el módulo compensador de CD en la red óptica, se logra aumentar el Factor Q, mientras que el Jitter disminuye en cada una de las señales como muestra la Tabla 4.8, lo que permite obtener un sistema más eficiente y con mejoras en cuanto al fenómeno de la CD.

Canales (Longitud de Onda) [nm]	Mejora del Factor Q compensando la CD [dB]	Disminución del Jitter compensando la CD [ns]
$\lambda_4=1550.11612$	11.646159	0.00450548
$\lambda_3=1550.91804$	11.461459	0.00513340
$\lambda_2=1551.72079$	10.809989	0.00497767
$\lambda_1=1552.52438$	11.109217	0.00495204

Tabla 4.8 Mejora del Factor Q y el Jitter producto de la compensación de la CD

La Tabla 4.8, muestra los resultados cuando se realiza la diferencia entre la señal no compensada y la compensada respecto al Factor Q y el Jitter. Estos resultados, permiten verificar la mejora en el desempeño de la red óptica cuando se realiza la compensación del fenómeno de la CD, a través del módulo empleado.

4.2.4.4 Distancia Máxima Límite de la Red Óptica con el Módulo Compensador de CD y el EDFA

Para encontrar la distancia máxima que puede lograr la red óptica al utilizar el módulo compensador de CD, esta se configura de acuerdo al escenario de la Figura 4.16, donde se excluye al EDFA del medio de transmisión, obteniendo así la Figura 4.24.

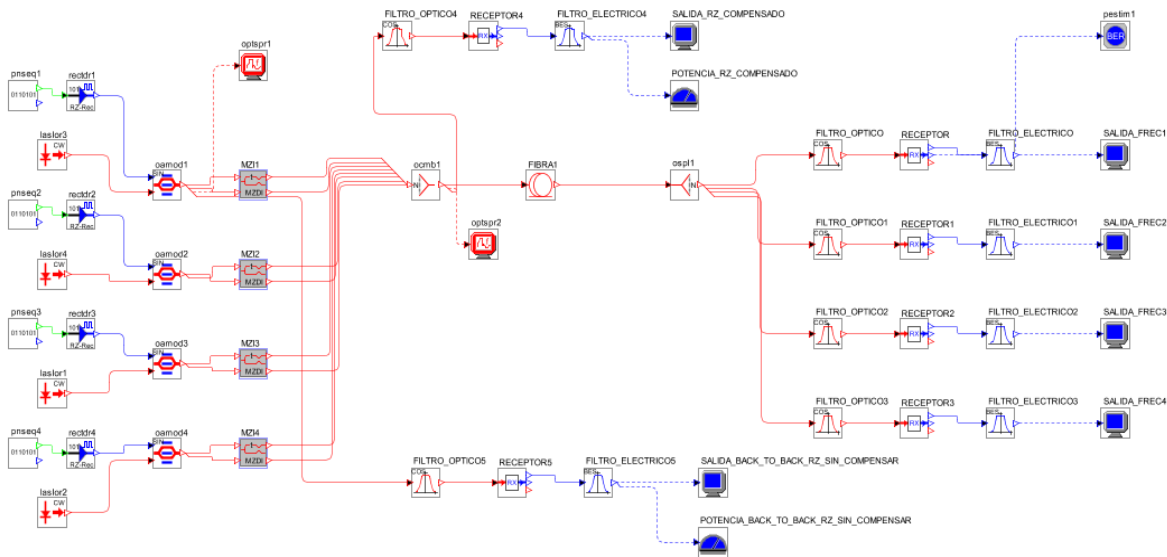


Figura 4.24 Escenario de simulación de la red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps para determinar la distancia máxima compensada por el módulo

La Figura 4.24 muestra la configuración del escenario de simulación, que permite analizar el desempeño del módulo compensador de CD en la red óptica, con el fin de determinar hasta donde es viable la transmisión de las señales de los datos con baja dispersión. Para esto, se realiza un análisis de los resultados de simulación de la Distancia vs BER y el diagrama de le ojo, ver Figuras 4.25 y 4.26.

