

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE FORMATOS DE MODULACIÓN EN COMUNICACIONES  
ÓPTICAS SOBRE REDES WDM**



**JUAN FELIPE GRIJALBA GÓMEZ  
GUSTAVO ADOLFO GÓMEZ AGREDO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES – GNTT  
POPAYÁN  
JUNIO de 2010**

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE FORMATOS DE MODULACIÓN EN COMUNICACIONES  
ÓPTICAS SOBRE REDES WDM**

**JUAN FELIPE GRIJALBA GÓMEZ  
GUSTAVO ADOLFO GÓMEZ AGREDO**

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

**Director  
Ing. ALEJANDRO TOLEDO TOVAR**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES – GNTT  
POPAYÁN  
JUNIO de 2010**

*A todos los que de alguna manera  
Cambiaron el rumbo de mi vida,  
A todos los que caminaron junto a mí,  
Para ellos es este triunfo, para ellos.....*

*Gustavo Gómez*

*Dedico este triunfo a mis padres y toda mi familia,  
Por brindarme su apoyo y afecto incondicional,  
A todos los que han hecho parte de mi vida,  
Y al ángel que desde el cielo ha sido mi guía,  
Para todos ustedes de corazón...*

*Juan Felipe Grijalba Gómez*

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a: Alejandro Toledo Tovar, Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones y Director del proyecto, por sus valiosas orientaciones.

A Victor Quintero y Oscar Calderón, por su colaboración y consejos en este trabajo de grado, y a todos los ingenieros y profesores que hicieron parte de nuestro camino universitario y que recordaremos con alegría.

Un agradecimiento especial a Aldo Peruggia - AllOptic Designs, por ser guía y colaborador con la herramienta de simulación OptiSim de Rsoft, para cumplir con éxito los objetivos propuestos.

También expresamos un agradecimiento muy especial a nuestras familias, sin las cuales no podríamos terminar esta etapa de nuestras vidas y a todos nuestros amigos por su apoyo incondicional.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	XII
<b>1 FORMATOS DE MODULACIÓN UTILIZADOS EN COMUNICACIONES ÓPTICAS SOBRE REDES WDM .....</b>	<b>1</b>
1.1 EFECTOS LINEALES .....	1
1.1.1 Pérdidas de la Fibra Óptica (Atenuación y Ruido) .....	2
1.1.2 Dispersión por modo de Polarización (PMD) .....	3
1.1.3 Dispersión Cromática (CD) .....	3
1.2 EFECTOS NO LINEALES .....	5
1.2.1 Automodulación de Fase (SPM) .....	6
1.2.2 Modulación de Fase Cruzada (XPM) .....	7
1.2.3 Mezcla de Cuatro Ondas (FWM) .....	7
1.3 PARÁMETROS DE MONITOREO ÓPTICO .....	8
1.3.1 Factor Q .....	8
1.3.2 Tasa de Errores de Bit (BER) .....	9
1.3.3 Relación Señal a Ruido óptica (OSNR) .....	9
1.3.4 Diagrama del Ojo .....	10
1.3.5 Potencia del Canal Óptico .....	11
1.4 FORMATOS DE MODULACIÓN.....	11
1.4.1 NRZ-OOK .....	13
1.4.2 RZ-OOK.....	14
1.4.3 RZ-DQPSK .....	15
1.4.4 RZ-DPSK.....	16
<b>2 REDES WDM DENTRO DEL CONTEXTO NACIONAL.....</b>	<b>19</b>
2.1 GENERALIDADES WDM .....	19
2.2 CARACTERÍSTICAS DE REDES WDM DENTRO DEL CONTEXTO NACIONAL .....	21
2.2.1 Topologías de Red .....	22
2.2.2 Características de Red .....	23
2.2.3 Equipos implementados por operadores nacionales .....	24
2.3 CARACTERÍSTICAS ADICIONALES .....	25
2.3.1 Frecuencias Centrales Nominales para Sistemas WDM .....	25
2.3.2 Características de la fibra óptica mono-modo .....	26
2.3.3 Dispositivos de Compensación y Amplificación .....	27
2.4 GENERACIÓN DEL MODELO SIMPLIFICADO DE RED .....	29

<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN</b> .....	31
3.1	METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN.....	31
3.2	HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN .....	35
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE FORMATOS DE MODULACIÓN EN COMUNICACIONES ÓPTICAS SOBRE REDES WDM</b> .....	38
4.1	ESCENARIO 1, FORMATO DE MODULACIÓN NRZ-OOK.....	38
4.2	ESCENARIO 2, FORMATO DE MODULACIÓN RZ-DQPSK .....	57
4.3	ESCENARIO 3, FORMATO DE MODULACIÓN RZ-DPSK.....	78
4.4	ANÁLISIS COMPARATIVO DE FORMATOS DE MODULACIÓN DESDE LA PERSPECTIVA DE LA RELACIÓN COSTO-EFICIENCIA .....	96
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b> .....	100
5.1	CONCLUSIONES .....	100
5.2	RECOMENDACIONES.....	102
5.3	TRABAJOS FUTUROS .....	102
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	104
	<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	III
	<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	VIII
	<b>ACRÓNIMOS</b> .....	X

**ANEXO: COMPONENTES DE SISTEMAS WDM**

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPITULO 1.

Figura 1.1	Clasificación de los Efectos Lineales .....	1
Figura 1.2	Pérdidas de la fibra en función de la frecuencia y longitud de onda.....	2
Figura 1.3	PMD en fibra ideal y normal .....	3
Figura 1.4	Dispersión en función de la longitud de onda para los tipos de fibra más comunes	4
Figura 1.5	Clasificación de los Efectos no Lineales Intracanal .....	5
Figura 1.6	Clasificación de los Efectos no Lineales Intercanal .....	6
Figura 1.7	Efecto de la SPM sobre un pulso que se propaga.....	6
Figura 1.8	Generación de frecuencias adicionales debido a FWM.....	7
Figura 1.9	Definición del óptimo umbral de decisión .....	8
Figura 1.10	Distribución de probabilidad para “0” y “1” lógicos.....	9
Figura 1.11	Niveles de OSNR para transmisiones WDM con múltiples etapas.....	10
Figura 1.12	Parámetros del Diagrama del Ojo.....	11
Figura 1.13	Regiones del Diagrama del Ojo .....	11
Figura 1.14	Clasificación de los formatos de modulación de fase diferencial .....	11
Figura 1.15	Clasificación de los formatos de modulación en intensidad .....	12
Figura 1.16	Diagrama de bloques transmisor NRZ-OOK.....	14
Figura 1.17	Diagrama de bloques transmisor RZ-OOK.....	14
Figura 1.18	Diagrama de Constelaciones Modulación DQPSK.....	15
Figura 1.19	Diagrama de bloques transmisor RZ-DQPSK .....	16
Figura 1.20	Diagrama de bloques transmisor RZ-DPSK.....	17
Figura 1.21	Diagrama de constelaciones modulación binaria DPSK.....	17

### CAPITULO 2.

Figura 2.1	Espaciamiento de los Canales CWDM, recomendación ITU-T G.694.2.....	20
Figura 2.2	Distribución de los canales DWDM en el espectro óptico.....	20
Figura 2.3	Comparación entre espectro óptico CWDM y DWDM .....	21
Figura 2.4	Cobertura de red y topología de los anillos del operador .....	22
Figura 2.5	Cobertura de red y topología de los anillos del operador 2.....	23
Figura 2.6	Esquema básico de un dispositivo EDFA.....	28
Figura 2.7	Esquema general para un modelo simplificado de red .....	29

### CAPITULO 3.

Figura 3.1	Esquema general de los escenarios de simulación .....	32
Figura 3.2	Diagrama de flujo para el entorno de simulación.....	35
Figura 3.3	Técnicas de simulación de la Herramienta OptSim .....	36

**CAPITULO 4.**

Figura 4.1	Modelo simplificado de red para el formato de modulación NRZ-OOK .....	38
Figura 4.2 (a)	Diagrama del ojo en un Receptor Back to Back .....	39
Figura 4.2 (b)	Espectro óptico alrededor de los 194nm .....	39
Figura 4.3 (a)	Diagrama del ojo en un Receptor Back to Back .....	39
Figura 4.3 (b)	Diagrama del ojo tras un tramo de 130Km de fibra .....	39
Figura 4.3 (c)	Señal Eléctrica transmitida .....	39
Figura 4.3 (d)	Señal eléctrica en el receptor .....	39
Figura 4.3 (e)	Potencia en Recepción vs Distancia de Transmisión .....	40
Figura 4.3 (f)	BER vs Distancia de Transmisión .....	40
Figura 4.3 (g)	Factor Q vs Distancia de Transmisión.....	40
Figura 4.3 (h)	Espectro óptico en Recepción a una distancia máxima de 130Km con un potencia promedio de recepción por Canal del orden de los -16dBm .....	40
Figura 4.3 (i)	Degradación de la OSNR dependiente de la distancia de transmisión.....	40
Figura 4.4	Espectro óptico en Recepción a 130Km con altas potencias de Tx .....	41
Figura 4.5 (a)	Diagrama del ojo para un Span de 130Km.....	42
Figura 4.5 (b)	Diagrama del ojo para dos Span de 130Km.....	42
Figura 4.5 (c)	Diagrama del ojo para tres Span de 130Km.....	42
Figura 4.6 (a)	Diagrama del ojo para un Span de 72Km obteniendo una BER = 1e-40, distancia total = 72Km.....	43
Figura 4.6 (b)	Diagrama del ojo para tres Span de 72Km obteniendo una BER = 1e-40, distancia total = 216Km.....	43
Figura 4.6 (c)	Diagrama del ojo para cinco Span de 72Km obteniendo una BER = 5.80e-37 distancia total = 360Km .....	43
Figura 4.6 (d)	Diagrama del ojo para siete Span de 72Km obteniendo una BER = 5.03e-33 distancia total = 504Km .....	44
Figura 4.7 (a)	Espectro óptico Transmitido .....	44
Figura 4.7 (b)	Espectro óptico en Recepción .....	44
Figura 4.7 (c)	Señal Eléctrica Transmitida .....	44
Figura 4.7 (d)	Señal Eléctrica en Recepción .....	44
Figura 4.7 (e)	Diagrama del Factor Q vs Distancia máxima del enlace.....	44
Figura 4.7 (f)	Diagrama de la BER vs Distancia máxima del enlace .....	44
Figura 4.7 (g)	Potencia en recepción vs Distancia máxima del enlace.....	45
Figura 4.7 (h)	Diagrama de la OSNR vs Distancia máxima del enlace .....	45
Figura 4.8 (a)	Diagrama del ojo sin efectos de pérdidas o ruido introducido por los elementos de red y el tramo de fibra a 130Km.....	46
Figura 4.8 (b)	Diagrama del ojo con efectos de pérdidas y ruido introducido por los elementos de la red y el tramo de fibra a 130Km.....	46
Figura 4.9	Diagrama del Ojo a 72Km afectado solo por la atenuación introducida por la fibra, el ruido de los amplificadores y el ruido de los transmisores .....	47
Figura 4.10 (a)	Diagrama del ojo sin efecto de la Dispersión Cromática.....	47
Figura 4.10 (b)	Efecto de la Dispersión Cromática en el Diagrama del ojo .....	47
Figura 4.11 (a)	Diagrama del Ojo sin compensación de la CD .....	48
Figura 4.11 (b)	Diagrama del Ojo compensando en 100% la CD .....	48
Figura 4.12 (a)	Diagrama del ojo para siete tramos de fibra concatenados de 72km sin compensación de la CD.....	49

Figura 4.12 (b) Diagrama del ojo para siete tramos de fibra concatenados de 72km con compensación de la CD.....	49
Figura 4.13 (a) Diagrama del ojo para un Span de 130Km sin considerar otras degradación con una PMD=0.2 .....	50
Figura 4.13 (b) Diagrama de la DGD vs Parámetro Fuente (Seed) .....	50
Figura 4.14 (a) Diagrama del ojo para un Span de 130Km sin considerar otras degradación con una PMD=20.....	51
Figura 4.14 (b) Diagrama del ojo para un Span de 130Km sin considerar otras degradación con una PMD=30.....	51
Figura 4.14 (c) Diagrama del ojo para un Span de 130Km sin considerar otras degradación con una PMD=40.....	51
Figura 4.15 (a) Diagrama del ojo con potencia EFDA=0dBm .....	52
Figura 4.15 (b) Diagrama del ojo con potencia EFDA=21dBm .....	52
Figura 4.16 (a) Diagrama del ojo frente a un régimen de dispersión normal ( $CD < 0$ ) $CD = -10$ .....	52
Figura 4.16 (b) Diagrama del ojo frente a un régimen de dispersión Cero $CD = 0$ .....	52
Figura 4.16 (c) Diagrama del ojo frente a un régimen de dispersión anómalo ( $CD > 0$ ) $CD = 10$ .....	53
Figura 4.17 (a) Diagrama del ojo en relación a la XPM con una $CD = 2 \text{ps/nm} \cdot \text{Km}$ .....	53
Figura 4.17 (b) Diagrama del ojo en relación a la XPM con una $CD = 10 \text{ps/nm} \cdot \text{Km}$ .....	53
Figura 4.17 (c) Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida (rojo) dependientes de la XPM.....	54
Figura 4.18 (a) Variación de Potencia vs efecto de la FWM debido al cambio de la CD .....	55
Figura 4.18 (b) Espectro óptico mostrando la generación de canales no deseados debido a la condición de phase-matching para una $CD = 0$ .....	55
Figura 4.18 (c) Espectro óptico mostrando la generación de canales no deseados debido a la condición de phase-matching para una $CD = 1$ .....	55
Figura 4.18 (d) Espectro óptico mostrando la generación de canales no deseados debido a la condición de phase-matching para una $CD = 2$ .....	56
Figura 4.18 (e) Espectro óptico mostrando la generación de canales no deseados debido a la condición de phase-matching para una $CD = 3$ .....	56
Figura 4.19 Modelo simplificado de red para el formato de modulación RZ-DQPSK .....	57
Figura 4.20 (a) Salida no Modulada del Formato RZ-DQPSK .....	57
Figura 4.20 (b) Salida Modulada del Formato RZ-DQPSK Back to Back.....	57
Figura 4.20 (c) Espectro Óptico para un solo canal .....	58
Figura 4.20 (d) Espectro Óptico para cuatro canales a 100GHz de espaciamiento.....	58
Figura 4.21 (a) Diagrama del ojo tras un span de 130Km RZ-DQPSK .....	58
Figura 4.21 (b) Espectro óptico en recepción con una Potencia de transmisión del orden de los -38dBm .....	58
Figura 4.22 (a) Diagrama del ojo a 130Km con una potencia de amplificación de 0dBm .....	60
Figura 4.22 (b) Diagrama del ojo a 130Km con una potencia de amplificación de 15dBm .....	60
Figura 4.22 (c) Espectro óptico con una Potencia en recepción del orden de los -27dBm.....	60
Figura 4.23 Mejoras introducidas al modelo para obtener la máxima distancia de transmisión mediante el formato RZ-DQPSK.....	60
Figura 4.24 (a) Diagrama del ojo a 130Km con un FWHM=0MHz.....	61
Figura 4.24 (b) Diagrama del ojo a 130Km con un FWHM=2.5MHz .....	61
Figura 4.25 (a) Diagrama del ojo a 150Km después de mejoras en amplificación .....	61
Figura 4.25 (b) Señal Eléctrica transmitida mediante un generador de secuencia pseudo aleatoria a 2.5Gb/s .....	61
Figura 4.25 (c) Señal eléctrica en el receptor .....	62

Figura 4.25 (d) Potencia en Recepción vs Distancia de Transmisión .....	62
Figura 4.25 (e) Factor Q vs Distancia de Transmisión.....	62
Figura 4.25 (f) BER vs Distancia de Transmisión.....	62
Figura 4.25 (g) Espectro óptico en Recepción a una distancia máxima de 150Km con un potencia promedio de recepción por Canal del orden de los -14dBm .....	62
Figura 4.26 (a) Diagrama del ojo con un solo span distancia total = 150Km sin compensar la CD .....	64
Figura 4.26 (b) Diagrama del ojo con dos span distancia total = 300Km sin compensar la CD.....	64
Figura 4.27 (a) Diagrama del ojo con un solo span distancia total = 150Km compensando la CD .....	64
Figura 4.27 (b) Diagrama del ojo con dos span distancia total = 300Km compensando en 100% la CD .....	64
Figura 4.28 (a) Diagrama del ojo para 6 span concatenados de 84Km con una distancia total = 504 compensando CD .....	65
Figura 4.28 (b) Espectro óptico en recepción con una potencia de -20dBm .....	65
Figura 4.28 (c) Factor Q vs Distancia de transmisión.....	65
Figura 4.28 (d) Diagrama de la BER vs Distancia de transmisión.....	65
Figura 4.28 (e) potencia en Recepción por canal vs Distancia de transmisión.....	65
Figura 4.28 (f) Diagrama de la OSNR vs Distancia de transmisión.....	65
Figura 4.28 (g) Señal eléctrica transmitida no modulada.....	66
Figura 4.28 (h) Señal eléctrica en recepción modulada.....	66
Figura 4.29 (a) Diagrama del ojo sin efectos de pérdidas o ruido introducido por los elementos de red y el tramo de fibra a 150Km con FWHM=0MHz .....	67
Figura 4.29 (b) Diagrama del ojo con efectos de pérdidas y ruido introducido por los elementos de la red y el tramo de fibra a 150Km con FWHM=0MHz.....	67
Figura 4.30 (a) Diagrama del ojo sin efecto de la Dispersión Cromática.....	69
Figura 4.30 (b) Efecto de la Dispersión Cromática en el Diagrama del ojo .....	69
Figura 4.31 (a) Diagrama del Ojo compensando 100% la CD .....	69
Figura 4.31 (b) Diagrama del Ojo sin compensación de la CD .....	69
Figura 4.32 (a) Diagrama del Ojo compensando 100% la CD .....	70
Figura 4.32 (b) Diagrama del Ojo para 6 span sin compensación de la CD.....	70
Figura 4.33 (a) Diagrama del Ojo para un span de 150Km con el parámetro CD=0 .....	70
Figura 4.33 (b) Diagrama del Ojo para un span de 150Km con el parámetro CD=40.....	70
Figura 4.34 (a) Diagrama del ojo para un Span de 150Km sin considerar otras degradaciones con una PMD=0.2 .....	71
Figura 4.34 (b) Diagrama del ojo para un Span de 150Km sin considerar otras degradaciones, con una PMD=1 .....	71
Figura 4.34 (c) Diagrama de la DGD vs Parámetro Fuente (Seed) .....	72
Figura 4.34 (d) Diagrama de la DGD vs Parámetro PMD (All-Order-PMD) .....	72
Figura 4.35 (a) Diagrama del ojo para un Span de 150Km sin considerar otras degradaciones con una PMD=0.....	72
Figura 4.35 (b) Diagrama del ojo para un Span de 150Km sin considerar otras degradaciones con una PMD=40.....	72
Figura 4.36 (a) Diagrama del ojo con potencia EFDA=14dBm .....	73
Figura 4.36 (b) Diagrama del ojo con potencia EFDA=21dBm .....	73
Figura 4.37 (a) Diagrama del ojo frente a un régimen de dispersión normal (CD<0) CD=-10.....	74
Figura 4.37 (b) Diagrama del ojo frente a un régimen de dispersión anómalo (CD>0) CD=10.....	74

Figura 4.37 (c) Diagrama del ojo frente a un dispersión cromática cero $CD=0$ .....	74
Figura 4.38 (a) Efecto de la XPM sobre el Diagrama del ojo para una $CD = 0$ .....	75
Figura 4.38 (b) Efecto de la XPM sobre el Diagrama del ojo para una $CD = 2$ .....	75
Figura 4.39 Efecto de la XPM sobre el Espectro óptico .....	75
Figura 4.40 (a) Espectro óptico transmitido.....	76
Figura 4.40 (b) Espectro óptico mostrando para una $CD = 0$ .....	76
Figura 4.40 (c) Espectro óptico mostrando la generación de canales no deseados para una $CD=1$ .....	77
Figura 4.40 (d) Espectro óptico mostrando la generación de canales no deseados para una $CD=3$ .....	77
Figura 4.41 Modelo simplificado de red para el formato de modulación RZ-DPSK.....	78
Figura 4.42 (a) Salida no Modulada del Formato RZ-DPSK.....	78
Figura 4.42 (b) Salida Modulada del Formato RZ-DPSK Back to Back.....	78
Figura 4.42 (c) Espectro Óptico para un solo canal .....	79
Figura 4.42 (d) Espectro Óptico para cuatro canales a 100GHz de espaciamiento.....	79
Figura 4.43 (a) Diagrama del ojo tras un span de 130Km RZ-DPSK.....	80
Figura 4.43 (b) Espectro óptico en con una Potencia de recepción por canal del orden de los -33dBm .....	80
Figura 4.44 (a) Diagrama del ojo con mejoras en potencias.....	80
Figura 4.44 (b) Espectro óptico con una Potencia de -26dBm.....	80
Figura 4.45 Formato de modulación RZ-DPSK implementado mejoras en pre-amplificación....	81
Figura 4.46 (a) Diagrama del ojo tras un span de 180Km con pre-amplificación.....	82
Figura 4.46 (b) Espectro óptico con una potencia en recepción -20dBm .....	82
Figura 4.46 (c) Señal eléctrica en el receptor .....	82
Figura 4.46 (d) Señal Transmitida no modulada .....	82
Figura 4.46 (e) Potencia en recepción vs Distancia de Transmisión.....	82
Figura 4.46 (f) BER vs Distancia de Transmisión.....	82
Figura 4.46 (g) Diagrama del Factor Q vs Distancia de Transmisión.....	83
Figura 4.46 (h) Diagrama de la OSNR vs Distancia de Transmisión.....	83
Figura 4.47 (a) Diagrama del ojo para 500Km mediante 5 segmentos de red .....	83
Figura 4.47 (b) Espectro óptico con una Potencia de -16dBm.....	83
Figura 4.48 (a) Diagrama del ojo para 500Km mediante 5 segmentos de red .....	84
Figura 4.48 (b) Espectro óptico con una potencia del orden de los -18dBm .....	84
Figura 4.48 (c) Señal Eléctrica Transmitida .....	84
Figura 4.48 (d) Señal Eléctrica en el Receptor.....	84
Figura 4.48 (e) Diagrama del Factor Q vs Distancia de Transmisión.....	84
Figura 4.48 (f) Diagrama de la BER vs Distancia de Transmisión .....	84
Figura 4.48 (g) Potencia de Recepción vs Distancia de Transmisión .....	85
Figura 4.48 (h) Diagrama de la OSNR vs Distancia de Transmisión.....	85
Figura 4.49 (a) Diagrama del ojo a 180Km afectado por el ruido y la atenuación de los elementos de red.....	86
Figura 4.49 (b) Diagrama del ojo a 180Km sin considerar el ruido y la atenuación .....	86
Figura 4.50 (a) Diagrama del ojo sin efecto de la Dispersión Cromática.....	87
Figura 4.50 (b) Diagrama del ojo con efecto de la Dispersión Cromática.....	87
Figura 4.51 (a) Diagrama del Ojo compensando 100% la CD para un span de 180Km .....	88
Figura 4.51 (b) Diagrama del Ojo sin compensación de la CD para un span de 180Km .....	88

Figura 4.52 (a) Diagrama del Ojo compensando 100% la CD para 5 segmentos de red con 500Km .....	88
Figura 4.52 (b) Diagrama del Ojo sin compensación de la CD para 5 segmentos de red con 500Km .....	88
Figura 4.53 (a) Diagrama del Ojo para un span de 150Km con el parámetro CD=0 .....	89
Figura 4.53 (b) Diagrama del Ojo para un span de 150Km con el parámetro CD=17.....	89
Figura 4.53 (c) Diagrama del Ojo para un span de 150Km con el parámetro CD=50.....	89
Figura 4.53 (d) Diagrama del Factor Q dependiente del parámetro CD.....	89
Figura 4.54 (a) Diagrama del ojo para un Span de 180Km sin considerar otras degradación con una PMD=0.2 .....	90
Figura 4.54 (b) Diagrama del ojo para un Span de 180Km sin considerar otras degradación con una PMD=40 .....	90
Figura 4.55 (a) Diagrama de la DGD vs Parámetro PMD (All-Order-PMD) .....	90
Figura 4.55 (b) Diagrama de la DGD vs Parámetro Fuente (Seed) .....	90
Figura 4.56 (a) Diagrama del ojo con potencia EFDA=9dBm .....	91
Figura 4.56 (b) Diagrama del ojo con potencia EFDA=21dBm .....	91
Figura 4.57 (a) Diagrama del ojo frente a un régimen de dispersión normal (CD<0) CD=-10.....	92
Figura 4.57 (b) Diagrama del ojo frente a un régimen de dispersión cero CD=0.....	92
Figura 4.57 (c) Diagrama del ojo frente a un régimen de dispersión anómalo (CD>0) CD=10.....	92
Figura 4.58 (a) Efecto de la XPM sobre el Diagrama del ojo para una CD = 0.....	93
Figura 4.58 (b) Efecto de la XPM sobre el Diagrama del ojo para una CD = 4.....	93
Figura 4.59 Efecto de la XPM sobre el Espectro óptico .....	93
Figura 4.60 (a) Espectro óptico mostrando la generación de canales para una CD = 0.....	94
Figura 4.60 (b) Espectro óptico mostrando la generación de canales para una CD = 1 .....	94
Figura 4.60 (c) Espectro óptico mostrando la generación de canales para una CD = 2 .....	94
Figura 4.60 (d) Espectro óptico mostrando la generación de canales para una CD = 3.....	94

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPITULO 2.

Tabla 2.1	Parámetros típicos en redes CWDM y DWDM .....	19
Tabla 2.2	Parámetros Técnicos de las tarjetas STM-64 Equipo OSN3500.....	24
Tabla 2.3	Parámetros Técnicos de las tarjetas STM-16 Equipo OSN3500.....	25
Tabla 2.4	Plan de Frecuencias para 32 canales a 100GHz.....	26
Tabla 2.5	Parámetros de la fibra óptica mono-modo ITU-T G.652 .....	27
Tabla 2.6	Características del Modelo Simplificado de Red.....	30

### CAPITULO 3.

Tabla 3.1	Características básicas del escenario de simulación.....	33
Tabla 3.2	Definición de los escenarios de simulación.....	34

**CAPITULO 4.**

Tabla 4.1	Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones del sistema.....	41
Tabla 4.2	Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones del sistema mediante segmentos de red concatenados.....	45
Tabla 4.3	Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones de las pérdidas y el ruido.....	46
Tabla 4.4	Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la CD en un span de 130Km implementando fibra compensadora DCF.....	48
Tabla 4.5	Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones del sistema mediante segmentos de red concatenados dependientes de la CD.....	49
Tabla 4.6	Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la PMD en un span de 130Km.....	51
Tabla 4.7	Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la XPM para un span de 130Km mediante la variación de la dispersión cromática.....	54
Tabla 4.8	Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones del sistema para una configuración de referencia optima de NRZ-OOK.....	59
Tabla 4.9	Parámetros de monitoreo óptico dependientes de FWMH.....	61
Tabla 4.10	Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones del sistema con mejoras en la potencia de transmisión y la potencia de amplificación (óptima RZ-DQPSK).....	63
Tabla 4.11	Parámetros de monitoreo óptico dependientes de la mínima distancia del enlace (500Km) mediante segmentos de red concatenados.....	66
Tabla 4.12	Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones de las pérdidas y el ruido con FWMH=0MHz.....	67
Tabla 4.13	Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones de las pérdidas y el ruido con FWMH=1MHz.....	68
Tabla 4.14	Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la CD.....	69
Tabla 4.15	Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la PMD en un span de 150Km.....	72
Tabla 4.16	Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones del sistema para el formato RZ-DPSK.....	79
Tabla 4.17	Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones del sistema con incremento en la potencia de amplificación para el formato RZ-DPSK.....	80
Tabla 4.18	Parámetros de monitoreo óptico implementando mejoras en amplificación.....	81
Tabla 4.19	Parámetros de monitoreo óptico dependientes de la distancia del enlace (500Km) mediante segmentos de red concatenados.....	85
Tabla 4.20	Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las pérdidas y el ruido.....	86
Tabla 4.21	Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la CD en un span de 150Km implementando fibra compensadora DCF.....	87
Tabla 4.22	Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la PMD en un span de 180Km.....	91
Tabla 4.23	Análisis comparativo de los formatos de modulación.....	96
Tabla 4.24	Análisis comparativo de los formatos de modulación con respecto a la máxima distancia alcanzada para un segmento de red.....	97
Tabla 4.25	Análisis comparativo de los formatos de modulación con respecto al mínimo de recursos implementados para segmentos de red concatenados.....	98

Tabla 4.26 Análisis comparativo de los formatos de modulación desde la perspectiva de la relación costo-eficiencia.....98

## ACRÓNIMOS

ACRZ:	Chirp Alternante con Retorno a Cero (Alternate-Chirp Return to Zero)
ASE:	Emisiones Espontáneas Amplificadas (Amplified Spontaneous Emission)
BER:	Tasa de Error de Bit (Bit Error Rate)
CD:	Dispersión Cromática (Chromatic Dispersion)
CRZ:	Retorno a Cero con Chirp (Chirped Return to Zero)
C-NRZ:	No retorno a Cero con Chirp (Chirped Nonreturn to Zero)
CSRZ:	Retorno a Cero con Supresor de Portadora (Carrier-Suppressed Return to Zero)
CWDM:	Multiplexación por División de Longitud de Onda Ampliamente Espaciada (Coarse Wavelength División Multiplexing)
D:	Dispersión (Dispersion)
DB:	Duobinario (Duobinary)
DCF:	Fibra Compensadora de Dispersión (Dispersion-Compensating Fiber)
DGD:	Retardo de Grupo Diferencial (Differential Group Delay)
DI:	Interferómetro de retraso (Delay Interferometer)
DPSK:	Modulación por desplazamiento diferencial de fase (Differential Phase Shift Keying)
DQPSK:	Modulación por desplazamiento por cuadratura diferencial de fase (Differential Quadrature Phase Shift Keying)
DS:	Dispersión Residual (Dispersion Slope)
DST:	Transmisión de Dispersión Soportada (Dispersion-Supported Transmission)
DWDM:	Multiplexación por División de Longitud de Onda Densamente Espaciada (Dense Wavelength División Multiplexing)
EAM:	Modulador de Electro-Absorción (Electroabsorption Modulator)
EDFA:	Amplificador de Fibra Dopada de Erbium (Erbium Doped Fiber Amplifier)
ESNR:	Relación Señal a Ruido Eléctrica (Electrical Signal to Noise Ratio)
FWHM:	Ruido de fase del láser (Full Width at Half Maximum)
FWM:	Mezcla de Cuatro Ondas (Four-Wave Mixing)
GVD:	Dispersión de Velocidad Grupal (Group Velocity Dispersion)
IFWM:	Mezcla Intracanal de Cuatro Ondas (Intrachannel Four-Wave Mixing)
IP:	Protocolo de Internet (Internet Protocol)
ITU-T:	Unión Internacional de Telecomunicaciones – Telecomunicaciones (International Telecommunication Union)
IXPM:	Modulación Intracanal de Fase Cruzada (Intrachannel Cross-Phase Modulation)
LAN:	Red de Área Local (Local Area Network)
MAN:	Red de Área Metropolitana (Metropolitan Area Network)
M-ASK:	Modulación por desplazamiento de Amplitud Multinivel (Multinivel Amplitud Shift Keying)
MI:	Inestabilidad de Modulación (Modulation Instability)
MZIM:	Modulador Mach-Zenhder Interferométrico (Mach-Zenhder Interferometric Modulator)
MZM:	Modulador Mach-Zenhder (Mach-Zenhder Modulator)
NRZ:	No Retorno a Cero (Nonreturn to Zero)
OA:	Amplificador Óptico (Optical Amplifier)
OOK:	Llaveo de encendido apagado (On-Off Keying)
OSNR:	Relación Señal a Ruido Óptico (Optical Signal to Noise Ratio)

<i>PASS:</i>	<i>Señalización por Desplazamiento de Amplitud-Fase (Phased Amplitud Shift Signaling)</i>
<i>PDFWM:</i>	<i>Mezcla de Cuatro Ondas Degenerado Parcialmente (Partial Degenerated Four-Wave Mixing)</i>
<i>PDH:</i>	<i>Jerarquía Digital Plesiócrona (Plesiochronous Digital Hierarchy)</i>
<i>PMD:</i>	<i>Dispersión por Modo de Polarización (Polarization Mode Dispersion)</i>
<i>PSBT:</i>	<i>Transmisión Binaria Fase-Formada (Phase-Shaped Binary Transmission)</i>
<i>PSP:</i>	<i>Estado Principal de Polarización (Principal State of Polarization)</i>
<i>QPSK:</i>	<i>Modulación por desplazamiento de cuadratura de fase (Quadrature Phase Shift Keying)</i>
<i>RZ:</i>	<i>Retorno a cero (Return to Zero)</i>
<i>SBS:</i>	<i>Dispersión Estimulada de Brillouin (Stimulated Brillouin-Scattering)</i>
<i>SDH:</i>	<i>Jerarquía Digital Síncrona (Synchronous Digital Hierarchy)</i>
<i>SONET:</i>	<i>Redes Ópticas Síncronas (Synchronous Optical Network)</i>
<i>SPM:</i>	<i>Automodulación de Fase (Self-Phase Modulation)</i>
<i>SPT:</i>	<i>Técnica de Propagación Espectral (Spectral Propagation Technique)</i>
<i>SRS:</i>	<i>Dispersión Estimulada de Raman (Stimulated Raman-Scattering)</i>
<i>SSB:</i>	<i>Banda Lateral Única (Single Sideband)</i>
<i>SSMF:</i>	<i>Estándar de Fibra Monomodo (Standard Single-Mode Fiber)</i>
<i>STM:</i>	<i>Módulo de Transporte Síncrono (Synchronous Transport Module)</i>
<i>VBS:</i>	<i>Técnica de Ancho de Banda Variable (Variable Bandwidth Simulation Technique)</i>
<i>VSF:</i>	<i>Banda Lateral Residual (Vestigial Sideband)</i>
<i>WAN:</i>	<i>Red de Área Amplia (Wide Area Network)</i>
<i>WDM:</i>	<i>Multiplexación por División de Longitud de Onda (Wavelength División Multiplexing)</i>
<i>XPM:</i>	<i>Modulación de Fase Cruzada (Cross-Phase Modulation)</i>
<i>XPolM:</i>	<i>Modulación de Cross Polarización (Cross-Polarization Modulation)</i>



## INTRODUCCIÓN

Con el fin de alcanzar una alta tasa de transferencia de datos sobre la fibra óptica y al mismo tiempo mantener costos de transporte reducidos, las redes ópticas actuales han evolucionado al lograr una mejora en la eficiencia espectral, donde los formatos de modulación se han convertido en la clave para diseñar sistemas modernos WDM, siendo más tolerantes frente a los efectos lineales y no lineales y otras degradaciones presentes optimizando el desempeño de la red, donde algunos formatos de modulación que han sido ampliamente utilizados por algún tiempo ya no son formatos óptimos para la siguiente generación de sistemas ópticos.

El presente trabajo de grado analiza de manera comparativa, el desempeño de los formatos de modulación que han recibido mayor atención en el contexto de los sistemas ópticos, con respecto a los efectos lineales y no lineales, para determinar cuál formato aporta la mejor relación costo-eficiencia, basados en las características de las redes dentro del contexto nacional. Así mismo, se genera un estudio detallado sobre los efectos lineales, no lineales y otras degradaciones ópticas, con respecto a los formatos de modulación implementados.

Debido a que dentro del contexto nacional e institucional, no existe ninguna referencia de investigación sobre esta temática, los resultados obtenidos son una plataforma para nuevas investigaciones centradas sobre los formatos avanzados de modulación para los operadores nacionales que implementan sistemas WDM. Del mismo modo, se deja una base teórica sobre nuevos y mejores formatos, los cuales aportan significativamente a mejorar el desempeño de la red.

Con el fin de abordar los temas requeridos para el desarrollo del trabajo de grado, el contenido se divide en cinco capítulos de la siguiente manera:

### **Capítulo 1. Formatos de modulación utilizados en comunicaciones ópticas sobre redes WDM.**

Se definen los efectos lineales y no lineales, que aportan las limitaciones más significativas en sistemas de fibra óptica, se seleccionan los parámetros de monitoreo óptico, con los cuales se evaluará a nivel físico el desempeño de los formatos de modulación que puedan generar mayor eficiencia, siendo estos formatos los que más atención han recibido dentro del contexto internacional, detallando sus principales características.

### **Capítulo 2. Redes WDM dentro del contexto nacional.**

En el presente capítulo se detallan las generalidades de la tecnología WDM, así mismo se determina un modelo simplificado de red, que se aproxima a las condiciones y características de los operadores nacionales y se definen algunas características adicionales sobre equipos de compensación y amplificación.

### **Capítulo 3. Metodología y Escenarios de Simulación.**

Se define la metodología y la estrategia de simulación, se determinan los escenarios para el análisis de la relación costo-eficiencia, así mismo se describe la herramienta de simulación utilizada.

### **Capítulo 4. Análisis del desempeño de formatos de modulación en comunicaciones ópticas sobre redes WDM.**

En este capítulo, se desarrollan cada uno de los escenarios de simulación, con su respectivo análisis de los efectos lineales y no lineales. Así mismo, se realiza el análisis comparativo desde la perspectiva de la relación costo-eficiencia de los formatos de modulación estudiados.

### **Capítulo 5. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.**

Contiene conclusiones generales con respecto a la realización del trabajo de grado, y a los resultados obtenidos. Así mismo, algunas recomendaciones con respecto al entorno de simulación y a la ejecución del proyecto y por último brinda ideas sobre posibles trabajos futuros.

## CAPÍTULO 1. FORMATOS DE MODULACIÓN UTILIZADOS EN COMUNICACIONES ÓPTICAS SOBRE REDES WDM

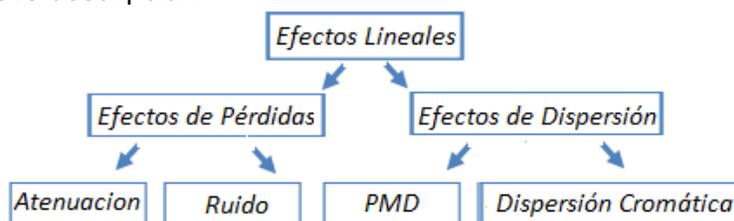
Históricamente, los sistemas de comunicación óptica han utilizado formatos de modulación simples, estos formatos de modulación conocidos como On-Off Keying (OOK) siguen siendo los preferidos por la mayoría de los enlaces debido a su fácil implementación. Sin embargo, desde que las distancias de transmisión y las velocidades de datos por canal se han incrementado, otros formatos de modulación han sido sugeridos para mitigar los impedimentos de las transmisiones, mejorando la sensibilidad del receptor o facilitando el incremento de las velocidades de datos por canal más allá de los límites de los sistemas binarios.

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<sup>1</sup> del sistema. Estas degradaciones se han convertido en uno de los problemas fundamentales a mejorar, *siendo un formato de modulación óptimo y más tolerante, la clave para contrarrestar dichos impedimentos.*

Para el desarrollo de este capítulo, se toman como referencia algunas investigaciones realizadas al respecto [1-7], las cuales sugieren los tipos de efectos lineales y no lineales, que aportan las limitaciones más significativas en sistemas de fibra óptica, así mismo, se detallan los parámetros de monitoreo óptico definidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones en el estándar ITU-T G.697 (ITU - International Telecommunication Union) [8], y se seleccionan los formatos de modulación que han recibido mayor interés dentro del contexto de las comunicaciones ópticas para posteriormente, evaluar a nivel físico el desempeño de los formatos de modulación.

### 1.1 EFECTOS LINEALES

Como efectos lineales, se conoce a las degradaciones ópticas que no dependen de la potencia de transmisión, en la figura 1.1, se observa la clasificación general de los efectos lineales presentes en las transmisiones sobre fibra óptica, de los cuales posteriormente se realizará una breve descripción.



**Figura 1.1 Clasificación de los Efectos Lineales [9].**

---

<sup>1</sup>Para el presente trabajo de grado, desempeño hace referencia a la medición de la relación costo-eficiencia de la red mediante la implementación de un formato de modulación, donde costos, involucra los cambios generados al sistema de comunicaciones y eficiencia, hace referencia al comportamiento frente a las degradaciones ópticas.

### 1.1.1 Pérdidas de la Fibra Óptica (Atenuación y Ruido)

Al propagarse una señal sobre un tramo de fibra, se presenta una disminución en la potencia de la señal debido a diferentes deficiencias como son la dispersión Rayleigh y la absorción material. La siguiente expresión representa las pérdidas de la fibra:

$$P_T = P_0 \exp(-\alpha L) \quad (1.1)$$

Donde  $\alpha$  es la constante de atenuación,  $P_0$  es la potencia de la señal óptica en la entrada de una fibra de longitud  $L$  y  $P_T$  es la potencia transmitida. Las pérdidas de la fibra óptica en función de la longitud de onda y la frecuencia están relacionadas acorde a  $\lambda=c/f$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío [1].

Con respecto al impacto de las pérdidas de la fibra óptica sobre redes WDM de los sistemas de telecomunicaciones modernos, se han desarrollado fibras que manejan coeficientes de atenuación por debajo de los 0,2 dB/Km a través de grandes anchos de banda del orden de los THz. No obstante, después de grandes distancias de propagación las pérdidas de la fibra reducen la potencia de la señal por debajo de los umbrales detectables por los receptores ópticos [2].

En la figura 1.2, se aprecia el rango de longitudes de onda, el cual se encuentra dividido en seis bandas: O, E, S, C, L y U; donde las mínimas pérdidas de la fibra ocurren entre los 1.5 $\mu$ m y los 1.6 $\mu$ m, obteniendo coeficientes de atenuación por debajo de los 0.148dB/Km [7].

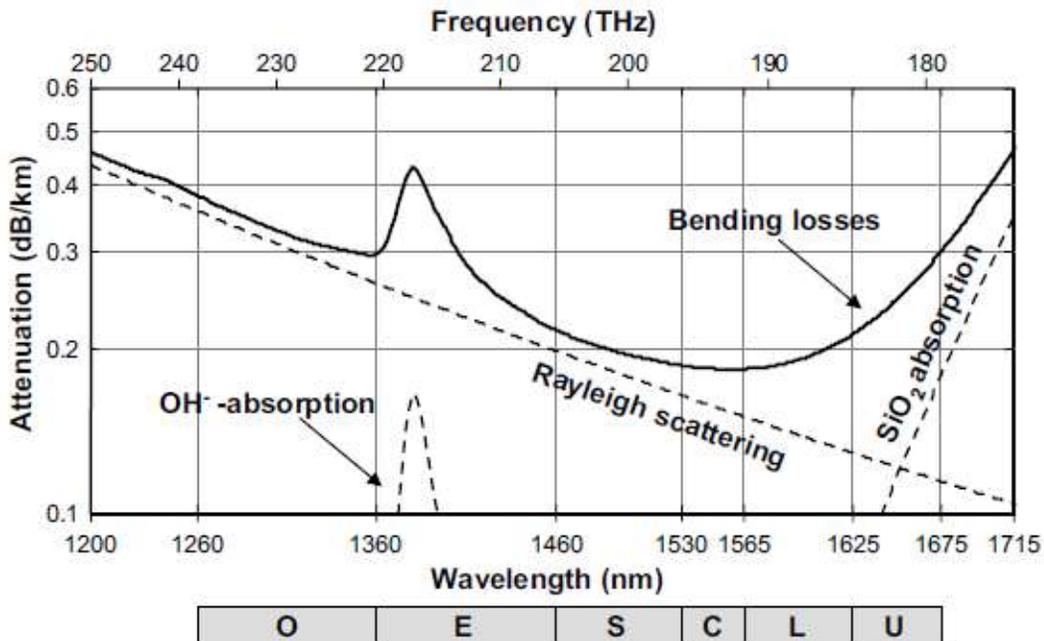


Figura 1.2 Pérdidas de la fibra en función de la frecuencia y longitud de onda [7].

