

**DISEÑO DE UN MÓDULO COMPENSADOR DE DISPERSIÓN
CROMÁTICA EN UN ENTORNO DE
CO-SIMULACIÓN MATLAB/OPTSIM PARA UNA RED DWDM A
10Gbps**



**Angie Vanessa Trujillo Imbachí
Anderson Daniel Zemanate Trujillo**

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones- GNTT
Popayán, 2019**

**DISEÑO DE UN MÓDULO COMPENSADOR DE DISPERSIÓN
CROMÁTICA EN UN ENTORNO DE
CO-SIMULACIÓN MATLAB/OPTSIM PARA UNA RED DWDM A
10Gbps**



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

**Angie Vanessa Trujillo Imbachí
Anderson Daniel Zemanate Trujillo**

Director: MsC(c). Gustavo Adolfo Gómez Agredo

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones- GNTT
Popayán, 2019**

A mis padres que son la motivación de mi vida, a mi hermana y mi sobrina por su apoyo y amor infinito, a mis abuelos en la tierra y en el cielo por sus enseñanzas, a Nacho por los más lindos recuerdos, y a mi familia y amigos que siempre fueron parte esencial en el proceso, a ustedes... ¡Gracias!

Angie Vanessa Trujillo Imbachí

*Dedico este triunfo a mi madre, mi hermana y toda mi familia,
Por brindarme su apoyo y afecto incondicional,
A todos los que han hecho parte de mi vida,
Y en especial a mi padre que desde el cielo me acompaña
y ha sido mi guía,
Para todos ustedes de corazón...*

Anderson Daniel Zemanate Trujillo

AGRADECIMIENTOS

Principal y esencialmente al ingeniero Gustavo Gómez, nuestro director y amigo, por su paciencia, dedicación y compromiso con este trabajo de grado.

Un agradecimiento especial a los ingenieros, Aldo Peruggia y Jigesh Patel de AllOptic Designs, por su orientación y guía para lograr el desarrollo de los objetivos del presente trabajo.

A los ingenieros Giovanni López, Alejandro Toledo y Pablo Jojoa de la Universidad del Cauca, por su asesoría y acompañamiento en el proceso. A todos los ingenieros de nuestra Universidad que aportaron para culminar esta etapa.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. DISPERSIÓN CROMÁTICA EN LOS SISTEMAS WDM.	1
1.1 Tecnología WDM	1
1.2 Estándar CWDM (ITU-T G.694.2)	3
1.3 Estándar DWDM (ITU-T G.694.1)	5
1.3.1 Topología Punto a Punto	5
1.4 Dispersión	8
1.4.1 Dispersión Cromática	9
1.4.2 Parámetros de la Dispersión Cromática	10
1.4.3 Dispersión Cromática negativa y positiva	12
1.4.4 Dispersión del material	13
1.4.5 Dispersión por guía de onda	14
1.5 Compensación de la Dispersión Cromática	15
1.5.1 Tipos de Fibra Óptica	16
1.5.2 DCF: <i>Dispersion Compensating Fiber</i> (Fibra Compensadora de Dispersión)	18
1.5.3 FBG: <i>Fiber Bragg Grating</i> (Rejillas de Fibra de Bragg)	23
1.5.4 Compensación Electrónica	25
CAPÍTULO 2. ENTORNOS DE CO-SIMULACIÓN.	27
2.1 Parámetros de Monitoreo Óptico	27
2.1.1 Factor de Calidad Q	28
2.1.2 Tasa de Errores de Bit (BER)	29
2.1.3 Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR)	29
2.1.4 Diagrama del Ojo	30
2.1.5 Jitter	30
2.2 Entornos de Co-simulación	31
2.2.1 Matlab	31
2.2.2 OptSim	32
2.2.3 Conexión Co-simulación	34
2.3 Metodología de Simulación	35
2.3.1 Diagrama de Flujo de Simulación	37
2.4 Definición del escenario de simulación	38
2.4.1 Caracterización del entorno de simulación	38
2.4.2 Entorno de Simulación	40
CAPÍTULO 3. DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO COMPENSADOR DE DISPERSIÓN CROMÁTICA.	43
3.1 Diseño del Algoritmo	43
3.1.1 Cálculo de la Dispersión de Material	43

3.1.2 Cálculo de la Dispersión por Guía de Onda.....	45
3.1.3 Cálculo de la Dispersión Total (Dispersión Cromática)	46
3.1.4 Conexión con Optsim	48
3.2 Implementación y Pruebas.....	48
3.2.1 Enlace back to back.....	49
3.2.2 Enlace sin compensación.	52
3.2.3 Caso de estudio 1. Sistema compensado al 25%.	55
3.2.4 Caso de estudio 2. Sistema compensado al 50%.	67
3.2.5 Caso de estudio 3. Sistema compensado al 75%.	77
3.2.6 Caso de estudio 4. Sistema compensado al 100%.	87
3.2.7 Caso de estudio 5: Análisis para velocidad de 10Gbps.	96
CAPITULO 4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.	111
4.1 Conclusiones	111
4.2 Recomendaciones.....	112
4.3 Trabajos futuros	112
BIBLIOGRAFÍA	114

ANEXO A: CO-SIMULACIÓN MATLAB/OPTSIM

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 1

Figura 1.1 Tecnología WDM.....	2
Figura 1.2 Configuración General Red WDM	3
Figura 1.3 Características generales Sistemas CWDM.	4
Figura 1.4 Ventana de Operación y Esquema básico de una red CWDM.....	5
Figura 1.5 Topología Punto a Punto para una red DWDM	6
Figura 1.6 Esquema Básico Redes DWDM.....	6
Figura 1.7 Características generales Sistemas DWDM.....	7
Figura 1.8 Ventana de Operación y Esquema básico de una red DWDM.....	7
Figura 1.9 Dispersión en diferentes velocidades	8
Figura 1.10 Ensanchamiento del pulso	9
Figura 1.11 Dispersión del pulso a causa de las diferentes longitudes de onda viajando a distintas velocidades.....	9
Figura 1.12 Zonas de Dispersión	13
Figura 1.13 Índice Refractivo en Función de la Longitud de onda	13
Figura 1.14 Dispersión del Material. Entrada y Salida del Pulso.....	14
Figura 1.15 Variación del MFD acorde a la longitud de onda	14
Figura 1.16 Propagación del pulso en una Fibra dada	15
Figura 1.17 CD Total de una fibra monomodo. Dispersión del Material + Dispersión de Guía de onda.....	15
Figura 1.18 Variación del Índice de refracción para SSMF	16
Figura 1.19 Variación del Índice de refracción para DSF.....	17
Figura 1.20 Variación del Índice de refracción para NZ-DSF.....	17
Figura 1.21 Curva de Dispersión para cada Tipo de fibra.....	18
Figura 1.22 Fibras Comerciales Corning	19
Figura 1.23 Técnica Pre-compensación óptica para CD.....	20
Figura 1.24 Dispersión vs Longitud del enlace para la técnica de Pre-compensación	20
Figura 1.25 Técnica Post-compensación óptica para CD	20
Figura 1.26 Dispersión vs Longitud del enlace para la técnica de Post-compensación	21
Figura 1.27 Técnica de compensación simétrica para la CD	21
Figura 1.28 Dispersión vs Longitud del enlace para la técnica de Compensación Simétrica	22
Figura 1.29 Dispersión acorde a SSMF y DCF	23
Figura 1.30 Funcionamiento Rejillas de Bragg	23
Figura 1.31 Rejilla de Bragg para Compensación de Dispersión Cromática	24
Figura 1.32 Ejemplo de Rejilla de Bragg para compensar tres longitudes de onda en un sistema WDM.....	24
Figura 1.33 Pre-compensación Electrónica para CD	25
Figura 1.34 Pre-compensación Electrónica para CD	26

CAPITULO 2

Figura 2.1 Parámetros y efectos que influyen en el canal óptico	27
Figura 2.2 Efectos que influyen en el desempeño del enlace	28
Figura 2.3 Definición del umbral óptimo de decisión	29
Figura 2.4 Relación entre la función de densidad de probabilidad y la tasa de errores en los bits	29
Figura 2.5 Diagrama de ojo generado por la combinación y superposición de unos y ceros30	
Figura 2.6 Efecto del jitter en la señal de transmisión.....	31
Figura 2.7 Logotipo Matlab.....	32
Figura 2.8 Técnicas de simulación de la herramienta OptSim	33
Figura 2.9 Logotipo OptSim.....	34
Figura 2.10 Diagrama ejecución simulación.	37
Figura 2.11 Escenario de simulación.....	41

CAPITULO 3

Figura 3.1 Parámetros que caracterizan a la fibra	43
Figura 3.2 Descomposición cálculo ecuación Dispersión de Material.....	44
Figura 3.3 Cálculo Dispersión de Material Total.	44
Figura 3.4 Dispersión de Material.....	45
Figura 3.5 Cálculo Dispersión de Guía de Onda Total.....	45
Figura 3.6 Dispersión de Guía de Onda	46
Figura 3.7 Dispersión Total (Dispersión Cromática)	46
Figura 3.8 Cambio de pendiente de Dispersión total obtenida.....	47
Figura 3.9 Dispersión Total con pendiente negativa.	47
Figura 3.10 Relación variables Matlab/OptSim.....	48
Figura 3.11 Escenario de Simulación.	49
Figura 3.12 Enlace Back to Back generado.....	49
Figura 3.13 (a) Espectro de la señal de Transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, enlace Back to Back.	50
Figura 3.14 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) espectro de la señal filtrada, enlace Back to Back.	50
Figura 3.15 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER; vs Distancia de Transmisión, enlace Back to Back.....	51
Figura 3.16 Dispersión total acumulada.	52
Figura 3.17 Sistema sin Compensación.	52
Figura 3.18 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema sin compensación.	53
Figura 3.19 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema sin compensación.	53
Figura 3.20 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER; vs Distancia de Transmisión, sistema sin compensación.	54
Figura 3.21 Dispersión Acumulada para post-compensación al 25%.	56

Figura 3.22 Sistema Post-Compensado.....	56
Figura 3.23 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema post compensado al 25%.....	56
Figura 3.24 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema post compensado al 25%.....	57
Figura 3.25 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema post compensado al 25%.....	58
Figura 3.26 Dispersión Acumulada para pre-compensación al 25%.....	59
Figura 3.27 Sistema Pre-Compensado.....	59
Figura 3.28 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema pre compensado al 25%.	59
Figura 3.29 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema pre compensado al 25%.	60
Figura 3.30 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema pre compensado al 25%.	61
Figura 3.31 Dispersión Acumulada para compensación simétrica al 25%.	62
Figura 3.32 Sistema Compensado Simétricamente.....	62
Figura 3.33 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema compensado simétricamente al 25%.....	63
Figura 3.34 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema compensado simétricamente al 25%.....	63
Figura 3.35 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER; vs Distancia de Transmisión, sistema compensado simétricamente al 25%.	64
Figura 3.36 Factor Multiplicante compensación al 25%.....	65
Figura 3.37 Sistema Post-compensado mediante módulo diseñado.	65
Figura 3.38 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) señal eléctrica transmitida, sistema compensado módulo MATLAB al 25%.....	65
Figura 3.39 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema compensado Modulo MATLAB al 25%.....	66
Figura 3.40 Dispersión Acumulada para post-compensación al 50%.	68
Figura 3.41 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema post compensado al 50%.....	68
Figura 3.42 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema post compensado al 50%.....	69
Figura 3.43 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema post compensado al 50%.....	70
Figura 3.44 Dispersión Acumulada para pre-compensación al 50%.....	70
Figura 3.45 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema pre compensado al 50%.	71
Figura 3.46 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema pre compensado al 50%.	71
Figura 3.47 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema pre compensado al 50%.	72

Figura 3.48 Dispersión Acumulada para post-compensación al 50%.....	73
Figura 3.49 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema compensado simétricamente al 50%.....	73
Figura 3.50 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema compensado simétricamente al 50%.....	74
Figura 3.51 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema compensado simétricamente al 50%.....	75
Figura 3.52 Factor Multiplicador para compensación al 50%.....	75
Figura 3.53 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) señal eléctrica transmitida, sistema compensado módulo MATLAB al 50%.....	76
Figura 3.54 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema compensado módulo MATLAB al 50%.....	77
Figura 3.55 Dispersión Acumulada para post-compensación al 75%.....	78
Figura 3.56 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema post compensado al 75%.....	78
Figura 3.57 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema post compensado al 75%.....	79
Figura 3.58 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema post compensado al 75%.....	80
Figura 3.59 Dispersión Acumulada para pre-compensación al 75%.....	80
Figura 3.60 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema pre compensado al 75%.....	81
Figura 3.61 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema pre compensado al 75%.....	81
Figura 3.62 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema pre compensado al 75%.....	82
Figura 3.63 Dispersión Acumulada para compensación simétrica al 75%.....	83
Figura 3.64 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema compensado simétricamente al 75%.....	83
Figura 3.65 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema compensado simétricamente al 75%.....	84
Figura 3.66 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema compensado simétricamente al 75%.....	85
Figura 3.67 Factor multiplicante para compensar al 75%.....	85
Figura 3.68 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) señal eléctrica transmitida, sistema compensado módulo MATLAB al 75%.....	85
Figura 3.69 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema compensado módulo MATLAB al 75%.....	86
Figura 3.70 Dispersión Acumulada para post-compensación al 100%.....	87
Figura 3.71 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema post compensado al 100%.....	88
Figura 3.72 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema post compensado al 100%.....	88

Figura 3.73 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema post compensado al 100%.....	89
Figura 3.74 Dispersión Acumulada para pre-compensación al 100%.....	90
Figura 3.75 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema pre compensado al 100%.	90
Figura 3.76 Diagrama del ojo en Recepción y Espectro de la señal filtrada, sistema pre compensado al 100%.....	91
Figura 3.77 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema pre compensado al 100%.	92
Figura 3.78 Dispersión Acumulada para post-compensación al 100%.	92
Figura 3.79 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema compensado simétricamente al 100%.....	93
Figura 3.80 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema compensado simétricamente al 100%.....	93
Figura 3.81 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema compensado simétricamente al 100%.....	94
Figura 3.82 Factor multiplicante para compensar al 100%.	94
Figura 3.83 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) señal eléctrica transmitida, sistema compensado módulo MATLAB al 100%.	95
Figura 3.84 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema compensado módulo MATLAB al 100%.	96
Figura 3.85 Escenario de simulación a 10Gbps.	97
Figura 3.86 (a) Diagrama del Ojo y (b) señal eléctrica transmitida, enlace Back to Back a 10Gbps.	98
Figura 3.87 (a) Diagrama del Ojo y (b) señal eléctrica transmitida, enlace sin compensación a 10Gbps.	99
Figura 3.88 (a) Diagrama del Ojo y (b) señal eléctrica transmitida, enlace post compensado al 100% a 10Gbps.	99
Figura 3.89 (a) Diagrama del Ojo y (b) señal eléctrica transmitida, enlace pre compensado al 100% a 10Gbps.	100
Figura 3.90 (a) Diagrama del Ojo y (b) señal eléctrica transmitida, enlace compensado simétricamente al 100% a 10Gbps.....	101
Figura 3.91 Corrimiento de pulsos dado aumento de CD, sistema compensado Módulo MATLAB a 10Gbps.	102
Figura 3.92 Sistema compensado módulo CCM, con CD acumulada de 100ps/nm*Km a 10Gbps.	102
Figura 3.93 Sistema compensado módulo CCM, con CD acumulada de 1200ps/nm*Km a 10Gbps.	103
Figura 3.94 Sistema compensado módulo CCM, con CD acumulada de 1300ps/nm*Km a 10Gbps.	104
Figura 3.95 Sistema compensado módulo CCM, con CD acumulada de 1700ps/nm*Km a 10Gbps.	104

Figura 3.96 Sistema compensado módulo CCM, con CD acumulada de 1300ps/nm*Km a 10Gbps.	105
---	-----

LISTA DE TABLAS

CAPITULO 2

Tabla 2.1 Plan de frecuencias para 4 canales a 100GHz.	39
Tabla 2.2 Características básicas del escenario de simulación.	40
Tabla 2.3 Características Amplificador Corning Pure Gain 1500 Compact	42

CAPITULO 3

Tabla 3.1 Parámetros de Monitoreo Óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema para el enlace back to back.	50
Tabla 3.2 Parámetros de Monitoreo Óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema para el enlace sin compensación.....	53
Tabla 3.3 Parámetros de Monitoreo Óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema post compesnado al 25%.....	57
Tabla 3.4 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema pre compensado al 25%.	60
Tabla 3.5 Parámetros de Monitoreo Óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema compensado simétricamente al 25%.	63
Tabla 3.6 Parámetros de Monitoreo Óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema post compensado modulo MATLAB al 25%.	66
Tabla 3.7 Parámetros de Monitoreo Óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema post compensado al 50%.....	69
Tabla 3.8 Parámetros de Monitoreo Óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema pre compensado al 50%.	71
Tabla 3.9 Parámetros de Monitoreo Óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema compesnado simétricamnete al 50%.	74
Tabla 3.10 Parámetros de Monitoreo Óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema post compensado módulo MATLAB al 50%.	76
Tabla 3.11 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema post compensado al 75%.....	79
Tabla 3.12 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema pre compensado al 75%.	81
Tabla 3.13 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema compensado simétricamente al 75%.	84
Tabla 3.14 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema compensado módulo MATLAB al 75%.....	86
Tabla 3.15 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema post compensado al 100%.....	88

Tabla 3.16 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema pre compensado al 100%.	91
Tabla 3.17 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema compensado simétricamente al 100%.....	93
Tabla 3.18 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema compensado Módulo MATLAB al 100%.....	95
Tabla 3.19 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema enlace Back to Back a 10Gbps.	98
Tabla 3.20 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema enlace sin compensación a 10Gbps.	99
Tabla 3.21 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema enlace post compensado al 100% a 10Gbps.	100
Tabla 3.22 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema enlace pre compensado al 100% a 10Gbps.....	100
Tabla 3.23 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema. Enlace compensado simétricamente al 100% a 10Gbps.....	101
Tabla 3.24 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema enlace compensado Módulo MATLAB a 10Gbps con CD acumulada de 100ps/nm*Km.	103
Tabla 3.25 Parámetros de Monitoreo Óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema. Enlace compensado módulo MATLAB a 10Gbps con CD acumulada de 1200ps/nm*Km.	103
Tabla 3.26 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema. Enlace compensado Módulo MATLAB a 10Gbps con CD acumulada de 1300ps/nm*Km.	104
Tabla 3.27 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema. Enlace compensado módulo MATLAB a 10Gbps con CD acumulada de 1700ps/nm*Km.	105
Tabla 3.28 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema. Enlace compensado módulo MATLAB a 10Gbps con CD acumulada de 1300ps/nm*Km.	105
Tabla 3.29 Resultados Módulo CCM configurado al 100%.	106
Tabla 3.30 Tabla Resumen.....	107

ACRÓNIMOS

ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i> - Emisión Espontánea Amplificada.
BER	<i>Bit Error Rate</i> - Tasa de Error de Bit.
CATV	<i>Community Antenna Television</i> - Television por Cable.
CCE	<i>Custom Component Executable</i> - Componente Personalizado Ejecutable.
CCM	<i>Custom Component Matlab</i> - Componente Personalizado Para Matlab.
CD	<i>Chromatic Dispersion</i> - Dispersion Cromática.
CW	Continuous-Wave - Onda Continua.
DB	<i>Decibel</i> - Decibel
DCF	<i>Dispersion Compensating Fiber</i> - Fibra Compensadora de Dispersión.
DFB	<i>Distribute Feedback</i> - Retroalimentación Distribuida.
DPSK	<i>Differential Phase Shift Keying</i> - Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase.
DQPSK	<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i> - Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase en Cuadratura.
DSF	<i>Dispersion-Shifted Fiber</i> - Fibra Desplazada de Dispersión.
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> - División por Longitud de Onda Densa.
EDC	<i>Electronic Dispersion Compensation</i> - Compensación Electrónica de la Dispersión.
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> - Amplificador de Fibra Dopado de Erbio.
ESNR	<i>Electrical Signal to Noise Ratio</i> - Relación Señal a Ruido Eléctrica.
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i> - Rejillas de Bragg.
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum</i> – Anchura a Media Altura.
FWM	<i>Four Wave Mixing</i> - Mezcla de Cuatro Ondas.

Gbps	<i>GigaBite Per Second</i> - Gigabit por Segundo.
GHz	GigaHertz.
GUI	<i>Guide User Interface</i> - Guía de Interfaz de Usuario.
GVD	<i>Group Velocity Dispersion</i> - Dispersión de la Velocidad de Grupo.
IDE	<i>Integrated Develoment Environment</i> - Entorno de Desarrollo Integrado.
IOR	<i>Index Of Refraction</i> - Índice de Refracción.
ISI	<i>InterSymbol Interference</i> - Interferencia Intersimbólica.
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> - Unión Internacional de Telecomunicaciones.
Km	<i>Kilometer</i> - Kilometro.
MFD	<i>Mode Field Diameter</i> - Diámetro de Campo Modal.
MZ	Mach-Zehnder.
NDSF	<i>Non-Dispersion-Shifted Fiber</i> - Fibra Desplazada sin Dispersión.
NRZ	Non Return to Zero - No Retorno a Cero.
NZ-DSF	<i>Non-Zero-Dispersion-Shifted Fiber</i> - Fibra Desplazada de Dispersión-No Cero.
Nm	<i>Nanometer</i> - Nanómetro.
OOK	On-Off Keying - Modulación Encendido-Apagado.
OPM	<i>Optical Performance Monitoring</i> – Monitoreo del Desempeño Óptico.
OSNR	<i>Optical Signal Noise Ratio</i> - Relación Señal a Ruido Óptica.
PDS	<i>Processor Digital Signal</i> - Procesamiento Digital de Señales.
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i> - Dispersión del Modo de Polarización.
SPM	<i>Self-Phase Modulation</i> - Modulación de Auto fase.
SPT	<i>Spectral Propagation</i> - Propagación Espectral.

SMF-28e+	Special Single Mode Fiber - Fibra Monomodo Especial.
SSMF	<i>Standard Single-Mode Fiber</i> - Fibra Mono-Modo Estándar.
VBS	<i>Variable Bandwidth</i> - Ancho de Banda Variable.
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> - Multiplexación por División de Longitud de Onda.
XPM	<i>Cross-Phase Modulation</i> - Modulación de Fase Cruzada.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, los sistemas de comunicación por Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*) suministran el mayor ancho de banda y velocidad de todas las redes de comunicación modernas, sin embargo, estas redes presentan dificultades para responder a las degradaciones en la transmisión en los sistemas de comunicación por fibra óptica. Efectos como dispersión, atenuación y efectos no lineales conllevan a la degradación y/o pérdida de la información en el enlace. En el caso de la fibra óptica, la dispersión cromática (CD, *Chromatic Dispersion*) es la degradación que más afecta el sistema de comunicación; este efecto ocurre debido a que los pulsos emitidos por la fuente se conforman de diferentes longitudes de onda que a su vez viajan a diferentes velocidades, lo que genera tiempos de llegada diferentes al receptor, causando ensanchamiento temporal del pulso y dando paso al surgimiento de interferencia intersimbólica [1]. El impacto de la CD es altamente significativo en la calidad de la señal óptica transmitida, pues restringe la velocidad de transmisión y longitud del enlace. Por lo anterior, es necesario implementar técnicas de compensación que contribuyan a disminuir las degradaciones causadas por la dispersión cromática.

Este trabajo de grado presenta una investigación comparativa de las técnicas de compensación ópticas de la CD frente al comportamiento de un módulo compensador implementado y co-simulado en Matlab de MathWorks y OptSim de Rsoft, con el fin de mitigar los efectos degradantes que trae consigo la CD, y de esta forma consolidar un conocimiento que puede ayudar a encontrar soluciones más factibles en el ámbito de procesamiento digital de señales que den soporte a nuevas exigencias.

Debido a que dentro del contexto institucional no existe ninguna referencia de investigación sobre esta temática, los resultados obtenidos son una plataforma para nuevas investigaciones centradas sobre el procesamiento digital de señales en fibra óptica para redes WDM. Del mismo modo, se deja una base teórica sobre las técnicas de compensación utilizadas, así como también la co-simulación entre herramientas de simulación como lo son MATLAB y OptSim.

ABSTRACT

Nowadays, communication system by wavelength division multiplexing (WDM), provide the highest bandwidth and speed of all modern communication networks, however, these networks present difficulties to respond degradations in transmission in optical fiber communication systems. Effects such as dispersion, attenuation and nonlinear effects lead to the degradation and/or loss of information in the link. In the case of optical fiber, chromatic dispersion (CD) is the degradation that most affects communication system,

this effect happens because of the pulses emitted by the source are made up of different wavelengths, which in turn travel at different speeds, which generates different arrival times to the receiver, causing a temporary widening of the pulse and giving rise to the emergence of intersymbolic interference [1]. The CD impact is highly significant in the quality of the transmitted optical signal, since it restricts the transmission speed and link length. Therefore, it is necessary to implement compensation techniques that contribute to reduce the degradations caused by chromatic dispersion.

This grade work present a comparative investigation of optical compensation techniques of the CD with behavior of a compensating module implemented and Co-Simulate MATLAB in MathWorks and Rsoft OptSim, in order to mitigate the degrading effects that brings with it the CD, and thus consolidate knowledge that can help to find solutions more feasible in the digital signal processing field to give support to new requirements.

Because of within the institutional context, there is no reference of research on this topic, the results are a platform for new research focused on digital signal processing in optical fiber to networks WDM. In the same way, a theoretical base is left on the compensation techniques of the dispersion, as well as the co-simulation between simulation tools such as MATLAB and OptSim.

ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO.

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

Capítulo 1. Dispersión Cromática

En este capítulo se presenta la caracterización de las redes WDM en donde se incluye CWDM Y DWDM, sin embargo, se hace énfasis en DWDM. Posteriormente, se realiza una descripción detallada de la dispersión cromática y efectos en los enlaces de red y finalmente se presentan las técnicas de compensación ópticas para la CD.

Capítulo 2. Entornos de Co-Simulación

Se especifican los parámetros de monitoreo óptico y el modelo simplificado de red. Después, se define la metodología de simulación para generar un escenario para los diferentes casos de estudio, según las configuraciones de los módulos compensadores de dispersión a trabajar; además, se establece la estrategia de co-simulación utilizada con las herramientas OptSim de Rsoft y Matlab de Mathworks, que en su medida, permiten evaluar el desempeño de las diferentes técnicas de compensación para la CD.

Capítulo 3. Diseño, Análisis E implementación del Algoritmo de Dispersión Cromática

Se presenta el diseño del algoritmo para disminuir la dispersión Cromática realizado en Matlab, una comparación entre las técnicas de compensación para la CD y sus diferentes configuraciones (25%, 50%,75% y 100%), y el comportamiento frente al módulo diseñado; esto con el fin de establecer cual presenta un desempeño óptimo en una red DWDM a 2.5Gbps y 10Gbps

Capítulo 4. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

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

CAPÍTULO 1. DISPERSIÓN CROMÁTICA EN LOS SISTEMAS WDM.

Los medios de transmisión han surgido y evolucionado como sistemas primordiales para el desarrollo de la humanidad dado que en ellos se fundamenta la creación y despliegue de nuevas y mejores tecnologías en el ámbito de la electrónica y las telecomunicaciones, un claro ejemplo es la implementación de enlaces o sistemas de comunicación mediante la utilización de la fibra óptica. La demanda por parte de los usuarios de nuevos y mejores servicios, promueve e impulsa el estudio de métodos que permitan explotar los recursos presentes en el sistema de comunicación. En este contexto, se propone a la fibra óptica como alternativa en el diseño de redes cableadas de comunicación; pues se destaca por el manejo de altas tasas de transmisión de datos, baja atenuación en comparación a otros medios de transmisión e implementación en enlaces de largas distancias [1].

Debido al aumento de usuarios y grandes exigencias de anchos de banda, se hace necesaria la implementación de tecnologías para redes ópticas, de las cuales, la más implementada es WDM, brindando capacidad de transmisión a largas distancias. Al transmitirse una señal óptica sobre la fibra, dicha señal sufre los efectos de degradaciones lineales y no lineales, las cuales pueden afectar considerablemente el desempeño del sistema. Los efectos de la CD son los que afectan mayormente la calidad de la señal, siendo necesario la implementación de técnicas avanzadas de compensación para contrarrestar dicho efecto.

Para el desarrollo del presente capítulo, inicialmente, se hace una descripción de redes WDM, donde se incluye la tecnología por Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*) y la tecnología por Multiplexación por División de Longitud de Onda Ligeras (CWDM, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*); posteriormente, se realiza una descripción de la dispersión cromática, identificando sus principales efectos sobre el enlace. Finalmente, se hace una descripción de las técnicas actualmente utilizadas para compensar los efectos de la CD, donde se incluyen módulos compensadores de dispersión ópticos y electrónicos.

1.1 Tecnología WDM

WDM, representa un esquema en el que se modulan múltiples portadoras ópticas con diferentes longitudes de onda, las cuales se transmiten sobre la misma fibra (ver figura 1.1) utilizando corrientes de bits eléctricas como lo son los láser o leds [2]. Gran cantidad de redes de transporte punto a punto actuales se basan en la tecnología WDM, en donde se logra aumentar la capacidad de transmisión gracias a la multiplexación de las longitudes de onda; para ello se hace necesario un multiplexor en transmisión y un demultiplexor en recepción que realicen esta función, por lo tanto, WDM suministra gran ancho de banda a nivel físico debido a la característica de soportar gran cantidad de canales de diferentes longitudes de onda en una única fibra, y que conlleva a alcanzar velocidades de hasta terabits por segundo [3].

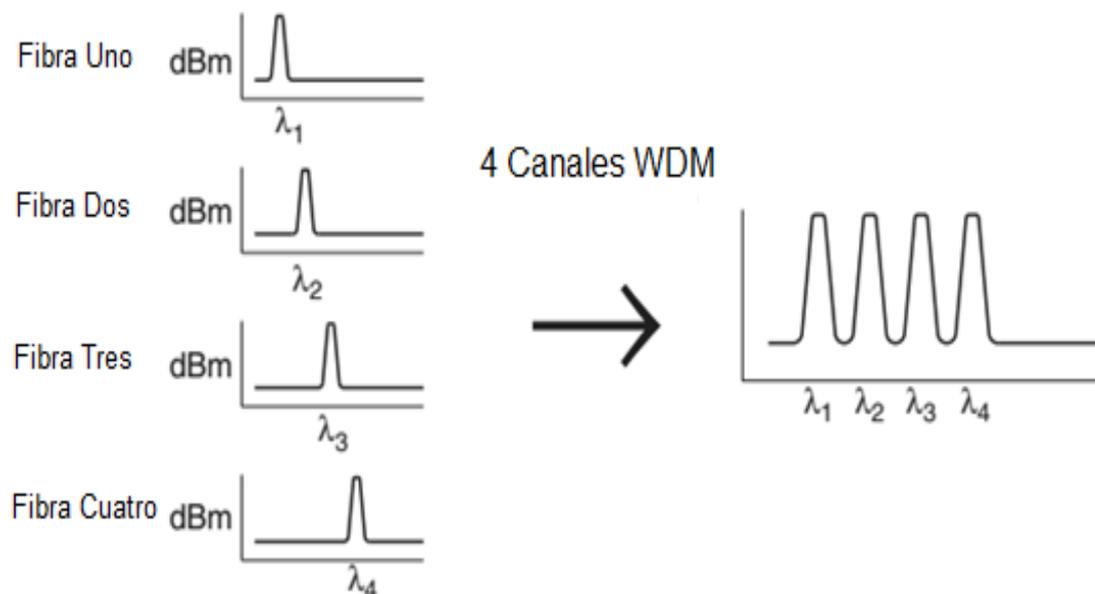


Figura 1.1 Tecnología WDM. Adaptado de [4].

Las redes WDM además de poseer un nivel de transporte totalmente óptico, donde es posible realizar el procesamiento electrónico de la información, también se caracterizan por [5]:

- Mantener las longitudes de onda independientes; es decir que una señal que se transporta en una longitud de onda es independiente de otra señal que se lleva en otra longitud de onda sobre la misma fibra.
- Reutilizar las longitudes de onda en la misma red, en donde estas diferentes longitudes pueden transportar señales a distintos lugares.
- Transparencia, la capa de transporte es independiente del formato de modulación empleado en nivel físico

La clasificación de los sistemas WDM se define basándose en los estándares propuestos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunication Union*), teniendo en cuenta el espaciamiento entre longitudes de onda, siendo espaciado un sistema CWDM y un sistema denso DWDM [6]. La tecnología WDM se implementó por primera vez utilizando fibra multimodo con longitudes de onda tanto de 850 como 1310 nm. Estos sistemas han sido menos habituales; sin embargo, algunos estándares utilizan CWDM para transportar señales a velocidades mayores a 1Gbps sobre fibras multimodo [7].

La figura 1.2 muestra la configuración general de una red WDM, la cual consta de cinco partes: transmisor, multiplexor, tramo de fibra óptica, demultiplexor y receptor. Cada longitud de onda forma un canal óptico y se trata de forma independiente del resto de canales.

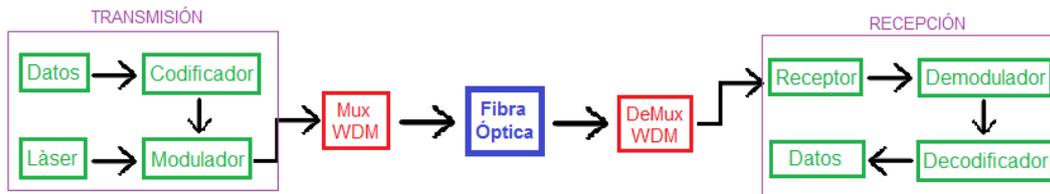


Figura 1.2 Configuración General Red WDM. Adaptado de [2].

En redes WDM el ancho de banda de una fibra puede dividirse hasta en 160 canales alcanzando velocidades de hasta terabits por segundo. Cabe aclarar que la fibra óptica es un medio de transmisión con un coeficiente de atenuación pequeño y un gran ancho de banda; sin embargo, a medida que la señal viaja por este medio, su potencia va disminuyendo, haciendo necesaria la implementación de amplificadores ópticos para recuperar la potencia de la señal y mantenerla dentro de la sensibilidad del receptor. Por otro lado, en la actualidad las redes de fibra monomodo son capaces de transportar señales a 10Gbps en 64 longitudes de onda o más, lo que se conoce como multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM) [6].

1.2 Estándar CWDM (ITU-T G.694.2).

CWDM fue utilizada inicialmente en los años 80 para transportar señales de video mediante fibras multimodo. Consiste en una técnica de transmisión de señales por medio de fibra óptica, con un espaciamiento de canales de 2500 GHz ~ 20nm. Debido a esto, es capaz de utilizar hasta 18 longitudes de onda para distancias cercanas a los 80km. CWDM es una tecnología del tipo WDM que se caracteriza por un espacio más ancho entre canales, en comparación a la tecnología DWDM; como se especifica en la Rec. UIT-T G.671 [8]. Los sistemas CWDM resultan realmente rentables debido a que los dispositivos a utilizar son poco robustos, permitiendo de esta manera dispositivos sin refrigeración, láseres simples y filtros pasabanda amplios, sin embargo, presentan anchos de banda lo suficientemente altos para adaptarse a las necesidades de redes metropolitanas, redes empresariales a corta distancia y como soporte para plataformas integradas de clientes, servicios y protocolos [9].

Mientras CWDM parte el espectro en grandes fragmentos, DWDM lo divide en pequeñas partes. La DWDM hace converger más de 40 canales en el mismo rango de frecuencia que se utilizan para dos canales de CWDM. CWDM está definida por longitudes de onda. La DWDM está definida en términos de frecuencias. El espaciado de las longitudes de onda más compacto en la DWDM abre espacio para más canales en una única fibra, pero es más costoso de implementar y de operar [10].

La Unión Internacional de Telecomunicaciones – sector telecomunicaciones (ITU-T, *International Telecommunication Union – Telecommunication Sector*) es el encargado de estandarizar las longitudes de onda utilizables para los sistemas de transmisión por fibra, en el año 2002 esta entidad creó la recomendación ITU-T G.694.2 donde se presenta el plan de longitudes de onda para sistemas CWDM, donde soporta un espaciamiento de canales de 20nm o 2500nm. Como se puede

observar, en las figuras 1.3 y 1.4 se encuentran resaltadas las características que incluye la recomendación para sistemas CWDM, además de la ventana de operación como el esquema básico de funcionamiento de las redes que cuentan con esta tecnología [11].

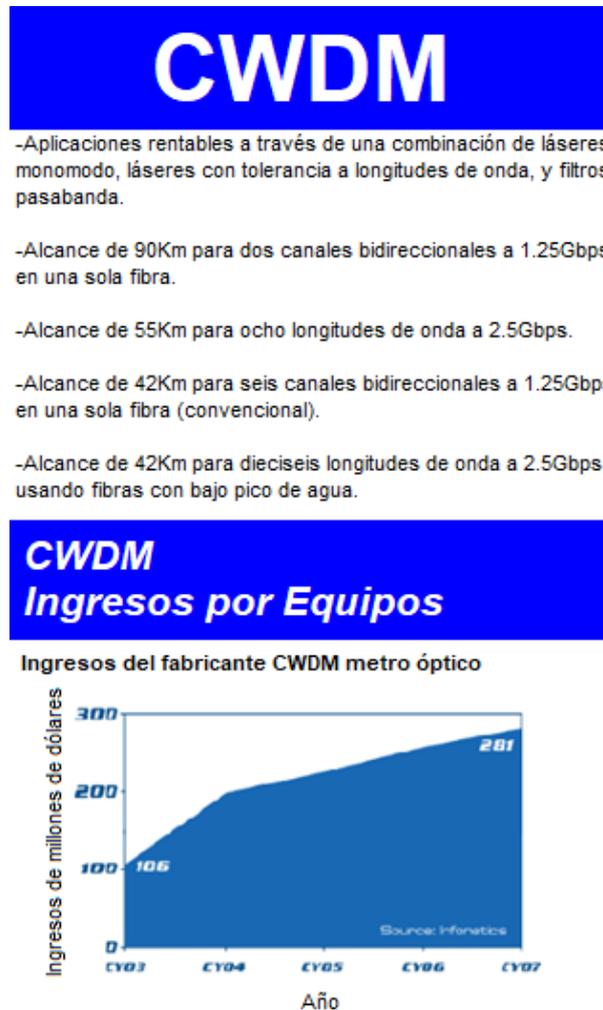


Figura 1.3 Características generales Sistemas CWDM. Adaptado al español de [11].

Las características técnicas que presenta un sistema CWDM son las siguientes:

- Espaciamiento de frecuencias de 2.500 GHz (20nm).
- 18 longitudes de onda, especificadas en el intervalo de 1270 a 1610 nm.
- Velocidad actual limitada a 10Gbps.
- Cobertura alrededor de los 120Km.
- Gran espectro óptico, lo que permite tener un número de canales utilizables sin que estos sean reducidos debido a la separación entre ellos.

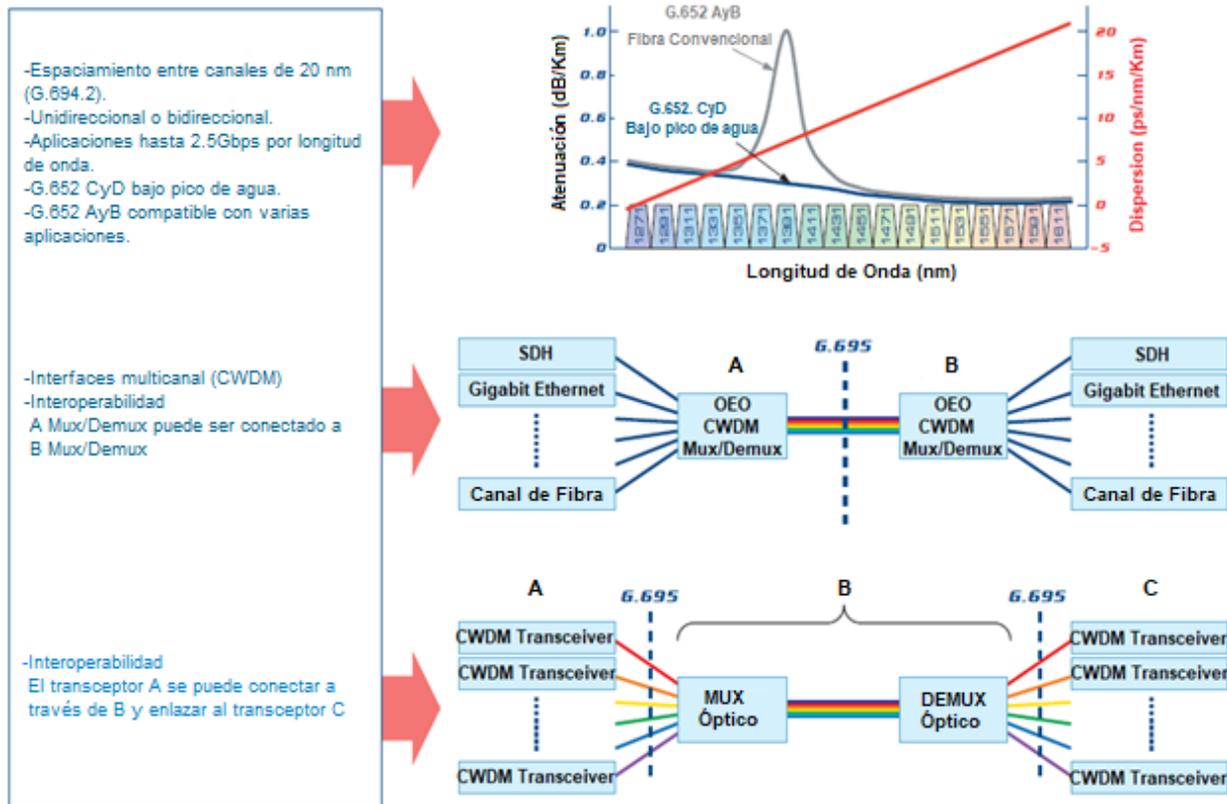


Figura 1.4 Ventana de Operación y Esquema básico de una red CWDM [11].

1.3 Estándar DWDM (ITU-T G.694.1)

DWDM, es una tecnología donde diferentes portadoras ópticas generadas por transmisores, se multiplexan y transmiten mediante una única fibra, utilizando distintas longitudes de onda para cada una de las portadoras. Cada portadora óptica crea un canal que puede ser tratado independiente del resto de canales que se encuentran en la fibra. Así, el ancho de banda se multiplica y se posibilitan las comunicaciones bidireccionales. Estos sistemas se caracterizan porque están dentro del rango de la banda C y el espaciamiento entre canales es de 100 GHz (~0.8nm) o menos. Debido a este espaciamiento, DWDM puede adaptar ocho o más canales dentro de la banda de los 1550nm [9].

1.3.1 Topología Punto a Punto.

El diseño de las redes DWDM se basa en diferentes topologías que, entre otras, se encuentran anillo, malla y punto a punto, siendo esta última la más utilizada en enlaces a larga distancia. En algunos casos, y debido principalmente a la longitud del enlace, se hace necesaria la amplificación, donde el número de amplificadores requeridos se obtiene de acuerdo a parámetros de diseño como lo son el número de canales, ancho de banda del canal, técnica de modulación, tipo de fibra, y la longitud de la fibra como se mencionó anteriormente [12]. La figura 1.5 muestra una topología punto a punto DWDM con la inmersión de un amplificador opcional.

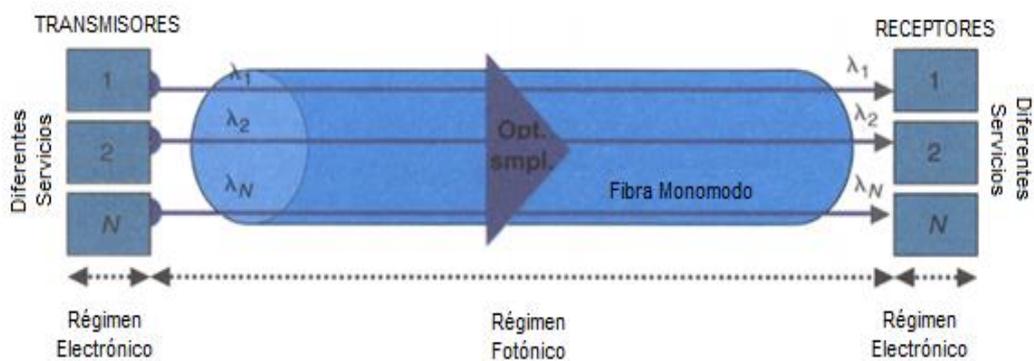


Figura 1.5 Topología Punto a Punto para una red DWDM. Adaptado de [12].

La figura 1.6 muestra un enlace DWDM realizado a nivel físico para n canales, el cual incluye componentes como transmisores, receptores, multiplexores, demultiplexores, amplificadores, entre otros dispositivos necesarios para establecer la comunicación [13].

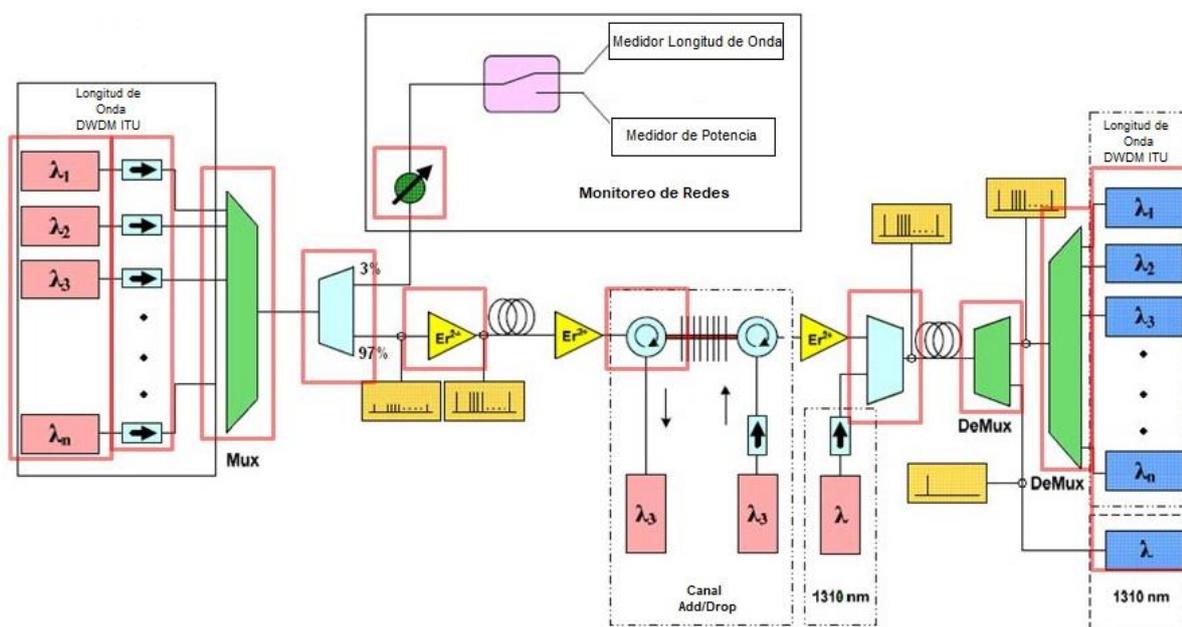


Figura 1.6 Esquema Básico Redes DWDM [13].

A continuación, en las figuras 1.7 y 1.8 se encuentra expuesta la tecnología DWDM en un resumen tomado de las recomendaciones de la ITU, donde se incluye además la ventana de operaciones y atenuación generada de acuerdo a la longitud de onda y también incluye el esquema básico de las redes que cuentan con esta tecnología.

DWDM

- Aplicaciones rentables, mediante el uso de un gran número de canales ópticos de un solo par de fibra óptica.
- Granularidad en la capacidad con la posibilidad de agregar nuevos canales ópticos, que también operan a diferentes velocidades de bits, al mismo par de fibra óptica, ya que se requiere capacidad adicional.
- Modularidad en el alcance de los sistemas, con una posible longitud de enlace de unos pocos a más de mil kilómetros.
- Flexibilidad en la configuración del enlace (lineal, anillo con o sin multiplexación óptica de la adición).

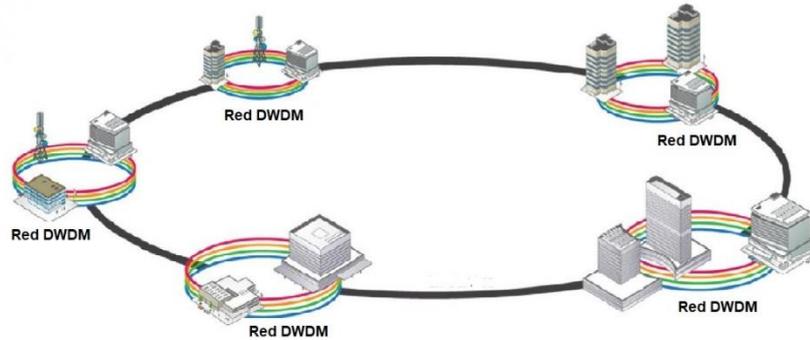


Figura 1.7 Características generales Sistemas DWDM. Adaptado de [14].

A pesar de la eficiencia de las redes DWDM para la transmisión de información, estas deben enfrentarse a características físicas de la fibra y calidad de componentes ópticos que eventualmente podrían ser limitantes en su desempeño e incluso aumentar costos de implementación [2].

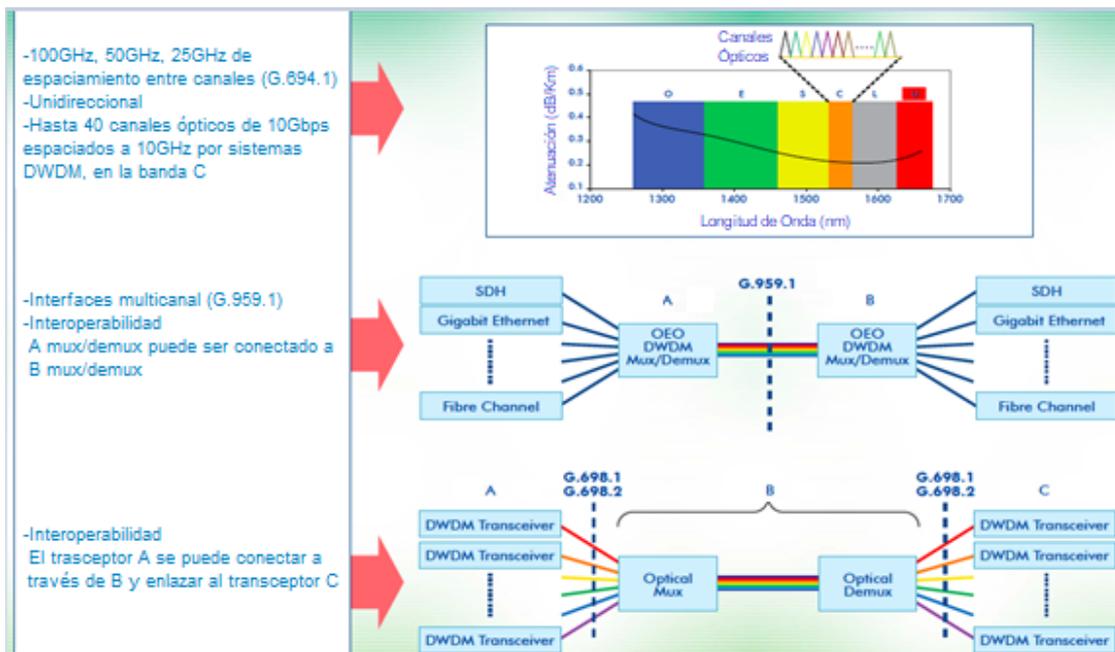


Figura 1.8 Ventana de Operación y Esquema básico de una red DWDM [14].