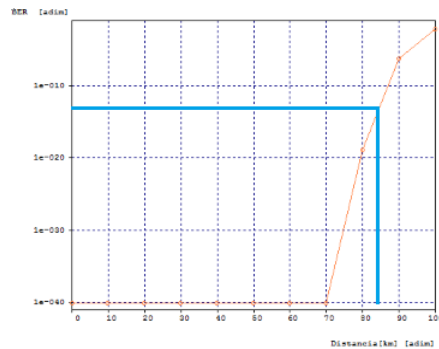


Figura 4.25 Distancia máxima que puede alcanzar el medio de trasmisión óptico utilizando el compensador de CD

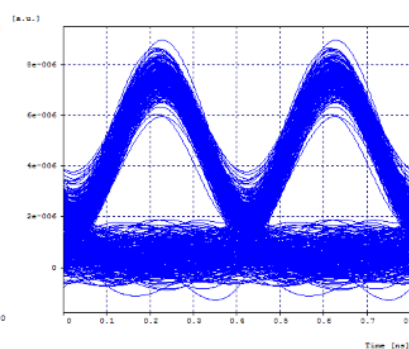


Figura 4.26 Diagrama del ojo con compensación de la CD a la frecuencia de trabajo de 193,4THz

En la Figura 4.25, se puede observar que para una distancia de 84Km se logra transmitir las señales de los datos a una BER aproximada de 1e-12 cuando se compensa la CD,

donde el efecto de la atenuación causado por el fenómeno de la CD comienza a ser notable, como se aprecia en la Figura 4.26. Sin embargo, este diagrama del ojo presenta baja atenuación, lo que garantiza que esta señal puede ser tratada para corregir el efecto que causa esta degradación y así obtener una adecuada recepción de los datos.

Entonces para corregir el efecto de la atenuación, se adapta en el medio de transmisión óptico el amplificador tipo EDFA, como se muestra en la Figura 4.16, donde es recomendable operar a baja potencia en el dispositivo, para evitar la excitación de los efectos no lineales en la red óptica.

Por lo tanto se configura al amplificador tipo EDFA por defecto de acuerdo a la Tabla 2.8, que corresponden a los valores de los parámetros mínimos que utiliza el dispositivo. De esta manera se realiza la simulación, para determinar hasta donde es viable transmitir amplificando las señales de los datos compensados en la red óptica. De acuerdo, a los resultados obtenidos en las variaciones de la Distancia vs BER y el comportamiento del diagrama del ojo, se halla la distancia máxima límite en la red.

La Figura 4.27, muestra que para una distancia de 105Km se logra una BER aproximada de $1e-12$ en las señales, donde el efecto de la atenuación comienza a ser notable de nuevo, como se aprecia en la Figura 4.28.