### 1.1.2 Dispersión por Modo de Polarización (PMD)

La Dispersión por Modo de Polarización (PMD - Polarization Mode Dispersion), es uno de los mayores factores limitantes en el rendimiento de los sistemas de transmisión de fibra óptica. La PMD en una fibra Monomodo, es el resultado de la diferencia de velocidades de grupo de los modos de polarización, donde dicho efecto empieza a tomar importancia cuando las velocidades de modulación están cerca o superan los 2.5Gb/s [1, 7].

La fibra óptica utilizada en transmisiones de largo alcance, presenta pequeñas birrefringencias<sup>2</sup> debido a la no formación simétrica circular de su núcleo. Como se observa en la figura 1.3, cuando la luz se propaga en un material birrefringente, se originan dos polarizaciones ortogonales entre sí y perpendiculares a la dirección de la propagación, dando como resultado una dispersión temporal de la señal transmitida. Esta dispersión que afecta negativamente a una señal modulada, se traduce en tiempos de recepción de la señal mayores o menores que el tiempo promedio de recepción, esta diferencia en los tiempos de propagación se llama Retardo de Grupo Diferencial (DGD - Differential Group Delay) que finalmente, se traduce en errores de la señal recibida, dando como resultado la no distinción de la información [10].

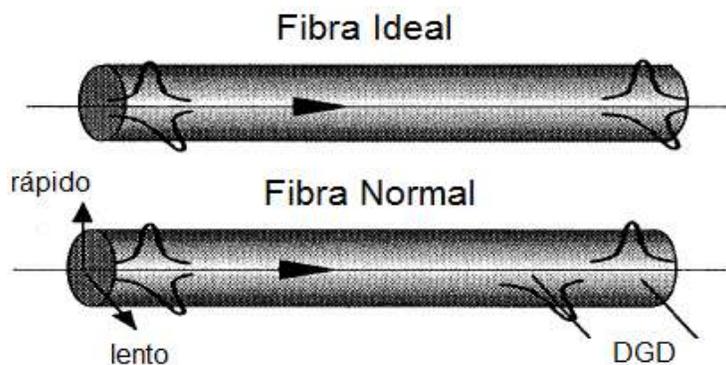


Figura 1.3 PMD en fibra ideal y normal [11].

La fibra óptica G.652 actual tiene un valor de PMD máximo típico de 0,2 ps/ $\sqrt{\text{Km}}$ , este valor de PMD cambia de forma aleatoria con respecto al tiempo y la longitud de onda, así que es más difícil de prever y compensar que la CD; donde una solución es utilizar modulaciones más eficientes [12].

### 1.1.3 Dispersión Cromática (CD)

El término Dispersión Cromática (CD - Chromatic Dispersion) se refiere al retardo o deformación espectral de un pulso óptico conforme se propaga por la fibra. La Fibra Óptica convencional tiene un coeficiente de dispersión positivo; donde a mayores longitudes de ondas se tiene un mayor tiempo de tránsito a través de la fibra comparado

<sup>2</sup> Birrefringencias hace referencia a desdoblarse un rayo de luz incidente en dos rayos linealmente polarizados de manera perpendicular entre sí, conocido como doble refracción.

con las longitudes de ondas cortas. La sensibilidad a la CD se incrementa linealmente con la distancia y cuadráticamente con la velocidad. Debido a la variación de la velocidad de transmisión de datos del sistema desde 2.5Gb/s a 10Gb/s, la dispersión cromática se incrementa en un factor de 16 [12].

Las fibras estándar están optimizadas para transmitir a 1310nm, donde la dispersión es mínima; pero alrededor de los 1550nm, donde la atenuación es mínima, se genera una dispersión que va desde los 16ps/nm\*Km a los 20ps/nm\*Km [12].

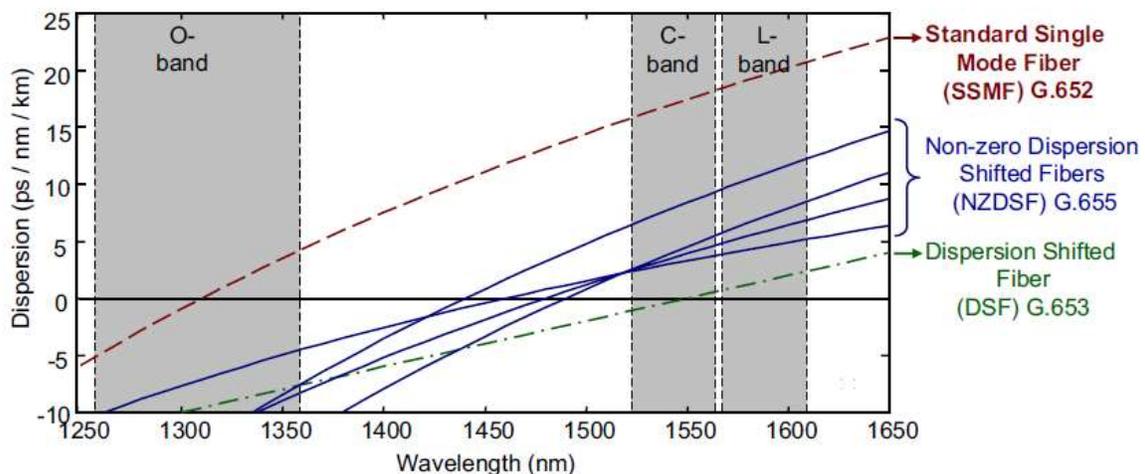
El mecanismo fundamental de la CD es la dependencia en frecuencia del índice de refracción. Debido a esto, los diferentes componentes espectrales asociados con un pulso podrían viajar a diferentes velocidades, este fenómeno se conoce como dispersión material y hace que los pulsos aumenten su duración temporal a medida que se propagan en la fibra [7].

El impacto de la dispersión material en una señal modulada puede ser descrito por la ecuación (1.2). Dichos efectos de dispersión pueden ser representados mediante la expansión de la ecuación en una serie de Taylor alrededor de la frecuencia central  $\omega_0$ :

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (1.2)$$

Donde  $\beta$  es la constante del modo de propagación,  $n(\omega)$  es el índice de refracción dependiente de la frecuencia y  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío [1].

La figura 1.4, muestra la dispersión en función de la longitud de onda para la mayoría de las fibras ópticas donde se observa que en la banda C, la dispersión cromática de la Fibra Estándar Monomodo (SSMF - Standard Single-Mode Fiber) está típicamente entre  $D=15.5\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$  y la longitud de onda de dispersión cero  $\lambda_0$  está cercana a los 1310nm.

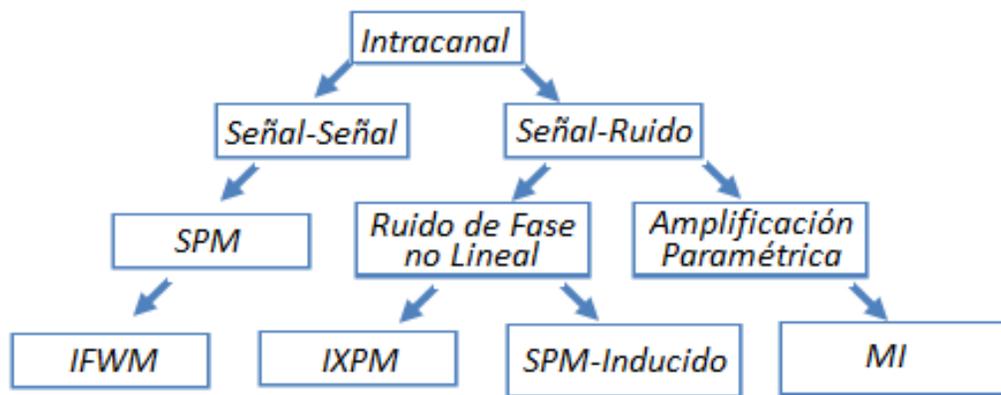


**Figura 1.4** Dispersión en función de la longitud de onda para los tipos de fibra más comunes [7].

En sistemas de comunicaciones sobre fibra óptica, es común el uso de la dispersión (D) expresada en [ps/nm\*Km], el cual se define como un cambio en la Dispersión de Velocidad Grupal (GVD - Group Velocity Dispersion) respecto a la longitud de onda  $\lambda$  de referencia. La longitud de onda para la cual D es igual a cero, hace referencia a la longitud de onda de dispersión cero o  $\lambda_0$  y es donde la dispersión de guía de onda y la dispersión material tienen la misma magnitud, pero signos opuestos.

## 1.2 EFECTOS NO LINEALES

Los efectos no lineales ocurren debido a cambios en el índice de refracción del medio con referencia a la intensidad óptica y a los fenómenos de dispersión. Dichos efectos no lineales son de gran importancia en sistemas basados en fibra óptica [13].



**Figura 1.5 Clasificación de los Efectos no Lineales Intracanal [2].**

Hay tres tipos de efectos no lineales que son importantes en los sistemas de transmisiones ópticas:

- Los efectos no-resonantes en donde no hay ninguna transferencia de energía entre el campo óptico y el medio dieléctrico.
- Los efectos de ruido de fase no lineal, los cuales describen la interacción no lineal entre la señal y el ruido.
- Los efectos no lineales conocidos como procesos resonantes o procesos no elásticos de dispersión en donde el campo óptico transfiere una parte de su energía al medio dieléctrico.

En la figura 1.5, se muestra la clasificación Intracanal y en la figura 1.6, la clasificación Intercanal de los efectos no lineales presentes en la fibra óptica.

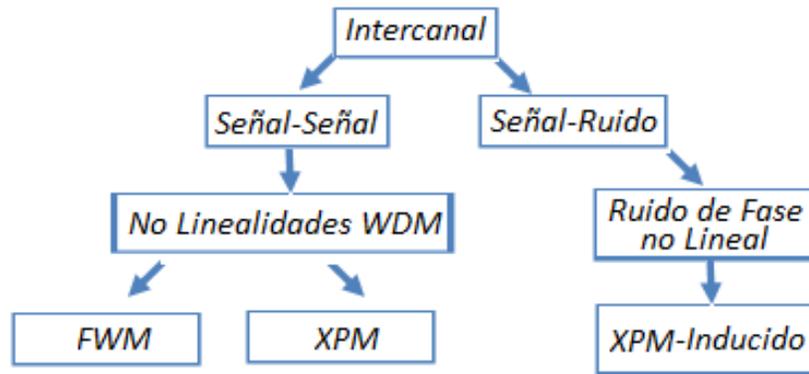


Figura 1.6 Clasificación de los Efectos no Lineales Intercanal [2].

### 1.2.1 Automodulación de Fase (SPM)

La Automodulación de Fase (SPM – Self Phase Modulation), es uno de los más importantes efectos no lineales, el cual se refiere a la variación de fase auto inducida, experimentada por un campo óptico durante su propagación en una fibra óptica. El desplazamiento de fase no lineal cambia debido a que distintas partes del pulso tienen una intensidad diferente, esto resulta en un “chirp<sup>3</sup> (C)” introducido por la SPM, lo cual causa un ensanchamiento del pulso. Un aspecto positivo de la aparición de la SPM, es que el “chirp” que introduce es de signo opuesto al que se genera por la dispersión cromática, por lo que se puede pensar en compensar dicha dispersión a partir de una cierta no linealidad [7, 13].

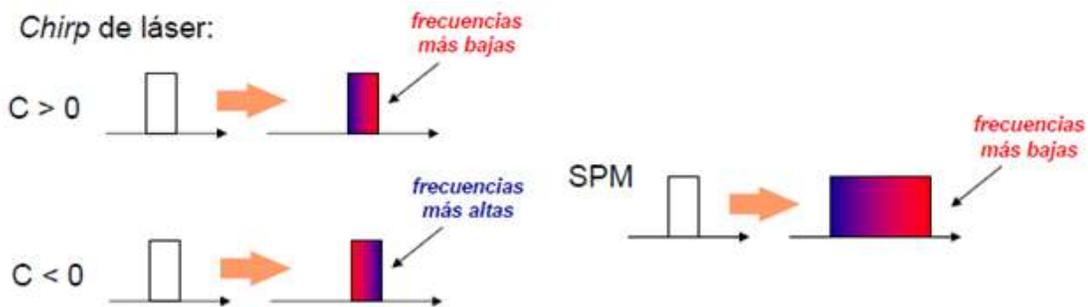


Figura 1.7 Efecto de la SPM sobre un pulso que se propaga [14].

Bajo un coeficiente de dispersión cromática negativa o régimen de dispersión normal ( $D < 0$ ), el retardo de grupo de la fibra es menor para longitudes de onda más altas y mayor para longitudes de onda más bajas, por lo que el flanco de subida tenderá a ir más rápido y el de bajada más despacio. Sin embargo, bajo un coeficiente de dispersión cromática

<sup>3</sup> “Chirp”, Hace referencia a una variación de la amplitud y frecuencia de la señal emitida por el láser.

positiva o régimen de dispersión anómalo ( $D > 0$ ), el retardo de grupo de la fibra es mayor para longitudes de onda más altas y menor para longitudes de onda más bajas, por lo que el flanco de subida tenderá a ir más lento y el de bajada más rápido, como se muestra en la figura 1.7 [13].

### 1.2.2 Modulación de Fase Cruzada (XPM)

La Modulación de Fase Cruzada (XPM – Cross Phase Modulation), hace referencia a un desplazamiento de fase no lineal cuando dos campos ópticos a frecuencias  $\omega_1$  y  $\omega_2$  polarizadas a lo largo del eje x, se co-propaga simultáneamente dentro de la fibra, en donde XPM siempre está acompañada de la SPM.

Dentro de un sistema WDM, la modulación de fase cruzada se produce entre los diferentes canales transmitidos, de forma que la potencia de un canal puede afectar a la fase de otro canal, provocando efectos de ensanchamiento de pulsos cruzados. Este efecto debe tomarse a consideración para sistemas WDM con más de 10 canales. En sistemas de transmisiones ópticas con SSMF a 10Gb/s de tasa de transmisión, dominan los efectos producidos por la XPM para espaciamientos por canal de 25GHz y los efectos de la SPM para canales con espaciamientos de 100GHz [14].

### 1.2.3 Mezcla de Cuatro Ondas (FWM)

La Mezcla de Cuatro Ondas (FWM – Four Wave Mixing), es un proceso no lineal que ocurre cuando dos o más longitudes de onda se co-propagan en la misma fibra satisfaciendo la condición de “*phase-matching*”<sup>4</sup>. Un número de nuevas frecuencias son generadas debido a la interacción de dos o más frecuencias. Si dos de las tres frecuencias son iguales, entonces solamente se generan dos nuevas longitudes de onda en la fibra. Este fenómeno es conocido como Mezcla de Cuatro Ondas Degenerado Parcialmente (PDFWM - Partial Degenerated Four Wave Mixing).

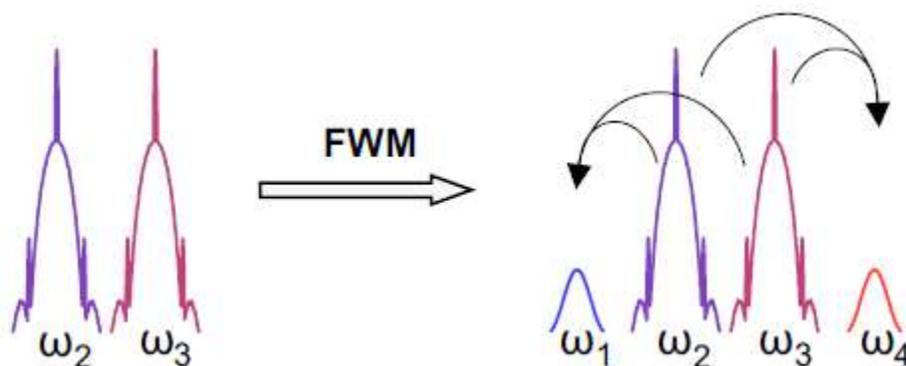


Figura 1.8 Generación de frecuencias adicionales debido a FWM [7].

<sup>4</sup> Una posible traducción para “*phase-matching*” sería coincidencia de fase, pero se prefiere su uso en inglés.

Para que el fenómeno de la FWM ocurra es necesaria la condición de “*phase-matching*”, donde, *el efecto de la FWM depende de la dispersión y del espaciamiento de los canales WDM [14].*

### 1.3 PARÁMETROS DE MONITOREO ÓPTICO

Para los sistemas de fibra óptica WDM, existen una serie de parámetros que proveen información sobre el desempeño de la red, como son la BER, el Factor Q, la OSNR, entre otros; dichos parámetros brindan información relacionada a la calidad de la señal óptica. A continuación se realiza una descripción de los parámetros de monitoreo óptico definidos en el estándar ITU-T G.697 [8], relevantes para el desarrollo del presente trabajo de grado.

#### 1.3.1 Factor Q

Se define como la Relación Señal a Ruido Eléctrica (ESNR - Electrical Signal to Noise Ratio) en la entrada de un circuito de decisión de un receptor de señal digital. Se supone que en condiciones ideales, el factor Q está dado por los niveles lógicos  $\mu_0$  y  $\mu_1$ , y por la distribución del ruido Gaussiano en torno a los niveles “1” y “0”, definidos por las desviaciones típicas  $\sigma_0$  y  $\sigma_1$ , como se aprecia en la ecuación 1.3 y 1.4.

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad (1.3)$$

$$Q(\text{decibelios}) = 20 \times \log_{10} Q(\text{lineal}) \quad (1.4)$$

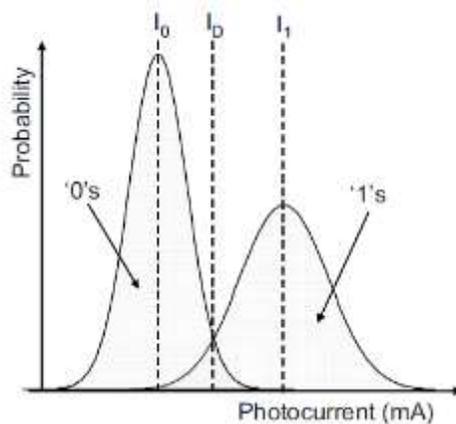


Figura 1.9 Definición del umbral óptimo de decisión [7].

En la práctica, hay una serie de factores que causan distorsiones cuyo efecto es que la forma de la distribución deja de ser Gaussiano, no obstante, esas distorsiones afectan principalmente a las regiones superiores de la distribución, mientras que con la

distribución de Gauss se puede efectuar una aproximación muy precisa de los extremos. Donde la región en que se superponen la distribución, representa la probabilidad de que se produzcan errores como se aprecia en la figura 1.9 [7].

### 1.3.2 Tasa de Errores de Bit (BER)

El parámetro más importante utilizado en comunicaciones ópticas es la Tasa de Error de Bit (BER – Bit Error Rate), que representa el número esperado de bits que se han transmitido erróneamente. Según la ITU-T para los sistemas de comunicaciones en general, el valor usual de la BER se encuentra alrededor de  $10^{-9}$ , es decir, un bit erróneo por cada mil millones de bits transmitidos, en la figura 1.10 se aprecia la relación entre la función densidad de probabilidad y la BER [9, 15].

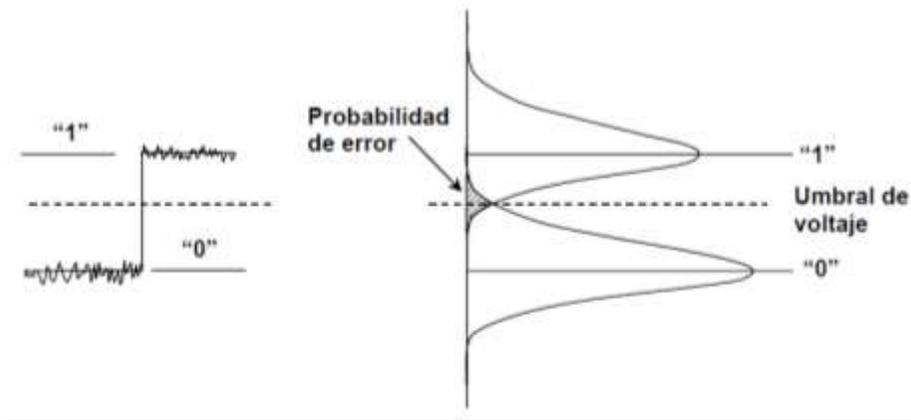


Figura 1.10 Distribución de probabilidad para “0” y “1” lógicos [15].

El factor Q puede ser usado para dar un valor aproximado de la BER si se considera que las distribuciones en el receptor de las señales correspondientes a los “1” y “0” lógicos, tienen una forma Gaussiana. En este caso, el factor Q y la BER están relacionados por la ecuación (1.5) [9].

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (1.5)$$

### 1.3.3 Relación Señal a Ruido óptica (OSNR)

La Relación Señal a Ruido Óptico (OSNR - Optical Signal to Noise Ratio), se define como la medida de la relación de la potencia de la señal con respecto a la potencia de ruido en un canal óptico. La OSNR es un parámetro muy importante, dado que sugiere que tanto es degradada una señal óptica que es transportada dentro de un sistema debido a las múltiples atenuaciones. La OSNR (en dB) puede calcularse en la ecuación (1.6) [16]:

$$OSNR = 10\log \frac{P_i}{N_i} + 10\log \frac{B_m}{B_r} \quad (1.6)$$

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  $B_r$  es el ancho de banda óptico de referencia típicamente seleccionado para 0.1nm.

La compensación de la OSNR es casi imposible para sistemas WDM multicanal, dado que cada etapa de amplificación involucra un incremento en los niveles de ruido con respecto a la potencia del canal (figura 1.11). Los diseños basados en la OSNR, desean mantener una relación BER específica al final de las etapas de los enlaces, es decir en el receptor.

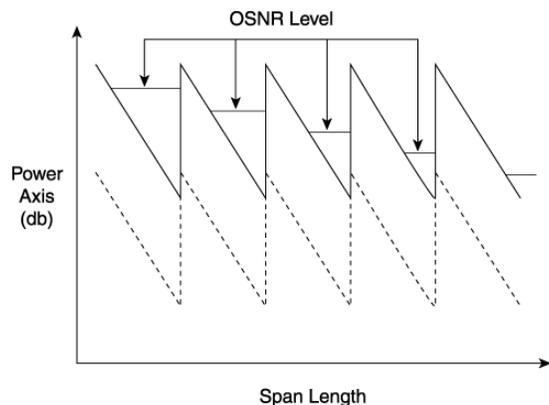


Figura 1.11 Niveles de OSNR para transmisiones WDM con múltiples etapas [17].

### 1.3.4 Diagrama del Ojo

El uso del diagrama del ojo permite el análisis de las formas de onda de los pulsos que se propagan en el canal de transmisión y del cual se pueden deducir parámetros de medición como la BER y el factor Q. Así mismo, muestra en un rango de tiempo la superposición de las distintas combinaciones de posibles unos y ceros. Como se aprecia en la figura 1.12, el diagrama de ojo permite observar parámetros que determinan la calidad de la señal, donde se identifican dos tipos de cruces: cruce de tiempo, en el cual se produce la apertura y cierre del ojo, y cruce de amplitud el cual consiste en el nivel de voltaje que produce la apertura y cierre del ojo definiéndose en el periodo de bit [18].

En la figura 1.13, el eje Y muestra el nivel de amplitud de la señal, entre menor sea esta apertura, se compromete más el desempeño del sistema debido a efectos como la atenuación, la ISI y el margen del ruido. Por otra parte, en el eje X o eje de tiempo se observa la incidencia del sincronismo y del jitter, así mismo se observan las distintas regiones específicas o máscaras del diagrama del ojo, en donde cualquier señal que se propague hace referencia a problemas y errores en la transmisión.

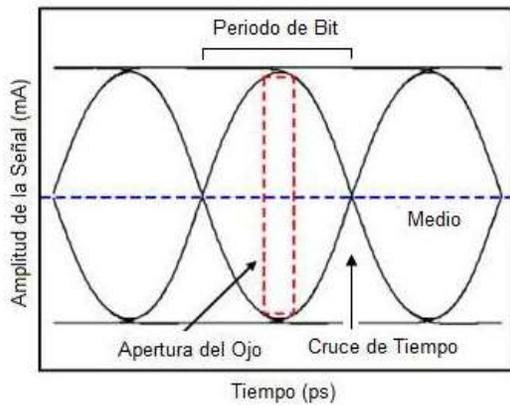


Figura 1.12 Parámetros del Diagrama del Ojo [7].

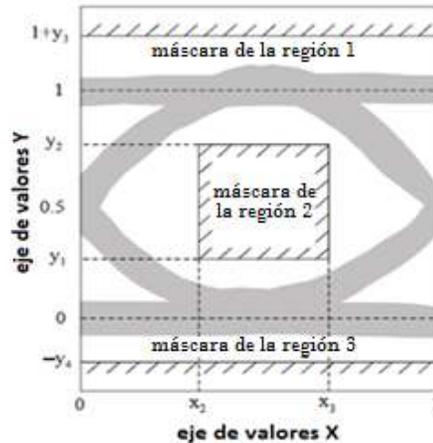


Figura 1.13 Regiones del Diagrama del Ojo [19]

### 1.3.5 Potencia del Canal Óptico

La potencia mínima del canal se relaciona con la OSNR y con la BER, donde debe tenerse en cuenta el proceso de detección, que es diferente en sistemas con amplificadores y en sistemas sin amplificadores. La potencia óptica mínima de canal que resulta es independiente del número de canales implementados y se encuentra limitada por los efectos de las Emisiones Espontáneas Amplificadas (ASE - Amplified Spontaneous Emission) y puede utilizarse para sistemas monocanal o multicanal, mientras que la potencia máxima de canal, sólo se podrá obtener cuando haya pocos canales.

## 1.4 FORMATOS DE MODULACIÓN

Para realizar el análisis del estado del arte dentro del contexto internacional de los formatos de modulación, se parte de una clasificación general teniendo en cuenta cuales de estos han generado mayor atención dentro de las comunicaciones ópticas.

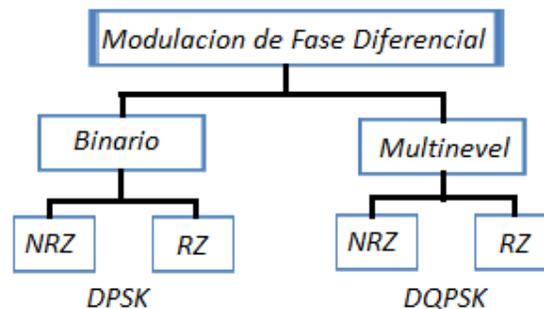
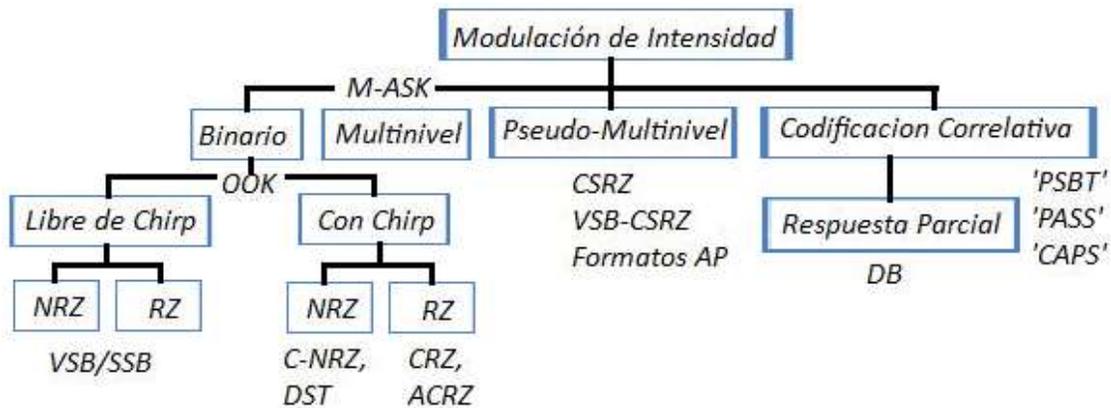


Figura 1.14 Clasificación de los formatos de modulación de fase diferencial [2].

El campo óptico tiene tres atributos físicos que pueden ser implementados para transportar información: la intensidad, la fase y la polarización. En la figura 1.14 y figura 1.15, se muestra la clasificación general de los formatos de modulación más importantes utilizados en comunicaciones ópticas [2].



**Figura 1.15 Clasificación de los formatos de modulación en intensidad [2].**

Mientras los formatos de modulación de intensidad y fase han sido ampliamente utilizados en comunicaciones ópticas a altas velocidades de transmisión de datos, el atributo de la polarización ha recibido muy poca atención, debido principalmente a la necesidad de realizar control en el receptor generado por los cambios aleatorios de polarización en la fibra óptica, haciendo difícil su detección. Por tal motivo, este atributo no será tenido en cuenta para el desarrollo del presente proyecto, pero puede ser considerado para futuras investigaciones.

Existen muchos formatos de modulación bajo investigación, y tratar de cubrir cada uno de ellos se convertiría en una labor muy exhaustiva. Es por ello, que en el desarrollo de este capítulo, se seleccionan formatos de modulación que pueden presentar mayor desempeño con respecto a los efectos lineales y no lineales. Esta selección se realizó con respecto a las siguientes investigaciones, entre otras:

- **Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System [1]:**

Se detallan y se comparan diferentes formatos de modulación para sistemas WDM de altas velocidades de transmisión de datos a 10Gb/s y 40Gb/s, dando especial énfasis a los formatos NRZ-OOK, RZ-OOK, CSRZ, NRZ-DPSK y RZ-DPSK, donde se determina que RZ-DPSK es la mejor opción de los formatos de modulación investigados.

- **Advanced Optical Modulation Formats [2]:**

Se encuentra una extensa base teórica sobre formatos de modulación, donde se realiza un análisis de los formatos más importantes para la transmisión de datos. Los formatos de modulación en fase RZ-DPSK y RZ-DQPSK han recibido una considerable atención, debido a su mejora en la sensibilidad del receptor comparado a los formatos de intensidad, resultando en un mejor desempeño del sistema.

- **Advanced Modulation Formats for Transmission Systems [3]:**

Se afirma que el formato de modulación DQPSK puede habilitar nuevas posibilidades con respecto al desempeño en los sistemas de comunicaciones ópticas debido a sus características multinivel. Así mismo, se resalta la importancia de DQPSK, dado que a partir de este formato se puede generar toda una gama de nuevos formatos de modulación combinando las características de la modulación en amplitud y la modulación en fase, en búsqueda de mejorar el rendimiento del sistema.

- **40Gb/s & 100Gb/s Transport in the WAN [4]:**

Estudio detallado de los laboratorios FUJITSU para habilitar la transición de redes a velocidades de 40Gb/s y 100Gb/s manteniendo la calidad de la transmisión y la conectividad. Se investiga el impacto de los formatos NRZ-OOK, CS-RZ, Duobinario, RZ-DPSK y RZ-DQPSK frente a las deficiencias de la fibra.

- **40G QPSK and DQPSK Modulation [5]:**

Estudio realizado para establecer el comportamiento de los formatos de modulación DQPSK y QPSK sobre redes a 40Gb/s, donde se determina que los formatos de modulación multinivel como DQPSK permiten altas eficiencias espectrales, así como la posibilidad de utilizar múltiples cascadas de OADMs debido en gran medida a su espectro óptico angosto, permitiendo una mejora a los impedimentos de la transmisión de los sistemas de fibra como la CD y PMD.

Mediante el análisis de los resultados obtenidos en las investigaciones anteriormente mencionadas, se pudo *determinar que los formatos de modulación que han generado mayor atención en comunicaciones ópticas sobre redes WDM en el contexto internacional, son los formatos RZ-DPSK y RZ-DQPSK. Estos formatos, que junto con el formato de referencia NRZ-OOK, serán implementados a nivel de simulación dentro del contexto nacional*<sup>5</sup>. A continuación se describen sus principales características.

#### 1.4.1 NRZ-OOK

Por mucho tiempo, No Retorno a Cero (NRZ – Non Return to Zero) ha sido el formato de modulación dominante en los sistemas de comunicaciones ópticas, debido a que requiere un bajo ancho de banda eléctrico para los transmisores y receptores, no es sensible al Ruido de Fase del Láser (FWHM - Full Width at Half Maximum) y cuenta con una configuración simple en el transmisor y el receptor [1].

En la figura 1.16, se observa el diagrama de bloques de un transmisor NRZ, donde la señal eléctrica es modulada por medio de un modulador de intensidad externo, dichos moduladores pueden ser del tipo Mach-Zehnder (MZM – Mach Zehnder Modulator) o de Electro-Absorción (EAM – Electro Absorption Modulator).

---

<sup>5</sup> Contexto nacional, hace referencia a las características de operadores nacionales que implementan redes de fibra óptica, con las cuales se generará un modelo simplificado de red.

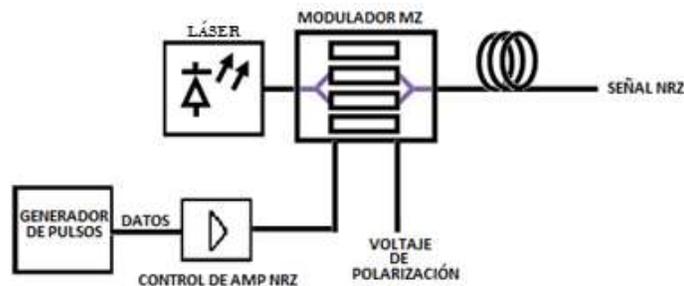


Figura 1.16 Diagrama de bloques transmisor NRZ-OOK [12].

En general, las señales ópticas moduladas mediante el formato NRZ, poseen el espectro óptico más compacto comparado con otros formatos de modulación. Sin embargo, esto no significa que una señal óptica NRZ tenga una resistencia superior a la CD en sistemas amplificados con compensadores de dispersión. Así mismo, no significa que presenta una mayor tolerancia a efectos tales como la XPM y la FWM para sistemas WDM [7].

Para los avances en sistemas de comunicaciones ópticas, con velocidades de transmisión de datos más altas y distancias más largas, *NRZ puede no ser la mejor opción de formato de modulación [1]*, sin embargo debido a su simplicidad y a su dominancia histórica, NRZ será tomado para el desarrollo del presente proyecto, como una buena referencia para propósitos de comparación con respecto a otros formatos de modulación.

#### 1.4.2 RZ-OOK

Las señales ópticas con Retorno a Cero (RZ – Return to Zero), han sido desarrolladas para ser más tolerantes a los efectos de degradaciones no lineales comparado con las señales de tipo NRZ. La razón a su mejor resistencia a los efectos no lineales es probablemente debido a su patrón regular de datos de la señal óptica.

En la figura 1.17, se observa el diagrama de bloques de un transmisor típico RZ-OOK [7], usualmente para obtener una señal óptica RZ, primero se genera una señal óptica NRZ por un modulador de intensidad externo, para después ser modulada por un tren de pulsos sincronizados con la misma velocidad de datos de una señal eléctrica utilizada por un segundo modulador de intensidad; el modulador que implementa la señal NRZ es llamado pulso carver.

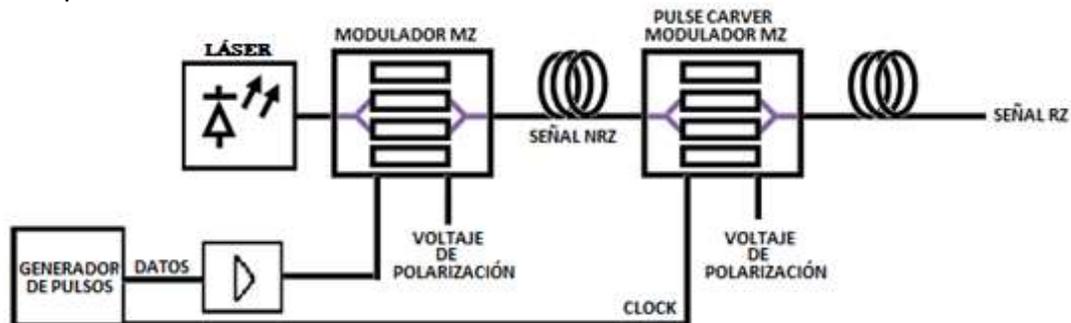


Figura 1.17 Diagrama de bloques transmisor RZ-OOK [12].

Normalmente un pulso tipo carver puede ser generado mediante la implementación de moduladores tipo MZM o EAM. Los pulsos generados a través de un modulador de electro-absorción a menudo son implementados en experimentos de laboratorio para obtener velocidades de datos por canal más allá de las capacidades de la optoelectrónica de altas velocidades.

Por otra parte, los pulsos generados a través de un modulador Mach-Zehnder son más implementados en sistemas de comunicaciones ópticas que utilizan la modulación RZ-OOK [2]. Sin embargo, este formato de modulación no será tomado en cuenta dentro de los escenarios de simulación, debido a su fuerte relación con los formatos modulados en fase seleccionados en la presente investigación.

### 1.4.3 RZ-DQPSK

La Modulación por Desplazamiento por Cuadratura Diferencial de fase (DQPSK – Differential Quadrature Phase Shift Keying), es el único formato de modulación multinivel, dado que transporta más de un bit por símbolo, siendo RZ-DQPSK el formato que ha recibido el mayor interés en los recientes años.

En la figura 1.18, se observa el diagrama de constelaciones de la modulación DQPSK, en el cual, el número de símbolos es el doble y la distancia entre los puntos de cada constelación es reducida a la mitad, donde dicha reducción requiere al menos una OSNR de 3 dB por encima, manteniendo la BER objetivo.

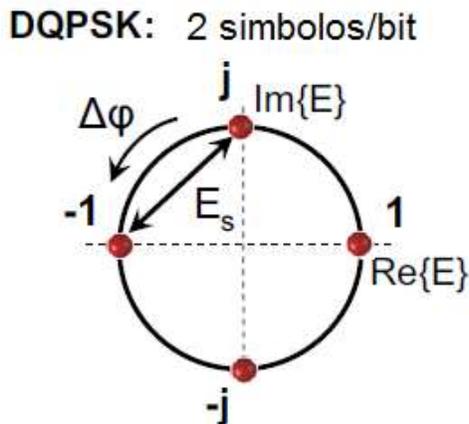


Figura 1.18 Diagrama de Constelaciones Modulación DQPSK [7].

En la figura 1.19, se aprecia el diagrama de bloques de un transmisor típico RZ-DQPSK mediante la implementación de un pulso carver, el cual consiste en una fuente láser operando continuamente, un splitter para dividir la luz en dos trayectos de igual intensidad, dos MZM operando como moduladores de fase, un conmutador óptico de fase  $\pi/2$  en uno de los trayectos y un combinador para producir una única señal de salida [7].

Mediante la utilización de la estructura de transmisor conocida como Súper Mach-Zehnder, se obtiene una ventaja producida por la conmutación exacta de fase  $\pi/2$  de los MZM independientemente de la señal manejada. Además, esta estructura requiere únicamente manejar señales eléctricas binarias, las cuales son mucho más fáciles de generar a altas velocidades que las formas de onda multinivel [20].

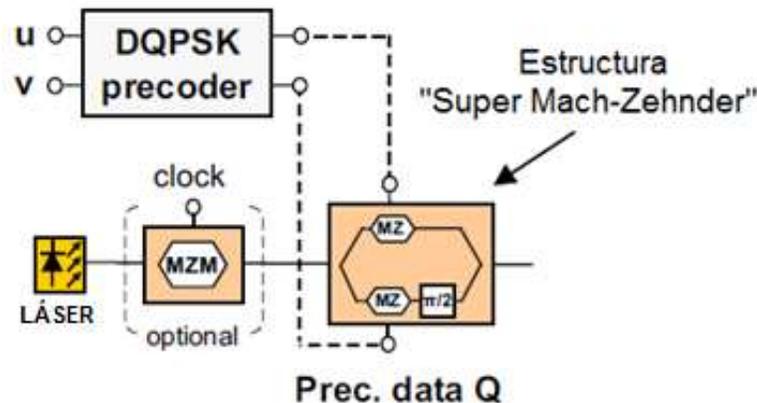


Figura 1.19 Diagrama de bloques transmisor RZ-DQPSK [7].

#### 1.4.4 RZ-DPSK

Al igual que los formatos de intensidad, la Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase (DPSK - Differential Phase Shift Keying) puede ser implementada mediante la utilización de los formatos NRZ-OOK y RZ-OOK; estos formatos modulados en fase, suponen el principio básico para duplicar la capacidad de transmisión sin incurrir en una penalización de potencia por efecto de la CD y la PMD [21].

DPSK representa información mediante el cambio de fase binaria entre bits adyacentes, donde un "1" digital es representado en un cambio de fase de  $\pi$ , mientras que un "0" digital es representado por la ausencia de dicho cambio de fase. Una de las ventajas principales de DPSK comparado con los formatos tradicionales de modulación es la de proporcionar una mejora de 3 dB en la sensibilidad del receptor al requerir una baja OSNR, a la vez que resulta más tolerante a los efectos no lineales en sistemas DWDM [22].

Para generar una señal óptica RZ-DPSK, debe ser utilizado más de un modulador. En la figura 1.20, se observa un diagrama de bloques típico de un transmisor RZ-DPSK, donde primero un modulador de fase electro-óptico genera una señal convencional NRZ-DPSK, para ser modulada por un pulso tipo carver o MZIM a la misma velocidad de datos, mediante la implementación de otro modulador de intensidad electro-óptico. Los moduladores más convenientemente implementados son los del tipo MZM.

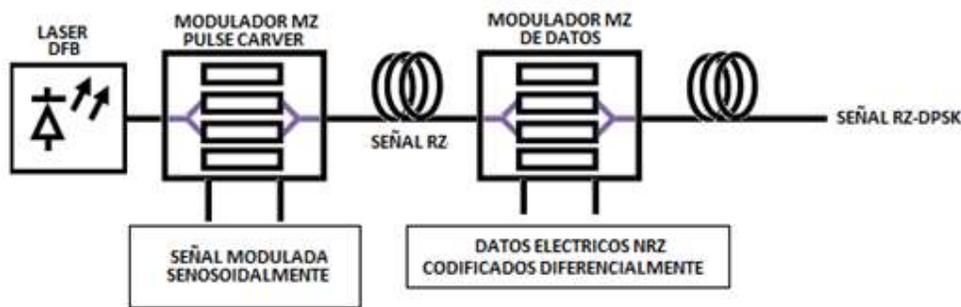


Figura 1.20 Diagrama de bloques transmisor RZ-DPSK [12].

La figura 1.21 representa el diagrama de constelaciones para una modulación binaria DPSK, donde la diferencia entre dos puntos de constelación es una señal de energía igual a  $E_s$ . Para DPSK, ambos puntos de la constelación tienen la misma señal de energía con una fase diferencial  $\Delta\phi=0$  ó  $\Delta\phi=\pi$ . Cuando la diferencia entre dos puntos de constelación es igual a  $\sqrt{2}E_s$ , la potencia promedio es la misma que para OOK.

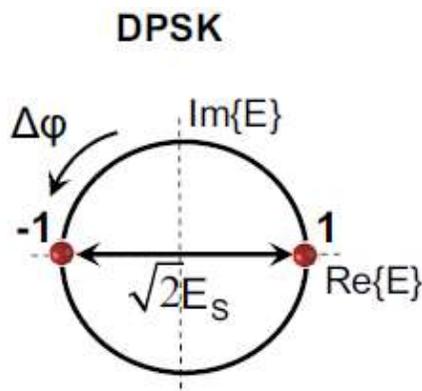


Figura 1.21 Diagrama de constelaciones modulación binaria DPSK [7].

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

Mediante el desarrollo del capítulo 1, se describieron algunos efectos lineales y no lineales, permitiendo comprender cuáles de estas degradaciones pueden afectar de manera significativa el desempeño de los sistemas de comunicaciones ópticas sobre redes WDM en el contexto nacional.

Dentro de las degradaciones más significativas a tener en cuenta para el desarrollo de la presente investigación, se determina que a velocidades de transmisión de 2.5Gb/s los

efectos más significativos son: el ruido, la atenuación, la dispersión cromática, la SPM, la FWM y la XPM; a 10Gb/s es la SPM y para velocidades de 40Gb/s y superiores, los efectos de degradación dominantes son la IXPM y la IFWM. Del mismo modo, para los formatos modulados en fase como DQPSK y DPSK, a 2.5Gb/s y a 10Gb/s la limitación central, proviene generalmente del ruido de fase no lineal y de la dependencia en potencia.