DWDM debido a la cobertura aproximadamente alcanzable, se divide en tres tipos: ultra larga distancia, larga distancia y metropolitana. Los sistemas DWDM de ultra

larga y larga distancia, se caracterizan por espaciamiento de frecuencias de (50 a 100 GHz) ~ (0.4 a 0.8 nm) y utilización de hasta 160 longitudes de onda; con soporte de canales de hasta los 40Gbps, mientras que los sistemas metropolitanos cuentan con espaciamientos de (100 a 200 GHz) ~ (0.8 a 1.6 nm) y hasta 40 longitudes de onda, para capacidad de hasta 10Gbps. No obstante, al aumentar distancia de transmisión y capacidad de canal, se hace necesaria la implementación de formatos de modulación con mayor robustez, con el fin de mitigar efectos lineales y no lineales en la fibra [14].

1.4 Dispersión

La dispersión define el efecto en el que pulsos de la señal transmitida mediante la fibra óptica viajan con distintas velocidades, por lo cual, la llegada al receptor se hace en diferentes tiempos. Aspectos como diámetro del núcleo, índice de refracción, longitud de onda, influyen en el comportamiento y estado de la señal transmitida, haciendo que el pulso se ensanche. El efecto de la dispersión afecta el desempeño del enlace óptico implementado, causando que los pulsos se superpongan y de esta forma se genere interferencia intersimbólica (ISI, *Intersymbol Interference*) [15].

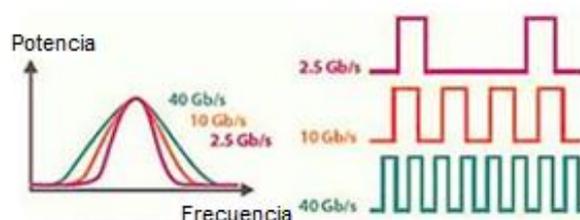


Figura 1.9 Dispersión en diferentes velocidades. Adaptado de [16].

Como se observa en la imagen 1.9, la señal transmitida es más vulnerable a sufrir dispersión a grandes velocidades, por lo cual se tiene en cuenta que la dispersión es proporcional a la longitud del enlace y a la velocidad con la que se transmita, así, estos dos aspectos resultan ser limitantes en un enlace de comunicación óptico.

La dispersión se divide básicamente en tres tipos: dispersión modal, dispersión cromática y dispersión del modo de polarización.

a. La dispersión modal: causada por el retardo entre modos de orden inferior y superior. El efecto causa limitación principalmente en el ancho de banda de las fibras multimodo.

b. La Dispersión Cromática (CD): se genera debido a que las longitudes de onda se propagan con diferentes velocidades por la fibra, efecto causado por la dispersión del material o la dispersión de la guía de onda.

c. La dispersión por modo de polarización (PMD): se produce debido a la birrefringencia a lo largo de la fibra, esto hace que los modos de polarización viajen a diferentes velocidades, lo que conlleva a la rotación de la orientación del tipo de polarización.

El trabajo de grado propuesto se enfoca en el estudio de la Dispersión Cromática en redes DWDM, por lo cual este efecto será el caso de estudio tratado en el presente documento.

1.4.1 Dispersión Cromática.

La CD es causada, principalmente, porque diferentes componentes espectrales de la señal transmitida se propagan a diferentes velocidades sobre la longitud de la fibra, como resultado, estos componentes tienen diferentes tiempos de llegada al receptor, como se observa en la figura 1.10 [1].

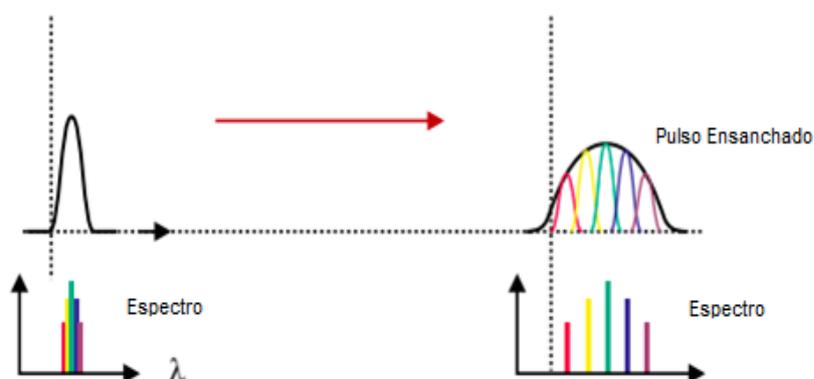


Figura 1.10 Ensanchamiento del pulso, adaptado de [1].

Ahora, en la figura 1.11 se puede apreciar como el ancho del pulso aumenta y el espacio entre bits se reduce. El resultado, es que en recepción no se logra reconocer correctamente si el dato recibido en un momento determinado corresponde a un valor lógico de uno o cero [1].

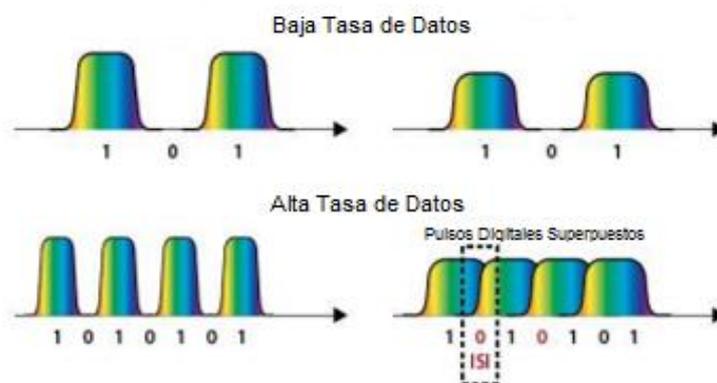


Figura 1.11 Dispersión del pulso a causa de las diferentes longitudes de onda viajando a distintas velocidades, adaptado de [16].

Como consecuencia de este efecto, el pulso en el receptor llega distorsionado causando interferencia intersimbólica. La CD es un efecto acumulativo, en donde a mayor longitud del enlace, mayor será la acumulación total. La dispersión cromática en la fibra causa un ensanchamiento del pulso y degrada la calidad de la transmisión, por lo tanto, la distancia que una señal digital puede recorrer antes de necesitar regeneración o compensación se ve limitada [17].

1.4.2 Parámetros de la Dispersión Cromática.

Los parámetros a tener en cuenta en un enlace de fibra en cuanto a CD son:

- El valor de CD de una longitud de onda es expresado en ps/nm.
- El valor de CD es acumulativo, por lo cual resulta dependiente de la longitud del enlace, de esta manera, se expresa la CD acumulada en ps/(nm x Km).
- Existe una longitud de onda de dispersión cero λ_0 , esta longitud no presenta efecto de CD, sin embargo se enfrenta a efectos derivados de la no linealidad óptica. La pendiente a esta longitud de onda se define como la pendiente de dispersión cero S_0 .

La dispersión en la fibra óptica tiene un papel decisivo en la propagación de pulsos cortos debido a que sus componentes espectrales viajan a diferentes velocidades definidas por $(c/n(\omega))$. Ahora bien, teniendo en cuenta la expresión mencionada, los efectos de la dispersión pueden analizarse expandiendo la constante de propagación β del modo en la serie de Taylor alrededor de la frecuencia en la cual se centra del pulso, ω [18] [19]:

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1 (\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{3!} \beta_3 (\omega - \omega_0)^3 \dots \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Donde:

$$\beta_m = \left(\frac{d^m \beta}{d\omega^m} \right) \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Esta serie tiene factores β_0 , β_1 , β_2 y β_3 los cuales están dados por las siguientes características:

β_0 : envolvente de la velocidad de fase (vp)

β_1 : inverso de la velocidad de grupo (vg)

β_2 : coeficiente de la dispersión de velocidad de grupo

β_3 : dispersión de tercer orden.

Con $m = 0,1,2 \dots$

Los parámetros β_1 y β_2 se relaciona entre sí por el índice de refracción efectivo $n(w)$, y por sus derivadas a través de las siguientes expresiones [19]:

$$\beta_1 = \frac{1}{v_g} = \frac{n_g}{c} = \frac{1}{c} \left(n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right) \quad \text{Ecuación 1.3}$$

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left(2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2 n}{d\omega^2} \right) \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Donde n_g es el índice de grupo y v_g es la velocidad de grupo. El coeficiente β_2 es conocido como parámetro de Dispersión de la Velocidad de Grupo (GVD, *Group Velocity Dispersion*), y es el responsable del ensanchamiento del pulso [20].

- **GVD (Group Velocity Dispersion).**

La velocidad de grupo es dependiente de la frecuencia debido a la dispersión cromática. Como resultado, diferentes componentes espectrales del pulso viajan a velocidades de grupo levemente diferentes, como se ha mencionado anteriormente [1]. Este fenómeno es mayormente conocido como Dispersión de la Velocidad de Grupo o Dispersión Cromática. La dispersión cromática tiene dos contribuciones, la dispersión del material y la dispersión de la guía, como se podrá observar más adelante.

En enlaces digitales la dispersión puede causar errores de bit mientras que en comunicaciones analógicas puede incrementar el nivel de ruido. Por lo tanto, para sistemas de comunicación para altas tasas de transmisión y gran ancho de banda, se hace necesaria la implementación de métodos que compensen dicha dispersión [21].

Si se considera una fibra óptica monomodo de longitud L en un enlace, una componente espectral con frecuencia ω llegará a la salida de la fibra después de un retardo temporal de $T = L/v_g$, donde la velocidad de grupo v_g , está definida como [22]:

$$v_g = \left(\frac{d\beta}{d\omega}\right)^{-1} \quad \text{Ecuación 1.5}$$

Utilizando la expresión de la constante de propagación, $\beta = n * \left(\frac{\omega}{c}\right)$ [22], se tiene que:

$$v_g = \frac{c}{n_g} \quad \text{Ecuación 1.6}$$

n_g , es el índice de grupo [22], y está dado por:

$$n_g = n + \omega \left(\frac{dn}{d\omega}\right) \quad \text{Ecuación 1.7}$$

Así, la dependencia en frecuencia de la velocidad de grupo causa ensanchamiento del pulso, debido a que las diferentes componentes espectrales se dispersan durante la propagación y no llegan al mismo tiempo al receptor. Si $\Delta\omega$ es el ancho espectral del pulso, el grado de ensanchamiento del pulso después de propagarse por una fibra de longitud L está dado por [19]:

$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega} \Delta\omega = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{L}{v_g}\right) \Delta\omega = L \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \Delta\omega = L\beta_2 \Delta\omega \quad \text{Ecuación 1.8}$$

En términos de longitud de onda, se tiene $\omega = 2\pi c/\lambda$ y $\Delta\omega = (-2\pi c/\lambda^2)\Delta\lambda$. Por lo tanto, el grado de ensanchamiento del pulso [23] es:

$$\Delta T = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{L}{v_g}\right) \Delta\lambda = DL \Delta\lambda \quad \text{Ecuación 1.9}$$

Donde,

$$D = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{v_g}\right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad \text{Ecuación 1.10}$$

Siendo D el parámetro de dispersión, o parámetro GVD, el cual se expresa en ps/(nm*km). La dependencia de D con la longitud de onda está regida por la dependencia del índice de modo n , con la frecuencia de la siguiente manera [23]:

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d}{d\omega} \left(\frac{1}{v_g}\right) = -\frac{2\pi}{\lambda^2} \left(2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2n}{d\omega^2}\right) \quad \text{Ecuación 1.11}$$

El parámetro de dispersión puede expresarse como $D = D_M + D_W$, donde las contribuciones vienen dadas por la dispersión del material D_M y la dispersión de guía D_W .

La dispersión del material se debe a que el índice de refracción, los materiales empleados para la fabricación de fibras y guías de onda, varían con la frecuencia óptica ω . El origen de la dispersión del material está relacionado con las frecuencias de resonancia características en las que el material absorbe la radiación electromagnética. Lejos de las resonancias medias, el índice de refracción $n(\omega)$ se aproxima por la denominada ecuación de Sellmeier, contenida en [22]:

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{A_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - B_j^2} \quad \text{Ecuación 1.12}$$

En donde w_j es la frecuencia de resonancia y B_j , A_j son los coeficientes de Sellmeier. Para las fibras ópticas estos parámetros se obtienen con mediciones experimentales.

Los efectos no lineales en las fibras se pueden manifestar cualitativamente con diferentes comportamientos dependiendo del signo del parámetro de la dispersión en la velocidad de grupo, GVD. Para longitudes de onda $\lambda < \lambda_0$, la fibra se dice que exhibe dispersión normal mientras $\beta_2 > 0$. En este régimen, las altas frecuencias viajan a menor velocidad que las bajas frecuencias. Lo opuesto ocurre en el régimen de dispersión anómalo cuando $\beta_2 < 0$ las altas frecuencias viajan a mayor velocidad que las frecuencias bajas. Las fibras de silicio exhiben una dispersión anómala cuando la longitud de onda excede la longitud de dispersión cero [24].

La dispersión de la guía depende de la geometría y dimensiones de la estructura considerada. El índice efectivo de un modo está entre el índice de refracción del núcleo y del revestimiento, acercándose más a uno u otro dependiendo de cuál sea el porcentaje de la potencia que se propaga por ellos. Dado que la distribución de potencia de un modo entre el núcleo y el revestimiento depende de la longitud de onda, si la longitud de onda cambia, la distribución de potencia también cambia, por lo que se provoca un cambio en el índice efectivo de propagación del modo. Por lo tanto, en ausencia de dispersión del material, si la longitud de onda varía, se seguirá produciendo el fenómeno de la dispersión debido a la dispersión por guía de onda o dispersión geométrica [25].

1.4.3 Dispersión Cromática negativa y positiva.

Las longitudes de onda corta viajan más rápido que las largas cuando la CD es positiva. Cuando la CD es negativa, sucede todo lo contrario; las longitudes de onda corta viajan más lento y las longitudes de onda larga más rápido [1]. En la figura

1.12 se muestran las zonas de dispersión; negativa y positiva, de acuerdo a la longitud de onda dada en nm. El punto de corte está dado por la longitud de onda de dispersión cero, λ_0 , la cual se encuentra en los 1310nm. Ahora bien, la dispersión negativa es utilizada frecuentemente para compensar la dispersión positiva excedida en una red [15].

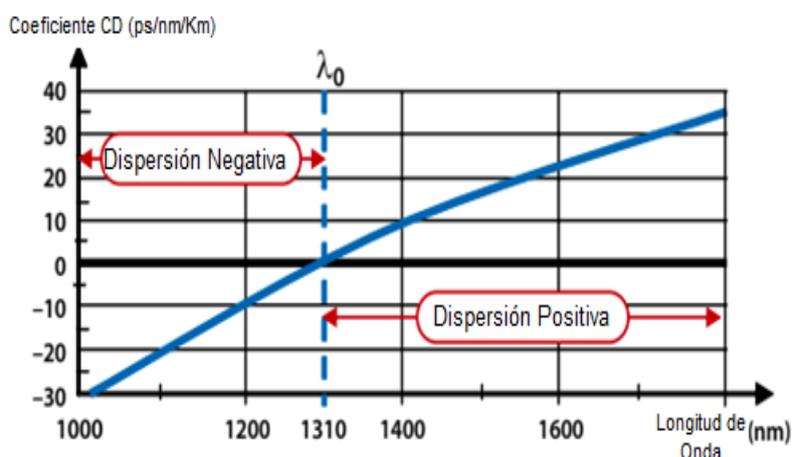


Figura 1.12 Zonas de Dispersión, adaptado de [1].

1.4.4 Dispersión del material.

La dispersión cromática se presenta debido a dos componentes: la dispersión del material y la dispersión por guía de onda. La dispersión del material involucra el índice refractivo, el cual consiste en la relación entre la velocidad de la luz en el material y la velocidad de la luz en el vacío. Este tipo de dispersión es causada por la variación del índice refractivo del material empleado para la elaboración de las fibras respecto a la longitud de onda, haciendo que la velocidad de las longitudes de onda sea diferentes; provocando ensanchamiento del pulso [15]. En la figura 1.13, se puede evidenciar que la variación en el índice refractivo depende de la longitud de onda que se esté utilizando.

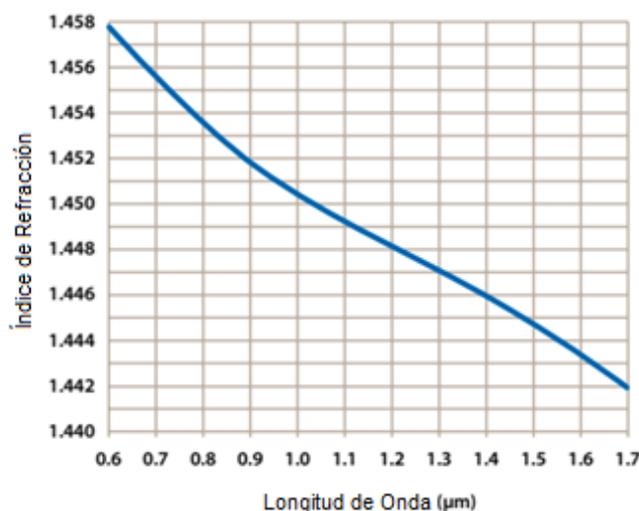


Figura 1.13 Índice Refractivo en Función de la Longitud de onda [1].

La figura 1.14, muestra como las longitudes de onda que componen el pulso se separan, causando ensanchamiento del pulso.

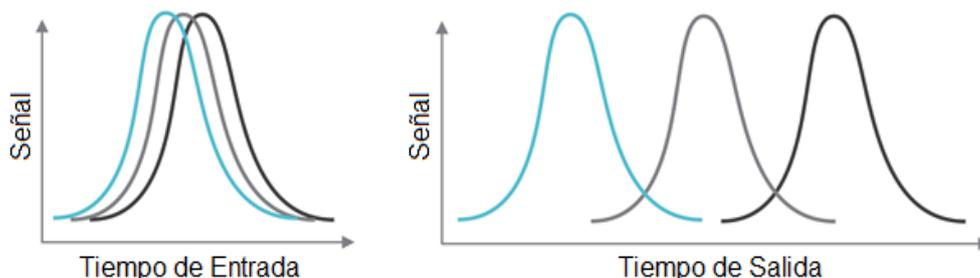


Figura 1.14 Dispersión del Material. Entrada y Salida del Pulso, adaptado de [26].

1.4.5 Dispersión por guía de onda.

Está influenciada por parámetros geométricos como lo son el perfil transversal del índice de refracción y del radio del núcleo de la fibra en relación con la señal de la longitud de onda. Por lo tanto, este tipo de dispersión afecta el paso de la luz a través de la fibra [27].

La dispersión de la guía de onda es la variación en la velocidad del grupo de diferentes componentes de longitud de onda de la luz causada principalmente el diámetro del haz de luz dentro de la longitud de onda de una fibra monomodo que se conoce como diámetro del campo modal (MFD, *Mode Field Diameter*) [1].

Las diferencias entre el núcleo de la fibra y las regiones de revestimiento de acuerdo al índice refractivo en su fabricación hacen que la luz se propague más rápidamente en el revestimiento que en el núcleo. La diferencia de velocidades de propagación es en gran medida independiente de la longitud de onda. Por lo tanto, a medida que el MFD aumenta, un mayor porcentaje de la luz se propaga dentro de la región de revestimiento que resulta en una propagación más rápida como se observa en la Figura 1.15 [1].

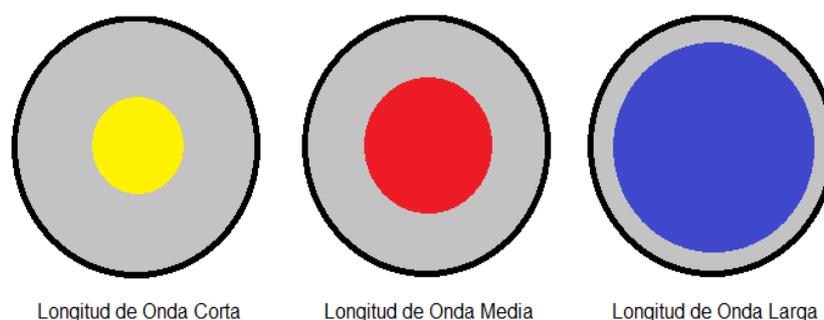


Figura 1.15 Variación del MFD acorde a la longitud de onda, adaptado de [1].

Las longitudes de onda más largas exhiben MFD más grande y, por lo tanto, propagación más rápida. El perfil de índice de fibra; variación del índice de refracción (IOR, *Index of Refractive*) en la fibra; y el MFD definen conjuntamente la dispersión de la guía de onda. Como se observa en la figura 1.16 la luz que viaja a

través del revestimiento (rojo) es más rápida que la luz que viaja por el núcleo (naranja).

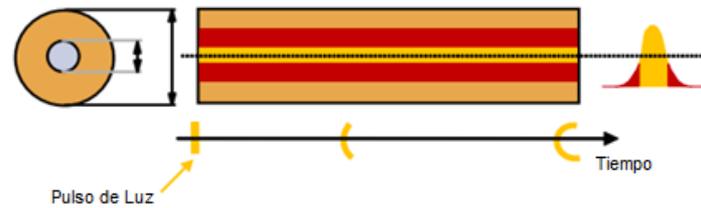


Figura 1.16 Propagación del pulso en una Fibra dada [1].

La dispersión por la guía de onda depende de diversos parámetros [1]:

- Δn , la diferencia del índice refractivo entre el núcleo y el revestimiento.
- Al disminuir el diámetro del núcleo, la dispersión se incrementa.
- Fabricación de la fibra.

Como resultado, la dispersión por material y por guía de onda, causan el mismo efecto en la señal transmitida por la fibra, por lo tanto, es posible utilizar el término dispersión cromática de forma general. La figura 1.17 ilustra cómo la CD total en una fibra, resulta de la suma de dispersiones de material y de guía de onda.

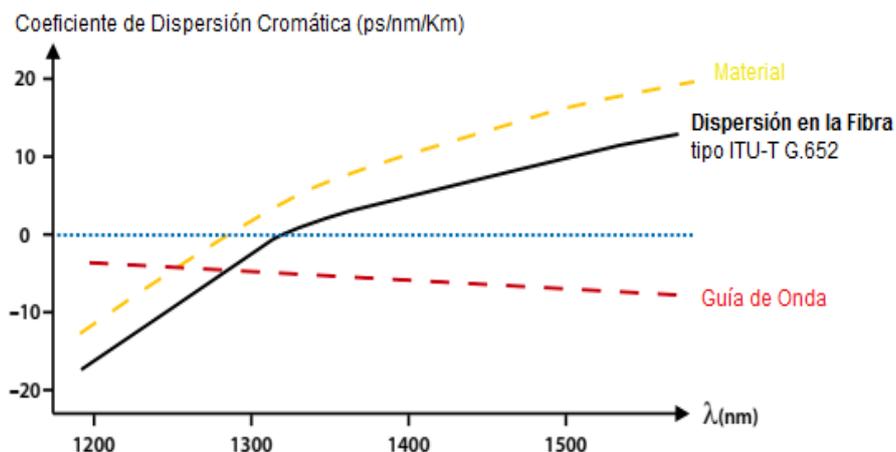


Figura 1.17 CD Total de una fibra monomodo. Dispersión del Material + Dispersión de Guía de onda [1].

1.5 Compensación de la Dispersión Cromática

Los impactos de los efectos de la CD son altamente significativos en la calidad de la señal óptica transmitida, pues restringen la velocidad de transmisión y longitud del enlace. Por lo anterior, en los enlaces de comunicación por fibra óptica debe considerarse la implementación de un módulo compensador que encamine al enlace óptico a un correcto funcionamiento [28] [29]. Como se mencionó anteriormente, la

CD total se compone de la dispersión del material y la dispersión por guía de onda. La dispersión del material es constante, pero la dispersión por guía de onda depende de los parámetros geométricos de la fibra. Los fabricantes pueden modificar el perfil del índice de refracción para establecer el coeficiente de dispersión cromática a cero.

Las técnicas de compensación ópticas para la CD, se pueden optimizar mediante la variación de los parámetros de entrada del pulso, la distancia de amplificación, espaciamiento entre amplificadores, entre otros [30]. Existen diversos métodos que permiten compensar la dispersión cromática. Está la posibilidad de utilizar un diodo láser de retroalimentación distribuida (DFB, *Distributed FeedBack*) como fuente apropiada para la señal óptica. También, hay tipos de fibra que reducen la CD como la fibra de dispersión desplazada (DSF, *Dispersion Shifted Fiber*) o las más comunes; Fibra monomodo estándar (SSMF, *Standard Single-Mode Fiber*). Entre los métodos más conocidos, está la inclusión del módulo de una fibra con un alto coeficiente negativo denominada fibra compensadora de dispersión (DCF, *Dispersion Compensating Fiber*). Este tipo de fibra compensa los retardos en las longitudes de onda del pulso de luz. Sin embargo y a pesar de su gran utilidad, estas fibras poseen relativamente una alta atenuación (0,5 dB/Km aprox.). También es posible mitigar la dispersión cromática por medio de las rejillas de Bragg [31]. A continuación, se describen algunos de los métodos más utilizados:

1.5.1 Tipos de Fibra Óptica.

Con el fin de producir diferentes tipos de fibra, los fabricantes manipulan la CD para lograr diversas aplicaciones y requerimientos. Por tal motivo, la ITU regula y clasifica las diversas fibras monomodo en 4 categorías de acuerdo a las propiedades de CD: (NDSF, *Non-Dispersion-Shifted Fiber*), (DSF, *Dispersion-Shifted Fiber*), (NZ-DSF, *Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber*) y (WNZ-DSF, *Wideband Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber*) [1], las cuales serán explicadas a continuación.

- **NDSF: *Non Dispersion Shifted Fiber* (Fibra Desplazada sin Dispersión).**

La fibra más comúnmente utilizada en las redes de comunicación óptica es la denominada fibra monomodo "dispersión sin cambios", descrita en la recomendación ITU G.652 [32]. NDSF presenta una mínima dispersión cromática en la ventana alrededor de los 1310 nm, pero con un nivel de CD alto en la región de 1550 nm [15].

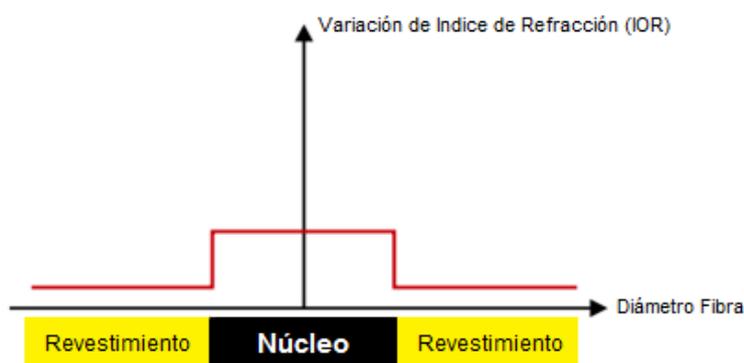


Figura 1.18 Variación del Índice de refracción para SSMF, adaptado de [1].

ITU-T G.652, se detalla como el estándar de SSMF. Originalmente se desarrolló para optimizar las transmisiones en la región alrededor de los 1310 nm, presentando un cambio notable en el índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento (ver figura 1.18). Actualmente, la SSMF se adecua para la implementación en redes DWDM en las bandas C y L (1530 a 1565 nm y 1570 a 1610 nm, respectivamente) [1].

- **DSF: *Dispersion Shifted Fiber* (Fibra Desplazada de Dispersión).**

Las fibras desplazadas por dispersión fueron diseñadas con dispersión igual a cero para la longitud de onda de la región de los 1550 nm, aprovechando la baja atenuación que se presenta en esta región y así incrementar el alcance de los sistemas de transmisión a larga distancia. La ITU la clasifica en su serie G, siendo G.653 su respectiva recomendación [1]. ITU G.653 [33], a pesar de ser una fibra diseñada para minimizar la dispersión, tiene varios inconvenientes; pues presenta mayor dispersión por el modo de polarización que la ITU G.652, y un alto riesgo de sufrir los efectos de mezcla de cuatro ondas (FWM, *Four Wave Mixing*), por lo cual su utilización resulta inviable en redes DWDM [15].

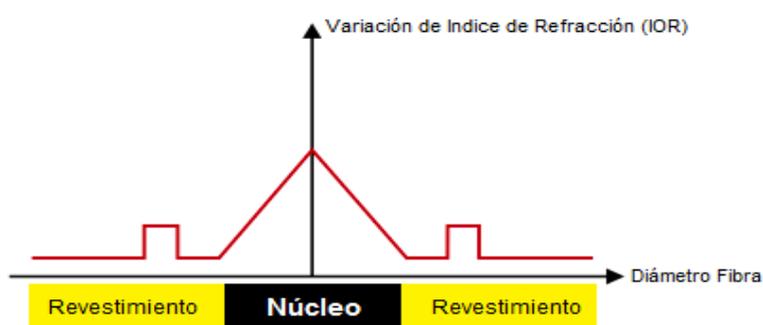


Figura 1.19 Variación del Índice de refracción para DSF, adaptado de [1].

- **NZDSF: *Non Zero Dispersion Shifted Fiber* (Fibra Desplazada de Dispersión – No cero).**

Debido a que DSF no fue viable en redes DWDM, se dió paso al surgimiento de NZDSF, donde esta se pudiera utilizar principalmente para aplicaciones en redes DWDM en la región de 1550nm. La recomendación G.655 [34] de la ITU, describe fibras modificadas con dispersión distinta a cero. Fueron diseñadas para mitigar los efectos no lineales experimentados por las fibras DSF. Tienen una longitud de onda de corte alrededor de los 1310 nm, limitando su desempeño alrededor de esta longitud [15].

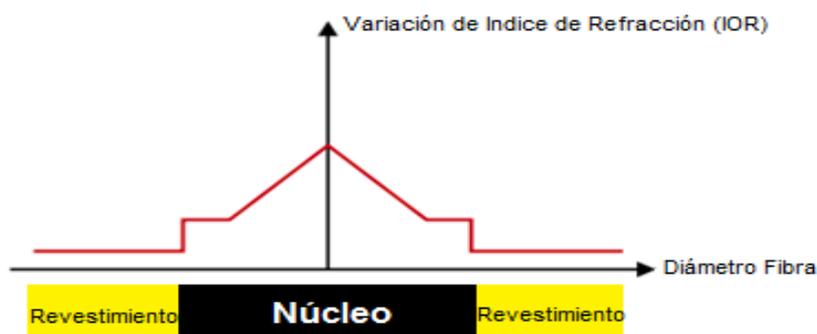


Figura 1.20 Variación del Índice de refracción para NZ-DSF, adaptado de [1].

- **W-NZDSF: *Wideband Non Zero Dispersion Shifted Fiber* (Fibra Desplazada de Dispersión – No Cero para Banda Ancha).**

El estándar ITU-T G.656 [35] brinda mayor capacidad de transmisión en redes WDM que sus longitudes de onda estén o sobrepasen las bandas C y L. Este tipo de fibra brinda una dispersión de 2 a 14 ps/nm x km entre 1460 y 1625 nm.

En conclusión, y como se manifiesta en la figura 1.21, cada tipo de fibra posee propiedades diferentes, dependiendo de la cantidad de dispersión frente a la longitud de onda.

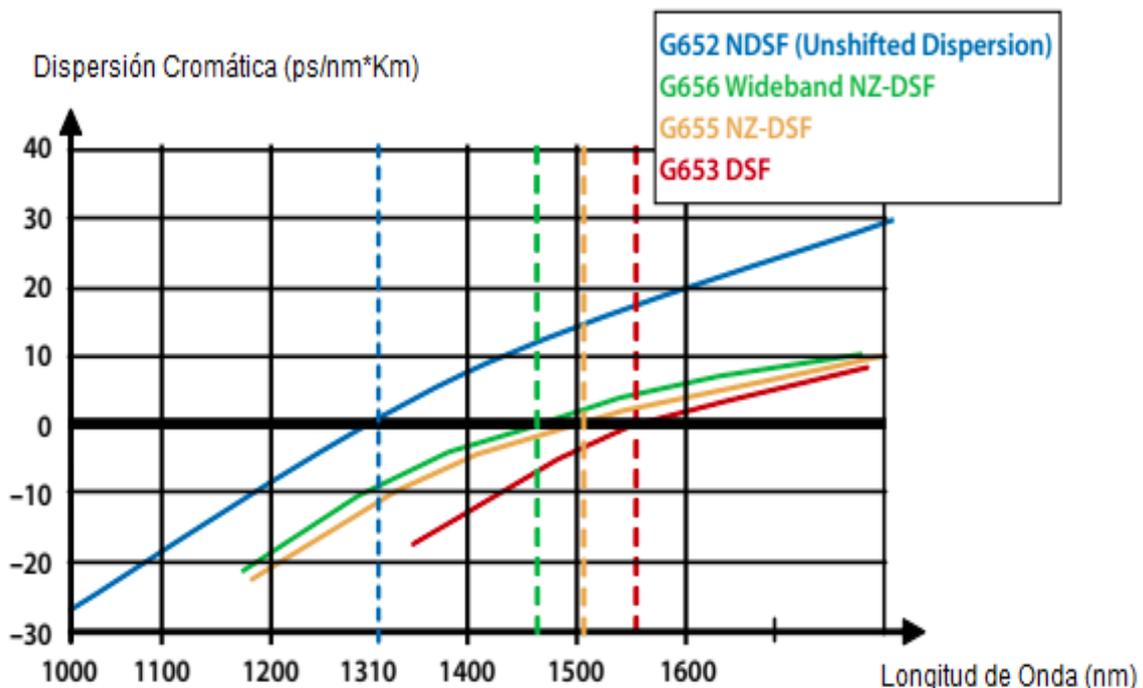


Figura 1.21 Curva de Dispersión para cada Tipo de fibra [1].

1.5.2 DCF: *Dispersion Compensating Fiber* (Fibra Compensadora de Dispersión).

Son fibras que tienen un valor negativo bastante alto de CD y que son capaces de compensar la dispersión total en un enlace óptico. La compensación se realiza intercalando tramos de fibra de transmisión estándar con fibras compensadoras DCF. La longitud de estos tramos depende de la longitud total del enlace de fibra estándar, de esta manera se compensa y minimizan los efectos causados por la dispersión total acumulada. Las formas de inserción de la fibra DCF en los enlaces se puede realizar de diferentes maneras: Al principio del enlace (Pre-Compensación), al final del enlace (Post-Compensación) o dentro del enlace (Compensación Simétrica) [20] [3].

Fabricantes como Corning y Lucent, diseñan fibras con características que benefician la calidad de la señal en el enlace de transmisión. Las fibras más comerciales de Corning, se encuentran en la figura 1.22:

Optical Fiber Product Portfolio



Figura 1.22 Fibras Comerciales Corning. Adaptado al español de [36].

En la figura 1.22, se observan algunas fibras que posee el fabricante Corning en el mercado, todas ellas se rigen bajo los diferentes estándares establecidos por la ITU. Como es de esperarse, estas fibras aportan a la calidad del enlace, pues ayudan a contrarrestar diversos efectos que se presentan en el enlace como atenuación, dispersión y efectos no lineales, que conllevan a la degradación de la señal óptica. Sin embargo, y a pesar de que no hay restricciones para su ubicación en el enlace, existen recomendaciones para su aplicación, de tal forma que la inclusión en el enlace sea más provechosa.

Debido a que la DCF es la fibra más utilizada en la actualidad para compensar los efectos de la CD, el presente trabajo estudia este tipo más a fondo, en comparación a los otros tipos de fibras compensadoras. Por lo tanto, se hace necesaria la descripción de sus diferentes modos de inserción en el enlace.

- **Modos de compensación para la dispersión: PRE-COMPENSACIÓN.**

Consiste en colocar un tramo de DCF antes del tramo de fibra de transmisión estándar, con el fin de generar un valor de CD negativo que permita compensar la CD que se acumulará en cada tramo a lo largo del enlace. Esta técnica causa compresión de los pulsos, bajo nivel de potencia de la señal y potencia más alta en la entrada de la DCF en comparación con la post-compensación, lo que conlleva a

que los efectos no lineales sean menos significativos [37]. En la figura 1.23 se observa de forma general la red óptica con pre-compensación.

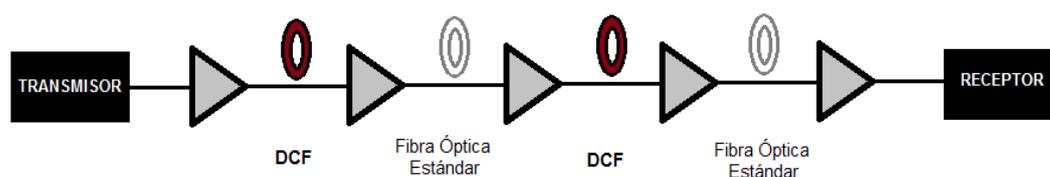


Figura 1.23 Técnica Pre-compensación óptica para CD, adaptado de [37].

En redes con técnica de Pre-Compensación, el valor de CD varía de acuerdo al tramo del enlace donde se encuentre la señal. Como se muestra en la figura 1.24, cuando la señal de transmisión atraviesa el segmento de DCF ubicado al inicio del enlace, se acumula CD negativa, debido a las propiedades de compensación, después, al pasar por la sección de fibra de transmisión estándar, la CD experimenta una pendiente positiva; de tal manera que, en recepción, la dispersión total acumulada será cercana a cero.

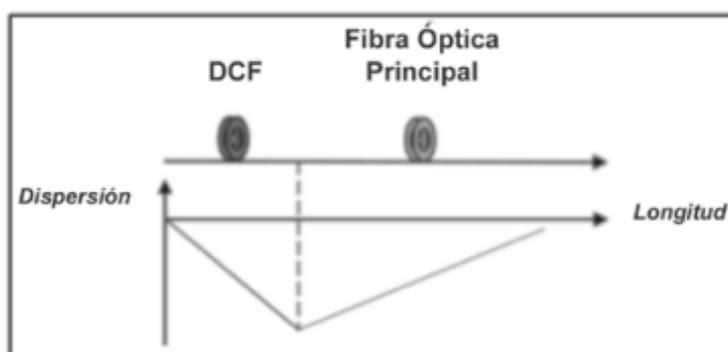


Figura 1.24 Dispersión vs Longitud del enlace para la técnica de Pre-compensación [37].

- **Modos de compensación para la dispersión: POST-COMPENSACIÓN.**

La técnica de Post-Compensación óptica consiste en colocar un tramo de DCF después del tramo de fibra de transmisión estándar, con el fin de generar un valor de CD negativo al final del enlace, que permita compensar la CD acumulada en cada tramo. En esta técnica, a diferencia de la pre-compensación, los pulsos se ensanchan y presentan bajos niveles de potencia, por lo tanto, los efectos no lineales son más notorios [37]. La figura 1.25 muestra el esquema general de una red en post-compensación.



Figura 1.25 Técnica Post-compensación óptica para CD, adaptado de [37].

Como se ilustra en la figura 1.26, se tiene inicialmente fibra de transmisión estándar, seguida de fibra compensadora DCF. Al pasar la señal de transmisión por la fibra estándar, la CD aumenta conforme aumenta la longitud del enlace, sin embargo y como es lo ideal, al pasar por la sección de DCF, la CD disminuye de manera significativa, debido a la propiedad de dispersión negativa que posee este tipo de fibra, por lo que, en recepción, la dispersión total acumulada es cercana a cero.

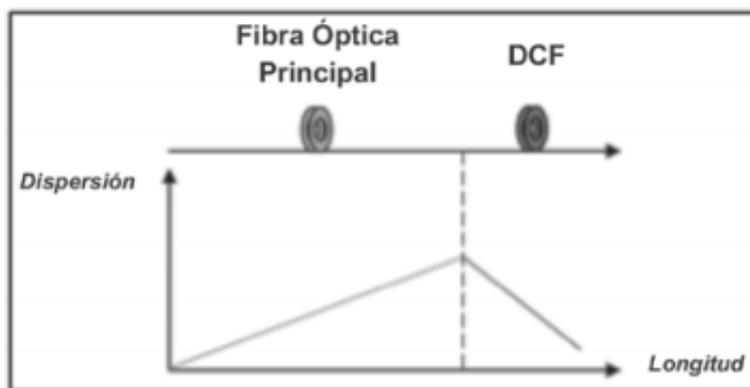


Figura 1.26 Dispersión vs Longitud del enlace para la técnica de Post-compensación [37].

- **Modos de compensación para la dispersión: COMPENSACIÓN SIMÉTRICA.**

Consiste en ubicar la DCF antes y después del tramo de fibra de transmisión estándar (ver figura 1.27). Esta técnica es más eficiente en comparación a las anteriores técnicas mencionadas, pues en recepción se obtienen valores de factor Q, BER y jitter más adecuados para una comunicación óptica a grandes velocidades [28].

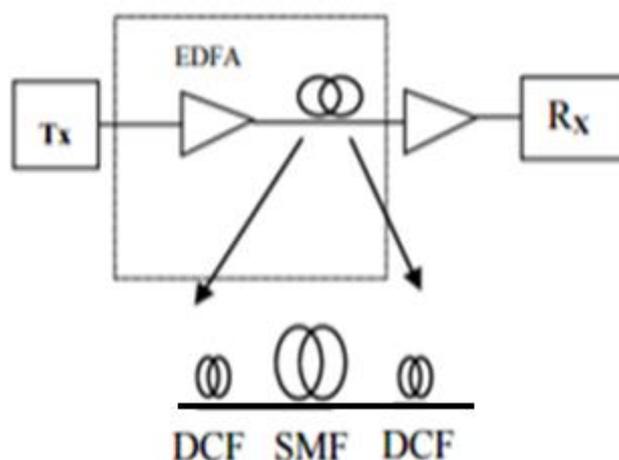


Figura 1.27 Técnica de compensación simétrica para la CD [37].

En esta técnica de compensación, se intercalan tramos de fibra DCF y estándar, con la intención de que la CD total acumulada se aproxime a un valor nulo, como se puede ver en la figura 1.28.

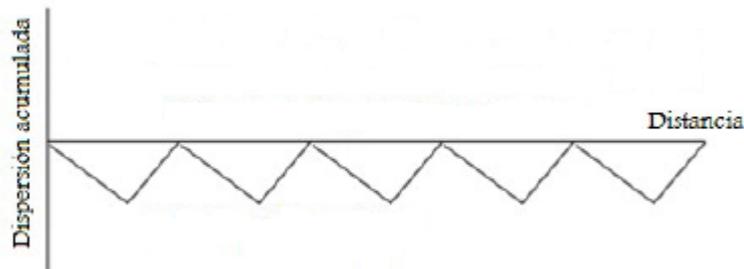


Figura 1.28 Dispersión vs Longitud del enlace para la técnica de Compensación Simétrica [38].

En las técnicas de compensación mencionadas, se hace necesario el cálculo de la longitud de DCF necesaria para la compensación en el enlace, dado que el exceso o insuficiencia de ésta, podría degradar la señal debido al aumento de los efectos no lineales [20] [37].

Dadas las características de compensación de la DCF, se mencionan algunas de sus ventajas [39]:

- Brinda solución de compensación de dispersión de banda ancha.
- Mantiene una dispersión resultante casi constante a través de la región del espectro.
- Se obtienen diversos resultados mediante la variación en la longitud de la fibra.
- Presenta un dispositivo pasivo con valor de dispersión fijo.

Sin embargo, y a pesar de la gran utilidad de este tipo de compensador óptico, presenta inconvenientes como lo son [39]:

- Agrega atenuación (0,6 dB / km de DCF).
- Debido a la pérdida óptica que se adiciona, se hacen necesarios los amplificadores ópticos de mayor complejidad.
- El pequeño tamaño del núcleo de DCF ocasiona intensidades ópticas elevadas y, por lo tanto, un umbral de potencia total bajo para las no linealidades.
- Puede llegar a causar dispersión adicional por el modo de polarización.

En la figura 1.29 se tiene un plano de dispersión en donde se evidencia el comportamiento de la DCF, fibra estándar y la combinación de ambas, con respecto a la longitud de onda. Los tramos de DCF compensan apropiadamente la CD para un canal, sin embargo, no sucede así con todos los canales de un enlace DWDM. La CD se acumula en las longitudes de onda límite de una banda respectiva, lo que puede llegar a ser un problema importante. Así, se hace necesario un módulo compensador sintonizable en recepción [15].

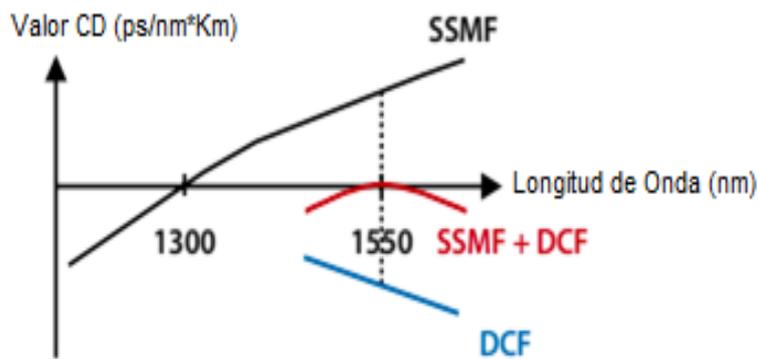


Figura 1.29 Dispersión acorde a SSMF y DCF [1].

1.5.3 FBG: *Fiber Bragg Grating* (Rejillas de Fibra de Bragg).

Para redes a altas velocidades de transmisión, el canal se ve afectado considerablemente debido a la dispersión de tercer orden, por lo cual se hace necesaria la compensación mediante técnicas apropiadas para estas velocidades. Entre estas técnicas, la FBG es la más implementada, ya que, al introducirlas apropiadamente en la red, permite que las longitudes de onda más lentas alcancen a las más rápidas; esto se logra al colocar una frecuencia de referencia en la longitud de onda central del láser [37]. Las rejillas de Bragg, son dispositivos que están construidos dentro del núcleo de la fibra óptica a partir de alteraciones en el índice de refracción, estas alteraciones tienen una relación periódica de distancia, donde la rejilla actúa como un filtro que rechaza la banda en transmisión y una longitud de onda específica se refleja a lo largo de la fibra cuando se cumple esa distancia [9]. Esto se presenta en la Figura 1.30.

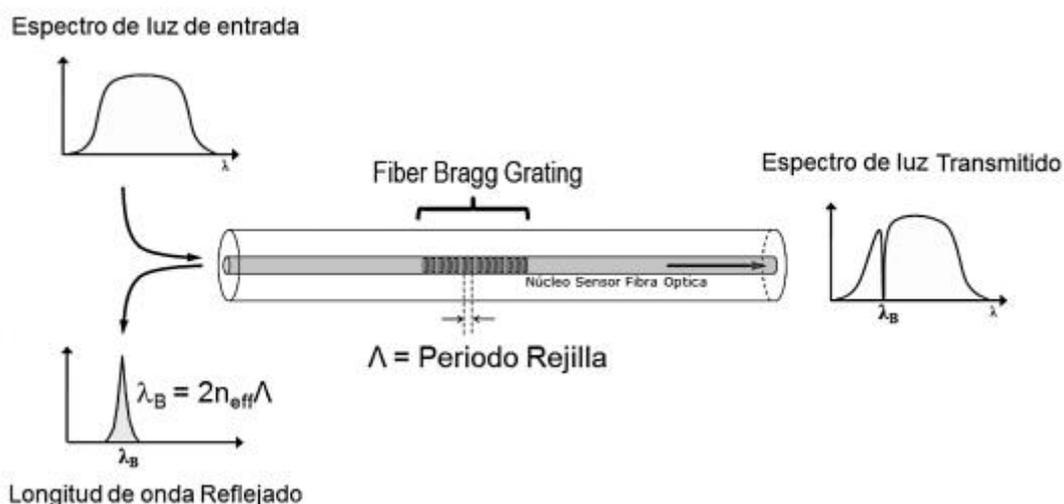


Figura 1.30 Funcionamiento Rejillas de Bragg [28].

Estas rejillas se utilizan conjuntamente con un circulador, lo que genera que la rejilla gire en sí misma de forma lineal y que su período varía linealmente con la posición, haciendo que refleje diferentes longitudes de onda, de modo que las longitudes de onda más cortas se reflejan en el extremo cercano de la rejilla fibra y las longitudes de onda más largas se reflejan en el extremo lejano. Debido al procedimiento

anterior, las FBGs introducen diferentes retardos a diferentes frecuencias. La dispersión cromática generalmente produce mayores retardos en los componentes de menor frecuencia de un pulso. Para compensar este efecto, es posible diseñar redes que hagan todo lo contrario, es decir, que introduzcan retardos mayores en los componentes de alta frecuencia. El retardo en función de la frecuencia se representa en la figura 1.31 para una rejilla general [28] [3].

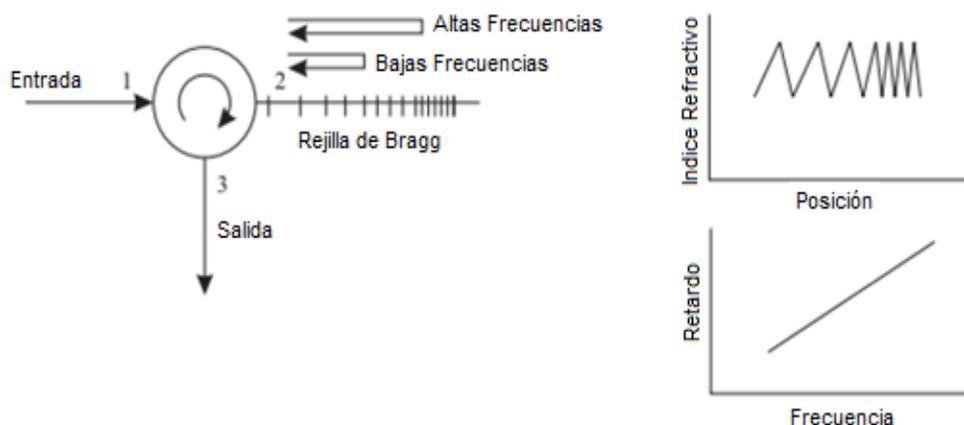


Figura 1.31 Rejilla de Bragg para Compensación de Dispersión Cromática, adaptado de [28].

Con el fin de compensar la CD en algunos cientos de kilómetros, las rejillas deben ser de banda lo suficientemente estrecha, es decir que se hace necesario utilizar una rejilla diferente para cada longitud de onda, como se muestra en la figura 1.32 [28].

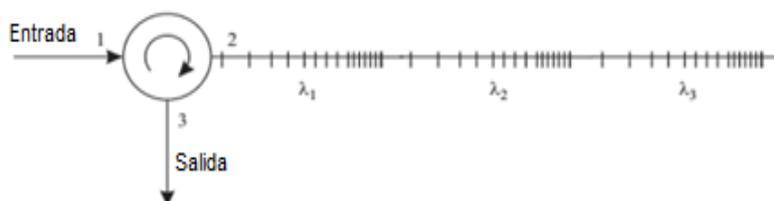


Figura 1.32 Ejemplo de Rejilla de Bragg para compensar tres longitudes de onda en un sistema WDM. Adaptado de [28].

Los compensadores FBG contribuyen en el buen desempeño de la señal en el enlace, pues:

- La pérdida por inserción usualmente es baja.
- Poseen diseño compacto
- Es un elemento completamente pasivo.

Aunque este dispositivo finalmente cumple con la compensación de la CD, posee inconvenientes que influyen en el desempeño del enlace:

- Ancho de banda finito por canal.
- Plan de canales fijo.
- Alto costo para la compensación de canales en redes DWDM.

1.5.4 Compensación Electrónica.

La compensación electrónica (EDC, *Electronic Dispersion Compensation*), se compone de técnicas que utilizan el procesamiento digital de señales (PDS, *Digital Signal Processor*) y la ecualización electrónica, que conllevan a: [40].

- Eliminar la CD total acumulada al final del enlace.
- Facilitar la configuración de la red a implementar, puesto que cada canal detecta y compensa su propia CD.
- Reducir costos de instalación en comparación a las DCFs.
- Tolerancia a los defectos del transmisor.

La EDC se describe en la recomendación ITU-T G.959.1 [41]. Aquí se encuentra información acerca de la implementación de redes a larga distancia con fibras estándar G.652 [32]. La inclusión del módulo de compensación electrónica en el enlace, se realiza de manera similar al método de DCF, ya que aquí se define la técnica de pre y post compensación, dependiendo de la ubicación del módulo EDC en el enlace.

