

Evaluación del Desempeño del Formato de Modulación CSRZ-DQPSK en una Red WDM



Diana Marcela García Satizabal
Rocío Santiago Sánchez

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
Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de
Telecomunicaciones
Popayán, Febrero de 2012

Evaluación del Desempeño del Formato de Modulación CSRZ-DQPSK en una Red WDM



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

**Diana Marcela García Satizabal
Rocío Santiago Sánchez**

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

**Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de
Telecomunicaciones**

Popayán, Febrero de 2012

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS DE REDES WDM, PARÁMETROS DE DESEMPEÑO, FORMATOS DE MODULACIÓN Y DEFINICIÓN DE UN MODELO SIMPLIFICADO DE RED WDM	2
1.1 CARACTERÍSTICAS DE REDES WDM	2
1.2 DEGRADACIONES ÓPTICAS, PARÁMETROS DE MONITOREO ÓPTICO Y FACTORES QUE LIMITAN EL DESEMPEÑO DE LOS SISTEMAS WDM	4
1.3 FORMATOS DE MODULACIÓN	5
1.3.1 Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase en Cuadratura DQPSK	7
1.3.2 Modulación por Supresión de Portadora con Retorno a Cero CSRZ	9
1.3.3 Modulación CSRZ-DQPSK	10
1.4 DESEMPEÑO DE SEÑALES ÓPTICAS MODULADAS EN FASE [26]	12
1.4.1 Degradaciones en la transmisión de señales ópticas moduladas en fase	12
1.5 MODELO SIMPLIFICADO DE RED	16
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y ESCENARIO DE SIMULACIÓN	20
2.1 METODOLOGIA DE SIMULACION	20
2.1.1 Modelo de Simulación	20
2.1.2 Proceso de simulación	23
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL FORMATO DE MODULACIÓN CSRZ-DQPSK A 10, 40 Y 100 Gbps	25
3.1 CONDICIONES INICIALES: CONFIGURACIÓN BACK-TO-BACK	26
3.1.1 Desajuste en el receptor a altas velocidades con canales dispersivos [64].	27
3.2 FORMATO DE MODULACIÓN CSRZ-DQPSK EMPLEANDO UNA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE 10 Gbps	31
3.2.1 Distancia máxima alcanzable por un segmento de red	31
3.2.2 Distancia máxima alcanzable mediante enlaces concatenados	35
3.2.3 Efecto del ruido de fase del láser	36
3.2.4 Análisis de los efectos lineales: Ruido y Pérdidas por Atenuación	36
3.2.5 Análisis de Dispersión Cromática (CD) [38]	37
3.2.6 Análisis de Dispersión por Modo de Polarización (PMD)	40

3.2.7	Análisis del efecto no lineal SPM [66].....	42
3.2.8	Análisis del efecto no lineal XPM [67]	44
3.2.9	Análisis del efecto no lineal FWM [68]	47
3.3	FORMATO DE MODULACIÓN CSRZ-DQPSK EMPLEANDO UNA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE 40 Gbps	49
3.3.1	Distancia máxima alcanzable por un segmento de red	49
3.3.2	Distancia máxima alcanzable mediante enlaces concatenados.....	52
3.3.3	Efecto del ruido de fase del láser	53
3.3.4	Ruido y Pérdidas por Atenuación	53
3.3.5	Análisis de Dispersión Cromática	54
3.3.6	Análisis de PMD.....	55
3.3.7	Análisis del efecto no lineal SPM.....	57
3.3.8	Análisis del efecto no lineal XPM.....	58
3.3.9	Análisis del efecto no lineal FWM	60
3.4	FORMATO DE MODULACIÓN CSRZ-DQPSK EMPLEANDO UNA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE 100 Gbps.....	61
3.4.1	Distancia máxima alcanzable por un segmento de red	61
3.4.2	Distancia máxima alcanzable mediante enlaces concatenados.....	63
3.4.3	Efecto del ruido de fase del láser	64
3.4.4	Ruido y Pérdidas por Atenuación: configuración a 100 Gbps	64
3.4.5	Análisis de Dispersión Cromática	65
3.4.6	Análisis de PMD.....	66
3.4.7	Análisis del efecto no lineal SPM.....	67
3.4.8	Análisis del efecto no lineal XPM.....	69
3.4.9	Análisis del efecto no lineal FWM	70
3.5	RECOPIACIÓN DE LAS MEDICIONES REALIZADAS SOBRE DISTINTAS TASAS BINARIAS.....	72
3.6	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS PARA CUMPLIR CON ESTÁNDARES MÍNIMOS DE DESEMPEÑO.	74
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS		79
4.1	CONCLUSIONES	79
4.2	RECOMENDACIONES	79

4.3 TRABAJOS FUTUROS.....	80
BIBLIOGRAFÍA	81

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1.1 Esquema modular de una red WDM	3
Figura 1.2 Diagrama en bloques del Modulador QPSK	6
Figura 1.3 Diagrama en bloques de: (a) un transmisor QPSK y (b) un transmisor DQPSK [20].	7
Figura 1.4 Estructura del transmisor DQPSK [21].	8
Figura 1.5 Diagrama de constelación para la modulación DQPSK con (a) Una estructura en paralelo súper Mach-Zehnder, (b) Un MZM en serie con un modulador en fase (c) Un PM con señal de impulsión de 4 niveles [21].	8
Figura 1.6 Demodulador y receptor balanceado para (a) DPSK y (b) DQPSK [26]	9
Figura 1.7 (a) Diagrama en bloques y (b) Principio de operación del formato de modulación CSRZ [28]	10
Figura 1.8 Implementación del formato de modulación CSRZ [29]	10
Figura 1.9 Diagrama en bloques del (a) Formato DQPSK y (b) Formato CSRZ DQPSK [30]	11
Figura 1.10 Arreglo experimental de la Modulación CSRZ-DQPSK a 100 Gbps; BPF: Filtro pasa banda; DSP: Procesador de señales digitales [31].	11
Figura 1.11 Modelo Simplificado de Red	19
Figura 2.1 Esquema del escenario general de simulación.	21
Figura 2.2 Diagrama de flujo del proceso de simulación	23
Figura 2.3 Técnicas de simulación de la Herramienta OptSim [30].	24
Figura 3.1 Escenario implementado en la herramienta de simulación para el formato de modulación CSRZ-DQPSK	25
Figura 3.2. Configuración Back to Back para el formato de modulación CSRZ-DQPSK.....	26
Figura 3.3 Condiciones Iniciales. Configuración Back to Back para el formato de modulación CSRZ-DQPSK	27
Figura 3.3 (a) Espectro óptico de CSRZ-DQPSK a 10 Gbps.	27
Figura 3.3 (b) Espectro óptico de CSRZ-DQPSK a 100 Gbps.	27
Figura 3.3 (c) Diagrama del ojo para un receptor Back to Back a 10 Gbps.	27
Figura 3.3 (d) Diagrama del ojo para un receptor Back to Back a 100 Gbps.	27
Figura 3.3 (e) BER vs OSNR para 10 Gbps.....	27
Figura 3.3 (f) BER vs OSNR para 100 Gbps.	27
Figura 3.4 Esquema de simulación para el formato de modulación CSRZ DQPSK, utilizando un receptor DQPSK Parcial.	28
Figura 3.5 Graficas de BER vs Desajuste, variando la dispersión de la fibra.	28