Por otra parte, se establece que los parámetros de monitoreo utilizados para estimar el desempeño del sistema con respecto al formato de modulación implementado y su respuesta frente a los efectos lineales y no lineales son la BER, el Factor Q, la OSNR, el diagrama del Ojo, y la Potencia del canal óptico.

Así mismo, se caracterizan los formatos de modulación que han generado mayor atención dentro de los estudios del contexto internacional, para ser aplicados a redes en el contexto nacional, identificando<sup>6</sup> que los formatos de modulación RZ-DPSK y RZ-DQPSK podrían presentar mayor desempeño frente a los efectos lineales y no lineales, para permitir la transición a redes con velocidades superiores del orden de los 10Gb/s, 40Gb/s y 100Gb/s.

---

<sup>6</sup> Dicha identificación de los formatos de modulación, se realiza en base al estado del arte del contexto internacional.

## CAPÍTULO 2. REDES WDM DENTRO DEL CONTEXTO NACIONAL

Debido a que los avances sobre formatos de modulación implementados sobre sistemas WDM se desarrollan bajo características superiores a las del contexto nacional, en cuanto a velocidad, capacidad y distancias; es de gran interés saber si dichos formatos presentan comportamientos similares frente al análisis de las degradaciones ópticas en sistemas con características inferiores, manteniendo la relación Costo-Eficiencia.

Con el fin de llevar la investigación hacia el contexto nacional, en el presente capítulo se determina un modelo simplificado de red, que se aproxima a las condiciones y características sobre las cuales están trabajando algunos operadores nacionales, donde los resultados obtenidos a nivel de simulación con respecto a los formatos de modulación estudiados NRZ-OOK, RZ-DPSK y RZ-DQPSK, aporten significativamente en el desempeño de dichas redes.

### 2.1 GENERALIDADES WDM

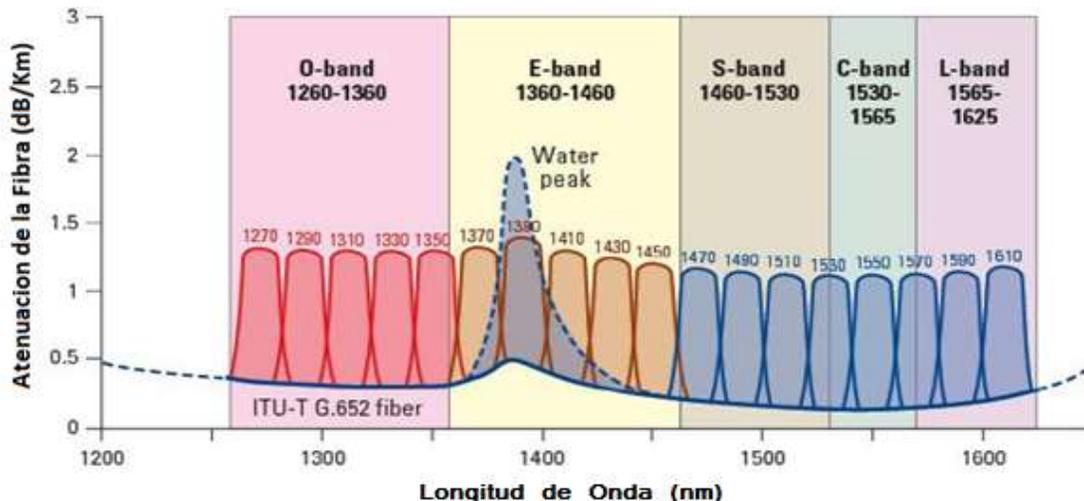
WDM es una tecnología que incrementa las capacidades de transporte de información de la fibra mediante la multiplexación de las señales ópticas de diferentes fuentes permitiendo la implementación de diferentes velocidades de transmisión de datos y protocolos sobre un único enlace [19].

En la actualidad, los sistemas WDM se clasifican según el tipo de aplicación en: DWDM (WDM Densamente Espaciados – Dense Wavelength División Multiplexing) y CWDM (WDM Ampliamente Espaciados – Coarse Wavelength División Multiplexing). En la tabla 2.1, se definen algunos parámetros típicos sugeridos por el estándar ITU-T G.694.1 [23] y G.694.2 [24].

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

**Tabla 2.1 Parámetros típicos en redes CWDM y DWDM [25].**

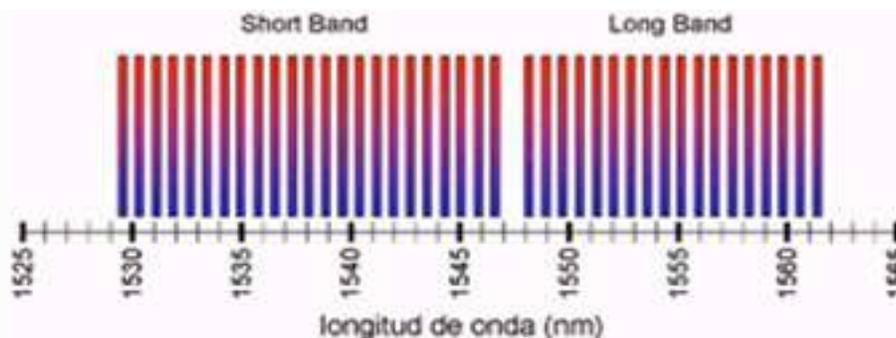
CWDM es una tecnología robusta desarrollada para incrementar la capacidad en la fibra multimodo de las Redes de Área Local (LAN – Local Area Network). En la actualidad, la recomendación ITU-T G.694.2 define 18 canales de longitud de onda en 5 diferentes ventanas, con espaciamentos de 20nm (2500GHz) y con capacidades típicas de los 50Mb/s a los 2.5Gb/s, como se aprecia en la figura 2.1.



**Figura 2.1 Espaciamiento de los Canales CWDM, recomendación ITU-T G.694.2 [26]**

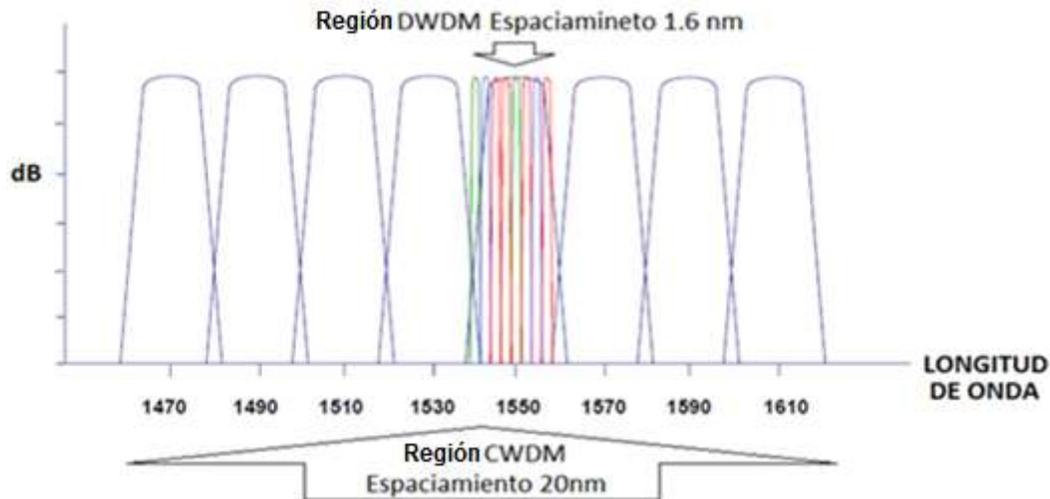
Algunas de las características principales que presenta la tecnología CWDM, comparada con DWDM, es que al ser una tecnología simple, permite un bajo costo de implementación, bajo consumo de potencia, bajo requerimiento en el espaciamiento de los canales y un ahorro significativo de costos en la expansión de las redes. No obstante algunas limitaciones fundamentales son su baja capacidad y su poco rango de operación en la implementación de sistemas modernos de fibra óptica [26].

En la figura 2.2, se aprecia la distribución de los canales a través del espectro óptico. Para DWDM, la recomendación ITU-T G.694.1 define la utilización de las ventanas desde los 1525nm a los 1565nm, así como espaciamientos típicos entre canales de 0.4nm (50GHz), 0.8nm (100GHz) y 1.6nm (200GHz) con velocidades de transmisión de datos del orden de los 2.5Gb/s a los 10Gb/s.



**Figura 2.2 Distribución de los canales DWDM en el espectro óptico [25].**

Algunas de las ventajas de DWDM es la de aprovechar al máximo la capacidad disponible en el sistema, disponer de distancias máximas en los enlaces mediante la implementación de amplificadores tipo EDFA y el bajo incremento en el costo debido a la implementación de nuevos canales. Sin embargo, no es una solución costo-eficiente para un número reducido de canales [27]. La figura 2.3, compara la utilización del espectro DWDM con respecto a CWDM.



**Figura 2.3 Comparación entre espectro óptico CWDM y DWDM [22].**

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

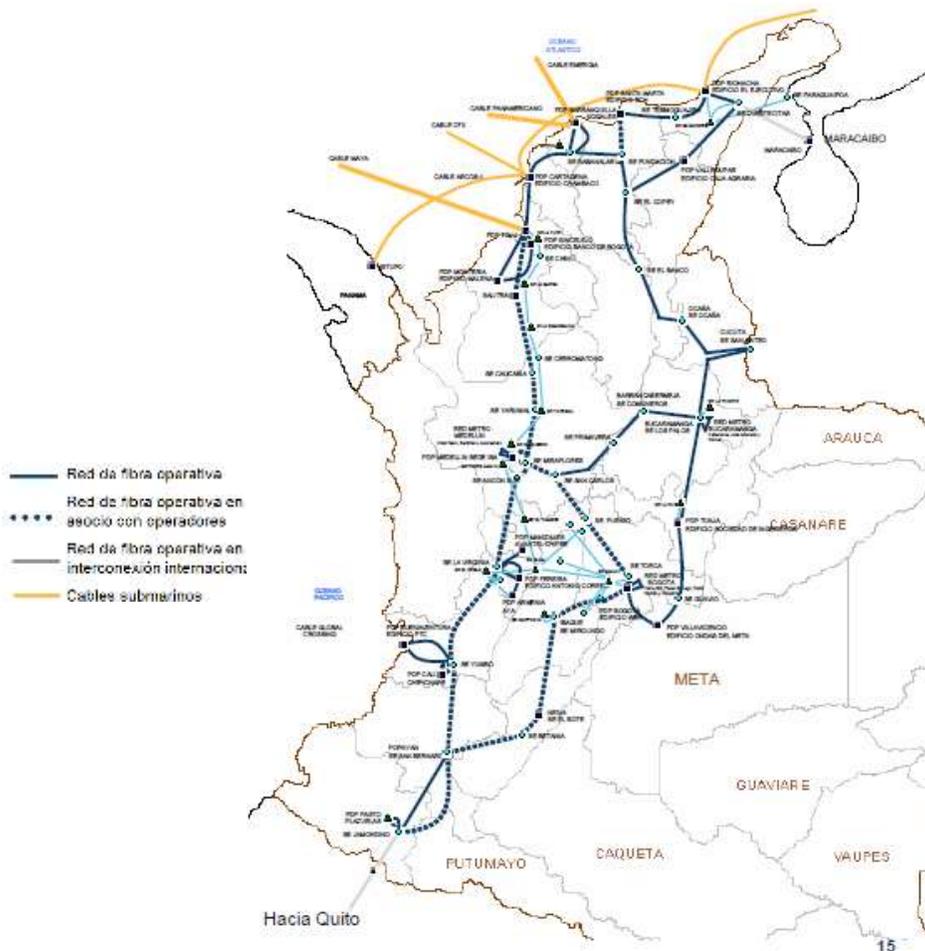
## 2.2 CARACTERÍSTICAS DE REDES WDM DENTRO DEL CONTEXTO NACIONAL

Con el fin de generar el modelo simplificado de red sobre el cual estará soportada la simulación de los diferentes formatos de modulación, es necesario realizar un análisis detallado de las características más significativas de algunos operadores nacionales que se encuentran implementando sistemas de fibra óptica sobre redes DWDM.

En general, la información suministrada por algunos operadores representativos como son ETB, INTERNEXA, TELMEX, TELEFONICA-TELECOM y UNE-EMP, entre otros, es de carácter confidencial y no es permitido su divulgación de manera puntual, sin embargo se ha podido obtener la información necesaria para generar un modelo que represente algunas características de los sistemas WDM dentro del contexto nacional, donde Los operadores anteriormente mencionados serán nombrados de manera aleatoria como operador 1 hasta operador 4 por motivos de confidencialidad.



- Anillo No 1: Bogotá, Medellín, Cali, Popayán, Neiva, Pereira e Ibagué.
- Anillo No 2: Bucaramanga, Cúcuta, Barranquilla, Cartagena, Tolú y Medellín.



**Figura 2.5 Cobertura de red y topología de los anillos del operador 2 [29]**

Por otra parte, el operador 3 y el operador 4 cuentan con una configuración típica de anillos con nodos principales ubicados en:

- Anillo Operador 3: Bogotá, Medellín, Pereira e Ibagué.
- Anillo Operador 4: Cartagena, Medellín, Bucaramanga y Santa Marta.

### 2.2.2 Características de Red

El primer operador, cuenta con una red DWDM trabajando a una velocidad de 2.5Gbps en la ventana de los 1550nm, se basa en el estándar G.652 con fibra tipo SSMF-28. Las distancias típicas de los nodos oscilan entre los 250Km y los 500Km; es una red equipada con módulos de compensación de dispersión y amplificadores de fibra dopados con Erblio, el parámetro de atenuación que tiene la fibra de la red es  $\alpha=0.25\text{dB/Km}$ . Los parámetros de dispersión se encuentran definidos como  $D=16,7\text{ps/nm}^2\text{Km}$  y  $DS=0.09\text{ps/nm}^2\text{Km}^2$ .

El segundo operador, cuenta con una red DWDM, donde el primer anillo posee una capacidad total de 16 longitudes de onda de las cuales 4 se encuentran implementadas a una velocidad de transmisión de datos de 2.5Gb/s; para el segundo anillo se cuenta con 32 longitudes de onda de capacidad total, de las cuales 4 longitudes de onda son implementadas a la misma velocidad de datos.

El tercer operador, cuenta con sistemas de protección tipo SPRING y la red se encuentra en este momento trabajando con 4 longitudes de onda a una velocidad de 2.5Gb/s para cada uno de sus enlaces de fibra. Para el caso del cuarto operador, este cuenta con una red DWDM con distancias típicas de los enlaces del orden de 80Km a 100Km, espaciamientos entre los amplificadores ópticos de 40dB, estándar utilizado G.652 con el tipo de fibra SSMF-28, espaciamientos de los canales WDM de 100GHz, sistemas de protección SPRING y SNCP trabajando en la banda C alrededor de los 1550nm, velocidades de transmisión de datos de 2.5Gb/s y 10Gb/s implementando solo redes en 2.5Gb/s, con modulación externa y modulación directa.

### 2.2.3 Equipos implementados por operadores nacionales

Los equipos OSN de HUAWEI con sus diferentes series OptiX OSN, son los más utilizados dentro de las configuraciones de las redes DWDM. A continuación, se detallan los parámetros de las tarjetas STM-64 y STM-16 del equipo OSN 3500, con el fin de verificar *ciertas características con las que contaría la red, así como el formato de modulación utilizado*, que para el objetivo del proyecto es fundamental.

En la tabla 2.2 se observan los parámetros de las tarjetas de interfaz óptica SF64/SL64 que son las responsables de manejar las señales ópticas STM-64 a 10Gb/s aproximadamente, así mismo son responsables de la recepción y la transmisión, soportar diversos esquemas de protección como SNCP, soportar salidas de longitud de onda fijas y ser compatible con diferentes distancias de transmisión.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN				
Velocidad de Tx	SF64	10.709Gb/s		SL64	9.953Gb/s
Capacidad de Procesamiento	1xSTM-64 servicio estándar o concatenado				
Patrón de código de Línea	NRZ				
Tipo de Módulo Óptico	I-64.1	S-64.2b	L- 64.2b	Le- 64.2	Ls-64.2
Longitud de Onda [nm]	1310	1550	1550	1550	1550
Distancia de Tx [Km]	0-2	2-40	30-70	30-70	80
Potencia de Operación [dBm]	-6 a 1	-1 a 2	10 a 14	1 a 4	3 a 5
Sensibilidad en Rx [dBm]	-11	-14	-14	-19.5	-21
Máxima Tolerancia de Dispersión [ps/nm]	6.6	800	1600	1200	1600

**Tabla 2.2 Parámetros Técnicos de las tarjetas STM-64 Equipo OSN3500 [30].**

Con respecto a las tarjetas SL16, en la tabla 2.3 se observan los parámetros más significativos, dichas tarjetas son las responsables de manejar las señales ópticas STM-16 a 2.5Gb/s aproximadamente, soportar diversos esquemas de protección como MSP, Ring, MSP Lineal y SNCP.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN				
Velocidad de Tx	2.488Gb/s				
Capacidad de Procesamiento	1xSTM-16 servicio estándar o concatenado				
Patrón de Código de Línea	NRZ				
Tipo de Módulo Óptico	I-16	S-16.1	L-16.1	L-16.2	Le-16.2 Je
Longitud de Onda [nm]	1310	1310	1310	1550	1550
Distancia de Tx [Km]	0-2	2-15	15-40	40-80	80-100
Potencia de Operación [dBm]	-10 a -3	-5 a 0	-2 a 3	-2 a 3	5 a 7
Sensibilidad en Rx [dBm]	-18	-18	-27	-28	-28

**Tabla 2.3 Parámetros Técnicos de las tarjetas STM-16 Equipo OSN3500 [30].**

Al analizar las tablas 2.2 y 2.3, se puede constatar que para los equipos OSN3500, el formato de modulación implementado es NRZ-OOK. Así mismo, se aprecian las longitudes típicas soportadas por las tarjetas y la potencia mínima requerida en recepción, siendo parámetros objetivos en el desarrollo de los escenarios de simulación.

## 2.3 CARACTERÍSTICAS ADICIONALES

Debido a que algunas de las características de la red no se determinaron con la información de los operadores, serán definidas mediante el uso de los estándares relacionados a WDM de la ITU-T como son G.694.1 [23] para definir las lambdas a diferentes espaciamentos del canal y G.652 para los parámetros de la fibra SSMF-28 [31]. Así mismo se detallan los dispositivos de amplificación y compensación comúnmente implementados sobre redes WDM dentro del contexto nacional.

### 2.3.1 Frecuencias Centrales Nominales para Sistemas WDM

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

- Espaciamentos de 12.5GHz:  
 $193.1+n \times 0.0125$  (2.1)
- Espaciamentos de 25GHz:  
 $193.1+n \times 0.025$  (2.2)

- Espaciamientos de 50GHz:  
 $193.1+n \times 0.05$  (2.3)
- Espaciamientos de 100GHz:  
 $193.1+n \times 0.1$  (2.4)

De lo anterior y mediante la ecuación (2.5), se puede determinar la longitud de onda para la frecuencia específica.

$$\lambda[nm] = \frac{2.99792458 \times 10^8 [m/s]}{f[THz]} \quad (2.5)$$

Donde n es cualquier entero positivo o negativo, incluyendo el 0 y 193.1 es la frecuencia de referencia en THz.

Sin embargo, para el desarrollo de este trabajo de grado se utiliza un plan de frecuencias definido para un equipo ONS 15454 de CISCO dado que es implementado por algunos operadores a nivel nacional. En la tabla 2.4, se detalla el plan de frecuencias a un espaciamiento de 100GHz para 32 canales, el cual se utilizará a nivel de simulación.

CANALES	FRECUENCIA NOMINAL CENTRAL		
Ch 1 – 1530.33nm	Ch 9 – 1538.19nm	Ch 17 – 1546.12nm	Ch 25 – 1554.13nm
Ch 2 – 1531.12nm	Ch 10 – 1538.98nm	Ch 18 – 1546.92nm	Ch 26 – 1554.94nm
Ch 3 – 1531.90nm	Ch 11 – 1539.77nm	Ch 19 – 1547.12nm	Ch 27 – 1555.75nm
Ch 4 – 1532.68nm	Ch 12 – 1540.56nm	Ch 20 – 1548.51nm	Ch 28 – 1556.55nm
Ch 5 – 1534.25nm	Ch 13 – 1542.14nm	Ch 21 – 1550.12nm	Ch 29 – 1558.17nm
Ch 6 – 1535.04nm	Ch 14 – 1542.94nm	Ch 22 – 1550.92nm	Ch 30 – 1558.98nm
Ch 7 – 1535.82nm	Ch 15 – 1543.73nm	Ch 23 – 1551.72nm	Ch 31 – 1559.79nm
Ch 8 – 1536.61nm	Ch 16 – 1544.53nm	Ch 24 – 1552.52nm	Ch 32 – 1560.61nm

**Tabla 2.4 Plan de Frecuencias para 32 canales a 100GHz [32].**

### 2.3.2 Características de la fibra óptica mono-modo

Mediante el uso del estándar ITU-T G.652, se puede describir las características geométricas, mecánicas y los atributos de transmisión para la fibra óptica mono-modo, aunque dicha fibra fue inicialmente optimizada para trabajar en la región de los 1310nm, también puede ser implementada en la región de los 1550nm. En la tabla 2.5, se detallan algunas características fundamentales y relevantes para el desarrollo de este proyecto.

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

**Tabla 2.5 Parámetros de la fibra óptica mono-modo ITU-T G.652 [31].**

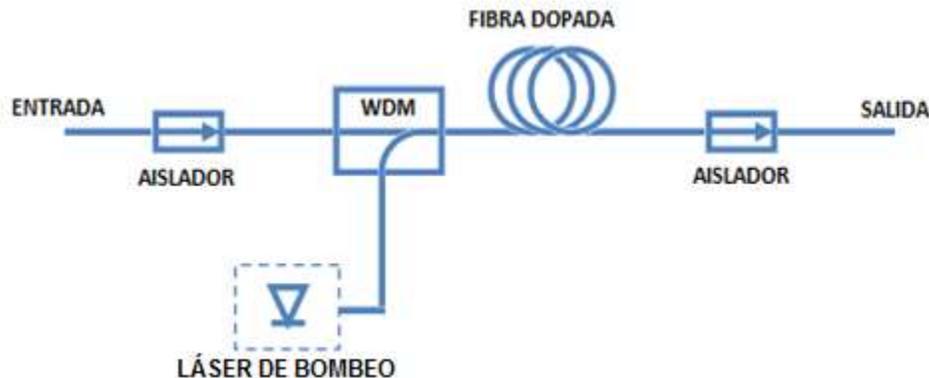
### 2.3.3 Dispositivos de Compensación y Amplificación

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

- **Amplificadores de Fibra Dopada de Erblio (EDFA)**

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

Un solo dispositivo EDFA puede ser utilizado para amplificar simultáneamente muchos canales con diferentes longitudes de onda, manteniendo ciertos niveles de potencia deseados mediante la implementación de ecualizadores dado que no todos los canales se amplifican por igual, dependiendo dicha amplificación de la longitud de onda de la señal, el número de señales presentes y la potencia de la señal de entrada [33]. En la figura 2.6, se aprecia el esquema básico de un amplificador EDFA de tipo físico.



**Figura 2.6 Esquema básico de un dispositivo EDFA [49].**

Los equipos utilizados para este caso de estudio, son los amplificadores de ganancia constante *Coming Pure Gain 1500 Compact* [34], debido a que son equipos implementados por uno de los operadores anteriormente analizados, los cuales presentan ganancia constante de 23dB, una potencia máxima de salida de 21dBm y una figura de ruido de 5.2dB. Mediante la ecuación 2.6, se puede determinar la máxima distancia teórica del tramo de fibra que puede ser amplificada mediante la utilización de estos dispositivos.

$$G = \alpha \times D \quad (2.6)$$

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

- **Fibra Compensadora de Dispersión Cromática (DCF)**

Uno de los métodos comúnmente implementados para compensar la CD, son los módulos de compensación de fibra negativa DCF (Dispersion Compensating Fiber). Dichos dispositivos, son módulos de fibra que poseen una alta dispersión, típicamente de 80 a 100 ps/nm\*Km, de esta forma utilizando solo un porcentaje muy pequeño de la longitud de la fibra SSMF-28 del sistema, se puede compensar totalmente los efectos de la dispersión de velocidad grupal GVD acumulada sobre la línea de transmisión. Por otra parte, dado que las pérdidas de la DCF son equivalentemente altas, típicamente 0,6 dB/km, se debe ajustar la potencia para mantener una Relación Señal a Ruido (SNR) aceptable al final de la línea de transmisión [35].

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

Mediante la ecuación 2.7, se puede determinar la longitud de la fibra DCF que debe implementarse en el modelo para compensar el efecto de la Dispersión Cromática:

$$D_1L_1 + D_2L_2 = 0 \quad (2.7)$$

Donde  $D_1$  es el coeficiente de dispersión del tramo de fibra SSMF-28,  $L_1$  es la longitud de cada span,  $D_2$  es la dispersión del tramo DCF y  $L_2$  la longitud de la DCF.

- **Módulos Amplificadores de Fibra de Dispersión Negativa HA5700**

Este tipo de módulos, amplifican la potencia de entrada de la señal óptica y generan un valor de dispersión negativo, el cual es utilizado para compensar la CD típica de 17ps/nm\*Km de la fibra SSMF-28 alrededor de la ventana de los 1550nm. Una de las ventajas fundamentales al implementar este tipo de dispositivos en comparación con los tramos de fibra DCF, es que no introducen grandes atenuaciones ni ruido al sistema, evitando en gran medida la degeneración de la señal óptica, soportando valores máximos de compensación del orden de los -1360ps/nm.

## 2.4 GENERACIÓN DEL MODELO SIMPLIFICADO DE RED

En la figura 2.7, se define un anillo típico con tres nodos principales, los cuales se encuentran bajo las mismas características de configuración. A nivel de simulación solo se analizará uno de los tramos y se asumirá un comportamiento similar en los demás.

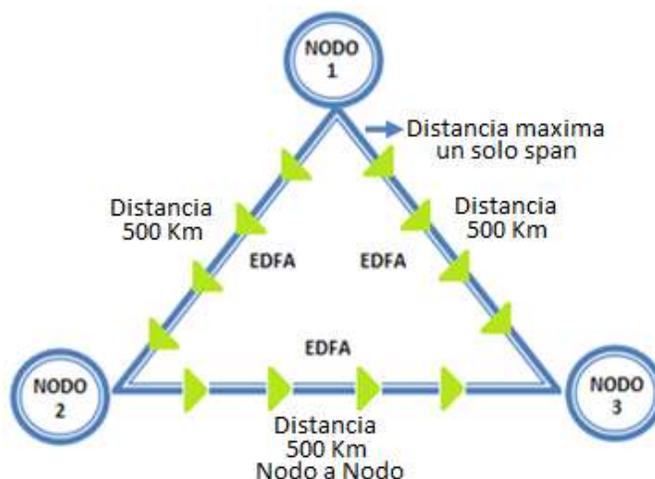


Figura 2.7 Esquema general para un modelo simplificado de red.

En la tabla 2.6, se observan los parámetros del sistema del modelo simplificado de red, basados en los valores más típicos implementados por los operadores nacionales.

PARÁMETRO	VALORES	
Velocidad del Sistema	2.5Gb/s	
Tecnología de Red	DWDM unidireccional	
Banda	Banda C	
Ventana	Alrededor de 1550nm	
Estándar Utilizado	G.652	
Tipo de fibra	SSMF-28	
Equipos de Amp / compensación	EDFA	DCF (Optional)
Número de canales implementados	4 Canales	
Espaciamiento de los canales DWDM	100GHz (0.8nm)	
Formato de Modulación	NRZ	
Espaciamiento entre Amplificadores	Acorde a la Ganancia del dispositivo	
Atenuación para 1550nm	0.275dB/Km	
Coeficiente de Dispersión 1550nm	17ps/nm*Km	
Coeficiente de Dispersión residual	0.09ps/nm*Km <sup>2</sup>	
Tipo de Modulación	Externa con moduladores Mach-Zehnder	
Potencia de Tx del Láser	0dBm a 7dBm	
Sensibilidad del Rx	-28dBm	
Filtros de Recepción ópticos	Filtro Bessel de orden 6	
Filtros ópticos en el Tx	Filtros Bessel de orden 6 de 10GHz para 2.5Gb/s	
Frecuencias Centrales Nominales	Según la tabla 2.4	

**Tabla 2.6 Características del Modelo Simplificado de Red**

Después de realizar un análisis detallado de la información obtenida por algunos de los operadores nacionales que implementan redes DWDM y junto con la información brindada por los estándares de la ITU-T, se definió un modelo simplificado de red que se aproxime a los sistemas implementados dentro del contexto nacional determinando algunas características y rangos de operación fundamentales presentados en la tabla 2.6. Dicho modelo, posteriormente servirá para generar los posibles escenarios de simulación en donde se evaluará el desempeño a nivel físico de los formatos de modulación identificados en los capítulos anteriores, en relación con los efectos lineales y no lineales, y otras degradaciones presentes en las comunicaciones sobre fibra óptica.

## CAPITULO 3. METODOLOGÍA Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Con el desarrollo del presente capítulo, se define la metodología de simulación, que permitirá generar los diferentes escenarios para cada uno de los formatos de modulación escogidos para el desarrollo del proyecto. La herramienta OptSim® de Rsoft, será utilizada para el desarrollo de la simulación; esta contendrá las características obtenidas en el capítulo 2 resumidas en la tabla 2.6, para ser analizados mediante los parámetros de monitoreo óptico definidos en capítulo 1.

### 3.1 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Para definir la metodología de simulación, se tienen en cuenta los documentos “*introducción a los simuladores*” [36] del manual de OPNET y el documento “*ingeniería del software, un enfoque práctico*” [37]. En donde simulación se define como “*una técnica que imita el comportamiento de un sistema del mundo real conforme evoluciona en el tiempo*”.

Existen varias características mediante las cuales pueden ser clasificados los tipos de simulación, como son: la simulación estática, la cual representa un sistema en un instante de tiempo determinado; la simulación dinámica, la cual representa la evolución de un sistema en el tiempo; la simulación determinística, que no contiene ninguna variable aleatoria; la simulación aleatoria, la cual representa sistemas que contiene variables aleatorias; la simulación continua, donde el comportamiento del sistema cambia de forma continua en el tiempo; y la simulación discreta, donde el comportamiento del sistema cambia solo para instantes de tiempo concretos llamados eventos [36].

Dentro de la metodología de simulación, en [37] se definen tres fases que son requeridas para generar un buen entorno de simulación, las cuales son pertinentes para este proyecto.

- Fase de definición: en esta fase, el desarrollador identifica la información a ser procesada, el comportamiento y el rendimiento del sistema. La pregunta fundamental se centra sobre *el qué* del problema.
- Fase de desarrollo: en esta fase, el desarrollador, define el diseño y la implementación de los procedimientos, las estructuras, las funciones, y la realización de las pruebas, en donde la pregunta se centra en *el cómo* del problema.
- Fase de Mantenimiento: hace referencia a las adaptaciones requeridas a medida que evoluciona el entorno de simulación, en donde todo se centra en *el cambio*.

Así mismo, existen algunos pasos básicos que deben ser tenidos en cuenta dentro de la metodología de simulación, adecuados para los propósitos del presente proyecto [37]:

## 1. Formulación del problema.

El objetivo a nivel de simulación es analizar el desempeño a nivel físico de los formatos de modulación con respecto a los efectos lineales y no lineales, en donde fue necesaria una investigación previa, la cual se realizó de la siguiente manera:

- Análisis de los efectos lineales y no lineales (ítem 1.1 y 1.2): donde se determinó que los efectos lineales a ser analizados son el ruido, la atenuación, la CD y la PMD. Así mismo, se determinaron los efectos no lineales SPM, XPM y FWM.
- Definición de los parámetros de monitoreo óptico (ítem 1.3): donde se definieron los parámetros que serán utilizados como una medida para determinar el desempeño de los formatos de modulación, seleccionando la BER, el Factor Q, la ONSR, el diagrama del ojo y la potencia del canal.
- Selección de los formatos de modulación (ítem 1.4): mediante el análisis del estado del arte dentro del contexto internacional de los formatos de modulación que han generado mayor atención dentro de las comunicaciones ópticas por su comportamiento frente a las degradaciones, aportando significativamente en el desempeño de la red.

## 2. Definición de características del modelo simplificado de red.

Se recopiló información de los operadores nacionales, para determinar las principales características de sus redes WDM, resumidas en la tabla 2.6, las cuales serán implementadas sobre cada uno de los escenarios de simulación.

## 3. Generación de los escenarios de simulación.

Una vez determinadas las características del modelo simplificado de red sobre el cual se realizarán las simulaciones (ítem 2.4), se definen los escenarios, para posteriormente analizar el desempeño de los formatos de modulación frente a los efectos lineales y no lineales presentes en los sistemas DWDM definidos en el capítulo 1.

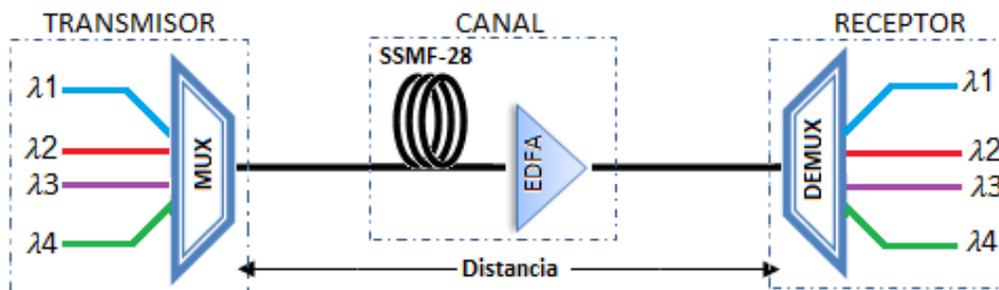


Figura 3.1 Esquema general de los escenarios de simulación.

Para realizar el análisis del desempeño de los formatos de modulación, cada uno de los escenarios, a nivel general cuenta con una velocidad de transmisión de datos de 2.5Gb/s, implementado 4 canales, manteniendo los parámetros de operación dentro de los rangos definidos para el contexto nacional resumidos en la tabla 2.6.

Como se observa en la tabla 3.1, para cada uno de los escenarios, se definirán tres secciones: las características de la sección del transmisor, del canal y del receptor, donde cada escenario se simula y posteriormente se analizan los resultados obtenidos. Se debe aclarar que a pesar de que cada uno de los escenarios parte de la misma configuración de las características y el mismo tipo de elementos de red, estos cambian en cada una de sus secciones debido a la implementación de cada uno de los formatos de modulación NRZ-OOK, RZ-DPSK y RZ-DQPSK.

SECCIONES	ELEMENTOS
<p align="center"><b>Sección del Transmisor</b></p>	<p align="center">Modulador Óptico Mach-Zehnder. Filtros Bessel de orden 6. Láser CW, 1MHz de FWHM. 100GHz de espaciamiento de canal. Banda C alrededor de los 1550nm. Velocidad de Transmisión de 2.5Gb/s.</p>
<p align="center"><b>Sección del Canal</b></p>	<p align="center">Estándar ITU-T G.652. Fibra SSMF-28. Amplificadores EDFA. Fibras de compensación DCF.</p>
<p align="center"><b>Sección del Receptor</b></p>	<p align="center">Sensibilidad de -28dBm. Filtro Eléctrico tipo Bessel de orden 6. Filtro Óptico de coseno rizado.</p>

**Tabla 3.1 Características básicas del escenario de simulación**

Mediante la combinación y la configuración de los elementos anteriormente mencionados, se puede generar las formas de onda requeridas, así mismo, dependiendo de los requerimientos de implementar cada uno de los formatos de modulación, se pueden necesitar más dispositivos de amplificación o dispositivos de compensación de la CD, generando cambios en el canal.

Una vez determinados los cambios para cada una de las secciones de la red mediante la implementación de cada uno de los formatos de modulación, se generan los tres escenarios de simulación sobre los cuales se realizará el análisis pertinente como se observa en la tabla 3.2.

ESCENARIOS	COMPONENTES
<b>Escenario 1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transmisor NRZ</li> <li>• Canal</li> <li>• Receptor NRZ</li> </ul>
<b>Escenario 2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transmisor RZ-DQPSK</li> <li>• Canal</li> <li>• Receptor RZ-DQPSK</li> </ul>
<b>Escenario 3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transmisor RZ-DPSK</li> <li>• Canal</li> <li>• Receptor RZ-DPSK</li> </ul>

**Tabla 3.2 Definición de los escenarios de simulación**

#### 4. Plan de pruebas.

Hace referencia al modo en que se trabaja dentro del entorno de simulación, explicado mediante un diagrama de flujo de la figura 3.2, donde se sintetiza el proceso de simulación, el cual debe estar dentro de los parámetros objetivos mostrados a continuación:

- BER:  $<10^{-9}$  (teórico), real alrededor de  $10^{-30}$ .
- Factor Q: 6dB (teórico), real alrededor de 25dB.
- Sensibilidad del Receptor: mínimo de -28dBm.

#### 5. Análisis comparativo de los formatos de modulación.

Para analizar comparativamente los formatos de modulación desde la perspectiva de la relación costo-eficiencia se tendrá en cuenta: **a)** el desempeño que presenta el formato de modulación frente a la máxima distancia alcanzable por un solo segmento de red, **b)** la cantidad de recursos implementados para una distancia mínima de 500Km mediante enlaces concatenados y **c)** su comportamiento frente a las diferentes degradaciones ópticas, de la siguiente manera:

- Distancia máxima alcanzable por un segmento de red
- Distancia mínima de 500Km mediante enlaces concatenados

- Análisis de los efectos lineales: Ruido y Pérdidas
- Análisis del efecto lineal: Dispersión Cromática
- Análisis del efecto lineal: PMD
- Análisis del efecto no lineal: SPM
- Análisis del efecto no lineal: XPM
- Análisis del efecto no lineal: FWM

En el diagrama de flujo de la figura 3.2, se aprecia el proceso de la simulación, el cual en general no es secuencial, sino iterativo, así mismo dicho diagrama parte del modelo simplificado de red obtenido previamente.



**Figura 3.2 Diagrama de flujo para el entorno de simulación.**

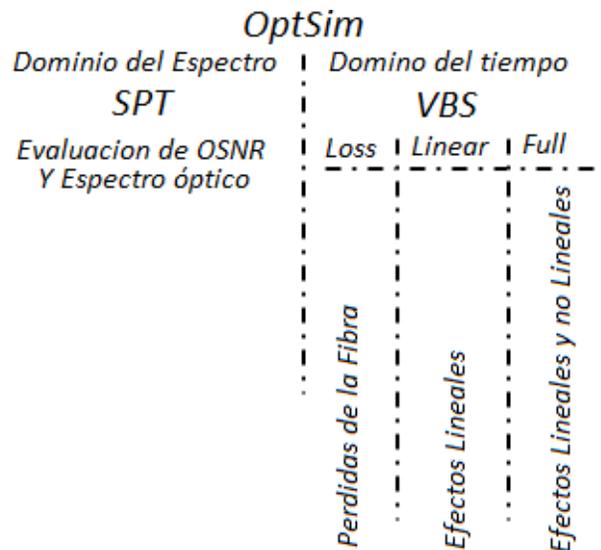
### 3.2 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

OptSim® es un entorno de simulación que soporta el diseño y la evaluación de desempeño del nivel de transmisión de sistemas de comunicaciones ópticas. Las facilidades de visualización y post-procesamiento de datos proporcionan una interface gráfica de medición flexible que actúa como un conjunto de instrumentos virtuales de laboratorio. OptSim® puede ser utilizado para un amplio rango de aplicaciones, entre las cuales se pueden destacar:

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

La herramienta de simulación OptSim® de Rsoft, en su documento “User Guide”, define dos técnicas de simulación las cuales pueden ser utilizados dependiendo del tipo de resultados que se deseen obtener: simulaciones en modo muestra, “*la cual es totalmente temporal, siendo la más fiel del mercado*” y simulaciones en modo bloque, la cual es la técnica de simulación tradicional.

El modo muestra, es particularmente útil para escoger entre diferentes tipos de variaciones del diseño en un enlace de una red de fibra óptica, dicho modo, se implementa muestra a muestra, lo cual optimiza el uso de la memoria de la secuencia en cada punto de interés arrojando los mejores resultados con respecto a las formas de onda, sin embargo el modo bloque, es la técnica de simulación tradicional, en la cual la secuencia de entrada se evalúa por bloque hasta el punto de salida [38]. En la figura 3.3, se observan las dos técnicas de simulación con las cuales cuenta la herramienta de simulación OptSim.



**Figura 3.3 Técnicas de simulación de la Herramienta OptSim® [38].**

❖ **Técnica de Propagación Espectral (SPT)**

Es una simulación en el dominio del espectro, donde las señales ópticas son propagadas como espectros de potencia, cada componente es caracterizada por una función de transferencia que no toma en cuenta las no linealidades de la fibra. Sin embargo, esta técnica es utilizada por VBS para estimar los puntos operativos tales como EDFAs, donde se requiere un conocimiento previo del espectro de potencia promedio de entrada [38].

❖ **Técnica de Ancho de Banda Variable (VBS)**

Es una simulación en el dominio del tiempo, la cual es el centro del entorno de simulación OptSim, donde las señales son propagadas a través de las redes como muestras en el dominio del tiempo, esta técnica es utilizada para simular tanto los efectos lineales y no lineales para las componentes ópticas y eléctricas [38].

*Para el propósito del presente proyecto, se utiliza la estrategia de simulación del modo muestra y la técnica VBS, dado que cumplen a cabalidad con los requerimientos de los escenarios de simulación.*

Mediante el desarrollo del presente capítulo, se determinó una metodología acorde al proyecto de investigación, donde los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios planteados sean adecuados al entorno de simulación.

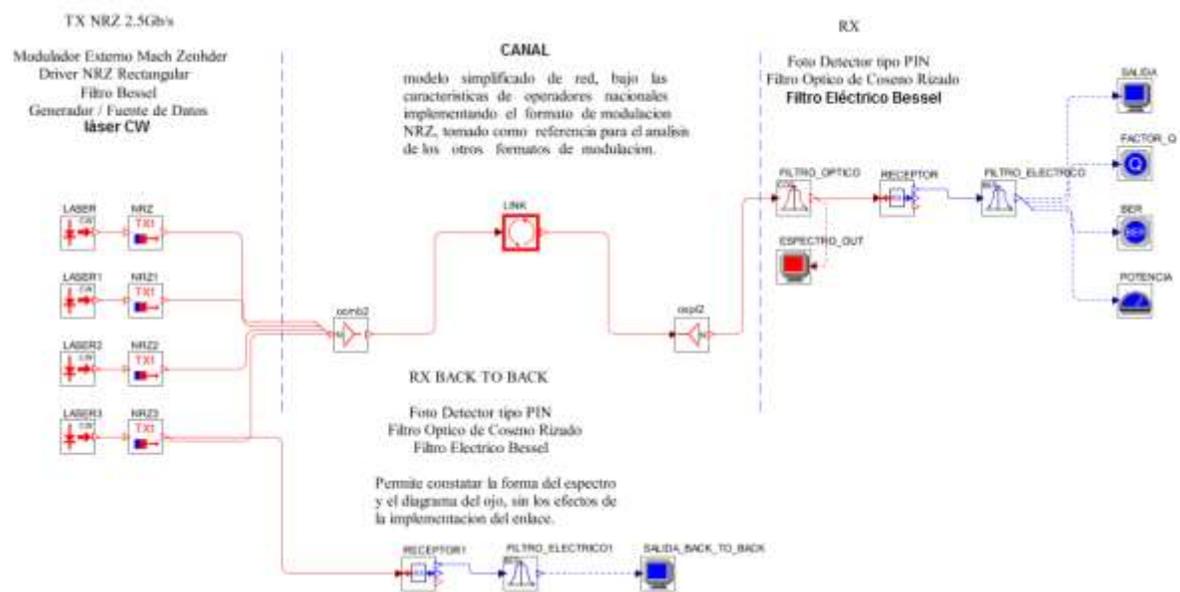
Así mismo, se identificó mediante el análisis de la herramienta OptSim® de Rsoft que una de las ventajas, es la facilidad de ser configurada para obtener resultados específicos, como el análisis de los efectos lineales o de las pérdidas de manera independiente, así mismo la herramienta cuenta con la capacidad de trabajar en red.