- **Modos de compensación electrónica para la dispersión: PRE-COMPENSACIÓN.**

Esta técnica es implementada en el lugar del transmisor. El propósito es compensar la CD acumulada en el enlace, mediante pre-distorsión de la señal. Como se observa en la figura 1.33, en el receptor se obtiene una dispersión prácticamente nula, además de hacerse necesaria la inclusión de amplificadores de fibra dopada de erbio (EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifier*) debido a la pérdida de potencia experimentada a lo largo del trayecto de fibra [42].

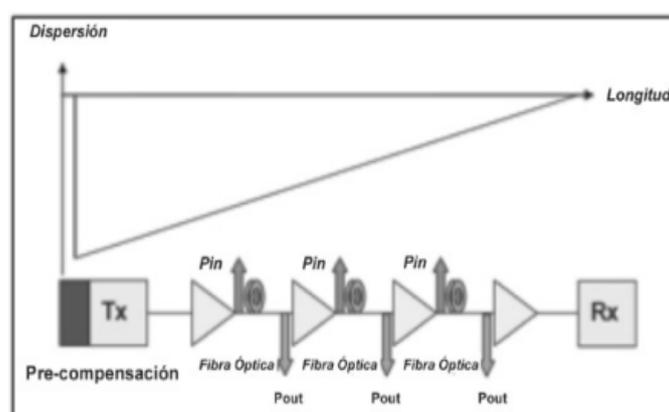


Figura 1.33 Pre-compensación Electrónica para CD [42].

- **Modos de compensación para la dispersión: POST-COMPENSACIÓN.**

Las técnicas de post-compensación electrónicas para la CD son implementadas en receptor (ver figura 1.34). El objetivo de esta técnica es mitigar los efectos de la CD en la señal transmitida después de atravesar el trayecto de fibra. Al igual que el caso anterior, se adicionan EDFAs en el enlace para contrarrestar los efectos de pérdida de la potencia [42].

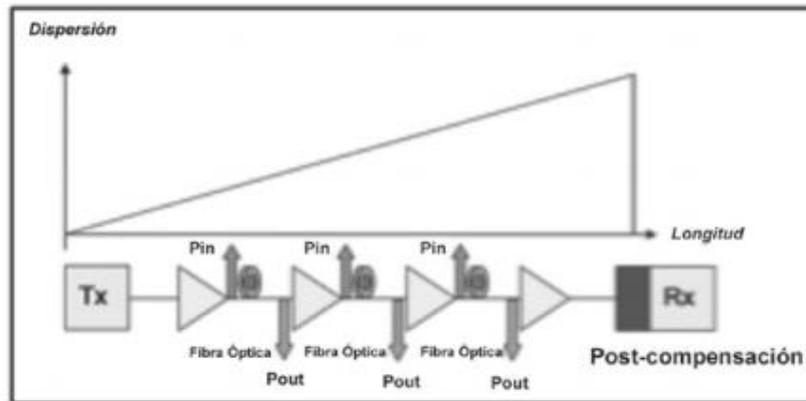


Figura 1.34 Pre-compensación Electrónica para CD [42].

Mediante el desarrollo del primer capítulo, se estudió la tecnología WDM y la dispersión cromática, igualmente, se realiza una descripción de las técnicas de compensación ópticas de la CD, definiendo los tipos de fibra presentes actualmente en el mercado como solución a la dispersión cromática. Ahora bien, se concluye que existen métodos tanto ópticos como electrónicos para compensar la Dispersión Cromática.

Una vez estudiada la base teórica acerca de las redes WDM, la dispersión cromática y las técnicas de compensación ópticas de la CD; es importante también analizar los parámetros de monitoreo y definir el modelo simplificado de red y la metodología de simulación, lo cual sirve para analizar paso a paso los escenarios de los diferentes casos de estudio, lo que conlleva al análisis comparativo del desempeño de sistemas ópticos basados en DCF, como técnica de compensación óptica de la CD con los sistemas electrónicos de compensación.

CAPÍTULO 2. ENTORNOS DE CO-SIMULACIÓN.

Teniendo en cuenta los fundamentos teóricos descritos en el capítulo anterior, se procede a definir la metodología de simulación, lo que conlleva a la generación del escenario de simulación. Es de resaltar, que el análisis correspondiente a los parámetros de monitoreo óptico que arroje el dispositivo compensador, se realiza mediante las herramientas de simulación OptSim® y Matlab®, por lo que se hace necesario detallar características tanto de los parámetros, como de las herramientas de simulación.

2.1 Parámetros de Monitoreo Óptico

Debido al auge de la tecnología y el crecimiento exponencial de usuarios, el tráfico al que se ve sometido la red se ha incrementado en los últimos años, haciendo ineludible un aumento del ancho de banda que permita suplir las necesidades de los clientes. Lo anterior, conlleva a que las arquitecturas de red se diseñen e implementen de forma más robusta, incrementando la dificultad en la gestión y posible corrección de efectos que degradan la señal transmitida por la red. Para permitir un correcto funcionamiento a largo plazo, la red óptica debe estar en capacidad de monitorear, evaluar y reparar dinámicamente el estado y calidad de las señales de transmisión, además de redirigir el tráfico y asignar recursos [43].

Con el fin de monitorear y gestionar el estado de la infraestructura y los recursos que proporciona la red, se hace necesaria la utilización de un grupo de parámetros que habitualmente se conocen como Parámetros de Monitoreo Ópticos (OPM, *Optical Performance Monitoring*), dado que permiten identificar con rapidez el lugar y causa de fallas. Para lograr una gestión robusta e inteligente, OPM debe medir con precisión los estados físicos de los elementos de red y la calidad de las señales en transmisión [43]. Sin embargo, la habilidad de medir en tiempo real los factores anteriormente mencionados, ha demostrado ser complejo, dada la gran cantidad de degradaciones, variedad de velocidades de datos y cambios continuos en la estructura de la red. Es importante que los sistemas actuales de fibra óptica permitan monitorear las múltiples degradaciones generadas por efectos lineales y no lineales, entre ellas la dispersión cromática la cual debe ser tratada de manera eficaz para poder recuperar la señal. En este contexto, para las redes WDM existen diversos parámetros de monitoreo como lo son: factor Q, BER, relación señal a ruido óptica (OSNR, *Optical Signal to Noise Rate*), entre otros, los cuales están definidos por la recomendación UIT-T G.697 [44].

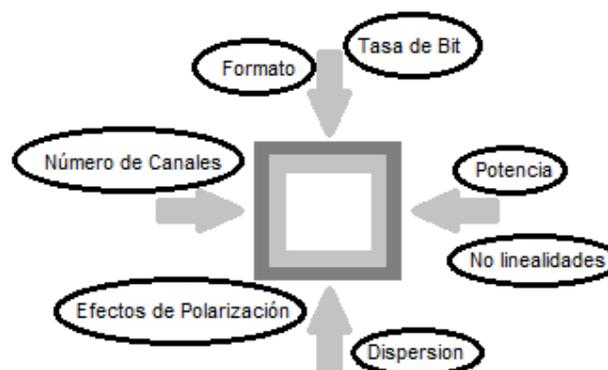


Figura 2.1 Parámetros y efectos que influyen en el canal óptico [43].

Las redes de telecomunicaciones ópticas, cuentan con gran variedad de parámetros y efectos que influyen en el comportamiento de la señal a lo largo del enlace de transmisión, (ver figura 2.1).

Como se puede observar en la figura 2.2, todos los elementos que se involucran en la red se ven afectados por los efectos que degradan la calidad de la señal, por lo tanto, es importante que los sistemas actuales de fibra óptica permitan monitorear estas múltiples degradaciones generadas por efectos lineales y no lineales, razón por la cual, para el desarrollo del presente trabajo de grado es relevante evaluar y analizar el desempeño de la red con respecto a modificaciones en las características del enlace y su tolerancia frente a la CD.

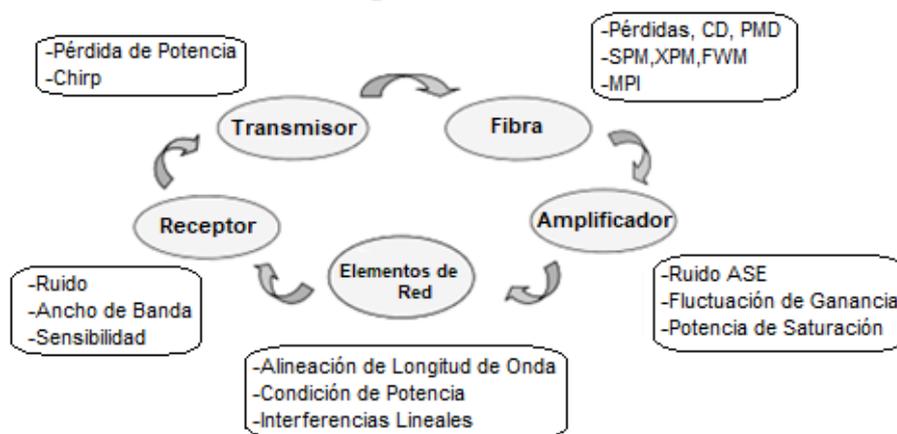


Figura 2.2 Efectos que influyen en el desempeño del enlace [43].

2.1.1 Factor de Calidad Q.

Se define como la Relación Señal a Ruido Eléctrica (ESNR - *Electrical Signal to Noise Ratio*) en la entrada de un circuito de decisión del receptor, lo anterior, se mide en el dominio del tiempo en términos de unidades logarítmicas. Este factor, determina completamente la calidad de la señal en el enlace óptico, puesto que se tienen en cuenta los efectos lineales y no lineales, ruido y filtrado, siendo de esta manera proporcional a la OSNR [45]. Debido a que, en sistemas ópticos, la OSNR no puede ser fácilmente medida, se utiliza la BER o el factor Q para determinar el rendimiento de las redes WDM utilizadas para la transmisión. Este factor está dado por los niveles lógicos μ_0 y μ_1 , y por la distribución del ruido Gaussiano en torno a los niveles "1" y "0", definidos por las desviaciones típicas σ_0 y σ_1 [45], como se aprecia en las ecuaciones 2.1 y 2.2

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$Q(\text{decibelios}) = 20 \times \log_{10} Q(\text{lineal}) \quad \text{Ecuación 2.2}$$

En enlaces ópticos, la distorsión hace que se pierda la forma de distribución gaussiana, sin embargo, estas distorsiones afectan principalmente a las regiones superiores de la distribución. Por lo tanto, la región donde se registra superposición, es la que representa la probabilidad que se produzcan errores, como se observa en la figura 2.3.

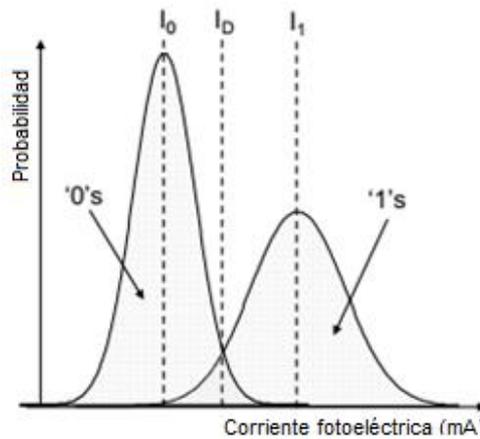


Figura 2.3 Definición del umbral óptimo de decisión [45].

2.1.2 Tasa de Errores de Bit (BER).

Es el parámetro principalmente utilizado en sistemas de telecomunicaciones ópticos para obtener la medida de desempeño de una red. Este parámetro representa el número de bits transmitidos en un intervalo de tiempo y el número de errores detectados, es decir que es una medida de la probabilidad de recibir erróneamente un bit transmitido. Según lo establecido por la ITU-T, los valores usuales de BER que permiten un correcto funcionamiento del enlace óptico, están alrededor de 10^{-12} , es decir, un bit erróneo por cada 10^{12} bits transmitidos [46] [47]. En la figura 2.4 se observa una distribución de probabilidad Gaussiana para "0" y "1" lógicos, basado en la relación entre la función de densidad de probabilidad y la BER.

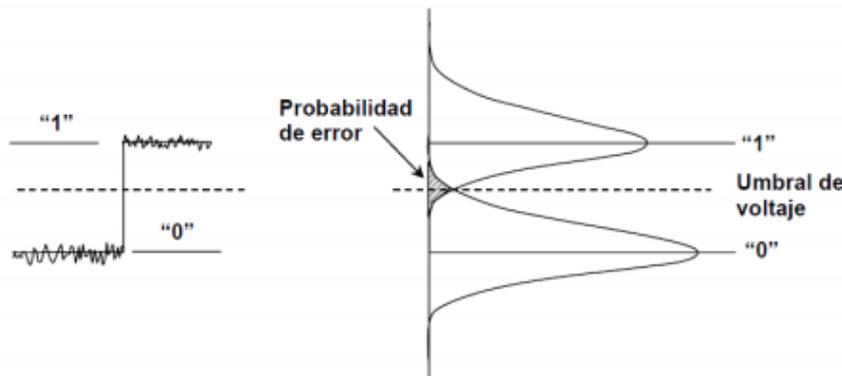


Figura 2.4 Relación entre la función de densidad de probabilidad y la tasa de errores en los bits [47].

2.1.3 Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR).

Se define como la relación de la potencia de la señal con respecto a la potencia de ruido en el canal óptico. La OSNR se refiere a qué tanto es degradada la señal óptica que es transmitida debido a las múltiples atenuaciones. La OSNR (en dB) puede calcularse de acuerdo a la ecuación (2.3) [48]:

$$OSNR = 10 \log \frac{P_i}{N_i} + 10 \log \frac{B_m}{B_r} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

- P_i es la potencia óptica de la señal.
- B_m es el ancho de banda.
- N_i es el valor promedio de la potencia de ruido medido en el ancho de banda.
- B_m y B_r son el ancho de banda óptico de referencia típicamente seleccionado para 0.1nm.

2.1.4 Diagrama del Ojo.

Utilizado en el análisis de la calidad de la señal en sistemas digitales. Fundamentalmente, hace referencia a un diagrama en el que se muestra la superposición de las distintas combinaciones posibles de unos y ceros en un periodo de tiempo o bits determinados. Las señales transmitidas por el enlace, permiten obtener características de los pulsos, posibilitando inferir parámetros de medición como la BER y el Factor Q [49]. En la figura 2.5 se observa un ejemplo básico del diagrama de ojo, generado por la combinación y superposición de unos y ceros.

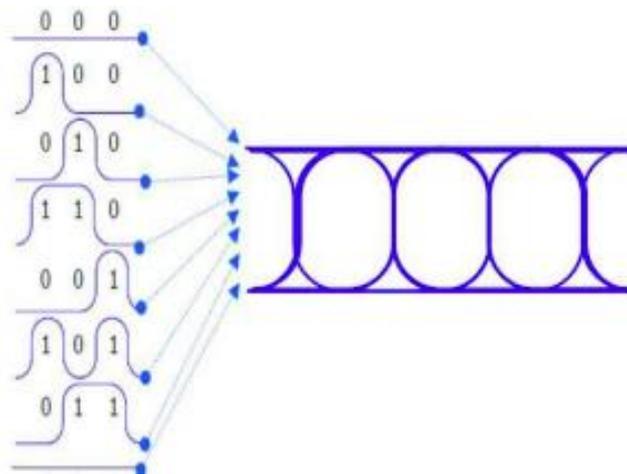


Figura 2.5 Diagrama de ojo generado por la combinación y superposición de unos y ceros [49].

2.1.5 Jitter.

Es una desviación de fase respecto a la posición en el tiempo de una señal la cual se propaga por un canal de transmisión. Es un efecto totalmente indeseable para los sistemas de comunicación, dado que introduce problemas en el canal, los cuales, si no son tratados apropiadamente, pueden degradar parcial o totalmente el desempeño del enlace. El jitter puede causar errores en recepción, pues el receptor se vería afectado, haciendo que el reloj difícilmente recupere el sincronismo, de ser así, la BER se vería altamente degradada, además de producir interferencia intersimbólica (ISI), debido a que ocurre un desplazamiento de las señales que componen el pulso, por ende se mezclan, como se puede observar en la figura 2.6 [49].

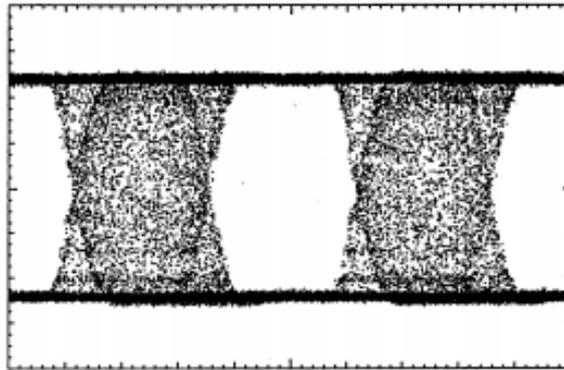


Figura 2.6 Efecto del jitter en la señal de transmisión [49].

2.2 Entornos de Co-simulación.

A continuación, se exponen características y funcionalidades de las herramientas Matlab y OptSim®, generando un tutorial paso a paso de su interconexión, con la finalidad de generar entornos de co-simulación que permitan la interacción de módulos y procesos basados en algoritmos, para incrementar las capacidades colectivas e individuales de las herramientas en mención.

2.2.1 Matlab [50].

MATLAB es el nombre abreviado de “MATriz LABoratory”. Es una herramienta de software matemático de alto rendimiento que está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux, por lo que resulta realmente útil en universidades y centros de investigación. La herramienta brinda un entorno de desarrollo integrado (IDE, *Integrated Development Environment*), el cual permite realizar cálculos numéricos con vectores y matrices, sin embargo, también permite el manejo de polinomios, funciones, ecuaciones diferenciales ordinarias, gráficos, permitiendo trabajar tanto con valores reales como complejos.

Su principal ventaja es que permite construir herramientas propias reutilizables, creando funciones particulares y programas especiales.

Entre sus principales características se destacan:

- Manipulación de matrices
- Representación de datos y funciones
- Implementación de algoritmos
- Creación de interfaces de usuario (GUI)
- Comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

Además, Matlab dispone de dos herramientas adicionales que ayudan al mejoramiento del desarrollo y diseño de software como son: Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (GUI-Editor de Interfaces de Usuario). También,

se pueden ampliar las capacidades de Matlab con las cajas de herramientas (*toolboxes*), y las de Simulink con los paquetes de bloques (*blocksets*).

Simulink por su parte, es una herramienta que posibilita construir y simular modelos de sistemas dinámicos por medio de diagramas de bloques. El comportamiento de estos sistemas se define mediante funciones de transferencia, operaciones matemáticas, elementos de Matlab y señales de todo tipo; simulando sistemas lineales y no lineales, ya sea en tiempo continuo o discreto. Es un entorno gráfico en el cual el modelo a simular se construye arrastrando los diferentes bloques que lo componen, estos modelos se guardan en ficheros con extensión *.mdl [51].



Figura 2.7 Logotipo Matlab [52].

2.2.2 OptSim® [53].

OptSim® es una herramienta de simulación y modelado, diseñada para sistemas de comunicación por fibra óptica adaptados a redes WDM, DWDM, CATV, entre otras aplicaciones, y soportada por plataformas Windows y UNIX. Es utilizada para el diseño, simulación y análisis de sistemas de comunicación óptica, con el fin de determinar el desempeño de la red dados ciertos parámetros del enlace. La herramienta además de incluir componentes y algoritmos de simulación avanzados y validados; que brindan gran precisión y resultados de la vida real, permite la investigación de nuevos esquemas de modulación.

OptSim® también representa un conjunto de bloques interconectados entre sí, formando un sistema de comunicación. Cada bloque es simulado de forma independiente, utilizando los parámetros planteados por el usuario y la señal procedente de otros bloques. Estos, se simbolizan gráficamente como iconos, pero internamente representan estructuras de datos y algoritmos numéricos.

Características:

- Análisis de rendimiento y amplia elección de medidas.
- Máxima precisión y velocidad de simulación dado el método de división de pasos y la optimización de algoritmos.
- Alta flexibilidad para la especificación de componentes.
- Aprendizaje y usabilidad adecuado.

Además, OptSim® define dos técnicas de simulación las cuales pueden ser utilizadas dependiendo del tipo de resultados que se deseen obtener: simulaciones en modo bloque, “la cual es la técnica de simulación tradicional” y simulaciones en modo muestra; “la cual es totalmente temporal, siendo la más fiel del mercado”. En el modo bloque, la secuencia de entrada se evalúa por bloque hasta el punto de salida y es la más usado actualmente. Por otro lado, el modo muestra resulta útil para escoger entre diferentes tipos de variaciones en el diseño de un enlace de fibra óptica, este modo se implementa muestra a muestra, mejorando el uso de la memoria de la secuencia en cada punto de interés. En la figura 2.8, se observan las dos técnicas de simulación con las cuales cuenta la herramienta de simulación OptSim®.

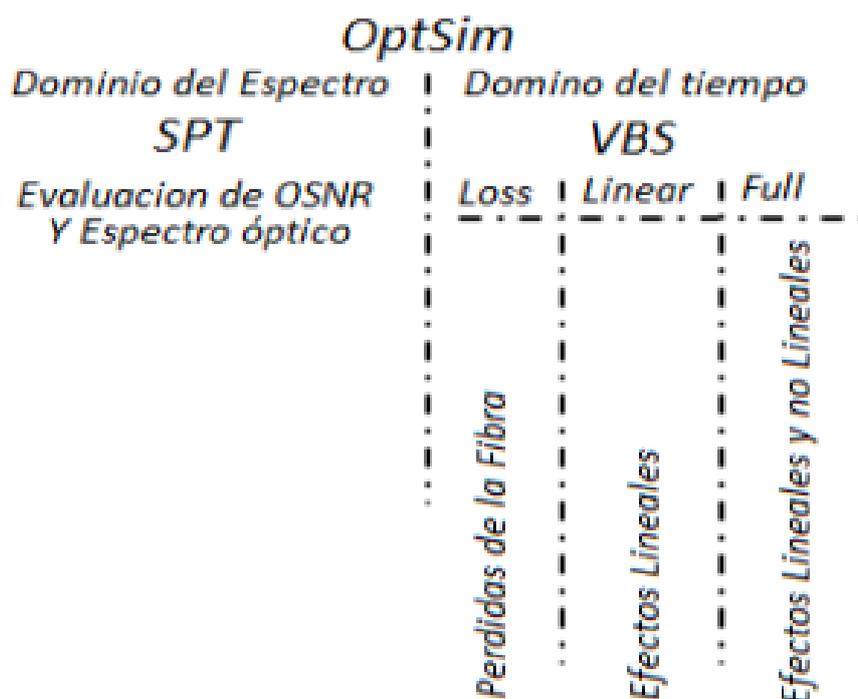


Figura 2.8 Técnicas de simulación de la herramienta OptSim [53].

- **Técnica de Propagación Espectral (SPT, Spectral Propagation Technique).**

Es una simulación en el dominio del espectro, donde las señales ópticas son propagadas como espectros de potencia, teniendo en cuenta pérdidas en componentes y ruido; cada componente posee una función de transferencia que no tiene en cuenta las no linealidades de la fibra.

- **Técnica de Ancho de Banda Variable (VBS, Variable Bandwidth Simulation)**

Es una simulación en el dominio del tiempo sobre un ancho de banda variable proporcionado por el usuario. Las señales son propagadas a través de las redes como muestras en el dominio del tiempo, esta técnica es utilizada para simular efectos lineales y no lineales para las componentes ópticos y eléctricos.

- **Análisis de resultados y procesamiento posterior**

Los resultados de la simulación pueden trazarse entre sí y correlacionarse con los valores de parámetros suministrados. OptSim® realiza análisis de los efectos del ruido, diafonía, la fluctuación de fase y las variaciones en los parámetros de los componentes utilizando metodologías cuasi-analíticas. Como se mencionó anteriormente, el presente trabajo de grado se ve involucrado específicamente con el efecto de la dispersión cromática, perteneciente a los efectos lineales.

Los resultados de simulación que entrega OptSim® también incluyen diagramas de forma de onda de la señal, diagramas de ojo, BER, potencia óptica recibida, mapas de potencia y dispersión, entre otros. A pesar de que la herramienta ofrece gran cantidad de parámetros, para el presente trabajo de grado se tendrán en cuenta los parámetros de monitoreo óptico señalados en el capítulo 2 sección 2.1.

Una de las funcionalidades que trae consigo OptSim® y el cual es uno de los principales enfoques por el que se realiza el presente trabajo de grado, es la co-simulación con la herramienta Matlab. Esta interfaz permite a los usuarios de OptSim® ejecutar simulaciones Matlab que interactúan completamente con la estructura de datos OptSim y que conlleva a una simulación conjunta.



Figura 2.9 Logotipo OptSim [53].

2.2.3 Conexión Co-simulación [53].

Inicialmente, con el fin de evitar problemas futuros, es importante tener en cuenta la versión de OptSim® con la que se cuente; en este caso, la versión licenciada con la que cuenta la Universidad del Cauca es la 5.2 del año 2010, por lo que se hace necesaria la utilización de Matlab 2007, pues se encontró que, para versiones actualizadas de Matlab, esta versión de OptSim® no es compatible. Otro punto a tener en cuenta, es que OptSim® funciona bien en sistemas operativos de 64 bits, sin embargo, para la co-simulación con programas externos; como lo es Matlab, es necesario contar con Matlab de 32bits.

Como se ha mencionado anteriormente, se busca diseñar un módulo que permita mitigar la dispersión cromática presente en el enlace. El código necesario para compensar los efectos de la CD, se realiza en la herramienta Matlab. A su vez, el bloque que contiene el código es generado en OptSim® con el fin de realizar el análisis correspondiente a la simulación del enlace total. Para realizar la unión de

estas dos herramientas, se hace uso de la configuración Custom Components que ofrece OptSim®, la cual se describe a continuación:

Custom Components (Componente Personalizado de Matlab®) es una forma de ampliar la biblioteca de componentes, donde un programa ejecutable externo se convierte en un componente OptSim® administrado de forma transparente para todas las capacidades de editor y simulador. Los componentes personalizados de OptSim® se pueden dividir en dos categorías:

- *Custom Component* para usar con MATLAB® (CCM), donde el programa externo es una rutina de Matlab.
- *Custom Component Executable* (CCE), donde el programa externo es un programa ejecutable genérico.

Dados los requerimientos y objetivos planteados, este trabajo de grado se enfoca en el diseño del módulo compensador de CD en la herramienta de simulación Matlab, por lo que la siguiente sección se enfoca en describir la creación y forma de trabajo del mismo.

- **CCM (Custom Component Matlab)**

El componente personalizado para usar con Matlab® (CCM) es un componente especial de OptSim® cuyo comportamiento durante la simulación se describe mediante una rutina Matlab® externa. Por lo tanto, el código generado en Matlab® debe realizar la función de transferencia para las señales, interactuando con el simulador OptSim® y ejecutando las respectivas simulaciones; técnicas SPT o VBS; explicadas en detalle en la sección 2.2.2, del presente capítulo. Como es del caso, la técnica escogida para la simulación ha sido VBS, pues con ella es posible involucrar efectos lineales y no lineales necesarios en el presente trabajo de grado.

El proceso de simulación de OptSim®, realiza la simulación del enlace hasta que la señal de transmisión llega al bloque CCM, pasando la señal de entrada y ejecutando el código Matlab® correspondiente. El CCM realiza la función de transferencia personalizada, cuando éste termina el proceso de simulación, OptSim® toma esta señal de salida y continúa la simulación del proyecto.

Para explicar de manera detallada la unión del código realizado en Matlab con la herramienta de simulación OptSim®, se hace referencia al anexo A, del presente documento.

2.3 Metodología de Simulación

La metodología a utilizar en el desarrollo de la monografía del presente trabajo de grado, se fundamenta en el modelo en cascada, el cual se constituye de 5 fases a ejecutar: Fase de Recolección de Información, Fase de Análisis y Síntesis de la Información, Fase de Diseño e Implementación, Fase de Pruebas y Resultados, y Fase de Entrega [54]. El modelo suministra desarrollo constante de las fases ordenadas secuencialmente con el fin de cumplir con el objetivo propuesto.

El modelo adaptado para el desarrollo de las simulaciones, se basará en la metodología de la simulación con enfoque práctico [55], a continuación se detalla de mejor manera dicha metodología y sus etapas para el estudio. Además, permiten el desarrollo del modelo simplificado de red en un escenario de simulación, donde mediante la utilización de la herramienta Optsim® es posible evaluar el desempeño de la red, para ello se tienen en cuenta los parámetros de monitoreo óptico en redes DWDM y así lograr alcanzar los objetivos propuestos en el presente trabajo.

- Definición del sistema. Es necesario realizar inicialmente un análisis preliminar y lograr determinar la posible interacción con otros sistemas, restricciones, variables involucradas y las medidas de efectividad a utilizar con el fin de definir y estudiar el sistema y plantear los resultados que se esperan obtener.
- Formulación del modelo. Al definir puntualmente los resultados que se esperan, seguidamente se debe precisar y construir el modelo que llevará a obtener esos resultados deseados. Aquí es necesario determinar todas las variables de lo conformarán, relaciones lógicas y diagramas de flujo que describan el modelo.
- Colección de datos. Se deben definir con precisión y claridad los datos que requiere el modelo para llegar a los resultados deseados. Existen diversos medios de obtener la información requerida: registros, órdenes e incluso la experimentación.
- Implementación del Modelo. Definido todo lo anteriormente mencionado, se debe decidir el lenguaje de programación a utilizar de acuerdo a las necesidades y objetivos del proyecto.
- Validación. Una de las principales etapas de estudio de simulación es la validación. Mediante esta etapa, es posible determinar falencias en la formulación del modelo o las variables involucradas.
- Experimentación. Se debe realizar siempre y cuando el modelo esté validado. Consiste en generar los datos que se espera obtener y realizar análisis de sensibilidad de los índices requeridos.
- Interpretación. Se interpretan los resultados que arroja la simulación y seguidamente hay toma de decisiones con el fin de obtener mejores resultados.
- Documentación. Dos tipos de documentación son requeridas: la primera se refiere a la documentación de tipo técnico, es decir, la que describe la forma de procesamiento de los datos. La segunda plantea la inclusión de un manual de usuario, con el cual se facilite la interacción y uso del modelo desarrollado.

2.3.1 Diagrama de Flujo de Simulación

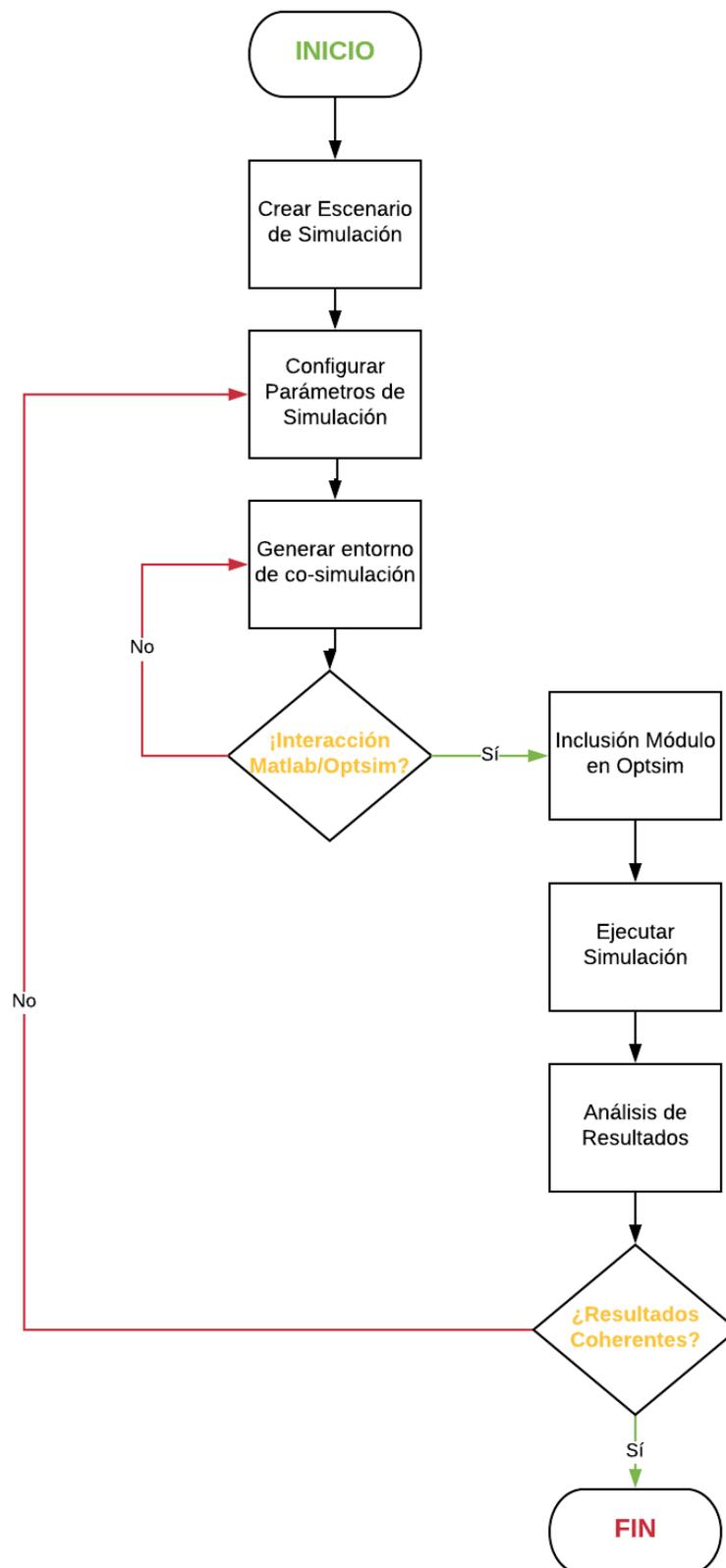


Figura 2.10 Diagrama ejecución simulación.

2.4 Definición del escenario de simulación.

A partir de la base teórica expuesta anteriormente (Capítulo 1), se procede a definir un modelo simplificado de red, el cual agrupa diferentes características según las necesidades de red planteadas, incluyendo equipos comerciales del mercado, parámetros de desempeño y recomendaciones de la ITU-T, con lo que es posible generar y analizar diferentes casos de estudio, esto con el fin de observar el desempeño de la red y el dispositivo de compensación.

2.4.1 Caracterización del entorno de simulación.

Se parte de la tecnología DWDM punto a punto unidireccional, pues permite el envío de información en un solo sentido, haciéndose necesaria la implementación de sistemas con doble fibra con el fin de lograr comunicación completa, sin embargo, resultan fáciles de instalar y operar, además posibilitan la transmisión de datos a altas velocidades mediante enlaces de larga distancia los cuales oscilan en una distancia mínima de 60 Km y una distancia máxima de 500 Km; según el estándar G.691 de la ITU [2][12].

La fibra óptica utilizada comúnmente a lo largo de un enlace, es la monomodo estándar Corning SMF-28e+, pues permite alcanzar largas distancias a altas tasas de transmisión debido a su diámetro de núcleo pequeño. Dos características importantes para el presente trabajo de grado son el coeficiente de dispersión y la atenuación de esta fibra. El coeficiente de dispersión se obtiene del datasheet proporcionado por el fabricante, siendo en este caso alrededor de los 17 ps/nm*Km y el valor de atenuación para redes alrededor de 1550nm, corresponde a 0.275 dB/Km, incluyendo pérdidas en empalmes y márgenes del cable. Se escoge esta fibra para el escenario de simulación, dada la compatibilidad con el estándar G.652.D de la ITU, el cual define las características de los cables de fibra óptica [32] [56].

El estándar G.694.1 de la ITU, recomienda utilizar las bandas L y C para redes DWDM. La banda C comprende la región que va desde los 1530 a los 1560nm y debido a la atenuación que posee esta banda, se decide hacer uso de ésta en el presente trabajo de grado [14]. Para el desarrollo del presente trabajo, y con el fin de cumplir con una velocidad neta de 10Gbps, se decide implementar inicialmente 4 canales de 2.5Gbps cada uno, con un espaciamiento típico de 100GHz, basados en la recomendación G.694.1 de la ITU, correspondiente a redes DWDM a 10Gbps, esto con la finalidad de disminuir los posibles efectos de la interferencia de canal adyacente. De acuerdo al estándar G.694.1, los canales autorizados vienen dados por espaciamientos típicos entre canales de 0.2nm(25GHz), 0.4nm(50GHz), 0.8nm(100GHz) y 1.6nm(200GHz) y con el fin de obtener el plan de frecuencias pertinente, se tienen en cuenta las siguientes ecuaciones [14]:

25 Ghz	$193.1 + n * 0.025$ [THz]
50 Ghz	$193.1 + n * 0.05$ [THz]
100 Ghz	$193.1 + n * 0.1$ [THz]

Donde n es un entero positivo o negativo, incluido el 0, y 193.1 es la frecuencia de referencia en [THz].

A Partir del estándar G.694.1 de la ITU, se eligen los canales óptimos a trabajar, los cuales cuentan con separación de 25, 50 y 100 GHz, no obstante, el espaciado típico a utilizar, como se menciona anteriormente es de 100GHz, por lo que el plan de frecuencias se realiza solamente para este valor [14]. El plan de frecuencias que incluye los canales a utilizar posteriormente en el desarrollo del trabajo de grado, se observan en la tabla 2.1:

Tabla 2.1 Plan de frecuencias para 4 canales a 100GHz.

Número de Canales	Separación [GHz]	Frecuencia Central Nominal [THz]	Longitud de Onda [nm]
Canal 1	100	194.000	1545.32
Canal 2		194.100	1544.52
Canal 3		194.200	1543.73
Canal 4		194.300	1542.93

Por otra parte, existen dos tipos de láser utilizados para la transmisión de datos: sintonizables y de onda continua. El láser de onda continua es utilizado actualmente en redes ópticas, debido a la alta velocidad de transmisión que maneja y a que cuenta con mayor vida útil, siendo seleccionado en este presente trabajo de grado. La potencia de transmisión; según la recomendación G.691 aplicada a redes DWDM a 10Gbps, debe estar en un rango de 0 a 6dBm [2] [56].

En cuanto al formato de modulación, se determina que la utilización de un formato de modulación robusto a los efectos de la CD, no permitiría analizar correctamente el desempeño del compensador en la red, por ende, se hace necesaria la implementación del formato de modulación básico NRZ-OOK. En redes DWDM, se implementa modulación externa debido a que se hace un mejor control del chirp¹, además no limita la velocidad del láser [2].

En los enlaces de larga distancia, se hace necesario poner en funcionamiento amplificadores que sean capaces de regenerar la amplitud de la señal, con el fin de que ésta esté en el rango de sensibilidad del receptor, por lo tanto, en el presente trabajo de grado, se tiene en cuenta el Amplificador de Fibra Dopado con Erbium (EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifier*), el cual es un amplificador unidireccional usado cuando se requiere la amplificación en una o más longitudes de onda. Su implementación se puede realizar en tres configuraciones: como amplificador de potencia; en el cual el EDFA se sitúa a continuación de una fuente óptica y antes de la fibra principal, amplificador de línea; se sitúa entre los tramos de fibra, y pre-amplificación, en el cual el EDFA se ubica antes del receptor [9].

¹ La corriente que modula el láser, introduce una variación en la frecuencia de emisión llamada chirp. Es decir, que a pesar de que el láser sea monomodo, el valor de la frecuencia de pico de emisión durante el pulso óptico, no es el mismo [57].

2.4.2 Entorno de Simulación.

Dados los objetivos del presente trabajo de grado, se define el siguiente escenario de simulación, el cual permite realizar un análisis comparativo de los posibles casos de compensación de la dispersión cromática; pre, post y compensación simétrica, para alcanzar una velocidad de 10Gbps en canales multiplexados (4x2.5Gbps), sin embargo se parte de una velocidad de transmisión nominal de 2.5Gbps ya que se ha encontrado que la dispersión cromática tiene relación y genera una respuesta intrínseca ante el incremento de la tasa de transmisión, por ende, se ve necesario realizar un análisis del comportamiento del módulo compensador creado ante dicho incremento de velocidad [16].

Como se observa en la tabla 2.2, para cada uno de los escenarios se definen tres secciones: características de la sección del transmisor, del canal y del receptor, donde cada escenario se simula y posteriormente se analizan los resultados obtenidos.

Tabla 2.2 Características básicas del escenario de simulación.

SECCIONES	DISPOSITIVOS
TX	Modulador óptico Mach-Zehnder. Filtros Bessel de orden 6 Laser CW, 2,5MHz de FWHM, 0dBm 100Ghz de espaciamento de canal Banda C, alrededor de los 1530nm Velocidad de transmisión de 2.5GHz
CANAL	Estándar ITU-T G.652 Fibra SSMF-28 Amplificadores EDFA de línea, 15dBm Amplificador EDFA BOOSTER, 20dBm Fibras de compensación DCF
RX	Sensibilidad de -30 dBm Filtro eléctrico tipo Bessel de orden 6 Filtro óptico de coseno rizado.

Mediante la configuración y combinación de los elementos anteriormente mencionados, se logra generar el tipo de enlace planteado. Cabe aclarar que la cantidad de dispositivos de amplificación, filtros y otros elementos, pueden variar dependiendo de los requerimientos para cada caso de estudio.

En la figura 2.11 se aprecia el escenario de simulación implementado con el formato NRZ-OOK. Una de las particularidades de la implementación de este formato de modulación, es su fácil configuración, dada la cantidad de elementos utilizados para generar una forma de onda NRZ. El trasmisor requiere un driver NRZ rectangular, un láser de modulación externa y un modulador MZ de seno cuadrado. En la sección del receptor solo se requiere un filtro eléctrico y óptico centrado a la frecuencia de trabajo y un receptor con una sensibilidad máxima de -30dBm.

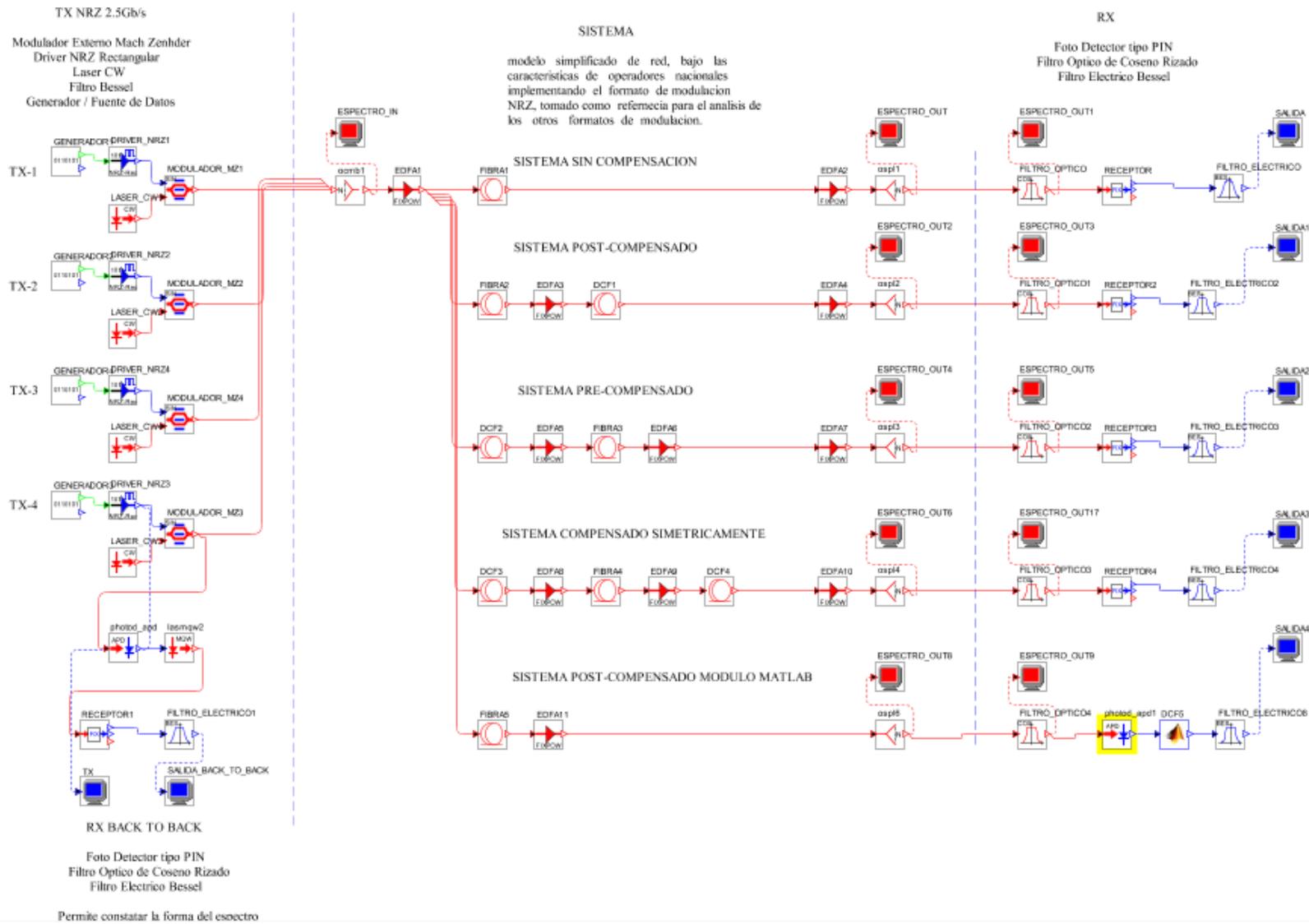


Figura 2.11 Escenario de simulación.

- **Configuraciones iniciales back to back.**

En la parte inferior de la imagen 2.11, se observa la configuración Back to Back del sistema, de aquí se obtienen las condiciones iniciales de funcionamiento del formato NRZ-OOK con respecto a la BER, OSNR, y los diferentes parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo. Los resultados obtenidos corresponden a las medidas en un enlace óptico ideal en el que no se consideran imperfecciones de canal, por tal razón serán considerados durante el transcurso del análisis de resultados que arroje el trabajo de grado, como el patrón de referencia empleado para evidenciar el efecto negativo originado por las diversas degradaciones.

En el lado del transmisor se hace uso de un láser de onda continua (CW, *Continuous Wave*) con (FWHM, *Full Width at Half Maximum* = 2,5 mhZ), moduladores ópticos externos Mach-Zenhnder y filtros bessell de orden 6.

- **Canal.**

Los EDFAs implementados para el desarrollo de este trabajo de grado, se basan en las características de los amplificadores Corning Pure Gain 1500 Compact de ganancia constante, utilizados en redes WD comerciales [58], ver tabla 2.3.

Tabla 2.3 Características Amplificador Corning Pure Gain 1500 Compact.

Tipo Amplificador	Ganancia	Ptx Máxima	Figura de Ruido
Corning Pure Gain 1500	23 dB	21 dBm	5.2 dB

En el sistema se tiene 4 configuraciones que se utilizarán a medida que transcurra el trabajo de grado para comparación con el modulo diseñado, como se observa en la figura 2.11.

Para la primera configuración se tiene un sistema sin compensación, utilizando 2 EDFAs, uno para amplificar la señal del transmisor y el otro luego de que la señal pase por un tramo de fibra óptica de 100 km, y finalmente enviarla al receptor. Para las configuraciones posteriores se tiene el sistema compensado, por lo tanto se hará la comparación de los tres modos de compensación utilizados actualmente con la fibra DCF: post-compensación, pre-compensación y compensación simétrica. Las 3 diferentes configuraciones presentadas en el entorno de simulación, han sido explicadas en el capítulo 1 sección 5.

Mediante el desarrollo del capítulo 2, se determinó un modelo de red, del cual se escogió una metodología acorde al proyecto de investigación, permitiendo diseñar un plan de evaluación y pruebas de acuerdo a las etapas desarrolladas en la metodología. Por otra parte, se realizó una descripción de las herramientas de simulación OptSim® y Matlab® que cuentan entre sus características con una interfaz gráfica amigable y de fácil configuración para obtener resultados específicos.

CAPÍTULO 3. DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO COMPENSADOR DE DISPERSIÓN CROMÁTICA.

3.1 Diseño del Algoritmo

La elaboración del código compensador parte de las fórmulas teóricas que generan la dispersión, las cuales incluyen dispersión por guía de onda (D_G) y dispersión de material (D_M) [40]. Teniendo que:

$$CD_T = D_G + D_M \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Para la elaboración del código correspondiente, se deben tener en cuenta ciertas características que permitan la correcta co-simulación entre las herramientas Matlab y OptSim® y que lleven a los resultados esperados.

Inicialmente, se debe considerar el tamaño del vector de la señal que sale del modulador, debido a que ésta será la señal proveniente de OptSim® a tratar en Matlab. Para este procedimiento, se recurre al *comand window* de Matlab, pues permite ver valores, tamaño y orientación del vector. Teniendo esa información, se realiza el cálculo concerniente con el fin de obtener, en este caso, **125951** valores correspondientes al tamaño del vector. El valor mínimo y máximo de lambda, se toman de acuerdo a las ventanas de trabajo de la fibra monomodo recomendadas por la ITU, considerando que serían posibles longitudes de onda de trabajo. Lambda indica el vector anteriormente mencionado y debido a las unidades que se manejan en OptSim®, este debe estar expresado en nanómetros.

Los valores presentes en la figura 3.1, caracterizan la fibra óptica matemáticamente, siendo necesarios en el desarrollo del presente algoritmo.

```
lambda = [1000:0.008113606770849999999:1997]*1e-9
G=0.6961663; %Coeficientes de Sellmeier para Germanio - Para determinar dispersión de luz en el medio
lambda1=68.4043*1e-9; %Longitudes de Onda para Germanio dopado de Silicio
c = 299792458;
pi = 3.1415926;
a = 4.1e-6; %Radio del núcleo
delta = 0.003; %Diferencia de índice entre el núcleo y el revestimiento.
n1=1.3024 %índice refractivo en el núcleo
```

Figura 3.1 Parámetros que caracterizan a la fibra [40].

3.1.1 Cálculo de la Dispersión de Material

El cálculo concerniente a la dispersión de material, surge de las siguientes ecuaciones [40]:

$$D_M = -\frac{\lambda}{c} * \frac{d^2n}{d\lambda^2} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

- λ , es el vector anteriormente mencionado, tamaño 1x125951
- c , denota la velocidad de la luz en el vacío. Para las conversiones entre frecuencia y longitud de onda debe ser igual a $2,99792458*10^8$ m/s, según la recomendación ITU-G 694.1.

La dispersión de material surge debido a la variación en el índice de refracción, en función de la longitud de onda [40]; esto es:

$$\frac{d^2 n}{d\lambda^2} = \frac{d^2 \sqrt{1 + \left(\frac{G \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2}\right)}}{d\lambda^2}$$

Ecuación 3.3

Para poder obtener el resultado del factor $\frac{d^2 n}{d\lambda^2}$ e implementarlo en Matlab, se hace necesario descomponerlo como se observa en la figura 3.2.

```

%% -----
%% Cálculo de la Dispersión de Material
syms lambda noflambda
npow2oflambda = 1 + (G.*lambda.^2./(lambda.^2.-lambda1*lambda1))
noflambda=sqrt(npow2oflambda)
p= diff(noflambda, lambda, 2)
pi=-1/268433456./(4503599627370496+3135254289267897.*lambda.^2./(lambda.^2.-5931525098431725/1267650600228229401496703205376)).^(3/2)...
.*(6270508578535794.*lambda./(lambda.^2.-5931525098431725/1267650600228229401496703205376)-6270508578535794.*lambda.^(3)...
./(lambda.^2.-5931525098431725/1267650600228229401496703205376).^2).^2.+1./134217728./(4503599627370496.+3135254289267897.*lambda.^(2)...
./(lambda.^2.-5931525098431725/1267650600228229401496703205376)).^(1/2).* (6270508578535794./(lambda.^2.-5931525098431725/1267650600228229401496703205376)...
-31352542892678970.*lambda.^2./(lambda.^2.-5931525098431725/1267650600228229401496703205376).^2.+25082034314143176*lambda.^(4)...
/(lambda.^2.-5931525098431725/1267650600228229401496703205376).^3)

```

Figura 3.2 Descomposición cálculo ecuación Dispersión de Material [40].

En principio, se deben declarar las variables que interfieren en la derivada. El operador “diff” con el que cuenta Matlab, permite obtener la derivada en el orden que se desee. El valor “p” que arroja como resultado ésta operación, se puede evidenciar en la ventana de comandos. Dado que lambda es un vector, se debe implementar el operador (.) para que se vean afectados cada uno de sus valores.