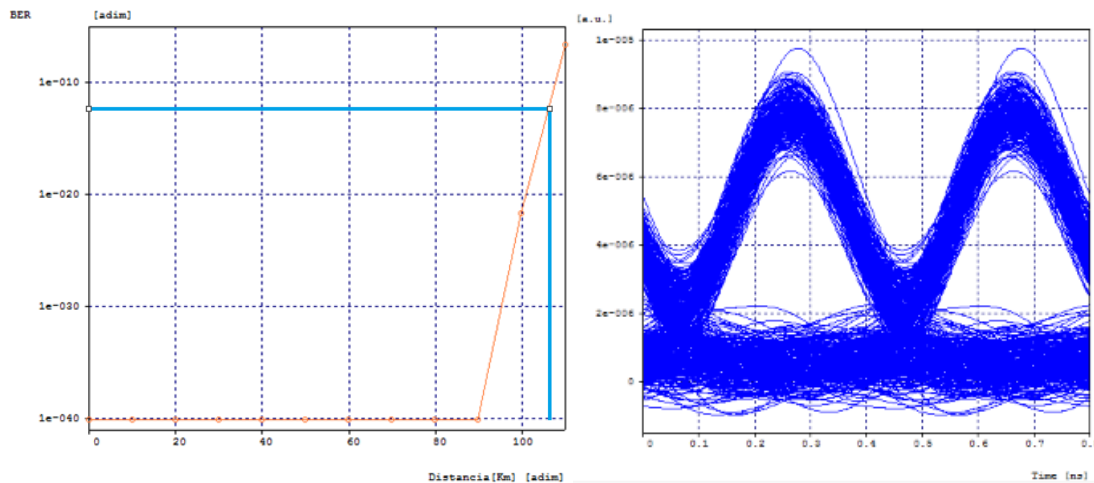


Figura 4.27 Distancia máxima límite que puede alcanzar en el medio de transmisión óptico amplificando la señal compensada **Figura 4.28 Diagrama del ojo de la señal compensada y amplificada a la frecuencia de trabajo de 193,4THz**

Para minimizar dicho efecto y alcanzar mayores distancias en la red, se recomienda realizar variaciones gradualmente en la ganancia, NF y la potencia del dispositivo, así como también la potencia en el láser, hasta conseguir el valor deseado de distancia y BER en las señales de los datos que se requiera transmitir; en lo que concierne al análisis de esta investigación, no se realizan variaciones en los parámetros dichos anteriormente, ya que se quiere solamente demostrar el máximo rendimiento del módulo compensador de CD diseñado y el óptimo desempeño de los dispositivos activos (láser CW, EDFA) que conforman esta red óptica a bajas potencias. De este modo se garantiza una optimización en los recursos que brindan estos dispositivos activos y además se establece un punto de

referencia en esta investigación, para trabajos posteriores respecto al estudio de los efectos lineales, en especial la CD y su compensación.

La Tabla 4.9, muestra los resultados del desempeño de la red óptica utilizando el módulo compensador de CD y el amplificador EDFA para cada uno de los canales.

Red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps	Frecuencia de trabajo [THz]	Canales (Longitud de Onda) [nm]	BER	Facto Q [dB]	Jitter [ns]	Distancia Límite [Km]
Desempeño de la red óptica, utilizando el modulo compensador de CD.	193.4	$\lambda_4=1550.11612$	2.9916e-12	16.896230	0.00701855	84
	193.3	$\lambda_3=1550.91804$	4.7995e-11	16.307085	0.00772811	
	193.2	$\lambda_2=1551.72079$	2.5647e-11	16.368309	0.00762149	
	193.1	$\lambda_1=1552.52438$	5.1835e-11	16.372318	0.00732587	
Desempeño de la red óptica compensada, corrigiendo el efecto de la atenuación a través del amplificador tipo EDFA.	193.4	$\lambda_4=1550.11612$	3.4464e-13	17.156615	0.00700194	105
	193.3	$\lambda_3=1550.91804$	1.5891e-12	17.070443	0.00694647	
	193.2	$\lambda_2=1551.72079$	1.4521e-13	17.268046	0.00702957	
	193.1	$\lambda_1=1552.52438$	3.2898e-12	16.801059	0.00730428	

Tabla 4.9 Desempeño total de la Red DWDM RZ-OOK a 2,5Gbps compensado el fenómeno de la CD y corrigiendo el efecto de la atenuación

De los resultados de la Tabla 4.9 se puede concluir que:

- Con la utilización del módulo compensador de CD, se transmiten las señales de los datos de una manera fiable sin dispersión aproximadamente hasta 21Km de más (63km+21km=84km). A partir de esta distancia el efecto de la atenuación comienza a ser notable en las señales.
- El EDFA ayuda a corregir el efecto de la atenuación (cuando se alcanza la máxima distancia con el compensador de CD), lo que permite aumentar la distancia del medio de transmisión óptico hasta 21Km de más (84km+21km=105km). Sin embargo, a partir de esta distancia las señales de los datos comienzan a degradarse. Además, este amplificador mejora la BER, Factor Q y Jitter.