Por otra parte, uno de los principales inconvenientes es que al estar diseñada para sistemas de 10Gb/s, la configuración de los parámetros para implementar modelos a 2.5Gb/s se dificulta sustancialmente, sin embargo una vez configurado, los resultados obtenidos son bastante fieles permitiendo introducir las condiciones básicas de operación de un sistema real, simulando la mayoría de los componentes de forma no ideal.

## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE FORMATOS DE MODULACIÓN EN COMUNICACIONES ÓPTICAS SOBRE REDES WDM.

Las actividades a desarrollar se enfocan en la evaluación del desempeño de los formatos de modulación, basados en los efectos lineales y no lineales presentes en las comunicaciones ópticas; la evaluación de los costos, debido a los cambios en los enlaces existentes producidos al aplicar los formatos de modulación; y al análisis comparativo desde la perspectiva de la relación costo-eficiencia.

### 4.1 ESCENARIO 1, FORMATO DE MODULACIÓN NRZ-OOK



**Figura 4.1 Modelo simplificado de red para el formato de modulación NRZ-OOK.**

En la figura 4.1, se aprecia el escenario de simulación para el formato de modulación NRZ-OOK, una de las particularidades de la implementación de este formato de modulación, es su fácil configuración y su simplicidad en la cantidad de elementos utilizados para generar una forma de onda NRZ, el transmisor 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 aceptable (-28dBm).

En las figuras 4.2 (a) y 4.2 (b), se aprecian las condiciones iniciales de funcionamiento del formato de modulación NRZ-OOK, con respecto al diagrama del ojo y el espectro óptico alrededor de los 194nm.

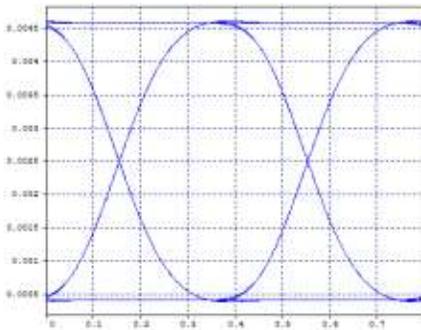


Figura 4.2 (a) Diagrama del ojo en un Receptor Back to Back.

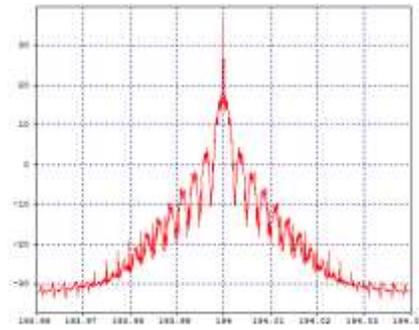


Figura 4.2 (b) Espectro óptico alrededor de los 194nm.

❖ **Distancia máxima alcanzable por un segmento de red**

Para este análisis, se determina la máxima distancia alcanzable por un tramo de fibra implementando un solo dispositivo de amplificación EDFA, teniendo en cuenta la mejor configuración de cada uno de los elementos de la red dentro de los rangos posibles (tabla 2.6), contando con las degradaciones típicas de los sistemas (pérdidas, dispersión cromática, ruido, entre otras), posteriormente se analizará de manera independiente los efectos lineales y no lineales, para determinar cuáles aportan en mayor medida degradaciones en el desempeño de la red.

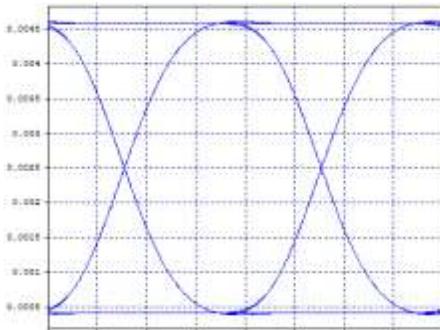


Figura 4.3 (a) Diagrama del ojo en un Receptor Back to Back.

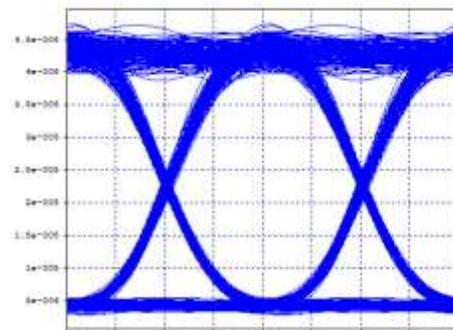


Figura 4.3 (b) Diagrama del ojo tras un tramo de 130Km de fibra.

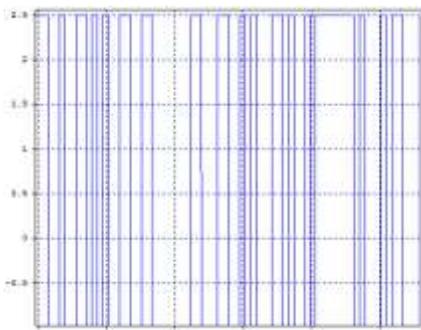


Figura 4.3 (c) Señal Eléctrica transmitida.

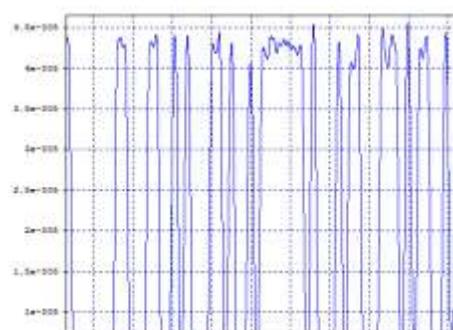


Figura 4.3 (d) Señal eléctrica en el receptor.

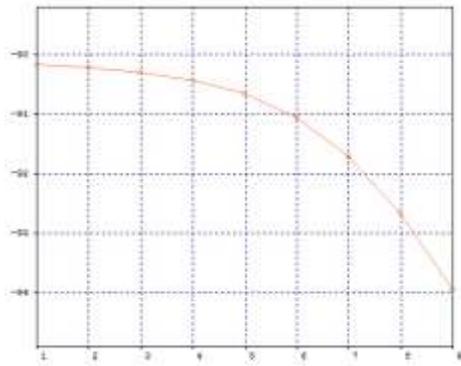


Figura 4.3 (e) Potencia en Recepción ( $P_{RX}$ ) vs Distancia de Transmisión.

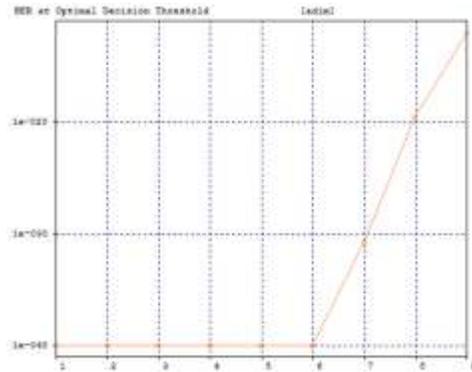


Figura 4.3 (f) BER vs Distancia de Transmisión.

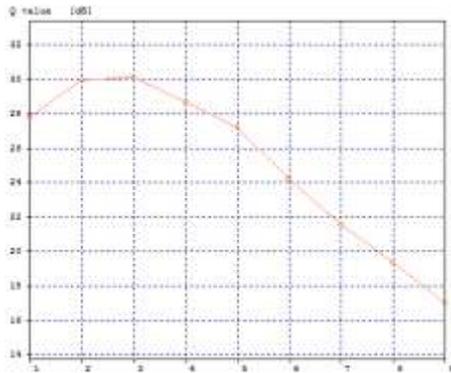


Figura 4.3 (g) Factor Q vs Distancia de Transmisión.

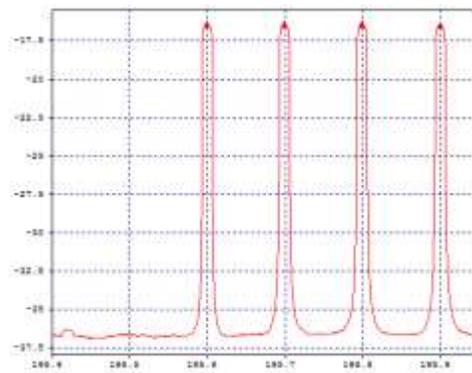


Figura 4.3 (h) Espectro óptico en Recepción a una distancia máxima de 130Km con un potencia promedio de recepción por Canal del orden de los -16dBm.

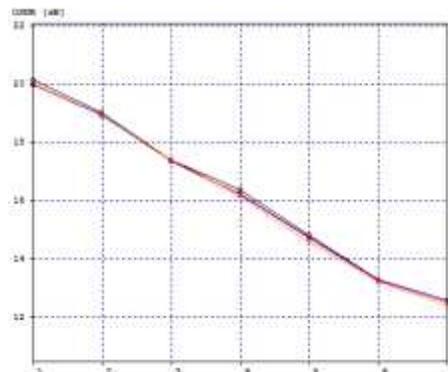
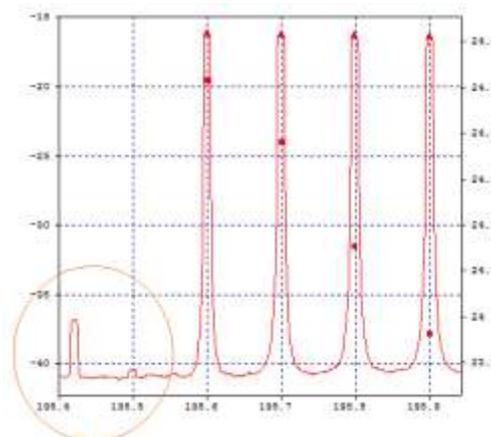


Figura 4.3 (i) Degradación de la OSNR dependiente de la distancia de transmisión.

Distancia [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>TX</sub> [dBm]	OSNR <sub>IN</sub> [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
120	195.9	1.64e-40	23.96	0.979	37.83	-16.56	20.13
125	195.9	1.64e-40	23.22	0.979	37.83	-16.67	19.03
130	195.9	4.33e-31	21.34	0.979	37.83	-16.90	17.40
135	195.9	1.95e-26	20.58	0.979	37.83	-17.14	16.37
140	195.9	3.74e-20	19.35	0.979	37.83	-17.51	14.81
145	195.9	6.86e-15	17.71	0.979	37.83	-18.02	13.28
150	195.9	4.07e-10	15.73	0.979	37.83	-18.29	12.60
155	195.9	9.60e-7	13.66	0.979	37.83	-19.14	10.75
160	195.9	6.92e-6	12.74	0.979	37.83	No detectado	no detectado

**Tabla 4.1 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones del sistema.**

Las figuras 4.3 (a) a 4.3 (i), muestran los diagramas de los parámetros de monitoreo óptico para una distancia máxima de 130Km. Se debe aclarar que por lo general se implementan potencias de transmisión y amplificación bajas, dado que al introducir potencias altas dentro del modelo se genera degradación debido a la excitación de los efectos no lineales, produciendo canales no deseados debido al fenómeno de la XPM, como se aprecia en la figura 4.4.



**Figura 4.4 Espectro óptico en Recepción a 130Km con altas potencias de Tx.**

En tabla 4.1, se aprecia la degradación de los parámetros de monitoreo óptico dependientes de la distancia de transmisión, donde después de una distancia de 130Km, el sistema se degrada hasta el punto de no poder detectar los canales transmitidos que se encuentran por debajo del rango de operación del receptor (-28dBm).

La distancia máxima de este formato de modulación (130Km) se tomó en base a los parámetros mínimos implementados por algunos operadores nacionales del orden de 1e-30 para la tasa de error (BER) y 20dB para el Factor Q, a pesar que según el estándar G.652 son del orden de los 1e-9 y 6dB respectivamente.

Así mismo, mediante el análisis de los resultados obtenidos en la tabla 4.1, se determinó que el formato de modulación NRZ-OOK configurado con una potencia en transmisión de 2dBm y una potencia de amplificación EDFA de 0dBm, puede alcanzar una distancia máxima de 130Km. Dichos resultados serán utilizados más adelante para comparar este formato de modulación, que es el más implementado dentro del contexto nacional, con los otros formatos bajo investigación (RZ-DPSK y RZ-DQPSK).

❖ **Distancia mínima de 500Km mediante enlaces concatenados**

Al realizar este análisis, se determinó cuál es la cantidad de dispositivos de amplificación o compensación, que se deben utilizar en la red para alcanzar una distancia mínima de 500Km mediante la implementación del formato de modulación NRZ-OOK, concatenando segmentos de red post-amplificados y manteniendo los parámetros de configuración dentro de los rangos anteriormente establecidos (tabla 2.6).

Como primera medida, se parte de segmentos de red con distancias del orden de los 130Km (máximo para un Span) intentando mantener la menor cantidad de dispositivos EDFA y DCF, con el propósito de tomar como referencia los resultados obtenidos, para analizar desde la perspectiva de la relación costo-eficiencia los otros formatos bajo investigación.

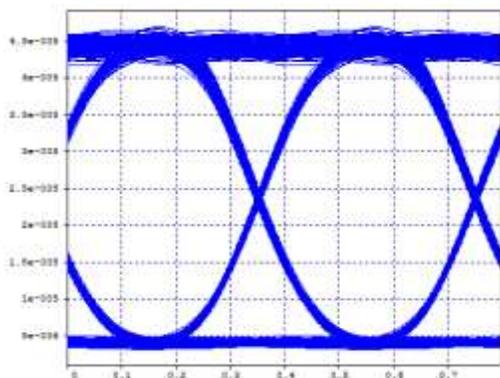


Figura 4.5 (a) Diagrama del ojo para un Span de 130Km.

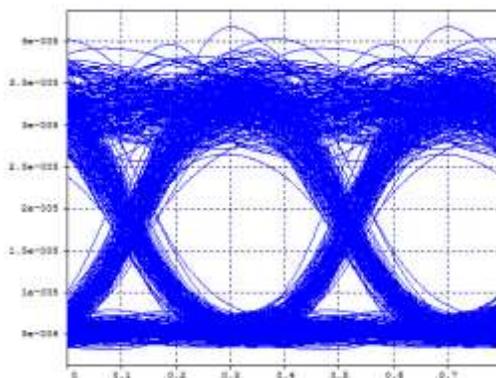


Figura 4.5 (b) Diagrama del ojo para dos Span de 130Km.

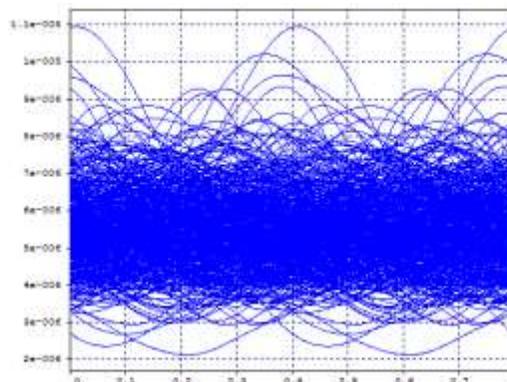
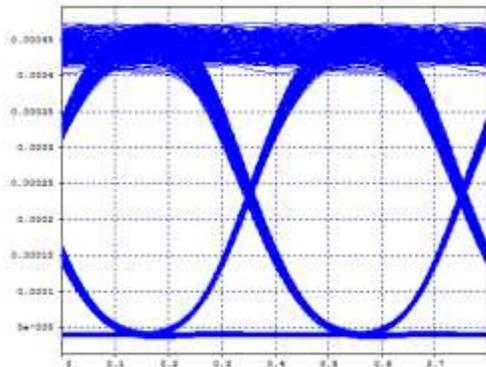
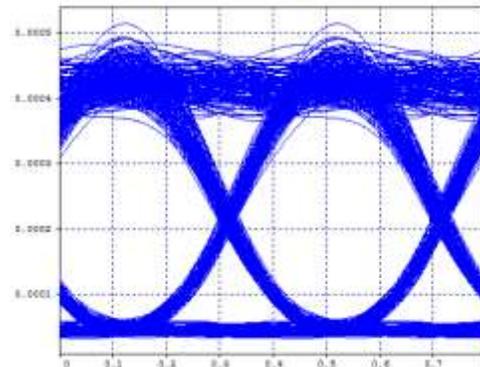


Figura 4.5 (c) Diagrama del ojo para tres Span de 130Km.

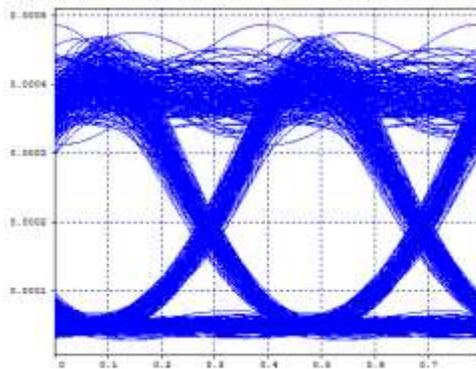
Como se aprecia en las figuras 4.5 (a) a 4.5 (c), concatenar segmentos de red del orden de los 130Km no resulta eficiente, dado que el sistema se degrada rápidamente en gran medida por las pérdidas introducidas por cada span y a pesar de que los amplificadores pueden manejar potencias del orden de los 21dBm, estas no aportan significativamente en el desempeño de la red, es por este motivo que para llegar a una distancia mínima de 500Km se debe reducir la longitud de cada tramo, evitando segmentos de red muy cortos, dado que esto aumentaría la cantidad de dispositivos EDFA y por lo tanto incrementaría el costo de la red.



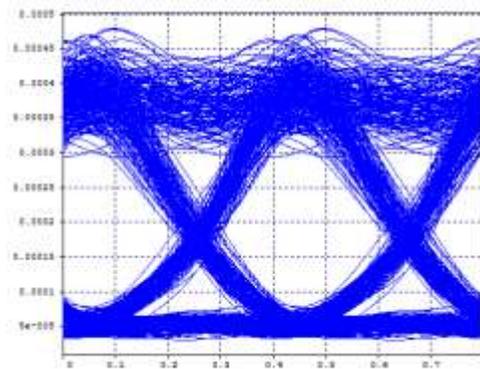
**Figura 4.6 (a) Diagrama del ojo para un Span de 72Km obteniendo una BER = 1e-40, distancia total = 72Km.**



**Figura 4.6 (b) Diagrama del ojo para tres Span de 72Km obteniendo una BER = 1e-40, distancia total = 216Km.**



**Figura 4.6 (c) Diagrama del ojo para cinco Span de 72Km obteniendo una BER = 5.80e-37 distancia total = 360Km.**



**Figura 4.6 (d) Diagrama del ojo para siete Span de 72Km obteniendo una BER = 5.03e-33 distancia total = 504Km.**

En las figuras 4.6 (a) a 4.6 (d), se muestra el efecto de la degradación del modelo debido a la concatenación de enlaces con distancias de 72Km, donde al final del séptimo span se pudieron obtener los parámetros objetivo con el mínimo de dispositivos implementados para este formato (7 EDFAs en total), también se comprobó si el efecto de realizar pre-amplificación antes de los enlaces concatenados (Booster), podría afectar positivamente la eficiencia del sistema, resultando negativo a la implementación de dichos ajustes.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para este enlace Nodo a Nodo mediante la implementación de segmentos de red post-amplificados, así como la tabla de los parámetros de monitoreo óptico alrededor de la máxima distancia (504Km) para verificar la degradación del modelo.

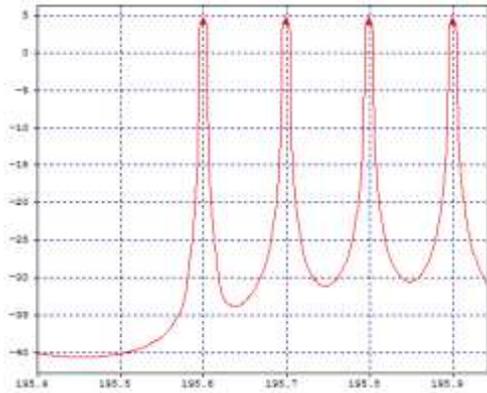


Figura 4.7 (a) Espectro óptico Transmitido.

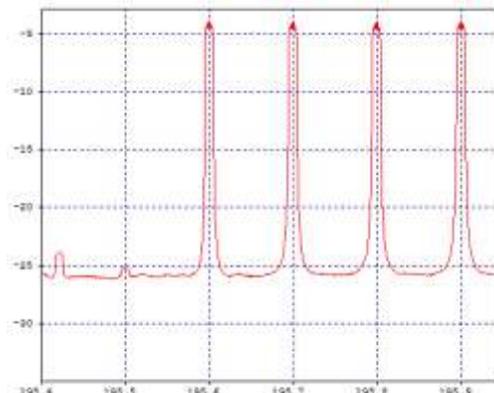


Figura 4.7 (b) Espectro óptico en Recepción.

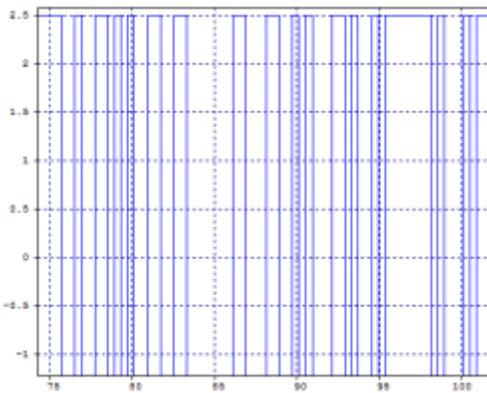


Figura 4.7 (c) Señal Eléctrica Transmitida.

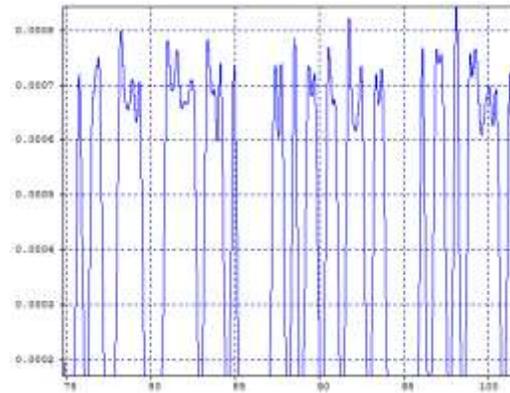


Figura 4.7 (d) Señal Eléctrica en Recepción.

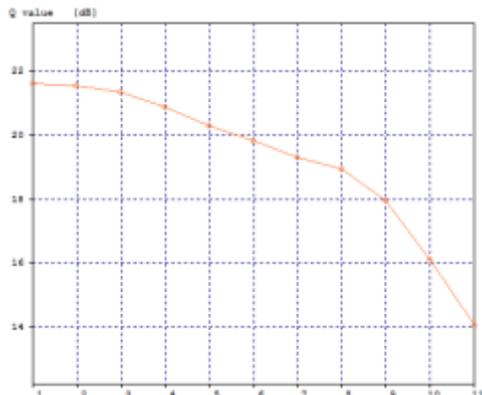


Figura 4.7 (e) Diagrama del Factor Q vs Distancia máxima del enlace.

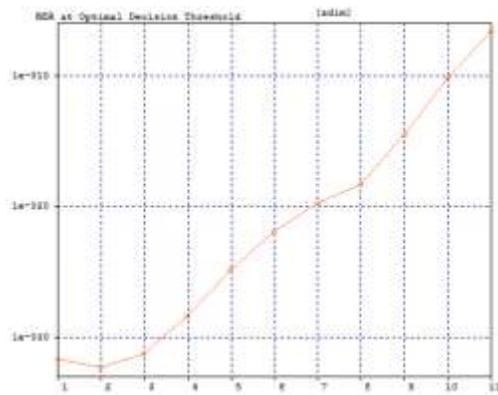


Figura 4.7 (f) Diagrama de la BER vs Distancia máxima del enlace.

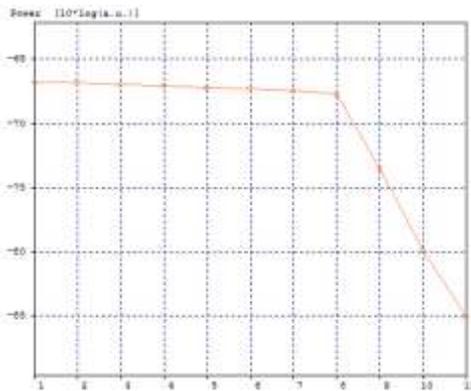


Figura 4.7 (g) Potencia en recepción vs Distancia máxima del enlace.

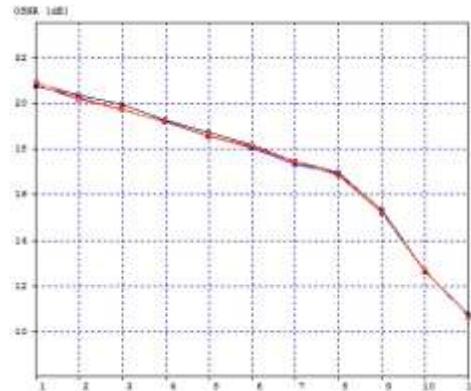


Figura 4.7 (h) Diagrama de la OSNR vs Distancia máxima del enlace.

Distancia Total [Km]	Distancia por Span [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
490	70	194	2.91e-32	21.61	-4.32	20.92
504	72	194	5.03e-33	21.56	-4.38	20.38
518	74	194	6.41e-32	21.35	-4.43	19.96
532	76	194	6.12e-29	20.90	-4.53	19.31
546	78	194	1.61e-25	20.30	-4.60	18.74
560	80	194	6.41e-23	19.85	-4.67	18.24
574	82	194	1.97e-20	19.30	-4.81	17.50
588	84	194	4.90e-19	18.97	-4.91	17.00
602	86	194	3.06e-15	17.95	-7.87	15.36
616	88	194	7.37e-11	16.13	-11.33	12.70
630	90	194	2.41e-7	14.09	-14.09	10.77

Tabla 4.2 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones del sistema mediante segmentos de red concatenados.

#### ❖ Análisis de los efectos lineales: Ruido y Pérdidas

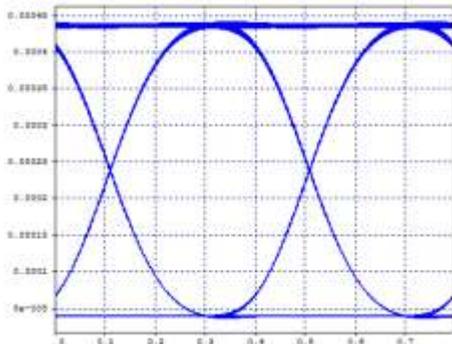
Para determinar el efecto de las pérdidas y el ruido asociadas a la propagación para una distancia máxima de 130Km con un solo span y mediante un solo dispositivo de amplificación EDFA, se analizan los parámetros de monitoreo óptico hasta distancias superiores de transmisión, debido a que la atenuación y el ruido introducidos por los elementos de red, son parámetros intrínsecos que solo se ven afectados mediante el incremento de la distancia o el aumento de los dispositivos de amplificación.

Para verificar la degradación del modelo debido solo a las pérdidas introducidas por la fibra y al ruido de los dispositivos, se trabaja con potencias mínimas de amplificación (0dBm), para no excitar los efectos no lineales y se desprecia la dispersión cromática (efecto lineal) introducida por la fibra (17ps/nm\*Km).

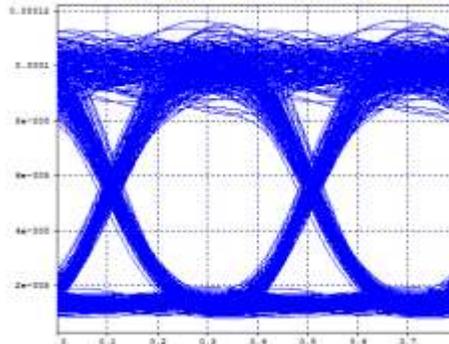
Al realizar la variación de la distancia y debido a que la fibra introduce 0.275dB/Km se está generando un rango de atenuación del orden de 27.5dB para 100Km hasta 38.5dB para 140Km de pérdidas totales introducidas al modelo, así mismo se tiene en cuenta el ruido introducido por los amplificadores EDFA del orden de los 5.5dB y el ruido de los moduladores y el láser (FWHM = 1MHz).

Distancia [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>TX</sub> [dBm]	OSNR <sub>IN</sub> [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
100	195.9	1e-40	28.52	0.979	37.83	-6.29	23.48
105	195.9	1e-40	27.60	0.979	37.83	-7.14	22.05
110	195.9	1e-40	26.09	0.979	37.83	-8.11	21.16
115	195.9	1e-40	23.96	0.979	37.83	-9.95	19.36
120	195.9	1e-40	23.20	0.979	37.83	-11.15	18.09
125	195.9	3.81e-35	22.00	0.979	37.83	-12.43	16.82
130	195.9	2.99e-25	20.25	0.979	37.83	-13.97	15.30
135	195.9	6.54e-19	18.96	0.979	37.83	-15.03	14.22
140	195.9	2.88e-15	17.84	0.979	37.83	-16.31	12.96

**Tabla 4.3 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones de las pérdidas y el ruido.**

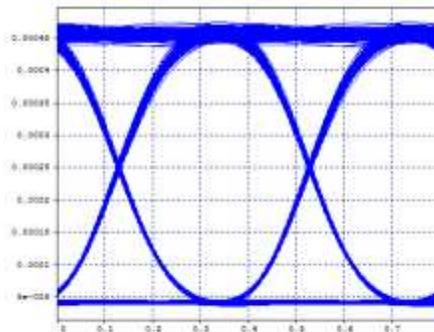


**Figura 4.8 (a) Diagrama del ojo sin efectos de pérdidas o ruido introducido por los elementos de red y el tramo de fibra a 130Km.**



**Figura 4.8 (b) Diagrama del ojo con efectos de pérdidas y ruido introducido por los elementos de la red y el tramo de fibra a 130Km.**

En las figuras 4.8 (a) y 4.8 (b), se observa el efecto de las pérdidas dentro del modelo, donde la degradación de la señal se da en gran medida debido a que los dispositivos de amplificación implementados no compensan la atenuación de la señal e introducen más ruido. Una posible solución sería la de aumentar considerablemente la potencia pero esto generaría que otras degradaciones (efectos no lineales) hagan efecto sobre la transmisión. Sin embargo, mediante le herramienta de simulación se comprobó que el aumento en la potencia de transmisión y en la potencia de los elementos de post- amplificación, no mejoran el desempeño del sistema.

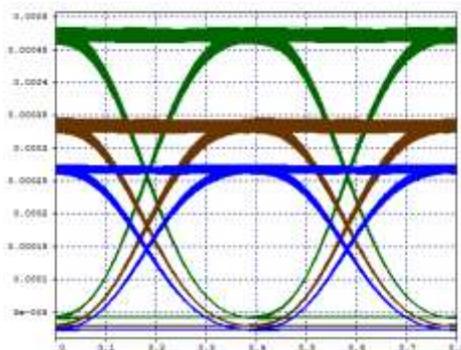


**Figura 4.9 Diagrama del Ojo a 72Km afectado solo por la atenuación introducida por la fibra, el ruido de los amplificadores y el ruido de los transmisores.**

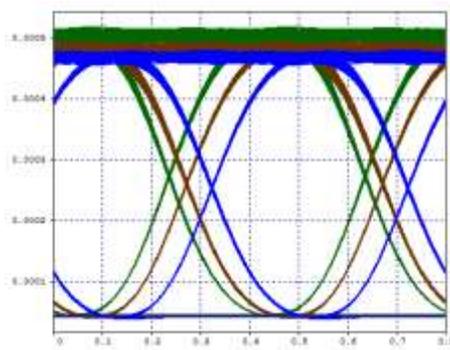
Por otra parte, al analizar los datos obtenidos en la tabla 4.3, para las figuras 4.8 (a) y 4.8 (b), se concluye que para el formato de modulación NRZ-OOK, *el efecto de las pérdidas y el ruido introducido por los elementos que conforman el enlace, aportan significativamente en la degradación del modelo siendo difícil de compensar, a menos que se disminuya drásticamente la longitud del span del orden de los 80Km o menos, como se aprecia en la figura 4.9.*

#### ❖ Análisis del efecto lineal: Dispersión Cromática

Para determinar el impacto de la Dispersión Cromática para un solo span con distancia máxima de 130Km se procederá a variar el parámetro Dispersión (variable global dentro del entorno de simulación) sin tener en cuenta los efectos de atenuación y ruido introducidos por los dispositivos EDFA, así mismo se trabaja a potencias bajas para no excitar los efectos no lineales teniendo en cuenta el jitter.



**Figura 4.10 (a) Diagrama del ojo sin efecto de la Dispersión Cromática.**



**Figura 4.10 (b) Efecto de la Dispersión Cromática en el Diagrama del ojo.**

Para verificar este efecto lineal, se puede realizar de tres maneras: primero, variando el parámetro de la dispersión cromática de la fibra (CD), manteniendo la máxima distancia de transmisión 130Km; segundo, fijando el parámetro de dispersión cromática introducido por la fibra del orden de los 17ps/nm\*Km y variando la longitud del enlace; y tercero compensado el tramo de fibra mediante módulos DCF en los rangos 100% compensado, 75% compensado, 50% compensado, 25% compensado y no compensado.

Como primera medida, para determinar el efecto de la CD implementando el formato NRZ-OOK, se procederá de la manera tres descrita anteriormente, donde para una tramo de 130Km de fibra se requiere: 22.1Km de fibra DCF para compensar en 100% la CD, 16.57Km de fibra DCF para compensar 75% la CD, 11.05Km de fibra DCF para compensar 50% la CD, 5.525Km de fibra DCF para compensar en 25% la CD y 0Km para no realizar compensación, donde para propósitos de investigación se desprecia la atenuación introducida por la fibra DCF, para verificar el efecto de la compensación en el modelo.

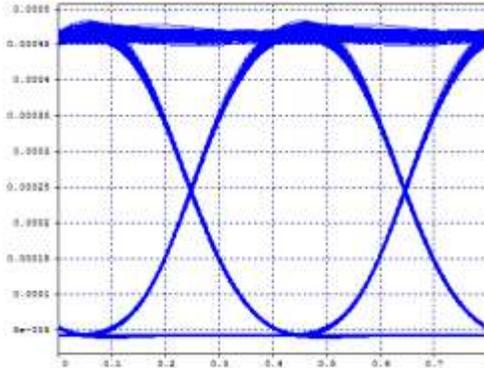


Figura 4.11 (a) Diagrama del Ojo sin compensación de la CD.

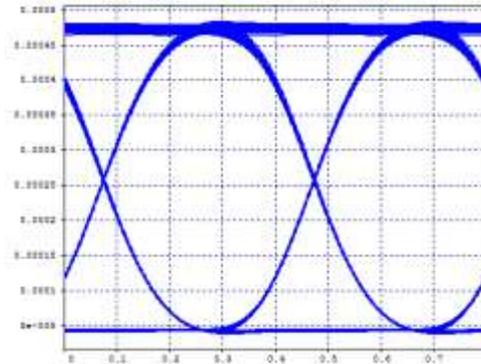
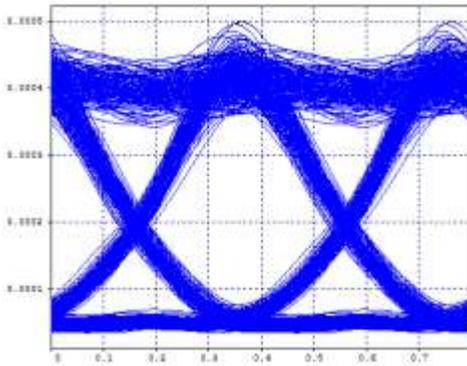


Figura 4.11 (b) Diagrama del Ojo compensando en 100% la CD.

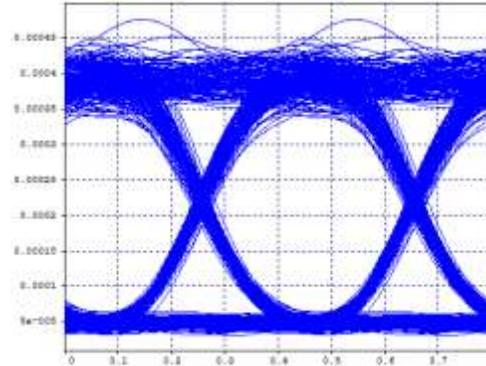
Longitud DCF [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]	Jitter [ns]
22.1	195.9	1e-40	40	-5.93	33.86	0.0801411
16.57	195.9	1e-40	40	-5.95	33.83	0.0783091
11.05	195.9	1e-40	40	-5.90	33.94	0.0793242
5.525	195.9	1e-40	38.64	-6.06	33.68	0.0744865
0	195.9	1e-40	36.44	-6.04	33.22	0.0702118

Tabla 4.4 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la CD en un span de 130Km implementando fibra compensadora DCF.

Como se aprecia en los resultados obtenidos en la tabla 4.4 y en las figuras 4.11 (a) y 4.11 (b), el efecto de la CD no afecta considerablemente el desempeño del sistema para un solo span de fibra de 130km, debido en gran medida a su dependencia en frecuencia y a la velocidad de transmisión de datos tan baja 2.5Gb/s. Por otra parte, se procede a verificar la mejora que se podría introducir al sistema realizando compensación, teniendo en cuenta los resultados obtenidos anteriormente en un modelo con todas las degradaciones y mediante la implementación de siete enlaces concatenados de 72Km para una distancia total de 504Km.



**Figura 4.12 (a) Diagrama del ojo para siete tramos de fibra concatenados de 72km sin compensación de la CD.**



**Figura 4.12 (b) Diagrama del ojo para siete tramos de fibra concatenados de 72km con compensación de la CD.**

Para realizar la compensación del modelo se utiliza un tramo de fibra DCF en modo post-compensación de 85Km para compensar en 100% la CD, sin tener en cuenta la atenuación introducida por la fibra, dado que una de las desventajas al implementar tramos de fibra compensadora de dispersión (DCF) es que a pesar de que poseen altos valores de CD negativa y se requiere un porcentaje bajo de longitud de fibra para compensar la dispersión de un tramo SSMF-28, introducen alta atenuación al modelo, del orden de 0.6dB/Km afectando considerablemente la potencia en recepción. Sin embargo, existen otros dispositivos de compensación como son los módulos HA5700 los cuales soportan un máximo de compensación -1360ps/nm sin introducir atenuación y con bajo ruido.

Por otra parte, para determinar la máxima tolerancia del formato de modulación a la Dispersión Cromática, se puede asociar mediante la máxima longitud alcanzada para un span de fibra y a la máxima CD soportada por el modelo del orden de los 57ps/nm\*Km y la distancia máxima se encuentra en 130Km, se puede determinar de la siguiente forma:

Dispersión máxima soportada por el modelo = 57ps/nm\*Km

Distancia máxima del span = 130Km

Máxima CD total soportada por el modelo = 130Km x 57ps/nm\*Km = 7410ps/nm

Fibra DCF	Distancia Total [Km]	Distancia por Span [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]	Jitter [ns]
Sin DCF	504	72	195.9	5.41 e-30	21.12	-6.78	18.14	0.068369
Con DCF	504	72	195.9	4.01 e-40	22.62	-6.82	18.09	0.084371

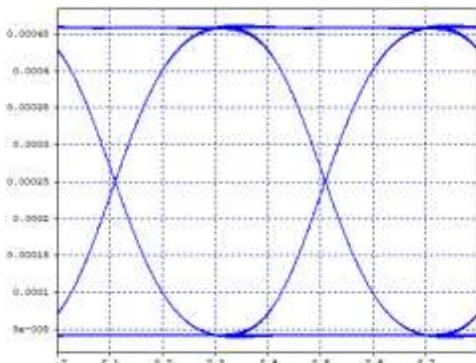
**Tabla 4.5 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones del sistema mediante segmentos de red concatenados dependientes de la CD.**

Como se aprecia en la tabla 4.5 y en las figuras 4.12 (a) y 4.12 (b), *el efecto de compensar la dispersión cromática no es significativo frente al desempeño del formato de modulación NRZ-OOK*, requiriendo más dispositivos de amplificación e incrementando el costo. De esta manera, *se concluye que la dispersión cromática no degrada considerablemente el modelo implementando el formato NRZ-OOK no requiriendo su compensación*.

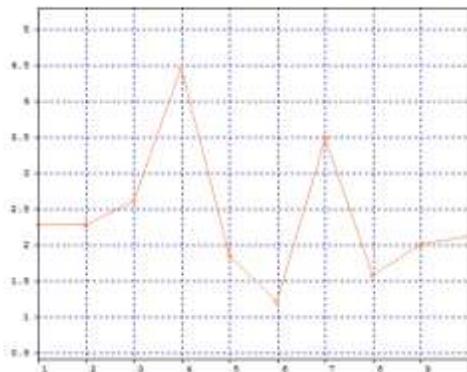
#### ❖ Análisis del efecto lineal: PMD

Para determinar el impacto de la PMD para una distancia máxima de 130Km, se utiliza un emulador de efectos concentrados teniendo en cuenta los efectos de polarización (PMD y las Birrefringencias) dentro del canal. Por otra parte, para visualizar de una mejor manera el efecto de la PMD sobre el modelo, no se tendrán en cuenta las atenuaciones y el ruido introducidos por los dispositivos, ni los efectos de la dispersión cromática (lineal) o los efectos no lineales.

El valor típico de PMD introducido por las fibras SSMF-28 es del orden de los 0.2ps/ $\sqrt{\text{Km}}$ , sin embargo para verificar cual es la tolerancia del formato de modulación NRZ-OOK frente a esta degradación lineal, se toman diferentes rangos de PMD mediante la modificación de este parámetro. Así mismo, se utiliza una librería brindada por OptSim (All-Order PMD) para evaluar el parámetro DGD.



**Figura 4.13 (a) Diagrama del ojo para un Span de 130Km sin considerar otras degradación con una PMD=0.2.**



**Figura 4.13 (b) Diagrama de la DGD vs Parámetro Fuente (Seed).**

Como se aprecia en las figura 4.13 (a), el efecto de la PMD sobre el modelo a valores bajos de variación del parámetro y bajo las características del entorno de simulación, no es significativo, donde el rango de variación de PMD de 0ps/ $\sqrt{\text{Km}}$  a 1ps/ $\sqrt{\text{Km}}$ , se tomó teniendo en cuenta el máximo valor introducido al sistema Nodo a Nodo de 504Km de 100.8ps/ $\sqrt{\text{Km}}$ , el cual es aproximadamente el mismo para un segmento de 130Km con una PMD = 1ps/ $\sqrt{\text{Km}}$ .

De otro modo, para verificar la máxima tolerancia del formato de modulación a la PMD, se generó un rango de valores superiores del orden de los 40ps/ $\sqrt{\text{Km}}$ . Se debe aclarar que para esta primera parte del análisis no se tienen en cuenta los efectos de las demás degradaciones, con el propósito de verificar solo la PMD, como se aprecia en las figuras 4.14 (a) a 4.14 (c).

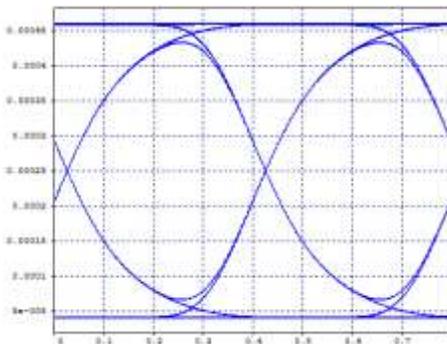


Figura 4.14 (a) Diagrama del ojo para un Span de 130Km sin considerar otras degradación con una PMD=20.

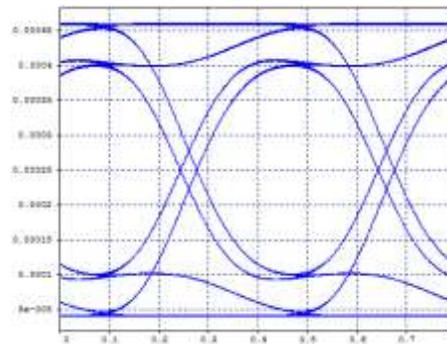


Figura 4.14 (b) Diagrama del ojo para un Span de 130Km sin considerar otras degradación con una PMD=30.