Ahora bien, teniendo el valor concerniente al factor de la derivada, se puede proceder al cálculo de la Dispersión de material total, planteada en la ecuación 3.3.

```

Matdisp = -(lambda./c).*pi
%Conversión a ps/nm.Km
Matdisp = Matdisp*1e-3
B=Matdisp.';
figure(1)
clf
hold
xlabel('nm')
ylabel('ps/nm.km')
title('Dispersión de Material')
plot(lambda, Matdisp, '-.')
grid on

```

Figura 3.3 Cálculo Dispersión de Material Total.

Todos los valores que se obtengan, deben estar en unidades de ps/nm*Km, debido a que los valores de amplitud de la señal no se deben ver afectados en OptSim®.

Una vez conseguido el vector a utilizar, mediante el operador (.) se debe realizar su transpuesta, esto con el fin de que todos tengan la misma orientación y así lograr operar los vectores resultantes obtenidos al final, ya que inicialmente se mencionó que a través del *comand window* de Matlab se logra ver la orientación del vector lambda. La figura 3.4 es la concerniente a éste cálculo, la cual se asemeja bastante

a la teórica (ver figura 1.17), por ende, se concluye que el cálculo de la dispersión de material es correcto.

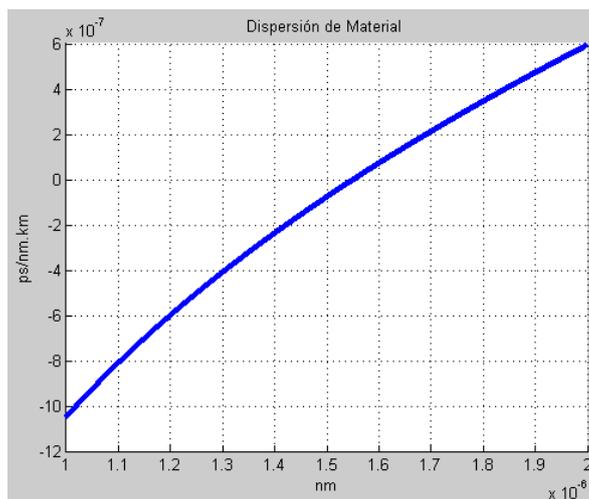


Figura 3.4 Dispersión de Material.

3.1.2 Cálculo de la Dispersión por Guía de Onda

Se debe tener en cuenta que el presente trabajo de grado utiliza fibra óptica monomodo para sus respectivas simulaciones, por lo cual el valor de frecuencia normalizada (V); quien determina cuántos modos de propagación soporta la fibra, debe ser menor a 2.5, para garantizar que la fibra propague un único modo; según [40]. Sin embargo, se ha comentado la línea de código necesaria para fibras multimodo, para interés general. Con el fin de facilitar y garantizar una correcta obtención de cálculos, se decide partir la fórmula total en 2 [40]; quedando como se evidencia en la figura 3.5 y en las ecuaciones 3.4 a 3.6.

```

% % -----
% % Cálculo de la Dispersión de Guía de Onda
%V = (2 * pi * a * n1 * sqrt(2 * delta)) % Frecuencia Normalizada.Determina cuantos modos soporta la fibra
Dlambda1 = -(noflambda .* delta) ./ (c * lambda);
Dlambda2 = 0.080 + 0.549 * (2.834 - 2.3).^2;
Dlambda = Dlambda1 .* Dlambda2;
%Conversión a ps/nm.Km
Dlambda = Dlambda*1e-3;
C=Dlambda.';
figure(2)
plot(lambda,Dlambda, '-')
title('Dispersión de Guía de Onda')

```

Figura 3.5 Cálculo Dispersión de Guía de Onda Total [40].

La expresión matemática de lo anterior, queda de la siguiente manera:

$$D_{\lambda 1} = -\frac{\sqrt{1 + \left(\frac{G \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2}\right) \cdot \Delta}}{c \cdot \lambda} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Este primer término, relaciona la mayoría de los valores que caracterizan la fibra. Seguidamente, se tiene que:

$$D_{\lambda 2} = 0.80 + 0.549 * (2.83 - V)^2 \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Ahora bien, se procede al cálculo de la dispersión de guía de onda total, siendo:

$$D_G = D_{\lambda 1} * D_{\lambda 2} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Se hace necesaria la conversión tanto de unidades como de orientación del vector, como se mencionó en el caso de dispersión de material. La figura resultante de esta dispersión, se asemeja bastante a la teórica (ver figura 1.17), por ende, se concluye que la figura 3.6 es correcta.

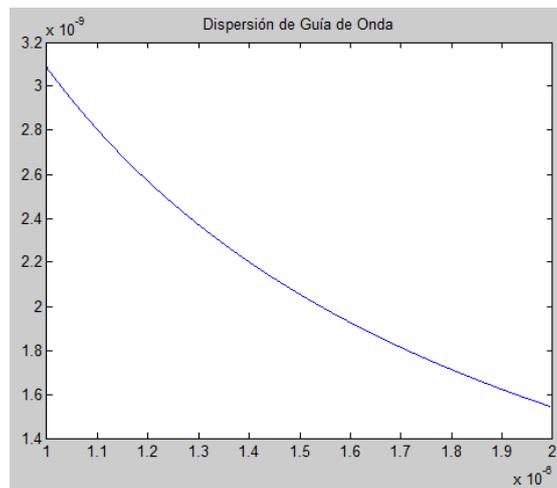


Figura 3.6 Dispersión de Guía de Onda [40].

3.1.3 Cálculo de la Dispersión Total (Dispersión Cromática)

Teniendo los dos tipos de dispersiones que componen la dispersión cromática, y que se tendrán en cuenta en el presente trabajo de grado, se procede a obtener el valor de dispersión total, según la ecuación 3.1. Se puede evidenciar, como las pendientes de las dispersiones anteriormente mencionadas, se complementan, sumándose punto a punto y generando así; la dispersión total, como se observa en la figura 3.7.

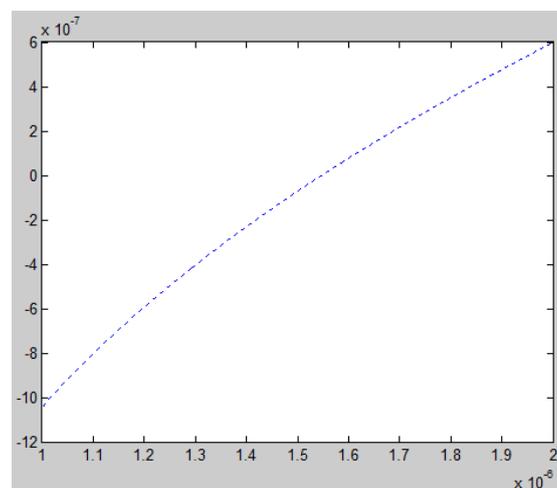


Figura 3.7 Dispersión Total (Dispersión Cromática)

En la figura 3.8, se observa la suma de dos variables “B” y “C”, las cuales hacen referencia a las matrices transpuestas de la dispersión de material y la dispersión de guía de onda, respectivamente. Una parte importante y fundamental para el desarrollo del trabajo, y que permite cumplir el objetivo de disminuir la CD presente en el enlace, se presenta en la línea de código enmarcada en rojo. Al cambiar la pendiente de la dispersión total obtenida, se resta dispersión a la señal proveniente del modulador de OptSim®, es decir que se está generando una dispersión que se contrarreste a la acumulada en el enlace de simulación. Esta dispersión, como se logra ver en los resultados del siguiente capítulo, disminuye en todas las componentes del vector conformador de la señal.

```

% % -----
% % Cálculo de la Dispersión Total
TotDisp = B+C;
TotDisp=TotDisp*-1;
figure (3)
plot(lambda, TotDisp3, ':')

```

Figura 3.8 Cambio de pendiente de Dispersión total obtenida.

Obteniendo como resultado de este cambio de pendiente, que se logra ver en la figura 3.9:

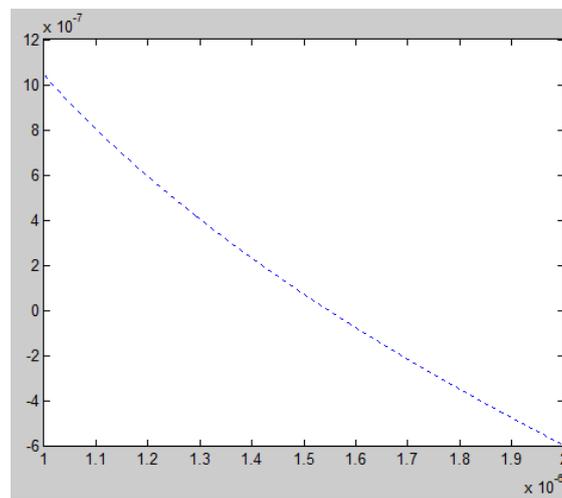


Figura 3.9 Dispersión Total con pendiente negativa.

Mediante el desarrollo y la implementación del algoritmo compensador de dispersión cromática, se pudo constatar que es posible modificar algunas variables de configuración, lo que conlleva a que se generen diferentes grados de libertad, enfocados en el control del radio del núcleo, el índice refractivo y la longitud de onda de trabajo, permitiendo de este modo cambiar la pendiente de dispersión para lograr diferentes porcentajes de compensación en el tratamiento digital de la señal, sin necesidad alguna de realizar cambios físicos en el enlace de comunicación.

3.1.4 Conexión con Optsim®.

Se hace necesaria una línea de código que permita la conexión de estas dos herramientas, la figura 3.10 indica cómo se relacionan las variables de entrada y salida. La declaración de las variables en OptSim®, ha sido explicada en detalle en el anexo A, del presente documento. Esta línea de código lo que hace es, agregar la dispersión con pendiente negativa que se ha generado en Matlab, a la señal proveniente de OptSim®.

```
% % Conexión con Optsim  
ele_out=ele_in+TotDisp;
```

Figura 3.10 Relación variables Matlab/OptSim.

3.2 Implementación y Pruebas.

Los perfiles de dispersión son graficas que permiten ver y analizar el comportamiento de la dispersión cromática en sus diferentes modos de compensación, frente a una distancia determinada. Para el presente trabajo de grado, se hace necesario realizar dicho análisis, pues determina la viabilidad y factibilidad de la implementación de los modos de compensación mediante DCF. Las compensaciones usualmente se hacen de forma: cero, normal, anómalo, pero debido a las características y objetivos del presente trabajo, se realiza de forma normal y anómalo, con porcentajes de 25, 50, 75 y 100% para realizar el respectivo análisis, y de esta manera generar los casos de estudio pertinentes.

Con el fin de desarrollar los cálculos correspondientes para cada porcentaje, se debe tener en cuenta que la distancia punto a punto a implementar en la simulación es de 100Km de fibra óptica SSMF-28, con valor de CD de 17ps/nm*Km, mientras que el valor de CD para la fibra compensadora DCF es de -80ps/nm*Km. Estos valores han sido anteriormente fijados en el capítulo 2. Los cálculos realizados para los 3 modos de compensación, parten de [59]. La ecuación 3.7, es la base que genera el cálculo para los diferentes porcentajes de compensación, por ende será utilizada en los literales que incluyen los casos de estudio, explicados más adelante.

$$CD_{Tot-Acum} = 17 \frac{ps}{nm * Km} * 100 Km = 1700 \frac{ps}{nm} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Como se evidencia en la figura 3.11, y como se mencionó en el desarrollo del algoritmo, el tratamiento de la señal que se procesa en el módulo compensador diseñado se realiza en el dominio eléctrico, y por tal motivo requiere información apriori de la acumulación de la dispersión y los efectos que esta produce en la señal de salida generada por el transmisor, permitiendo la implementación solo del modo post-compensado, debido a las altas limitaciones de procesamiento de información de los módulos de conversión de tipo electro-óptico de la herramienta OptSim, generadas por las altas velocidades de transmisión de datos, sin embargo es posible a futuro implementar equipos de mayor capacidad de procesamiento, los cuales mitigaran dichas limitaciones.

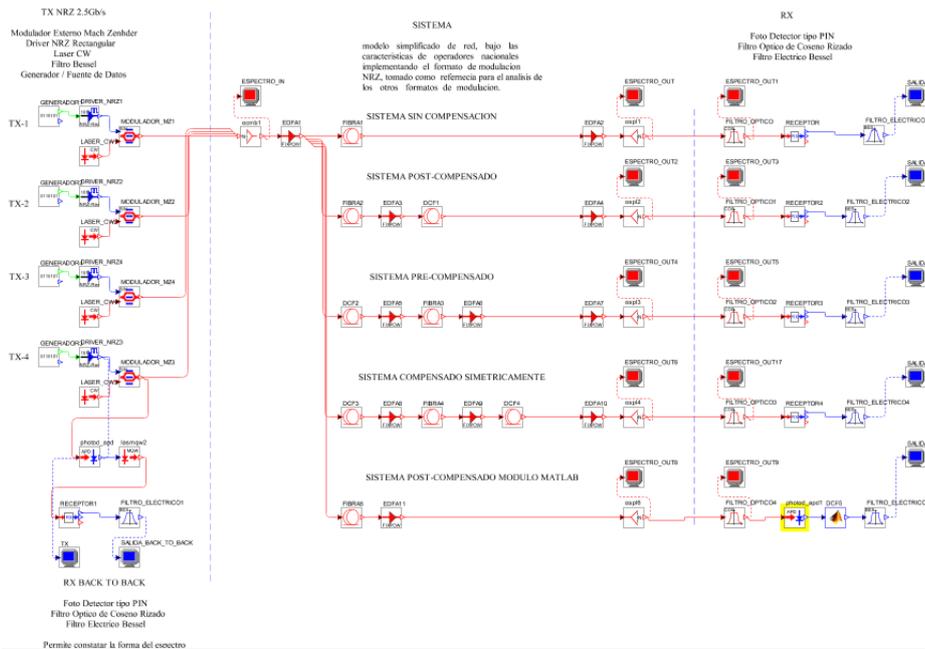


Figura 3.11 Escenario de Simulación.

Se ha implementado un enlace back to back con el fin de obtener valores que no se vean afectados por degradaciones debido a elementos externos, y de esta manera analizar los diferentes sistemas respecto a este. El análisis pertinente se basa en la OPM, en este caso los parámetros a tener en cuenta serán los descritos en el capítulo 2, sección 2.1.

3.2.1 Enlace back to back.

Con el fin de dar inicio al desarrollo y análisis de las diferentes compensaciones, se procede a realizar, primeramente, la implementación del enlace back to back.

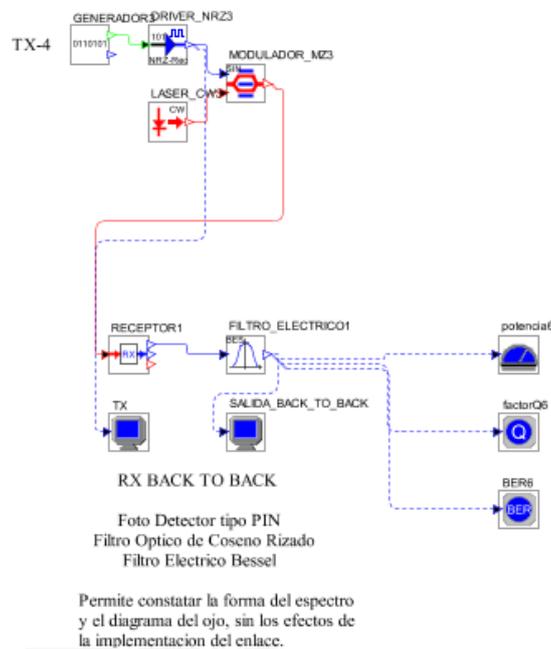


Figura 3.12 Enlace Back to Back generado.

Haciendo uso de las herramientas de simulación con las que cuenta OptSim®, se procede a obtener los resultados correspondientes a este enlace, siendo los siguientes:

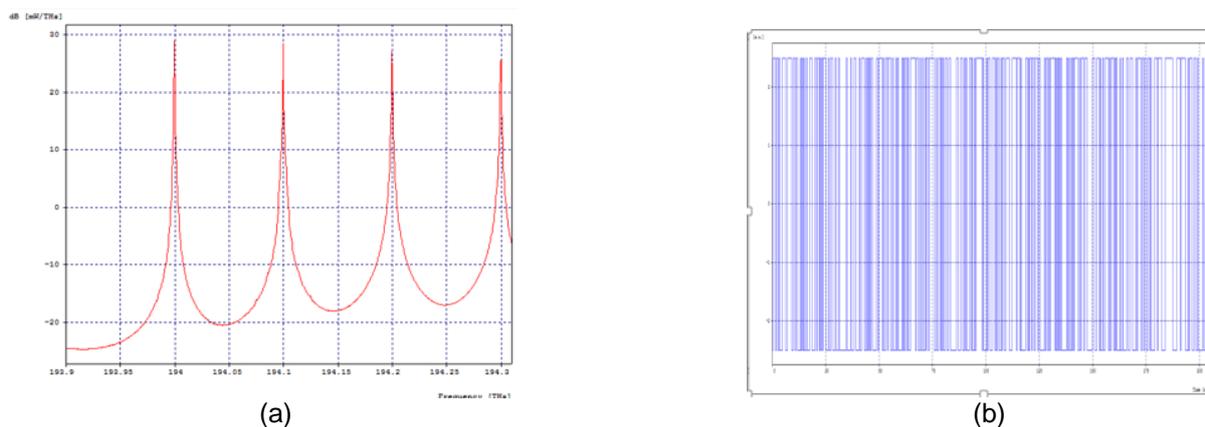


Figura 3.13 (a) Espectro de la señal de Transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, enlace Back to Back.

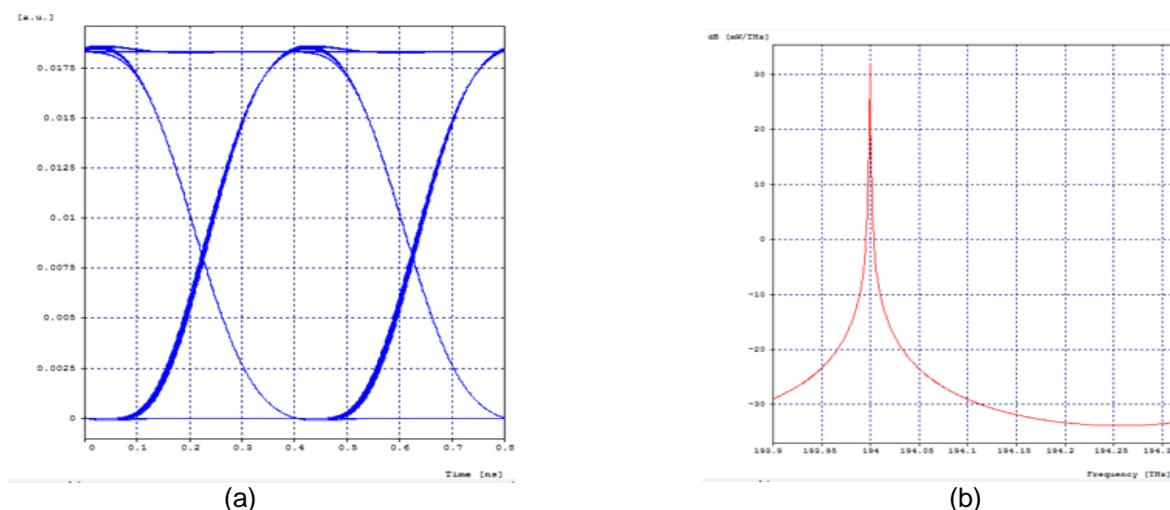


Figura 3.14 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) espectro de la señal filtrada, enlace Back to Back.

En estas figuras se aprecian las condiciones iniciales de funcionamiento del sistema. Las gráficas resultan ser ideales, debido a la ausencia de elementos que interfieran en el transcurso de la señal.

Tabla 3.1 Parámetros de Monitoreo Óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema para el enlace back to back.

Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	P_{Tx} [dBm]	Jitter [ns]	$OSNR_{IN}$ [dB]	P_{Rx} [dBm]	$OSNR_{OUT}$ [dB]
90	194	1e-40	40	0	0.0736	51.01	-28	51.01
95	194	1e-40	40	0	0.0736	51.01	-28	51.01
100	194	1e-40	40	0	0.0736	51.01	-28	51.01
105	194	1e-40	40	0	0.0736	51.01	-28	51.01
110	194	1e-40	40	0	0.0736	51.01	-28	51.01

Las figuras que relacionan los parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo de grado, y la distancia de transmisión, se encuentran a continuación:

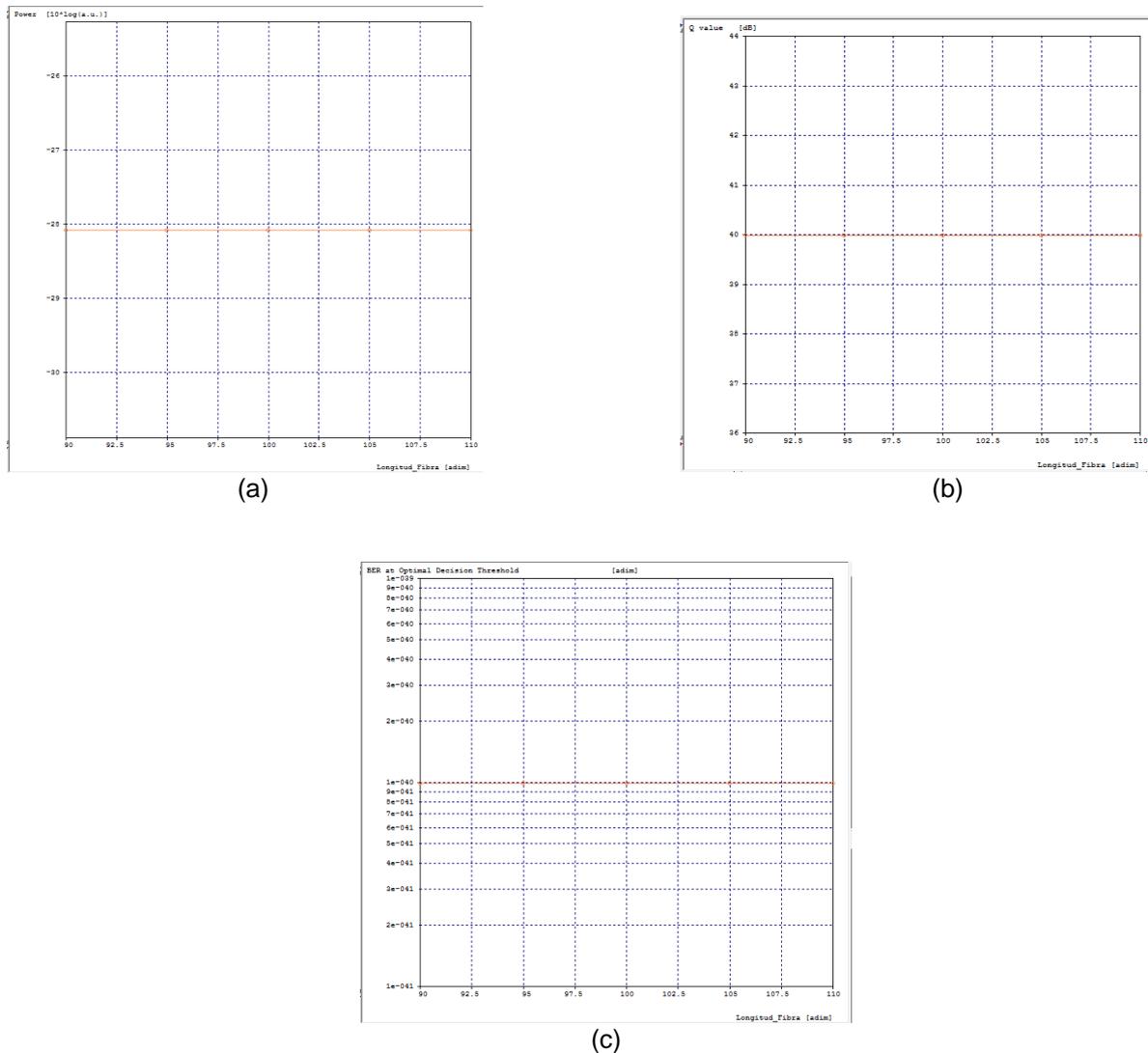


Figura 3.15 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER; vs Distancia de Transmisión, enlace Back to Back.

La tabla 3.1, contiene los valores de OPM que ha arrojado el enlace back to back, dependientes de la distancia de transmisión. A pesar de obtener estos valores de referencia, y debido a que son valores bastante ideales, se aclara que el presente trabajo de grado se basa los valores de referencia planteados en el estándar G.652D [32].

Por otra parte, las figuras presentadas 3.13 y 3.14, muestran la relación existente entre los parámetros de monitoreo óptico y la distancia de transmisión, siendo el foco de análisis 100Km. Es de resaltar, que se han implementado potencias de transmisión y valores de amplificación bajos, dado que, al inyectar altas potencias dentro del modelo, se generan degradaciones debido a la excitación de los efectos no lineales, produciendo de esta manera canales no deseados dado el efecto de la

XPM, fluctuaciones y cambios en el diagrama del ojo. Los valores correspondientes a potencia de láser y EDFAs, se encuentran en la tabla 2.2.

3.2.2 Enlace sin compensación.

Es importante tener en cuenta, que la CD es directamente proporcional al aumento de la distancia de transmisión. La figura 3.116 hace mención a esto:

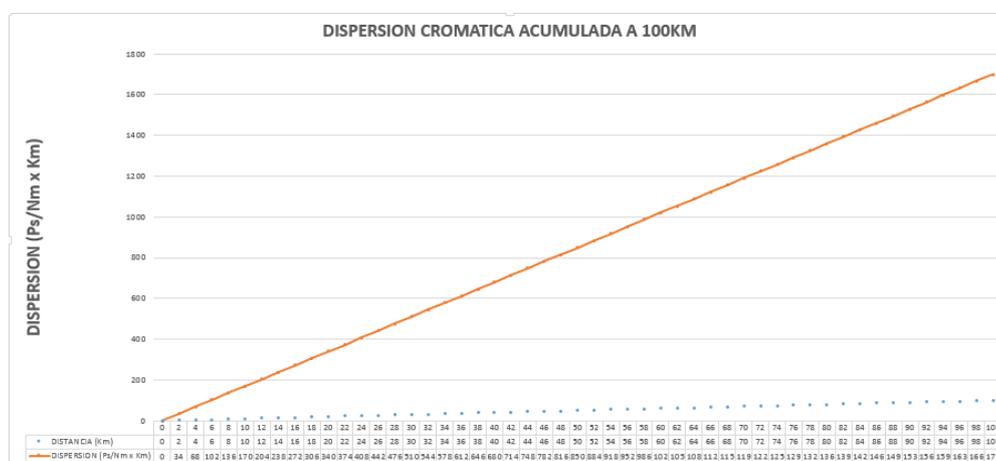


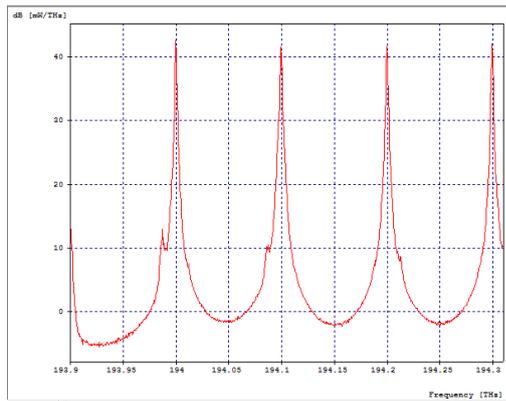
Figura 3.16 Dispersión total acumulada.

La figura 3.17 corresponde al sistema implementado en la herramienta OptSim®, explicado a continuación.

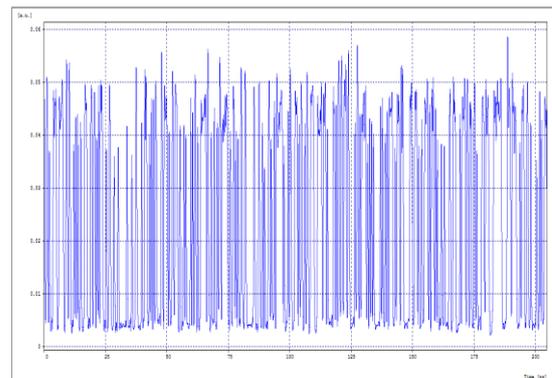


Figura 3.17 Sistema sin Compensación.

Una vez la señal proveniente de los 4 canales sea enviada por un solo medio de transmisión, se hacen las respectivas mediciones de espectro. La figura 3.17 representa el sistema sin compensación, donde la señal es transmitida mediante la fibra y posteriormente amplificada mediante un EDFA, seguidamente, se encuentra el sistema donde se realiza el filtrado de la señal, pasando a un receptor configurado con las condiciones planteadas en la tabla 2.2.

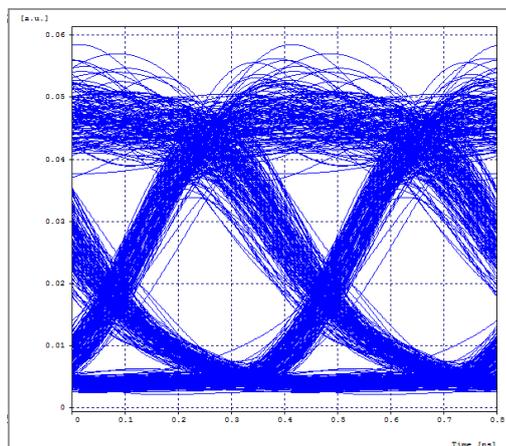


(a)

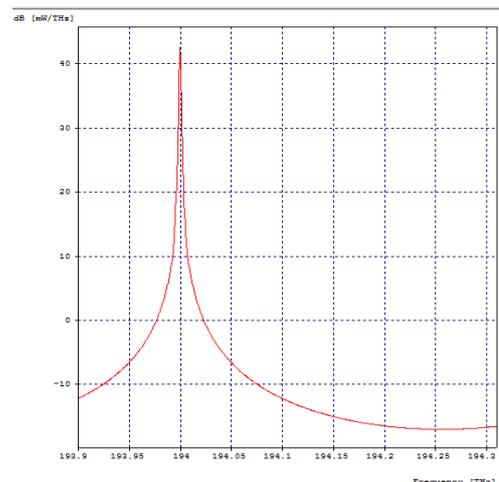


(b)

Figura 3.18 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema sin compensación.



(a)



(b)

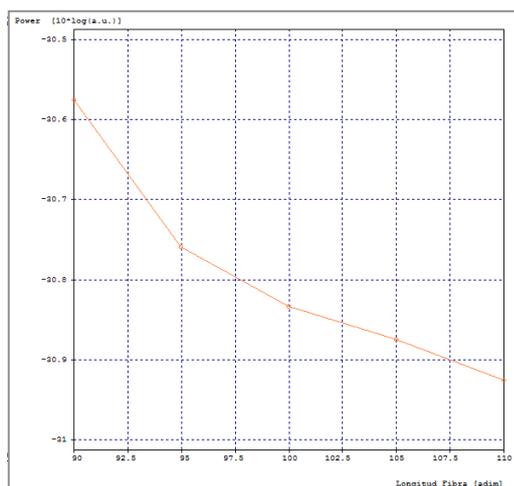
Figura 3.19 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema sin compensación.

Los valores de OPM que arrojan estas gráficas, se presentan en la tabla 3.2.

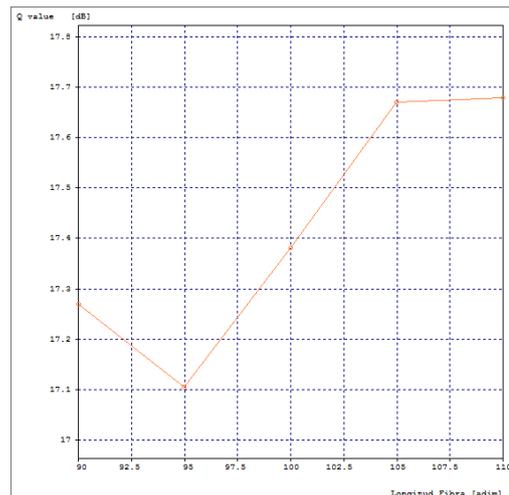
Tabla 3.2 Parámetros de Monitoreo Óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema para el enlace sin compensación.

Distancia [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P_{Tx} [dBm]	Jitter	$OSNR_{IN}$ [dB]	P_{Rx} [dBm]	$OSNR_{OUT}$ [dB]
90	194	1.39e-13	7.303	0	0.0995	51.01	-30.58	48.77
95	194	1.75e-12	7.17	0	0.0995	51.01	-30.75	48.67
100	194	2.05e-13	7.398	0	0.1011	51.01	-30.83	48.42
105	194	2.49e-14	7.647	0	0.1012	51.01	-30.88	48.27
110	194	1.12e-14	7.658	0	0.0990	51.01	-30.92	48.30

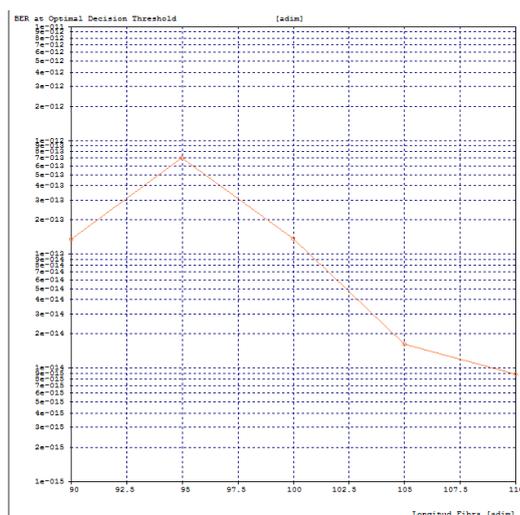
Las figuras que relacionan los parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo de grado, y la distancia de transmisión, se encuentran a continuación:



(a)



(b)



(c)

Figura 3.20 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER; vs Distancia de Transmisión, sistema sin compensación.

La figura 3.19 indica la degradación de la señal dada, debida en gran medida a que los dispositivos de amplificación implementados introducen gran cantidad de ruido. Una posible solución es aumentar considerablemente la potencia de transmisión, pero; como se mencionó anteriormente; generaría otras degradaciones (efectos no lineales) sobre la señal. La tabla 3.2 y la figura 3.20 indican que ha habido pérdida en la potencia de recepción, haciendo que esta se encuentre en los niveles mínimos aceptados. El efecto de la CD en el enlace se evidencia en el incremento del valor del jitter, pues ocurrió un corrimiento en la señal por causa de la superposición de los pulsos, lo que conlleva a que se genere ISI; y, como se evidencia en el diagrama de ojo presente en la figura 3.19 (a), la BER se vea realmente afectada, haciendo que llegue a la mínima aceptación. De la misma tabla, se obtiene que el valor de OSNR ha disminuido, salida en cuanto entrada. Se ha encontrado que los EDFA hacen que el valor de OSNR disminuya debido a la figura de ruido ASE (Emisión Espontánea Amplificada, *Amplified Spontaneous Emission*) que tienen vinculada. Otros factores que también influyen en la disminución de este parámetro son [60]:

- Formato de modulación: DQPSK y DPSK.
- Velocidad de transmisión: 40 Gb / y 100 Gb/s.
- Dispersión en la Fibra Óptica: Dispersión del Modo de Polarización (PMD) y Dispersión cromática (CD).
- Espaciado de canales: para fines de múltiples canales, es importante.

El factor Q presenta un decrecimiento al alcance de los 100Km de longitud de la fibra, esto debido a los efectos de orden superior resultantes del aumento en la post-amplificación, pero se encuentra en el rango de los valores mínimos esperados, como se observa en la figura 3.20.

Una vez analizada la parte espectral del sistema, y se haya verificado que los niveles de potencia y OSNR permiten trabajar en condiciones óptimas, se procede a analizar el comportamiento del sistema con la inclusión de elementos compensadores, para los diferentes modos de compensación. Los sistemas implementados buscan llegar a un balance, donde los efectos positivos y negativos que introducen los diferentes elementos agregados se compensen de tal forma que los valores de OPM que se obtengan estén siempre dentro del umbral establecido para el correcto funcionamiento del sistema.

3.2.3 Caso de estudio 1. Sistema compensado al 25%.

Los cálculos a continuación, se basan en la ecuación 3.7. Aquí se compensa el 25% de la dispersión total acumulada con el fin de reducir los efectos negativos que la CD introduce en el enlace. Las ecuaciones 3.8 y 3.9, indican la cantidad de dispersión a compensar y la cantidad de DCF necesaria para lograrlo, respectivamente.

$$1700 \frac{ps}{nm} * 0.25 = 425 \frac{ps}{nm} \quad \text{Ecuación 3.8}$$

$$\frac{425 \frac{ps}{nm}}{-80 \frac{ps}{nm * Km}} = -5.3125 Km \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Debido que la medida corresponde a distancia, entonces se toma 5.3125Km. Sin embargo, se decide aproximar los valores que tengan decimales, a su entero superior, es decir que, para obtener un 25% de compensación de la CD en un enlace de 100Km, se necesitan 6Km de fibra compensadora DCF.

- **Post-compensado.**

La gráfica 3.21, ilustra el comportamiento teórico de la CD vs distancia de transmisión, contando con compensación mediante DCF, con longitud de 6Km, como se halló en el anterior cálculo. Se ve como, a los 100Km de longitud de la

fibra, se sufre un cambio en la pendiente que caracteriza la CD, debido al cambio en el tipo de fibra; SSMF a DCF.

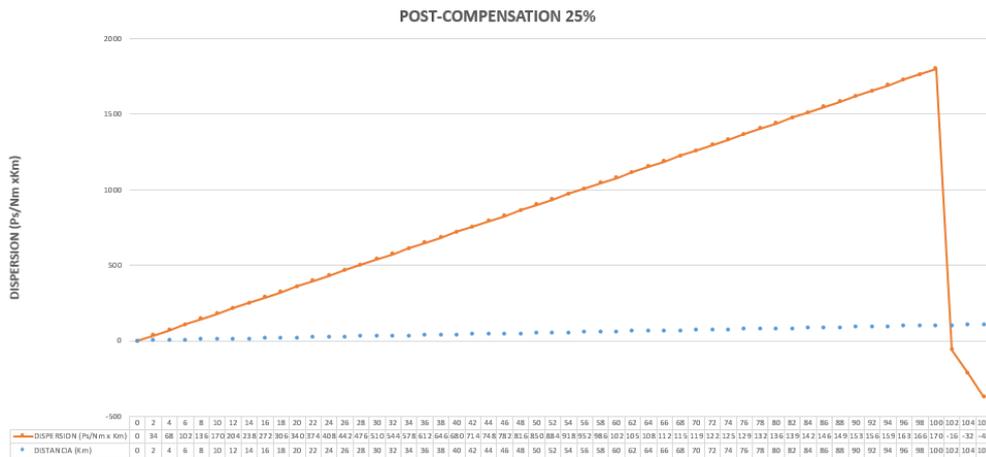


Figura 3.21 Dispersión Acumulada para post-compensación al 25%.

La figura 3.22 corresponde al sistema implementado en la herramienta OptSim®. Este consta de una fibra SSMF, donde la señal es amplificada mediante un EDFA y compensada a través de fibra DCF.



Figura 3.22 Sistema Post-Compensado.

A continuación, se presentan las gráficas de los resultados obtenidos.

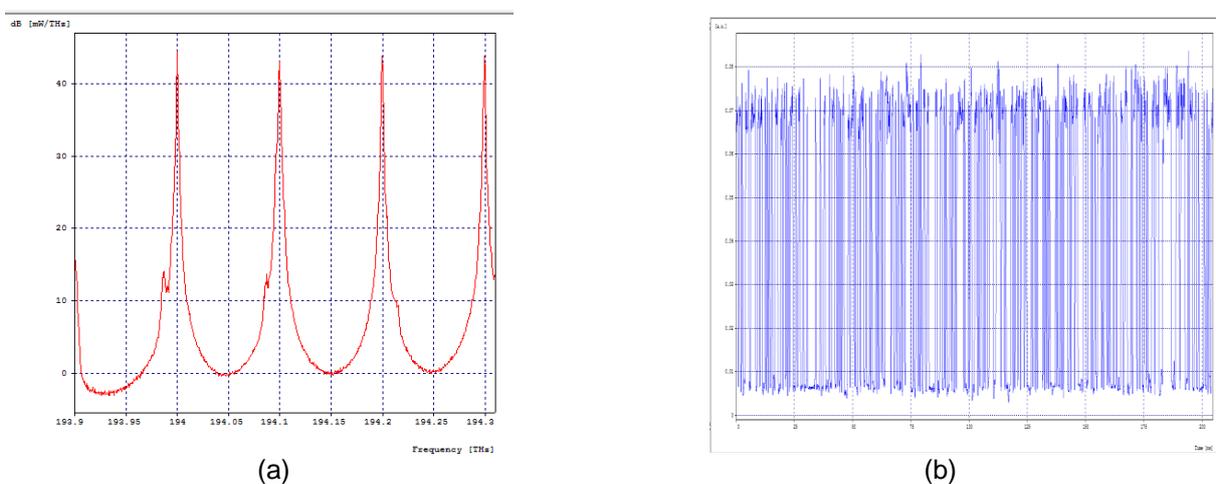
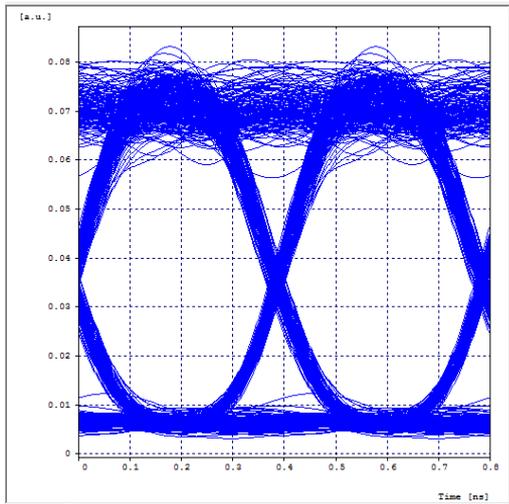
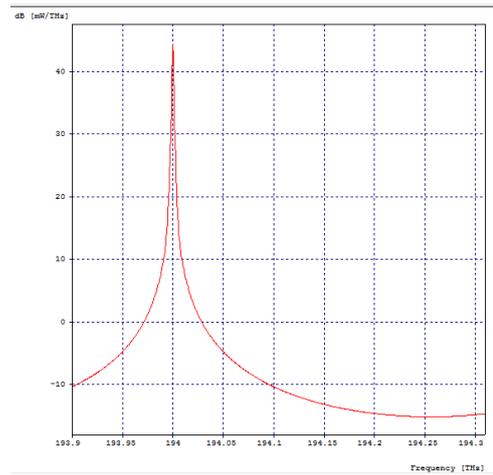


Figura 3.23 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema post compensado al 25%.



(a)



(b)

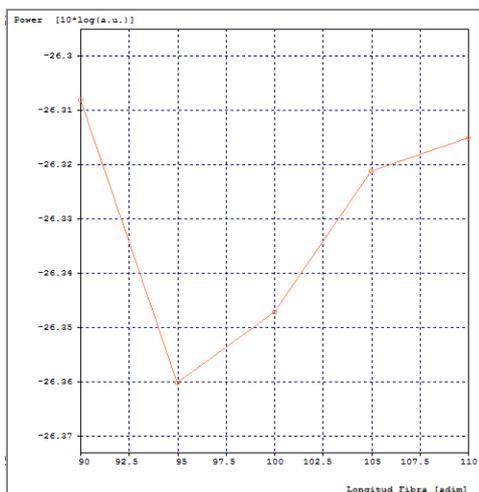
Figura 3.24 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema post compensado al 25%.

Los valores de OPM que arrojan estas gráficas, se presentan en la tabla 3.3.

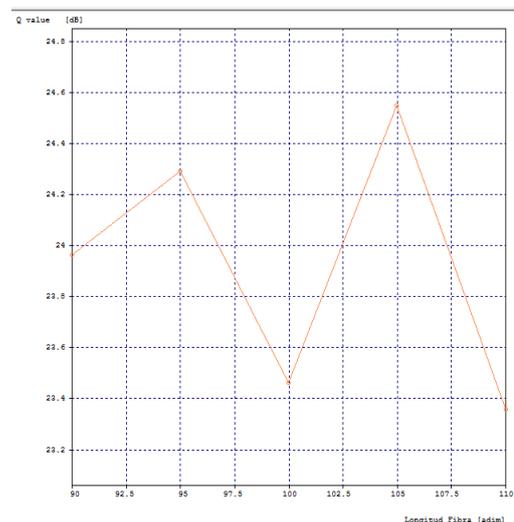
Tabla 3.3 Parámetros de Monitoreo Óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema post compensado al 25%.

Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	P_{Tx} [dBm]	Jitter [ns]	$OSNR_{IN}$ [dB]	P_{Rx} [dBm]	$OSNR_{OUT}$ [dB]
90	194	1e-40	23.9	0	0.0831	51.01	-26.31	47.84
95	194	1e-40	24.3	0	0.0840	51.01	-26.36	48.17
100	194	1e-40	23.42	0	0.0866	51.01	-26.35	48.52
105	194	1e-40	24.45	0	0.0865	51.01	-26.32	48.96
110	194	1e-40	23.38	0	0.0849	51.01	-30.35	49.08

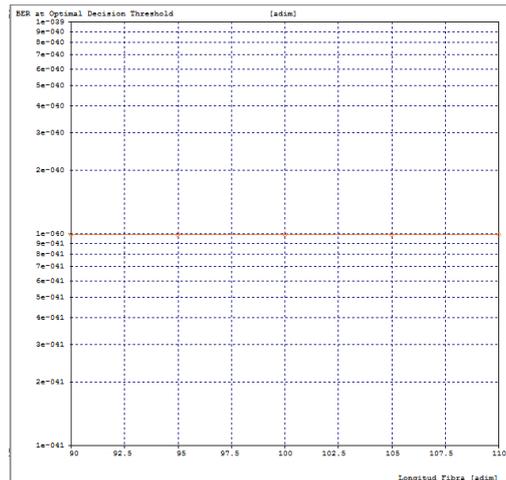
Las figuras que relacionan los parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo de grado, y la distancia de transmisión, se encuentran a continuación:



(a)



(b)



(c)

Figura 3.25 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema post compensado al 25%.

Con el fin de regenerar y obtener niveles de potencia en recepción aceptables, se ve necesario incorporar un amplificador EDFA extra, ubicado en la línea, con las características especificadas en la tabla 2.2 del capítulo 2. Esta incorporación, a pesar de lograr el objetivo inicial; como se ve en los resultados plasmados en la tabla; trae consigo la generación de efectos que conllevan a la degradación de la señal. Aunque ha sido agregado un dispositivo DCF de compensación para la CD en el enlace, la configuración que se le ha dado no es la indicada, pues no ha compensado la Dispersión Cromática acumulada en el enlace, para una distancia de 100Km, esto se evidencia, dado que se sigue presentando corrimiento en la señal, causando que el jitter en el sistema aumente, en comparación al enlace sin compensación. De lo anterior, se concluye que el tipo y la cantidad de compensación implementada en este caso, no es la correcta para el tipo de enlace generado. Pese a lo anterior, los valores de OPM se encuentran en los rangos aceptables para el trabajo de grado (ver tabla 3.3), que como se mencionó anteriormente, se basan en las recomendaciones que da la ITU. Como se muestra en la tabla mencionada, se lograron obtener incrementos en los valores de OSNR y Factor Q, respecto al enlace sin compensación. De los anteriores valores, se obtienen gráficas con cambios de pendientes significativas (figura 3.25), debido a los efectos no lineales relacionados con los EDFA.

- **Pre-compensado.**

La gráfica 3.26, ilustra el comportamiento teórico de la CD vs distancia de transmisión, contando con compensación mediante DCF, con longitud de 6Km, como se halló en el anterior cálculo. Se ve como, a los 100Km de longitud de la fibra, se sufre un cambio en la pendiente que caracteriza la CD, debido al cambio en el tipo de fibra; SSMF a DCF.

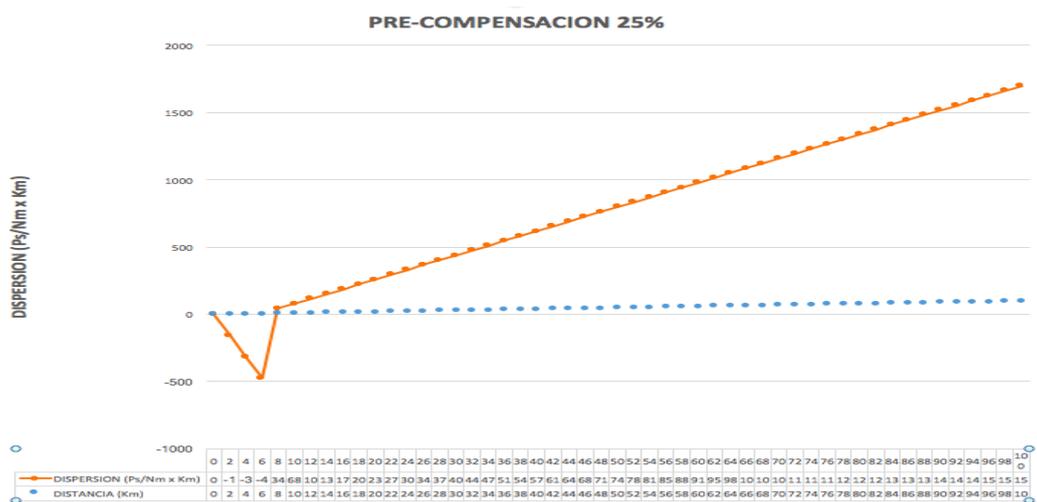


Figura 3.26 Dispersión Acumulada para pre-compensación al 25%.

La figura 3.27 corresponde al sistema implementado en la herramienta OptSim®, explicado a continuación.



Figura 3.27 Sistema Pre-Compensado.

En el sistema de la figura 3.27, la señal inicialmente se transmite por la fibra compensadora DCF, con el fin de generar una dispersión negativa, que contrarreste a la que se generará al pasar por la SSMF. Se hacen necesarios dos amplificadores de línea, asunto que se explicará más adelante. A continuación, se presentan las gráficas de los resultados obtenidos.

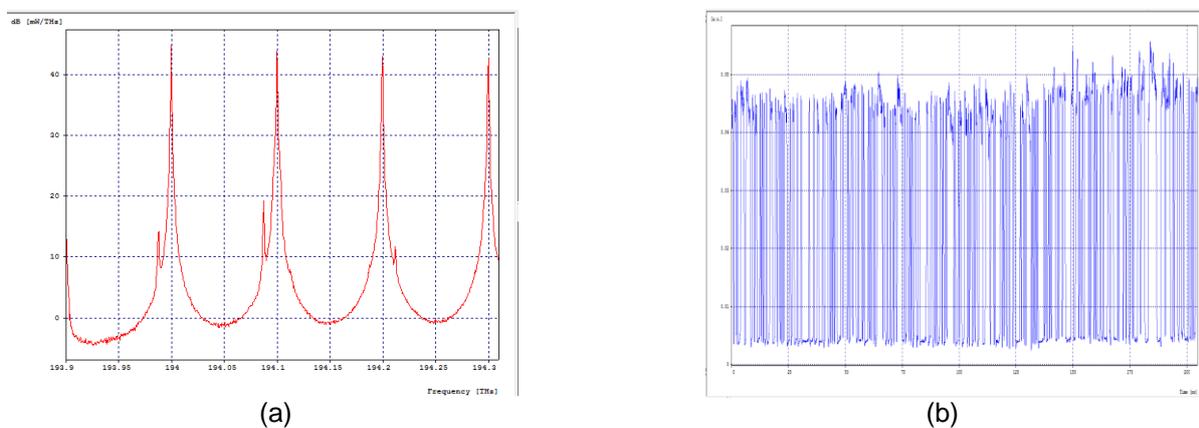


Figura 3.28 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema pre compensado al 25%.