4.3 Análisis de Resultados Finales de los Dos Casos de Estudio

Para los dos casos de estudio, se realiza la comparación de resultados de los sistemas DWDM NRZ-OOK/RZ-OOK sin y con el módulo compensador, así como también el desempeño del EDFA en estas redes, ver Tabla 4.12.

De la Tabla 4.12, se puede decir que:

- Al evaluar las redes DWDM NRZ-OOK/RZ-OOK hasta la distancia máxima alcanzable en presencia del compensador y del EDFA para todos los casos, se observa que la BER se aproxima a la objetivo (1e-12) con un Factor Q de 17db. Cuando se empieza a incrementar esta distancia (máxima), se obtiene una

recepción de las señales no tan adecuada, debido a que la atenuación comienza a deteriorar la señal de información. Por tanto, se considera que es posible enviar los datos de una manera eficiente hasta aproximadamente 100km, para los dos casos de estudio.

- En la red DWDM NRZ-OOK, se puede alcanzar 2Km más de fibra óptica respecto a la red DWDM RZ-OOK.
- El Jitter en la red DWDM RZ-OOK es menor en comparación con la red DWDM NRZ-OOK, para todos los casos.
- La OSNR en las redes DWDM NRZ-OOK/RZ-OOK presenta el mismo rango de variaciones entre 41-42dB para todos los casos, mientras que la potencia de recepción tiene cambios considerables en los distintos porcentajes que califican el desempeño de estas redes.

Red DWDM NRZ-OOK a la frecuencia de 193,4 THz	Distancia [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	OSNR_{TX} [dB]	OSNR_{RX} [dB]	P_{Rx} [dBm]
Rendimiento de la red sin compensar la CD, para la distancia de 63Km	15.75	1e-40	40.000000	0.0702715	42.013557	42.058876	-11.412
	31.5	1e-40	39.996161	0.0729572	42.013557	41.850449	-15.7522
	47.25	1e-40	25.529480	0.0729254	42.013557	42.002380	-20.0812
	63	4.2564e-12	16.811241	0.0798989	42.013557	41.896776	-24.392
Rendimiento de la red compensada, para la distancia entre 63-86Km	68.75	1e-40	25.626039	0.0755949	42.016984	41.993847	-20.002
	74.5	1e-40	22.699971	0.0846743	42.016984	42.194980	-21.5998
	80.25	1.0212e-21	19.564503	0.0826515	42.016984	41.961386	-23.1852
	86	6.6704e-11	16.323482	0.0841836	42.016984	42.056805	-24.7706
Rendimiento de la red compensada, corrigiendo la atenuación a una distancia entre 86-107Km	91.25	1e-40	24.566245	0.0764341	42.016984	41.884620	-20.179
	96.5	9.3310e-38	22.244696	0.0824106	42.016984	42.159575	-21.6111
	101.75	3.7799e-20	19.352115	0.0839753	42.016984	41.924839	-23.0501
	107	3.825e-12	16.940416	0.0788262	42.016984	41.958652	-24.4811
Red DWDM RZ-OOK a la frecuencia de 193,4 THz	Distancia [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	OSNR_{TX} [dB]	OSNR_{RX} [dB]	P_{Rx} [dBm]
Rendimiento de la red sin compensar la CD, para la distancia de 63Km	15.75	1e-40	40.000000	0.000872295	42.125061	42.089008	-12.794
	31.5	1e-40	33.903387	0.00128062	42.125061	41.307510	-17.1339
	47.25	1e-40	25.610556	0.00272351	42.125061	41.529705	-21.4566
	63	2.1293e-11	16.558681	0.00659254	42.125061	41.770544	-25.7962
Rendimiento de la red compensada, para la distancia entre 63-84Km	68.25	1e-40	25.004336	0.0027158	42.126816	41.667292	-21.4106
	73.5	1e-40	22.931505	0.00372273	42.126816	42.200082	-22.8458
	78.75	2.2499e-22	19.886471	0.00534205	42.126816	42.151177	-24.2912
	84	2.9916e-12	16.896230	0.00701855	42.126816	41.544743	-25.751
Rendimiento de la red compensada, corrigiendo la atenuación a una distancia entre 84-105Km	89.25	1e-40	24.924553	0.00323848	42.126816	41.907291	-21.1309
	94.5	3.2913e-40	22.654192	0.00403333	42.126816	42.164960	-22.5691
	99.75	8,9008e-22	19,756654	0,00547071	42,126816	41,908352	-24,0002
	105	3,4464e-13	17,156615	0,00700194	42,126816	41,444784	-25,4185