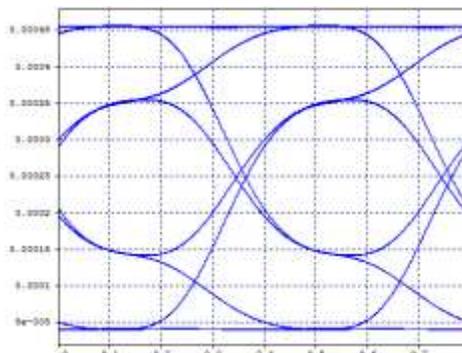


Figura 4.14 (c) Diagrama del ojo para un Span de 130Km sin considerar otras degradación con una PMD=40.

PMD [ps/Km <sup>0.5</sup> ]	PMD Total	Distancia [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
0	0	130	195.9	1e-40	40	-6.07	33.36
5	600	130	195.9	1e-40	40	-6.07	33.36
10	1200	130	195.9	1e-40	40	-6.07	33.36
15	1800	130	195.9	1e-40	33.32	-6.07	33.36
20	2400	130	195.9	1e-40	24.38	-6.07	33.36
25	3000	130	195.9	1.80e-36	22.18	-6.07	33.36
30	3600	130	195.9	1.02e-21	20.81	-6.07	33.36
35	4200	130	195.9	2.78e-9	15.34	-6.07	33.36
40	4800	130	195.9	6.42e-5	11.67	-6.07	33.36

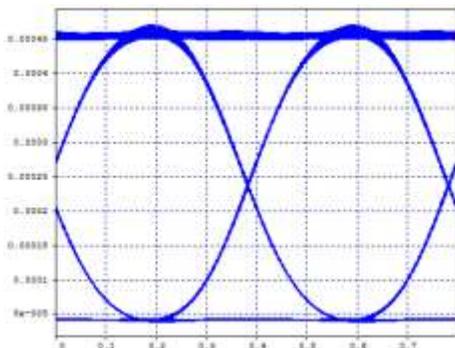
Tabla 4.6 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la PMD en un span de 130Km.

Mediante el análisis de los resultados obtenidos en la tabla 4.6, se determina que la máxima tolerancia al efecto de la PMD soportada por el formato de modulación NRZ-OOK se encuentra alrededor de los 3.000ps/ $\sqrt{\text{Km}}$  dado que después de este rango, el modelo se degrada de tal forma que ningún canal sería detectado, no debido a la potencia en recepción sino a las relaciones de BER y Factor Q.

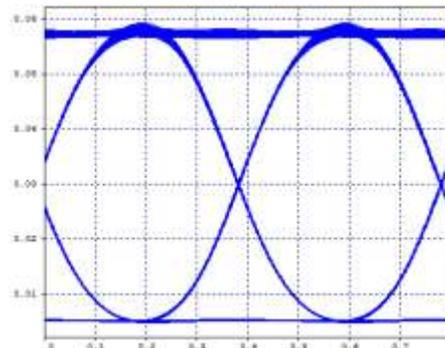
Por otro lado, debe aclararse que para obtener valores de PMD de  $3.000\text{ps}/\sqrt{\text{Km}}$  el modelo debe trabajar con longitudes por span del orden de  $15.000\text{Km}$ , lo cual es imposible, *resultando en un efecto no significativo para la degradación del desempeño del modelo configurado bajo las características del entorno nacional.*

❖ **Análisis del efecto no lineal: SPM**

Para analizar el efecto de la SPM, se procede a variar la potencia de los dispositivos de amplificación y la potencia del láser. Por otra parte, se verifica si el efecto de la dispersión cromática combinado con la SPM mediante el régimen de dispersión normal ( $CD < 0$ ) y el régimen de dispersión anómalo ( $CD > 0$ ), genera cambios en los parámetros de monitoreo óptico.

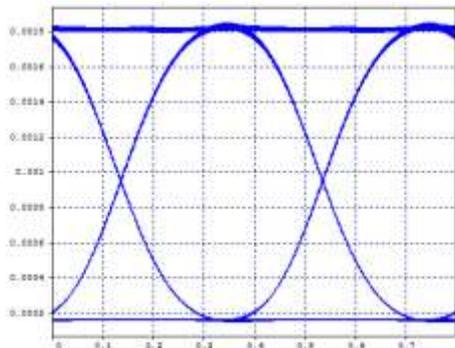


**Figura 4.15 (a) Diagrama del ojo con potencia EFDA=0dBm.**

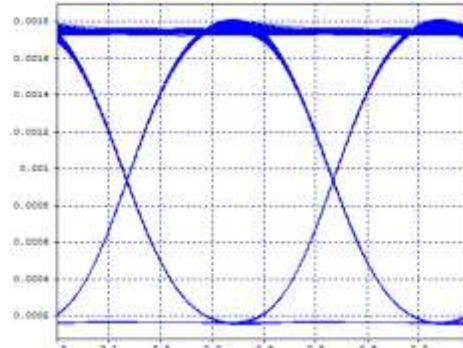


**Figura 4.15 (b) Diagrama del ojo con potencia EFDA=21dBm.**

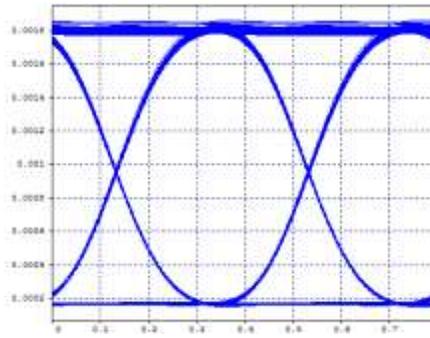
Como se observa en las figuras 4.15 (a) y 4.15 (b), el efecto de la SPM no es un efecto degradante implementando este formato de modulación, dado que al incrementar la potencia de los dispositivos de amplificación y la potencia del láser, el diagrama del ojo y los parámetros de monitoreo óptico se mantienen constantes. Por otra parte, se analiza los efectos del régimen de dispersión anómalo y el régimen de dispersión normal, debido a la fuerte relación de la CD con la SPM.



**Figura 4.16 (a) Diagrama del ojo frente a un régimen de dispersión normal ( $CD < 0$ )  $CD = -10$ .**



**Figura 4.16 (b) Diagrama del ojo frente a un régimen de dispersión Cero  $CD = 0$ .**



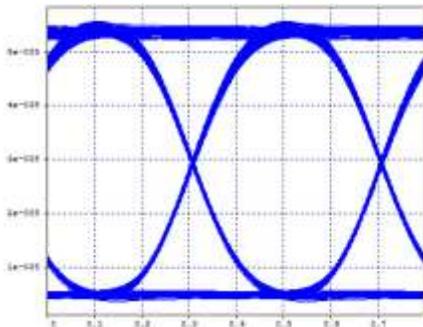
**Figura 4.16 (c) Diagrama del ojo frente a un régimen de dispersión anómalo ( $CD>0$ )  $CD=10$ .**

Como se observa en las figuras 4.16 (a) a 4.16 (c), el régimen de dispersión normal y anómalo, no afecta los parámetros de monitoreo óptico, en mayor medida debido a las características iniciales de implementación del modelo, el efecto de la SPM debido a la CD no aporta significativamente en la degradación del mismo. *De esta forma, se concluye que la SPM no es uno de los efectos degradantes que se debe tener en cuenta, debido a no ser altamente susceptible ante las variaciones de la potencia y a no requerir ser compensado en CD.*

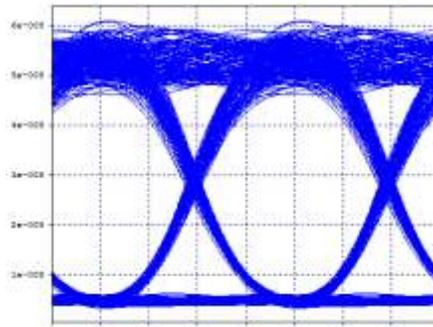
❖ **Análisis del efecto no lineal: XPM**

Para determinar el impacto de la XPM para una distancia máxima de 130Km alcanzada para el formato de modulación NRZ-OOK, se asigna a 2 de los canales una potencia menor de transmisión y se varía la dispersión cromática dentro de la fibra. Lo anterior, se realiza con el fin de verificar si la potencia de un canal afecta a la fase de otro, provocando efectos de ensanchamiento de pulsos cruzados mediante la propagación con diferentes potencias; canal 1 y canal 4 con 0dBm y canal 2 y canal 3 con -10dBm.

Para visualizar el efecto de la XPM, se mira el espectro óptico de salida, el cual debe presentar un leve alargamiento comparado con el espectro de entrada, así mismo el diagrama del ojo debe presentar una degradación inducida por las potencias.



**Figura 4.17 (a) Diagrama del ojo en relación a la XPM con una  $CD=2\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$ .**



**Figura 4.17 (b) Diagrama del ojo en relación a la XPM con una  $CD=10\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$ .**

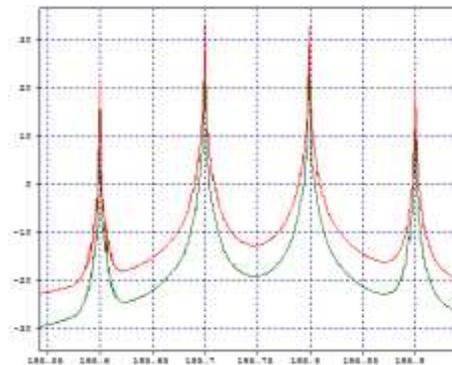


Figura 4.17 (c) Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida (rojo) dependientes de la XPM.

CD [ps/nm*Km]	Distancia [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
0	130	195.6	1e-40	32.10	-12.60	34.12
3	130	195.6	1e-40	34.01	-12.60	34.38
6	130	195.6	1e-40	36.00	-12.57	33.73
9	130	195.6	1e-40	38.36	-12.59	33.70
12	130	195.6	1e-40	40	-12.60	34.53
15	130	195.6	1e-40	40	-12.60	34.44
18	130	195.6	1e-40	40	-12.58	34.29

Tabla 4.7 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la XPM para un span de 130Km mediante la variación de la dispersión cromática.

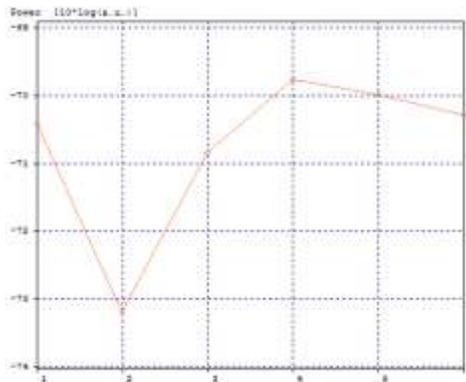
Como se observa en los resultados obtenidos en la tabla 4.7 para los parámetros de monitoreo óptico, los últimos tres valores se encuentran muy próximos al valor óptimo de compensación de los módulos de dispersión y por esta razón se genera un incremento en la potencia de recepción y una mejora en la calidad y la fidelidad de la señal recibida (constatado mediante el diagrama del ojo) figuras 4.17 (a) y 4.17 (b). Así mismo, en la figura 4.17 (c) se observa el efecto de la XPM mediante el análisis del espectro óptico, dado que se presenta un alargamiento del mismo, comparado con el espectro óptico de entrada.

Una de las características principales que se debe tener en cuenta para visualizar el efecto de la XPM mediante la implementación del formato NRZ-OOK, es que la diferencia de las potencias de entrada de los canales debe ser muy significativa, *dado que al estar a una baja velocidad de transmisión de datos y un alto espaciamiento de los canales (100GHz), los efectos no lineales y en particular la XPM, no se hace realmente significativo dentro de los parámetros de configuración de los operadores dentro del contexto nacional.*

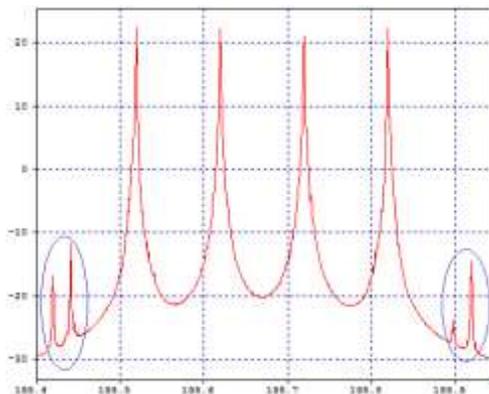
❖ **Análisis del efecto no lineal: FWM**

Para determinar el impacto de la FWM para una distancia máxima de 130Km, se compensa el efecto de la dispersión cromática mediante elementos DCF de una longitud de 22.1Km para un tramo de 130Km de fibra y se varía la dispersión cromática dentro de la fibra para analizar la FWM en la potencia recibida y el espectro óptico, dependientes de la variación de la CD.

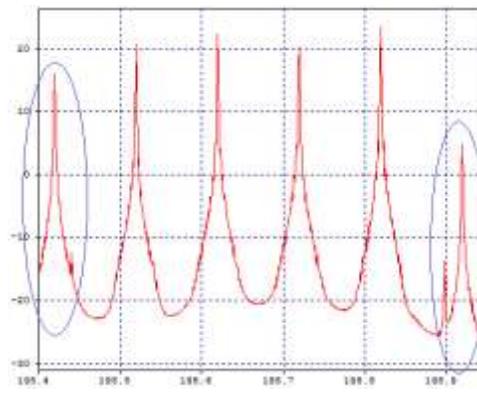
Como se aprecia en las figuras 4.18 (a) a 4.18 (e), debido a que la mezcla de cuatro ondas es un proceso no lineal que ocurre cuando dos o más longitudes de onda se co-propagan en la misma fibra satisfaciendo la condición de *phase-matching*, dependiendo del valor que toma la CD, la fase de los canales transmitidos se aproxima, generando la suma de otros canales en frecuencias distintas a las deseadas.



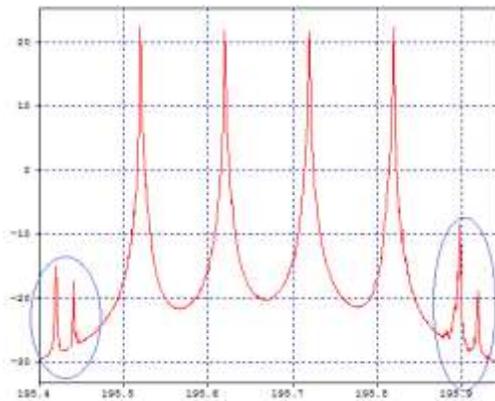
**Figura 4.18 (a) Variación de Potencia vs efecto de la FWM debido al cambio de la CD.**



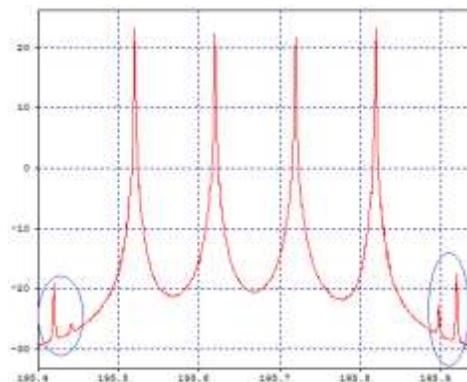
**Figura 4.18 (b) generación de canales no deseados debido a la condición de *phase-matching* para una CD = 0.**



**Figura 4.18 (c) Espectro óptico mostrando la generación de canales no deseados debido a la condición de *phase-matching* para una CD = 1.**



**Figura 4.18 (d) Espectro óptico mostrando la generación de canales no deseados debido a la condición de *phase-matching* para una  $CD = 2$ .**



**Figura 4.18 (e) Espectro óptico mostrando la generación de canales no deseados debido a la condición de *phase-matching* para una  $CD = 3$ .**

Este efecto solo se hace visible para variaciones del parámetro  $CD$ , donde un valor fijo (17ps/nm\*Km) dentro de un span de 130Km, este efecto no se hace evidente. Así mismo, *debido a que la FWM depende de la dispersión y del espaciamiento de los canales WDM, y debido a que el formato de modulación NRZ-OOK no responde ante la compensación de la fibra y además el espaciamiento de los canales es grande (100GHz), la FWM no afecta significativamente el desempeño del modelo.*

Después de realizar el análisis de las diferentes degradaciones que afectan la transmisión mediante la implementación del formato de modulación NRZ-OOK, se concluye qué:

- Es un formato fácil de configurar utilizando unos pocos elementos en transmisión y recepción, *siendo el formato más económico de implementar*, entre los formatos de modulación estudiados.
- Uno de los principales problemas es su degradación debido a las pérdidas y al ruido introducido por los elementos que conforman la red, siendo la única solución la disminución de la longitud por span, requiriendo un mayor número de enlaces concatenados para cubrir la distancia mínima objetivo comparado con los formatos modulados en fase, *siendo el formato menos eficiente respecto al desempeño de la red.*
- A pesar de las limitaciones presentadas por este formato de modulación, se puede denominar como un formato robusto bajo las condiciones y características del entorno nacional, sin embargo NRZ-OOK se encuentra trabajando sobre el límite de sus capacidades, donde no presenta una buena respuesta ante la compensación de la dispersión cromática, ni a las variaciones de la potencia de transmisión por canal o del incremento de los dispositivos EDFA, dejando de lado la posibilidad de implementar redes de mayor capacidad o enlaces de más distancia, *no siendo un formato de modulación eficiente con respecto al futuro de las redes de fibra óptica en el país.*

## 4.2 ESCENARIO 2, FORMATO DE MODULACIÓN RZ-DQPSK

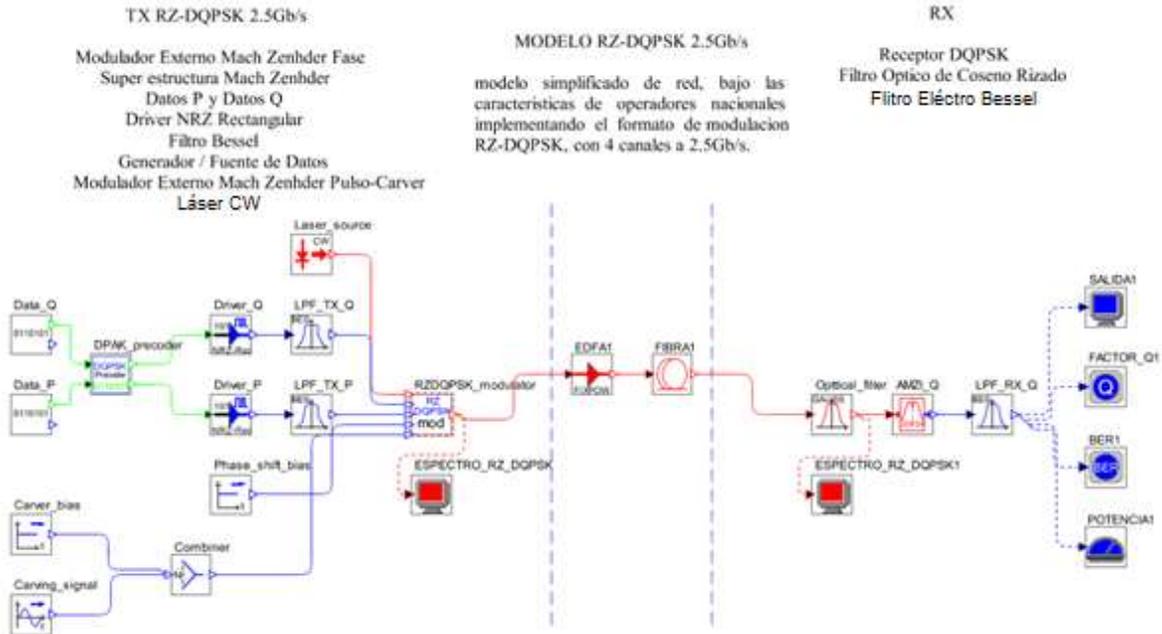


Figura 4.19 Modelo simplificado de red para el formato de modulación RZ-DQPSK.

Como se observa en la figura 4.19, este formato de modulación, tiene la característica de ser muy complejo en la configuración del transmisor, donde una de las principales diferencias con respecto al formato de modulación NRZ-OOK, es la configuración física de los elementos en transmisión y recepción, la cual se incrementa significativamente dado que el formato requiere una estructura súper mach Zehnder para separar los datos de fase (datos P) y cuadratura (datos Q).

En las figuras 4.20 (a) a 4.20 (d), se aprecian las condiciones iniciales de funcionamiento del formato de modulación RZ-DQPSK, en donde es evidente la diferencia en espectro y en modulación con respecto al formato de referencia NRZ-OOK.

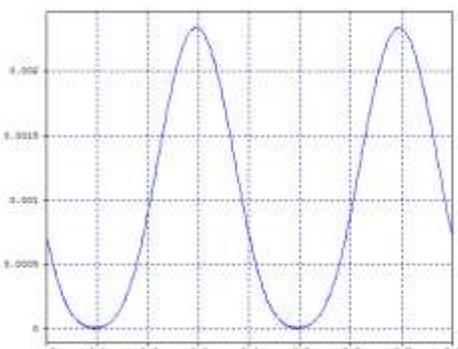


Figura 4.20 (a) Salida no Modulada del Formato RZ-DQPSK.

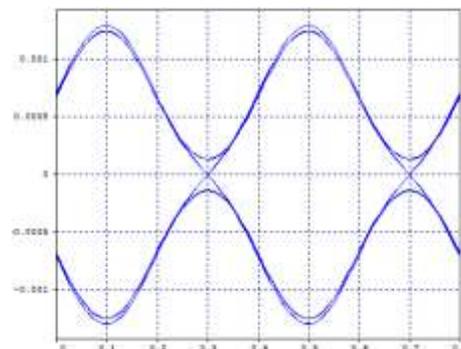
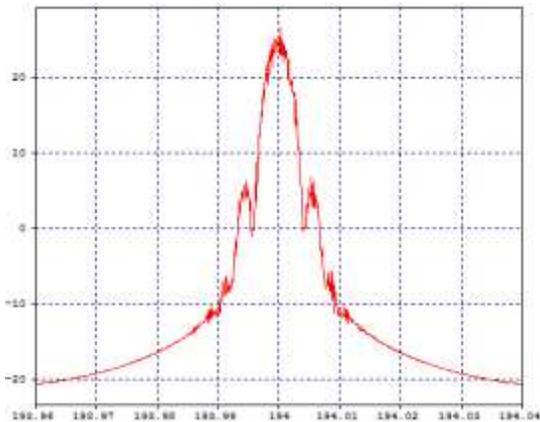
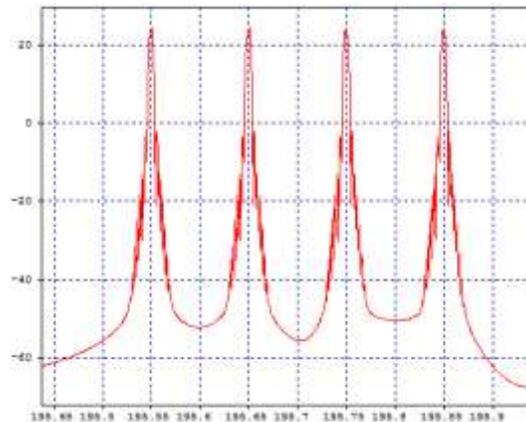


Figura 4.20 (b) Salida Modulada del Formato RZ-DQPSK Back to Back.



**Figura 4.20 (c) Espectro Óptico para un solo canal.**

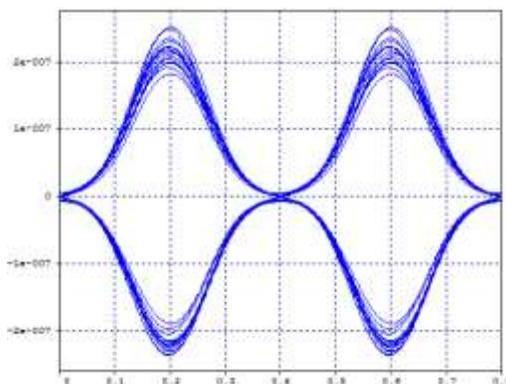


**Figura 4.20 (d) Espectro Óptico para cuatro canales a 100GHz de espaciamiento.**

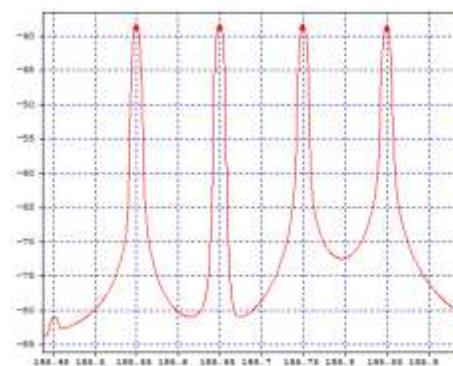
Para analizar el comportamiento de este formato de modulación y con el propósito de compararlo con el formato de referencia NRZ, se parte de la misma distancia máxima obtenida para un solo span de 130Km junto con la configuración de cada uno de los elementos de la red. Posteriormente, se determina si el formato de modulación RZ-DQPSK supera los datos obtenidos para el formato de referencia mediante la configuración de dispositivos extra (compensadores o pre amplificadores) para obtener la máxima distancia en un solo span.

Por otra parte, se analizará el mínimo de recursos posibles implementando el formato RZ-DQPSK para los 500Km mediante segmentos de red concatenados y de igual manera que al formato NRZ-OOK, se analizará de forma independiente los efectos de las degradaciones lineales, no lineales, y otros parámetros que afectan las transmisiones sobre fibra óptica, para determinar cuáles aportan en mayor medida deficiencias en el desempeño de la red.

❖ **Distancia máxima alcanzable por un segmento de red**



**Figura 4.21 (a) Diagrama del ojo tras un span de 130Km RZ-DQPSK.**



**Figura 4.21 (b) Espectro óptico en recepción con una Potencia de transmisión del orden de los -38dBm.**

En las figuras 4.21 (a) y 4.21 (b), se aprecian los parámetros de monitoreo óptico para un solo tramo de 130Km de fibra con amplificación de ganancia constante, mediante la implementación de una potencia de transmisión de 2dBm y una potencia del dispositivo EDFA de 5dBm (valores óptimos formato NRZ), esto se realiza con el fin de comparar los resultados obtenidos anteriormente y verificar las mejoras o deficiencia que presenta el formato RZ-DQPSK.

Distancia [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>TX</sub> [dBm]	OSNR <sub>IN</sub> [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
120	195.9	1e-40	23.05	-5.01	72.45	-38.83	41.13
125	195.9	1e-40	23.19	-5.01	72.45	-40.70	31.99
130	195.9	1e-40	23.09	-5.01	72.45	-41.84	33.18
135	195.9	1e-40	23.10	-5.01	72.45	-42.98	38.63
140	195.9	1e-40	22.90	-5.01	72.45	-44.45	38.33
145	195.9	1e-40	22.81	-5.01	72.45	-45.71	36.66
150	195.9	1e-40	22.82	-5.01	72.45	-47.13	37.38
155	195.9	1e-40	22.83	-5.01	72.45	-48.46	34.00
160	195.9	1e-40	22.93	-5.01	72.45	-49.96	33.49

**Tabla 4.8 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones del sistema para una configuración de referencia óptima de NRZ-OOK.**

Mediante el análisis de los resultados obtenidos en la tabla 4.8 para los parámetros de monitoreo óptico, se concluye que a pesar de que este formato de modulación mantiene una mejor relación de la BER y el Factor Q, comparado con el formato NRZ-OOK, uno de los principales inconvenientes es la necesidad de realizar pre-amplificación, dado que las potencias recibidas se encuentran por debajo de los -40dBm a una distancia de 130Km, siendo imposible detectarlos por el receptor.

Una de las principales limitaciones del formato de modulación RZ-DQPSK, es la disminución de la potencia de transmisión de los canales, debido a la configuración del transmisor, donde para el caso del formato NRZ-OOK se parte de una potencia por canal del orden de los 6dBm, mientras que para RZ-DQPSK se parte de una potencia de -5dBm, generando que la potencia de los canales se encuentren por fuera de los rangos posibles, independiente de la relación OSNR o los parámetros BER y Factor Q.

Como se observa en las figuras 4.22 (a) y 4.22 (b), el formato de modulación RZ-DQPSK responde muy bien ante el incremento de la potencia, sin embargo solo para valores de amplificación superiores a 10dBm, se obtiene una potencia en recepción del orden de los -27dBm por canal, la cual se encuentra dentro del rango del receptor, como se puede apreciar en la figura 4.22 (c).

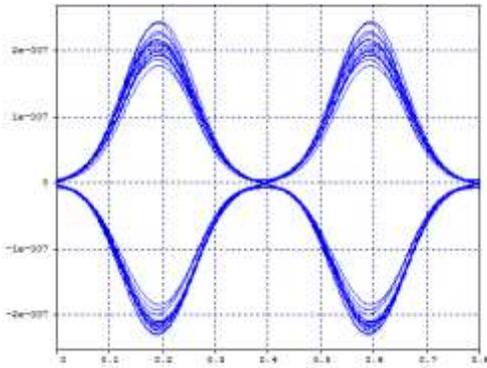


Figura 4.22 (a) Diagrama del ojo a 130Km con una potencia de amplificación de 0dBm.

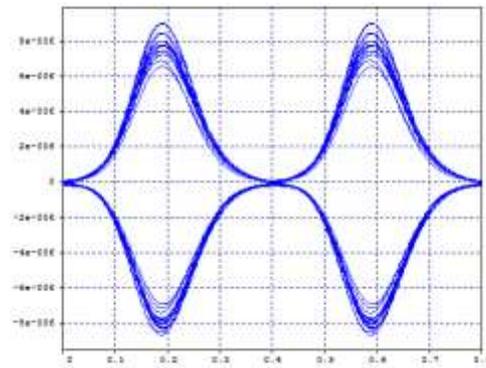


Figura 4.22 (b) Diagrama del ojo a 130Km con una potencia de amplificación de 15dBm.

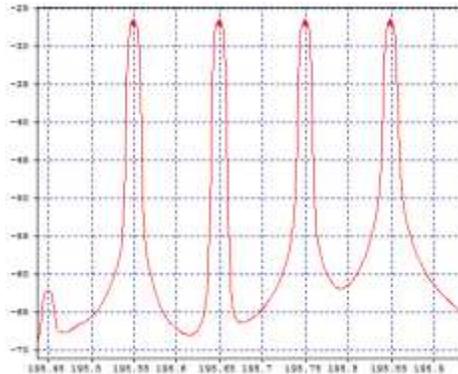


Figura 4.22 (c) Espectro óptico con una Potencia en recepción del orden de los -27dBm.

Debido a lo anterior, existen una cantidad de soluciones que se pueden implementar sobre el formato para obtener el máximo de capacidades, en su gran mayoría ligadas al incremento de la potencia, en donde se podría pre-amplificar cada uno de los canales aumentando en gran medida la cantidad de amplificadores implementados asegurando distancia mucho más largas que las obtenidas para el formato de referencia NRZ-OOK, no siendo una solución costo-eficiente, o por otra parte se podría pre-amplificar todos los canales mediante la utilización de un Booster.

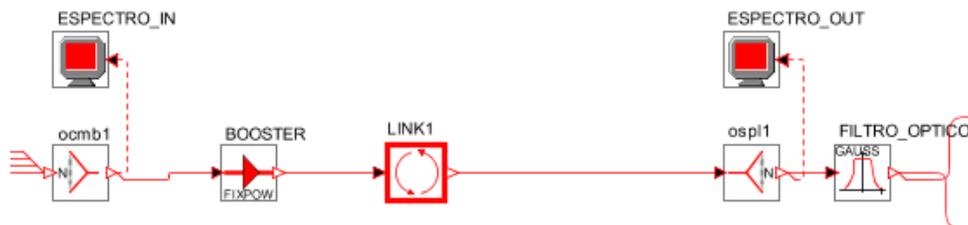


Figura 4.23 Mejoras introducidas al modelo para obtener la máxima distancia de transmisión mediante el formato RZ-DQPSK.

Por otra parte, uno de los parámetros más importantes a considerar mediante la implementación del formato de modulación RZ-DQPSK, es el efecto del ruido de fase del láser (FWHM), el cual aporta significativamente en la degradación del sistema para el formato RZ-DQPSK dado que para NRZ-OOK se comporta de manera indiferente. A continuación en las figuras 4.24 (a) y 4.24 (b) y tabla 4.9, se detallan los cambios generados debido al incremento en el FWHM.

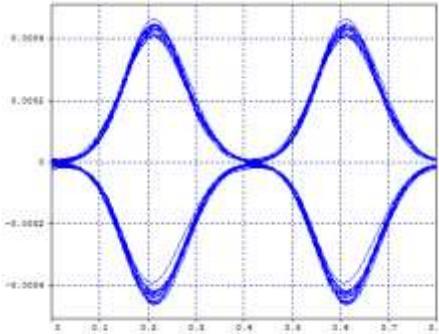


Figura 4.24 (a) Diagrama del ojo a 130Km con un FWHM=0MHz.

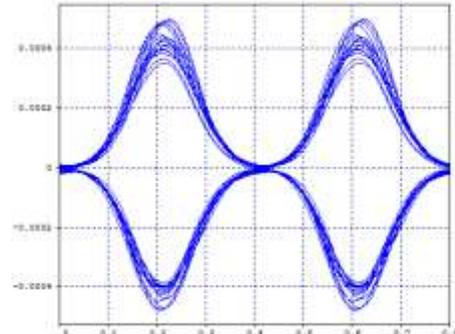


Figura 4.24 (b) Diagrama del ojo a 130Km con un FWHM=2.5MHz.

FWHM[MHz]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
0	195.9	1e-40	29.20	-6.05	26.24
0.5	195.9	1e-40	25.20	-5.99	26.08
1.0	195.9	1e-40	26.79	-6.04	26.13
1.5	195.9	7.41e-38	22.42	-6.03	26.08
2.0	195.9	1e-36	22.09	-6.02	26.04
2.5	195.9	2.21e-31	21.37	-6.04	25.95

Tabla 4.9 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de FWHM.

En las figuras 4.25 (a) a 4.25 (g), se aprecian los parámetros de monitoreo óptico después de realizar las mejoras en amplificación para el formato de modulación RZ-DQPSK.

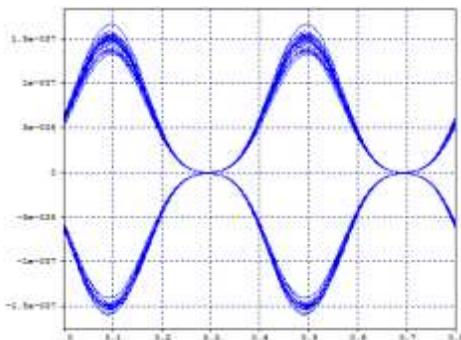


Figura 4.25 (a) Diagrama del ojo a 150Km después de mejoras en amplificación.

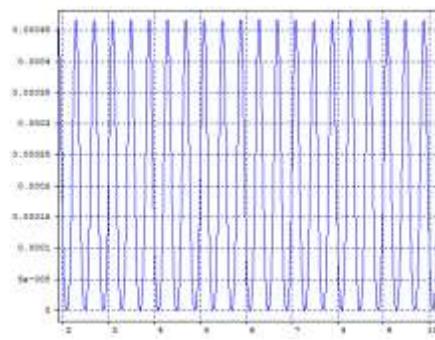


Figura 4.25 (b) Señal Eléctrica transmitida mediante un generador de secuencia pseudo aleatoria a 2.5Gb/s.

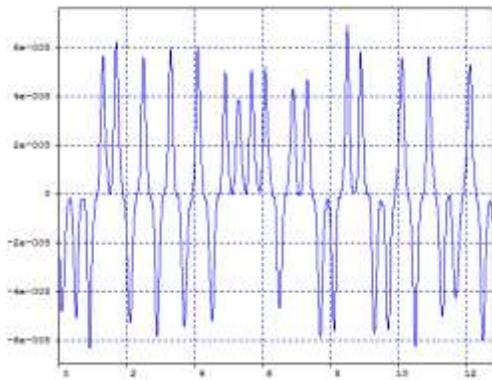


Figura 4.25 (c) Señal eléctrica en el receptor.

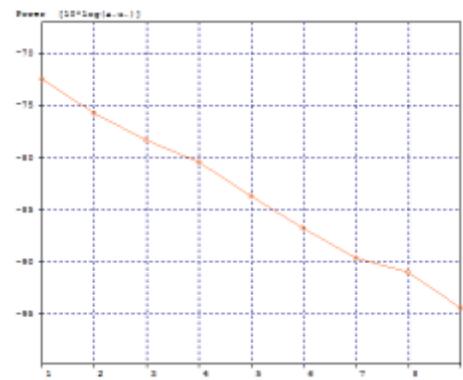


Figura 4.25 (d) Potencia en Recepción vs Distancia de Transmisión.

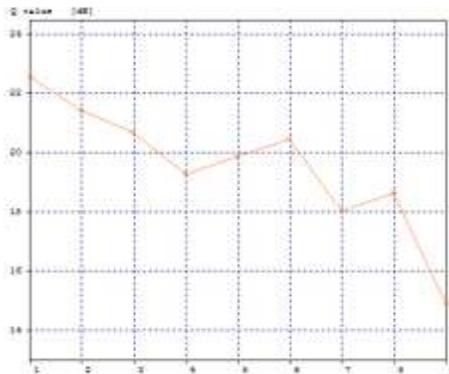


Figura 4.25 (e) Factor Q vs Distancia de Transmisión.

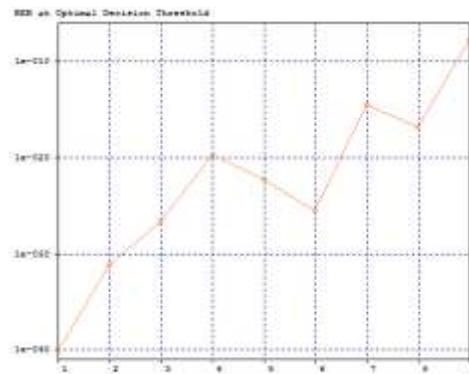


Figura 4.25 (f) BER vs Distancia de Transmisión.

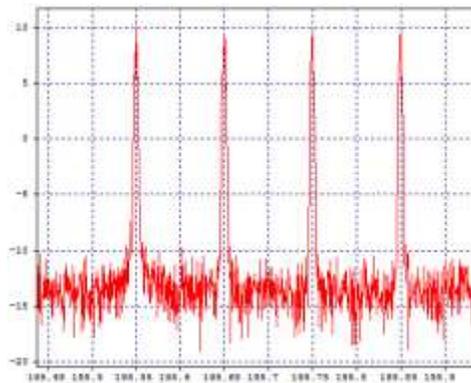


Figura 4.25 (g) Espectro óptico en Recepción a una distancia máxima de 150Km con un potencia promedio de recepción por Canal del orden de los -14dBm.

Una de las diferencias principales con respecto al formato NRZ-OOK es la no degradación lineal de los parámetros de monitoreo óptico, así mismo se presenta una mejora significativa en la máxima distancia alcanzada manteniéndose dentro de los rangos

mínimos de operación del orden de los 150Km de RZ-DQPSK comparado con los 130Km de NRZ-OOK mediante el incremento de un dispositivo de amplificación, lo cual no fue posible para el formato NRZ-OOK debido a que este no responde bien ante el aumento en la potencia, donde esto nos insinúa que el formato de modulación RZ-DQPSK es mucho más tolerante a los efectos de degradación no lineales dado que la potencia, es una forma de excitar dichos efectos.

Distancia [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>TX</sub> [dBm]	OSNR <sub>IN</sub> [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
120	195.55	1e-40	27.11	-7.01	72.37	-6.04	26.48
125	195.55	1e-40	27.08	-7.01	72.37	-7.49	24.61
<b>130</b>	<b>195.55</b>	<b>1e-40</b>	<b>27.58</b>	<b>-7.01</b>	<b>72.37</b>	<b>-8.86</b>	<b>22.93</b>
135	195.55	1e-40	27.04	-7.01	72.37	-10.18	21.83
140	195.55	1e-40	27.66	-7.01	72.37	-11.44	20.21
145	195.55	1e-40	27.69	-7.01	72.37	-12.74	19.51
<b>150</b>	<b>195.55</b>	<b>1e-40</b>	<b>27.51</b>	<b>-7.01</b>	<b>72.37</b>	<b>-14.11</b>	<b>18.41</b>
155	195.55	2.05e-28	27.48	-7.01	72.37	-15.61	16.38
160	195.55	5.53e-17	27.32	-7.01	72.37	No detectado	No detectado

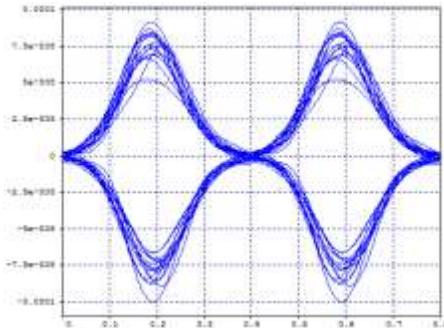
**Tabla 4.10 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones del sistema con mejoras en la potencia de transmisión y la potencia de amplificación (óptima RZ-DQPSK).**

Mediante el análisis de los resultados obtenidos para la tabla 4.10, se concluye que el formato de modulación RZ-DQPSK mantiene mejores relaciones de señal a ruido, tasa de BER y Factor Q que el formato NRZ-OOK, permitiendo, después de realizar pre-amplificación, alcanzar distancia del orden de los 150Km para un solo tramo de red, encontrándose 30Km por encima de lo obtenido para NRZ-OOK. Sin embargo, debido a su rápida degradación de la potencia del canal, se debe implementar mayor cantidad de dispositivos de amplificación para encontrarse dentro de los parámetros objetivos, haciendo más costosa la implementación de este formato de modulación, pero obteniendo rangos de operación mucho mejores.

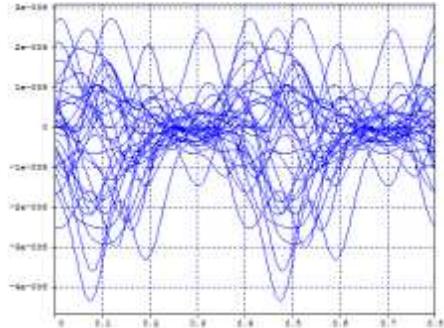
Uno de los aspectos fundamentales que se debe resaltar, es que mediante la implementación del formato de modulación RZ-DQPSK se transporta el doble de información que el formato NRZ-OOK, dado que en recepción se pueden obtener los datos que se encuentran en fase (datos P) y los datos que se encuentran en cuadratura (datos Q), sumando a esto la capacidad de aumentar la distancia manteniendo unos valores óptimos para asegurar la transmisión, siendo este formato mucho más eficiente en la cantidad de información que puede manejar y en la distancia máxima alcanzable para un solo span, pero requiriendo más dispositivos de amplificación debido a su dependencia en potencia por la configuración del transmisor.

❖ **Distancia mínima de 500Km mediante enlaces concatenados**

Al igual que para el formato de modulación NRZ-OOK, al realizar este análisis, se determina cuál es la cantidad de dispositivos de amplificación o compensación que se deben implementar en la red para alcanzar una distancia mínima de 500Km concatenando segmentos de red post amplificados manteniendo los parámetros de configuración dentro de los rangos anteriormente establecidos. Como primera medida, se parte de segmentos de red con distancias del orden de los 150Km (máximo para un Span) intentando mantener la menor cantidad de dispositivos EDFA y DCF.

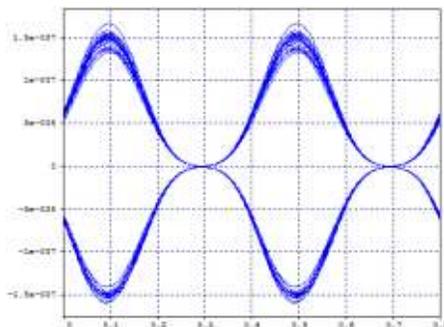


**Figura 4.26 (a) Diagrama del ojo con un solo span distancia total = 150Km sin compensar la CD.**

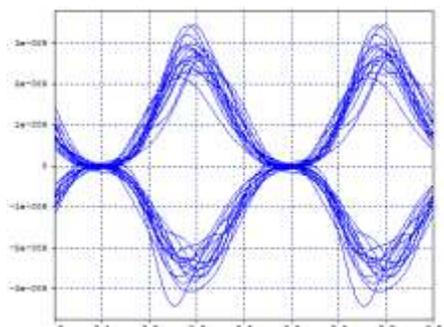


**Figura 4.26 (b) Diagrama del ojo con dos span distancia total = 300Km sin compensar la CD.**

Como se observa en las figuras 4.26 (a) y 4.26 (b), igual que para el formato de modulación NRZ-OOK, el concatenar segmentos con la máxima longitud obtenida no es nada eficiente, degradándose el sistema rápidamente. Por otra parte, se verificará si manteniendo esta máxima distancia y compensando la CD se puede obtener un mejor desempeño de la red, para tratar de mantener los segmentos lo más largos posibles.