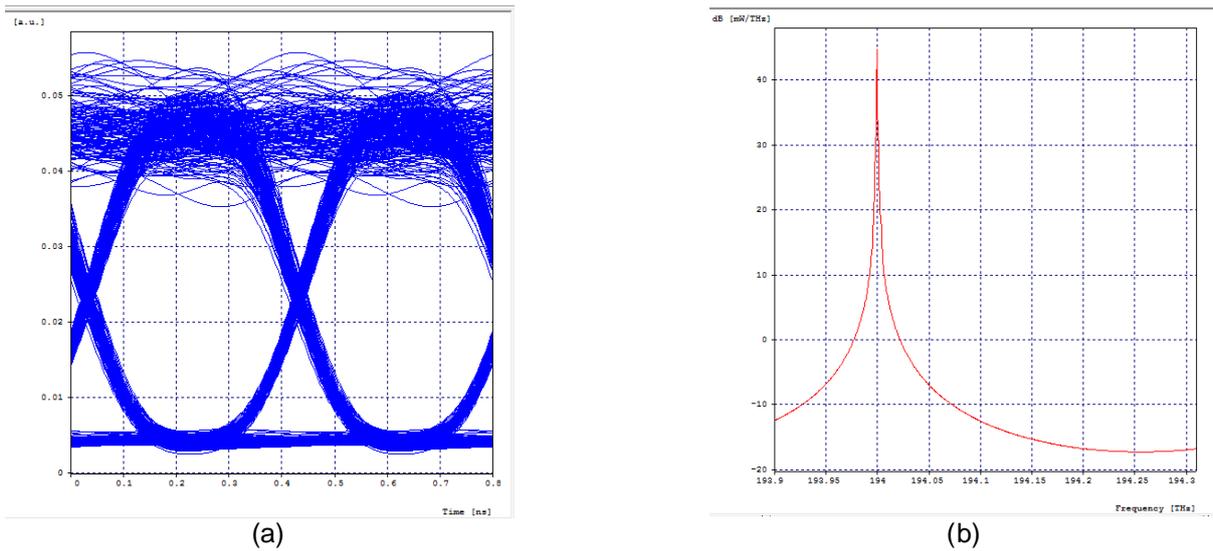


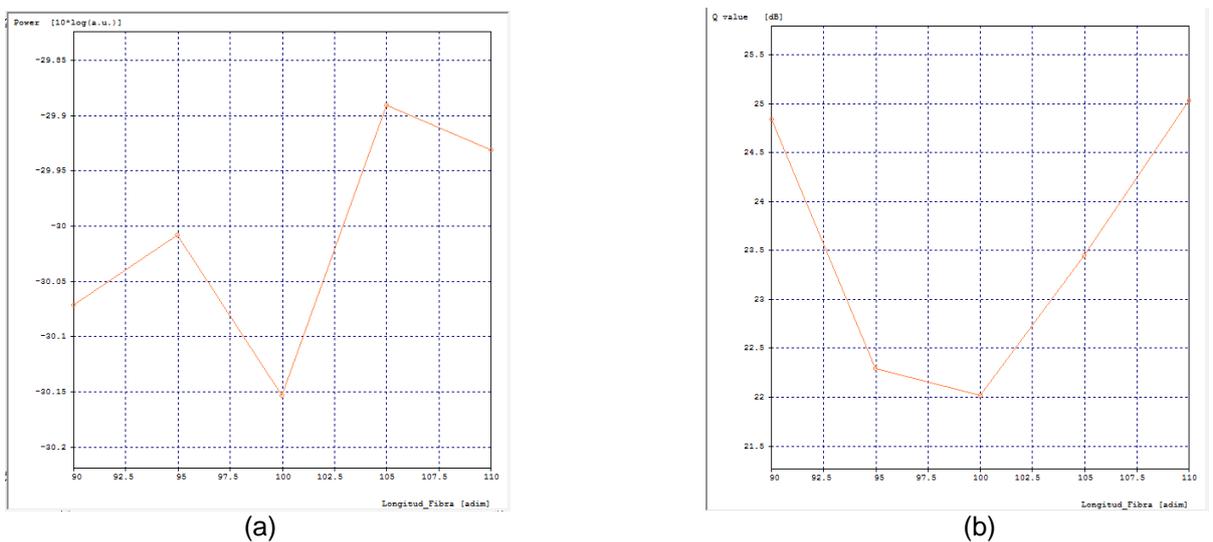
Figura 3.29 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema pre compensado al 25%.

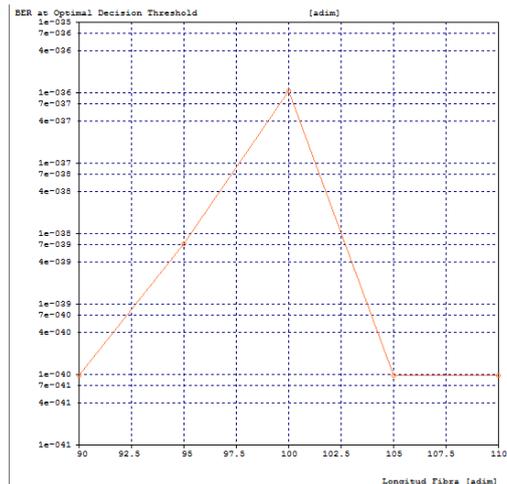
Los valores de OPM que arrojan estas gráficas, se presentan en la tabla 3.4

Tabla 3.4 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema pre compensado al 25%.

Distancia [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P _{Tx} [dBm]	Jitter [ns]	OSNR _{IN} [dB]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
90	194	1e-40	24.8	0	0.0852	51.01	-30.07	48.45
95	194	7.846e-39	22.3	0	0.0736	51.01	-30.01	48.51
100	194	6.24e-37	22	0	0.0878	51.01	-30.15	48.73
105	194	1e-40	23.49	0	0.0750	51.01	-29.88	48.92
110	194	1e-40	25	0	0.0757	51.01	-29.93	49.26

Las figuras que relacionan los parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo de grado, y la distancia de transmisión, se encuentran a continuación:





(c)

Figura 3.30 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema pre compensado al 25%.

Como en el anterior caso, para lograr regenerar la señal y llegar por lo menos a los valores mínimos esperados, se han ubicado dos amplificadores de línea en el enlace, sin embargo y por las características de implementación del enlace, los datos plasmados en la tabla 3.4 y la figura 3.30 (a), muestran que la potencia en recepción ha disminuido, llegando a los niveles mínimos esperados.

La superposición de los pulsos es ahora más evidente. La ISI y la CD empiezan a jugar un papel importante en el desempeño del enlace, llevando a que los valores de BER y Factor Q disminuyan (ver figura 3.30 (a) y (b), respectivamente). En este tipo de enlaces hay que tener en cuenta que, al querer incrementar potencia en recepción, de una u otra forma se sacrifica calidad del enlace, dados los efectos negativos que introducen los EDFA. Es por esto que, a pesar de haber diseñado el enlace tal y como lo dicen los cálculos teóricos para la compensación, el valor de jitter ha incrementado, como se ve en la tabla 3.4 y como lo evidencia la figura 3.29 (a). Los valores de OPM siguen estando dentro del rango establecido, por lo que el desempeño del enlace, es aceptable.

- **Compensado simétricamente.**

La gráfica 3.31, ilustra el comportamiento teórico de la CD vs distancia de transmisión, contando con compensación mediante DCF, con longitud de 6Km. Los cambios de pendiente en el comportamiento de la CD son significativos debido al cambio de tipo de fibra.

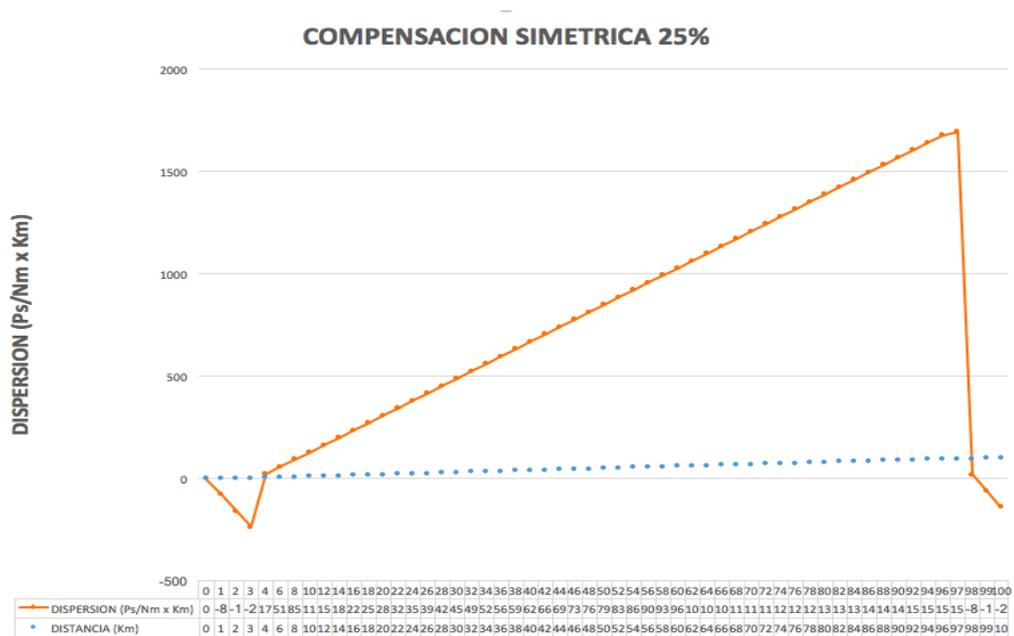


Figura 3.31 Dispersión Acumulada para compensación simétrica al 25%.

La figura 3.32 corresponde al sistema implementado en la herramienta OptSim®, explicado a continuación.



Figura 3.32 Sistema Compensado Simétricamente.

Los cálculos teóricos indican que son necesarios 6Km de fibra compensadora en total, es por esto que, para esta configuración, se disponen de 3Km de fibra DCF inicialmente, seguidamente la fibra de transmisión DCF y continuando con los 3Km de DCF faltantes, para un total de 106Km de longitud del enlace. Para alcanzar los niveles de potencia requeridos en recepción, se han implementado dos amplificadores EDFA en la línea. A continuación, se presentan las gráficas de los resultados obtenidos.

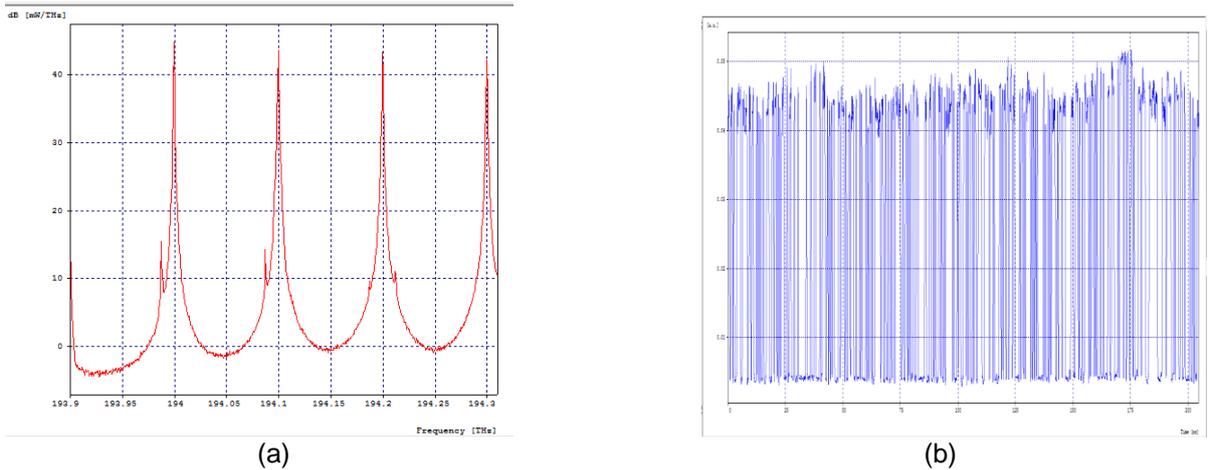


Figura 3.33 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema compensado simétricamente al 25%.

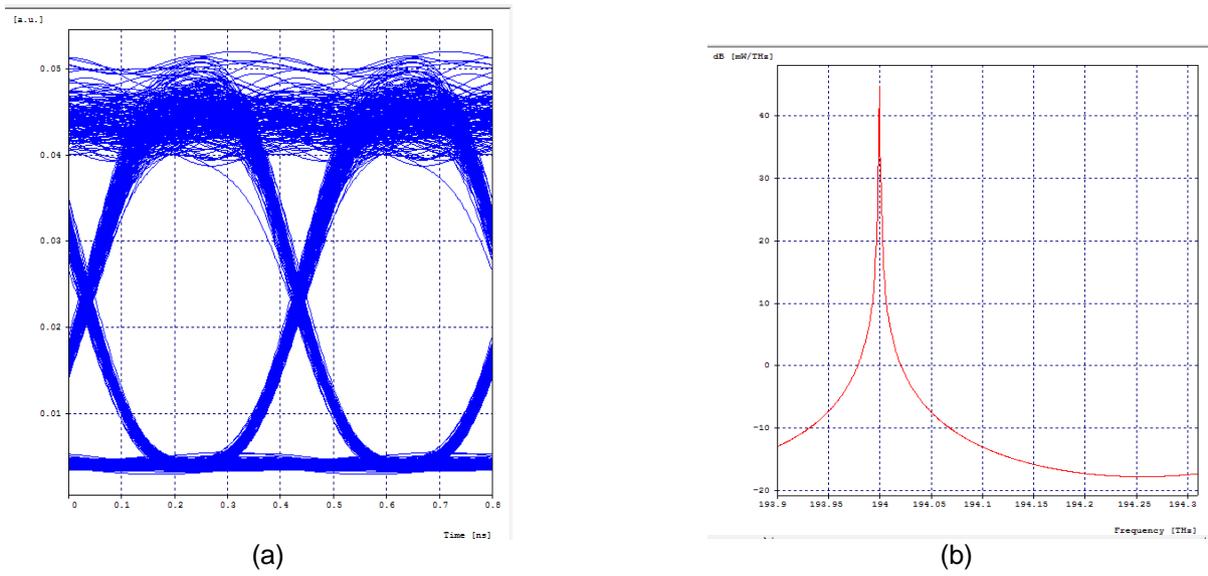


Figura 3.34 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema compensado simétricamente al 25%.

Los valores de OPM que arrojan estas gráficas, se presentan en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Parámetros de Monitoreo Óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema compensado simétricamente al 25%.

Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	P _{Tx} [dBm]	Jitter [ns]	OSNR _{IN} [dB]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
90	194	1e-40	24.55	0	0.0748	51.01	-30.28	48.92
95	194	1e-40	25.3	0	0.0815	51.01	-29.79	49.04
100	194	1e-40	23.53	0	0.0757	51.01	-30.31	49.10
105	194	1e-40	25.51	0	0.0768	51.01	-29.88	49.48
110	194	1e-40	25.1	0	0.0814	51.01	-30.18	49.84

Las figuras que relacionan los parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo de grado, y la distancia de transmisión, se encuentran a continuación:

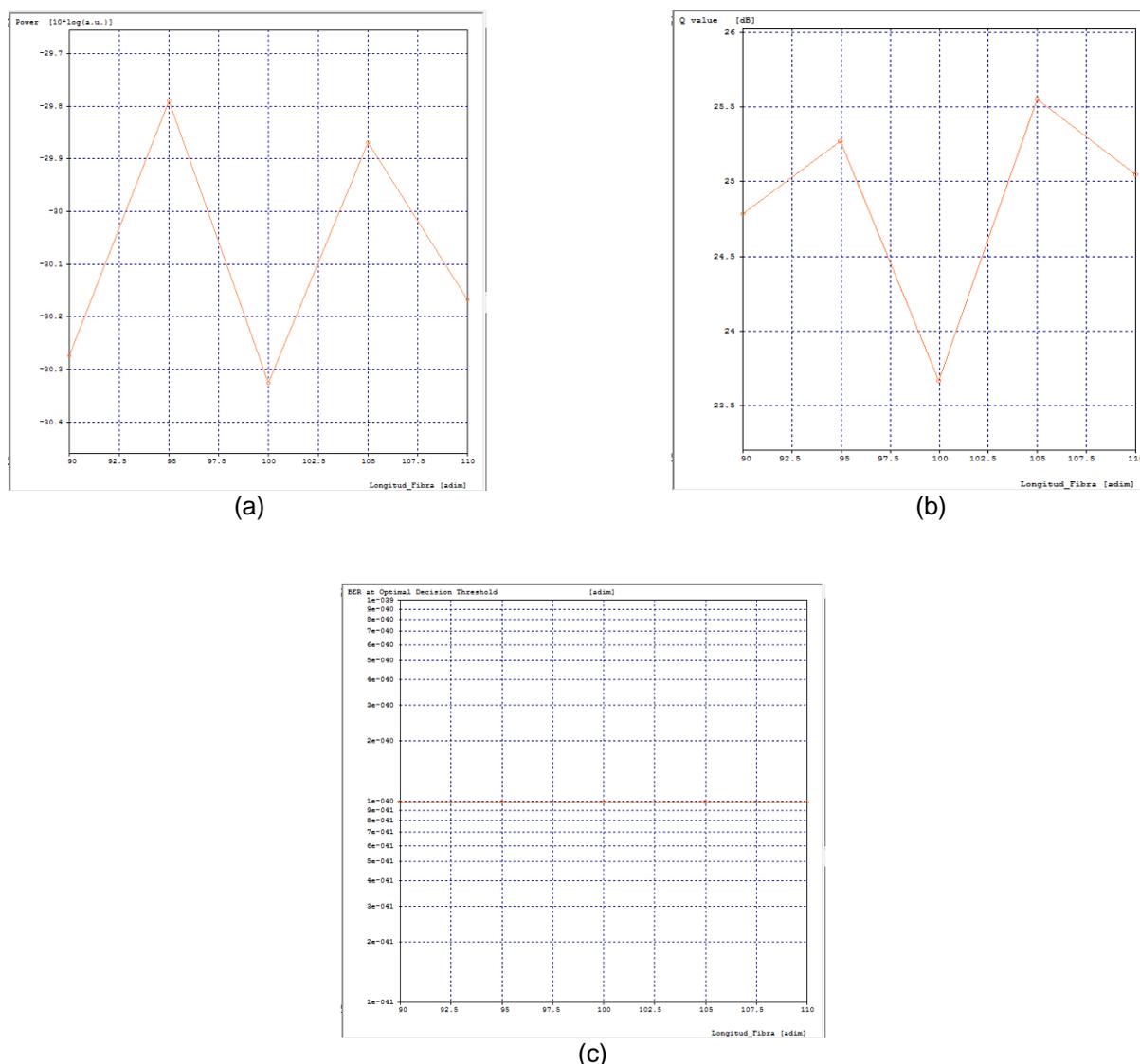


Figura 3.35 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER; vs Distancia de Transmisión, sistema compensado simétricamente al 25%.

A pesar de continuar con dos amplificadores EDFA de línea, la potencia en recepción no incrementa a los 100 Km de enlace, manteniéndose en el umbral de los valores mínimos esperados, como se observa en la tabla 3.5 y en la figura 3.35 (a). De la tabla se obtiene que, dado el tipo de compensación implementado, el desempeño de la BER y el Factor Q han aumentado, causando que el desempeño del enlace sea mejor, en comparación a los sistemas pre y post compensado. Al disminuir el jitter, se confirma que la configuración del enlace está generando que las fibras DCF compensen de manera correcta. Al haber logrado incrementar los valores de OPM, se ratifica que se encuentran dentro del rango establecido, llevando a que el desempeño del enlace sea bueno.

- **Post-compensado mediante módulo Matlab.**

La compensación realizada mediante este método, consiste en la variación de un factor multiplicador (Matlab®) que interactúa con el vector de datos que representa la señal de entrada en términos del retardo y ensanchamiento del pulso introducido por el medio debido a la CD acumulada en el sistema (OptSim®). Dicho factor se relaciona con la posibilidad de retardar la señal (jitter) permitiendo generar un intervalo de decisión, para un retardo mínimo compensando en un 100% la dispersión de la señal de entrada; factor multiplicador de 1; y una compensación nula para un factor multiplicador de 35.

Dicho lo anterior, para el caso actual, de 25% se tiene que:

$$\text{ele_out} = \text{ele_in} + 26.25 * (\text{TotDisp});$$

Figura 3.36 Factor de configuración compensación al 25%

La figura 3.37 corresponde al sistema implementado en la herramienta OptSim®, explicado a continuación.

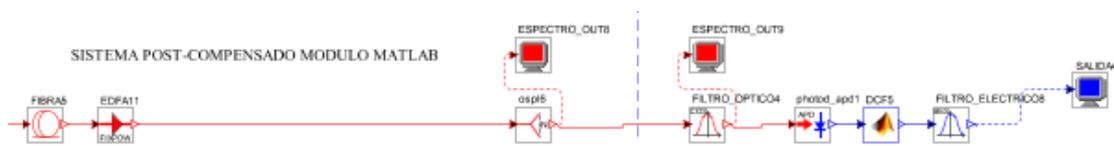


Figura 3.37 Sistema Post-compensado mediante módulo diseñado.

Una vez la señal óptica haya pasado por la fibra de transmisión SSMF y el amplificador EDFA, por cuestiones de manejo, se hace necesario hacer una conversión óptico-eléctrico, mediante un foto-detector. De esta manera, la señal a tratar en el módulo diseñado a Matlab, es una señal eléctrica, donde su tratamiento ha sido explicado en la sección 3.1 denominada “Diseño del algoritmo”.

A continuación, se presentan las gráficas de los resultados obtenidos.

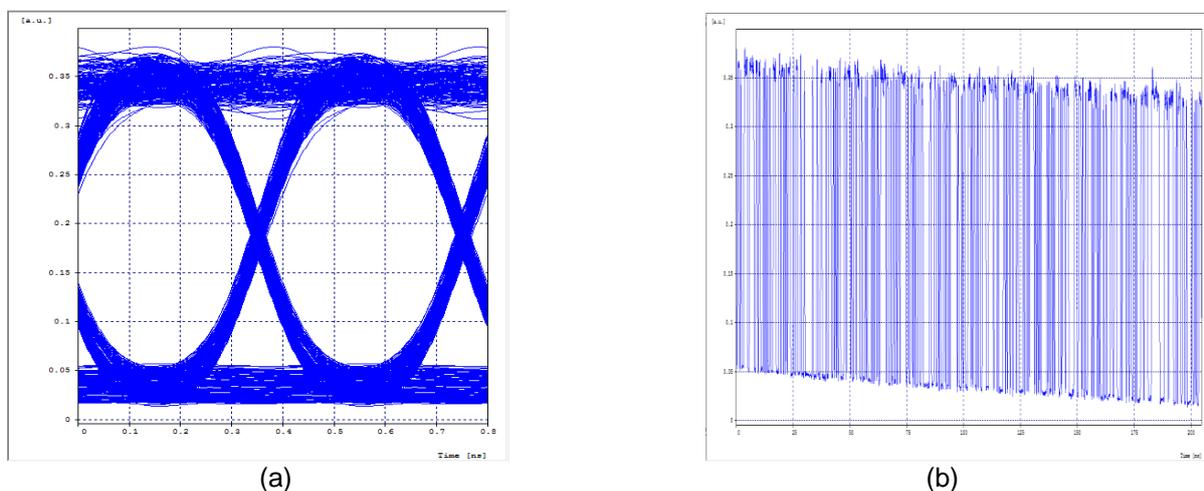


Figura 3.38 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) señal eléctrica transmitida, sistema compensado módulo MATLAB al 25%.

Los valores de OPM que arrojan estas gráficas, se presentan en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Parámetros de Monitoreo Óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema post compensado modulo MATLAB al 25%.

Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	P_{Tx} [dBm]	Jitter [ns]	$OSNR_{IN}$ [dB]	P_{Rx} [dBm]	$OSNR_{OUT}$ [dB]
90	194	1e-40	26.44	0	0.076	51.01	-8.7	51.43
95	194	1e-40	24.72	0	0.068	51.01	-10.7	51.43
100	194	1e-40	22.87	0	0.071	51.01	-12.5	51.23
105	194	4.64e-25	20.42	0	0.075	51.01	-14.5	51.21
110	194	3.94e-18	18.70	0	0.072	51.01	-16.5	51.29

Las figuras que relacionan los parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo de grado, y la distancia de transmisión, se encuentran a continuación:

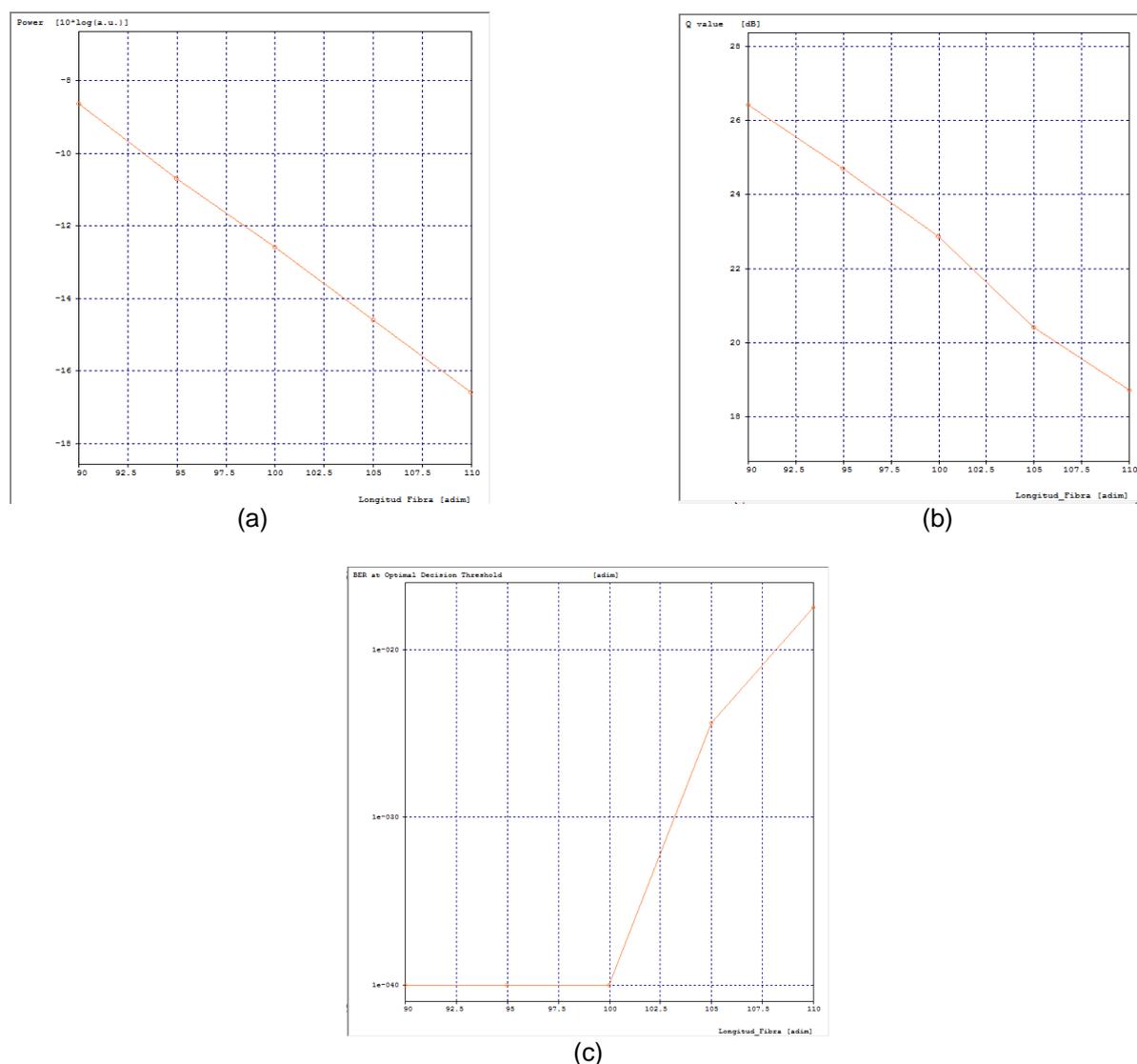


Figura 3.39 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema compensado Modulo MATLAB al 25%.

Como se puede ver en la figura 3.37, ha sido necesario implementar un único amplificador EDFA, esto debido a que el conversor óptico-eléctrico se comporta como un regenerador de señal, haciendo que ésta llegue a niveles realmente aceptables y mayores, en comparación a los anteriores sistemas implementados. Ahora bien, la cantidad de ruido generado por los EDFA es menor, y el nivel de potencia recibida ha aumentado, lo anterior conlleva a que la OSNR incremente considerablemente, como indica la tabla 3.6. Este tipo de compensación, lleva a que el jitter disminuya de manera considerable, por lo que se compensan los corrimientos generados por la CD. La figura 3.39 (c) indica que la BER se mantiene constante hasta el kilómetro 100, sin embargo, a partir de esta distancia, la longitud del enlace empieza a hacer efecto en el desempeño de la BER, por consiguiente, del enlace total. El factor de calidad disminuye directamente la distancia de transmisión aumenta, no obstante, los valores de OPM siguen estando dentro del rango establecido en base a las recomendaciones de la ITU.

Para este porcentaje de compensación, la DCF presenta mejor comportamiento en la configuración de compensación simétrica, debido a que logra disminuir mayormente el efecto del jitter, sin sacrificar el desempeño de los otros parámetros de monitoreo óptico. Sin embargo, el enlace que incluye el módulo diseñado disminuye mucho más el efecto del jitter, y a su vez mejora el nivel de potencia en recepción.

3.2.4 Caso de estudio 2. Sistema compensado al 50%.

Los sistemas presentados en este caso, compensan el 50% de la dispersión total acumulada con el fin de reducir los efectos negativos que la CD introduce en el enlace. Las ecuaciones 3.10 y 3.11, indican la cantidad de dispersión a compensar y la cantidad de DCF necesaria para lograrlo, respectivamente. Debido que la medida corresponde a distancia, entonces se toma 10.625Km. Sin embargo, por practicidad, se decide aproximar los valores que tengan decimales, a su entero superior, es decir que para obtener un 50% de compensación de la CD en un enlace de 100Km, se necesitan 11Km de fibra compensadora DCF.

$$1700 \frac{ps}{nm} * 0.5 = 850 \frac{ps}{nm} \quad \text{Ecuación 3.14}$$

$$\frac{850 \frac{ps}{nm}}{-80 \frac{ps}{nm * Km}} = -10.625 Km \quad \text{Ecuación 3.15}$$

- **Post-compensado.**

La gráfica 3.40, ilustra el comportamiento teórico de la CD vs distancia de transmisión, contando con compensación mediante DCF, con longitud de 11Km, como se halló en el anterior cálculo. Este tipo de compensación, sufre cambios significativos a los 100Km de longitud de la fibra, pues hay un cambio en la pendiente que caracteriza la CD, debido al cambio en el tipo de fibra; SSMF a DCF. Hasta los 100Km se han acumulado 1700 ps/nm*Km de CD, al pasar por la fibra compensadora, el valor de dispersión acumulada disminuye significativamente. Cabe aclarar que, dado que la explicación competente a los tipos de compensación

se ha realizado en la parte teórica (Capítulo 1) y en el análisis correspondiente a 25%, no se repetirá este procedimiento. Sin embargo, se debe tener en cuenta que, debido al cambio de compensación, varía únicamente la longitud de la fibra DCF.

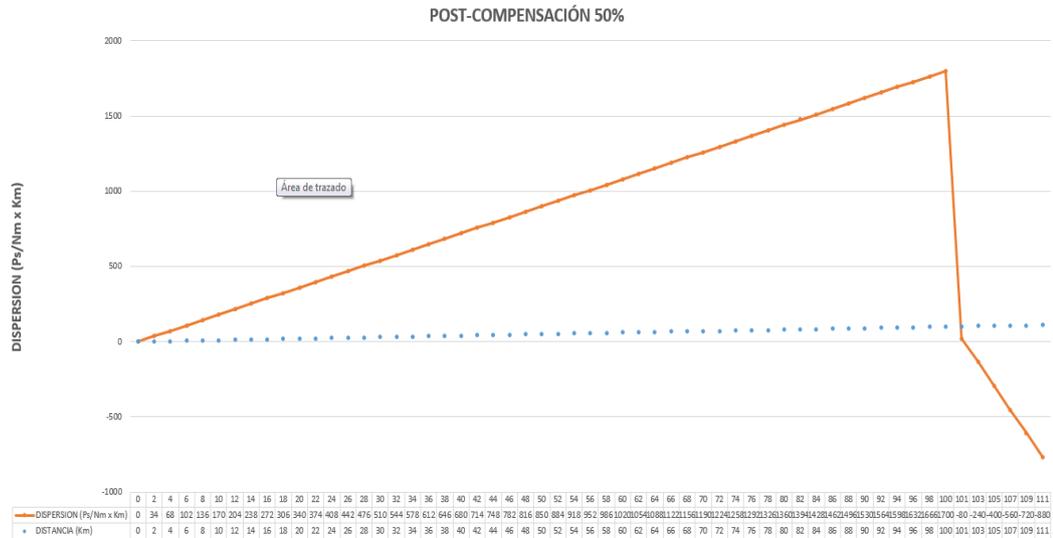


Figura 3.40 Dispersión Acumulada para post-compensación al 50%.

Se aclara que los enlaces implementados para los casos de 50, 75 y 100%, son los mismos para el caso de 25%, las variaciones se ven en la longitud de la fibra DCF y el factor multiplicador en el módulo de Matlab. A continuación, se presentan las gráficas de los resultados obtenidos para este caso.

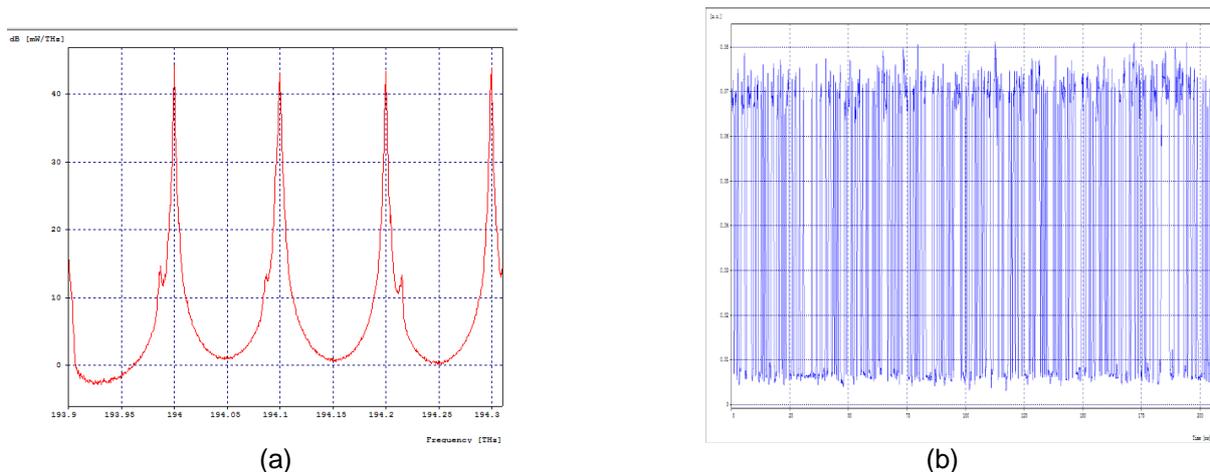


Figura 3.41 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema post compensado al 50%.

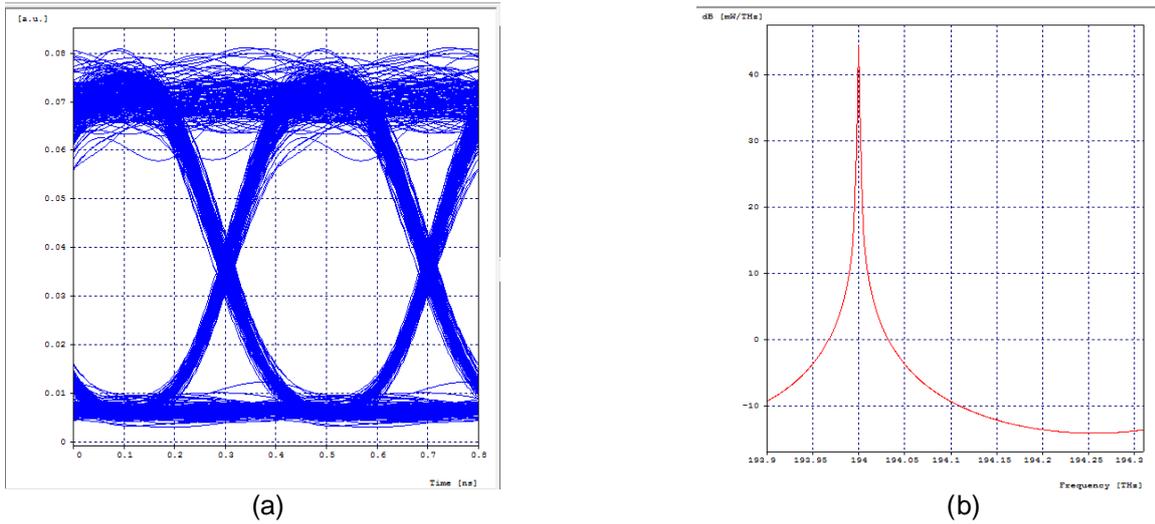


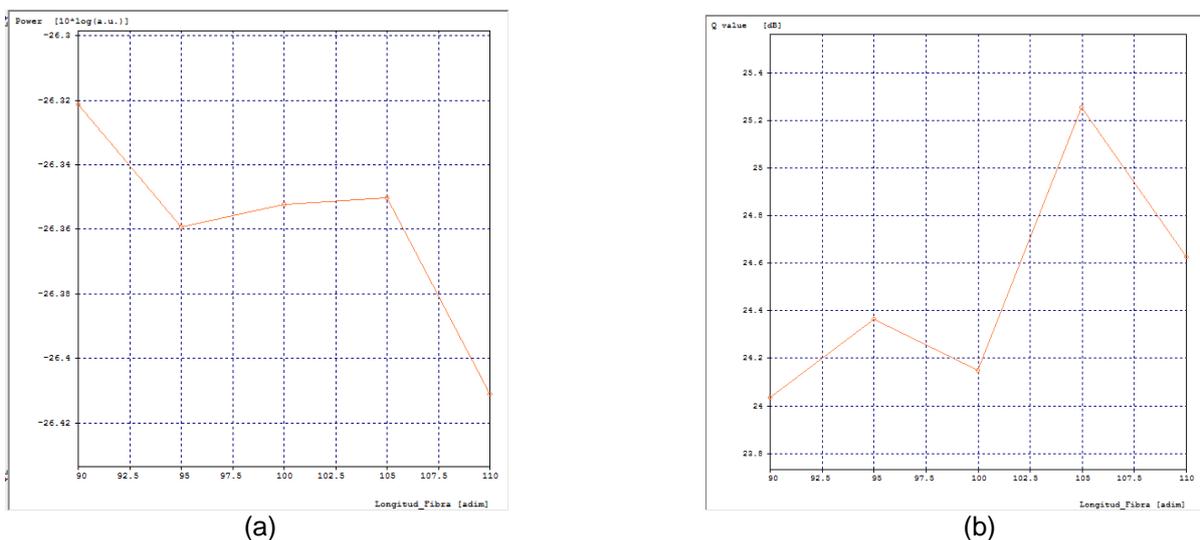
Figura 3.42 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema post compensado al 50%.

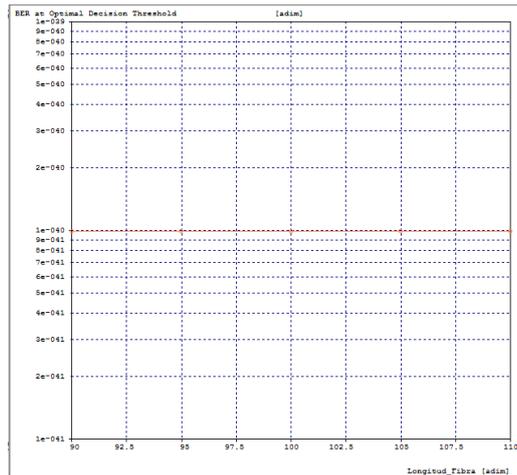
Los valores de OPM que arrojan estas gráficas, se presentan en la tabla 3.7

Tabla 3.7 Parámetros de Monitoreo Óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema post compensado al 50%.

Distancia [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P_{Tx} [dBm]	Jitter [ns]	$OSNR_{IN}$ [dB]	P_{Rx} [dBm]	$OSNR_{OUT}$ [dB]
90	194	1e-40	24.05	0	0.0820	51.01	-26.32	47.53
95	194	1e-40	24.38	0	0.0828	51.01	-26.36	47.55
100	194	1e-40	24.19	0	0.0850	51.01	-26.35	47.43
105	194	1e-40	25.26	0	0.0839	51.01	-26.35	47.48
110	194	1e-40	24.62	0	0.0790	51.01	-26.41	47.67

Las figuras que relacionan los parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo de grado, y la distancia de transmisión, se encuentran a continuación:





(c)

Figura 3.43 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema post compensado al 50%.

Al implementar este caso, se evidencia como el incremento en el porcentaje de compensación, influye notoriamente en el desempeño del enlace, haciendo que el factor de calidad incremente debido a que se reduce la superposición de pulsos (jitter). Al disminuir este valor, se confirma que las DCFs están compensando de la manera correcta, y como se esperaba debido al aumento en su longitud. A pesar de que la figura 3.43 (a) muestra una disminución de potencia a partir de los 105Km, este no se considera, dado que; como se ha aclarado desde un principio, el alcance de la red diseñada es de 100Km.

- **Pre-compensado.**

La gráfica 3.44, muestra el comportamiento teórico de la CD vs distancia de transmisión, realizando compensación mediante DCF, con la longitud indicada anteriormente.

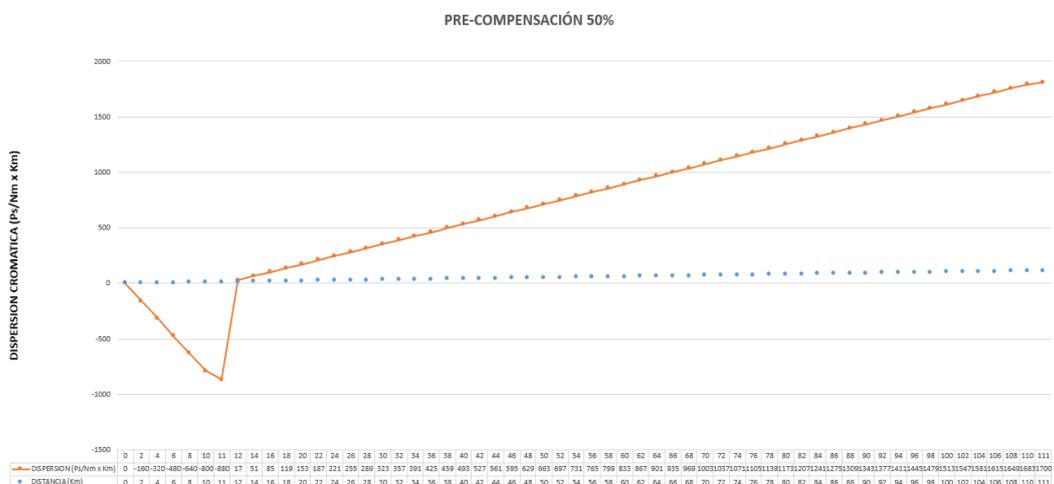


Figura 3.44 Dispersión Acumulada para pre-compensación al 50%.

A continuación, se presentan las gráficas de los resultados obtenidos para este caso.

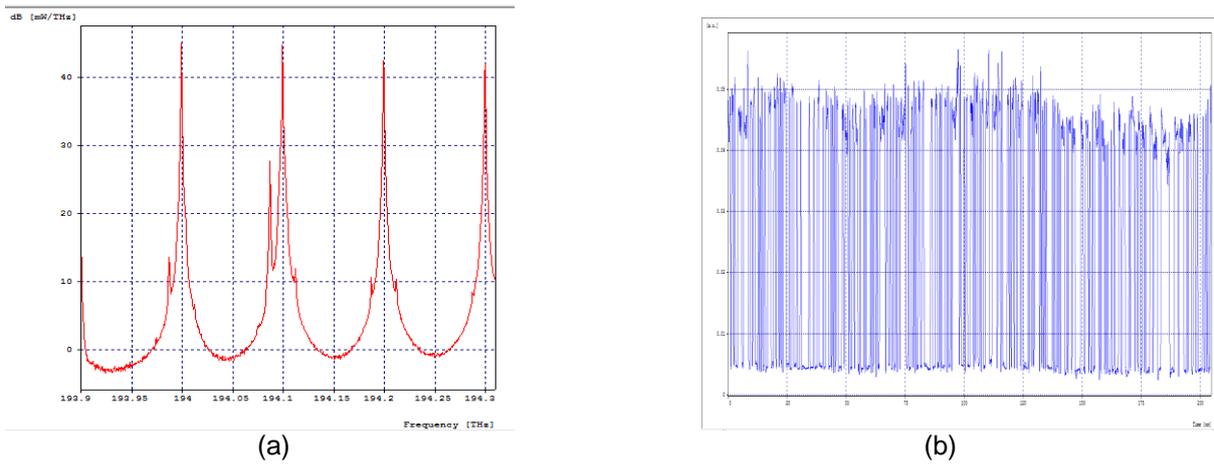


Figura 3.45 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema pre compensado al 50%.

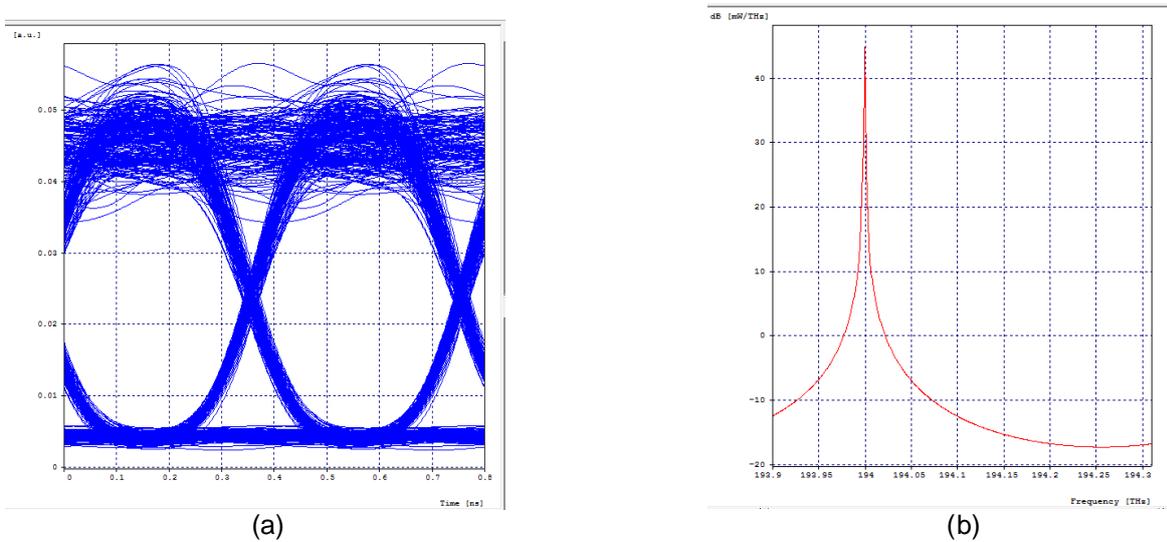


Figura 3.46 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema pre compensado al 50%.

Los valores de OPM que arrojan estas gráficas, se presentan en la tabla 3.8

Tabla 3.8 Parámetros de Monitoreo Óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema pre compensado al 50%.

Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	P_{Tx} [dBm]	Jitter [ns]	$OSNR_{IN}$ [dB]	P_{Rx} [dBm]	$OSNR_{OUT}$ [dB]
90	194	1e-40	23.9	0	0.0831	51.01	-30.16	49.09
95	194	1e-40	26	0	0.0779	51.01	-30.15	48.82
100	194	1.844e-29	21	0	0.0825	51.01	-30.05	48.71
105	194	1e-40	24.5	0	0.0770	51.01	-30.23	48.65
110	194	1e-40	25.3	0	0.0811	51.01	-30.06	48.74

Las figuras que relacionan los parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo de grado, y la distancia de transmisión, se encuentran a continuación:

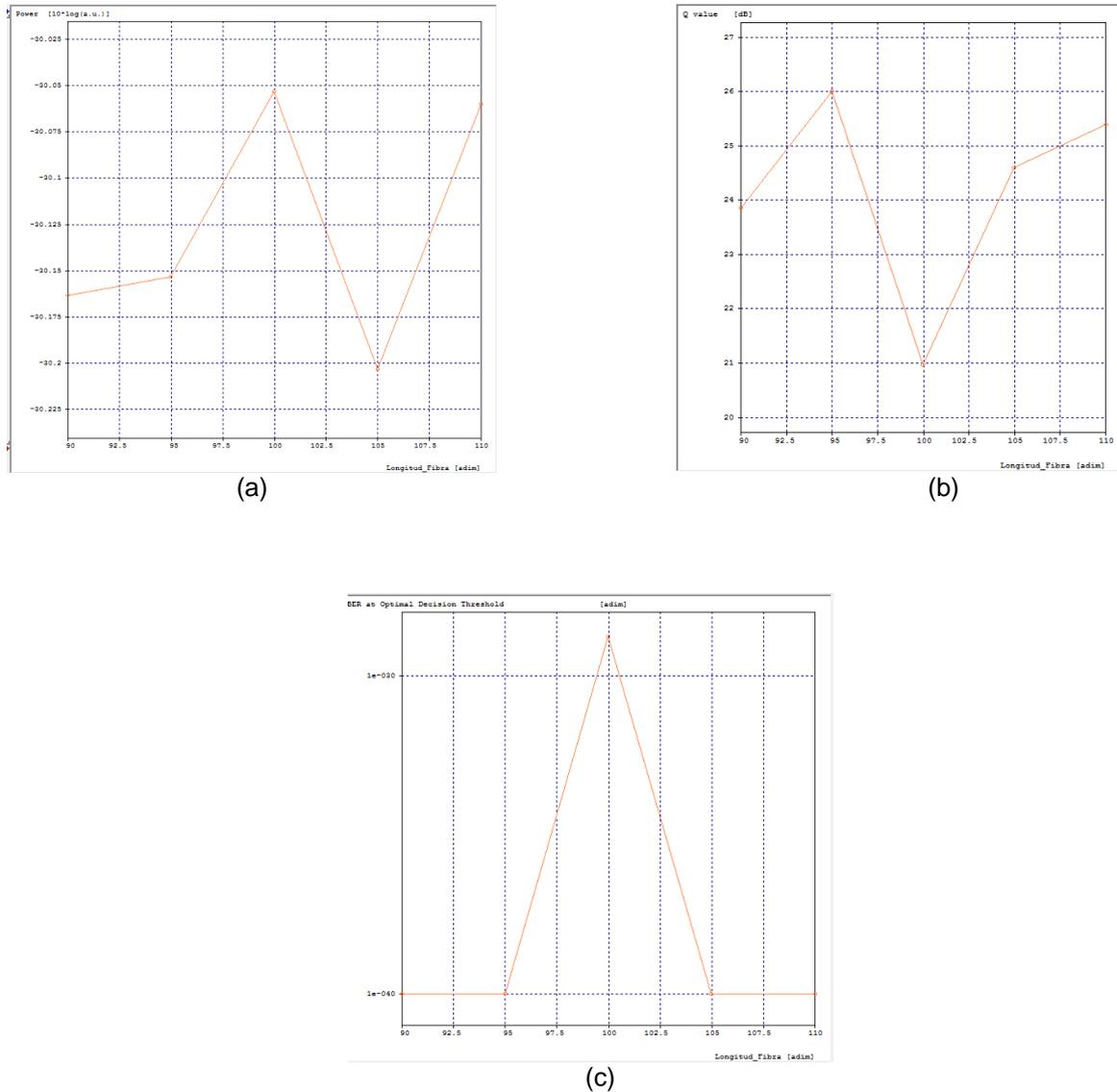


Figura 3.47 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema pre compensado al 50%.

Las fluctuaciones que indica la gráfica 3.47, se deben en gran medida a la cantidad de amplificadores que deben ser utilizados en esta configuración, y los cuales, como se ha mencionado anteriormente, introducen diversos efectos. A pesar de que esta configuración reduce el jitter, el desempeño del enlace se ve afectado debido a que ha disminuido considerablemente la calidad de los parámetros de monitoreo, sin embargo estos valores son aceptables por las recomendaciones de la ITU.