Figura 3.5 (a) BER vs Desajuste del MZDI para una dispersión de 0 ps/nm. Transmisión a 10 Gbps	28
Figura 3.5 (b) BER vs Desajuste del MZDI para una dispersión de 1360 ps/nm. Transmisión a 10 Gbps	28
Figura 3.5 (c) BER vs Desajuste del MZDI para una dispersión de 0 ps/nm. Transmisión a 100 Gbps	28
Figura 3.5 (d) BER vs Desajuste del MZDI para una dispersión de 40 ps/nm. Transmisión a 100 Gbps	28
Figura 3.6 Concepto del Desajuste en el retraso de un MZDI [64].	29
Figura 3.7 BER vs OSNR como función del desajuste en el retraso de un MZDI para una CD = 0 ps/nm.	29
Figura 3.8 Penalización en la OSNR para diferentes valores de dispersión en función del Desajuste en el receptor DPSK	30
Figura 3.9 (a) Diagrama del ojo, enlace de 80Km con PTX=-10dBm. BER = 6,95e-31.	32
Figura 3.9 (b) Diagrama del ojo, enlace de 80Km con PTX=16dBm. BER = 8,57e-23.	32
Figura 3.10 BER vs Distancia empleando una Potencia de Transmisión de (a) -10 dBm, (b) 0 dBm, (c) 10 dBm y (d) 16 dBm. Red de cuatro canales espaciados entre sí 200 GHz.	32
Figura 3.11 Tramo individual del enlace implementando mejoras en la amplificación y la técnica de post-compensación óptica para la CD.	35
Figura 3.12 (a) Diagrama del ojo empleando un tramo de distancia máxima (80Km) con un FWHM= 0 MHz	36
Figura 3.12 (b) Diagrama del ojo empleando un tramo de distancia máxima (80Km) con un FWHM= 5 MHz	36
Figura 3.13 Potencia en Recepción vs Distancia de Transmisión.	37
Figura 3.14 (a) Diagrama del ojo sin efecto de la Dispersión Cromática (D=0 ps/nm/Km)	38
Figura 3.14 (b) Diagrama del ojo con efecto de la Dispersión Cromática (D=18,7 ps/nm/Km)	38
Figura 3.15 (a) Diagrama del Ojo sin compensación de la CD para un Span de 80 Km.	39
Figura 3.15 (b) Diagrama del Ojo compensando en 100% la CD para un Span de 80 Km.	39
Figura 3.16 (a) Diagrama del ojo para seis (6) tramos de fibra concatenados de 80km con compensación de la CD	40
Figura 3.16 (b) Diagrama del ojo para dos (2) tramos de fibra concatenados de 80km sin compensación de la CD	40
Figura 3. 17 Factor Q vs PMD	41
Figura 3.18 (a) Diagrama del ojo sin considerar otras degradaciones, con una PMD= 0,2 ps/√Km.	41
Figura 3.18 (b) Diagrama del ojo sin considerar otras degradaciones con una PMD= 11,7 ps/√Km.	41
Figura 3.19 (a) Diagrama de la DGD vs Parámetro Fuente (Seed).	42
Figura 3.19 (b) Diagrama de la DGD vs Parámetro PMD.	42

Figura 3.19 (c) BER vs Parámetro PMD	42
Figura 3.20 (a) Potencia de Recepción Vs Potencia de Transmisión	43
Figura 3.20 (b) Espectros de Salida sin considerar el efecto de SPM	43
Figura 3.20 (c) Espectros de Salida considerando el efecto de SPM.....	43
Figura 3.21 (a) Potencia en Recepción Vs Potencia de Transmisión.....	44
Figura 3.21 (b) Espectro de entrada (verde) y espectro de salida (rojo) considerando el efecto de SPM.....	44
Figura 3.22 (a) Degradación del Diagrama del ojo ocasionada por el efecto de SPM con $D = 0$ ps/nm/Km. (BER = $2,56e-11$, Q= 18,49 dB).	44
Figura 3.22 (b) Degradación del Diagrama del ojo ocasionada por el efecto de SPM con $D = 17$ ps/nm/Km. (BER = $4e-26$, Q= 20 dB).	44
Figura 3.22 (c) Degradación del Diagrama del ojo ocasionada por el efecto de SPM con $D = -17$ ps/nm/Km. (BER = $1e-40$, Q= 22 dB).	44
Figura 3.22 (d) Espectros de señales de salida resultantes para $D= 0$ (verde) y $D= 17$ ps/nm/Km (rojo).	44
Figura 3.23 (a) BER vs Potencia de Transmisión de los canales de bombeo. Medida en el canal 193,5 THz.....	45
Figura 3.23 (b) Factor Q vs Potencia de Transmisión de los canales de bombeo. Medida en el canal 193,5 THz.....	45
Figura 3.23 (c) Diagrama del ojo con P. Transmisión de -5 dBm. BER= $1e-40$, Q=40 dB.....	46
Figura 3.23 (d) Diagrama del ojo con P. Transmisión de 0 dBm. BER= $1e-40$, Q=33,11 dB.....	46
Figura 3.23 (e) Diagrama del ojo con P. Transmisión de 16 dBm. BER= $4e-24$, Q= 20,22 dB.....	46
Figura 3.24 (a) BER vs Coeficiente de Dispersión.	46
Figura 3.24 (b) Factor Q vs Coeficiente de Dispersión.	46
Figura 3.24 (c) Espectro de la señal de salida con $D = 0$ ps/nm/Km. P. Transmisión de los canales de bombeo de 16 dBm.....	46
Figura 3.24 (d) Espectro de la señal de salida con $D = 17$ ps/nm/Km. P. Transmisión de los canales de bombeo de 16 dBm.....	46
Figura 3.25 (a) Espectro de salida para una señal con P. Transmisión de -5 dBm.....	47
Figura 3.25 (b) Espectro de salida para una señal con P. Transmisión de 0 dBm.....	47
Figura 3.25 (c) Espectro de salida para una señal con P. Transmisión de 16 dBm.	47
Figura 3.26 (a) Espectro de la señal de salida para un enlace con coeficiente de dispersión $D = 0$ [ps/nm/Km]. P. Transmisión por canal de 16 dBm.	48
Figura 3.26 (b) Espectro de la señal de salida para un enlace con coeficiente de dispersión $D = 18$ [ps/nm/Km]. P. Transmisión por canal de 16 dBm.	48
Figura 3.26 (c) Canal 193,5 THz. Potencia de recepción Vs Coeficiente de dispersión de la fibra. ..	48