**Figura 4.27 (a) Diagrama del ojo con un solo span distancia total = 150Km compensando la CD.**



**Figura 4.27 (b) Diagrama del ojo con dos span distancia total = 300Km compensando la CD.**

Como se observa en las figuras 4.27 (a) y 4.27 (b), el hecho de compensar la dispersión cromática sobre el enlace mejora el desempeño del modelo. Por otra parte, dado que después de implementar los segmentos de fibra DCF, no se obtienen los parámetros objetivo, lo único que se puede hacer es comenzar a disminuir la distancia de cada segmento de red, tratando de mantenerlo lo más largo posible hasta llegar a obtener una distancia mínima de 500Km.

Para las figuras 4.28 (a) a 4.28 (h), se observan los parámetros de monitoreo óptico para alcanzar la misma distancia de 500Km mediante 6 enlaces concatenados, manteniendo el mínimo de dispositivos de amplificación y compensación, disminuyendo la longitud de los segmentos de fibra por tramo (6 span de 84Km) para un total de 6 dispositivos EDFA, un Booster y un dispositivo de compensación (100% de la CD).

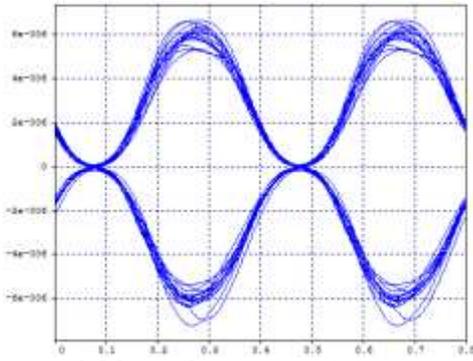


Figura 4.28 (a) Diagrama del ojo para 6 span concatenados de 84Km con una distancia total = 504 compensando CD.

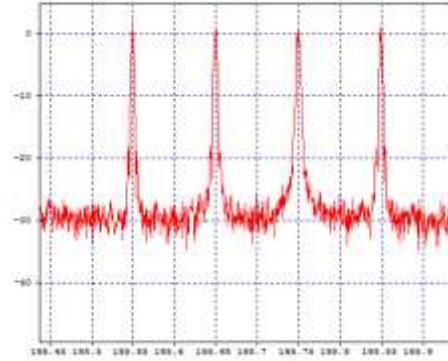


Figura 4.28 (b) Espectro óptico en recepción con una potencia de -20dBm.

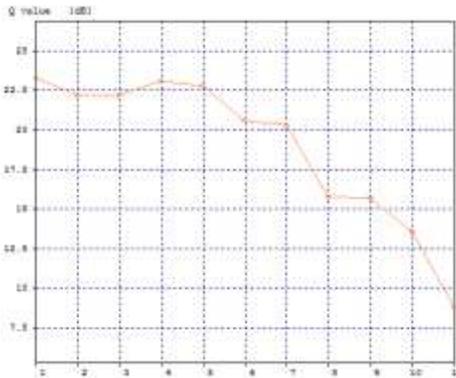


Figura 4.28 (c) Factor Q vs Distancia de transmisión.

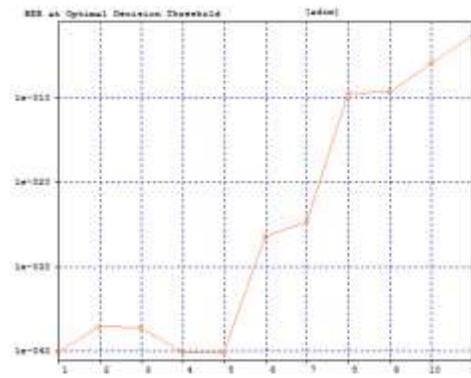


Figura 4.28 (d) Diagrama de la BER vs Distancia de transmisión.

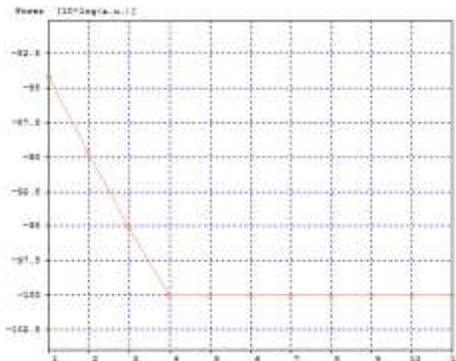


Figura 4.28 (e) potencia en Recepción por canal vs Distancia de transmisión.

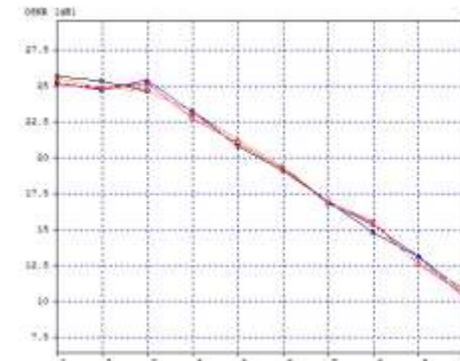


Figura 4.28 (f) Diagrama de la OSNR vs Distancia de transmisión.

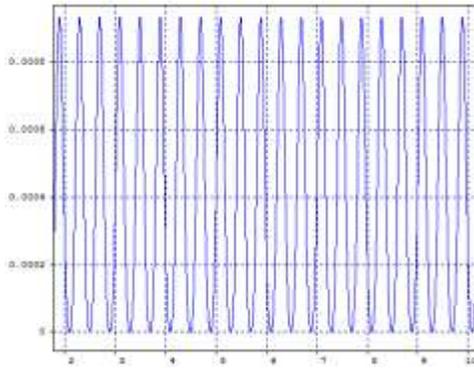


Figura 4.28 (g) Señal eléctrica transmitida no modulada.

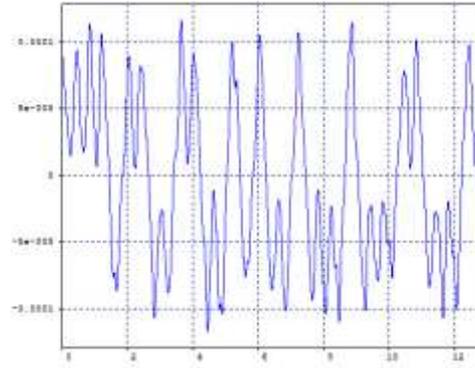


Figura 4.28 (h) Señal eléctrica en recepción modulada.

Distancia Total [Km]	Distancia por Span [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
480	80	195.55	1e-40	23.28	-19.08	28.03
492	82	195.55	1.62e-37	22.21	-19.54	28.02
504	84	195.55	7.82e-38	22.26	-20.65	27.56
516	86	195.55	1e-40	23.10	-24.00	25.62
528	88	195.55	1e-40	22.83	-27.36	24.07
540	90	195.55	5.10e-27	20.61	-30.45	21.92
552	92	195.55	3.88e-25	20.37	-33.90	20.11
564	94	195.55	3.88e-10	15.81	-37.11	18.01
576	96	195.55	5.25e-10	15.72	-40.58	15.45
588	98	195.55	1.30e-06	13.58	-43.55	13.02
600	100	195.55	2.88e-3	8.87	-46.43	11.39

Tabla 4.11 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de la mínima distancia del enlace (500Km) mediante segmentos de red concatenados.

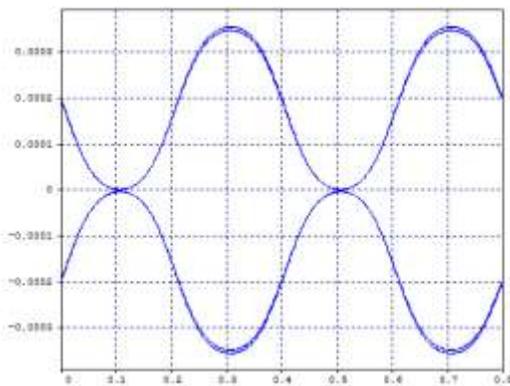
Al realizar el análisis de los datos obtenidos en la tabla 4.11, se observa que el formato de modulación RZ-DQPSK, puede alcanzar una distancia mínima de 500Km mediante la concatenación de menos Span (6 de 84Km), comparado con NRZ-OOK (7 de 72Km), y además mantiene una mejor relación OSNR y BER, sin embargo *este formato de modulación es altamente susceptible a las pequeñas variaciones de potencia, compensación de la CD y FWHM*, donde una de las principales desventajas frente a NRZ-OOK es la necesidad de pre-amplificación debido a la compleja configuración del transmisor.

#### ❖ Análisis de los efectos lineales: Ruido y Pérdidas

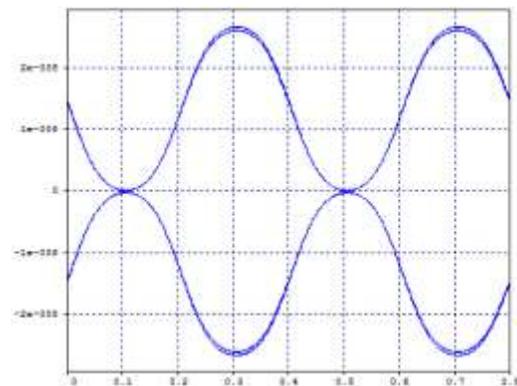
Para determinar el efecto de las pérdidas y el ruido asociadas a la propagación para un solo span de 150Km (distancia máxima para RZ-DQPSK), se analizan los parámetros de monitoreo óptico mediante la variación de la distancia debido a que la atenuación de la fibra y el ruido de los amplificadores EDFA son parámetros intrínsecos de cada uno de los elementos de red.

Con el propósito de verificar la degradación del modelo debido solo a las pérdidas introducidas por la fibra y al ruido de los dispositivos, se trabaja con potencias mínimas de amplificación para estar dentro del rango del receptor (-28dBm), para no excitar los efectos no lineales y se desprecia la dispersión cromática (efecto lineal) introducida por la fibra (17ps/nm\*Km), así mismo se desprecian los efectos del láser (FWHM) dado que este formato es susceptible a degradación debido al incremento del mismo.

Al realizar la variación de la distancia y debido a que la fibra introduce 0.275dB/Km se genera un rango de atenuación desde 35.75dB para 130Km hasta 46.75dB para 170Km de pérdidas totales introducidas al modelo. Así mismo se tiene en cuenta el ruido introducido por los amplificadores EDFA del orden de los 5.5dB, el ruido de los moduladores y el de los dispositivos de compensación.



**Figura 4.29 (a) Diagrama del ojo sin efectos de pérdidas o ruido introducido por los elementos de red y el tramo de fibra a 150Km con FWHM=0MHz.**



**Figura 4.29 (b) Diagrama del ojo con efectos de pérdidas y ruido introducido por los elementos de la red y el tramo de fibra a 150Km con FWHM=0MHz.**

Distancia [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>TX</sub> [dBm]	OSNR <sub>IN</sub> [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
130	195.9	1e-40	39.99	-0.04	71.22	-35.83	36.78
135	195.9	1e-40	39.55	-0.04	71.22	-37.18	38.22
140	195.9	1e-40	39.53	-0.04	71.22	-38.54	35.34
145	195.9	1e-40	39.41	-0.04	71.22	-39.90	39.72
150	195.9	1e-40	39.40	-0.04	71.22	-41.27	39.68
155	195.9	1e-40	39.36	-0.04	71.22	-42.65	37.43
160	195.9	1e-40	39.34	-0.04	71.22	-44.02	40.56
165	195.9	1e-40	39.28	-0.04	71.22	-45.41	38.19
170	195.9	1e-40	39.20	-0.04	71.22	-46.81	35.95

**Tabla 4.12 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones de las pérdidas y el ruido con FWHM=0MHz.**

Como se observa en la figuras 4.29 (a) y 4.29 (b), *el ruido y las pérdidas introducidas en la fibra no son un parámetro significativo en la degradación del desempeño del modelo para el formato RZ-DQPSK*, caso contrario al formato de modulación NRZ-OOK en donde las pérdidas y el ruido son un factor determinante en la degradación del desempeño de la red.

Como se observa en las tablas 4.12 y 4.13, aunque el efecto del FWHM se hace evidente en el diagrama del ojo, este no degrada en mayor medida los parámetros de monitoreo óptico, en donde a la misma distancia de 150Km, el aporte en la degradación de la BER es de  $1e-40$  a  $6.98e-40$  y de la OSNR de 39.40 a 27.82. Por otra parte los valores obtenidos de la potencia en recepción por debajo de la potencia mínima deseada del orden de los -21dBm son debido a que se trabajó con poca amplificación y potencias de transmisión por canal bajas, para evitar los efectos no lineales.

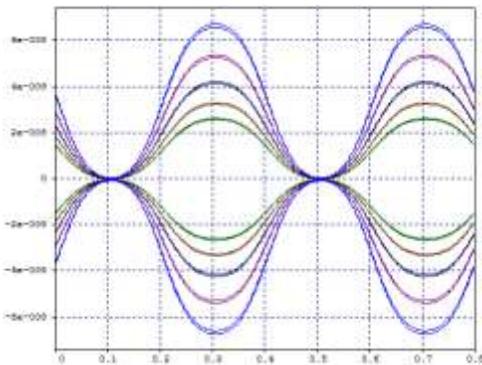
Distancia [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>TX</sub> [dBm]	OSNR <sub>IN</sub> [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
130	195.9	1e-40	27.82	-0.04	71.41	-35.83	37.06
135	195.9	1e-40	27.82	-0.04	71.41	-37.18	37.19
140	195.9	1e-40	27.82	-0.04	71.41	-38.54	35.21
145	195.9	4.75e-40	27.84	-0.04	71.41	-39.90	39.72
150	195.9	6.98e-40	27.82	-0.04	71.41	-41.27	39.68
155	195.9	1e-40	27.81	-0.04	71.41	-42.65	37.43
160	195.9	5.90e-31	27.84	-0.04	71.41	-44.02	40.56
165	195.9	1e-40	27.81	-0.04	71.41	-45.41	38.19
170	195.9	2.21e-29	27.83	-0.04	71.41	-46.81	35.95

**Tabla 4.13 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones de las pérdidas y el ruido con FWHM=1MHz.**

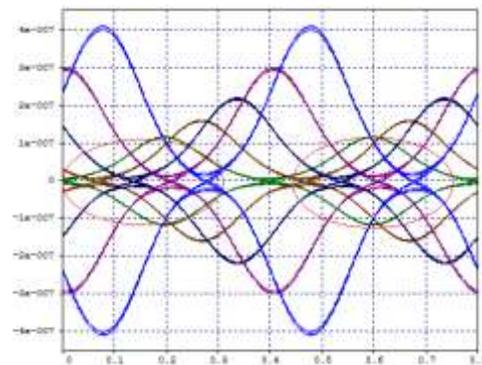
#### ❖ Análisis del efecto lineal: Dispersión Cromática

Para determinar el impacto de la Dispersión Cromática para un solo span de 150Km se procede a variar el parámetro Dispersión sin tener en cuenta los efectos de las pérdidas o atenuaciones y los efectos de ruido introducidos por los dispositivos EDFA, así mismo se trabaja a potencias bajas para no excitar los efectos no lineales teniendo en cuenta el parámetro jitter y no se tiene en cuenta el efecto del FWHM del láser.

Al igual que para el caso del formato de modulación NRZ-OOK, como primera medida, se compensa la dispersión cromática dentro del modelo mediante la implementación del formato RZ-DQPSK, donde para un tramo de 150Km de fibra se requiere: 25.5Km de fibra DCF para compensar en 100% la CD, 19.125Km de fibra DCF para compensar 75% la CD, 12.75Km de fibra DCF para compensar 50% la CD, 6.375Km de fibra DCF para compensar en 25% la CD y 0Km para no realizar compensación, donde para propósitos de investigación se desprecia la atenuación introducida por la fibra DCF.

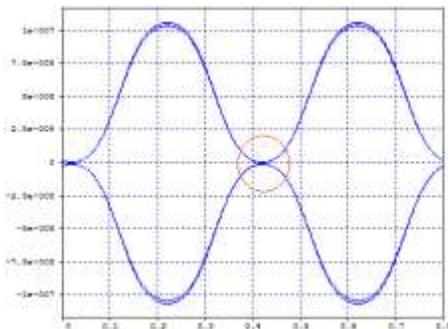


**Figura 4.30 (a) Diagrama del ojo sin efecto de la Dispersión Cromática.**

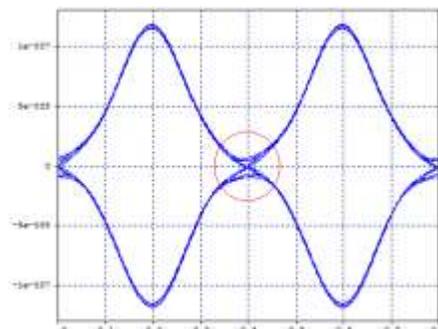


**Figura 4.30 (b) Efecto de la Dispersión Cromática en el Diagrama del ojo.**

En las figuras 4.30 (a) y 4.30 (b), se aprecia el efecto de la CD en donde se hace más notable el corrimiento de los diagramas del ojo dependientes de la distancia, debido a la presencia del jitter en el modelo, sin embargo las relaciones de los parámetros de monitoreo óptico se mantienen casi constantes.



**Figura 4.31 (a) Diagrama del Ojo compensando 100% la CD.**



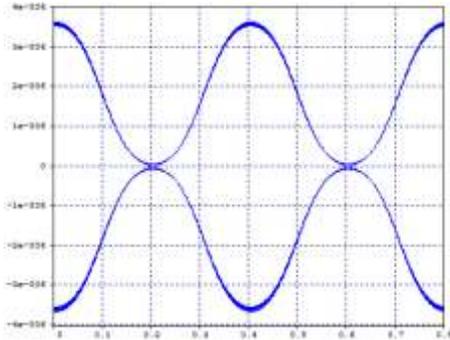
**Figura 4.31 (b) Diagrama del Ojo sin compensación de la CD.**

Longitud DCF [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]	Jitter [ns]
25.5	195.55	1e-40	39.50	-41.28	36.86	0.000779997
19.125	195.55	1e-40	39.68	-41.29	38.43	0
12.75	195.55	1e-40	39.64	-41.34	34.40	0
6.375	195.55	1e-40	39.52	-41.30	37.48	0
0	195.55	1e-40	39.50	-41.30	38.27	0.00074162

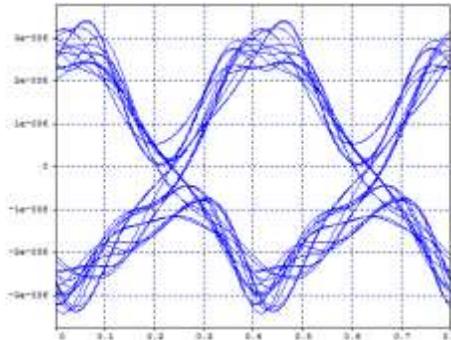
**Tabla 4.14 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la CD**

Mediante el análisis de las figuras 4.31 (a) y 4.31 (b), se determina que realizar compensación para un solo span de fibra no es necesario ni eficiente, dado que implementa más dispositivos y degrada la potencia. Sin embargo, el análisis de la distancia mínima de 500Km mediante enlaces concatenados da como resultado que realizar compensación de la dispersión cromática es fundamental para mejorar el

desempeño del modelo. A continuación, se muestran los efectos de la CD sobre enlaces concatenados, para determinar la dependencia de los parámetros de monitoreo óptico con respecto a este efecto lineal.



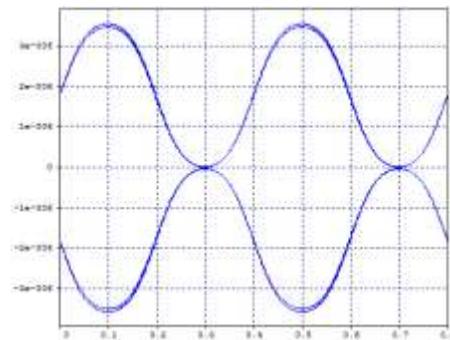
**Figura 4.32 (a) Diagrama del Ojo compensando 100% la CD.**



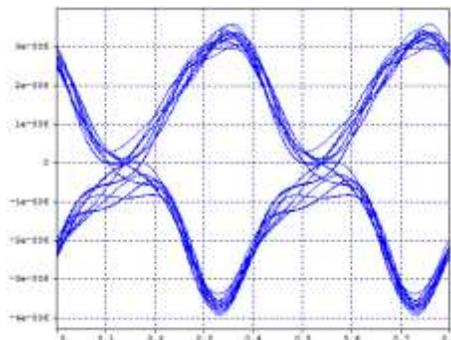
**Figura 4.32 (b) Diagrama del Ojo para 6 span sin compensación de la CD.**

En las figuras 4.32 (a) y 4.32 (b), se observa que al compensar la dispersión cromática para enlaces concatenados, se mejora significativamente el desempeño del modelo mediante la implementación del formato de modulación RZ-DQPSK, caso contrario a los resultados obtenidos para el formato de modulación NRZ-OOK, en donde independientemente de la compensación de los span, no se mejora el desempeño, sin embargo dicha mejora incrementa significativamente los costos debido a la utilización de más dispositivos de compensación por tramo.

Ahora, se procede a verificar cual es el efecto de incrementar el parámetro CD dentro de la fibra sin realizar ninguna compensación, en donde se determina el valor máximo soportado por el formato de modulación con respecto a la variación de la CD. Se debe aclarar que este formato es altamente susceptible a dicho cambio a diferencia del formato NRZ-OOK.



**Figura 4.33 (a) Diagrama del Ojo para un span de 150Km con el parámetro CD=0.**



**Figura 4.33 (b) Diagrama del Ojo para un span de 150Km con el parámetro CD=40.**

De lo anterior, para determinar la máxima tolerancia del formato a la dispersión cromática se tuvo en cuenta que no es la BER el parámetro de monitoreo óptico el que se degrada, dado que este se mantiene constante con un valor de  $1e-40$ , por otra parte es el Factor Q

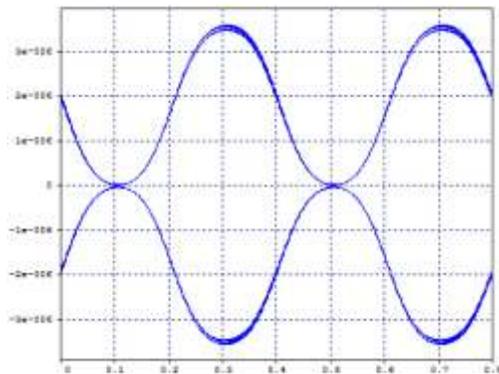
el que a medida que se incrementa el parámetro CD comenzó a degradarse hasta valores cercanos a 20dB, valor próximo al obtenido para el formato NRZ-OOK, donde igualmente se puede asociar la máxima tolerancia a la CD con la distancia máxima alcanzada para un span de fibra, debido a que el máximo valor del parámetro CD soportado por el formato RZ-DQPSK es del orden de los 40ps/nm\*Km y la distancia máxima se encuentra en 150Km. Se determina de la siguiente forma:

Máximo valor del parámetro CD = 40ps/nm\*Km  
 Distancia máxima del span = 150Km  
 Máxima CD total soportada por el modelo = 150Km x 40ps/nm\*Km = 6.000ps/nm

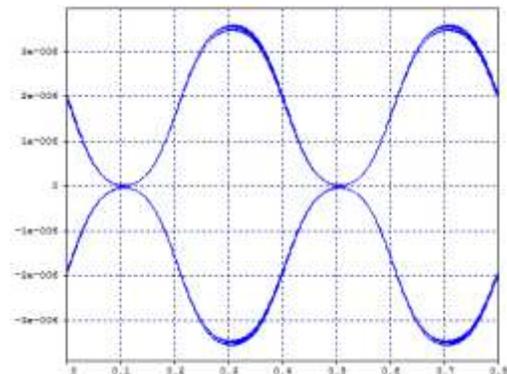
Este valor es mucho mayor que el valor soportado por el formato NRZ-OOK del orden de los 2040ps/nm. Por otro lado, mediante este análisis se concluye que el formato de modulación RZ-DQPSK a diferencia del formato NRZ-OOK, requiere ser compensado en CD para aprovechar al máximo las características de transmisión del formato.

❖ **Análisis del efecto lineal: PMD**

Para determinar el impacto de la PMD para un solo span de 150Km, se utiliza un emulador de efectos concentrados (All-Order PMD), donde solo se tienen en cuenta los efectos de polarización (PMD y las Birrefringencias) y se evalúa el parámetro DGD dentro del modelo. Por otra parte, no se tienen en cuenta la atenuación ni el ruido introducidos por los dispositivos, ni los efectos de la dispersión cromática o los efectos no lineales. Así mismo, para verificar cual es la tolerancia máxima del formato de modulación RZ-DQPSK frente a esta degradación lineal, se toman diferentes rangos de PMD, mediante la modificación de este parámetro dentro de las características de la fibra.



**Figura 4.34 (a) Diagrama del ojo para un Span de 150Km sin considerar otras degradaciones con una PMD=0.2.**



**Figura 4.34 (b) Diagrama del ojo para un Span de 150Km sin considerar otras degradaciones, con una PMD=1.**

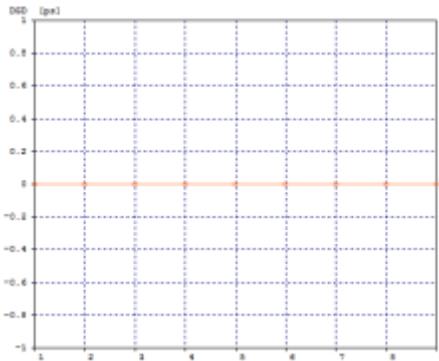


Figura 4.34 (c) Diagrama de la DGD vs Parámetro Fuente (Seed).

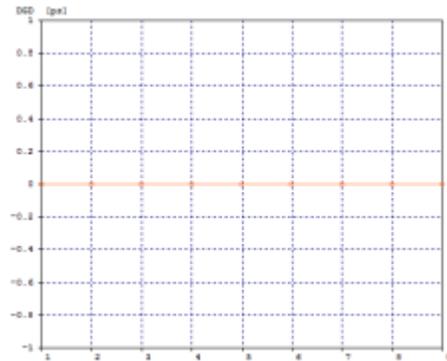


Figura 4.34 (d) Diagrama de la DGD vs Parámetro PMD (All-Order-PMD).

PMD [ps/Km <sup>0.5</sup> ]	Distancia [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
0	150	195.55	1e-40	39.71	-26.02	39.69
0.2	150	195.55	1e-40	39.71	-26.02	39.69
0.4	150	195.55	1e-40	39.71	-26.02	39.69
0.6	150	195.55	1e-40	39.71	-26.02	39.69
0.8	150	195.55	1e-40	39.71	-26.02	39.69
1.0	150	195.55	1e-40	39.71	-26.02	39.69

Tabla 4.15 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la PMD en un span de 150Km.

Como se aprecia en los resultados obtenidos en la tabla 4.15, el efecto de la PMD sobre el modelo a valores bajos de variación del parámetro y bajo las características del entorno de simulación, no genera ningún tipo de cambio sobre los parámetros de monitoreo óptico.

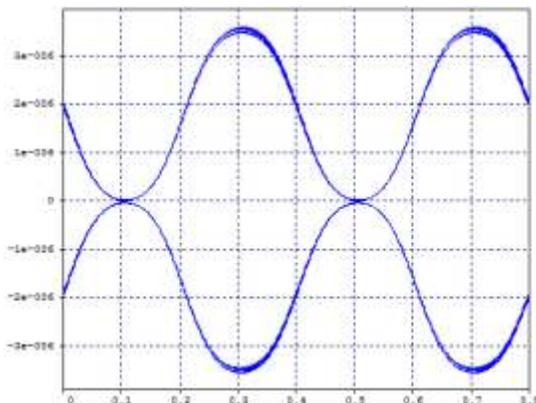


Figura 4.35 (a) Diagrama del ojo para un Span de 150Km sin considerar otras degradaciones con una PMD=0.

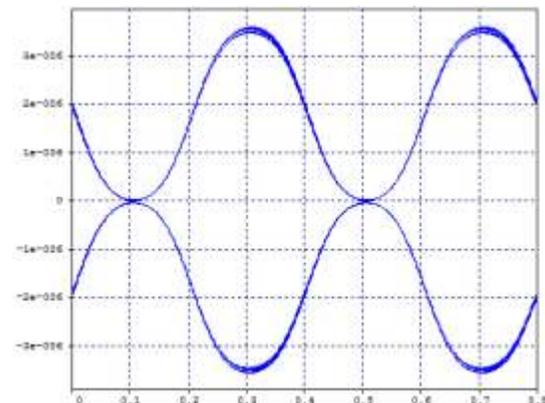


Figura 4.35 (b) Diagrama del ojo para un Span de 150Km sin considerar otras degradaciones con una PMD=40.

Para verificar la máxima tolerancia del formato de modulación a la PMD, se generó un rango de valores del orden de los  $40\text{ps}/\sqrt{\text{Km}}$  al igual que para el caso del formato de referencia NRZ-OOK. Se debe aclarar que para esta parte del análisis no se tienen en cuenta los efectos de las demás degradaciones, esto con el propósito de verificar solo el efecto de la PMD.

Las figuras 4.35 (a) y 4.35 (b), muestran que la tolerancia al efecto de la PMD soportada por el formato de modulación RZ-DQPSK, comparado con el formato de referencia NRZ-OOK, es superior dado que el modelo no se degrada frente a la variación del parámetro PMD dentro de la Fibra, efecto contrario al encontrado sobre el formato de modulación NRZ-OOK, en donde a los mismos valores el modelo se degrada notablemente.

Así mismo en la figura 4.34 (c) se observa que la variación de la DGD con respecto al parámetro Seed y con respecto a la variación del parámetro PMD figura 4.34 (d), dentro del emulador All-Order-PMD, se mantiene constante, no generando ningún tipo de distorsión o retardo debido a la propagación de los pulsos de subida y de bajada a diferentes velocidades, caso contrario al obtenido con el formato de modulación NRZ-OOK, haciendo del formato RZ-DQPSK un formato con una alta tolerancia sobre los efectos a la dispersión por modo de polarización, donde podría concluirse que actúa casi que de una forma indiferente ante la presencia de dicha degradación.

#### ❖ Análisis del efecto no lineal: SPM

Como primera medida, se analiza la SPM con respecto a la potencia de transmisión, variando la potencia de los dispositivos de amplificación y la potencia del láser, para determinar si aporta significativamente en la degradación del modelo para el formato de modulación RZ-DQPSK. Por otra parte, se verifica si el efecto de la dispersión cromática combinado con la SPM podría aportar diferencias en el ensanchamiento de los pulsos mediante el régimen de dispersión normal ( $CD < 0$ ) y el régimen de dispersión anómalo ( $CD > 0$ ).

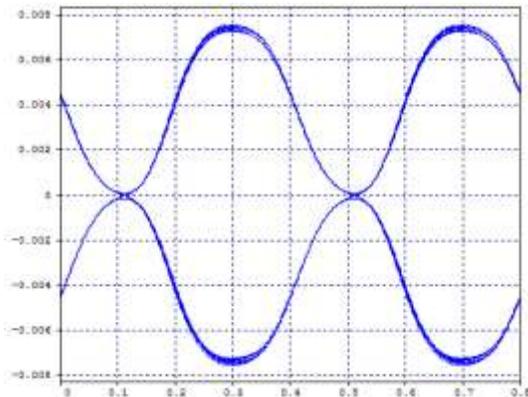


Figura 4.36 (a) Diagrama del ojo con potencia EFDA=14dBm.

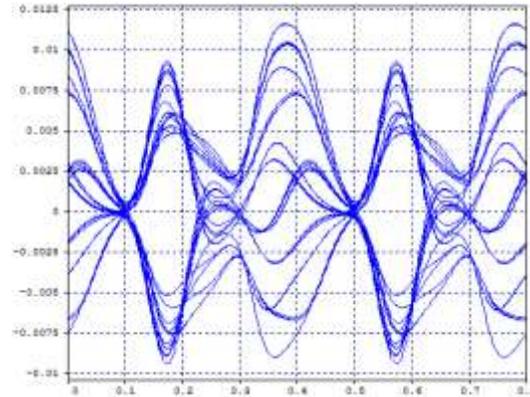
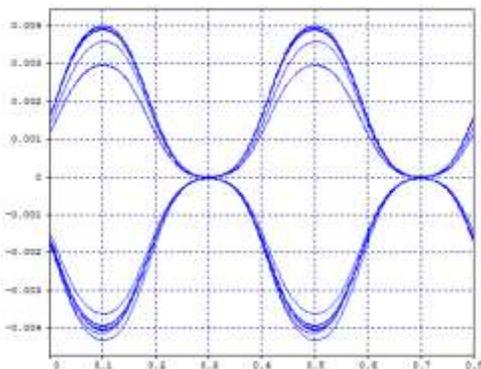


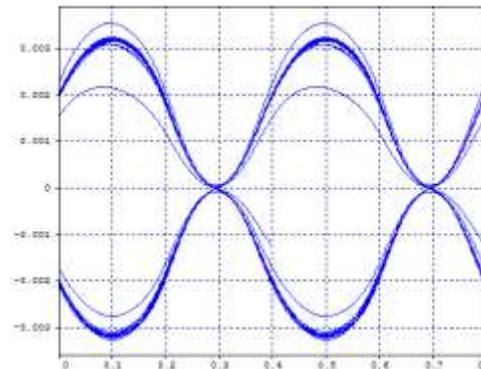
Figura 4.36 (b) Diagrama del ojo con potencia EFDA=21dBm.

Como se observa en las figuras 4.36 (a) y 4.36 (b), el efecto de la SPM debido al incremento de la potencia de los dispositivos de amplificación y la potencia del láser, para altas potencias de amplificación más allá de 14dBm, se hace evidente, generando una degradación sobre diagrama del ojo y sobre los parámetros de monitoreo óptico, donde para este caso se encontró un efecto mucho más desfavorable mediante la implementación de este formato de modulación, a diferencia del formato de referencia NRZ-OOK, en donde la degradación no es tan evidente.

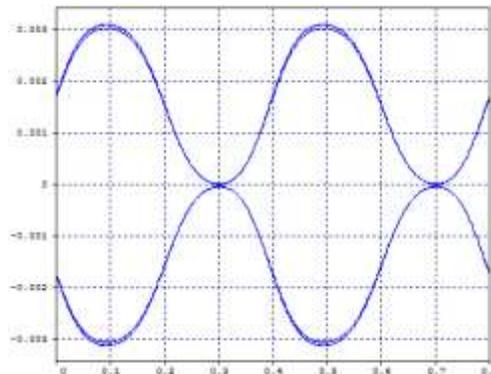
Por otra parte, se analiza los efectos del régimen de dispersión anómalo y el régimen de dispersión normal, en el modelo, debido a que la dispersión cromática se encuentra fuertemente vinculada con la SPM, pudiendo aportar degradaciones significativas debido al estrechamiento o ensanchamiento de los pulsos transmitidos.



**Figura 4.37 (a) Diagrama del ojo frente al régimen de dispersión normal ( $CD < 0$ )  $CD = -10$ .**



**Figura 4.37 (b) Diagrama del ojo frente al régimen de dispersión anómalo ( $CD > 0$ )  $CD = 10$ .**



**Figura 4.37 (c) Diagrama del ojo frente a dispersión cromática cero  $CD = 0$ .**

Como se aprecia en las figuras 4.37 (a) a 4.37 (c), el único caso para el cual el efecto de la dispersión cromática no genera ningún cambio, es para la dispersión cero, donde se encuentra totalmente compensada por medio de un dispositivo ideal, sin embargo para los cambios generados mediante la variación del parámetro  $CD$ , se generan diferencias en el diagrama del ojo, caso contrario al encontrado para el formato de referencia NRZ-OOK, donde la relación de la SPM frente al régimen de dispersión de la  $CD$ , no afectó ni generó ningún cambio sobre los parámetros de monitoreo óptico.

Por otro lado, se concluye que la SPM es uno de los efectos degradantes que se debe tener en cuenta mediante la implementación de este formato de modulación, debido a que es altamente susceptible ante las variaciones de la potencia y frente a la compensación de la CD, donde se pueden generar grandes mejoras teniendo en cuenta los aspectos anteriormente mencionados para RZ-DQPSK, caso contrario al encontrado para el formato de modulación NRZ-OOK, el cual a pesar de mostrarse más robusto ante este efecto no lineal, no mejora frente a la compensación de la CD o al manejo de potencia.

❖ **Análisis del efecto no lineal: XPM**

Para determinar el impacto de la XPM para una distancia de 150Km, se asignan a dos de los canales una potencia menor de transmisión y se varía la dispersión cromática dentro de la fibra, del mismo modo que para el formato de referencia NRZ-OOK, donde se asignan unas potencias de: canal 1 y canal 4 con -10dBm y canal 2 y canal 3 con -30dBm.

Se debe aclarar que la potencia de los dispositivos EDFA se mantiene alta (10dBm), con el fin de excitar los efectos no lineales. Por otro lado, incrementar la potencia de los canales afectaría notablemente el espectro transmitido, no permitiendo verificar los cambios generados por la variación de la CD y las diferencias en las potencias de los canales.

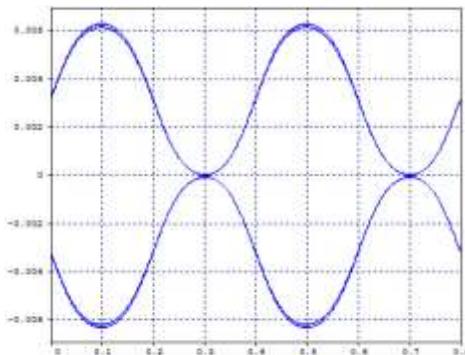


Figura 4.38 (a) Efecto de la XPM sobre el Diagrama del ojo para una CD = 0.

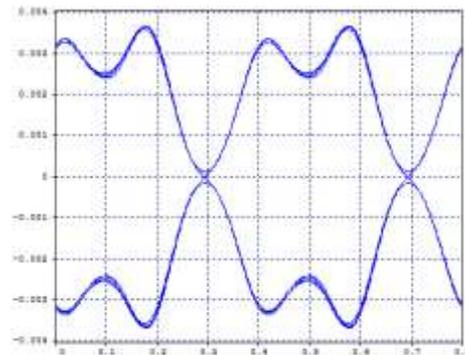


Figura 4.38 (b) Efecto de la XPM sobre el Diagrama del ojo para una CD = 2.

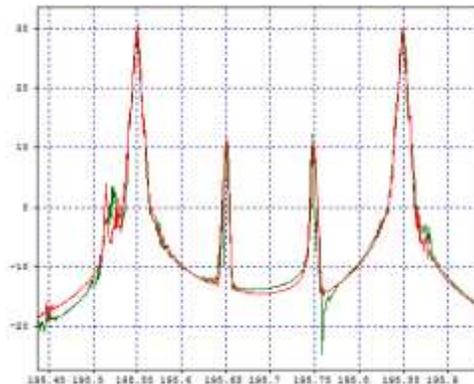


Figura 4.39 Efecto de la XPM sobre el Espectro óptico.

Como se aprecia en las figuras 4.38 (a) y 4.38 (b), uno de los modos de verificar el efecto de la XPM sobre el modelo, es mediante la degradación presentada por el diagrama del ojo, debido a la variación de la CD. Por otra parte, es posible mirar el efecto de la XPM como una ampliación del espectro óptico recibido, como se aprecia en la figura 4.39, donde se compara el espectro a una  $CD=0\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$  (verde) y  $CD=4\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$  (rojo).

Al analizar el efecto de la XPM sobre el modelo simplificado de red, mediante la implementación del formato de modulación RZ-DQPSK, se puede apreciar que a diferencia del formato de referencia NRZ-OOK, se modifican los parámetros de monitoreo óptico en mayor medida debido a la dependencia en potencia y al efecto de la CD sobre el sistema.

Por otro lado, se determina que a pesar de mostrar diferencia en el diagrama del ojo y en el espectro óptico, *dichos cambios no degradan significativamente el desempeño, permitiendo aprovechar las relaciones de las no linealidades con la potencia y la dispersión cromática, para favorecer el desempeño a nivel general del modelo.*

#### ❖ Análisis del efecto no lineal: FWM

Para determinar el impacto de la FWM para un solo span de fibra de 150Km, se compensa el efecto de la dispersión cromática y se varía el parámetro CD dentro de la fibra para analizar el efecto en la potencia recibida y el espectro óptico, dependientes de la variación de la CD.

Como se aprecia en las figuras 4.40 (a) a 4.40 (d), el efecto de la FWM se hace evidente para bajos valores de dispersión de la fibra y decrece a medida que la CD incrementa, esto es debido a que a bajos valores de CD o próximos a la condición de dispersión cero, figura 4.40 (b), el efecto se maximiza. Por otra parte, este efecto no lineal, es más fuerte comparado con el formato de referencia NRZ-OOK, debido a que este formato de modulación es altamente susceptible a los cambios de la dispersión cromática y a la compensación de la misma, del mismo modo, a pesar que se puede visualizar el efecto de la FWM este no degrada significativamente la eficiencia del modelo.

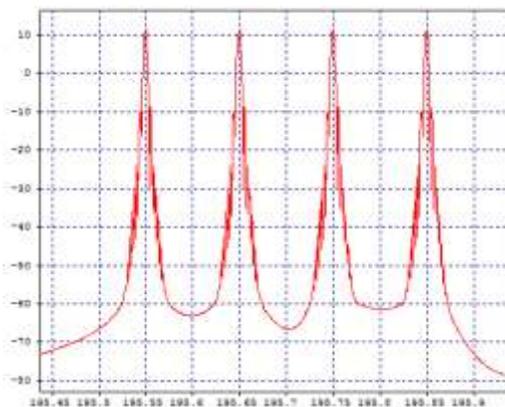


Figura 4.40 (a) Espectro óptico transmitido.

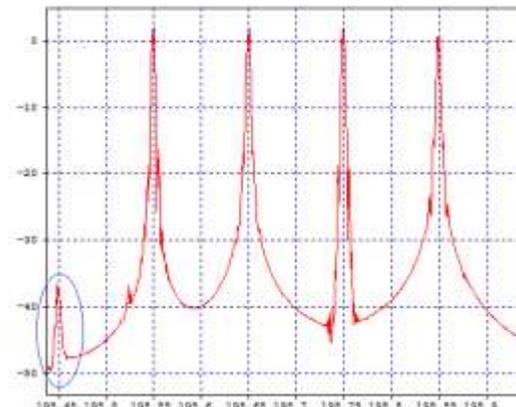
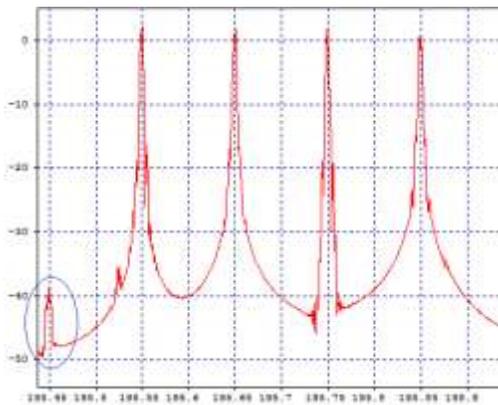
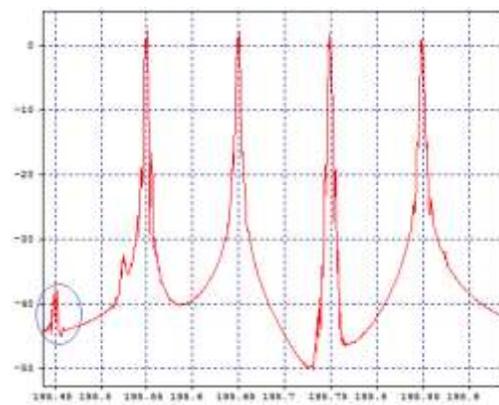


Figura 4.40 (b) Espectro óptico para una  $CD = 0$ .