- **Compensado simétricamente.**

La gráfica 3.48, enseña el comportamiento teórico de la dispersión acumulada en el enlace, donde las longitudes de las fibras DCF y SSMF han sido especificadas anteriormente.

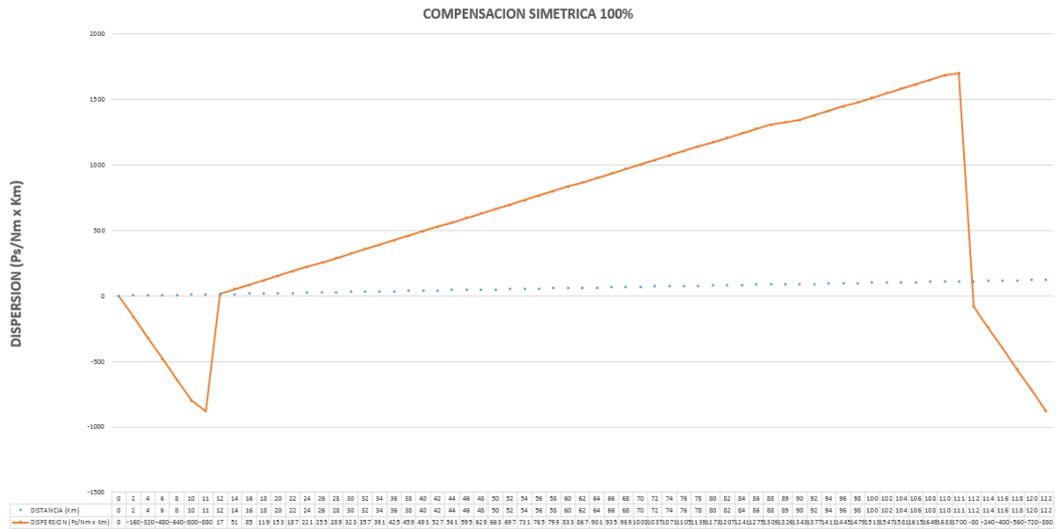


Figura 3.48 Dispersión Acumulada para post-compensación al 50%.

A continuación, se presentan las gráficas de los resultados obtenidos para este caso.

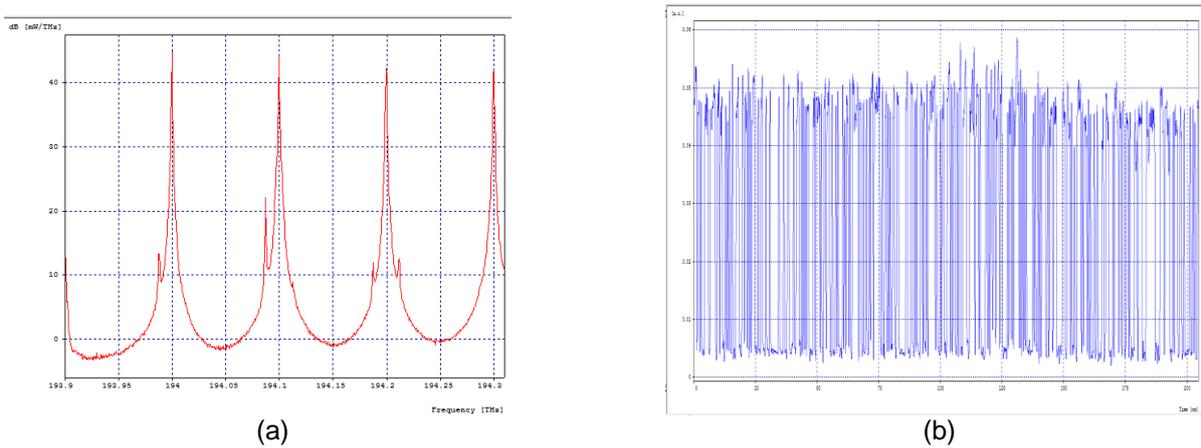


Figura 3.49 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema compensado simétricamente al 50%.

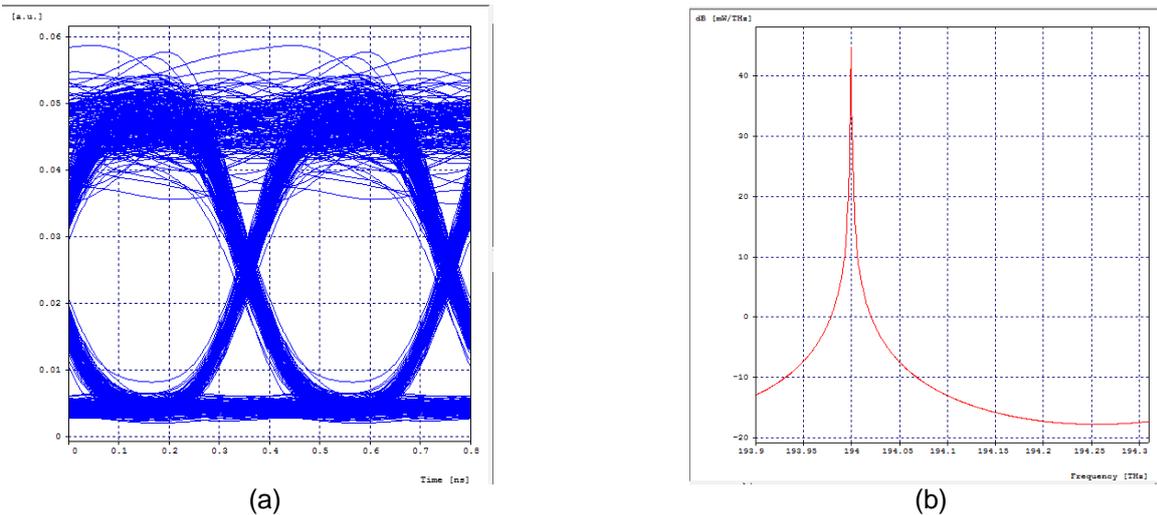


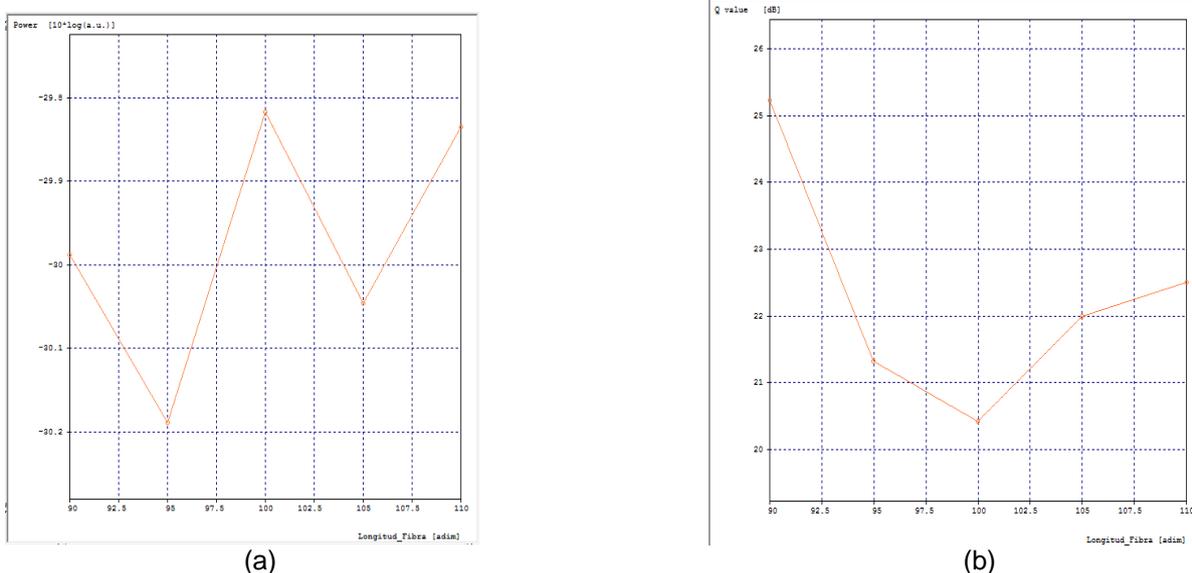
Figura 3.50 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema compensado simétricamente al 50%.

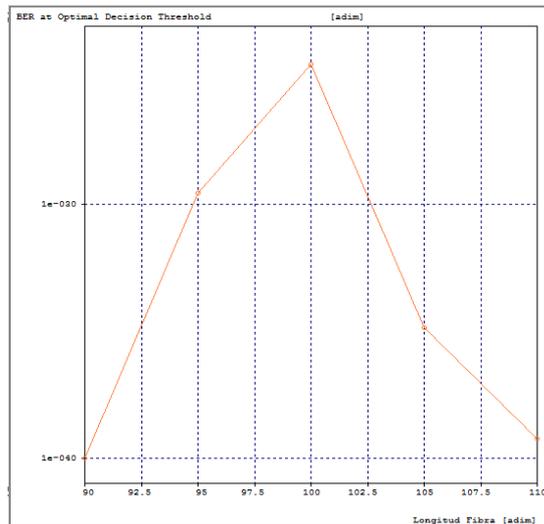
Los valores de OPM que arrojan estas gráficas, se presentan en la tabla 3.7.

Tabla 3.9 Parámetros de Monitoreo Óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema compensado simétricamnete al 50%.

Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	P _{Tx} [dBm]	Jitter [ns]	OSNR _{IN} [dB]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
90	194	1e-40	25.2	0	0.0770	51.01	-29.98	48.81
95	194	2.74e-30	22.7	0	0.0826	51.01	-30.18	48.71
100	194	3.07e-25	20.4	0	0.0775	51.01	-29.82	48.55
105	194	6.20e-36	22	0	0.0868	51.01	-30.05	48.28
110	194	9.58e-40	22.5	0	0.0794	51.01	-29.85	48.37

Las figuras que relacionan los parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo de grado, y la distancia de transmisión, se encuentran a continuación:





(c)

Figura 3.51 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema compensado simétricamente al 50%.

Dada la cantidad de amplificadores utilizados, se tienen mejores niveles de potencia en recepción, en comparación a los anteriores casos de compensación, pero esto también conlleva a que, como se dio en el anterior caso, la cantidad de amplificadores lleve a la degradación del desempeño del sistema. A pesar de esto, se obtienen mejores resultados de jitter, llevando a que la superposición de pulsos disminuya. (Ver tabla 3.9).

- **Post-compensado mediante módulo Matlab.**

La compensación mediante el módulo, como se ha mencionado, involucra un factor de configuración el cual hace posible que se hagan variaciones en el porcentaje de compensación. El cálculo realizado para obtener una compensación al 50%, es el siguiente:

$$\text{ele_out} = \text{ele_in} + 17.5 * (\text{TotDisp});$$

Figura 3.52 Factor de configuración para compensación al 50%.

A continuación, se presentan las gráficas de los resultados obtenidos.

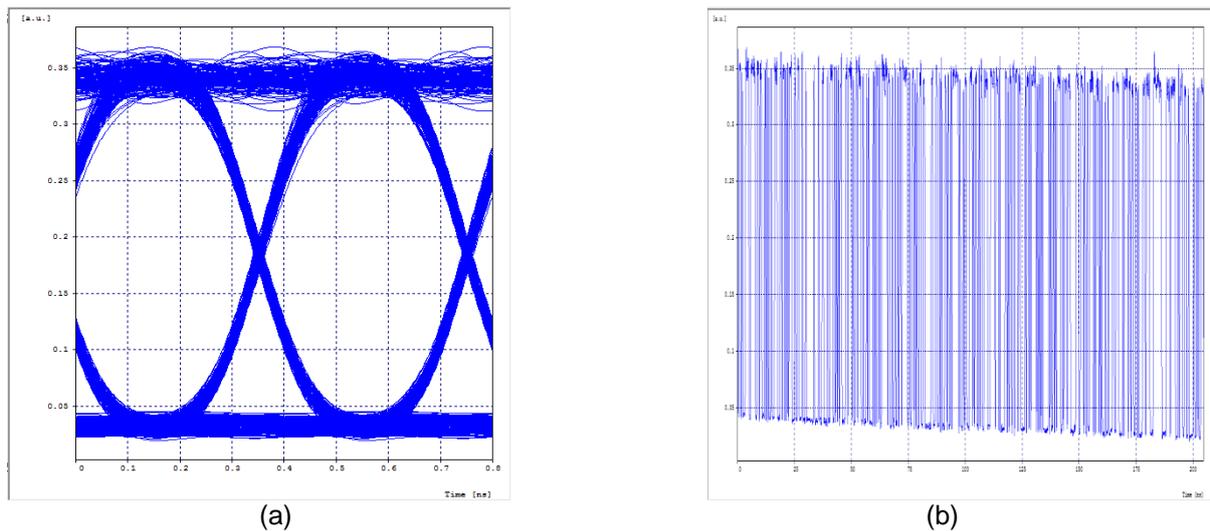


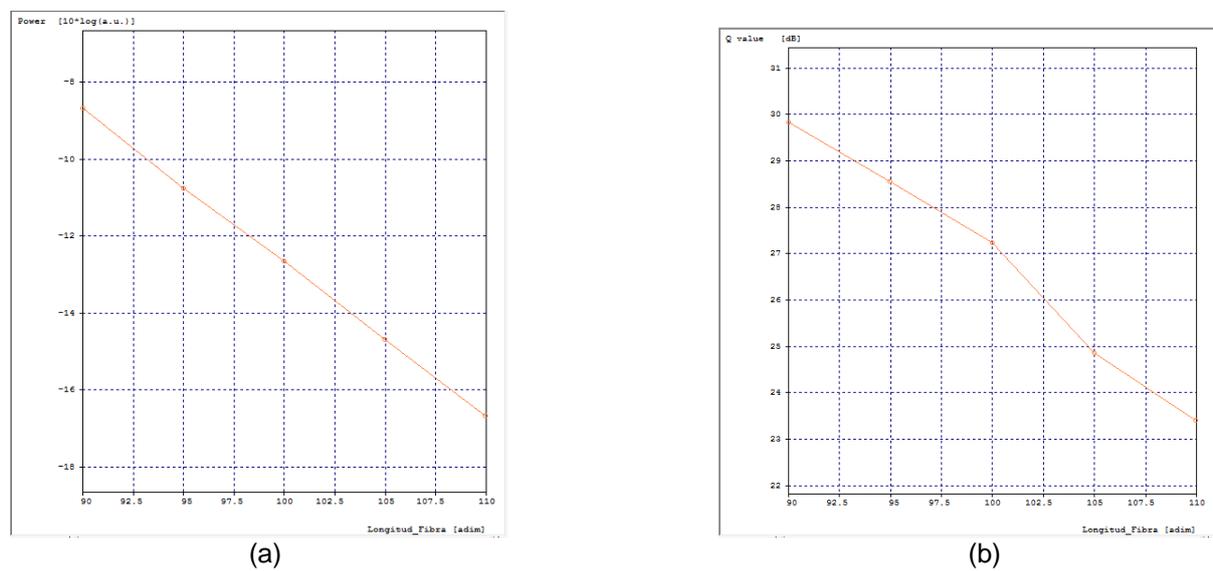
Figura 3.53 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) señal eléctrica transmitida, sistema compensado módulo MATLAB al 50%.

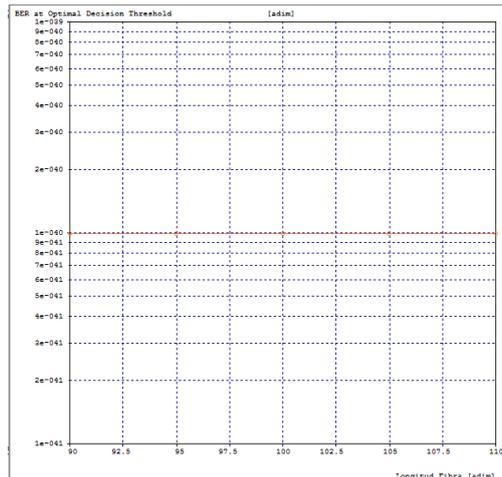
Los valores de OPM que arrojan estas gráficas, se presentan en la tabla 3.10.

Tabla 3.10 Parámetros de Monitoreo Óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema post compensado módulo MATLAB al 50%.

Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	P _{Tx} [dBm]	Jitter [ns]	OSNR _{IN} [dB]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
90	194	1e-40	29.83	0	0.076	51.01	-8.66	51.43
95	194	1e-40	28.55	0	0.067	51.01	-10.75	51.43
100	194	1e-40	27.24	0	0.0707	51.01	-12.66	51.23
105	194	1e-40	24.86	0	0.074	51.01	-14.72	51.21
110	194	1e-40	23.42	0	0.073	51.01	-16.60	51.29

Las figuras que relacionan los parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo de grado, y la distancia de transmisión, se encuentran a continuación:





(c)

Figura 3.54 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema compensado módulo MATLAB al 50%.

De los valores que arroja la tabla 3.10, y de la imagen 3.54 (a), se puede ver como los valores de potencia resultan ser muy buenos en recepción, esto debido al comportamiento de “amplificador” que tiene el conversor óptico-eléctrico. Dado lo anterior es posible implementar un unico amplificador EDFA, y como lo muestran las imágenes de la figura 3.54, en comparacion a los otros casos de compensación, se generan pocas fluctuaciones en los parametros de monitoreo, haciendo que tengan un comportamiento lineal, sin cambios de pendiente, lo que genera que el desempeño del enlace sea bueno, como lo muestran los valores plasmados en la tabla 3.10. Este tipo de compensación, lleva a que el jitter disminuya de manera considerable, por lo que se compensan los corrimientos generados por la CD. La potencia en recepción y el factor Q, presentan un comportamiento inversamente proporcional a la distancia, como es de esperarse. El comportamiento del enlace que contiene el módulo permite tener niveles más bajos de jitter, y continúa con muy buen nivel de potencia en recepción, sin que otros valores de OPM se vean afectados.

Todos los modos de compensación para este porcentaje, sacrifican parámetros de monitoreo por la intención de compensar alguno en específico. Debido a que el foco principal del presente trabajo de grado resulta ser la compensación de la CD, se decide tener en cuenta el modo que mejor compense el efecto del jitter, el cual genera la CD, de esta forma, el desempeño de la compensación simétrica es el más óptimo.

3.2.5 Caso de estudio 3. Sistema compensado al 75%.

Los sistemas presentados en este caso, compensan el 75% de la dispersión total acumulada en el enlace, para lograr reducir los efectos negativos que la CD introduce.

Las ecuaciones 3.16 y 3.17, indican la cantidad de dispersión a compensar y la cantidad de DCF necesaria para lograrlo, respectivamente.

$$1700 \frac{ps}{nm} * 0.75 = 1275 \frac{ps}{nm}$$

Ecuación 3.16

$$\frac{1275 \frac{ps}{nm}}{-80 \frac{ps}{nm \cdot Km}} = -15.937$$

Ecuación 3.17

Por practicidad, se decide aproximar los valores que tengan decimales, a su entero superior, es decir que para obtener un 75% de compensación de la CD en un enlace de 100Km de fibra SSM-28, son necesarios 16Km de fibra compensadora DCF.

- **Post-compensado.**

La gráfica 3.55, ilustra el comportamiento teórico de la CD vs distancia de transmisión, contando con compensación mediante DCF, con longitud de 16Km, como se halló en el anterior cálculo.

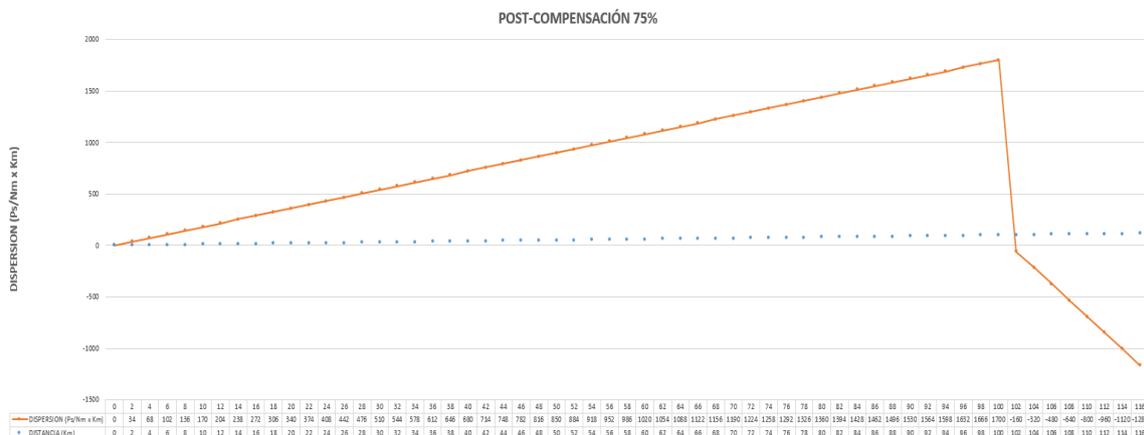


Figura 3.55 Dispersión Acumulada para post-compensación al 75%.

A continuación, se presentan las gráficas de los resultados obtenidos.

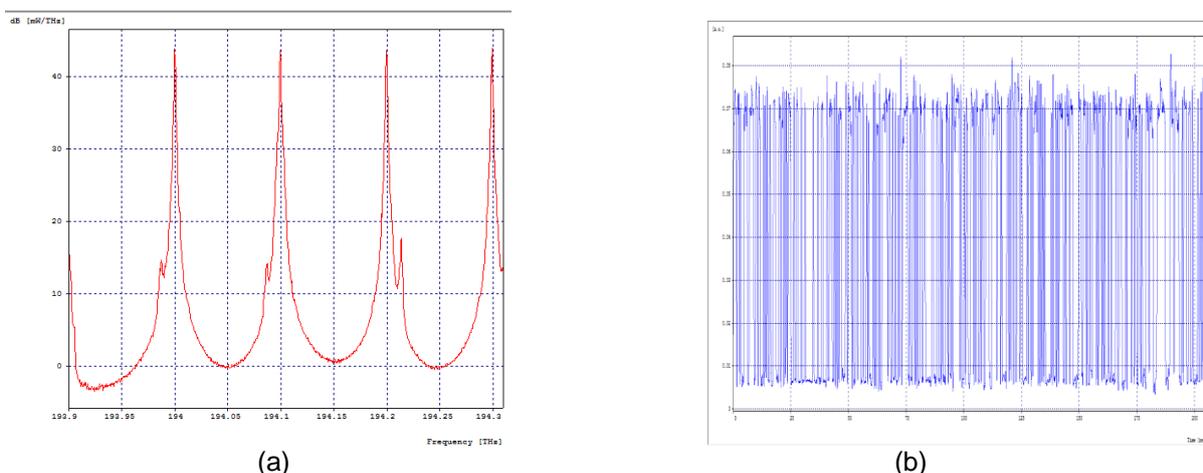
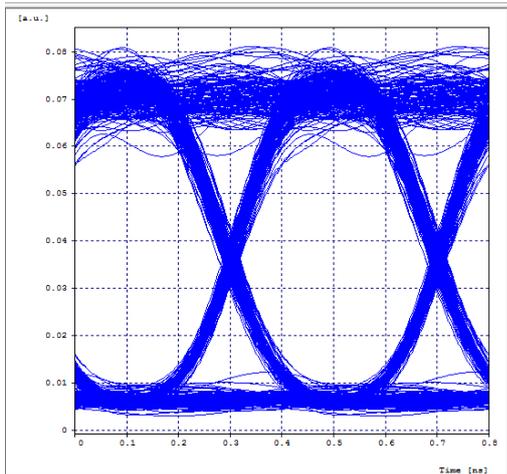
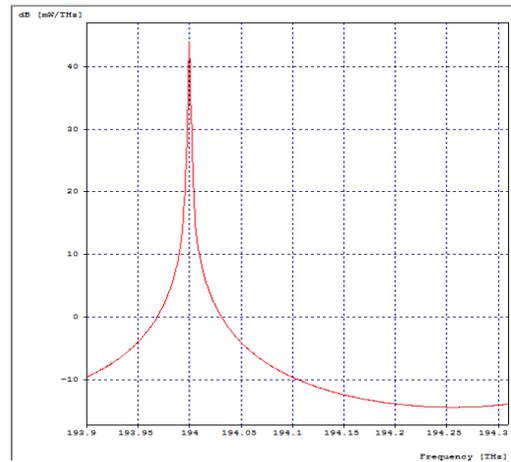


Figura 3.56 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema post compensado al 75%.



(a)



(b)

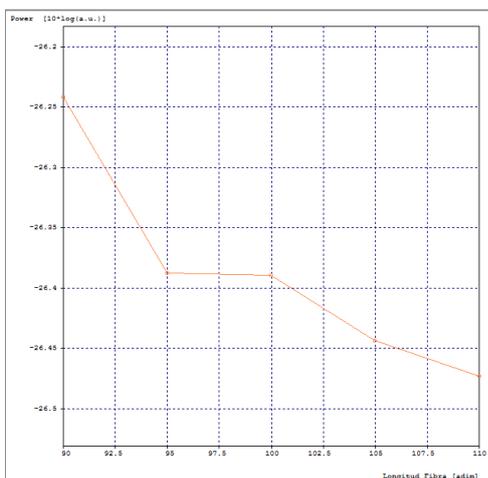
Figura 3.57 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema post compensado al 75%.

Los valores de OPM que arrojan estas gráficas, se presentan en la tabla 3.11.

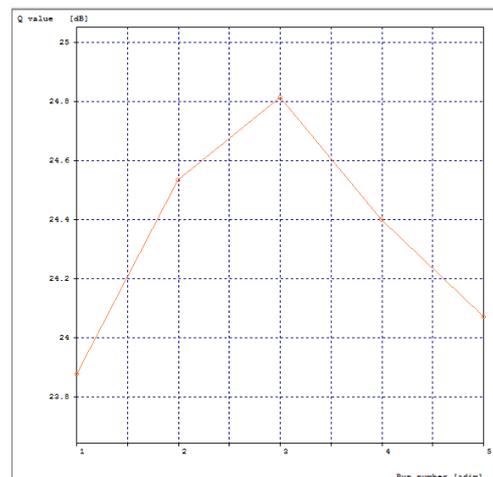
Tabla 3.11 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema post compensado al 75%.

Distancia [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P_{Tx} [dBm]	Jitter [ns]	$OSNR_{IN}$ [dB]	P_{Rx} [dBm]	$OSNR_{OUT}$ [dB]
90	194	1e-40	23.76	0	0.0766	51.01	-26.29	47.41
95	194	1e-40	24.2	0	0.0833	51.01	-26.37	47.54
100	194	1e-40	24.25	0	0.0761	51.01	-26.44	47.69
105	194	1e-40	25.30	0	0.0744	51.01	-26.46	47.81
110	194	1e-40	24.8	0	0.0750	51.01	-26.52	47.65

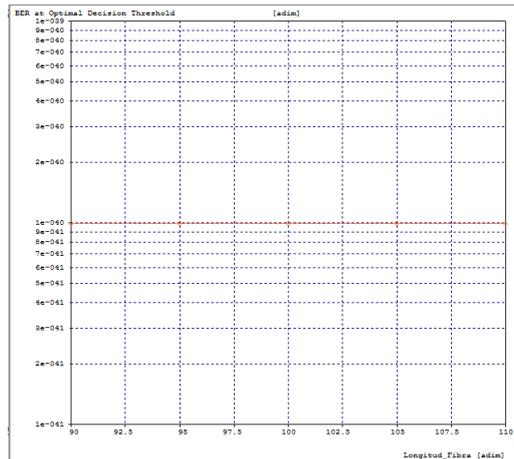
Las figuras que relacionan los parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo de grado, y la distancia de transmisión, se encuentran a continuación:



(a)



(b)



(c)

Figura 3.58 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema post compensado al 75%.

De la tabla 3.11, la cual arroja los valores obtenidos, se puede concluir como, al incrementar el porcentaje de compensación, se tienen valores de OPM mucho mejores, capaces de garantizar un muy buen funcionamiento del sistema. Esta configuración hace que, debido a la cantidad de DCF, se logre disminuir considerablemente el jitter, sin necesidad de que otros parámetros se vean sacrificados.

- **Pre-compensado.**

El cambio de pendiente que se observa en la figura 3.59, indica el cambio en el tipo de fibra utilizado, contando con las longitudes correspondientes a este caso. De igual manera, esta figura describe el comportamiento teórico para este tipo de compensación.

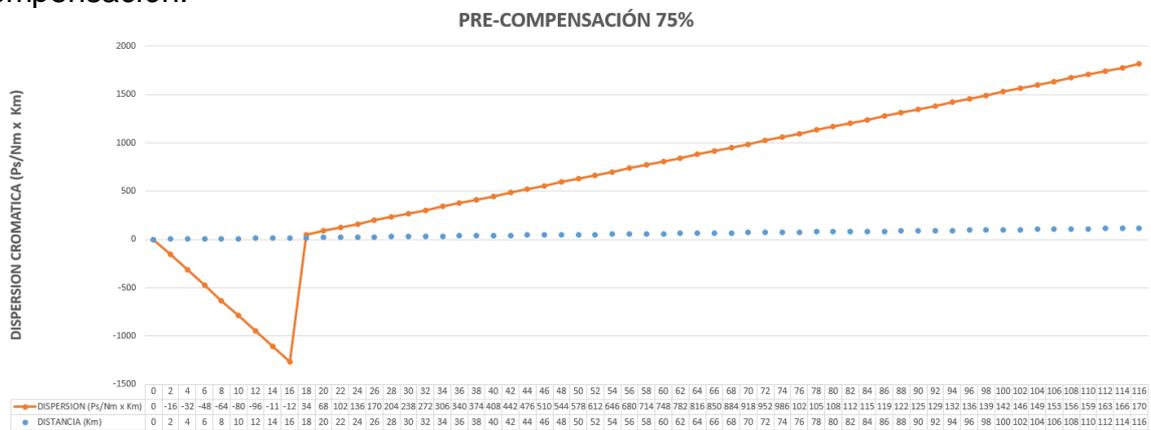


Figura 3.59 Dispersión Acumulada para pre-compensación al 75%.

A continuación, se presentan las gráficas de los resultados obtenidos.

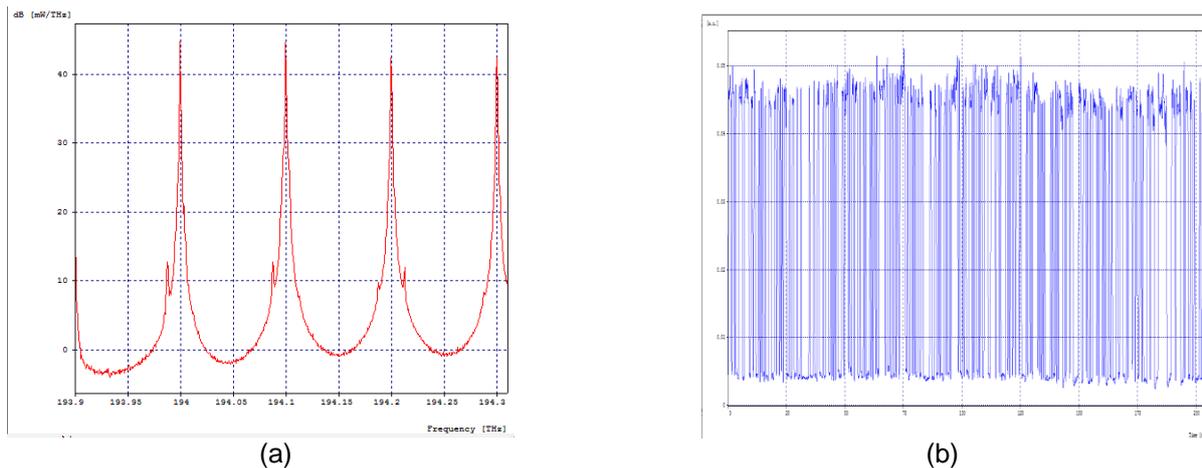


Figura 3.60 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema pre compensado al 75%.

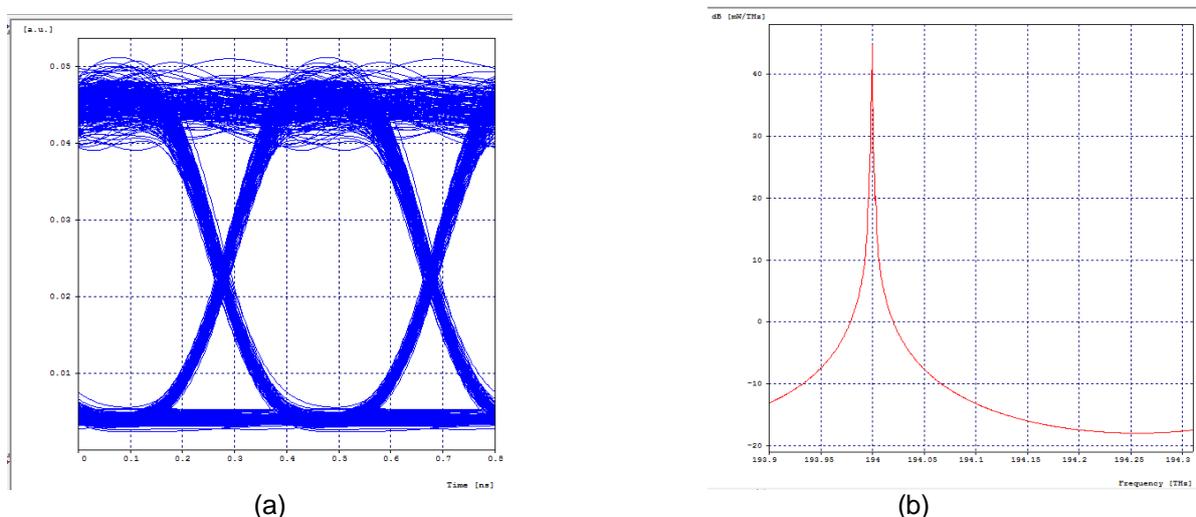


Figura 3.61 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema pre compensado al 75%.

Los valores de OPM que arrojan estas gráficas, se presentan en la tabla 3.12

Tabla 3.12 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema pre compensado al 75%.

Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	P_{Tx} [dBm]	Jitter [ns]	$OSNR_{IN}$ [dB]	P_{Rx} [dBm]	$OSNR_{OUT}$ [dB]
90	194	1e-40	26.15	0	0.0727	51.01	-30.21	49.28
95	194	1e-40	26.7	0	0.0780	51.01	-30.07	49.17
100	194	1e-40	25	0	0.0749	51.01	-30.26	49.32
105	194	1e-40	26.6	0	0.0713	51.01	-30.03	49.62
110	194	1e-40	25.6	0	0.0745	51.01	-30.18	49.61

Las figuras que relacionan los parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo de grado, y la distancia de transmisión, se encuentran a continuación:

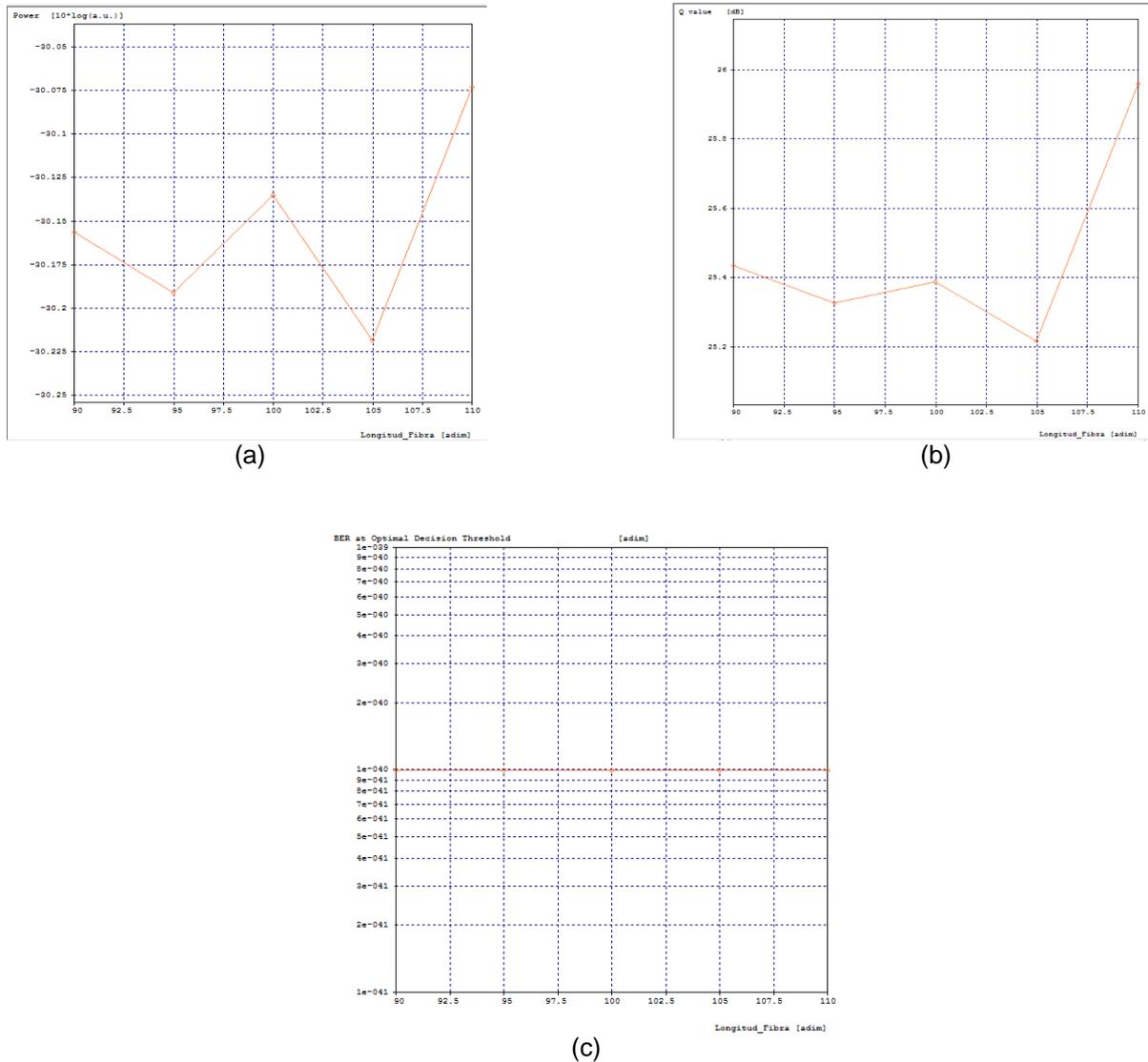


Figura 3.62 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema pre compensado al 75%.

Con el fin de mantener la potencia en los niveles aceptables, se hace necesario aumentar la cantidad de amplificadores, sin embargo, de casos anteriores, se sabe que esto implica que se involucren efectos que generan los comportamientos plasmados en las figuras 3.62 (a) y (b). A pesar de ello, la tabla 3.12 indica que se ha logrado compensar el corrimiento de pulsos que general la CD y de esta forma conservar la BER constante.

- **Compensado simétricamente.**

El comportamiento teórico de la CD para este sistema, se presenta a continuación. (ver figura 3.63).

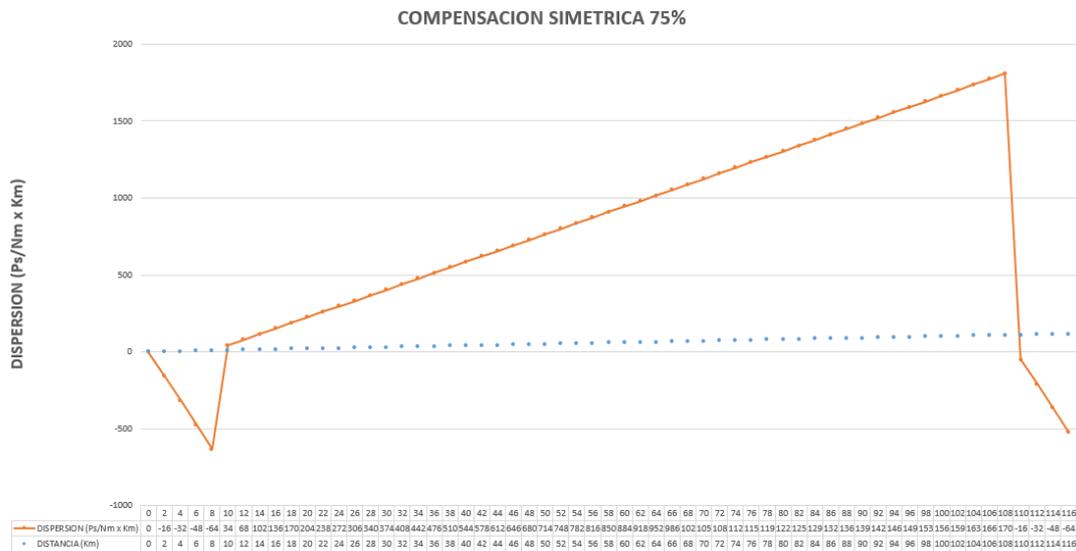


Figura 3.63 Dispersión Acumulada para compensación simétrica al 75%.

A continuación, se presentan las gráficas de los resultados obtenidos.

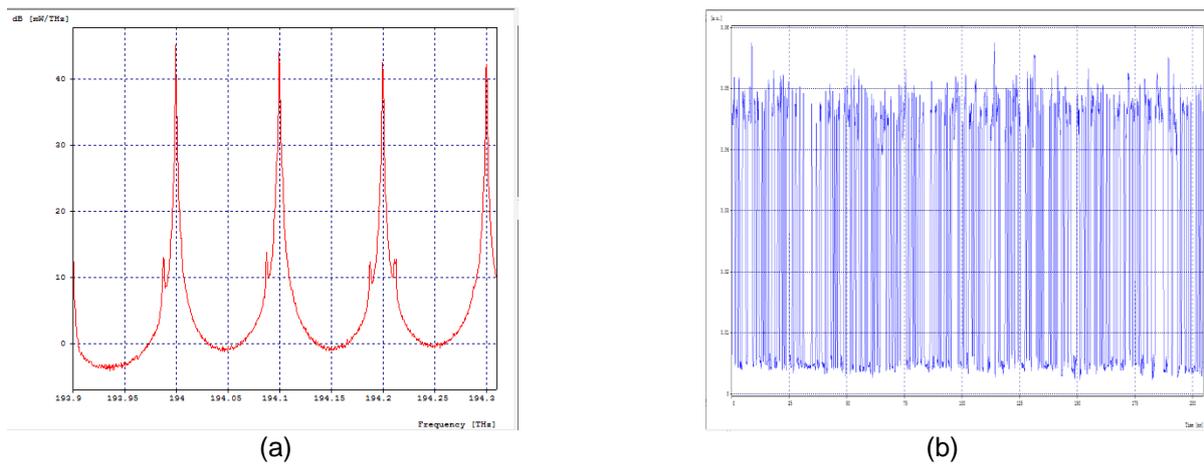


Figura 3.64 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema compensado simétricamente al 75%.

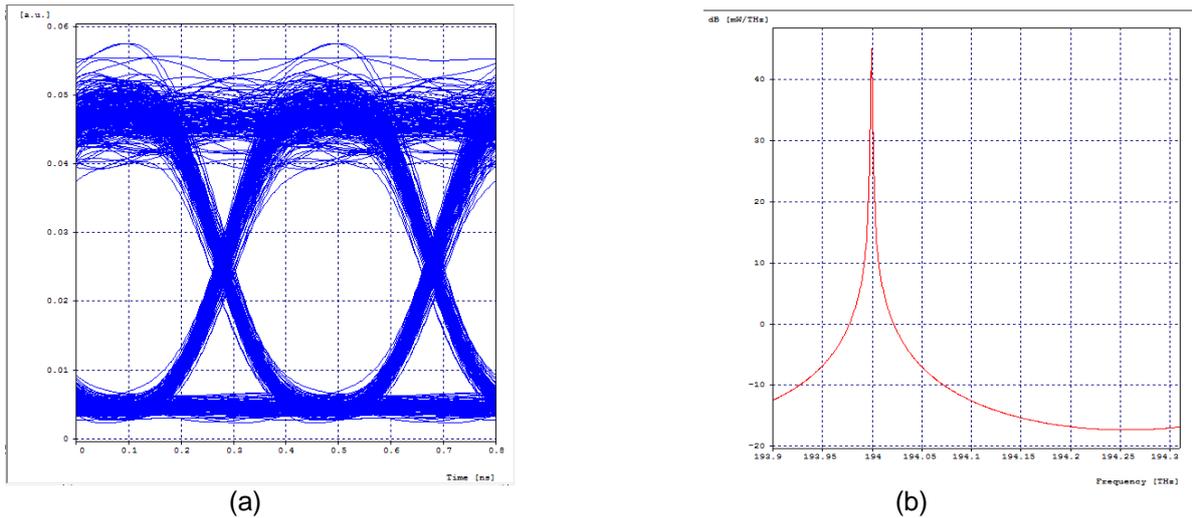


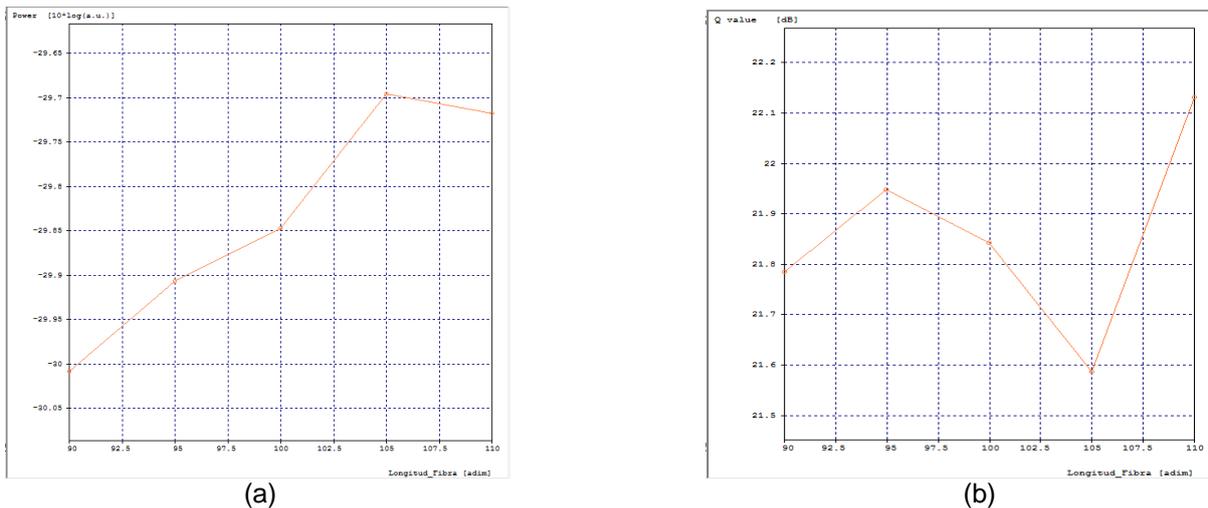
Figura 3.65 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema compensado simétricamente al 75%.

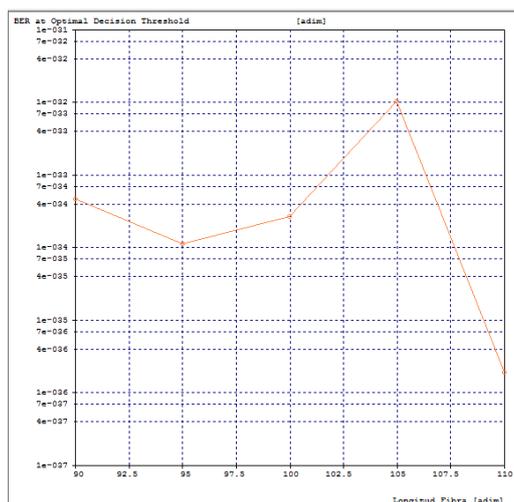
Los valores de OPM que arrojan estas gráficas, se presentan en la tabla 3.13

Tabla 3.13 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema compensado simétricamente al 75%.

Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	P _{Tx} [dBm]	Jitter [ns]	OSNR _{IN} [dB]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
90	194	4.85e-34	22.95	0	0.0816	51.01	-29.76	48.86
95	194	1.13e-34	21.49	0	0.0878	51.01	-29.91	49.09
100	194	2.94e-34	21.6	0	0.0783	51.01	-29.69	48.94
105	194	9.65e-33	20.35	0	0.0783	51.01	-29.86	48.77
110	194	1.58e-36	21.2	0	0.0801	51.01	-29.7	48.68

Las figuras que relacionan los parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo de grado, y la distancia de transmisión, se encuentran a continuación:





(c)

Figura 3.66 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema compensado simétricamente al 75%.

La gran cantidad de amplificadores utilizados, conlleva de alguna manera a que la calidad del enlace disminuya, como lo muestran los valores plasmados en la tabla 3.13, y permite ratificar los análisis anteriormente planteados. A pesar de que se mitigan los efectos del jitter, se ven afectados los diversos parámetros de monitoreo, hasta el punto de ver grandes variaciones en el comportamiento de la BER.

- **Post-compensado mediante módulo Matlab.**

Para obtener una compensación del 75% de la CD acumulada, mediante el módulo diseñado, se hace necesario multiplicar por 8.75 el vector generado en Matlab. A continuación, se presentan las gráficas de los resultados obtenidos.

```
ele_out=ele_in +8.75*(TotDisp);
```

Figura 3.67 Factor de configuración para compensar al 75%.

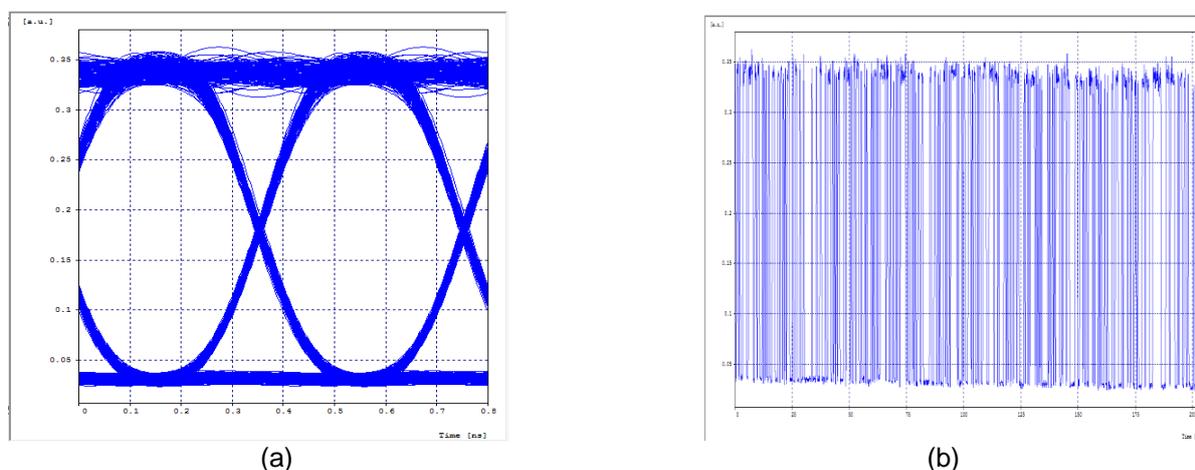


Figura 3.68 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) señal eléctrica transmitida, sistema compensado módulo MATLAB al 75%.

Los valores de OPM que arrojan estas gráficas, se presentan en la tabla 3.14

Tabla 3.14 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema compensado módulo MATLAB al 75%.

Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	P _{Tx} [dBm]	Jitter [ns]	OSNR _{IN} [dB]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
90	194	1e-40	32.11	0	0.0738	51.01	-8.68	51.43
95	194	1e-40	30.19	0	0.0695	51.01	-10.71	51.43
100	194	1e-40	29.80	0	0.0704	51.01	-12.77	51.23
105	194	1e-40	27.59	0	0.0718	51.01	-14.73	51.21
110	194	1e-40	26.82	0	0.0709	51.01	-16.79	51.29

Las figuras que relacionan los parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo de grado, y la distancia de transmisión, se encuentran a continuación:

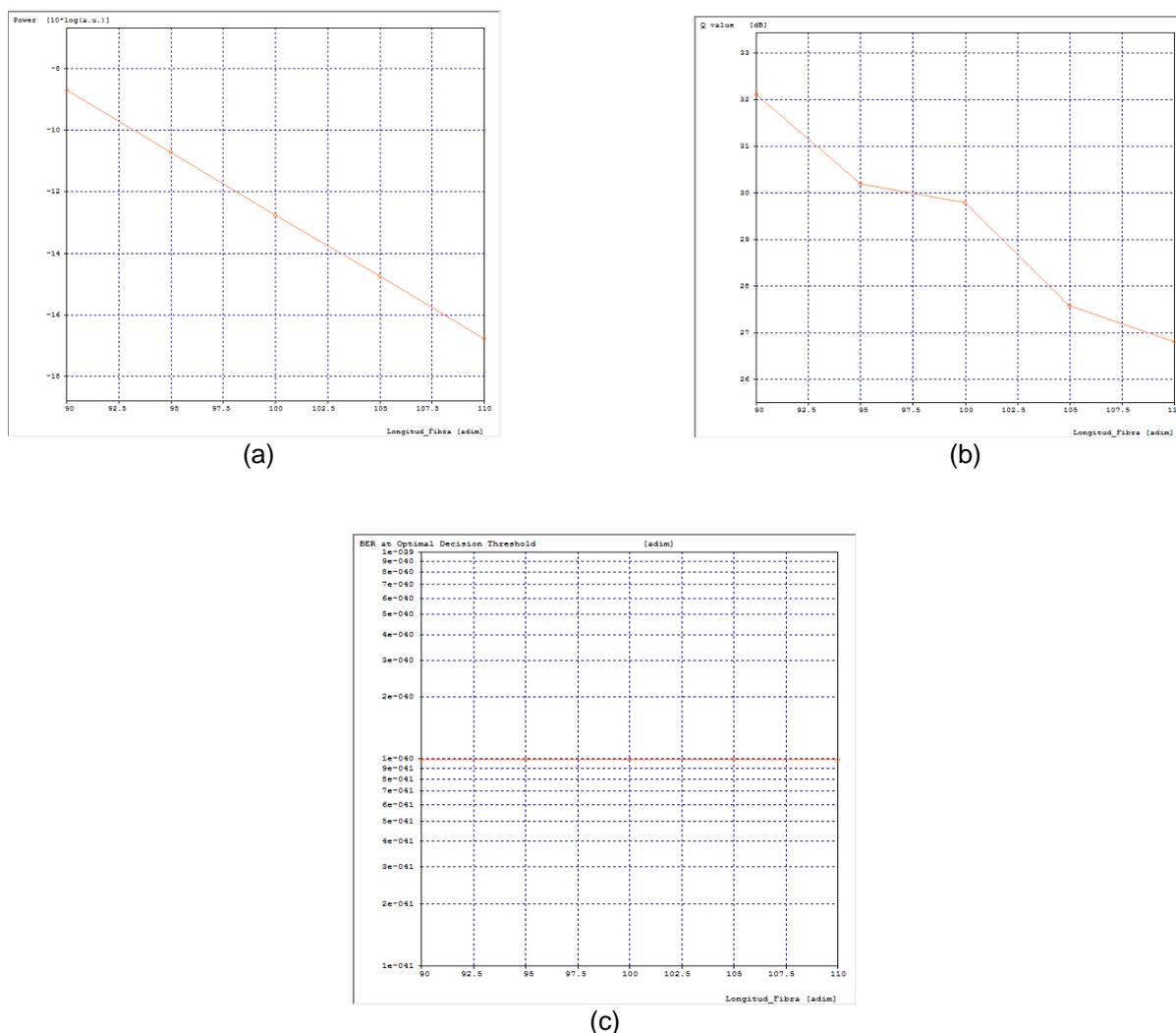


Figura 3.69 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema compensado módulo MATLAB al 75%.

De este sistema se puede decir que, la implementación contribuye al desempeño del sistema, puesto que no se hace necesario involucrar varios amplificadores. El módulo compensador generado, permite obtener valores más bajos de jitter, logrando que la superposición de pulsos no afecte de manera significativa al sistema y dado que todos los valores de OPM se encuentran muy por encima del umbral mínimo permitido, se consigue mantener la BER constante (ver figura 3.69 (c)). La pre-compensación cumple con la labor de obtener el menor valor posible de jitter, de esta manera al implementar esta configuración, se obtendría el mejor desempeño y calidad, sin embargo, el módulo sigue permitiendo obtener mejores valores de OPM.

3.2.6 Caso de estudio 4. Sistema compensado al 100%.

El cálculo concerniente a este porcentaje de compensación, se presenta en las ecuaciones 3.18 y 3.19.

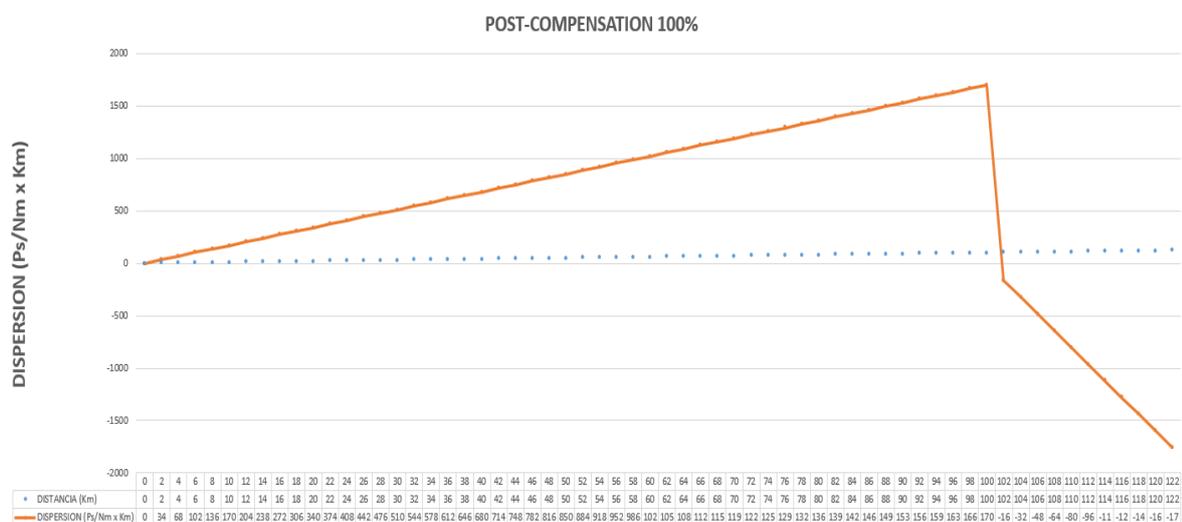
$$1700 \frac{ps}{nm} * 1 = 1700 \frac{ps}{nm} \quad \text{Ecuación 3.18}$$

$$\frac{1700 \frac{ps}{nm}}{-80 \frac{ps}{nm * Km}} = -21.25 Km \quad \text{Ecuación 3.19}$$

De lo anterior se obtiene que, para obtener una compensación completa de la dispersión total acumulada, se hacen necesarios 22Km de fibra compensadora.

- **Post-compensado.**

La gráfica 3.70, muestra el comportamiento teórico de la CD vs distancia de transmisión, contando con compensación mediante DCF, con longitud de 22Km, como se halló en el anterior cálculo.



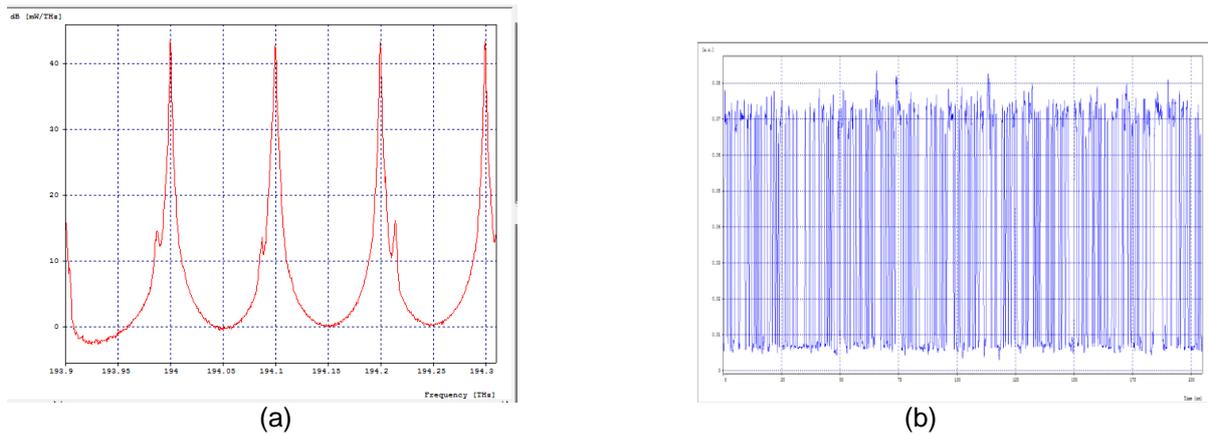


Figura 3.71 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema post compensado al 100%.

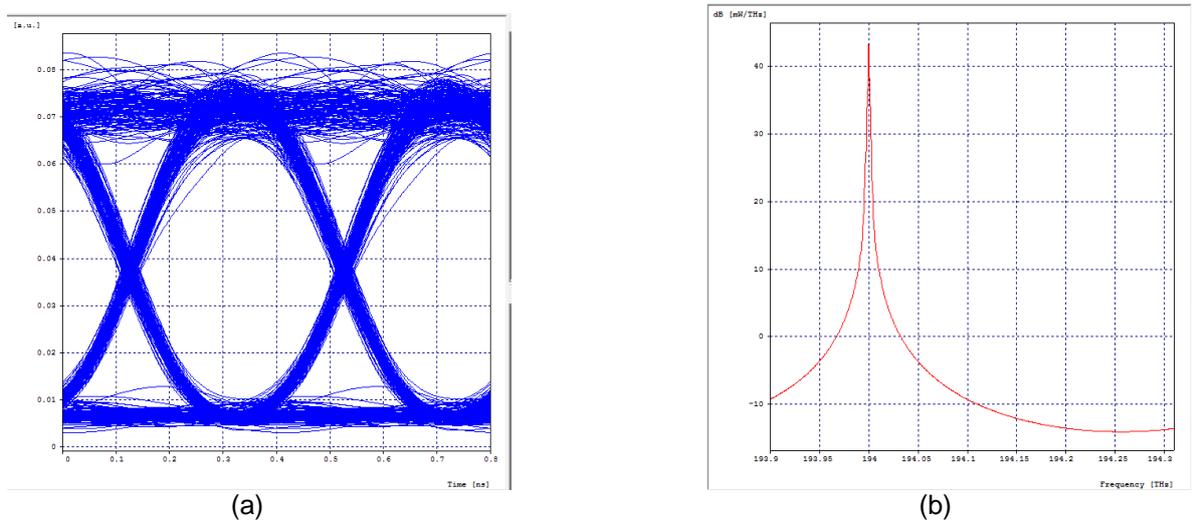


Figura 3.72 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema post compensado al 100%.

Los valores de OPM que arrojan estas gráficas, se presentan en la tabla 3.15.

Tabla 3.15 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema post compensado al 100%.

Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	P_{Tx} [dBm]	Jitter [ns]	$OSNR_{IN}$ [dB]	P_{Rx} [dBm]	$OSNR_{OUT}$ [dB]
90	194	1e-40	24.1	0	0.0773	51.01	-26.21	47.64
95	194	1e-40	24.4	0	0.0773	51.01	-26.16	47.47
100	194	1e-40	24.8	0	0.0787	51.01	-26.28	47.47
105	194	1e-40	25.95	0	0.0800	51.01	-26.36	47.50
110	194	1e-40	25.4	0	0.0791	51.01	-26.44	47.49

Las figuras que relacionan los parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo de grado, y la distancia de transmisión, se encuentran a continuación:

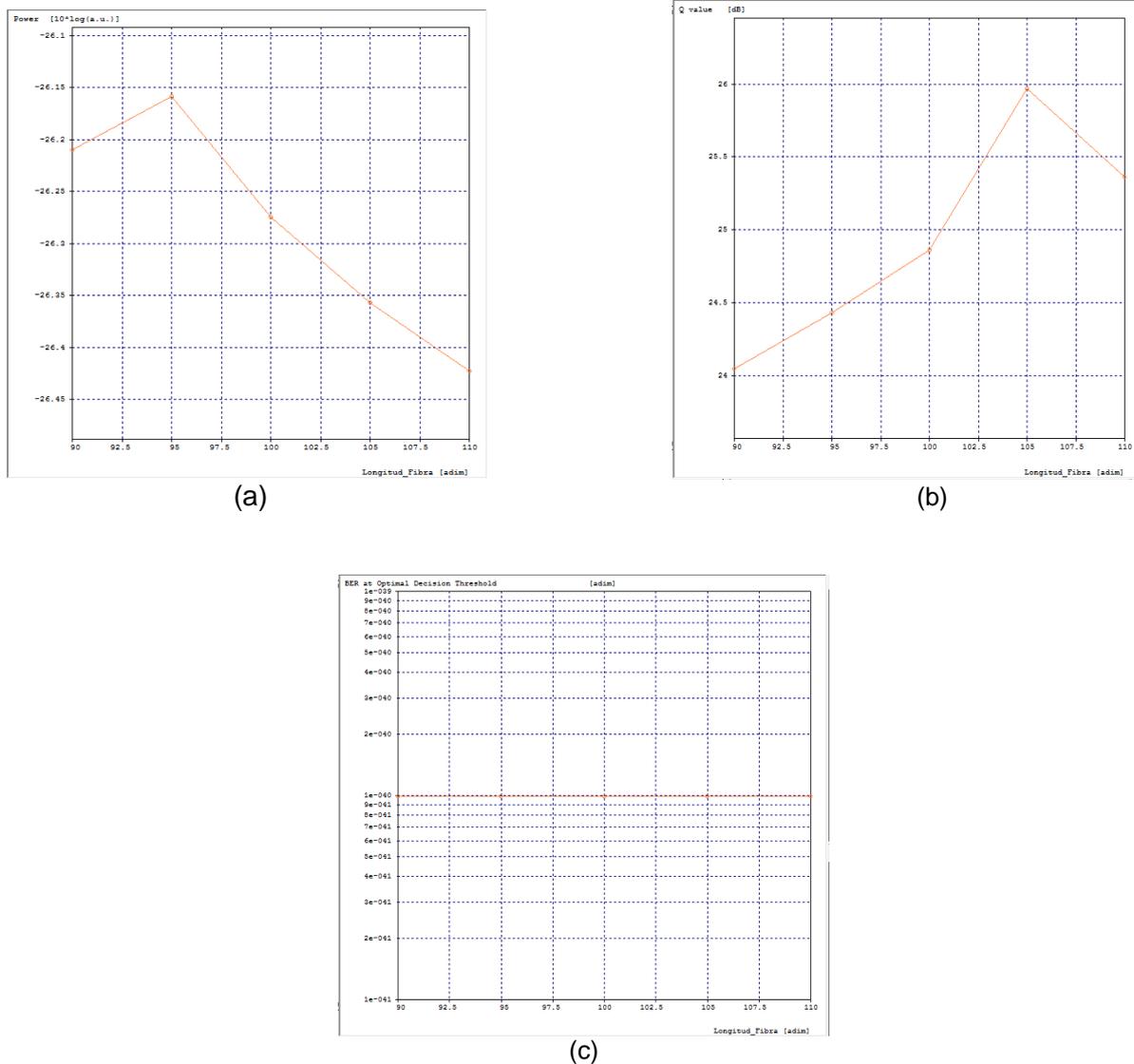


Figura 3.73 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema post compensado al 100%.

Dado que se compensa el efecto total de la CD en el enlace, se tienen valores de jitter mucho menores a los obtenidos en los otros casos de compensación (ver tabla 3.15), esto conlleva a que el Factor de calidad del enlace incremente, haciendo que se tenga un mejor desempeño y de esta manera, no se generen altas pérdidas de potencia.

- **Pre-compensado.**

Las gráficas teóricas son una base que indican el comportamiento ideal que sigue; en este caso; la CD vs distancia de transmisión. La figura 3.74 indica lo mencionado.

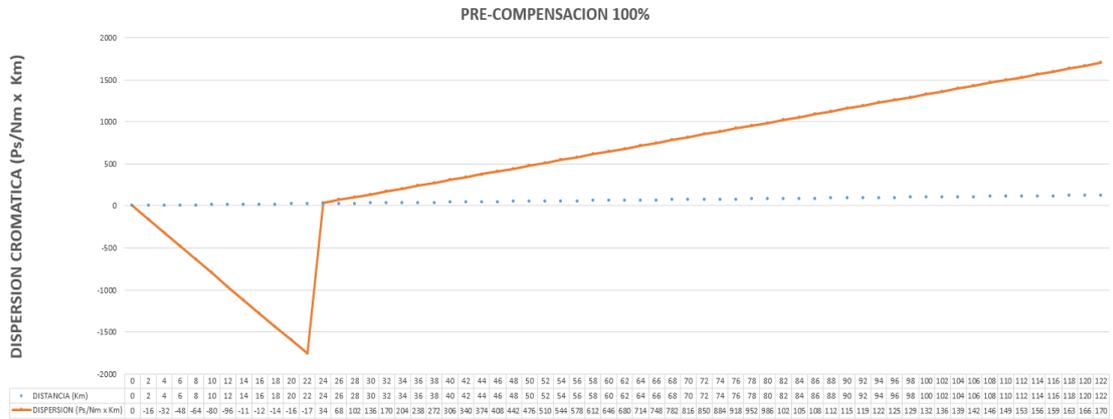


Figura 3.74 Dispersión Acumulada para pre-compensación al 100%.

A continuación, se presentan las gráficas de los resultados obtenidos.

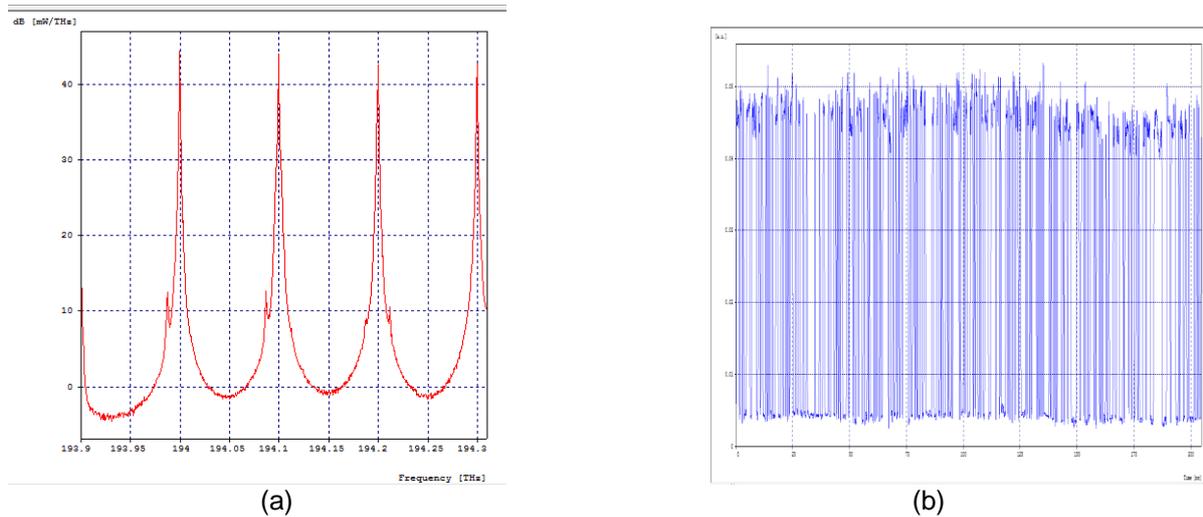


Figura 3.75 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema pre compensado al 100%.

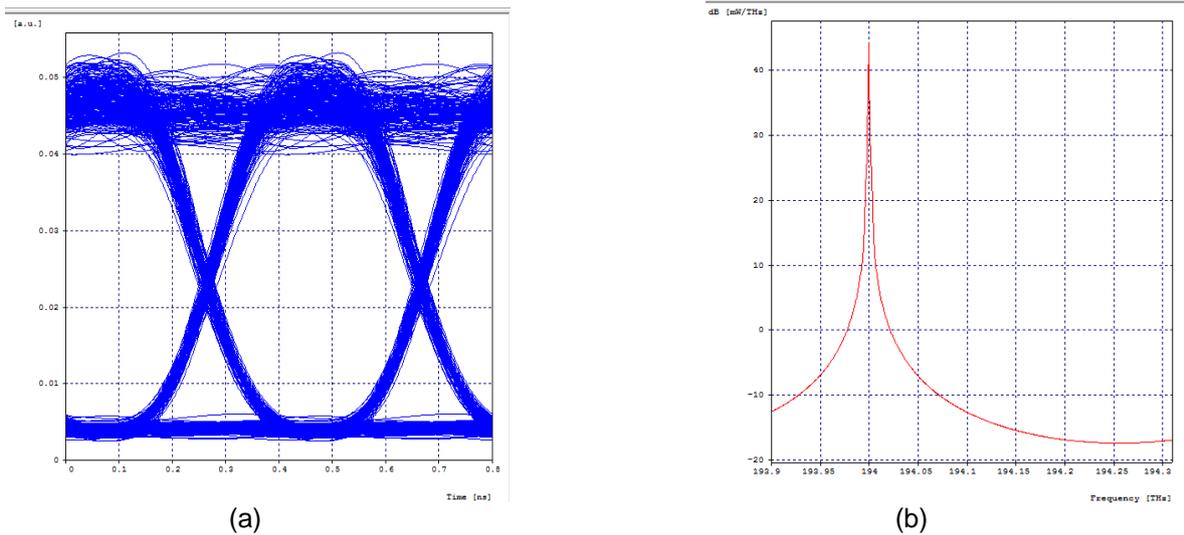


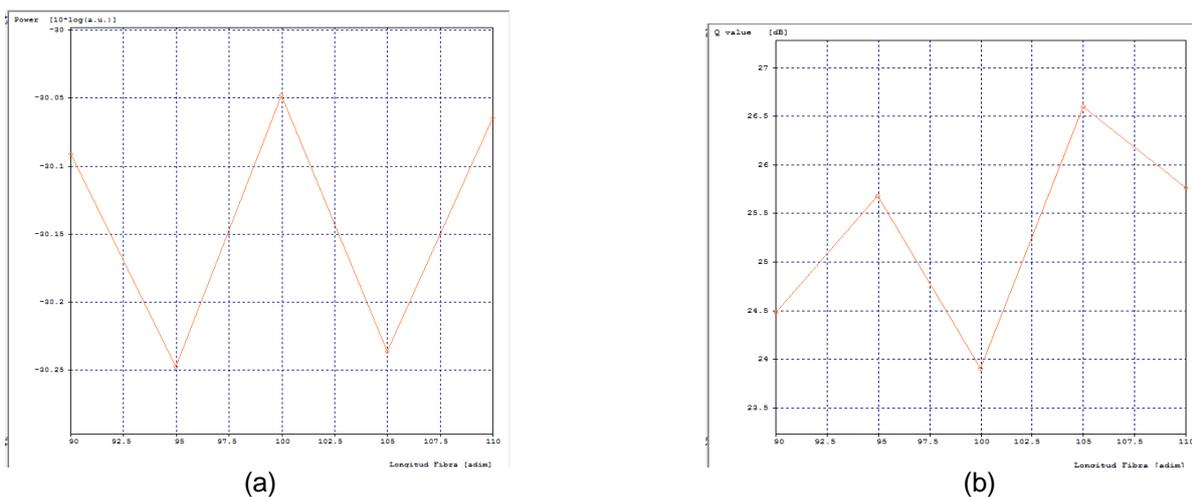
Figura 3.76 Diagrama del ojo en Recepción y Espectro de la señal filtrada, sistema pre compensado al 100%.

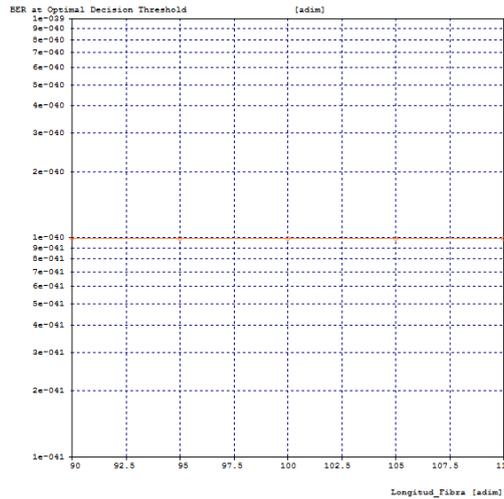
Los valores de OPM que arrojan estas gráficas, se presentan en la tabla 3.16.

Tabla 3.16 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema pre compensado al 100%.

Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	P _{Tx} [dBm]	Jitter [ns]	OSNR _{IN} [dB]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
90	194	1e-40	24.5	0	0.0781	51.01	-30.08	48.87
95	194	1e-40	25.53	0	0.0730	51.01	-30.25	48.74
100	194	1e-40	23.59	0	0.0749	51.01	-30.05	48.90
105	194	1e-40	26.54	0	0.0774	51.01	-30.23	48.81
110	194	1e-40	25.57	0	0.0763	51.01	-30.18	48.91

Las figuras que relacionan los parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo de grado, y la distancia de transmisión, se encuentran a continuación:





(c)

Figura 3.77 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema pre compensado al 100%.

Los factores que alteran el comportamiento de las graficas de la figura 3.77, se deben, como se ha dicho a lo largo del capítulo, a los efectos que agregan la cantidad de amplificadores ópticos utilizados. Lo anterior conlleva a que en recepción, se tengan bajos niveles de potencia. Gracias a la robustez del enlace implementado, los efectos lineales no llegan a degradar tanto el sistema, permitiendo mantener la BER constante (ver figura 3.77 (c)).

- **Compensado simétricamente.**

El comportamiento teórico de este modo de compensación, se presenta a continuación:

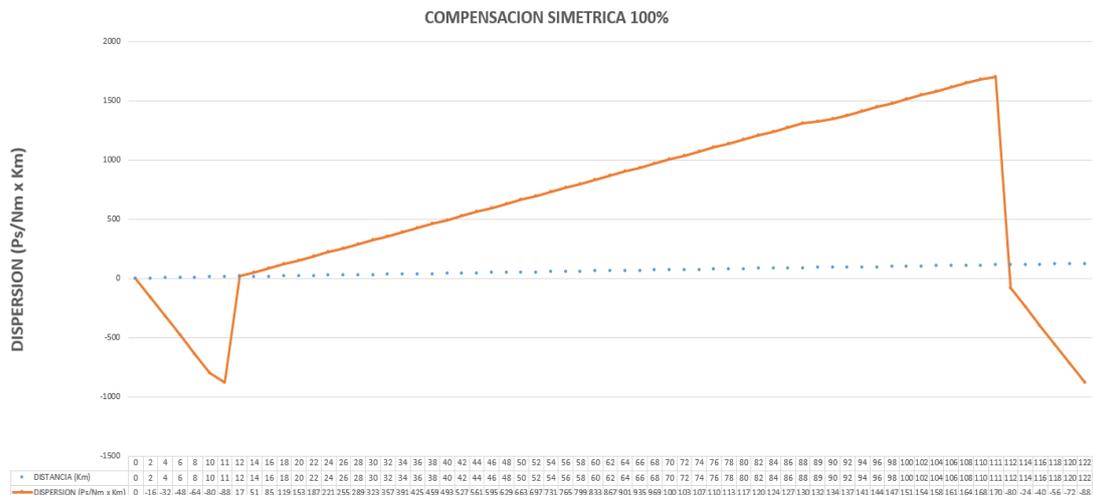


Figura 3.78 Dispersión Acumulada para post-compensación al 100%.

A continuación, se presentan las gráficas de los resultados obtenidos.

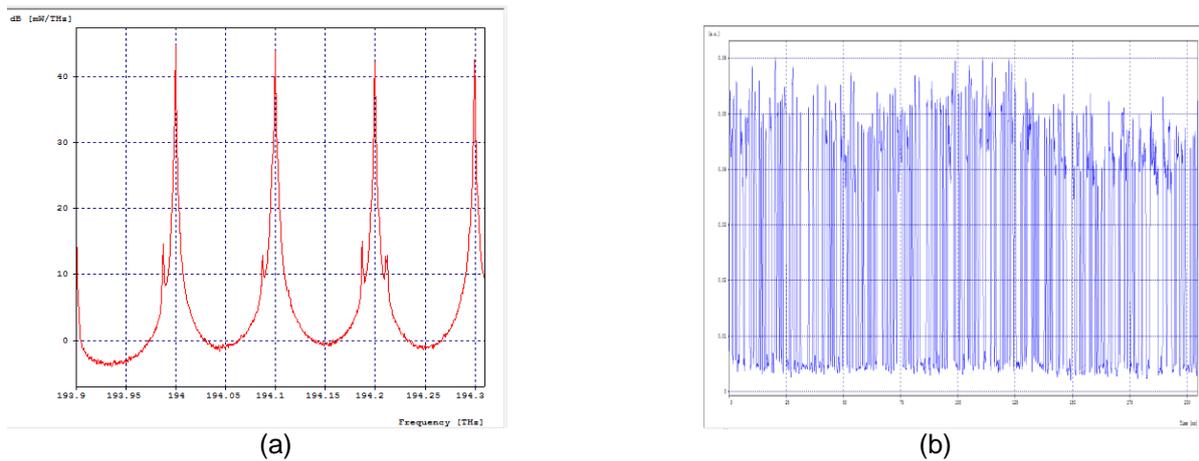


Figura 3.79 (a) Espectro de la señal de transmisión y (b) señal eléctrica transmitida, sistema compensado simétricamente al 100%.

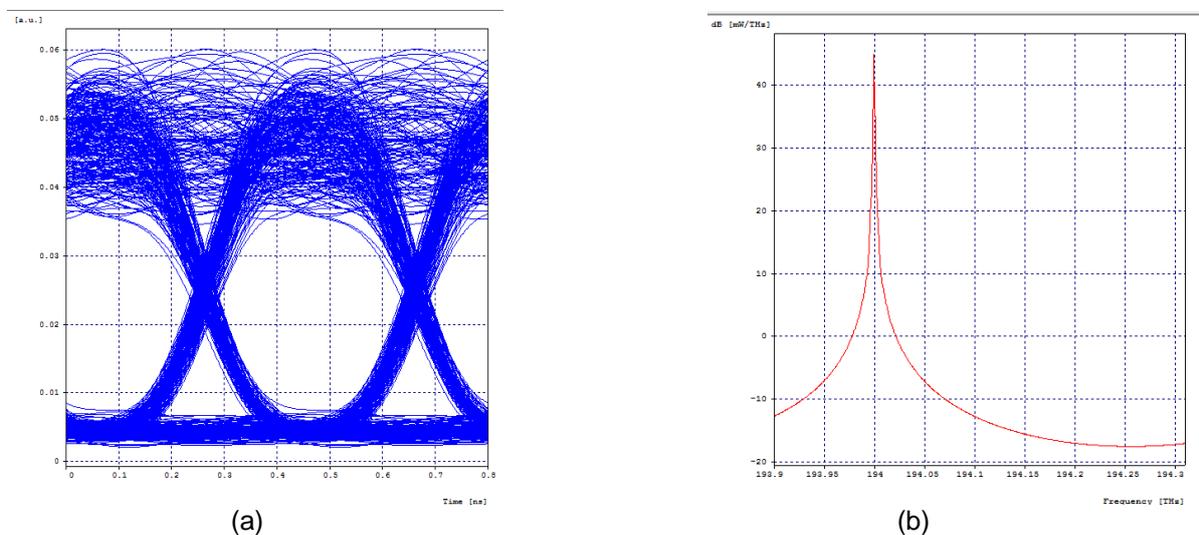


Figura 3.80 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) Espectro de la señal filtrada, sistema compensado simétricamente al 100%.

Los valores de OPM que arrojan estas gráficas, se presentan en la tabla 3.17.

Tabla 3.17 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema compensado simétricamente al 100%.

Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	P_{Tx} [dBm]	Jitter [ns]	$OSNR_{IN}$ [dB]	P_{Rx} [dBm]	$OSNR_{OUT}$ [dB]
90	194	1e-40	25	0	0.0860	51.01	-29.98	48.36
95	194	2.94e-17	18.7	0	0.0938	51.01	-29.86	48.56
100	194	1.12e-13	17.2	0	0.0951	51.01	-29.84	49.10
105	194	2.74e-19	19.1	0	0.0767	51.01	-30.2	48.08
110	194	5.83e-27	20.7	0	0.0913	51.01	-29.82	49.11

Las figuras que relacionan los parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo de grado, y la distancia de transmisión, se encuentran a continuación:

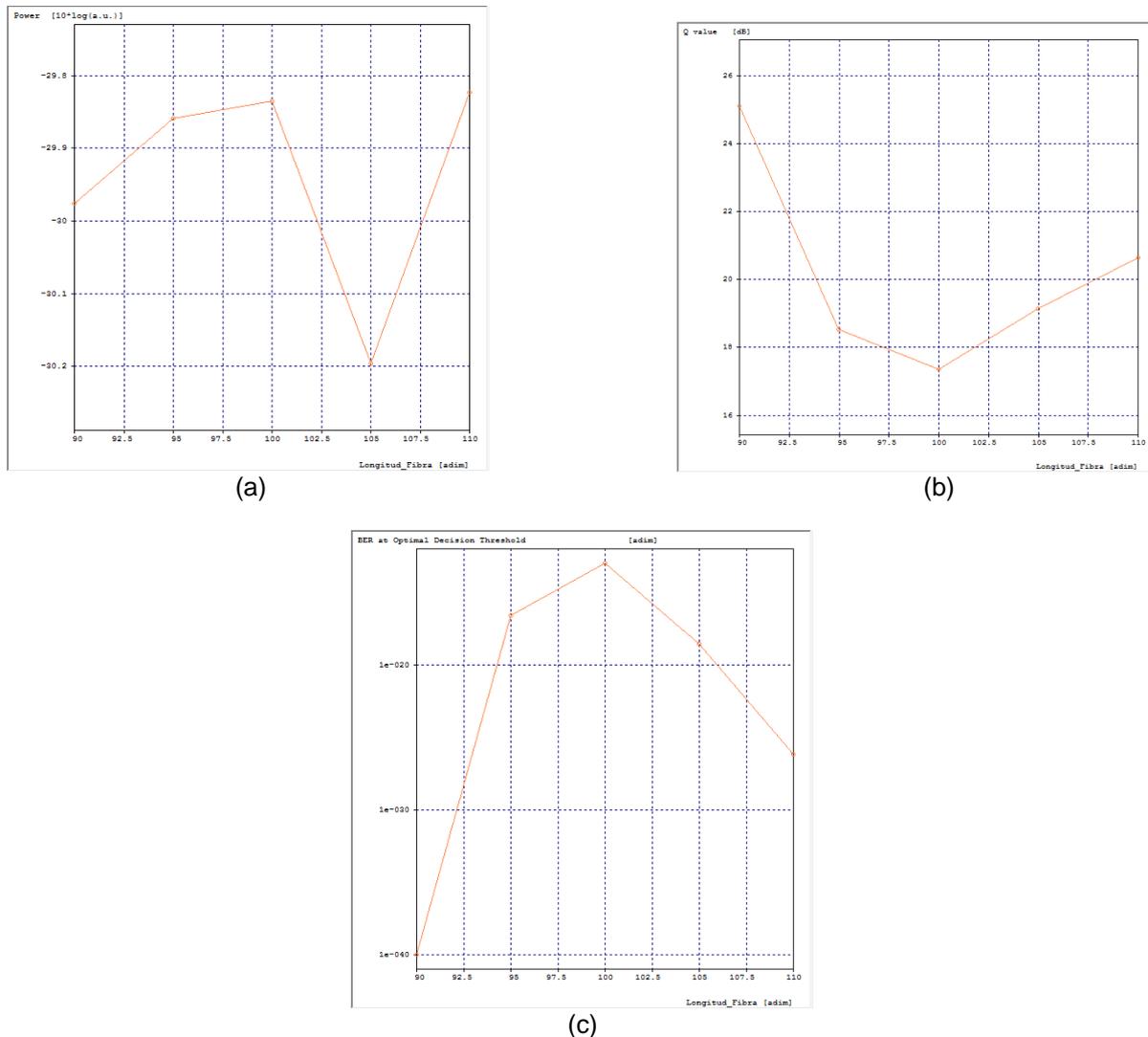


Figura 3.81 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema compensado simétricamente al 100%.

El sistema ha aumentado el valor de jitter, por lo cual se tiene que no está realizando correctamente la compensación requerida, debido a esto, este tipo de configuración, degrada la señal hasta el punto de que la BER se ve realmente afectada, llegando a puntos mínimos; como lo muestra la figura 3.81 (c); que aunque son aceptables por la ITU, no son los mas recomendables.

- **Post-compensado mediante módulo Matlab.**

```
ele_out=ele_in +(TotDisp) ;
```

Figura 3.82 Factor de configuración para compensar al 100%.

A continuación, se presentan las gráficas de los resultados obtenidos.

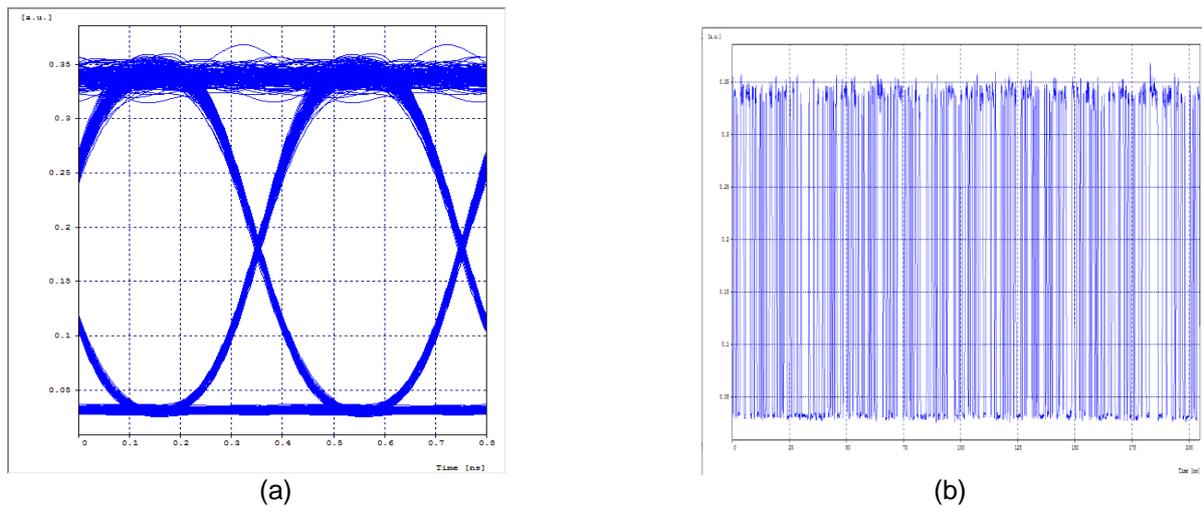


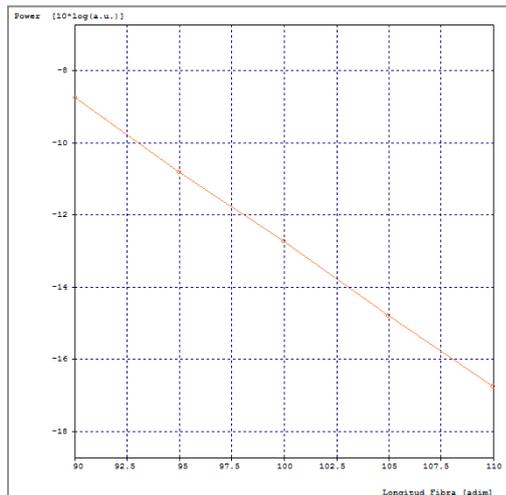
Figura 3.83 (a) Diagrama del ojo en Recepción y (b) señal eléctrica transmitida, sistema compensado módulo MATLAB al 100%.

Los valores de OPM que arrojan estas gráficas, se presentan en la tabla 3.18.

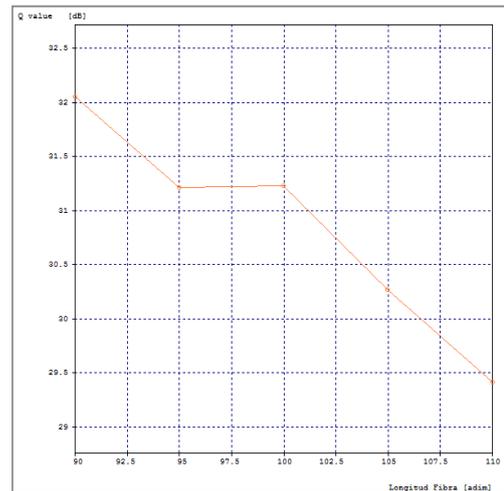
Tabla 3.18 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema compensado Módulo MATLAB al 100%.

Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	P_{Tx} [dBm]	Jitter [ns]	$OSNR_{IN}$ [dB]	P_{Rx} [dBm]	$OSNR_{OUT}$ [dB]
90	194	1e-40	32.05	0	0.0771	51.01	-8.67	51.43
95	194	1e-40	31.21	0	0.0673	51.01	-10.76	51.43
100	194	1e-40	31.23	0	0.0701	51.01	-12.76	51.23
105	194	1e-40	30.27	0	0.0753	51.01	-14.73	51.21
110	194	1e-40	29.41	0	0.0728	51.01	-16.76	51.29

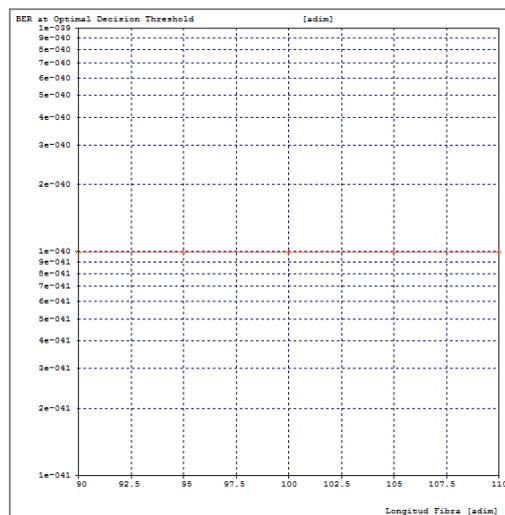
Las figuras que relacionan los parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo de grado, y la distancia de transmisión, se encuentran a continuación:



(a)



(b)



(c)

Figura 3.84 (a) Potencia en recepción, (b) Factor Q y (c) BER vs Distancia de Transmisión, sistema compensado módulo MATLAB al 100%.

Para 100% de compensación, el módulo encuentra su mejor desempeño, logrando obtener muy buenos valores de todos los parámetros de monitoreo óptico.

La pre-compensación mitiga mayormente los efectos del jitter en el enlace, lo que conlleva a que la CD disminuya, sin embargo, al presentar valores tan bajos de potencia, no sería totalmente recomendable. Debido a esto, se debe tener en cuenta el enlace que contiene el módulo compensador, dado que se obtiene mejor compensación y muy buenos valores de potencia en recepción.

3.2.7 Caso de estudio 5: Análisis para velocidad de 10Gbps.

Como se ha mencionado, corresponde al objetivo del presente trabajo de grado, generar un enlace que alcance velocidades de 10Gbps. En el anterior análisis, se dio paso a la implementación de un sistema, donde la multiplexación de 4 canales a 2.5Gbps cada uno, formara los 10 Gbps que soportara la fibra. Sin embargo y con el

fin de tener plena seguridad del desempeño de la red a esta velocidad, se decide implementar un enlace que cuente con un único transmisor, configurado a 10Gbps netos. El sistema montado sobre la herramienta OptSim®, y que es ahora el foco para realizar el respectivo análisis del comportamiento del módulo compensador generado, es el siguiente:

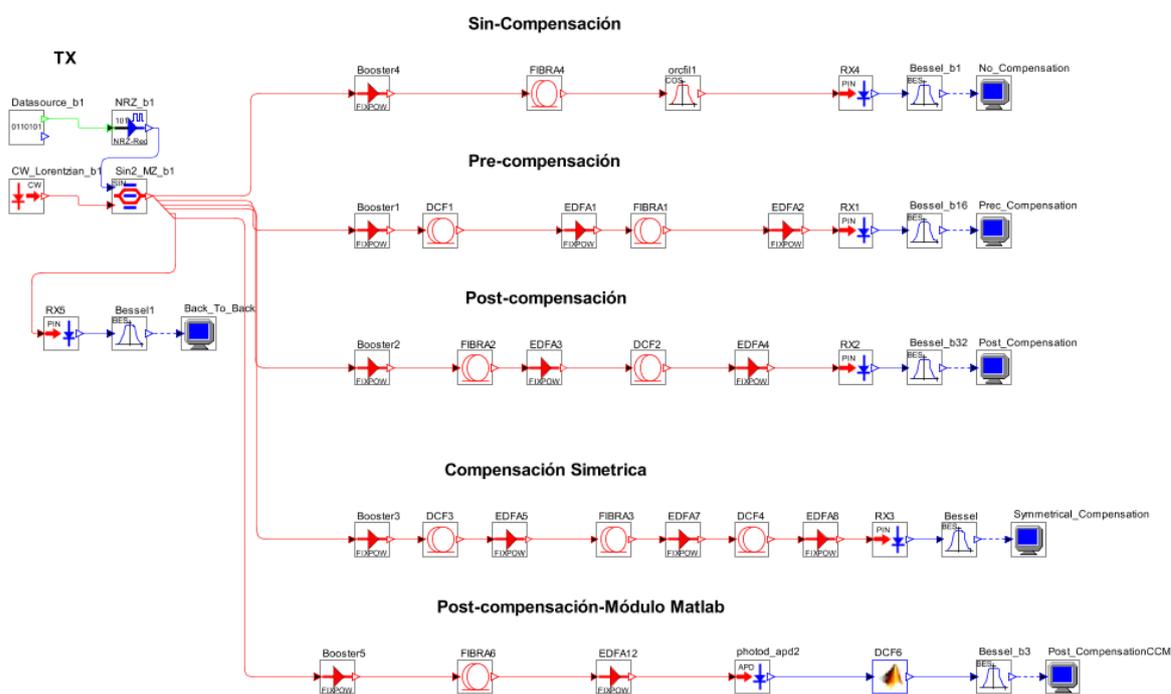


Figura 3.85 Escenario de simulación a 10Gbps.

En la figura 3.85 se observa, al igual que el sistema implementado a 10Gbps, cinco maneras diferentes de compensación de la CD. De igual forma, el análisis respectivo, parte con base en el enlace back to back y el enlace sin compensación, con el fin de tener en cuenta el mejor y peor de los casos en cuanto a desempeño de los OPM, respectivamente.

Como en el caso de la simulación del sistema a velocidad de 2.5Gbps, se deben tener en cuenta ciertas características que permitan la correcta co-simulación entre las herramientas Matlab® y OptSim®. Dado el cambio de velocidad, se tiene un único transmisor configurado, esto lleva a que el tamaño del vector; que indica el tamaño de la señal; cambie, siendo necesario nuevamente ver sus características (tamaño y orientación) en el comand window. De lo anterior, se obtuvo que para el caso de 10Gbps, el tamaño del vector a operar es de 1×55296 . Este tamaño es debido a que se incrementa la cantidad de bits por segundo que se transmiten (paso de 2.5 a 10Gbps), por lo cual, es necesario disminuir significativamente el número de muestras por bit, con el fin de no generar inconvenientes y demoras en el procesamiento y simulación del sistema de transmisión.

Los elementos en transmisión continúan siendo los mismos; transmisor NRZ-OOK con modulador Mach Zehnder, en línea se tienen amplificadores EDFA que compensen las pérdidas de potencia y finalmente el receptor ha sido configurado nuevamente a -30dBm, siendo este el umbral mínimo esperado. Las pruebas de

tolerancia del módulo compensador generado, frente a la CD, arrojan que frente a 100Km de longitud del enlace y porcentajes de compensación de 25 y 50%, no es posible compensar los efectos de la CD, por lo tanto, se decide incluir en el presente documento únicamente los resultados que arroja la compensación a 100% para una longitud de 100Km, teniendo en cuenta que la robustez de esta configuración, si permite mejorar el desempeño del enlace. Estos resultados los muestran las gráficas a continuación:

- **Enlace back to back.**

Se procede a analizar primeramente, el sistema sin elementos que degraden la calidad de la señal, obteniendo como resultado:

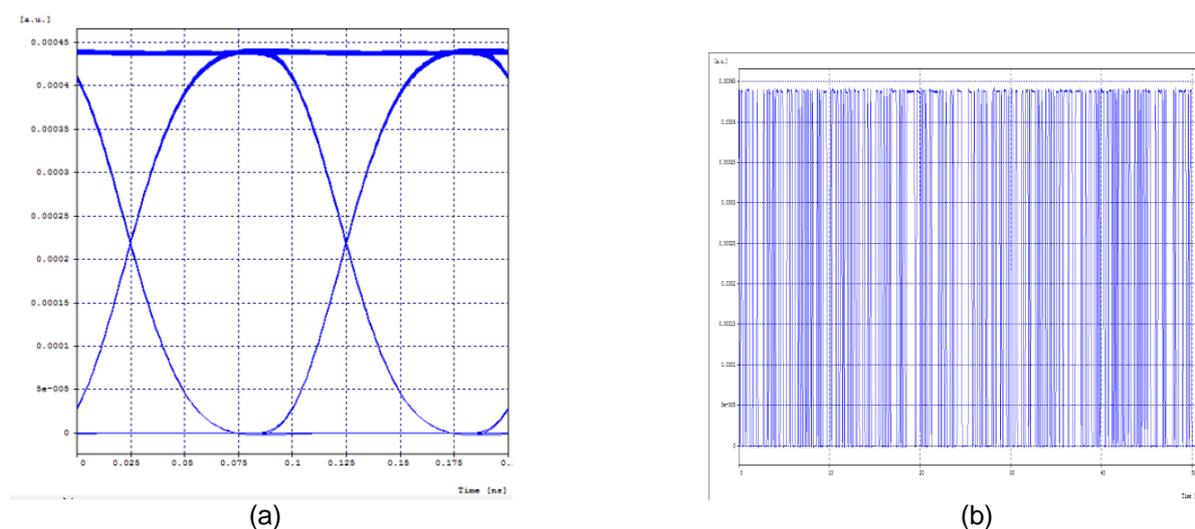


Figura 3.86 (a) Diagrama del Ojo y (b) señal eléctrica transmitida, enlace Back to Back a 10Gbps.

Tabla 3.19 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema enlace Back to Back a 10Gbps.

Distancia [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	1e-40	40	0.0170

A pesar de no haber sufrido degradaciones en la calidad de los pulsos, dado el aumento de velocidad de transmisión, se ve atenuado considerablemente, en relación al back to back para 2.5Gbps, sin embargo, y dada la falta de elementos en el enlace, los valores de OPM que se obtienen, son ideales.

- **Sin compensación.**

Esta configuración hace referencia al caso en el que se obtendrían los peores valores de OPM, dado que no cuenta con dispositivos que recuperen la señal que llega a recepción. Para corroborar esto, la figura 3.87 muestra los resultados obtenidos:

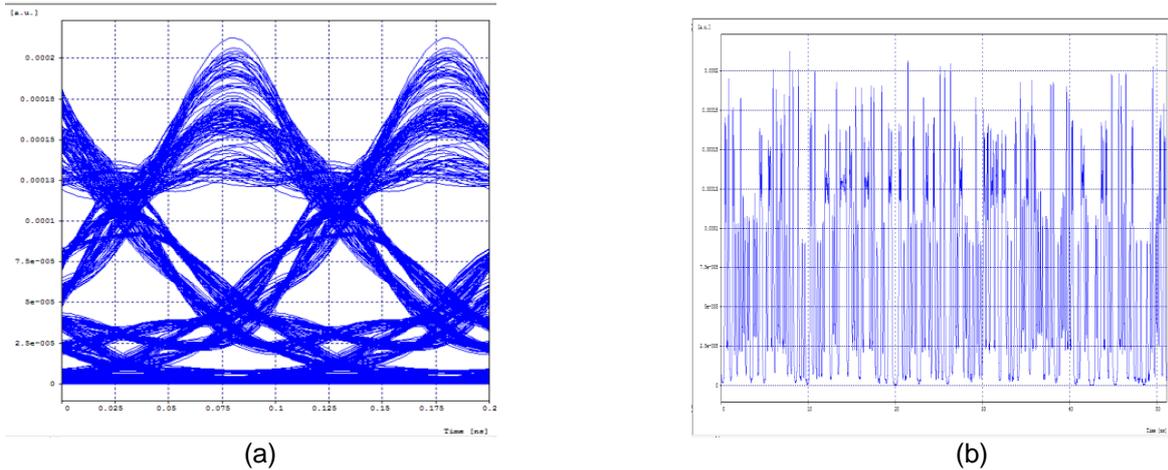


Figura 3.87 (a) Diagrama del Ojo y (b) señal eléctrica transmitida, enlace sin compensación a 10Gbps.