Figura 3.26 (d) Canal 192,7 THz (Producto de Intermodulación). Potencia de recepción Vs Coeficiente de dispersión de la fibra.	48
Figura 3.27 Red de cuatro canales con espaciamento de 200 GHz. Velocidad de TX de 40 Gbps. .	49
Figura 3.27 (a) Espectro a la salida del transmisor.	49
Figura 3.27 (b) Diagrama del ojo a la salida del transmisor. BER = 1e-40. Q = 28,86.	49
Figura 3.27 (c) BER vs Distancia. Potencia de TX -10 dBm	49
Figura 3.27 (d) BER vs Distancia. Potencia de TX 10 dBm	49
Figura 3.27 (e) BER vs Distancia. Potencia de TX 16 dBm	49
Figura 3.28 Red de cuatro canales con espaciamento de 100 y 50 GHz. Velocidad de TX de 40 Gbps.	50
Figura 3.28 (a) Diagrama del ojo a la salida del TX. BER = 1e-40. Q = 28,78. Espaciamento de 100 GHz.	50
Figura 3.28 (b) Espectro a la salida del TX con espaciamento de 100 GHz.	50
Figura 3.28 (c) Diagrama del ojo a la salida del TX. BER = 6,68e-17. Q = 18,51. Espaciamento de 50 GHz.	50
Figura 3.28 (d) Espectro a la salida del TX con espaciamento de 50 GHz.	50
Figura 3.29 (a) Diagrama del ojo empleando un tramo de distancia máxima (7 Km) con un FWHM= 0 MHz	53
Figura 3.29 (b) Diagrama del ojo empleando un tramo de distancia máxima (7 Km) con un FWHM= 5 MHz	53
Figura 3.30 (a) Diagrama del ojo sin efecto de la Dispersión Cromática (CD=0 ps/nm/Km).	54
Figura 3.30 (b) Diagrama del ojo con efecto de la Dispersión Cromática (CD=17.3 ps/nm/Km)	54
Figura 3.31 (a) Diagrama del Ojo compensando al 100 % la CD en un span de 80 Km. BER = 1e-40, Factor Q = 24.01 dB.	54
Figura 3.31 (b) Diagrama del Ojo compensando al 75 % la CD en un span de 80 Km. BER = 0.017804, Factor Q = 6.47 dB.	54
Figura 3.32 (a) Diagrama del ojo para dos (2) tramos de fibra de 80km concatenados. Con compensación de la CD.	55
Figura 3.32 (b) Diagrama del ojo para un (1) tramo de fibra de 80km. Sin compensación de la CD.	55
Figura 3.33 (a) BER vs PMD. Variando el coeficiente de PMD en valores cercanos a 0.2ps/vKm.	55
Figura 3.33 (b) Factor Q vs PMD. Variando el coeficiente de PMD en valores cercanos a 0.2ps/vKm.	55
Figura 3.34 (a) Diagrama del ojo sin considerar otras degradaciones, con una PMD= 0,2 ps/vKm.	56
Figura 3.34 (b) Diagrama del ojo sin considerar otras degradaciones, con una PMD= 24 ps/vKm.	56
Figura 3.34 (c) Diagrama del ojo sin considerar otras degradaciones, con una PMD= 26 ps/vKm.	56
Figura 3.35 (a) Diagrama de la DGD vs Parámetro Fuente (Seed).	56

Figura 3.35 (b) BER vs PMD	56
Figura 3.35 (c) Factor Q vs PMD	56
Figura 3.36 (a) Potencia de Recepción Vs Potencia de Transmisión	57
Figura 3.36 (b) Espectros de Salida sin considerar el efecto de SPM	57
Figura 3.36 (c) Espectros de Salida considerando el efecto de SPM.....	57
Figura 3.37 (a) Potencia en Recepción Vs Potencia de Transmisión.....	57
Figura 3.37 (b) Espectros de entrada (verde) y Espectro de salida (rojo) considerando el efecto de SPM. 16dBm.	57
Figura 3.38 (a) Espectros de señales de salida resultantes para $D = 17$ ps/nm/Km y para $D = -17$..	58
Figura 3.38 (b) Degradación del Diagrama del ojo ocasionada por el efecto de SPM con $D = 17$	58
Figura 3.38 (c) Degradación del Diagrama del ojo ocasionada por el efecto de SPM con $D = -17$ ps/nm/Km. (BER = $1e-40$, Q = 27.78 dB)	58
Figura 3.39 (a) BER vs Potencia de Transmisión de los canales de bombeo. Medida en el canal 193,5 THz.....	58
Figura 3.39 (b) Factor Q vs Potencia de Transmisión de los canales de bombeo. Medida en el canal 193,5 THz.....	58
Figura 3.39 (c) Diagrama del ojo con P. Transmisión de -5 dBm. BER= $1e-40$, Q= 31.71 dB.	59
Figura 3.39 (d) Diagrama del ojo con P. Transmisión de 0 dBm. BER= $1e-40$, Q=31.35 dB.	59
Figura 3.39 (e) Diagrama del ojo con P. Transmisión de 16 dBm. BER= $1.78e-32$, Q= 21.71 dB.	59
Figura 3.40 (a) BER vs Coeficiente de Dispersión. P. Transmisión de de los canales de bombeo de 16 dBm.....	59
Figura 3.40 (b) Factor Q vs Coeficiente de Dispersión. P. Transmisión de de los canales de bombeo de 16 dBm.....	59
Figura 3.40 (c) Espectro de la señal de salida con $D = 0$ ps/nm/Km. P. Transmisión de los canales de bombeo de 16 dBm.....	59
Figura 3.40 (d) Espectro de la señal de salida con $D = 17$ ps/nm/Km. P. Transmisión de los canales de bombeo de 16 dBm.....	59
Figura 3.41 (a) Espectro de salida para una señal con P. Transmisión de -5 dBm.....	60
Figura 3.41 (b) Espectro de salida para una señal con P. Transmisión de 0 dBm.....	60
Figura 3.41 (c) Espectro de salida para una señal con P. Transmisión de 16 dBm.	60
Figura 3.42 (a) Espectro de la señal de salida. $D = 0$ [ps/nm/Km]. P. Transmisión por canal de 16dBm	60
Figura 3.42 (b) Espectro de la señal de salida. $D = 3$ [ps/nm/Km]. P. Transmisión por canal de 16dBm	60
Figura 3.42 (c) Espectro de la señal de salida. $D = 18$ [ps/nm/Km]. P. Transmisión por canal de 16dBm	60
Figura 3.42 (d) Canal 193,5 THz. Potencia de recepción Vs Coeficiente de dispersión de la fibra... 61	

Figura 3.42 (e) Canal 192,9 THz (Producto de Intermodulación). Potencia de recepción Vs Coeficiente de dispersión de la fibra.	61
Figura 3.43 Condiciones Iniciales. Configuración Back to Back para una red de cuatro canales espaciados en 400, 200 y 100 GHz. Velocidad de Transmisión de 100 Gbps.....	62
Figura 3.43 (a) Espectro a la salida del transmisor con espaciamiento de 400 GHz.....	62
Figura 3.43 (b) Espectro a la salida del transmisor con espaciamiento de 200 GHz.	62
Figura 3.43 (c) Espectro a la salida del transmisor con espaciamiento de 100 GHz.....	62
Figura 3.43 (d) Diagrama del ojo. BER = 1e-40. Q = 24,25. Espaciamiento de 400 GHz.	62
Figura 3.43 (e) Diagrama del ojo. BER = 1e-40. Q = 23,83. Espaciamiento de 200 GHz.	62
Figura 3.43 (f) Diagrama del ojo. BER = 8e-10. Q = 15,82. Espaciamiento de 100 GHz.	62
Figura 3.43 (g) BER vs Distancia de TX. Espaciamiento de 400 GHz.	62
Figura 3.43 (h) BER vs Distancia de TX. Espaciamiento de 200 GHz.	62
Figura 3.43 (i) BER vs Distancia de TX. Espaciamiento de 100 GHz.	62
Figura 3.44 (a) Diagrama del ojo empleando FWHM = 5 MHz. Red de cuatro canales con espaciamiento de 200 GHz.	64
Figura 3.44 (b) Diagrama del ojo empleando FWHM = 5 MHz. Red de cuatro canales con espaciamiento de 100 GHz.	64
Figura 3.45 (a) Diagrama del ojo sin efecto de la Dispersión Cromática (CD=0 ps/nm/Km).....	65
Figura 3.45 (b) Diagrama del ojo con efecto de la Dispersión Cromática (CD=16.8 ps/nm/Km)	65
Figura 3.46 (a) Diagrama del Ojo compensando al 100% la CD un Span de 80 Km.....	66
Figura 3.46 (b) BER vs Distancia de TX compensando al 100% la CD.....	66
Figura 3.46 (c) Diagrama del Ojo compensando al 100% la CD un Span de 49 Km.	66
Figura 3.47 (a) BER vs PMD. Variando el coeficiente de PMD en valores cercanos a 0.2ps/VKm....	66
Figura 3.47 (b) Factor Q vs PMD. Variando el coeficiente de PMD en valores cercanos a 0.2ps/VKm.	66
Figura 3.48 (a) Diagrama del ojo para un Span de longitud de 0.3 Km, sin considerar otras degradaciones, con una PMD = 0.2 ps/VKm.....	67
Figura 3.48 (b) Diagrama del ojo para un Span de longitud de 0.3 Km, sin considerar otras degradaciones, con una PMD = 44 ps/VKm.....	67
Figura 3.49 (a) BER vs PMD	67
Figura 3.49 (b) Factor Q vs PMD	67
Figura 3.50 (a) Potencia de Recepción Vs Potencia de Transmisión	68
Figura 3.50 (b) Espectros de Salida sin considerar el efecto de SPM	68
Figura 3.50 (c) Espectros de Salida considerando el efecto de SPM.....	68
Figura 3.51 Espectro de entrada (verde) y Espectro de salida (rojo) considerando el efecto de SPM. PTX de 16 dBm.....	68