**Figura 4.40 (c) Espectro óptico mostrando la generación de canales no deseados para una CD = 1.**



**Figura 4.40 (d) Espectro óptico mostrando la generación de canales no deseados para una CD = 3.**

Después de realizar el análisis de las diferentes degradaciones que afectan la transmisión mediante la implementación del formato de modulación RZ-DQPSK, se determinó:

- Es un formato complejo en configuración, utilizando una gran cantidad de dispositivos para generar la forma de onda, donde a diferencia del transmisor del formato de referencia NRZ-OOK, este es casi tres veces más grande y depende de muchos más parámetros de configuración, *siendo el más costoso de implementar.*
- Con respecto al desempeño del formato de modulación, este se presenta muy robusto frente a los fenómenos de atenuación y ruido introducidos por el enlace, siendo estas degradaciones las más significativas a 2.5Gb/s.
- Se muestra altamente susceptible a los cambios de potencia de transmisión y amplificación, siendo este uno de los factores más importantes a la hora de trabajar con dicho formato, donde su dependencia en potencia es lo que limita sustancialmente la longitud máxima que se puede alcanzar con un solo span.
- Es un formato de modulación altamente sensible al efecto de incrementar el FWHM del láser, en donde una leve variación genera un gran impacto sobre los parámetros del monitoreo óptico.
- A pesar de ser un formato más costoso de implementar, es el único de los formatos que duplica la capacidad por canal debido a las características multinivel.
- Con respecto a la dispersión cromática, esta es una de las degradaciones más significativas que afecta el desempeño de este formato de modulación, siendo efectiva su compensación a la hora de implementar enlaces concatenados, incrementando los costos, pero mejorando el desempeño de la red.

### 4.3 ESCENARIO 3, FORMATO DE MODULACIÓN RZ-DPSK

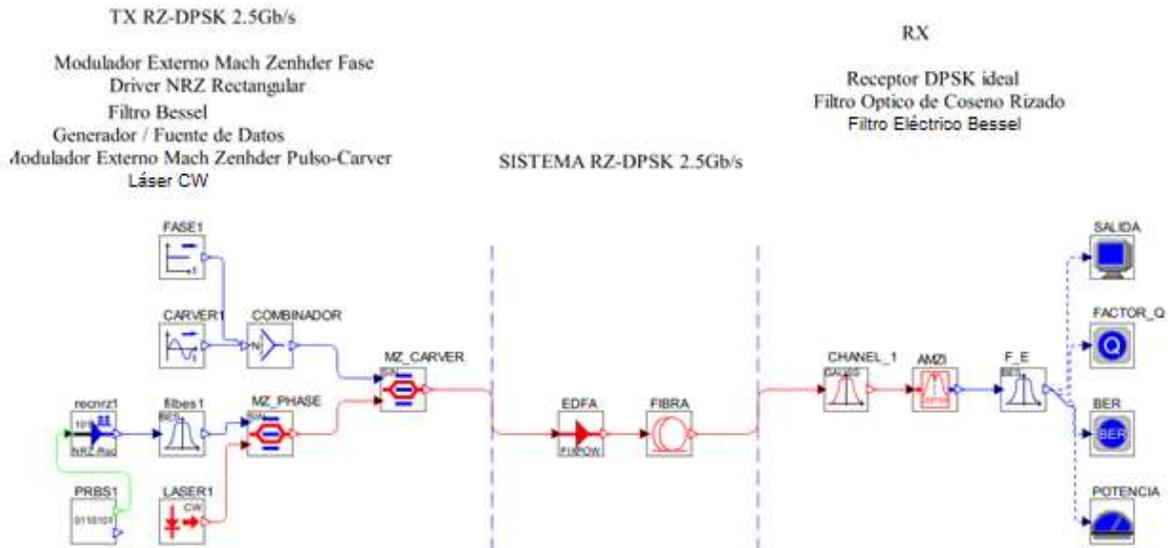


Figura 4.41 Modelo simplificado de red para el formato de modulación RZ-DPSK

En la figura 4.41, se observa que este formato de modulación, no tiene una configuración muy compleja en el transmisor, utilizando un modulador MZ para generar el pulso carver de la forma de onda RZ y otro modulador para generar la fase, siendo el pulso carver, una de las principales diferencias con respecto al formato de modulación NRZ-OOK.

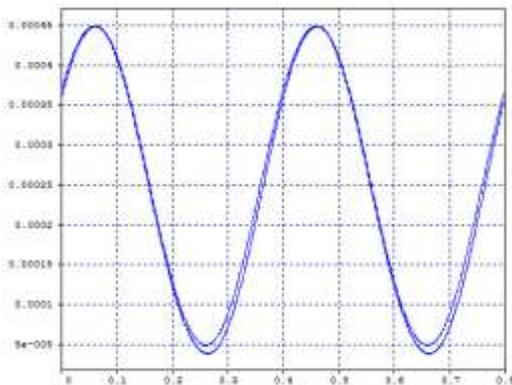


Figura 4.42 (a) Salida no Modulada del Formato RZ-DPSK.

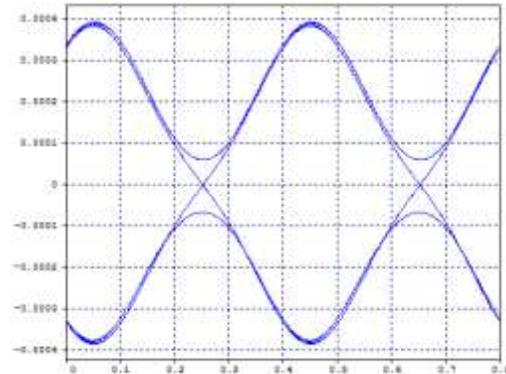
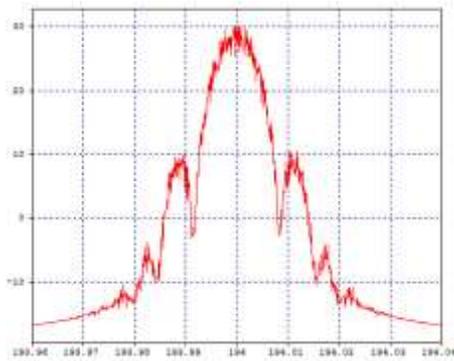
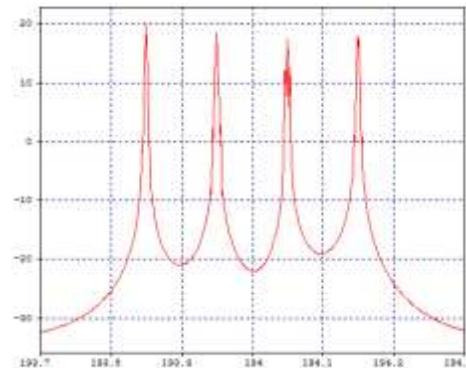


Figura 4.42 (b) Salida Modulada del Formato RZ-DPSK Back to Back.



**Figura 4.42 (c) Espectro Óptico para un solo canal.**



**Figura 4.42 (d) Espectro Óptico para cuatro canales a 100GHz de espaciamiento.**

En las figuras 4.42 (a) a 4.42 (d), se aprecia las condiciones iniciales de funcionamiento del formato de modulación RZ-DPSK, en donde es evidente la diferencia en espectro y en modulación con respecto al formato de referencia NRZ-OOK, pero un comportamiento similar al formato de modulación RZ-DQPSK, en donde la diferencia fundamental se encuentra en un espectro más ancho.

Para analizar el comportamiento de este formato de modulación y con el propósito de compararlo con el formato de referencia NRZ, se parte de la misma distancia máxima obtenida para un solo span de 130Km, junto con la configuración de cada uno de los elementos de la red. Posteriormente, se determinará si el formato de modulación RZ-DPSK puede superar el formato de referencia mediante la implementación de dispositivos extra (compensadores o pre amplificadores) para obtener la máxima distancia en un solo span. Del mismo modo, se determinarán los recursos requeridos para alcanzar una distancia de 500Km mediante segmentos de red concatenados.

❖ **Distancia máxima alcanzable por un segmento de red**

En los resultados obtenidos en la tabla 4.16 para las figuras 4.43 (a) y 4.43 (b), se aprecian los parámetros de monitoreo óptico para un solo tramo de 130Km de fibra con amplificación de ganancia constante, mediante la implementación de una potencia de transmisión del orden de los 2dBm, un FWHM igual a 1MHz y una potencia del dispositivo EDFA de 5dBm (valores implementados en el formato NRZ), esto se realiza con el fin de comparar los resultados obtenidos anteriormente y verificar las mejoras o deficiencia que presenta el formato RZ-DPSK.

Distancia [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>TX</sub> [dBm]	OSNR <sub>IN</sub> [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
130	195.55	1e-40	39.58	-4.18	36.09	-33.35	35.20

**Tabla 4.16 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones del sistema para el formato RZ-DPSK.**

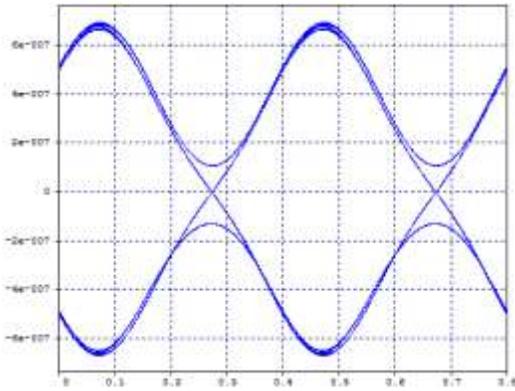


Figura 4.43 (a) Diagrama del ojo tras un span de 130Km RZ-DPSK.

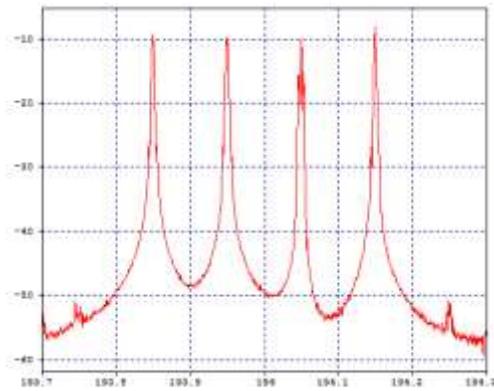


Figura 4.43 (b) Espectro óptico en con una Potencia de recepción por canal del orden de los -33dBm.

Como se observa en la tabla 4.17 para las figuras 4.44 (a) y 4.44 (b), al configurar los valores óptimos para el formato de comparación NRZ-OOK, la potencia por canal en recepción se encuentra por debajo de la potencia objetivo del orden de los -28dBm. Debido a esto, se incrementa la potencia del dispositivo EDFA y la potencia de transmisión, para alcanzar los parámetros objetivos.

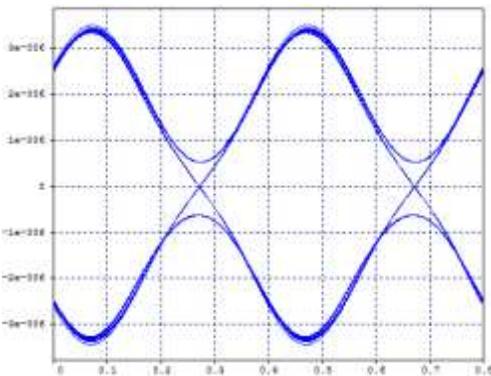


Figura 4.44 (a) Diagrama del ojo con mejoras en potencias.

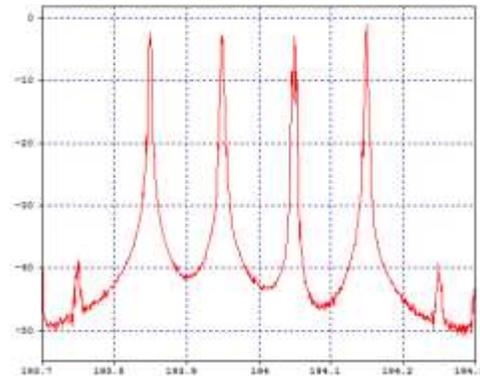
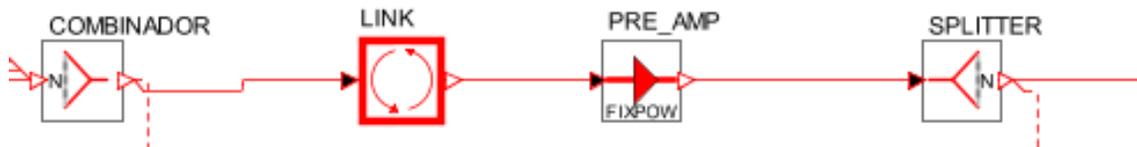


Figura 4.44 (b) Espectro óptico con una Potencia de -26dBm.

Potencia Tx [dBm]	Potencia EDFA [dBm]	Distancia [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
3	12	130	195.55	1e-40	40	-26.72	34.06

Tabla 4.17 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones del sistema con incremento en la potencia de amplificación para el formato RZ-DPSK.

Sin embargo, debido a que este formato de modulación presenta una mejora significativa frente a los parámetros de monitoreo óptico y presenta alta tolerancia frente a los efectos de degradaciones lineales, no lineales, sería ineficiente obtener la misma longitud que para el formato de referencia, dado que al tener solo una fuerte dependencia a la potencia, se podrían obtener distancias mucho más largas de transmisión mediante la implementación de dispositivos extras, como se observa en la figura 3.47, donde para el caso del formato NRZ-OOK, resultaron dichas mejoras negativas al deseo de obtener distancias más largas de transmisión.



**Figura 4.45 Formato de modulación RZ-DPSK implementado mejoras en pre-amplificación**

En la tabla 4.18, se constatan los resultados obtenidos para las gráficas 4.46 (a) a 4.46 (h), en donde después de realizar una mejora en pre-amplificación se pueden obtener distancias del orden de los 180Km, mediante la implementación del formato de modulación RZ-DPSK, donde la degradación generada es debido en mayor parte al ruido introducido por el dispositivo (Pre-Amp), dado que virtualmente este formato no se degenera debido a los impedimentos en las transmisiones y si no fuera por su fuerte dependencia en potencia podría alcanzar saltos del orden de los 500Km o superiores sin requerir elementos externos.

Distancia [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>TX</sub> [dBm]	Potencia EDFA [dBm]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
130	193.85	1e-40	34.49	3	12	-3.69	27.54
150	193.85	1e-40	29.17	3	12	-11.86	20.32
155	193.85	1e-40	24.36	3	12	-13.23	19.67
160	193.85	1e-40	24.50	3	12	-14.56	18.27
165	193.85	1e-40	23.27	3	12	-15.94	16.61
170	193.85	3.15e-38	22.30	3	12	-17.36	14.94
175	193.85	5.14e-31	21.26	3	12	-18.39	14.08
180	193.85	7.04e-27	20.66	3	12	-20.01	12.43
185	193.85	8.33e-16	18.20	3	12	-21.26	11.31
190	193.85	5.16e-13	17.12	3	12	-22.39	9.79

**Tabla 4.18 Parámetros de monitoreo óptico implementando mejoras en amplificación.**

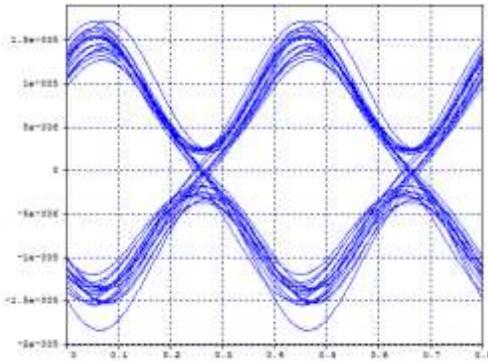


Figura 4.46 (a) Diagrama del ojo tras un span de 180Km con pre-amplificación.

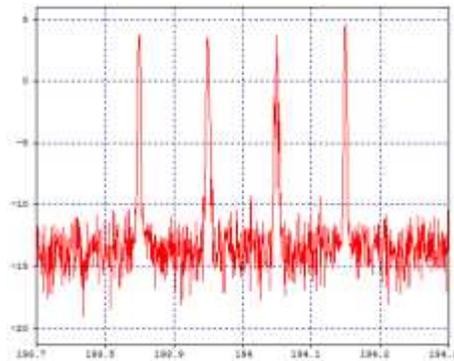


Figura 4.46 (b) Espectro óptico con una potencia en recepción -20dBm.

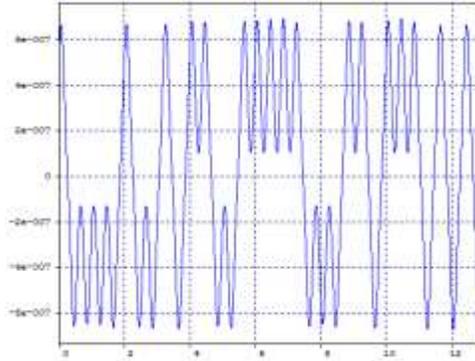


Figura 4.46 (c) Señal eléctrica en el receptor.

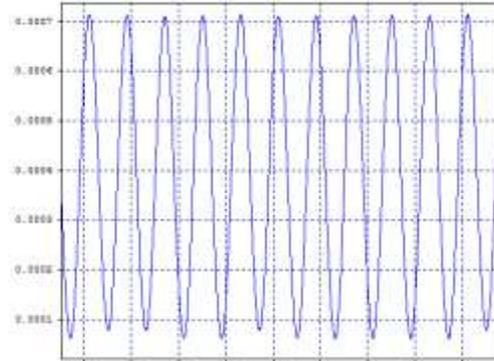


Figura 4.46 (d) Señal Transmitida no modulada.

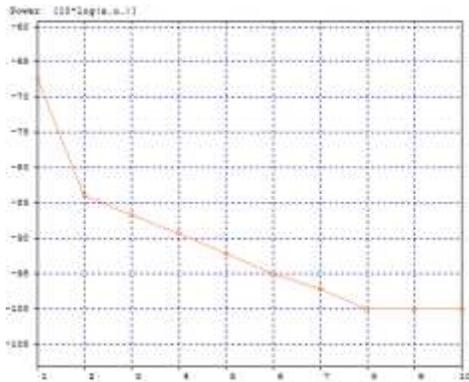


Figura 4.46 (e) Potencia en recepción vs Distancia de Transmisión.

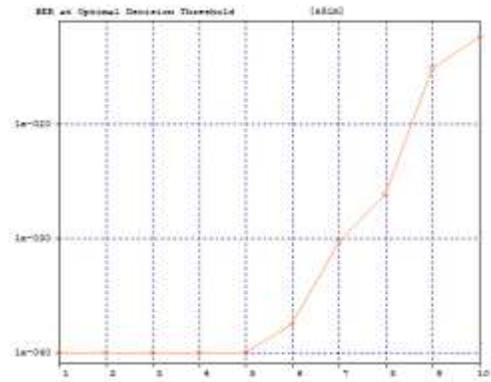
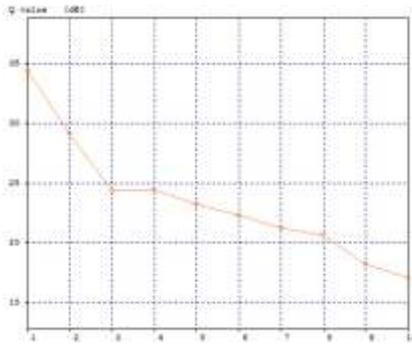
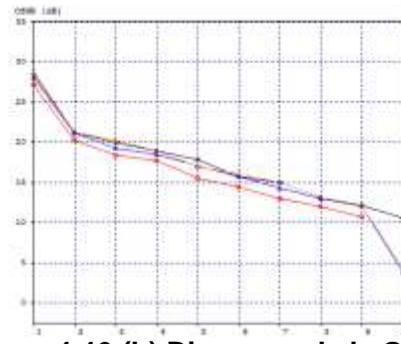


Figura 4.46 (f) BER vs Distancia de Transmisión.



**Figura 4.46 (g) Diagrama del Factor Q vs Distancia de Transmisión.**

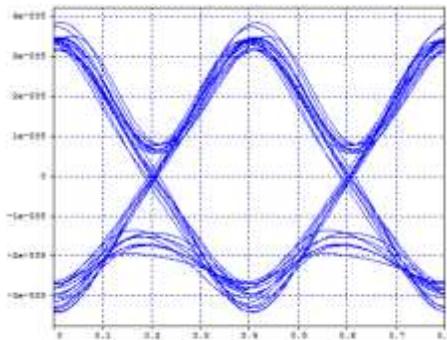


**Figura 4.46 (h) Diagrama de la OSNR vs Distancia de Transmisión.**

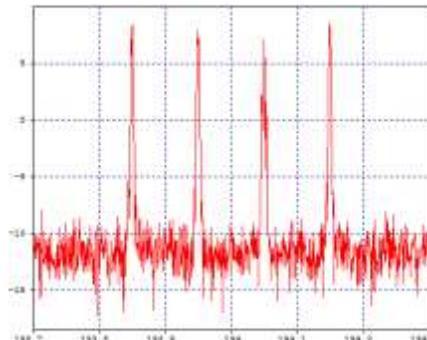
Por otra parte se puede observar en los resultados obtenidos anteriormente, que para las distancias de 130Km, 150Km y 180Km (color rojo), la eficiencia de este formato de modulación comparado con el formato de referencia NRZ-OOK (130Km) y con el formato RZ-DQPSK (150Km) es superior en todos los sentidos, siendo fácilmente configurable, obteniendo distancias de transmisión más largas y manteniendo las relaciones de OSNR aproximadamente 3dB por encima de NRZ-OOK.

❖ **Distancia mínima de 500Km mediante enlaces concatenados**

Al igual que para el formato de modulación NRZ-OOK, al realizar este análisis, se determina cuál es la cantidad de dispositivos de amplificación o compensación, que se deben implementar en la red para alcanzar una distancia mínima de 500Km concatenando segmentos de red post amplificados.



**Figura 4.47 (a) Diagrama del ojo para 500Km mediante 5 segmentos de red.**



**Figura 4.47 (b) Espectro óptico con una Potencia de -16dBm.**

Comparando los resultados obtenidos para los formatos de modulación NRZ-OOK, RZ-DQPSK y RZ-DPSK, se constata que es el último formato de modulación el que requiere menor cantidad de dispositivos de red para lograr la distancia objetivo de 500Km, en donde NRZ-OOK requiere 7 span de 72Km sin compensación, RZ-DQPSK requiere 6 span de 84Km, un dispositivo de pre-amplificación (Booster) y compensación de la dispersión cromática y RZ-DPSK requiere 5 span de 100Km con un elemento de pre-amplificación (Pre-Amp) sin compensación de la dispersión cromática, *siendo este formato el más económico de implementar para alcanzar la distancia objetivo de 500Km mediante enlaces concatenados.*

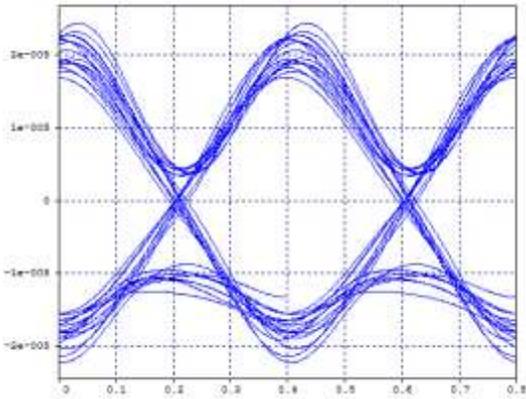


Figura 4.48 (a) Diagrama del ojo para 500Km mediante 5 segmentos de red.

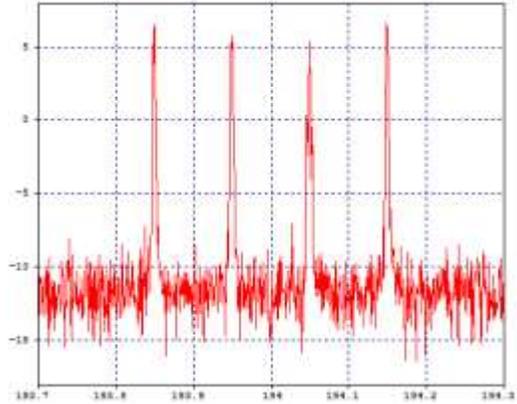


Figura 4.48 (b) Espectro óptico con una potencia del orden de los -18dBm.

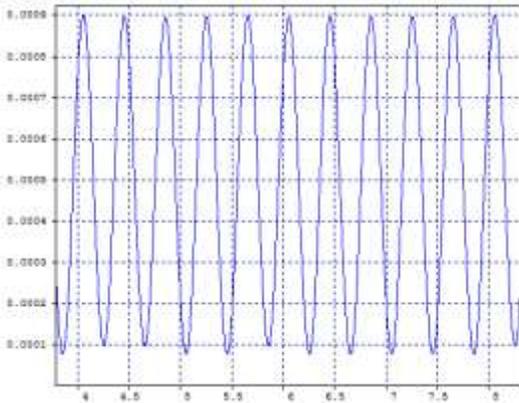


Figura 4.48 (c) Señal Eléctrica Transmitida.

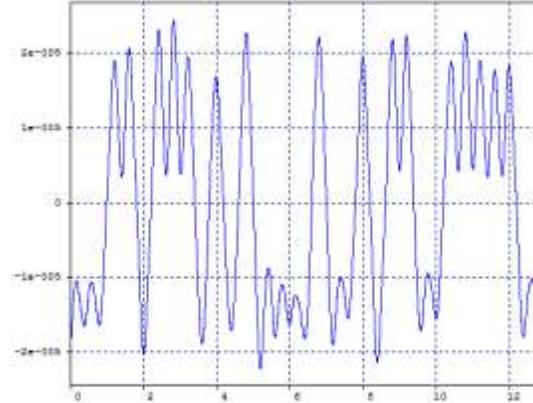


Figura 4.48 (d) Señal Eléctrica en el Receptor.

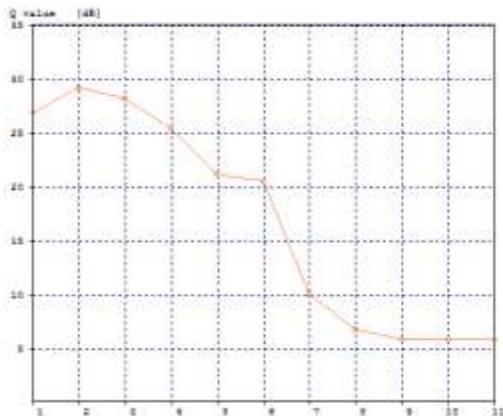


Figura 4.48 (e) Diagrama del Factor Q vs Distancia de Transmisión.

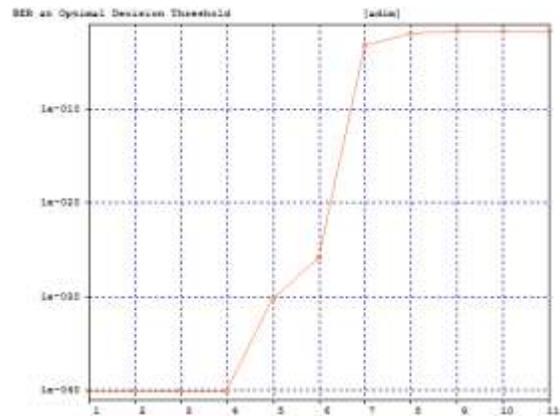


Figura 4.48 (f) Diagrama de la BER vs Distancia de Transmisión.

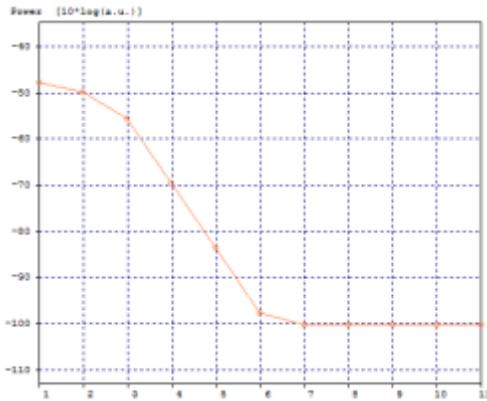


Figura 4.48 (g) Potencia de Recepción vs Distancia de Transmisión.

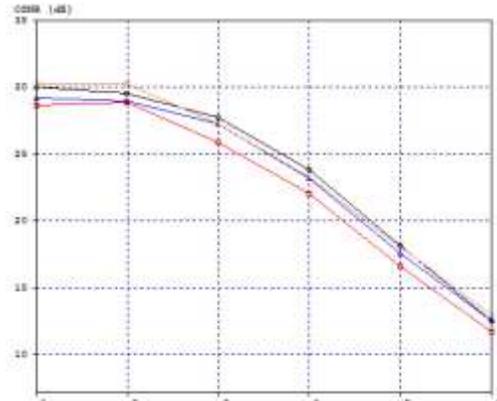


Figura 4.48 (h) Diagrama de la OSNR vs Distancia de Transmisión.

Distancia Total [Km]	Distancia por Span [Km]	Canal [THz]	VER	Factor Q [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
375	75	193.85	1e-40	28.70	6.24	30.11
400	80	193.85	1e-40	28.39	6.28	29.59
425	85	193.85	1e-40	30.05	2.44	27.70
450	90	193.85	1e-40	30.23	-4.56	23.89
475	95	193.85	1e-40	26.59	-11.36	18.17
500	100	193.85	9.53e-35	21.76	-18.09	12.62
525	105	193.85	1.19e-7	14.41	No detectado	No detectado
550	110	193.85	0.0195	6.28	No detectado	No detectado
575	115	193.85	0.0275	6.02	No detectado	No detectado
600	120	193.85	0.0275	6.02	No detectado	No detectado
625	125	193.85	0.0275	6.02	No detectado	No detectado

Tabla 4.19 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de la distancia del enlace (500Km) mediante segmentos de red concatenados.

Mediante el análisis de los parámetros de monitoreo óptico mostrados en la tabla 4.19, se concluye que el formato de modulación RZ-DPSK, es un formato más eficiente frente a las degradaciones que afectan el desempeño en las transmisiones sobre redes WDM y que a su vez, reduce en mayor medida la implementación de elementos de red debido a que requiere una cantidad menor de saltos para alcanzar la distancia objetivo de 500Km, haciendo de este formato, el que presenta una mejor relación desde la perspectiva costo-eficiente bajo las características del entorno nacional.

#### ❖ Análisis de los efectos lineales: Ruido y Pérdidas

Para determinar el efecto de las pérdidas y el ruido para la distancia de 180Km en la implementación del formato de modulación RZ-DPSK, se procederá a analizar los parámetros de monitoreo óptico de manera similar al formato de referencia NRZ-OOK.

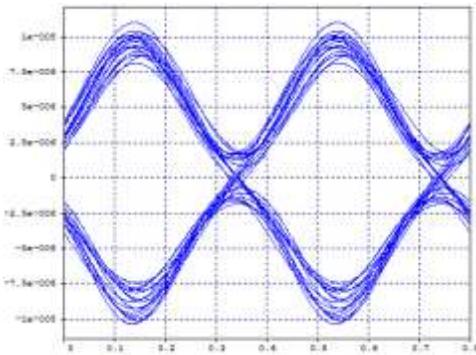


Figura 4.49 (a) Diagrama del ojo a 180Km afectado por el ruido y la atenuación de los elementos de red.

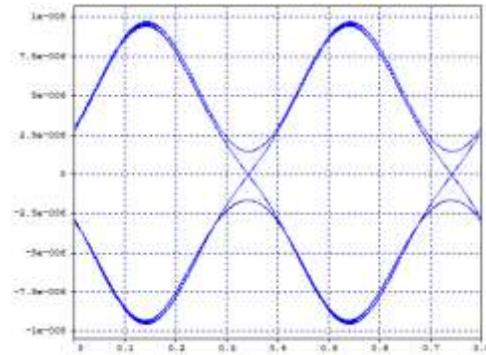


Figura 4.49 (b) Diagrama del ojo a 180Km sin considerar el ruido y la atenuación.

Distancia [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
150	193.85	1e-40	28.16	-12.01	21.85
160	193.85	1e-40	26.10	-14.69	18.77
170	193.85	5.22e-39	22.37	-17.32	16.07
180	193.85	3.30e-25	20.47	-20.09	13.39
190	193.85	9.94e-12	16.53	-22.73	10.14
200	193.85	2.66e-5	12.13	No detectado	No detectado
210	193.85	2.5e-4	10.90	No detectado	No detectado

Tabla 4.20 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las pérdidas y el ruido.

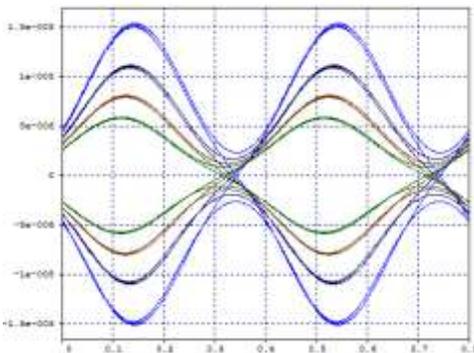
Como se observa en la tabla 4.20, debido a que la fibra introduce 0.275dB/Km de pérdidas al modelo, al realizar la variación de la distancia se está generando un rango de atenuación del orden de 41.25dB para 150Km hasta 57.75dB para 210Km, con el fin de determinar la máxima tolerancia a esta degradación óptica. Así mismo, se tiene en cuenta el ruido introducido por los amplificadores EDFA de 5.5dB, el ruido de los moduladores y el FWHM del láser, en donde la degradación de los parámetros BER y Factor Q, se encuentra ligada al ruido introducido por los dispositivos EDFA y el pre-amplificador; y la disminución de la potencia de recepción por canal, está ligada a la atenuación introducida por la fibra.

Al analizar los resultados obtenidos para los formatos NRZ-OOK y RZ-DQPSK comparado con el presente formato de modulación, se concluye que este formato es más tolerante frente al ruido y a las pérdidas pudiendo soportar hasta 52.27dB de atenuación total introducida en el sistema sumado al ruido del EDFA y el pre-amplificador (5.5dB cada uno), comparado con los 38.5dB obtenidos para el formato NRZ-OOK, *sin embargo el formato de modulación más tolerante a esta degradación es el formato RZ-DQPSK, donde su dependencia más fuerte es frente al FWHM del láser, caso contrario a RZ-DPSK donde este factor es indiferente.*

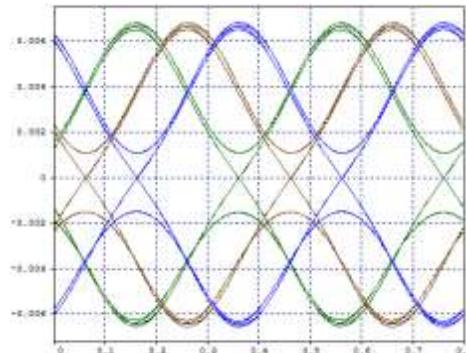
❖ **Análisis del efecto lineal: Dispersión Cromática**

Al igual que para los dos formatos de modulación anteriormente estudiados, para determinar el impacto de la Dispersión Cromática para un enlace de 500Km se procede por una parte a compensar en diferente porcentaje la dispersión cromática teniendo en cuenta los efectos de las pérdidas o atenuaciones y los efectos de ruido introducidos por los dispositivos EDFA, y por otro lado se procede a variar el parámetro CD dentro de la fibra para determinar la máxima tolerancia frente a esta degradación sin tener en cuenta otras degradaciones.

En las figuras 4.50 (a) y 4.50 (b), se aprecia el efecto del Jitter en el modelo, en donde debido a la presencia de este parámetro, se hace evidente el corrimiento del diagrama del ojo dependientes de la distancia, donde para propósitos de estudio, en el primer caso figura 4.50 (a) se tiene en cuenta la atenuación y no la CD, y en el segundo caso figura 4.50 (b) se tiene en cuenta la CD, pero no la atenuación.



**Figura 4.50 (a) Diagrama del ojo sin efecto de la Dispersión Cromática.**

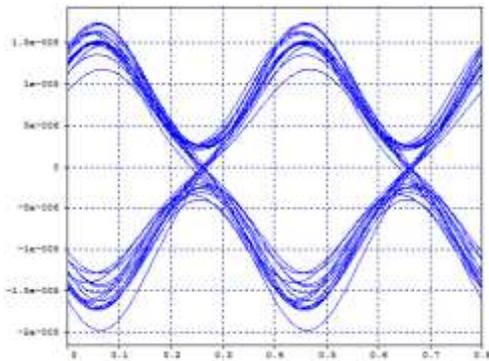


**Figura 4.50 (b) Diagrama del ojo con efecto de la Dispersión Cromática.**

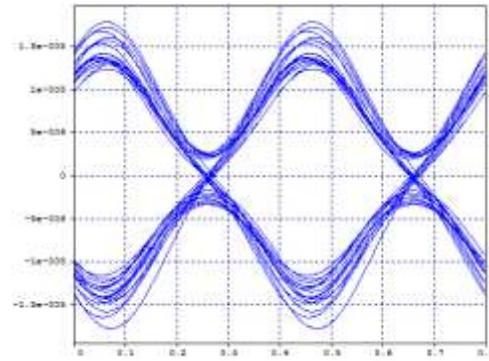
Al igual que para los formatos anteriormente estudiados, se procede a compensar la dispersión cromática dentro del modelo, donde para una tramo de 180Km de fibra se requiere: 30.6Km de fibra DCF para compensar en 100% la CD, 22.95Km para compensar 75%, 15.3Km para compensar 50%, 7.65Km para compensar en 25% y 0Km para no realizar compensación, donde para propósitos de investigación se desprecia la atenuación introducida por la fibra DCF.

Porcentaje de compensación [%]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]	Jitter [ns]
100%	193.85	5.35e-22	19.71	-19.85	13.1	0.006034
75%	193.85	5.70e-24	20.09	-20.05	12.5	0.007914
<b>50%</b>	<b>193.85</b>	<b>1.33e-31</b>	<b>21.37</b>	<b>-19.82</b>	<b>12.7</b>	<b>0.007218</b>
25%	193.85	1.45e-18	18.84	-19.99	12.0	0.007774
0%	193.85	1.26e-20	19.33	-20-12	12.5	0.006415

**Tabla 4.21 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la CD en un span de 150Km implementando fibra compensadora DCF**

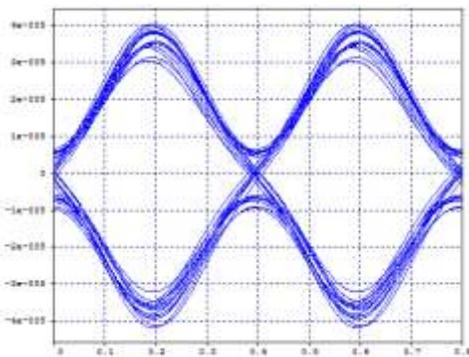


**Figura 4.51 (a) Diagrama del Ojo compensando 100% la CD para un span de 180Km.**

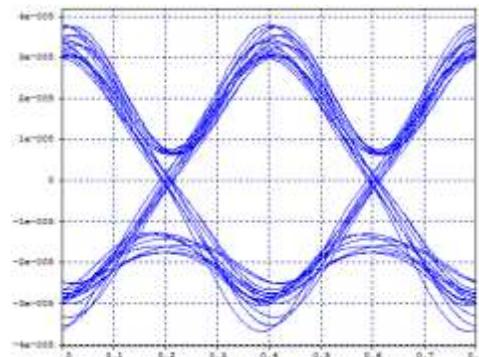


**Figura 4.51 (b) Diagrama del Ojo sin compensación de la CD para un span de 180Km.**

Mediante el análisis de los resultados mostrados en la tabla 4.21, se determina que realizar compensación para un solo span de fibra no es necesario dado que la variación de los parámetros de monitoreo óptico es mínima, no respondiendo de igual manera que el formato RZ-DQPSK. Sin embargo, mediante el análisis de las figuras 4.52 (a) y 4.52 (b), para una distancia de 500Km mediante enlaces concatenados, se constata que la mejora aportada en los parámetros de monitoreo óptico no amerita el gasto de implementación de dispositivos de compensación, dado que el formato no responde bien ante esta mejora, caso contrario al obtenido para el formato de modulación RZ-DQPSK. El hecho de compensar la CD permitía mejoras significativas en la transmisión.

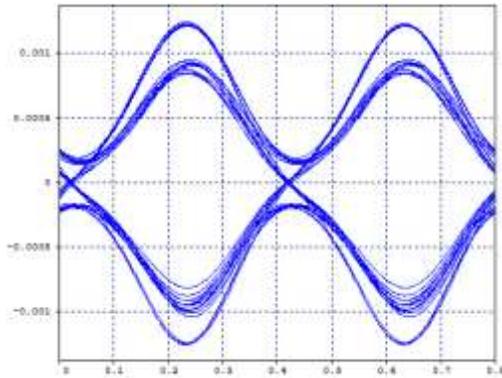


**Figura 4.52 (a) Diagrama del Ojo compensando 100% la CD para 5 segmentos de red con 500Km.**

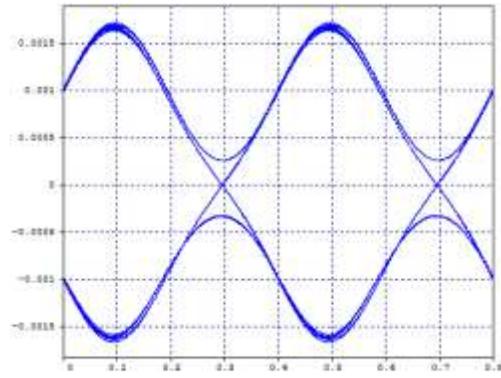


**Figura 4.52 (b) Diagrama del Ojo sin compensación de la CD para 5 segmentos de red con 500Km.**

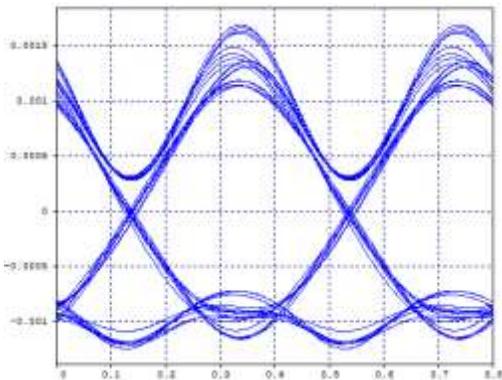
Por otra parte, para determinar el valor máximo a la CD soportado por el formato de modulación RZ-DPSK, se procede a verificar cuál es el efecto de incrementar el parámetro CD dentro de la fibra sin realizar ninguna compensación, teniendo como referencia los mismos valores implementados para los otros formatos de modulación.



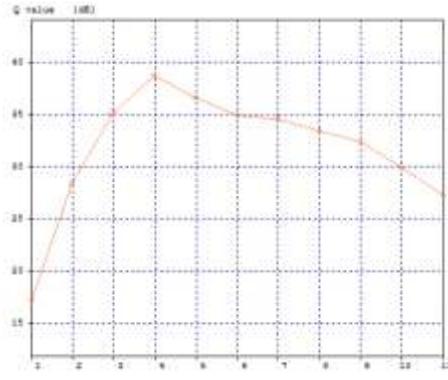
**Figura 4.53 (a) Diagrama del Ojo para un span de 150Km con el parámetro CD=0.**



**Figura 4.53 (b) Diagrama del Ojo para un span de 150Km con el parámetro CD=17.**



**Figura 4.53 (c) Diagrama del Ojo para un span de 150Km con el parámetro CD=50.**



**Figura 4.53 (d) Diagrama del Factor Q dependiente del parámetro CD.**

Como se observa en las figuras 4.53 (a) a 4.53 (c), este formato de modulación, es más susceptible a los efectos no lineales, debido a la condición de *phase-matching*, donde estos efectos se maximizan. Sin embargo, la degradación no es realmente significativa frente a los parámetros de monitoreo óptico, así mismo mediante la gráfica 4.53 (b), se observa la degradación del factor Q, en donde se obtiene su mejor valor con el parámetro CD próximo a los 17ps/nm\*Km, siendo el coeficiente de dispersión que introduce la fibra SSMF-28. Por otra parte, se constata que mediante una variación del parámetro CD, el formato de modulación es más tolerante que los otros formatos bajo investigación.