Tabla 3.20 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema enlace sin compensación a 10Gbps.

Distancia [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	4.35 e-6	13.091	0.0282

Dado el incremento de velocidad, la señal a 100Km se ha deteriorado tanto que ya no cumple con el rango establecido por la ITU en cuanto a la BER, como indica la tabla 3.20. Debido a lo anterior, es necesario dar paso a las configuraciones que incluyen módulos compensadores. Como se mencionó inicialmente, las compensaciones se realizarán únicamente para un porcentaje de 100%, esto conlleva a que, la longitud de las fibras DCF sea de 22Km y el factor multiplicador en el módulo diseñado en Matlab sea de 1.

- **Post-compensado.**

La esencia de esta configuración ya ha sido explicada en la parte teórica (capítulo 2) y en el análisis para 2.5Gbps, por ende, se da paso a los resultados obtenidos.

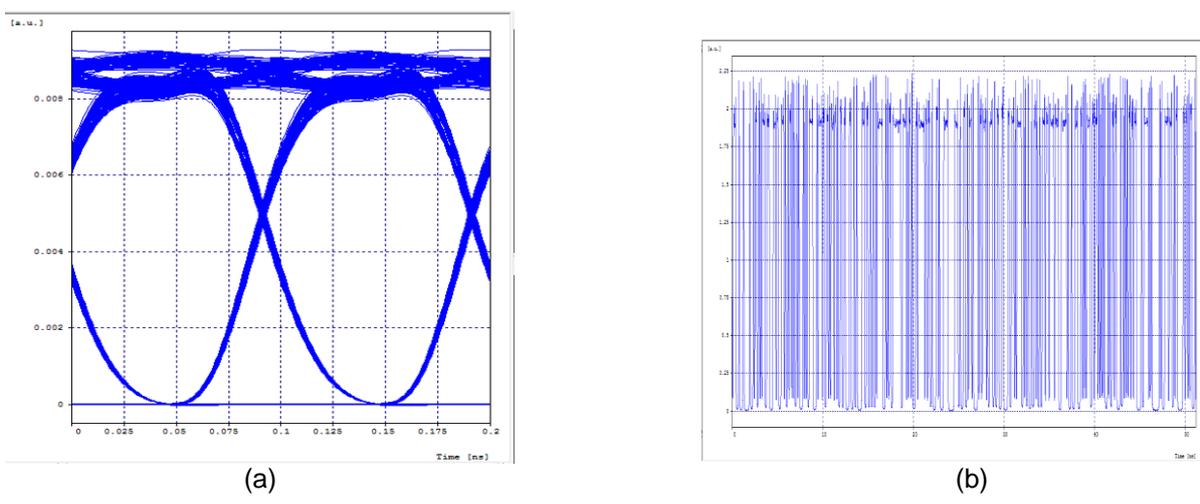


Figura 3.88 (a) Diagrama del Ojo y (b) señal eléctrica transmitida, enlace post compensado al 100% a 10Gbps.

Tabla 3.21 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema enlace post compensado al 100% a 10Gbps.

Distancia [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	1e-40	28.34	0.0180

Al ser compensado el sistema, los valores de plasmados en la tabla 3.21, indican claramente como se ha logrado regenerar la señal, de tal forma que se logra compensar la sobre posición de pulsos, haciendo que el valor de jitter disminuya, lo que conlleva a que el valor de BER se encuentre dentro de los valores recomendados por la ITU.

- **Pre-compensado.**

A pesar de tener buenos resultados, como se muestra a continuación, el desempeño de la post-compensación es mucho mejor, en cuanto a la compensación de sobre posición de pulsos.

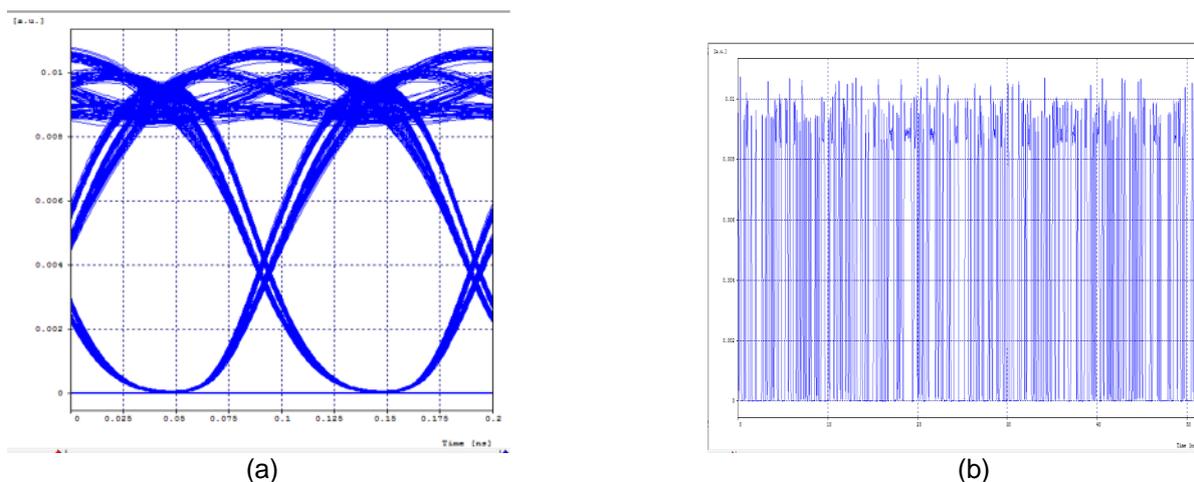


Figura 3.89 (a) Diagrama del Ojo y (b) señal eléctrica transmitida, enlace pre compensado al 100% a 10Gbps.

Tabla 3.22 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema enlace pre compensado al 100% a 10Gbps.

Distancia [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	1e-40	27.89	0.0257

Los valores de la tabla 3.22 se encuentran dentro del umbral definido, por ende, la configuración de la compensación realizada es correcta. Sin embargo, este sistema presenta mayor atenuación a causa de los efectos no lineales que introducen los EDFA.

- **Compensado simétricamente.**

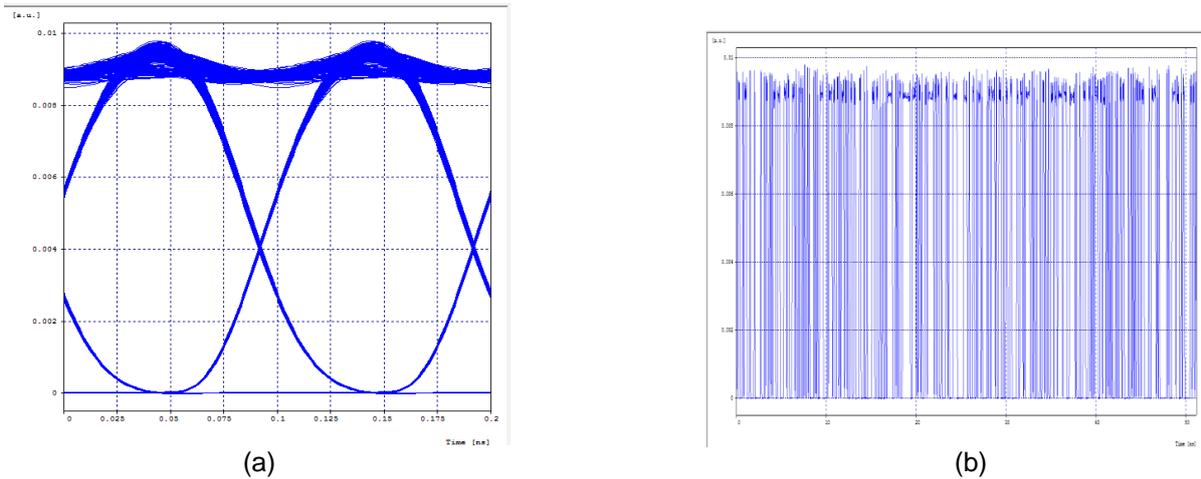


Figura 3.90 (a) Diagrama del Ojo y (b) señal eléctrica transmitida, enlace compensado simétricamente al 100% a 10Gbps.

Tabla 3.23 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema. Enlace compensado simétricamente al 100% a 10Gbps.

Distancia [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	1e-40	32.55	0.0093

El valor de BER y el bajo valor de jitter, dan pie a que la calidad de la señal en recepción sea buena, esto se evidencia en el aumento en el valor del Factor Q.

Lo anterior lleva a concluir que, la implementación de un sistema a 10Gbps compensado simétricamente al 100%, es la opción más viable para obtener un buen desempeño del sistema, y que cumpla con las recomendaciones de la ITU.

- **Post-compensado mediante módulo de Matlab.**

Para analizar el comportamiento de la CD y la vulnerabilidad del módulo frente a esta, se decide ver el corrimiento de los pulsos en recepción. Es necesario ver los diagramas de ojo que se generan una vez aumente la CD, por ende se utiliza la CD como variable a modificar, de esto resulta:

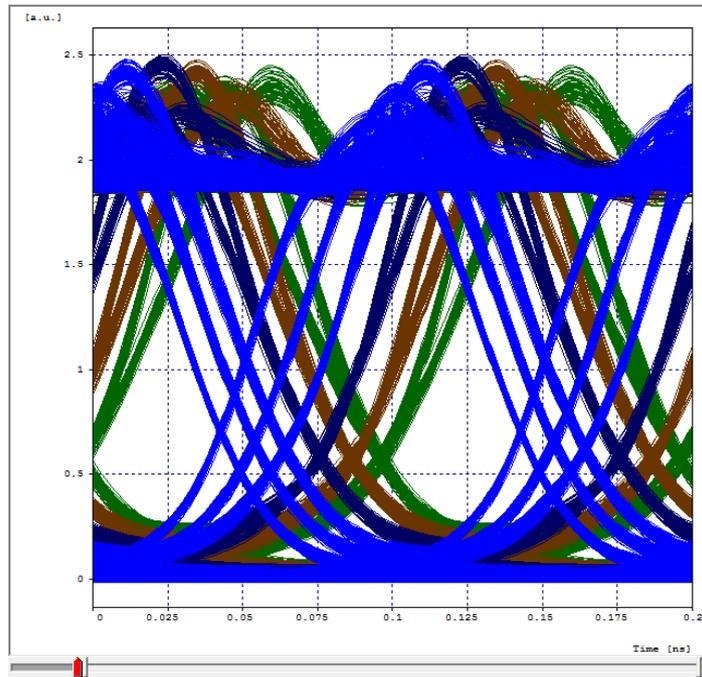


Figura 3.91 Corrimiento de pulsos dado aumento de CD, sistema compensado Módulo MATLAB a 10Gbps.

Se han generado 17 valores diferentes de CD, empezando en $100\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$ y terminando en $1700\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$, con saltos de $100\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$. Esto ya que el máximo valor de CD acumulado en un enlace de 100Km con fibra SSMF-28 de $\text{CD}=17\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$ es de $1700\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$. La figura 3.91, ilustra el corrimiento de los pulsos una vez aumente la CD, indicando que el valor de jitter esperado en recepción aumentará. Esto se hace con el fin de evidenciar como la CD aumenta directamente proporcional al aumento en la longitud del enlace. Para evitar redundancia, no se presentan los 17 casos, sino únicamente los que generan análisis significativos. Estos se presentan a continuación:

- $100\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$

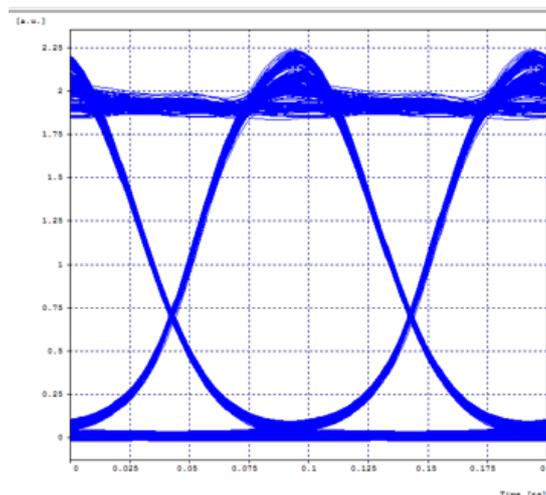


Figura 3.92 Sistema compensado módulo CCM, con CD acumulada de $100\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$ a 10Gbps.

Dado que se conoce que la CD total acumulada es de 1700 ps/nm*Km para una longitud total de 100Km, por equivalencia se tiene que 100 ps/nm*Km acumulados, corresponden a una longitud de 5.88Km de fibra. Los parámetros que se obtienen de esta configuración, se presentan a continuación:

Tabla 3.24 Parámetros de Monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema enlace compensado Módulo MATLAB a 10Gbps con CD acumulada de 100ps/nm*Km.

Distancia [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
5.88	1e-40	27.81	0.0167

Como se evidencia en la figura 3.92 y la tabla 3.24, la CD acumulada no afecta el desempeño del enlace, por lo cual, se procede a aumentar el valor de CD, con el fin de determinar el la CD limitante para el módulo generado.

- 1200ps/nm*Km

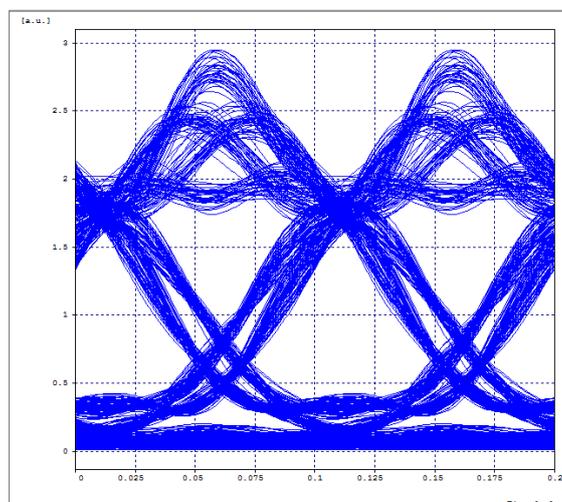


Figura 3.93 Sistema compensado módulo CCM, con CD acumulada de 1200ps/nm*Km a 10Gbps.

De igual manera, por equivalencia se tiene para este caso que, para 1200 ps/nm*Km, son necesarios 70,58 Km. Los parámetros que se obtienen de esta configuración, se presentan a continuación:

Tabla 3.25 Parámetros de Monitoreo Óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema. Enlace compensado módulo MATLAB a 10Gbps con CD acumulada de 1200ps/nm*Km.

Distancia [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
70.58	6.37e-18	18.74	0.0275

El cambio en los parámetros de monitoreo óptico, indica como al incrementar la longitud del enlace, hace que se genere más CD, haciendo que la calidad y desempeño del enlace disminuya de forma considerable. Debido a que la BER aun cumple con los estándares establecidos por la ITU, se procede a incrementar nuevamente la CD acumulada, y así hallar el limitante.

- 1300ps/nm*Km

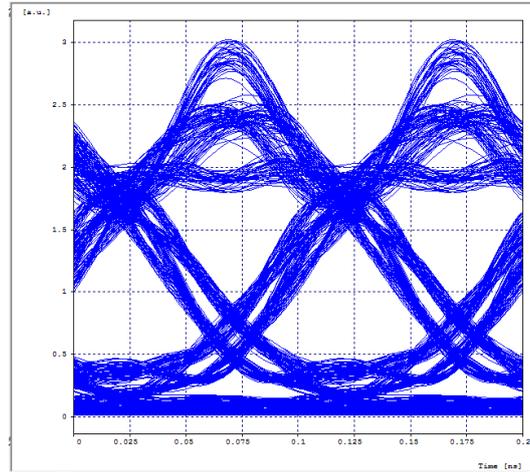


Figura 3.94 Sistema compensado módulo CCM, con CD acumulada de 1300ps/nm*Km a 10Gbps.

Por lo tanto, 1300 ps/nm*Km acumulados, corresponden a una longitud de 76.47Km de fibra. Los parámetros que se obtienen de esta configuración, se presentan a continuación:

Tabla 3.26 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema. Enlace compensado Módulo MATLAB a 10Gbps con CD acumulada de 1300ps/nm*Km.

Distancia [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
76.47	4.85e-12	16.53	0.0279

Finalmente, se ha logrado obtener el valor mínimo aceptado por la ITU en cuanto a BER, es decir que hasta esta longitud de enlace es capaz de compensar el módulo generado en el entorno de so-simulación, cumpliendo con los estándares internacionales. Al incrementar la distancia, se incrementa el valor de jitter, sin embargo, se logran valores menores al enlace sin compensación, confirmando de esta manera que el compensador si está haciendo su labor.

- 1700ps/nm*Km

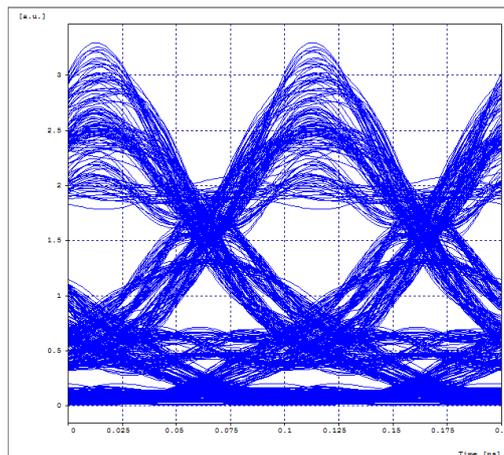


Figura 3.95 Sistema compensado módulo CCM, con CD acumulada de 1700ps/nm*Km a 10Gbps.

Tabla 3.27 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema. Enlace compensado módulo MATLAB a 10Gbps con CD acumulada de 1700ps/nm*Km.

Distancia [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
100	¡Error!	11.49	0.0285

Como muestra la tabla 3.27, esta configuración no es aceptable, debido a que la calidad de la señal que llega al receptor, es deficiente.

Debido a este análisis, y con el fin de comprobar la máxima longitud del enlace obtenida, se decide implementar el enlace con 76Km de fibra, donde se obtuvo (ver figura 3.96).

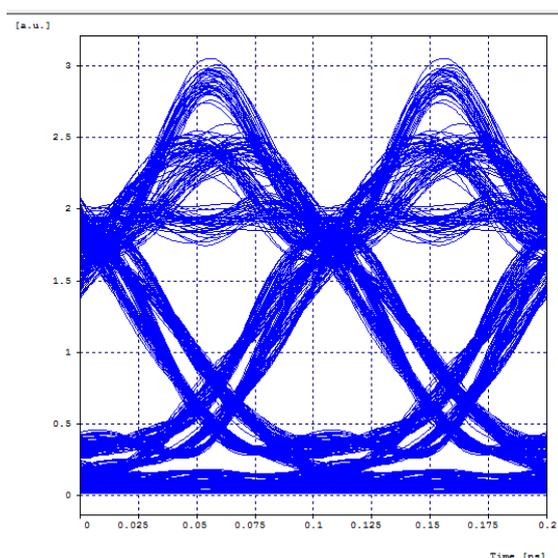


Figura 3.96 Sistema compensado módulo CCM, con CD acumulada de 1300ps/nm*Km a 10Gbps.

Los parámetros que se obtienen de esta configuración, se presentan a continuación:

Tabla 3.28 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las de las degradaciones del sistema. Enlace compensado módulo MATLAB a 10Gbps con CD acumulada de 1300ps/nm*Km.

Distancia [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
76	2.30e-13	17.23	0.0277

Dado lo anterior, se concluye que el módulo diseñado en el presente trabajo de grado, a una velocidad de 10Gbps, funciona en sistemas en los que su máxima longitud de enlace sea de 76Km; siendo éste el limitante de dicho módulo compensador; de lo contrario, el sistema no cumpliría con las normas internacionales. A continuación, se incluyen los valores que se generaron a partir de las 17 variaciones de CD, que se mencionaron anteriormente. La tabla 3.29 contiene dicha información, resaltando en rojo los valores limitantes obtenidos:

Tabla 3.29 Resultados Módulo CCM configurado al 100%.

CD [ps/nm*Km]	Jitter [ns]	BER	Factor Q [dB]
100	0.0167	1e-40	27.81
200	0.0183	1e-40	24.44
300	0.0169	4.10e-39	22.51
400	0.0143	9.50e-23	19.92
500	0.0152	2.27e-18	18.75
600	0.0156	2.31e-19	19.17
700	0.0159	5.44e-22	19.88
800	0.0171	1.29e-32	21.46
900	0.0210	1.49e-35	22.04
1000	0.0244	2.58e-29	21.10
1100	0.0271	2.19e-25	20.49
1200	0.0275	6.37e-18	18.74
1300	0.0279	4.85e-11	16.53
1400	0.0280	1.21e-7	14.58
1500	0.0281	2.57e-6	13.17
1600	0.0281	2.89e-5	12.10
1700	0.0285	¡Error!	11.49

En el transcurso de este capítulo se realizó el diseño e implementación del módulo compensador de dispersión cromática realizado en Matlab, haciendo la inmersión en su respectivo caso de estudio, de esta manera, fue posible realizar un análisis de los distintos modos de compensación existentes (pre, post y simétrico). Dicho análisis se obtuvo de las herramientas de simulación de OptSim® y se basó en los parámetros de monitoreo óptico aceptados por la ITU.

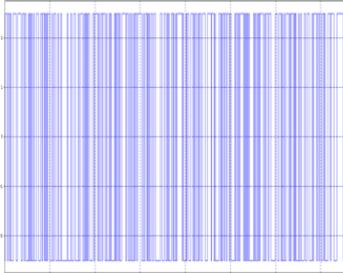
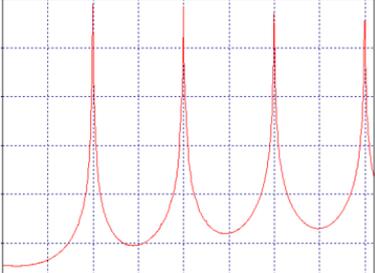
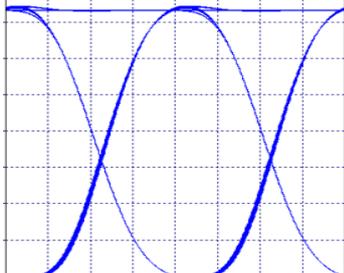
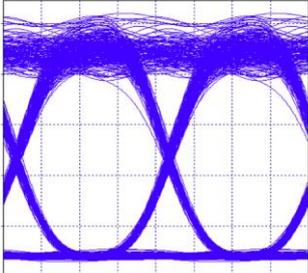
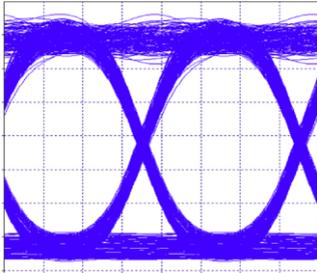
Se realizó el análisis a dos diferentes velocidades, esto con el fin de notar la influencia que tiene la velocidad de transmisión en los sistemas ópticos, esto conlleva a que:

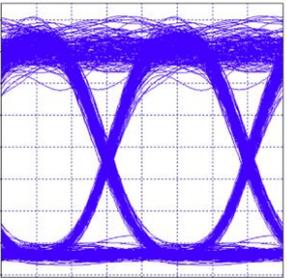
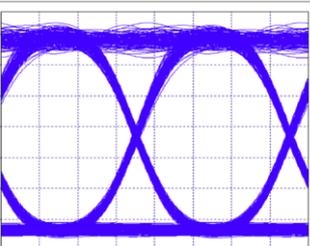
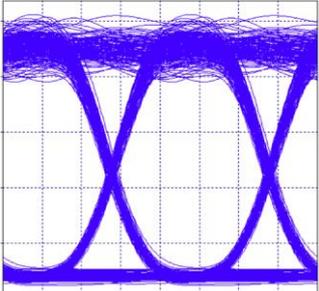
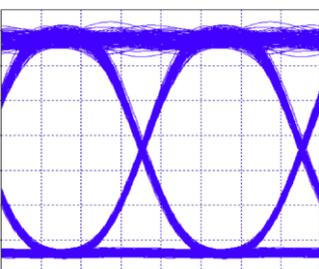
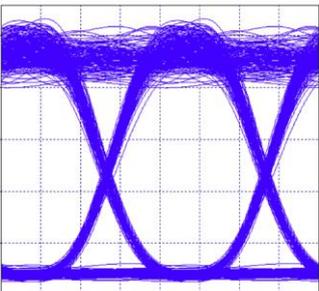
- En sistemas a 2.5Gb/s se determinó que los efectos que más aportan a la degradación del modelo, son el ruido, la atenuación y la Dispersión Cromática, sin embargo, bajo las características diseñadas para el enlace bajo la recomendación de la ITU, se determinó que los efectos como la PMD, SPM, XPM y FWM, no aportan significativamente.
- Es el módulo compensador de dispersión a una velocidad de 2.5Gbps diseñado en Matlab el que presenta la mejor tolerancia con respecto a los efectos lineales y no lineales, permitiendo mantener los parámetros de monitoreo óptico dentro de los rangos objetivo, y de esta manera corroborar el buen desempeño del enlace, notándose mejores resultados de este, frente a la DCF.
- A una velocidad de 10Gbps, el modulo compensador diseñado en Matlab presenta limitaciones. La dispersión se acumula tan rápido que el dispositivo no es capaz de operar la señal, haciendo que el sistema degrade la calidad de la información. Debido a lo anterior, se concluye que es

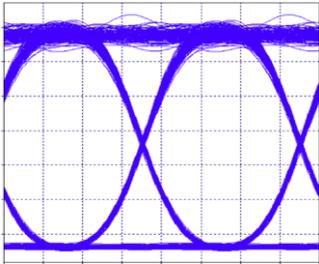
necesario disminuir la longitud del enlace, lo que implica que la dispersión total acumulada sea soportable por el módulo.

La información anteriormente suministrada, se encuentra reunida en la tabla presente a continuación:

Tabla 3.30 Tabla Resumen

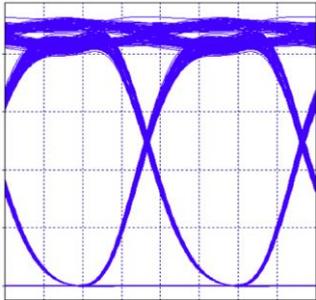
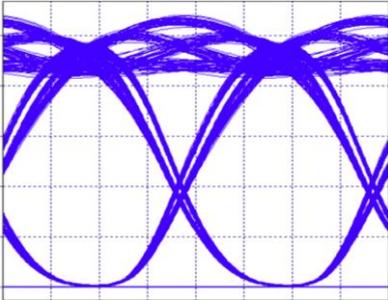
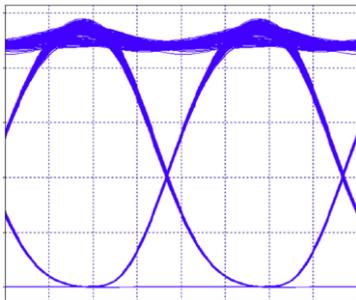
TABLA RESUMEN																	
SISTEMA BACK TO BACK																	
																	
																	
ENLACE A 2.5 Gbps																	
25%	DCF COMPENSADO SIMETRICAMENTE		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Distancia [Km]</th> <th>Canal [THZ]</th> <th>BER</th> <th>Factor Q [dB]</th> <th>Jitter [ns]</th> <th>P_{Rx} [dBm]</th> <th>OSNR_{OUT} [dB]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100</td> <td>194</td> <td>1e-40</td> <td>23.53</td> <td>0.0861</td> <td>-30.31</td> <td>49.10</td> </tr> </tbody> </table>	Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]	100	194	1e-40	23.53	0.0861	-30.31	49.10
	Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]										
100	194	1e-40	23.53	0.0861	-30.31	49.10											
CCM		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Distancia [Km]</th> <th>Canal [THZ]</th> <th>BER</th> <th>Factor Q [dB]</th> <th>Jitter [ns]</th> <th>P_{Rx} [dBm]</th> <th>OSNR_{OUT} [dB]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100</td> <td>194</td> <td>1e-40</td> <td>22.87</td> <td>0.071</td> <td>-12.5</td> <td>51.23</td> </tr> </tbody> </table>	Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]	100	194	1e-40	22.87	0.071	-12.5	51.23	
Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]											
100	194	1e-40	22.87	0.071	-12.5	51.23											

50%	<p>DCF POST COMPENSADO</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Distancia [Km]</th> <th>Canal [THZ]</th> <th>BER</th> <th>Factor Q [dB]</th> <th>Jitter [ns]</th> <th>P_{Rx} [dBm]</th> <th>OSNR_{OUT} [dB]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100</td> <td>194</td> <td>1e-40</td> <td>24.19</td> <td>0.0850</td> <td>-26.35</td> <td>47.43</td> </tr> </tbody> </table>	Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]	100	194	1e-40	24.19	0.0850	-26.35	47.43
	Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]									
100	194	1e-40	24.19	0.0850	-26.35	47.43										
<p>CCM</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Distancia [Km]</th> <th>Canal [THZ]</th> <th>BER</th> <th>Factor Q [dB]</th> <th>Jitter [ns]</th> <th>P_{Rx} [dBm]</th> <th>OSNR_{OUT} [dB]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100</td> <td>194</td> <td>1e-40</td> <td>27.24</td> <td>0.0707</td> <td>-12.66</td> <td>51.23</td> </tr> </tbody> </table>	Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]	100	194	1e-40	27.24	0.0707	-12.66	51.23	
Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]										
100	194	1e-40	27.24	0.0707	-12.66	51.23										
75%	<p>DCF COMPENSADO SIMETRICAMENTE</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Distancia [Km]</th> <th>Canal [THZ]</th> <th>BER</th> <th>Factor Q [dB]</th> <th>Jitter [ns]</th> <th>P_{Rx} [dBm]</th> <th>OSNR_{OUT} [dB]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100</td> <td>194</td> <td>1e-40</td> <td>21.6</td> <td>0.0783</td> <td>-29.69</td> <td>48.94</td> </tr> </tbody> </table>	Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]	100	194	1e-40	21.6	0.0783	-29.69	48.94
	Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]									
100	194	1e-40	21.6	0.0783	-29.69	48.94										
<p>CCM</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Distancia [Km]</th> <th>Canal [THZ]</th> <th>BER</th> <th>Factor Q [dB]</th> <th>Jitter [ns]</th> <th>P_{Rx} [dBm]</th> <th>OSNR_{OUT} [dB]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100</td> <td>194</td> <td>1e-40</td> <td>29.80</td> <td>0.0704</td> <td>-12.77</td> <td>51.23</td> </tr> </tbody> </table>	Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]	100	194	1e-40	29.80	0.0704	-12.77	51.23	
Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]										
100	194	1e-40	29.80	0.0704	-12.77	51.23										
100%	<p>DCF PRE COMPENSADO</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Distancia [Km]</th> <th>Canal [THZ]</th> <th>BER</th> <th>Factor Q [dB]</th> <th>Jitter [ns]</th> <th>P_{Rx} [dBm]</th> <th>OSNR_{OUT} [dB]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100</td> <td>194</td> <td>1e-40</td> <td>23.59</td> <td>0.0749</td> <td>-30.05</td> <td>48.90</td> </tr> </tbody> </table>	Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]	100	194	1e-40	23.59	0.0749	-30.05	48.90
Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]										
100	194	1e-40	23.59	0.0749	-30.05	48.90										

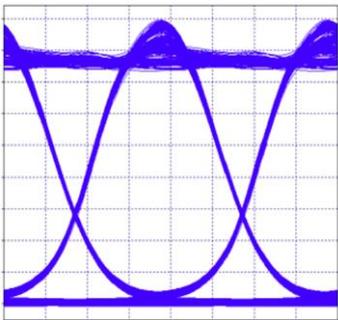
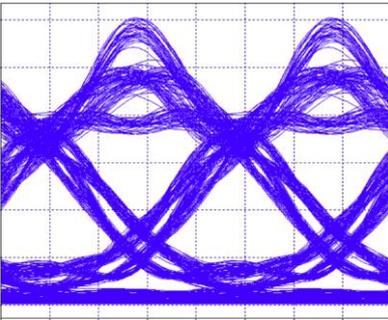
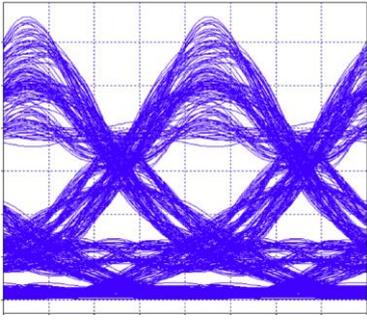
CCM		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Distancia [Km]</th> <th>Canal [THZ]</th> <th>BER</th> <th>Factor Q [dB]</th> <th>Jitter [ns]</th> <th>P_{Rx} [dBm]</th> <th>OSNR_{OUT} [dB]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100</td> <td>194</td> <td>1e-40</td> <td>31.23</td> <td>0.0701</td> <td>-12.76</td> <td>51.23</td> </tr> </tbody> </table>	Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]	100	194	1e-40	31.23	0.0701	-12.76	51.23
Distancia [Km]	Canal [THZ]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	P _{Rx} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]										
100	194	1e-40	31.23	0.0701	-12.76	51.23										

Enlace a 10 Gbps

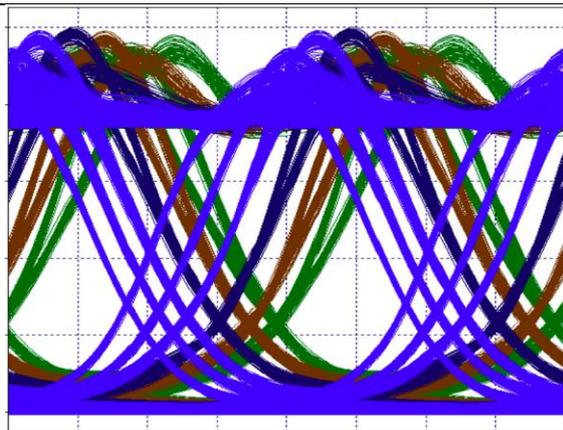
DCF - COMPENSADO 100%

POST	PRE	SIMETRICAMENTE																		
																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th>BER</th> <th>Factor Q [dB]</th> <th>Jitter [ns]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1e-40</td> <td>28.34</td> <td>0.0180</td> </tr> </tbody> </table>	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	1e-40	28.34	0.0180	<table border="1"> <thead> <tr> <th>BER</th> <th>Factor Q [dB]</th> <th>Jitter [ns]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1e-40</td> <td>27.89</td> <td>0.0257</td> </tr> </tbody> </table>	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	1e-40	27.89	0.0257	<table border="1"> <thead> <tr> <th>BER</th> <th>Factor Q [dB]</th> <th>Jitter [ns]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1e-40</td> <td>32.55</td> <td>0.0093</td> </tr> </tbody> </table>	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	1e-40	32.55	0.0093
BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]																		
1e-40	28.34	0.0180																		
BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]																		
1e-40	27.89	0.0257																		
BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]																		
1e-40	32.55	0.0093																		

CCM - COMPENSADO 100%

100ps/nm*Km	1300ps/nm*Km	1700ps/nm*Km																								
																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Distancia [Km]</th> <th>BER</th> <th>Factor Q [dB]</th> <th>Jitter [ns]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5.88</td> <td>1e-40</td> <td>27.81</td> <td>0.0167</td> </tr> </tbody> </table>	Distancia [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	5.88	1e-40	27.81	0.0167	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Distancia [Km]</th> <th>BER</th> <th>Factor Q [dB]</th> <th>Jitter [ns]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>76.47</td> <td>4.85e-12</td> <td>16.53</td> <td>0.0279</td> </tr> </tbody> </table>	Distancia [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	76.47	4.85e-12	16.53	0.0279	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Distancia [Km]</th> <th>BER</th> <th>Factor Q [dB]</th> <th>Jitter [ns]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100</td> <td>0</td> <td>11.49</td> <td>0.0285</td> </tr> </tbody> </table>	Distancia [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	100	0	11.49	0.0285
Distancia [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]																							
5.88	1e-40	27.81	0.0167																							
Distancia [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]																							
76.47	4.85e-12	16.53	0.0279																							
Distancia [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]																							
100	0	11.49	0.0285																							

CORRIMIENTO DE PULSOS DADO AUMENTO DE CD



CD [ps/nm*Km]	Jitter [ns]	BER	Factor Q [dB]
100	0.0167	1e-40	27.81
200	0.0183	1e-40	24.44
300	0.0169	4.10e-39	22.51
400	0.0143	9.50e-23	19.92
500	0.0152	2.27e-18	18.75
600	0.0156	2.31e-19	19.17
700	0.0159	5.44e-22	19.88
800	0.0171	1.29e-32	21.46
900	0.0210	1.49e-35	22.04
1000	0.0244	2.58e-29	21.10
1100	0.0271	2.19e-25	20.49
1200	0.0275	6.37e-18	18.74
1300	0.0279	4.85e-11	16.53
1400	0.0280	1.21e-7	14.58
1500	0.0281	2.57e-6	13.17
1600	0.0281	2.89e-5	12.10
1700	0.0285	0	11.49

CAPITULO 4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

El presente trabajo de grado estudia analíticamente el desempeño de la DCF, como también el diseño e implementación de un módulo compensador mediante los software Matlab® y OptSim® en comunicaciones ópticas, para hacer una comparación que genere criterios aplicables al desarrollo de las redes ópticas. Es importante resaltar, que los resultados obtenidos pueden ser aplicados a un contexto y necesidad específicos, lo cual es uno de los principales compromisos de la ingeniería.

En este capítulo se presentan conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros relacionados con el desarrollo del presente trabajo de grado, relacionando los aspectos más importantes que dieron cumplimiento a los objetivos propuestos.

4.1 Conclusiones

- Mediante la realización de este trabajo de grado, se determinó la incidencia que los efectos lineales y no lineales generan en relación al aumento de la velocidad en la transmisión de datos, observándose el limitante para el algoritmo diseñado.
- Por medio de la realización del presente trabajo de grado, se pudieron definir técnicas que permiten mitigar la dispersión cromática en sistemas DWDM, llevando a que los resultados obtenidos puedan aportar en decisiones futuras para el mejoramiento de las redes de fibra óptica.
- Un aspecto fundamental a destacar, es el resultado obtenido para el módulo CCM a 2.5Gbps, donde generó muy buenos resultados en cuanto a parámetros de monitoreo óptico frente a las degradaciones estudiadas. Lo anterior arrojó que, al obtener buenos valores de BER, jitter, OSNR, Factor Q el módulo trabaja a la par con respecto a los módulos que contiene OptSim®, generando de esta forma grandes expectativas para el futuro en las comunicaciones ópticas. Sin embargo y debido a los altos costos que conlleva la implementación física, es de resaltar que el módulo diseñado a partir de la lógica, presenta grandes ventajas presupuestales.
- Dado que, para el caso de 10 Gbps se acumula rápidamente la dispersión; únicamente compensando al 100%, y para una distancia mucho menor funciona el módulo diseñado, arrojando de esta manera el limitante de éste.
- Mediante el análisis del desempeño de los diferentes módulos compensadores de dispersión, se determinó que la escogencia de un módulo óptimo frente a los efectos lineales y no lineales, que mejore significativamente el desempeño de la red, dependerá de factores como la tasa de transmisión de datos, la distancia de transmisión, la capacidad y la arquitectura, así mismo, de las características del módulo compensador.

- Mediante la simulación de los distintos escenarios, se identificó que para que los módulos típicos implementados en OptSim® puedan funcionar de la mejor manera y estén dentro de los parámetros objetivo, se requieren altos valores de amplificación, caso contrario a lo obtenido mediante la inclusión del módulo.
- Debido a inconvenientes presentados por la herramienta OptSim® para realizar conversiones eléctrico-óptico, no fue posible la implementación de los modos pre y simétrico del módulo compensador diseñado.
- La versión 5.2 de OptSim® con la que cuenta la universidad, únicamente es compatible con Matlab de 32 bits de versiones 2007 o inferiores a esta.

4.2 Recomendaciones

Para realizar el estudio del desempeño de los módulos compensadores de dispersión y el modulo diseñado mediante un algoritmo en Matlab sobre comunicaciones ópticas, es necesario tener en cuenta una serie de recomendaciones que facilita la obtención y el análisis de los resultados, las cuales se presentan a continuación:

- Se debe definir el entorno de simulación y el alcance de la investigación, dado que los módulos compensadores de dispersión reaccionan de diferente manera frente a la variación de las características de la red.
- Por otra parte, para la realización de este proyecto se usó la herramienta de simulación OptSim® y Matlab®, licencias adquiridas por parte de la Universidad del Cauca, donde se pudo constatar que, debido a poseer diversas características de simulación, estas herramientas podrían ser utilizada para implementar nuevas materias electivas o laboratorios entorno a los sistemas WDM, permitiendo simular redes de nueva generación y facilitando su estudio y comprensión.
- Se debe tener en cuenta las condiciones que llevaron a la correcta co-simulación entre las herramientas, entre ellas: versiones compatibles y herramientas licenciadas.

4.3 Trabajos futuros

A través de cada una de las etapas de desarrollo del presente trabajo de grado, fue posible identificar nuevas investigaciones frente al desempeño módulos compensadores de dispersión en comunicaciones ópticas sobre redes WDM, tales como:

- Verificar la incidencia de los algoritmos diseñados en Matlab frente a los efectos lineales y no lineales a diferentes velocidades de transmisión de datos, con distintos espaciamentos y número de canales WDM.

- Realizar estudios centrados en el procesamiento digital de señales ópticas en el dominio eléctrico mediante la herramienta de simulación Matlab, debido a que no son ampliamente estudiados por su complejidad para ser implementados dentro de las redes de fibra óptica.
- Analizar la conversión eléctrico-óptica en OptSim® para así poder implementar el módulo en las diferentes configuraciones (pre-post-simétrica)
- Generar, en base a los resultados obtenidos en la presente investigación, nuevos módulos que compensen la dispersión cromática mediante la modificación del algoritmo base presentado en este trabajo de grado, con el fin de alcanzar mayores velocidades de transmisión y mayor capacidad de la red, sin incurrir en cambios significativos dentro del enlace.

ARTÍCULOS, PONENCIAS Y REPRESENTACIONES

El presente trabajo de grado, permitió generar el artículo denominado “METODOLOGÍA DE ENTORNOS DE CO-SIMULACIÓN PARA LAS HERRAMIENTAS MATLAB®/OPTSIM®”, donde por su relevancia y aporte fue aceptado en la Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada” de la Universidad de Pamplona.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. Collings, F. Heismann, G. Lietaert, "Reference Guide to Fiber Optic Testing", JDS Uniphase Corporation, Volume 2, 2010.
- [2] J. D. Herrera J. T. Toledo, "Análisis Comparativo del Desempeño de los Formatos de Modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK Frente a Técnicas de Compensación Ópticas de la Dispersión Cromática en Redes WDDM a 10Gbps", Universidad del Cauca, Popayán 2016.
- [3] P. G. Agrawal, "Fiber-optic communication systems", John Wiley & Sons, Vol. 222, 2012.
- [4] R. Ramaswami, K. Sivarajan, & G. Sasaki, "Optical Networks: A practical perspective", Edit Morgan Kaufman, Elsevier, Burlingong USA, 2010.
- [5] C. DeCusatis, "Dense Wavelength Division Multiplexing for parallel sysplex and metropolitan/storage area networks", Optical Networks, vol. 2, no.1, pp. 69-80, 2001.
- [6] F. Farahmand, "Contention Resolution and Burst Grooming Strategies in Layered Optical Burst-Switched Networks", Thesis Dissertation, 2005.
- [7] G. Sasaki & O. Gerstel, "Minimal cost WDM SONET rings that guarantee no blocking", Optical Networks Magazine, October, vol. 1, no. 4, 2000.
- [8] ITU-T Rec G.671, "Transmission Characteristics of Optical Components and Subsystems", Telecommunication Standardization Sector of ITU, Febrero, 2012.
- [9] E.I. Mena R. E. Mendoza, "Diseño de una red para Andinatel S.A en la Provincia de Tungurahua", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2009.
- [10] B. Chomycz, "Planning fiber optics networks", McGraw-Hill Education Group, 2009.
- [11] ITU-T Rec G.694.2, "Spectral grids for WDM applications: DWDM Wavelength grid", Telecommunication Standardization Sector of ITU, Marzo, 2012.
- [12] S. V. Kartalopoulos "Introduction to DWDM technology: data in a rainbow", SPIE Optical Engineering Press, 2000.
- [13] J. G. Lopez, "Diseño de Métodos Cross Layer Cognitivos Para Redes de Comunicacion Optica de Rafagas (OBS)", Tesis Doctoral, Facultad de Ingenieria Electrónica Y telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayan, 2014.
- [14] ITU-T Rec G.694.1, "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid", Telecommunication Standardization Sector of ITU, Febrero, 2012.

- [15] K. D. Pawan, S. Vibha, "Dispersion in Optical Fiber Communication", International Journal of Science and Research (IJSR), ISSN (Online): 2319-7064 Volume 3 Issue 10, October 2014.
- [16] L. Stepanek, "Chromatic dispersion in optical communications", Journal of Electrical and Electronic Engineering, vol VII, No. 2, 142–151, 2012.
- [17] R.K. Shevgaonkar, "Fiber Optics", Dept. of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology, Bombay, 2005.
- [18] G.P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", Ed. Academic Press, 2001.
- [19] Felice Domineco, "A Study of a Nonlinear Schrodinger Equation for Optical Fibers", Tesis doctoral, Facolta di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali, Università Degli Studi Di Firenze, Florencia, 2016.
- [20] R.J Florez, "Compensación de los Efectos de Propagación en Enlaces Ópticos", Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2016.
- [21] J. A.Guerrero, B. Medina, C. M. Serpa, I. Neil, "Compensación Digital de la Dispersión Cromática en Sistemas de Comunicaciones Ópticas Basados en Algoritmos CMA y MMSE", XVI Simposio de Tratamiento de Señales, Imágenes y Visión Artificial-STSIVA, Cali, 2011.
- [22] Brückner Volkmar, "Elements of Optical Networking Basics and Practice of Optical Data Communication", Springer, pp.194, October, 2011.
- [23] H. Salgado, "Dispersion in Optical Fibers", December 2007, [Online]. Available:https://paginas.fe.up.pt/~hsalgado/co/docs/phase_group_vel_dispersion.pdf [Accessed: 04-Oct-2017].
- [24] A. H. Puricelli, "Estudio y simulación de efectos no lineales en transmisión por Fibras ópticas", Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, 2010.
- [25] S. M. Gomez, "Control de la Dispersión Cromática en Guías Ranuradas Nanofotónicas", Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2009.
- [26] Fibercore. (2017). *Fibercore - Fibercore Fiberpeadia - Material dispersion*. [online] Available at: <http://fibercore.com/fiberpaedia/material-dispersion> [Accessed 5 Oct. 2017].
- [27] A. Ghatak and K. Thyagarajan, "Optical Waveguides and Fibers", University of Connecticut, Mansfield, 2000.
- [28] R. Ramaswami, K. Sivarajan, and Galen Sasaki, "*Optical networks: a practical perspective*", Morgan Kaufmann, 2009.
- [29] R. K. Sethi y A. Goel, "Dispersion Compensation in Optical Communication

System by Employing 16-QAM Modulation Using OFDM”, *IMPACT: International Journal of Research in Engineering & Technology (IMPACT: IJRET) ISSN (E): 2321-8843; ISSN (P): 2347-4599 Vol. 3, Issue 2, Feb 2015.*

- [30] D. F. Melo y J. A. Ruiz, “Análisis de Desempeño de Diferentes Técnicas de Compensación Ópticas y Electrónicas para la CD en Redes WDM”, Universidad del Cauca, Popayán, 2011.
- [31] S. Spolitis, V. Bobrovs, G. Ivanovs, “Realization of combined chromatic dispersion compensation methods in high speed WDM Optical transmission Systems”, Department of Telecommunications Engineering, vol 10, 33–38, 2011.
- [32] ITU-T Rec G.652, "Characteristics of a single-mode optical fibre and cable", Telecommunication Standardization Sector of ITU, Noviembre, 2016.
- [33] ITU-T Rec G.653, "Characteristics of a dispersion-shifted, single-mode optical fibre and cable", Telecommunication Standardization Sector of ITU, Julio, 2010.
- [34] ITU-T Rec G.655, "Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fiber and cable", Telecommunication Standardization Sector of ITU, Noviembre, 2009.
- [35] ITU-T Rec G.656, "Characteristics of a fiber and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport", Telecommunication Standardization Sector of ITU, Julio, 2010.
- [36] Corning Optical Communications, [online]. Available: <https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/COF-006-AEN.pdf>.
- [37] V. Srikant, "Broadband dispersion and dispersion slope compensation in high bit rate and ultra-long haul systems", Optical Fiber Communication Conference, California, 2001.
- [38] G. Muñoz, “*DWDM Networks When Using Raman Configurations with DCF Fibers*”, Universidad del Cauca, Popayán, 2017.
- [39] N. Kahlon, G. Kaur “Various dispersion Compensation techniques for optical system”, open journal of communications and software, volume 1, Number 1 (2014).
- [40] L. N. Binh, “Optical Fiber Communication Systems”, CRC Press, First edition, 2009.
- [41] ITU-T Rec G.959.1, "Optical transport network physical layer interfaces", Telecommunication Standardization Sector of ITU, Febrero, 2012.
- [42] R. Gutiérrez, “Diseño de un Enlace de Fibra Óptica”, Tesis de Grado,

Universidad Nacional Autónoma de México, México DF, 2007.

- [43] C. K. Chan, "Optical Performance Monitoring".
- [44] ITU-T Rec G.697, "Características de los medios de transmisión– Características de los componentes y los subsistemas ópticos", Telecommunication Standardization Sector of ITU, junio, 2004.
- [45] D. van den Borne, "Robust Optical Transmission Systems – Modulation and Equalization", Tesis doctoral, 2008.
- [46] ITU-T Rec. O.201, "Aparatos de medida para parámetros de canales ópticos", Telecommunication Standardization Sector of ITU, julio, 2003.
- [47] E. G. Manzano, "Optimización de las prestaciones de enlaces ópticos submarinos de gran capacidad y larga distancia mediante el control de la dispersión", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2006.
- [48] D. Knipp, T. Chakma, "Optical Signal to Noise Ratio (OSNR)", Presentación, International University Bremen, Spring, 2005.
- [49] J. A. Dinamarca Ossa, "Análisis de Diagramas de Ojo", Universidad Técnica Federico Santa María, 2002.
- [50] Matlab, "User Guide", Mathworks, 2014.
- [51] Matlab, "MathWoks" [online]. Available: https://la.mathworks.com/?s_tid=gn_logo, [Último acceso: 19/07/2018].
- [52] ETSETB. MATLAB. Fundamentos y/o Aplicaciones. Curso 11/12b.
- [53] RSoft, "OPTSIM USER GUIDE Physical Layer Division 400 Executive Boulevard", Suite 100 Ossining, NY 10562.
- [54] R. Coss, Simulación, un enfoque práctico.
- [55] M. A. López, G. Martínez, B. Reyes, M. Vázquez, C. Domínguez, "Simulación Digital", Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlan, Abril, 2008.
- [56] UIT-T Rec. G.691, "Interfaces ópticas para los sistemas monocal STM-64 y otros sistemas de la jerarquía digital síncrona con amplificadores ópticos", Telecommunication Standardization Sector of ITU, Marzo, 2006.
- [57] M. Zamorano, E. Moschim, S. Rossi, "Análisis del efecto del chirp sobre el desempeño de un sistema óptico", Universidad de Tarapacá, Chile, 2000.
- [58] Avanex Corporation, "PureGain 1500, Fixed Gain, Compact EDFA with Control Electronics", datasheet. 2005.

- [59] G. Gómez, J. F. Grijalba, "Análisis del desempeño de formatos de modulación en comunicaciones ópticas sobre redes WDM", Tesis Pregrado, Universidad del Cauca, Colombia, 2010.
- [60] F. Moliner, "Análisis del OSNR de configuraciones de enlaces de Fibra Óptica", Trabajo de grado, Dpto. de Ingeniería Informática, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, Noviembre de 2009.