Figura 3.52 (a) Espectros de señales de salida resultantes para $D = 17$ ps/nm/Km	69
Figura 3.52 (b) Degradación del Diagrama del ojo ocasionada por el efecto de SPM con $D = 17$	69
Figura 3.52 (c) Degradación del Diagrama del ojo ocasionada por el efecto de SPM con $D = -17$	69
Figura 3.53 (a) BER vs Potencia de Transmisión de los canales de bombeo.....	69
Figura 3.53 (b) Factor Q vs Potencia de Transmisión de los canales de bombeo.....	69
Figura 3.53 (c) Diagrama del ojo con P. Transmisión de -5 dBm. BER= $1e-40$, Q= 24.37 dB.	69
Figura 3.53 (d) Diagrama del ojo con P. Transmisión de 0 dBm. BER= $1e-40$, Q=24.20 dB.....	69
Figura 3.53 (e) Diagrama del ojo con P. Transmisión de 16 dBm. BER= $2.31e-28$, Q= 21.03 dB. 69	
Figura 3.54 (a) BER vs Coeficiente de Dispersión.	70
Figura 3.54 (b) Factor Q vs Coeficiente de Dispersión.	70
Figura 3.54 (c) Espectro de la señal de salida con $D = 0$ ps/nm/Km.	70
Figura 3.54 (d) Espectro de la señal de salida con $D = 17$ ps/nm/Km.	70
Figura 3.55 (a) Espectro de salida para una señal con P. Transmisión de -5 dBm.....	71
Figura 3.55 (b) Espectro de salida para una señal con P. Transmisión de 0 dBm.....	71
Figura 3.55 (c) Espectro de salida para una señal con P. Transmisión de 16 dBm.	71
Figura 3.56 (a) Espectro de la señal de salida para un enlace con coeficiente de dispersión $D = 0$ [ps/nm/Km]. P. Transmisión por canal de 16 dBm.	71
Figura 3.56 (b) Espectro de la señal de salida para un enlace con coeficiente de dispersión $D = 18$ [ps/nm/Km]. P. Transmisión por canal de 16 dBm.	71
Figura 3.56 (c) Canal 193,5 THz. Potencia de recepción Vs Coeficiente de dispersión de la fibra. ..	71
Figura 3.56 (d) Canal 192,9 THz (Producto de Intermodulación). Potencia de recepción Vs Coeficiente de dispersión de la fibra.	71
Figura 3.57 (a) TX con 8 Canales. Enlace compensado. Separación 100 GHz.....	75
Figura 3.57 (b) TX con 8 Canales. Enlace compensado. Separación 50 GHz.	75
Figura 3.57 (c) TX con 8 Canales. Enlace compensado. Separación 25 GHz.....	75
Figura 3.58 BER vs Número de tramos concatenados, aumentando el número de canales en la red y empleando un espaciamiento fijo de 50 GHz.	76

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1.1 Parámetros típicos en redes CWDM y DWDM [6].	3
Tabla 1.2 Frecuencia de Ocurrencia de Degradaciones Ópticas en un Sistema WDM [13].	5
Tabla 1.3 Tabla de verdad del Pre-codificador del transmisor DQPSK	7
Tabla 1.4 Parámetros de la Fibra Corning SSMF-28 [55].	16
Tabla 1.5 Amplificador Conrning pure gain 1500 compact de ganancia constante.	17
Tabla 1.6 Características del Modelo Simplificado de Red.	18
Tabla 1.7. Parámetros de configuración en el modelo simplificado de red, necesarios para obtener diferentes velocidades de transmisión.	19
Tabla 3.1 Condiciones Iniciales de funcionamiento del formato CSRZ-DQPSK	26
Tabla 3.2 Valores de OSNR, para una BER=1e-3, con variaciones en el desajuste del receptor y en la dispersión acumulada.	30
Tabla 3.3 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de cuatro canales espaciados entre sí 200 GHz. OSNR In 56,78 dB.	31
Tabla 3.4 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de cuatro canales espaciados entre sí 100 GHz.	33
Tabla 3.5 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de cuatro canales espaciados entre sí 50 GHz.	33
Tabla 3.6 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de ocho canales espaciados entre sí 200 GHz. OSNR In 56,79 dB.	33
Tabla 3.7 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de ocho canales espaciados entre sí 100 GHz.	33
Tabla 3.8 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de ocho canales espaciados entre sí 50 GHz.	33
Tabla 3.9 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de dieciséis canales espaciados entre sí 200 GHz. OSNR In 56,79 dB.	34
Tabla 3.10 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de dieciséis canales espaciados entre sí 100 GHz.	34
Tabla 3.11 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de dieciséis canales espaciados entre sí 50 GHz.	34
Tabla 3.12 Distancia Máxima mediante enlaces concatenados. Potencia de transmisión de -5,58 dBm, OSNR _{IN} = 56,79 dB. Red de 8 canales espaciados 100 GHz. Velocidad de Transmisión de 10 Gbps.	36
Tabla 3.13 Parámetros de monitoreo óptico dependientes del FWHM. Con potencia de transmisión de -5 dBm en un enlace de 80 Km.	36