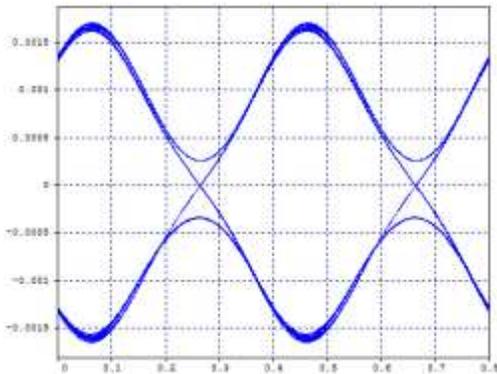
Para asociar la máxima tolerancia a la CD con la distancia de 180Km, se puede determinar de la siguiente forma:

Máximo valor del parámetro CD = 50ps/nm\*Km  
 Distancia máxima del span = 180Km  
 Máxima CD total soportada por el modelo = 180Km x ps/nm\*Km = 9.000ps/nm

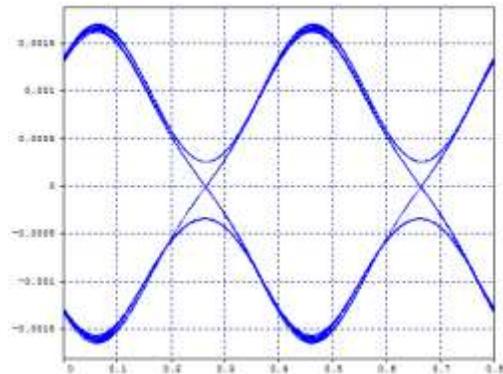
Este valor obtenido, es mucho mayor que el valor soportado por el formato NRZ-OOK del orden de los 7000ps/nm. Por otro lado, mediante este análisis se concluye que el formato de modulación RZ-DPSK no requiere ser compensado en CD para aprovechar al máximo las características de transmisión.

❖ **Análisis del efecto lineal: PMD**

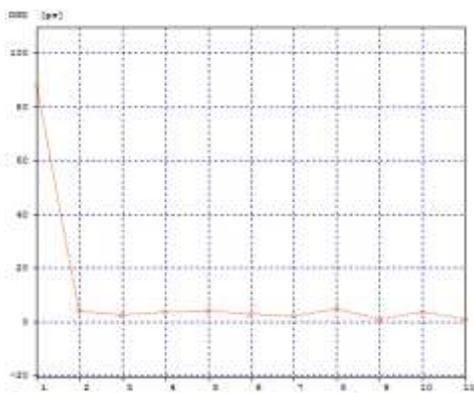
Para determinar el impacto de la PMD para un solo span de 180Km, se procede de manera similar a los formatos de modulación anteriormente estudiados, donde no se tendrán en cuenta las atenuación y el ruido introducidos por los dispositivos ni los efectos de la dispersión cromática o los efectos no lineales.



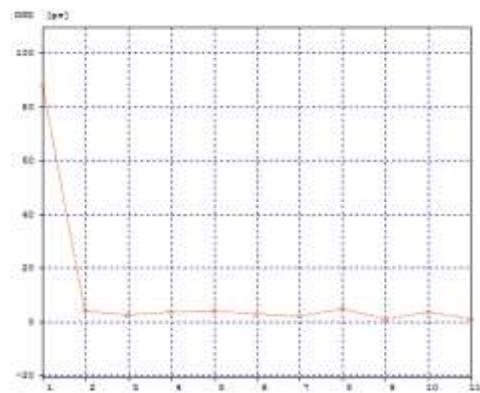
**Figura 4.54 (a) Diagrama del ojo para un Span de 180Km sin considerar otras degradación con una PMD=0.2.**



**Figura 4.54 (b) Diagrama del ojo para un Span de 180Km sin considerar otras degradación con una PMD=40.**



**Figura 4.55 (a) Diagrama de la DGD vs Parámetro PMD (All-Order-PMD).**



**Figura 4.55 (b) Diagrama de la DGD vs Parámetro Fuente (Seed).**

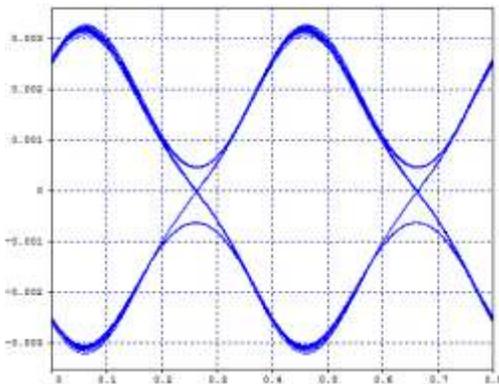
PMD [ps/Km <sup>0.5</sup> ]	Distancia [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
0	180	193.85	1e-40	40	-2.35	35.05
0.2	180	193.85	1e-40	40	-2.36	35.45
0.4	180	193.85	1e-40	40	-2.34	35.64
0.6	180	193.85	1e-40	40	-2.32	35.53
0.8	180	193.85	1e-40	40	-2.56	35.76
1.0	180	193.85	1e-40	40	-2.41	35.32

**Tabla 4.22 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la PMD en un span de 180Km.**

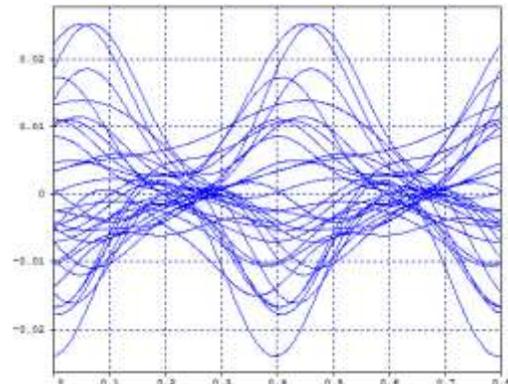
Mediante el análisis de las figuras 4.54 (a) y 4.54 (b), se determina que la tolerancia al efecto de la PMD soportada por el formato de modulación RZ-DPSK comparado con el formato de referencia NRZ-OOK es superior, dado que el modelo no se degrada frente a la variación del parámetro PMD dentro de la Fibra. Así mismo, en las figura 4.55 (a) y 4.55 (b), se observa la variación de la DGD con respecto al parámetro Seed y con respecto a la variación del parámetro PMD, donde se comporta de una forma similar a la del formato RZ-DQPSK mostrando pequeñas variaciones del retraso de dispersión grupal.

❖ **Análisis del efecto no lineal: SPM**

Para realizar el análisis de la SPM con respecto a la potencia de transmisión, se procederá de manera similar que con el formato de referencia NRZ-OOK, en donde se varía la potencia de los dispositivos de amplificación y la potencia del láser, para determinar si aporta significativamente en la degradación del modelo. Por otra parte, se verifica si el efecto de la dispersión cromática combinado con la SPM mediante el régimen de dispersión normal ( $CD < 0$ ) y el régimen de dispersión anómalo ( $CD > 0$ ) genera cambios en los parámetros de monitoreo óptico.



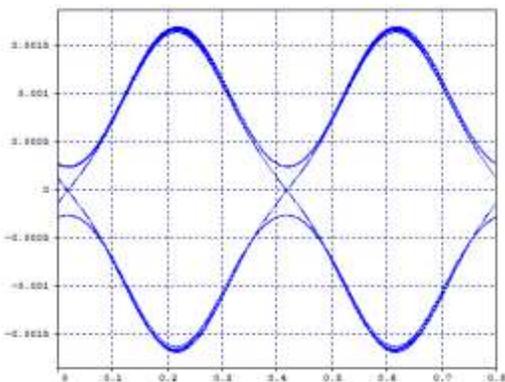
**Figura 4.56 (a) Diagrama del ojo con potencia EFDA=9dBm.**



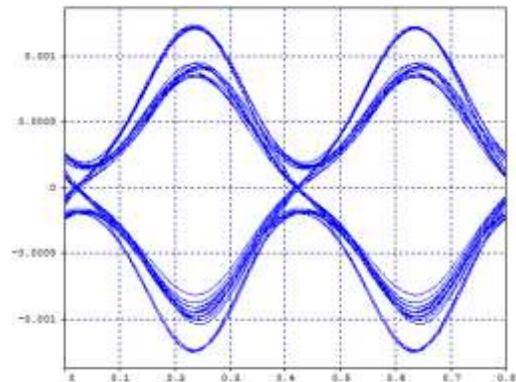
**Figura 4.56 (b) Diagrama del ojo con potencia EFDA=21dBm.**

Como se observa en las figuras 4.56 (a) y 4.56 (b), el efecto de la SPM se hace evidente sobre la degradación del diagrama del ojo y sobre los parámetros de monitoreo óptico, debido al incremento de la potencia de los dispositivos de amplificación y la potencia del láser, para potencias de amplificación más allá de los 9dBm, donde en comparación con el formato de referencia NRZ-OOK y el formato RZ-DQPSK, este se presenta más susceptible.

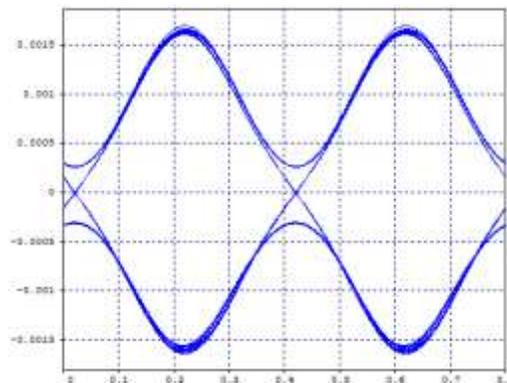
Por otra parte, al igual que para los formatos de estudio anteriormente desarrollados, se analiza los efectos del régimen de dispersión anómalo y el régimen de dispersión normal, debido a la fuerte relación de la CD con la SPM, pudiendo aportar degradaciones significativas debido al estrechamiento o ensanchamiento de los pulsos transmitidos.



**Figura 4.57 (a) Diagrama del ojo frente a un régimen de dispersión normal (CD<0) CD=-10.**



**Figura 4.57 (b) Diagrama del ojo frente a un régimen de dispersión cero CD=0.**



**Figura 4.57 (c) Diagrama del ojo frente a un régimen de dispersión anómalo (CD>0) CD=10.**

Como se observa en las figuras 4.57 (a) a 4.57 (c), al implementar el régimen de dispersión normal y anómalo, no afecta en mayor medida los parámetros de monitoreo óptico, caso contrario al obtenido para el formato de modulación RZ-DQPSK. Del mismo modo, se constata nuevamente, que es mediante la implementación de la CD igual a 0 de

la figura 4.57 (b), donde el formato de modulación RZ-DPSK degrada los parámetros de monitoreo óptico, sin embargo debido a las condiciones del modelo, *el efecto de la SPM debido a la CD no aporta significativamente en la degradación del mismo. Por otro lado, se concluye que la SPM no es uno de los efectos degradantes que se debe tener en cuenta mediante la implementación de este formato de modulación*, debido a que a pesar de ser altamente susceptible ante las variaciones de la potencia, no requiere ser compensado en CD.

❖ **Análisis del efecto no lineal: XPM**

Para determinar el impacto de la XPM para una distancia de 180Km, se asigna a dos de los canales una potencia menor de transmisión y se varía la dispersión cromática dentro de la fibra, del mismo modo que para el formato de referencia NRZ-OOK, donde se asignan unas potencias de: canal 1 y canal 4 con -10dBm y canal 2 y canal 3 con -30dBm.

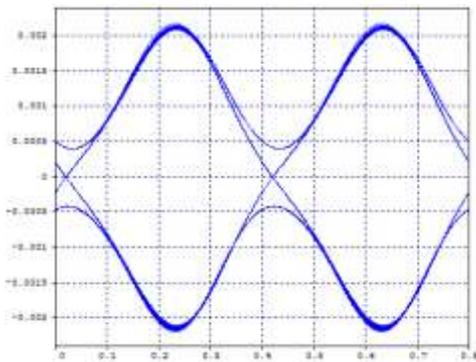


Figura 4.58 (a) Efecto de la XPM sobre el Diagrama del ojo para una CD = 0.

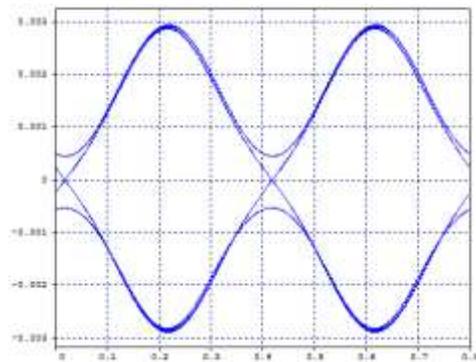


Figura 4.58 (b) Efecto de la XPM sobre el Diagrama del ojo para una CD = 4.

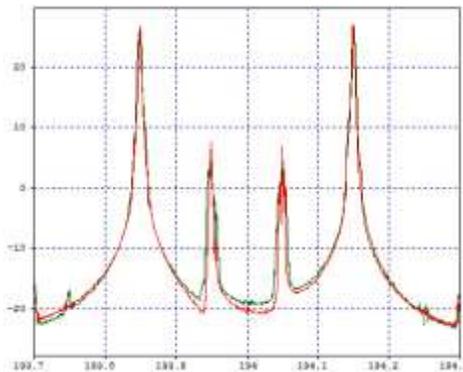


Figura 4.59 Efecto de la XPM sobre el Espectro óptico.

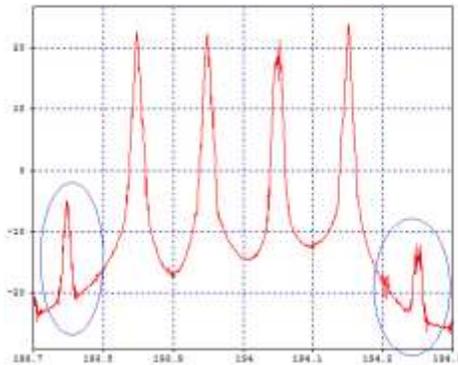
En las figuras 4.58 (a) y 4.58 (b), se observa el efecto de la XPM sobre el diagrama del ojo, en donde no se genera ningún tipo de cambio dentro de los parámetros de monitoreo óptico, caso contrario al resultado obtenido mediante la implementación del formato de modulación RZ-DQPSK. Así mismo, en la gráfica 4.59, se aprecia el efecto de la XPM en

el espectro óptico, donde la ampliación del espectro no es significativo, comparando el espectro a una  $CD=0\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$  (verde) y  $CD=4\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$  (rojo).

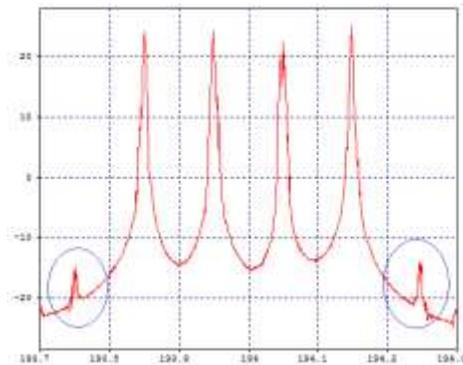
Al realizar el análisis del efecto de la XPM sobre el modelo simplificado de red, mediante la implementación del formato de modulación RZ-DPSK, se aprecia que al igual que para el formato de referencia NRZ-OOK, no se modifican los parámetros de monitoreo óptico y por ende, se determina que este efecto no lineal no degrada significativamente el desempeño de la red, en gran medida debido a las características iniciales de operación del modelo simplificado de red.

#### ❖ Análisis del efecto no lineal: FWM

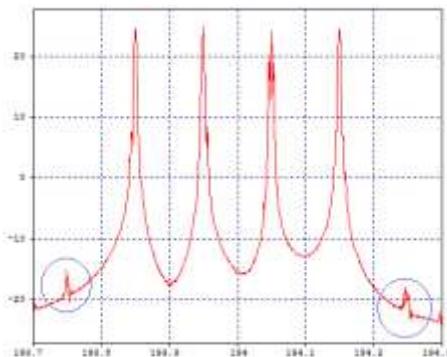
Para determinar el impacto de la FWM para un span de fibra de 180Km, se procede de manera similar al formato de referencia, en donde se compensa el efecto de la dispersión cromática y se varía el parámetro CD dentro de la fibra para analizar el efecto de la FWM en la potencia recibida y el espectro óptico.



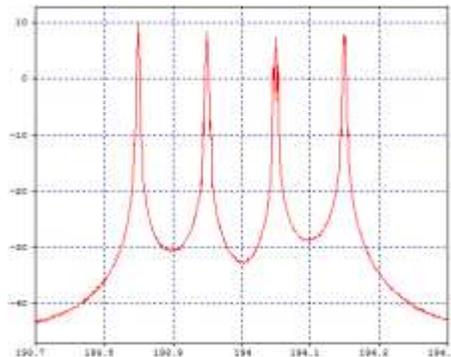
**Figura 4.60 (a) Espectro óptico mostrando la generación de canales para una  $CD = 0$ .**



**Figura 4.60 (b) Espectro óptico mostrando la generación de canales para una  $CD = 1$ .**



**Figura 4.60 (c) Espectro óptico mostrando la generación de canales para una  $CD = 2$ .**



**Figura 4.60 (d) Espectro óptico mostrando la generación de canales para una  $CD = 3$ .**

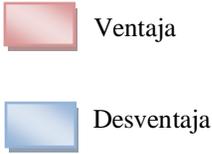
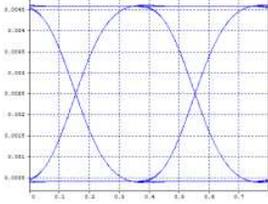
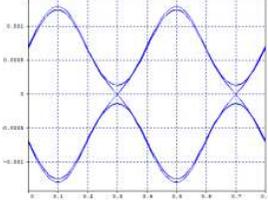
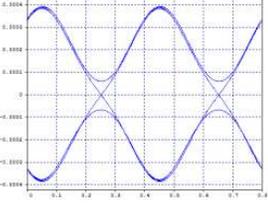
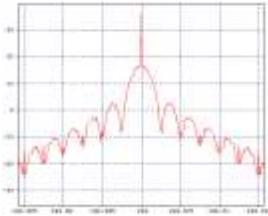
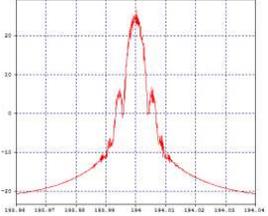
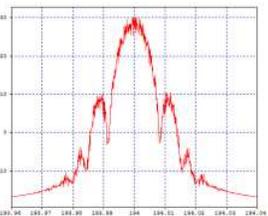
Como se aprecia en las figuras 4.60 (a) a 4.60 (d), al igual que para el caso del formato de modulación RZ-DQPSK y contrario al formato de referencia NRZ-OOK, el efecto de la FWM se hace evidente para bajos valores de dispersión de la fibra y decrece a medida que la CD incrementa, *esto es debido a que a bajos valores de CD o próximos a la condición de phase-matching (dispersión cero), el efecto se maximiza. Sin embargo, a pesar de poder visualizar el efecto de la FWM, este no degrada significativamente la eficiencia del modelo.*

Después de realizar el análisis de las diferentes degradaciones que afectan la transmisión del modelo mediante la implementación del formato de modulación RZ-DPSK, se puede concluir qué:

- El desempeño de este formato de modulación comparado con el formato de referencia NRZ-OOK es superior en todo sentido, siendo fácilmente configurable, obteniendo distancias de transmisión más largas y manteniendo la relación de OSNR aproximadamente 3dB por encima de NRZ-OOK.
- Al analizar los resultados obtenidos para los formatos NRZ-OOK y RZ-DQPSK comparados con RZ-DPSK, se concluye que este formato es más tolerante frente al ruido y a las pérdidas, siendo estas degradaciones las más significativas a 2.5Gb/s, sin embargo el formato de modulación más tolerante a esta degradación es RZ-DQPSK.
- El formato de modulación RZ-DPSK puede considerarse casi tan económico de implementar y tan sencillo de configurar como el formato NRZ-OOK y casi tan eficiente frente a las degradaciones ópticas como el formato RZ-DQPSK, haciendo de este formato de modulación el mejor desde la perspectiva de la relación costo-eficiencia.
- RZ-DPSK ha presentado las mejores características frente a las degradaciones ópticas bajo los escenarios implementados en el presente trabajo de grado y bajo los estudios desarrollados en el estado del arte a nivel internacional, haciendo de este formato de modulación la mejor opción para implementar redes WDM bajo las características del contexto nacional y para migrar a redes de más capacidad, más velocidad y ultra largas distancias.

#### 4.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE FORMATOS DE MODULACIÓN DESDE LA PERSPECTIVA DE LA RELACIÓN COSTO-EFICIENCIA

Una vez encontrada la respuesta del modelo simplificado de red mediante la implementación de los formatos de modulación frente a las degradaciones ópticas de manera independiente, se condensa toda la información obtenida del desarrollo del proyecto en la tabla 4.23, donde para propósitos de comparación, se ha definido un rango de valores los cuales se explican a continuación:

	NRZ-OOK	RZ-DQPSK	RZ-DPSK
			
Espectro Óptico			
Tolerancia al Ruido y a la Atenuación	POBRE	MUY BUENA	BUENA
Tolerancia a la CD	MEDIA	MEDIA	BUENA
Tolerancia a la PMD	MEDIA	MUY BUENA	MUY BUENA
Tolerancia a las no linealidades	BUENA	BUENA	BUENA
Tolerancia a enlaces concatenados	MEDIA	MEDIA	BUENA
Máxima distancia alcanzada	MEDIA	BUENA	MUY BUENA

**Tabla 4.23 Análisis comparativo de los formatos de modulación frente a los efectos lineales y no lineales.**

- **Pobre:** es el rango más bajo, el cual hace referencia a las características que deben tenerse en cuenta, dado que degradan significativamente la eficiencia del sistema y en general no pueden ser compensadas encontrándose en el límite de los parámetros objetivo.
- **Media:** es uno de los rangos intermedios, el cual hace referencia a un comportamiento cercano al deseado, en donde a pesar de presentar degradación en los parámetros de monitoreo óptico, estos no aportan significativamente en la degradación del

desempeño del modelo. Una de las características de este tipo de parámetros es que pueden ser mejorados mediante la implementación de elementos extras, como amplificadores y compensadores de la CD.

- **Buena:** es uno de los rangos intermedios, el cual hace referencia a un comportamiento deseado de los parámetros de monitoreo óptico, con respecto a los valores objetivo, en donde el formato se muestra tolerante frente a la degradación estudiada.
- **Muy Buena:** es el rango más alto, en donde en general mediante la implementación del formato de modulación se mejora significativamente el comportamiento de la red en comparación con los datos obtenidos para los otros formatos, siendo el más robusto y tolerante frente a la degradación, manteniendo la mejor relación para los parámetros de monitoreo óptico.

Como se aprecia en la tabla 4.24, donde se comparan las distancias máximas obtenidas mediante la implementación de cada uno de los formatos de modulación; *a pesar de que los formatos modulados en fase presentan mayor tolerancia frente a las degradaciones, estos requieren ser compensados en potencia en mayor medida debido a la configuración de sus transmisores. Sin embargo, mediante la implementación de algunas mejoras, los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-DPSK aportan significativamente en el desempeño del sistema, donde para NRZ-OOK los dispositivos adicionales de amplificación y compensación, no aportaron en el mejoramiento de los parámetros de monitoreo óptico.*

Formato	Distancia [Km]	BER	Factor Q [dB]	PRX [dBm]	OSNR [dB]
NRZ-OOK	130	4.33e-31	21.34	-16.90	17.40
NRZ-OOK	150	4.07e-10	15.73	-18.29	12.60
NRZ-OOK	180	No Detectado	No Detectado	No Detectado	No Detectado
RZ-DQPSK	130	1e-40	27.58	-8.86	22.93
RZ-DQPSK	150	1e-40	27.51	-14.11	18.41
RZ-DQPSK	180	No Detectado	No Detectado	No Detectado	No Detectado
RZ-DPSK	130	1e-40	34.49	-3.69	27.54
RZ-DPSK	150	1e-40	29.17	-11.86	20.32
RZ-DPSK	180	7.0e-27	20.26	-20.01	12.43

**Tabla 4.24 Análisis comparativo de los formatos de modulación con respecto a la máxima distancia alcanzada para un segmento de red.**

Por otra parte, con respecto a la cantidad de elementos requeridos por la red mediante la implementación de un formato de modulación para alcanzar una distancia mínima de 500Km mediante enlaces concatenados, comparando los resultados obtenidos en la tabla 4.23, *se constata que es el formato de modulación RZ-DPSK el que requiere menor cantidad de dispositivos de red, haciendo de este formato de modulación el menos costoso de implementar y a su vez, siendo el más eficiente frente a las degradaciones ópticas, para ser implementado dentro del contexto nacional.*

Formato	Distancia [Km]	BER	Factor Q [dB]	PRX [dBm]	OSNR [dB]
NRZ-OOK	504 con 7 span	5.03e-33	21.56	-4.38	20.38
RZ-DQPSK	504 con 6 span	7.82e-38	22.26	-20.65	27.56
RZ-DPSK	500 con 5 span	9.53e-35	21.76	-18.09	12.62

**Tabla 4.25 Análisis comparativo de los formatos de modulación con respecto al mínimo de recursos implementados para segmentos de red concatenados**

Por último, como se aprecia en la tabla 4.26, se analizaron los formatos de modulación desde la perspectiva de la relación costo-eficiencia, teniendo en cuenta todos los resultados obtenidos en la presente investigación, donde el formato menos costoso de implementar se evalúa debido a la configuración del transmisor, el receptor y a los cambios generados en el canal por la implementación de dispositivos extra como amplificadores y compensadores. Del mismo modo, la eficiencia del formato de modulación se evalúa en base a su comportamiento frente a los efectos lineales y no lineales.

FORMATO DE MODULACIÓN	NRZ-OOK		RZ-DQPSK		RZ-DPSK	
ELEMENTOS DE ANÁLISIS	COSTOS	EFICIENCIA	COSTOS	EFICIENCIA	COSTOS	EFICIENCIA
CALIFICACIÓN	MEDIOS	MEDIA	ALTOS	ALTA	BAJOS	ALTA
DESEMPEÑO	BUENO		MEDIO		MUY BUENO	

**Tabla 4.26 Análisis comparativo de los formatos de modulación desde la perspectiva de la relación costo-eficiencia.**

Mediante el análisis del desempeño de los formatos de modulación sobre comunicaciones ópticas en el contexto nacional, se verificó que existe toda una gama de nuevos y mejores formatos de modulación que podrían habilitar la transición de las redes, hacia redes de alta capacidad y ultra larga distancia, pero *debido a las características simples de las redes nacionales, los nuevos formatos de modulación podrían no ser la mejor opción si el deseo es mantener las características actuales de transmisión, en donde la mejor opción sería el formato de modulación más implementado NRZ-OOK*, debido a su simplicidad y a que cubre en mayor medida los parámetros objetivo.

Por otra parte, se debe prestar principal atención al formato de modulación RZ-DQPSK, el cual mejora significativamente los parámetros de monitoreo óptico y aporta una mejora única, duplicando la capacidad por canal, pasando automáticamente de redes con 10Gb/s a redes con una capacidad total de 20Gb/s. Sin embargo, debido a su fuerte dependencia en potencia, a la necesidad de ser compensado en CD, a su falta de estabilidad con respecto a los parámetros de configuración y a su complejo transmisor y receptor, no resulta en un formato económico de implementar pero si muy eficiente frente a las degradaciones ópticas.

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, dado que bajo las características del entorno nacional, los efectos como la PMD, SPM, XPM y FWM, no aportan significativamente con los valores que normalmente introducen en el enlace.

Por último, después de determinar los formatos de modulación que han generado mayor atención en comunicaciones ópticas sobre redes WDM para ser implementados dentro del contexto nacional y de evaluar, mediante la herramienta de simulación OptSim® de Rsoft, el desempeño a nivel físico de los formatos de modulación, se realizó el análisis comparativo desde la perspectiva de la relación costo-eficiencia de los formatos estudiados en el desarrollo del presente trabajo de grado, donde se concluye que:

*Es el formato de modulación RZ-DPSK el que presenta la mejor tolerancia con respecto a los efectos lineales y no lineales, permitiendo redes de alta eficiencia espectral, mejorando sustancialmente la distancia por enlace, manteniendo los parámetros de monitoreo óptico dentro del rango objetivo, así mismo, dicho formato presentó una relación costo-eficiencia superior entre los formatos de modulación estudiados, siendo la mejor solución para los operadores nacionales que implementan redes WDM.*

## CAPITULO 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El presente trabajo de grado, aborda desde una perspectiva analítica el desempeño de distintos formatos de modulación en comunicaciones ópticas, para hacer una comparación objetiva a la luz de criterios aplicables al desarrollo de las redes ópticas a nivel nacional; donde se dio cumplimiento a cada uno de los objetivos planteados en la investigación. Es muy 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.

Debido a que el presente trabajo de grado se encuentra dentro de los temas de actualidad, fue presentado en el “*Call for Papers*” para el “*V Seminario Nacional en Tecnologías Emergentes en Telecomunicaciones y Telemática TET-2010*” siendo aprobado para participar en calidad de ponentes del 10 al 12 de Junio del año en curso, y expuesto en la Universidad San Buenaventura de Cali el 7 de Mayo de 2010, en representación del grupo de investigación GNTT de la FIET.

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.

### 5.1 CONCLUSIONES

- ❖ Mediante la realización de este trabajo de grado, se determinó la incidencia de los formatos de modulación frente a los efectos lineales y no lineales para determinar cuál de los formatos aporta la mejor solución sin incrementar significativamente los costos y sin presentar cambios sensibles al enlace (relación costo-eficiencia), para ser implementado en redes de fibra óptica dentro del contexto nacional, cumpliendo de esta manera cada uno de los objetivos específicos y el objetivo general del proyecto.
- ❖ Algunos de los aportes fundamentales del presente trabajo de grado, se ven reflejados en la caracterización de los formatos de modulación que han generado mayor atención en el contexto internacional, donde se pudo identificar nuevos y mejores formatos de modulación los cuales aportan significativamente a mejorar el desempeño de la red. Del mismo modo, se realizó un análisis comparativo mediante la implementación de los formatos de modulación en un modelo simplificado de red, definiendo las principales características de las redes de algunos operadores nacionales.
- ❖ Mediante el análisis del desempeño de formatos de modulación, se determinó que la escogencia de un formato óptimo frente a los efectos lineales y no lineales, que mejore significativamente el desempeño de la red, dependerá de factores de la red como la tasa de transmisión de datos, la distancia de transmisión, la capacidad y la arquitectura, así mismo, dependerá de las características específicas del formato como la eficiencia espectral, y su relación costo-eficiencia.

- ❖ Al realizar el análisis de los formatos de modulación estudiados bajo la relación costo-eficiencia, se determinó que bajo las condiciones y características de los operadores nacionales, NRZ-OOK sigue siendo una buena solución permitiendo sistemas dentro de los parámetros objetivos. Sin embargo, si el deseo es migrar a redes con alta eficiencia espectral incrementando características como velocidad, capacidad y distancia de transmisión, RZ-DPSK se muestra como la mejor opción de formato de modulación.
- ❖ Mediante el análisis de los resultados obtenidos para cada formato de modulación, se determinó que la dispersión cromática es uno de los parámetros fundamentales a tener en cuenta, debido a su fuerte relación con las demás degradaciones ópticas, en donde un formato altamente tolerante a la CD, puede aportar significativamente en el desempeño de la red.
- ❖ La expectativa generada en el estudio del estado del arte sobre el contexto internacional alrededor de los formatos de modulación fue muy superior al aporte real de los formatos bajo características de redes del entorno nacional, donde a pesar de cumplir con los objetivos del proyecto, los resultados obtenidos *con respecto al desempeño de los formatos de modulación frente a los efectos lineales y no lineales*, no aportaron mejoras realmente significativas en el desempeño de la red, debido en gran medida a que bajo dichas características los efectos de la degradaciones ópticas se concentran en el ruido y la atenuación.
- ❖ Otro de los aspectos fundamentales a destacar son los resultados obtenidos para el formato de modulación RZ-DQPSK, donde generó un gran impacto con respecto a los parámetros de monitoreo óptico frente a las degradaciones estudiadas, *siendo el único formato de modulación que duplica la capacidad total de la red, manteniendo en mayor medida mejores relaciones de BER, Factor Q y OSNR*, generando grandes expectativas para el futuro en las comunicaciones ópticas. *Sin embargo debido a su dependencia en potencia y a su compleja configuración del transmisor, no cumple con los planteamientos del presente trabajo de grado, en donde a pesar de ser el más eficiente, también es el más costoso de implementar.*
- ❖ Este trabajo de grado, es en la actualidad una buena investigación para los operadores nacionales que implementan sistemas WDM, teniendo en cuenta que dentro del contexto nacional e institucional, *no existe ninguna referencia de investigación sobre esta temática* en donde los resultados obtenidos pueden aportar en decisiones futuras de proyectos de expansión y mejoramiento de las redes de fibra óptica, así mismo, este trabajo de grado es una plataforma para nuevas investigaciones centradas sobre los formatos avanzados de modulación, dado que se pueden generar grandes aportes en las áreas de investigación y desarrollo.
- ❖ Mediante la simulación de los distintos escenarios, se identificó que para los formatos de modulación el orden de los elementos dentro del canal, afecta considerablemente los resultados obtenidos, en donde para el formato de modulación RZ-OOK se debe realizar la amplificación después del segmento de red, debido a su baja tolerancia al ruido, mientras que para el caso de los formatos modulados en fase, se debe realizar

amplificación antes del segmento de red, debido a su fuerte tolerancia al ruido, pero a su dependencia a la potencia.

## 5.2 RECOMENDACIONES

Para realizar el estudio del desempeño de los formatos de modulación 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 los formatos de modulación que serán estudiados, debido a que día a día se generan nuevos formatos.
- ❖ Se debe definir el entorno de simulación y el alcance de la investigación, dado que los formatos de modulación reaccionan de diferente manera frente a la variación de las características de la red como velocidad de transmisión y espaciamiento de los canales.
- ❖ Se debe definir una metodología de simulación, para asegurar un buen entorno, en donde los resultados obtenidos estén acordes al contexto sobre el cual se está desarrollando el proyecto, así mismo es de gran utilidad revisar las técnicas y las estrategias de simulación que puede brindar la herramienta debido a que se podrían facilitar la obtención de los resultados deseados.
- ❖ Por otra parte, para la realización de este proyecto se usó la herramienta de simulación OptSim® de Rsoft, licencia adquirida por parte de la Universidad del Cauca, donde se pudo constatar que debido a soportar un gran número de características de simulación, esta herramienta podrían ser utilizada para implementar nuevas materias electivas o laboratorios entorno a los sistemas WDM, permitiendo simular redes de nueva generación facilitando su estudio y comprensión.

## 5.3 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 de formatos de modulación en comunicaciones ópticas sobre redes WDM, tales como:

- ❖ Verificar la incidencia de los formatos de modulación frente a los efectos lineales y no lineales a diferentes velocidades de transmisión de datos, con distintos espaciamientos y número de canales WDM.
- ❖ Realizar estudios centrados en los formatos modulados en polarización, debido a que no son ampliamente estudiados por su complejidad para ser implementados dentro de las redes de fibra óptica.

- ❖ Investigación centrada en el efecto de la Dispersión Cromática ya que es un factor que incide significativamente en las comunicaciones ópticas, teniendo una fuerte relación con casi todos los aspectos de la red.
- ❖ Realizar análisis sobre detección coherente para aprovechar las características de transmisión de los formatos modulados en fase.
- ❖ Realizar investigaciones detalladas sobre los filtros de transmisión y recepción, dado que afectan considerablemente el desempeño del sistema.
- ❖ Generar, en base a los resultados obtenidos en la presente investigación nuevos formatos de modulación, mediante la modificación de los formatos estudiados para alcanzar mayores velocidades de transmisión y más capacidad de la red, sin incurrir en cambios significativos dentro del enlace.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Zhang, “*Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System*”, Tesis de Maestría. The University of Kansas, 2005
- [2] P. J. Winzer, R-J. Essiambre, “*Advanced Optical Modulation Formats*”, Proc. IEEE Vol. 94, No. 5, pp. 952-985, Mayo. 2006
- [3] T. Tokle, M. Serbay, J. B. Jensen, W. Rosenkranz y P. Jeppesen, “*Advanced Modulation Formats for Transmission Systems*”, OFC/NFOEC 2008
- [4] O. Vassilieva, “*40Gb/s & 100Gb/s Transport in the WAN*”, Fujitsu Laboratories of America, Inc. Richardson, Texas. 2007
- [5] L. Zhao, H. Shankar y A. Nachum, “*40G QPSK and DQPSK Modulation*”, OFC 2007
- [6] D. van den Borne, S. L. Jansen, E. Gottwald, P. M. Krummrich, P. Leisching, G. D. Khoe y H. de Waardt, “A robust modulation format for 42.8-Gbit/s long-haul transmission: ¿RZ-DPSK or RZ-DQPSK?”, white paper, 2006
- [7] D. van den Borne, “Robust Optical Transmission Systems – Modulation and Equalization”, Tesis doctoral, 2008
- [8] 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
- [9] ITU-T Rec. O.201, “Aparatos de medida para parámetros de canales ópticos”, TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU, julio, 2003
- [10] S. Ten, M. Edwards, “An Introduction to the fundamentals of PMD in Fibers”, white paper, Julio 2006
- [11] H. Zamora, “DISPERSIÓN POR MODO DE POLARIZACIÓN (PMD) EN REDES TRONCALES DE FIBRA OPTICA”, laboratorio, Universidad Santiago de Chile, 2005
- [12] Le Nguyen Binh, “Digital Optical Communications”, CRC Press Taylor & Francis Group, 2009
- [13] S. P. Singh y N. Singh, “*NONLINEAR EFFECTS IN OPTICAL FIBERS: ORIGIN, MANAGEMENT AND APPLICATIONS*”, Progress In Electromagnetics Research, PIER 73, pp. 249–275, 2007
- [14] I. Garcés, J. Mateo, “Fenómenos no Lineales en Fibras Ópticas”, presentación, Universidad de Zaragoza, España, 1997

- [15] E. Gualda 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
- [16] D. Knipp, T. Chakma, "Optical Signal to Noise Ratio (OSNR)", Presentación, International University Bremen, Spring, 2005
- [17] Cisco Systems, Inc., "WDM Network Design: OSNR and Dispersion-Based Design", 2007. Página Web disponible en:  
<http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=30886&seqNum=8&rl=1>
- [18] J. Antonio Dinamarca, "Análisis del Diagrama del Ojo", Reporte técnico, Universidad Técnica Federico Santa María, 2002
- [19] ITU-T Rec. G.959.1, "Digital Sections and digital line system – Digital line systems", TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU, marzo, 2008
- [20] D. McGhan, C. Laperle, A. Savchenko, C. Li, G. Mak y M. O'Sullivan, "5120 km RZ-DPSK transmission over G652 fiber at 10 Gb/s with no optical dispersion compensation", conference paper, 2005
- [21] M. Zaacks, U. Mahlab, P. Mamyshev, C. Rasmussen, J. Calvitti, K. Falta, "Demonstration of 1000km 43Gb/s RZ-DPSK Transmission through a 50GHz Channel Spaced WSS", OFC 2006
- [22] M. Imran y R. Haddad. "Chirped RZ-DPSK Modulation Format in 40Gb/s WDM Transmission Systems". Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS). 2005
- [23] ITU-T Rec. G.694.1, "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid", TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU, Junio, 2002
- [24] ITU-T Rec. G.694.2, "Características de los medios de transmisión – Características de los componentes y los subsistemas ópticos: Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda: Plan de multiplexación por división aproximada de longitud de onda", TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU, Diciembre, 2003
- [25] C. Astudillo, N. Hernández, "Sistemas Ópticos Multicanal", Presentación, Universidad Técnica Federico Santa María, 2007
- [26] Communication Consultants, "Wavelength Division Multiplexing – CWDM vs DWDM", Presentación, Fargo, Julio, 2006
- [27] Applied Optoelectronics Centre, "WDM and DWDM Multiplexing", Presentación, School of Electronic and Communications Engineering, 2002
- [28] J. Tolosa, "Proyecto WDM", Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2003

- [29] Internexa S.A E.S.P., “Cerrando la Brecha Digital Mejorando la Conectividad Regional en LATAN”, noviembre, 2009
- [30] Huawei Technologies, “OptiX OSN 3500, Intelligent Optical Transmission System, Hardware Description Manual”, 2005
- [31] ITU-T Rec. G.652, “Characteristics of a single-mode optical fiber and cable”, TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU, junio, 2005
- [32] Cisco Systems, “Cisco OSN 15454 Multiservice Transport Platform”, 2003
- [33] F. Binti Mahad, A. Bin Mohd, “EDFA Gain Optimization for WDM System”, University Technology Malaysia, *Elektrika* VOL. 11, NO. 1, pp. 34-37, 2009
- [34] Avanex Corporation, “PureGain 1500, Fixed Gain, Compact EDFA with Control Electronics”, datasheet, 2005
- [35] A. Bertaina, J-L. Beylat, S. Bigo, M. W. Chbat, “Impacto de la Infraestructura de Fibra en la Transmisión por WDM”, *Revista de Telecomunicaciones de Alcatel*, tercer trimestre, 1998
- [36] OPNET, “Manual de usuario”, septiembre, 2004
- [37] Roger S. Pressman. “Ingeniería del Software, un enfoque práctico”. Editorial Mc. Graw Hill, 2002
- [38] OptSim, “User Guide”, RSoft, 2009
- [39] J.-X. Cai, D. G. Foursa, L. Liu, C. R. Davidson, Y. Cai, W. W. Patterson, A. J. Lucero, B. Bakhshi, G. Mohs, P. C. Corbett, V. Gupta, W. Anderson, M. Vaa, G. Domagala, M. Mazurczyk, H. Li, M. Nissov, A. N. Pilipetskii y Neal S. Bergano, “*RZ-DPSK Field Trial over 13,100 km of Installed Non Slope-Matched Submarine Fibers*”, paper, 2004
- [40] R. Millan, “Redes y Tecnología WDM”, Valladolid, España, 2000. Página Web disponible en: <http://www.ramonmillan.com>
- [41] Internexa S.A E.S.P., “Red de Fibra Óptica”. Página Web disponible en: <http://www.internexa.com/fibraoptica.htm>
- [42] UNE-EPM, “Características de Redes WDM”, 2009
- [43] Huawei Technologies, “OptiX OSN 7500, Intelligent Optical Transmission System, Hardware Description Manual”, 2005
- [44] Huawei Technologies, “OTA107101 OptiX OSN 9500 Descripción del Hardware”, 2005
- [45] ZTE Technologies, “The Evolutionary Path of Fixed Networks”, ZTE Technologies Magazine, Vol. 9, febrero, 2007

- [46] ITU-T Rec. G.650.2, "Transmission media and optical systems characteristics– optical fiber cables", TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU, Julio, 2007
- [47] ITU-T Rec. G.692, "Características de los medios de transmisión – Características de los componentes y los subsistemas ópticos", TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU, octubre, 1998
- [48] Daniel Gariépy, Gang He, "Measuring OSNR in WDM Systems – Effects of Resolution Bandwidth and Optical Rejection Ratio", EXFO Enterprise Reaching Out, 2009
- [49] R. Hui, S. Zhang, B. Zhu, R. Huang, C. Allen, D. Demarest, "Advanced Optical Modulation Formats and Their Comparison in Fiber-Optic Systems", Technical Report enero, 2004
- [50] Lidia Jordanova, Valentin Topchiev, "Amplification of the Multi-Wavelength Signal by Using EDFA with Constant Gain", IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.9 No.12, Technical University of Sofia, Bulgaria, 2009
- [51] Meghan Fuller, "10 Gbit/s dispersion compensation techniques abound", Lightwave Europe, Diciembre, 2006
- [52] Ramón Gutiérrez, "Diseño de un Enlace de Fibra Óptica", Presentación técnica, UNAM, 2009
- [53] W. Chen, F. Buchali, X. Yi, W. Shieh, J. S. Evans y R. S. Tucker, "*Chromatic dispersion and PMD mitigation at 10 Gb/s using Viterbi equalization for DPSK and DQPSK modulation formats*", OPTICS EXPRESS, Vol. 15, No. 9, pp. 5271-5276, OSA 2007
- [54] A. H. Gnauck, P. J. Winzer, L. L. Buhl, T. Kawanishi, T. Sakamoto, M. Izutsu, K. Higuma, "*12.3-Tb/s C-Band DQPSK Transmission at 3.2 b/s/Hz Spectral Efficiency*", white paper, 2006
- [55] M. Masayuki, "Polarization-mode Dispersion and its Mitigation", journal of the National institute of Information and Communications Technology, Vol 53, No 2, pp. 45-52, 2006