Tabla 4.10 Resultados finales comparando los sistemas DWDM NRZ-OOK/RZ-OOK sin y con el módulo compensador de CD para distintos porcentajes de desempeño

5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros de la realización de este trabajo de grado. Las conclusiones se basan en los diferentes objetivos, ejecución y análisis de las simulaciones. Las recomendaciones se dan de acuerdo a las degradaciones ópticas que presenta la CD en una red DWDM.

5.1 Conclusiones

- Al optimizar los recursos de los dispositivos activos (Laser CW y EDFA) en las redes DWDM NRZ-OOK/RZ-OOK a nivel de bajas potencias, ganancias y figura de ruido, se garantiza un sistema óptimo y eficiente, ya que al realizar el OPM se obtuvo como resultado una BER de $1e-12$ y un Factor Q de 16dB aproximadamente, lo cual es muy próximo a lo estipulado por la recomendación de la ITU-T Sup39.
- El MZI por ser un dispositivo de alto rendimiento, dada su gran velocidad de procesamiento de datos y bajas pérdidas de inserción, tiene la capacidad de compensar la CD en un sistema de fibra óptica DWDM a velocidades de datos de 2,5Gbps.
- En la herramienta de simulación OptSim™ de Synopsys, a través de los resultados arrojados por los espectros ópticos de los diferentes dispositivos Mach Zehnder (Figura 3.1), se logra determinar que el MZI Dual-arm Ideal presenta el mejor rendimiento para el diseño del módulo compensador de CD, por tener mayor amplitud en la intensidad de la señal respecto a los otros dispositivos (Tabla 3.1).
- Se evidencia el óptimo desempeño del módulo compensador de CD basado en estructuras MZI, cuando se realiza un arreglo en cascada o paralelo con el dispositivo MZI Dual-arm Ideal, ya que al comparar la tasa de error de bit entre las distintas configuraciones, se observa claramente que este arreglo presenta el mejor desempeño con una BER de $1e-40$ (Figura 3.6 y Tabla 3.5).
- Los parámetros de configuración del módulo compensador de CD diseñado son de gran importancia en especial el retardo, ya que de él depende si la señal a la salida es constructiva o destructiva. Dado lo anterior, se determina con el OPM que con un retardo de 40ps, se obtiene un adecuado funcionamiento del módulo compensador de CD al tener una BER de $1e-40$ y un Factor Q de 40dB (Tabla 3.6).
- Se demostró que en los sistemas DWDM NRZ-OOK/RZ-OOK a 2,5Gbps al implementar el módulo compensador de CD diseñado, se disminuyó el fenómeno de la dispersión cromática (Figura 4.12 y 4.26) y se logró alcanzar hasta 23km y 21km de más en dichos sistemas respectivamente (Figura 4.11 y 4.25). Así mismo, cuando se incluye el EDFA, se logra corregir la atenuación hasta

distancias de 21km en ambos sistemas (Figura 4.13 y 4.27). Por lo tanto, con la inclusión del módulo compensador de CD y del EDFA se alcanzan distancias de 107km y 105km para los dos sistemas respectivamente, logrando claramente un mejor desempeño en el sistema NRZ-OOK.