Tabla 3.14 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones por pérdidas por atenuación y ruido con $PTX = -5,58$ dBm.	37
Tabla 3.15 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la compensación de la CD en un enlace de 80 Km.....	39
Tabla 3.16 Parámetros de monitoreo óptico medidos en segmentos de red concatenados dependientes de la compensación de la CD.....	40
Tabla 3.17 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la PMD.....	41
Tabla 3.18 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la PMD en un Span de longitud de 80Km. P. transmisión= -5.58 dBm.....	41
Tabla 3.19 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de cuatro canales espaciados entre sí 200 GHz.....	50
Tabla 3.20 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de cuatro canales espaciados entre sí 100 GHz.....	50
Tabla 3.21 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de ocho canales espaciados entre sí 200 GHz.....	51
Tabla 3.22 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de ocho canales espaciados entre sí 100 GHz.....	51
Tabla 3.23 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de dieciséis canales espaciados entre sí 200 GHz.....	51
Tabla 3.24 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de dieciséis canales espaciados entre sí 100 GHz.....	51
Tabla 3.25 Comparación del efecto de la CD, la DGD y la PMD sobre distintas tasas binarias	52
Tabla 3.26 Distancia Máxima mediante enlaces concatenados. Potencia de transmisión de $-8,70$ dBm, $OSNR_{IN} = 52,95$ dB. Red de 8 canales espaciados 100 GHz. Velocidad de Transmisión de 40 Gbps.	52
Tabla 3.27 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de FWHM. Con potencia de transmisión de -5 dBm en un enlace de 7 Km.	53
Tabla 3.28 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones por pérdidas por atenuación y ruido con $FWMH=0$ MHz. Potencia de Transmisión de $-8,70$ dB.....	53
Tabla 3.29 Parámetros de monitoreo óptico medidos en segmentos de red concatenados dependientes de la compensación de la CD.....	55
Tabla 3.30 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la PMD en un span de longitud de 7 Km. P. transmisión= -8.70 dBm.....	56
Tabla 3.31 Parámetros de calidad variando la longitud de la fibra. Potencia del láser de -10 dBm. Velocidad de Transmisión de 100 Gbps.	63
Tabla 3.32 Parámetros de calidad variando la potencia del láser. Velocidad de Transmisión de 100 Gbps. Longitud del enlace de 300 mts.	63

Tabla 3.33 Distancia Máxima mediante enlaces concatenados. Potencia de transmisión de -13,06 dBm, OSNR _{IN} = 49,21 dB. Red de 8 canales espaciados 100 GHz. Velocidad de Transmisión de 100 Gbps.	64
Tabla 3.34 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de FWHM. Red de cuatro canales con espaciamiento de 200 GHz.	64
Tabla 3.35 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de FWHM. Red de cuatro canales con espaciamiento de 100 GHz.	64
Tabla 3.36 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones por pérdidas por atenuación y ruido con FWHM = 0MHz. Potencia de Transmisión de -13,06 dB.	65
Tabla 3.37 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la PMD en un Span de longitud de 0.3 Km. P. transmisión= -13.06 dBm.	67
Tabla 3.38 Valores medidos de los parámetros de desempeño de la red.	72
Tabla 3.39 Tolerancia del formato de modulación CSRZ-DQPSK frente a los fenómenos no lineales.	73
Tabla 3.40 Red de mayor capacidad obtenida a partir de simulación para el formato de modulación CSRZ-DQPSK empleando una velocidad de transmisión de 10 Gbps. Sin Compensar la CD.	75
Tabla 3.41 Red compensada de mayor capacidad obtenida a partir de simulación para el formato de modulación CSRZ-DQPSK empleando una velocidad de transmisión de 10 Gbps. Compensando la CD.	76
Tabla 3.42 Alcance máximo por span compensado la CD al 75 %, empleando redes con diferente número de canales, para el formato de modulación CSRZ-DQPSK empleando una velocidad de transmisión de 10 Gbps.	76

LISTA DE ACRÓNIMOS

ASE	Amplified Spontaneous Emission
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BW	BandWidth
CSRZ	Carrier Suppressed Return to Zero
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
CD	Chromatic Dispersion
DGD	Diferencial Group Delay
DPSK	Differential Phase Shift Keying
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
FWHM	Full Width at Half Maximum
FWM	Four-Wave Mixing
ISI	Inter Symbol Interference
MZ	Mach-Zehnder
MZDI	Mach Zehnder Delay Interferometer
NPN	Non-Linear Noise
NRZ	Non Return to Zero
OADM	Optical Add/Drop Multiplexer
OOK	On-Off Keying
OPM	Optical Performance Monitoring
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
OXC	Optical Cross-Connector

PMD	Polarization Mode Dispersion
PM-QPSK	Polarization Multiplexed-Quadrature Phase Shift Keying
PSK	Phase Shift Keying
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RZ	Return to Zero
RZ DQPSK	Return-to-Zero Differential Phase Shift Keying
SE	Spectral Efficiency
SPM	Self-Phase Modulation
SSMF	Standard Single-ModeFiber
XPM	Cross-phase modulation
WDM	Wavelength Division Multiplexing

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la cantidad de tráfico transportado por las redes de comunicaciones ha crecido notablemente y se prevé que esta tendencia de crecimiento de tráfico se va a acentuar en los próximos años, lo que implica que las redes de datos tienen que estar preparadas para permitir la transmisión de grandes volúmenes de información a muy altos regímenes binarios y con Tasas de Error de Bit (Bit Error Rate, *BER*) aceptables. Actualmente, el único medio físico que permite una transmisión de estas características es la fibra óptica, motivo por el cual ésta se ha convertido en el canal de comunicación por excelencia para las redes de comunicaciones presentes y futuras.

Uno de los parámetros clave que determina las características funcionales de un enlace de comunicaciones es el formato de modulación de la señal que transporta los datos. De este parámetro depende el comportamiento de dicha señal frente a las imperfecciones del canal de comunicación, la máxima distancia permisible entre regeneradores de señal, la máxima tasa binaria y la *BER* del citado canal. Todos estos factores influyen en el costo del enlace, por lo que la elección del formato de modulación es una labor fundamental en el proceso de planificación de un sistema de comunicaciones.

El presente proyecto está centrado en el estudio del formato de modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase en Cuadratura (DQPSK, *Differential Quadrature Phase Shift Keying*), con Supresor de Portadora con Retorno a Cero (CSRZ, *Carrier Suppressed Return to Zero*), a las velocidades de 10, 40 y 100 Gbps, frente a distintos fenómenos que se producen en el canal de comunicación.

Con el fin de abordar en los temas requeridos para el desarrollo del trabajo de grado, el contenido se divide en cuatro capítulos de la siguiente manera: en el capítulo 1 se presentan las características más significativas de los formatos de modulación en fase, las redes ópticas de Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*), el formato de modulación CSRZ-DQPSK y se definen las características de un modelo simplificado de red, en el capítulo 2 se define la metodología de simulación que se llevará a cabo con el fin de evaluar el desempeño del formato de modulación estudiado, el capítulo 3 presenta los resultados y el análisis de los datos obtenidos después de implementar a nivel de simulación el formato de modulación y evaluar su desempeño frente a los fenómenos lineales y no lineales, además se presentan las características técnicas necesarias para cumplir con estándares mínimos de desempeño. Finalmente, el capítulo 4 presenta las conclusiones del trabajo de grado y posibles trabajos futuros a desarrollar en esta área.

CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS DE REDES WDM, PARÁMETROS DE DESEMPEÑO, FORMATOS DE MODULACIÓN Y DEFINICIÓN DE UN MODELO SIMPLIFICADO DE RED WDM

En la actualidad es cada vez más notorio el incremento en el número de usuarios de redes de telecomunicaciones y también de la diversidad y complejidad de los servicios que estos demandan. Por tal razón, se tiene la necesidad de diseñar redes de comunicaciones más robustas, versátiles y confiables, capaces de soportar una nueva gama de servicios, aplicaciones de altos estándares y con mayores niveles de consumo.

Se espera que las nuevas implementaciones de red, se produzcan sin cambios significativos en los precios de los servicios, lo que obliga a los operadores de red a buscar soluciones novedosas en el ámbito de las redes de transporte óptico. Las tecnologías de redes ópticas WDM aparecen como la opción más promisoría para sustentar la demanda creciente de Ancho de Banda (*BW*, *BandWidth*), en las estructuras de transporte [1]. Al ser una tecnología robusta WDM ha propiciado su adaptación desde entornos de largas distancias a entornos metropolitanos, presentándose como una de las alternativas más atractivas en cuanto a prestaciones-costo.

Un aspecto importante de las comunicaciones ópticas es el formato de modulación, ya que de este depende en gran medida el desempeño de la red. Con el fin de aprovechar eficientemente los recursos disponibles, se han introducido en los sistemas de comunicación óptica un gran número de formatos de modulación. En particular, los formatos de modulación de fase han adquirido interés en el dominio óptico, en el contexto de la codificación diferencial y la detección balaceada [2]. En este documento se va a analizar el formato de Modulación CSRZ-DQPSK, el cual permite mejorar características tales como la velocidad de transmisión y aumenta la capacidad en las redes WDM [3].

Para el desarrollo de este capítulo, inicialmente se mencionan las características más relevantes correspondientes a las redes WDM, posteriormente se realiza una recopilación de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en dichas redes, para luego realizar una introducción sobre técnicas de monitoreo del desempeño del canal óptico basado en OPM (*Optical Performance Monitoring*), haciendo especial énfasis en señales moduladas en fase. Además, se toman como referencia algunas investigaciones realizadas acerca del formato DQPSK-CSRZ [15-31], las cuales posibilitan entender el funcionamiento de la modulación y conocer acerca de su implementación, lo cual permitirá al finalizar este capítulo, diseñar un modelo simplificado de red, que facilite medir y analizar los parámetros de desempeño del formato en una red WDM.

1.1 CARACTERÍSTICAS DE REDES WDM

Los sistemas WDM se clasifican en: WDM Densamente Espaciados (DWDM, *Dense Wavelength División Multiplexing*) y WDM Ampliamente Espaciados (CWDM, *Coarse Wavelength División Multiplexing*). En la Tabla 1.1, se definen algunos parámetros típicos sugeridos por el estándar ITU-T G.694.1 [4] y G.694.2 [5].

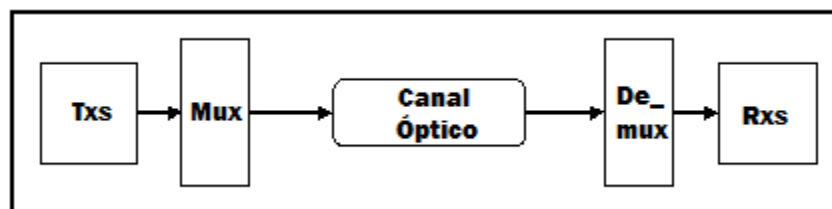
Tabla 1.1 Parámetros típicos en redes CWDM y DWDM [6].

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

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 [7]. Las ventajas de DWDM son 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 (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) y el bajo incremento en el costo debido a la implementación de nuevos canales. Sin embargo, no es una solución eficiente en costo para un número reducido de canales [8].

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 varios láser 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), donde típicamente cada segmento mide entre 80Km y 120Km dependientes del tipo de atenuación de la fibra óptica utilizada [9]. El esquema modular de una red WDM se ilustra en la Figura 1.1.

Figura 1.1 Esquema modular de una red WDM



Por tanto, para definir la arquitectura de la red es preciso tener presente aspectos de dimensionamiento tales como: longitud de la fibra óptica, tipo de fibra óptica, número de canales (CWDM, DWDM), BW óptico disponible (capacidad) y tipo de equipos: amplificadores, compensadores, moduladores, multiplexores, entre otros.

Las dos principales topologías de redes WDM son: la topología punto a punto, la cual es utilizada para redes de larga distancia; se caracteriza por canales de alta velocidad (10 a 40Gbps), por su alta integridad, confiabilidad y su rápida restauración, y la topología en anillo, la cual es la arquitecturas más común en áreas metropolitanas y en tramos de unas pocas decenas de kilómetros [10].

Teniendo en cuenta la recopilación de información acerca de las diferentes características de las redes WDM, concernientes a varios operadores de telecomunicaciones nacionales se determina que la topología más implementada en redes comerciales es la topología en anillo. Por tal razón, en la sección 1.5, para la definición del modelo simplificado de red, se toma un par de nodos (topología punto a punto) de una topología en anillo y se asume que los pares de nodos restantes tienen separaciones iguales, por lo tanto presentan comportamientos similares [9], [11], [12].

1.2 DEGRADACIONES ÓPTICAS, PARÁMETROS DE MONITOREO ÓPTICO Y FACTORES QUE LIMITAN EL DESEMPEÑO DE LOS SISTEMAS WDM

En esta sección se presentan las degradaciones que afectan la calidad de la señal óptica y los parámetros de monitoreo del desempeño de una red WDM; más adelante en la sección 1.4, se introducen las técnicas necesarias para efectuar la comprobación de la calidad de desempeño en el dominio óptico, cuando se emplean señales moduladas en fase.

Existen diferentes tipos de parámetros que describen la transmisión a través de un enlace de fibra óptica, los cuales se pueden catalogar como “parámetros que afectan la calidad de la señal óptica”. De acuerdo con la recomendación ITU-T G.697 [13], tales parámetros se clasifican en dos categorías: Degradaciones Ópticas y Parámetros de Monitoreo Óptico. Entre las *degradaciones ópticas* se encuentran: dispersión cromática, dispersión por modo de polarización, diafonía, atenuación, efectos no lineales¹, entre otros; mientras que dentro de los *parámetros de monitoreo óptico* están: longitud de onda de cada canal, relación señal a ruido óptica (OSNR, *Optical Signal to Noise Ratio*), potencia por canal WDM, potencia total en la fibra, factor Q y BER.

Por otra parte, los factores críticos que limitan el desempeño de los sistemas WDM se pueden clasificar en tres categorías: *potencia* (potencia del láser, atenuación de la fibra y pérdidas de los componentes), *longitud de onda* (estabilidad espectral, rango espectral de los EDFA, longitud de onda central y BW), y *tiempo* (dispersión de la fibra, jitter de la señal y tasa de transmisión de datos), además existen otros factores de igual importancia que se originan debido a la combinación de dichas categorías (Ruido de Emisión Espontánea Amplificada ASE, entre otros) [14].

Se debe tener en cuenta que todas las degradaciones mencionadas anteriormente, pueden ser suficientemente fuertes para producir una degradación profunda en una señal óptica, hasta un nivel en que el receptor ya no puede detectar los datos con una tasa de error razonable, sin embargo, no todas las degradaciones afectan a WDM en la misma medida. A continuación, se clasifican y enumeran las principales degradaciones de los sistemas WDM en la capa óptica, que limitan la capacidad del sistema para transportar información. En la Tabla 1.2 se muestra una lista de las principales posibles degradaciones del sistema.

¹ Los efectos no lineales son: Automodulación de Fase (SPM, *Self Phase Modulation*), Modulación Cruzada de Fase (XPM, *Cross Phase Modulation*), Mezclado de Cuatro Frecuencias (FWM, *Four Wave Mixing*), Difusión de Brillouin Estimulada (SBS - *Stimulated Brillouin Scattering*) y Difusión de Raman Estimulada (SRS - *Stimulated Raman Scattering*).

Tabla 1.2 Frecuencia de Ocurrencia de Degradaciones Ópticas en un Sistema WDM [13].