- Con el diseño del compensador de CD basado en estructuras MZI para redes DWDM a 2,5Gbps, se logra obtener un dispositivo capaz de compensar la CD en un alto porcentaje y de manera confiable.

5.2 Recomendaciones

- Definir una buena metodología es de gran importancia para garantizar los resultados, de acuerdo a los objetivos que se plantean.
- Conocer a fondo la teoría del MZI para realizar algún tipo de aplicación ya sea como filtro o ecualizador.
- De acuerdo a las pruebas realizadas en el arreglo del compensador de CD, se recomienda trabajar con el retardo de 40ps en los MZI Dual-arm Ideal para cualquier otro tipo de configuración.

5.3 Trabajos Futuros

Mediante el cumplimiento de los objetivos del trabajo de grado, se identificaron nuevas investigaciones concernientes al análisis del módulo compensador de CD diseñado, para mejorar el desempeño en las redes DWDM a 2,5Gbps, como son:

- Analizar el impacto del módulo compensador de CD, en post-compensación y en compensación simétrica a distintas velocidades.
- Analizar comparativamente la compensación de la CD entre el módulo diseñado y otros tipos de compensación (DCF, FBG, entre otros).
- Analizar el comportamiento del módulo diseñado respecto a los diferentes formatos de modulación multinivel.
- Realizar un compensador de CD que soporte una mayor tolerancia a este fenómeno en una red DWDM a 2,5Gbps.
- Realizar un diseño a partir de MZI, para controlar los fenómenos no lineales en una red DWDM.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AQ. Zheng, "On the SOA-based MZI all-optical logic gates for all-optical networks," 2012. Disponible en: arxiv.org, <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1205/1205.0268.pdf>.
- [2] A. Lerin, "Modulación directa de diodos láser de alta velocidad para sistemas de transmisión coherente" Proyecto final de carrera para obtener el título de Ingeniero de Telecomunicaciones, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicaciones de Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España, 2012.
- [3] N. K. Dutta, et al, "Pseudo Random Word Generation Using Regular and Quantum Dot Semiconductor Optical Amplifiers," *IEEE*, 978-1-4244-2677-5, pp.1-4, 2006.
- [4] O. R. Alvarado Amaya, "Recomendaciones para el diseño, implementación y puesta en servicio de red DWDM para empresas de telecomunicaciones en el Salvador" Trabajo de graduación para optar al título de ingeniero en telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de Don Bosco, San Salvador, El Salvador, Octubre de 2009.
- [5] S. Kumar, et al, "All-optical half adder using and SOA and a PPLN waveguide for signal processing in optical networks," *Optic Express*, Vol.14, No.22, pp. 10255-10260, Oct, 2006.
- [6] J. Ocón González, "Estudio de la intersección de regeneradores 1R en un enlace óptico WDM punto a punto mediante herramientas CAD" Proyecto final de carrera, Departamento de Tecnología y Bioingeniería, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2012.
- [7] J. C. Grosz, "Sistema de Comunicación por Fibra Óptica de Alta Capacidad," Artículo de interés, Departamento de Física y Matemática, Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA), Buenos Aires, Argentina, 2004. Disponible en: unmsm.edu.pe, <http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/consejo/boletin51/enpdf/a03.pdf>.
- [8] J. G. López Perafán, et al, "Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM," *Revista Facultad de Ingeniería*, ISSN 0121-1129, Vol.20, No. 31, pp. 23-35, Jul-Dic, 2011.
- [9] J. A. Hernández Rodríguez, "Telecomunicación por Sistemas Ópticos" Tesis para obtener el título de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Electrónica Unidad Culhuacan, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, 2010.
- [10] 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.
- [11] C. E. Pérez Valenzuela, et al, "Tendencias en Telecomunicaciones Ópticas," Universidad Del Cauca, Popayán-Colombia, PMD.
- [12] Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, ITU-T Recomendación G.694.1, 2012.
- [13] Spectral grids for WDM applications: CWDM Wavelength grid, ITU-T Recomendación G.694.2, 2003.