Variación de la Degradación	Frecuencia de Ocurrencia	Descripción
Atenuación	Elevada	
Variaciones de la Potencia del Canal Óptico debido a Variaciones de Ganancia	Elevada	
Desviación de la Frecuencia (o Longitud de Onda) del Valor Nominal	Elevada	Rec. ITU-T G.692
Dispersión por Modo de Polarización (PMD) (primer orden y órdenes superiores)	Media	Apéndice II/G.663
Mezcla de Cuatro Ondas (FWM)	Media	Apéndice II/G.663
Ruido de Emisión Espontánea Amplificada (ASE) en Amplificación Óptica	Media	Apéndice II/G.663
Dispersión Cromática (CD)	Media	Apéndice II/G.663
Pendiente de Dispersión Cromática	Media	Recs. ITU-T G.652, G.653, G.655
Reflexiones	Media	Apéndice III/G.663
Ruido de Láser	Media	
Diafonía entre Canales	Media	Sup. ITU-T 39
Diafonía Interferométrica	Media	Sup. ITU-T 39
Modulación de Fase Cruzada (XPM)	Baja	Apéndice II/G.663
Automodulación de Fase (SPM)	Baja	Apéndice II/G.663
Difusión Estimulada de Brillouin (SBS)	Baja	Apéndice II/G.650.2, Apéndice II/G.663
Difusión Estimulada de Raman (SRS)	Baja	Apéndice II/G.663

Los niveles de frecuencia de ocurrencia relativa en la Tabla 1.2 son:

- *Baja*: cuando la probabilidad de que el efecto sea suficientemente fuerte como para causar una penalidad de X dB, se produzca a razón de un evento en 10 años aproximadamente.
- *Media*: cuando la probabilidad de que el efecto sea suficientemente fuerte como para causar una penalidad de X dB, se produzca a razón de un evento por año aproximadamente.
- *Alta*: cuando la probabilidad de que el efecto sea suficientemente fuerte como para causar una penalidad de X dB, se produzca a razón de 10 eventos por año aproximadamente.

Un operador teniendo en cuenta una red DWDM de 10000 Km, sugiere definir un valor X de penalidad de 3 dB, como el valor que corresponde a una degradación significativa.

A partir de la información que se muestra en la Tabla 1.2 y la información que se presenta en la sección 1.4.1 del presente trabajo, donde se recopilan las principales degradaciones en la transmisión de señales ópticas moduladas en fase, en el capítulo 2 referente a la metodología de simulación, se seleccionan las degradaciones que son pertinentes de evaluar en este trabajo de grado.

1.3 FORMATOS DE MODULACIÓN

La mayoría de las redes de fibra óptica transmiten información digital modulando la amplitud de la onda portadora [15]. Estos formatos de modulación conocidos como On-Off Keying (OOK), siguen siendo los preferidos por la mayoría de los operadores debido a su fácil implementación. Sin embargo, mientras exista la necesidad de mejorar las prestaciones de los enlaces de comunicaciones ópticas, se tendrá que recurrir a otras alternativas, tales como los formatos de modulación por desplazamiento de fase (PSK,

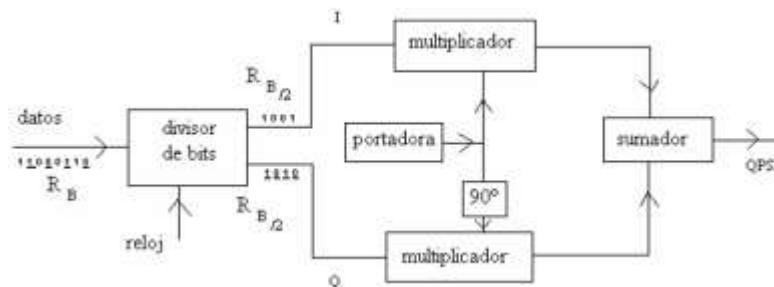
Phase Shift Keying), que permiten para grandes velocidades ampliar el alcance de la transmisión y ofrecen mayor resistencia a las degradaciones no lineales presentes en la fibra, comparados con los formatos de modulación en amplitud [16].

La modulación PSK es una forma de modulación angular que consiste en hacer variar la fase de la portadora entre un número de valores discretos [17]. Esta modulación puede dividirse en dos grandes grupos: la modulación PSK convencional, en la que la información se codifica en el valor del salto de fase, y la modulación PSK Diferencial (DPSK, *Differential Phase Shift Keying*), en la que el valor del salto de fase con respecto al salto anterior, es el que contiene la información. En el sistema PSK convencional, es necesario tener una portadora en el receptor para la sincronización. Esto supone tener un receptor más complejo que con DPSK. A continuación se presentan algunos formatos de modulación en fase, que hacen especial énfasis en la implementación del formato DQPSK, el cual actualmente ha cobrado gran importancia por el soporte de varios suministradores de equipos [18].

La Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria (BPSK, Binary Phase Shift Keying). Cuenta con 2 símbolos (suele ser 0° para el 1 y 180° para el 0), con 1 bit de información cada uno. La diferencia entre símbolos es máxima (180°) y su velocidad de transmisión es la más baja de las modulaciones de fase [18].

La Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK, Quadrature Phase Shift Keying). Cuenta con 4 símbolos desplazados entre sí 90° . Normalmente se usan como valores de salto de fase 45° , 135° , 225° y 315° [19]. Cada símbolo en QPSK aporta 2 bits y suele dividirse el flujo de cada bit que forma el símbolo como I (componente en fase) y Q (componente en cuadratura). La Figura 1.2 ilustra el diagrama en bloques del modulador QPSK.

Figura 1.2 Diagrama en bloques del Modulador QPSK



La salida de los multiplicadores es:

- Canal I : $+\cos W_c t$ y $-\cos W_c t$
- Canal Q : $+\sin W_c t$ y $-\sin W_c t$

La salida del multiplicador va al circuito sumador donde se combinan las señales. Las salidas del modulador QPSK se representan en las siguientes ecuaciones.

$$IQ = 11 \rightarrow +\cos W_c t + \sin W_c t = 1,414 \sin(W_c t + 45^\circ) \quad (1.1)$$

$$IQ = 10 \rightarrow +\cos W_c t - \sin W_c t = 1,414 \sin(W_c t + 135^\circ) \quad (1.2)$$

$$IQ = 01 \rightarrow -\cos W_c t + \sin W_c t = 1,414 \sin(W_c t - 45^\circ) \quad (1.3)$$

$$IQ = 00 \rightarrow -\cos W_c t - \sin W_c t = 1,414 \sin(W_c t - 135^\circ) \quad (1.4)$$

Donde $I \equiv$ Datos en fase, $Q \equiv$ Datos en cuadratura, W_c es la frecuencia de la portadora y t es el tiempo

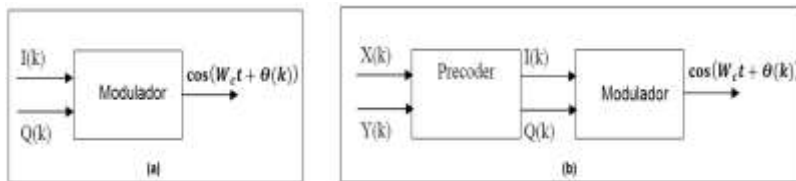
1.3.1 Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase en Cuadratura DQPSK

En el sistema PSK diferencial, a diferencia de las modulaciones PSK convencionales, no se necesita recuperar la señal portadora para realizar la demodulación. Es diferencial puesto que la información no está contenida en la fase absoluta, sino en las transiciones. La referencia de fase se toma del intervalo inmediato anterior, con lo que el detector decodifica la información digital basándose en diferencias relativas de fase [20]. Por ejemplo, en BPSK diferencial con codificación binaria "1", se puede transmitir mediante la adición de 180° a la fase actual de la portadora y un binario "0" se puede transmitir mediante la adición de 0° a la fase actual (la variante simétrica sería 90° para un '1' y -90° para un "0"). Para DQPSK, el desplazamiento de fase podría ser de 0°, 90°, 180°, -90° (con variante de -135°, -45°, +45° y +135°), que corresponde a los datos de '00', '01', '11', '10', respectivamente. Como se puede observar, los bits individuales de la señal DPSK se agrupan en pares en la señal DQPSK, que sólo cambia cada T_s (Tiempo de Símbolo) igual a dos veces el T_b (Tiempo de bit). Cada símbolo recibido es demodulado a uno de los 4 puntos en un diagrama de constelación y a continuación un comparador, calcula la diferencia de fase entre la señal recibida y el anterior [20].