- [14] K. J. Hoyos, J. S. Vélez, “*Impacto de las Propiedades de una Fibra Compensadora de Dispersión (DCF) en el Diseño de un Sistema WDM,*” Tesis Pregrado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, Enero de 2013.
- [15] O. I. Gaxiola, “*Simulador de un sistema de comunicación óptico empleando multicanalización por división de longitudes de onda (WDM),*” Tesis Maestría en Ciencias con Especialidad en Sistemas Digitales, Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital, Instituto Politécnico Nacional, Tijuana, México, Junio de 2005.
- [16] Interfaces ópticas para sistemas multicanales con amplificadores ópticos, ITU-T Recomendación G.692, (10/98).
- [17] J. C. Colombo, “*Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo OTDR,*” Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Tucumán Quito-Ecuador, OTDR, 2011.
- [18] J. L. Caizaluisa, “*Estudio para la integración de la técnica de multiplicación DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) dentro de un enlace Quito-Guayaquil que utilice SDH como técnica de transmisión para mediana empresa portadora,*” Proyecto previo para la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, Julio de 2009.
- [19] A. G. Rodríguez, “*Diseño y caracterización de sistemas opto electrónicos de comunicaciones basados en fibra óptica,*” Proyecto fin de carrera Ingeniería Técnica Industrial, Departamento de Tecnología Electrónica, Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, Febrero de 2011.
- [20] C. R. Vieites, “*Implementación de un Sistema DWDM en la Red Interurbana de Fibra Óptica de Telcel BellSouth y Evaluación Teórica de Equipos DWDM,*” Especialización en Telecomunicaciones Digitales, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Comisión de Estudios de Postgrado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela, Diciembre de 2003.
- [21] F. Saavedra, et al, “*Propagación de Pulsos Ópticos a través de Amplificadores de Fibra Dopada con Erblio (EDFA),*” *Revista Facultad de Ingeniería – Universidad Tarapaca*, Vol.13, No.3, pp. 82-88, 2005.
- [22] Equipo de prueba del factor Q para evaluar la calidad de transmisión de los canales ópticos, ITU-T Recomendación O.201, (07/2003).
- [23] Múltiples aplicaciones DWDM con interfaces ópticas de un solo canal óptico, ITU-T Recomendación G.698.1, (11/2009).
- [24] Consideraciones de diseño del sistema óptico y de ingeniería, ITU-T Recomendación G.Sup39, (09/2012).
- [25] J. F. Grijalba, G. A. Gómez, “*Análisis del Desempeño de Formatos de Modulación en Comunicaciones Ópticas Sobre Redes WDM,*” Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, Agosto de 2010.
- [26] Ma. D. Manzanedo Martínez, “*Aplicación de los amplificadores ópticos de semiconductor a la fotónica de microondas,*” Tesis Doctoral, Departamento de

- Comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, Junio de 2013.
- [27] Characteristics of a single-mode optical fibre and cable, ITU-T Recomendación G.652, (11/2009).
- [28] Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable, ITU-T Recomendación G.655, (11/2009).
- [29] J. A. Dinamarca, "Análisis de Diagramas de Ojo," Universidad Técnica Federico Santa María, Chile, ITCD, ROL: 9721036-5, Noviembre 6 de 2002.
- [30] Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable, ITU-T Recomendación G.653, (07/2010).
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] J.P. Agredo, H.J. Ordoñez, "Análisis del desempeño de redes WDM frente a variaciones en los parámetros de transmisión y su incidencia en los efectos no lineales" Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2010.
- [35] TELNET, "Fibra Óptica NGN- Dispersión Cromática y PMD," TELNET Redes Inteligentes S.A., España, Noviembre de 2009.
- [36] C. Ararat, E. Paz, "Análisis del desempeño de los formatos (RZ-NRZ)/DQPSK a 10 Y 40Gb/s en una Red Metropolitana DWDM" Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2013.
- [37] D. Hoh, et al, "Chromatic dispersion measurement of microstructured optical fibers for nonlinear applications," [Online] *DGaO Proceedings*, ISSN 1614-8436-um: nbn: 0287-2012-A036-1, 2012.
Disponible en: <http://www.dgao-proceedings.de>
- [38] 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.
- [39] 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.

- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] R. Jones, et al, "Silicon Photonic Tunable Optical Dispersion Compensator," *Optic Express*, Vol.15, No.24, pp. 15836-15841, Nov, 2006.
- [43] OptSim, "User Guide", RSoft, 2009.
- [44] Ulgen, O. M., et al., "Simulation Methodology-a Practitioner's Perspective," ed: Michigan Simulation User Group, Technical Committee on Simulation Methodology, pp. 1-24, 2000.
- [45] OptSim, "Models Reference, Volumen I Sample Mode", RSoft, 2009.
- [46] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, "Dispersion," *Optical Networks*, R. Adams, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Morgan Kaufmann Publishers. An Imprint of Elsevier: San Francisco, San Diego, New York, Boston, London, Syney, Tokyo, 2002, pp. 308-320.
- [47] B. Calle, "Fibra G.655 y G.652D," *Informe sobre la comparación, características y precios de las fibras ópticas G.655 y G.652D*," Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador, Marzo 27 de 2011.
- [48] Supervisión óptica para sistemas de multiplexación por división en longitud de onda densa, ITU-T Recomendación G.697, (02/2012).
- [49] 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.
- [50] Ma. Yunzhu, et al, "Novel optical filters configuration for dispersion compensation in high-speed WDM optical communication systems," *IEEE*, 1-4244-0463-0, 2006.
- [51] H. Kawashima, K. Nara, "Wideband Tunable Dispersion Compensator Using a 25-Stage PLC-MZI," *Revista Furukawa*, No.35, pp. 6-11, 2009.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] I. Suárez, et al, "Fabricación, caracterización y modelado de interferómetros Mach-Zehnder integrados en guías de onda de LiNbO3: Zn," *OPTOEL cuarta reunión española de optoelectrónica*, pp. 1 - 6, 2005.
- [55] M. Secondini, "Optical Equalization: System Modeling and Performance Evaluation," *Journal of Lightwave Technology*, Vol.24, No.11, pp. 4013 - 4021, 2006.
- [56] D. Borne, "The fiber-optic transmission chanel, Long-Haul optical transmission systems, Binary modulation formats, Differential quadrature phase shift keying,

- Long-haul DPSK transmission, Polarization-multiplexing, Polarization-multiplexed DQPSK,” Robust Optical Transmission Systems Modulation and Equalization,* Copyright by Dirk van den Borne: Países Bajos, 2008, pp. 11-171.
- [57] F. Moliner García, “Análisis del OSNR de configuraciones de enlaces de Fibra Óptica”, Tesis de Maestría, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España, Noviembre de 2009.
- [58] GNTT, “Parámetros de Desempeño Óptico,” Universidad Del Cauca, Popayán-Colombia, PDO.
- [59] D. A. Buelvas Peñarredonda, et al, “Redes Ópticas DWDM: Diseño e Implementación de una red WDM,” *Revista Visión Electrónica*, Año 4, No.1, pp. 70-80, Enero-Junio, 2010.
- [60] J. A. Gama, “Evaluación del Desempeño de Sistemas WDM Utilizando Formatos Avanzados de Modulación Óptica,” Tesis pregrado, Facultad de Ingenierías, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, Octubre de 2010.
- [61] A. Leiva L., et al, “Efectos de la Dispersión por Modo de Polarización (PMD) en la Propagación de Pulsos a través de Fibras Ópticas,” *Revista Chilena de Ingeniería*, Vol.15, No.3, pp. 336-343, 2007.