TRANSMISOR DQPSK

Un transmisor DQPSK incluye un modulador QPSK y un pre-codificador [19]. Los datos pasan primero por el pre-codificador, el cual permite la asignación directa de la secuencia de bits de entrada $(X(k), Y(k))$, en una diferencia de fase de la portadora (un nuevo símbolo o conjunto de bits $(I(k), Q(k))$). La Figura 1.3, permite observar que la diferencia entre la implementación del transmisor QPSK y el transmisor DQPSK, es el módulo pre-codificador. Las salidas del pre-codificador $I(k)$ y $Q(k)$, están en función de las entradas actuales $X(k)$ y $Y(k)$ y la salida anterior $I(k-1)$ y $Q(k-1)$, tal como se observa en las ecuaciones 1.5 y 1.6.

Figura 1.3 Diagrama en bloques de: (a) un transmisor QPSK y (b) un transmisor DQPSK [20].



$$I(k) = \overline{X(k)Y(k)I(k-1)} + \overline{X(k)Y(k)Q(k-1)} + X(k)Y(k)I(k-1) + X(k)\overline{Y(k)Q(k-1)} \quad (1.5)$$

$$Q(k) = \overline{X(k)Y(k)Q(k-1)} + \overline{X(k)Y(k)Q(k)} + X(k)Y(k)Q(k-1) + X(k)\overline{Y(k)Q(k-1)} \quad (1.6)$$

Las operaciones lógicas presentes en el pre codificador se resumen en la Tabla 1.3.

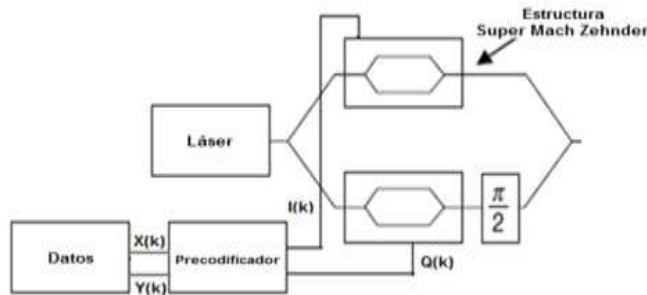
Tabla 1.3 Tabla de verdad del Pre-codificador del transmisor DQPSK

$X(k)$	$Y(k)$	$I(k)$	$Q(k)$
0	0	$\overline{I(k-1)}$	$\overline{Q(k-1)}$
0	1	$\overline{Q(k-1)}$	$I(k-1)$
1	0	$Q(k-1)$	$\overline{I(k-1)}$
1	1	$I(k-1)$	$Q(k-1)$

IMPLEMENTACIÓN DEL TRANSMISOR DQPSK

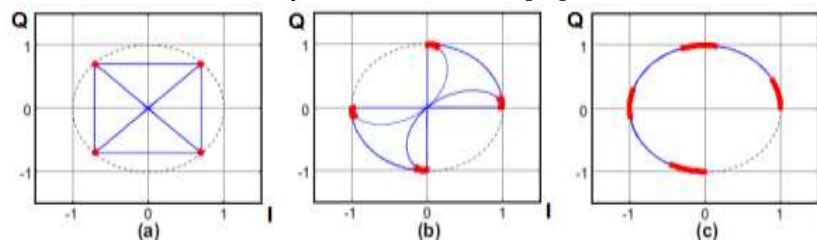
La modulación DQPSK puede implementarse utilizando una gran variedad de configuraciones del transmisor. El arreglo más empleado comúnmente se denomina modulador paralelo DQPSK, el cual consta de una fuente láser que opera continuamente, un splitter para dividir la luz en dos trayectos de igual intensidad, una estructura conocida como Súper Mach-Zehnder² (MZ), la cual se basa en dos moduladores Mach-Zehnder operando como moduladores DPSK, un conmutador óptico de fase $\pi/2$ en uno de los trayectos y un combinador para producir una señal única de salida [21]. En la Figura 1.4 se ilustra la estructura del transmisor DQPSK descrito.

Figura 1.4 Estructura del transmisor DQPSK [21].



Otras configuraciones del transmisor DQPSK incluyen: un modulador MZ y un modulador de fase en serie [22], un modulador de fase con 4 niveles de señal [23], [24], y un transmisor que consta de dos moduladores de electro absorción (EAM) en un interferómetro de tres brazos [25]. La Figura 1.5 representa el diagrama de constelación de varias de las configuraciones del modulador DQPSK.

Figura 1.5 Diagrama de constelación para la modulación DQPSK con (a) Una estructura en paralelo súper Mach-Zehnder, (b) Un MZM en serie con un modulador en fase (c) Un PM con señal de impulsión de 4 niveles [21].



RECEPTOR DQPSK [26]

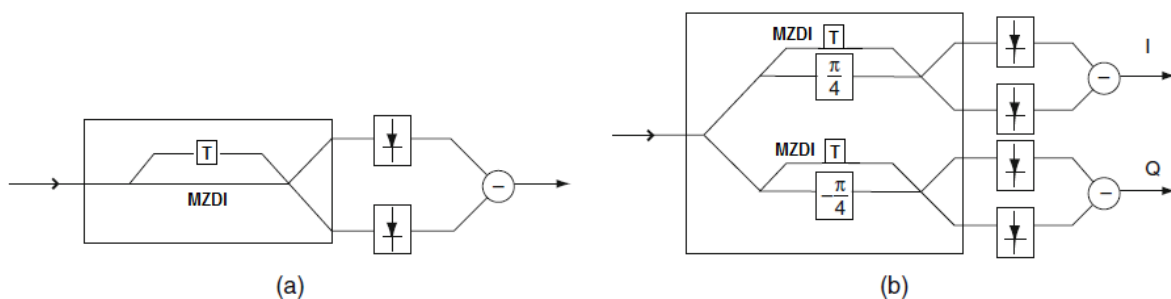
Un receptor puede demodular una señal DPSK sin necesidad de una portadora local ya que la referencia de fase se toma del último bit recibido. En la Figura 1.6 (a) y (b) se representa la estructura del receptor DPSK y DQPSK respectivamente, los cuales

² Cada modulador Mach-Zehnder actúa como un modulador de intensidad, en él la entrada de la señal óptica se divide por igual y se envía por dos caminos diferentes. Después de unos pocos centímetros, las dos vías se recombinan provocando interferencia constructiva o destructiva dependiendo del desfase.

típicamente están constituidos por interferómetros MZDI³ (Mach Zehnder Delay Interferometer), encargados de introducir un retardo equivalente a un periodo de bit. Un demodulador DQPSK se puede construir con dos demoduladores DPSK, sin embargo, a diferencia de DPSK, los MZDI que conforman el receptor DQPSK fijan una diferencia de fase, con el fin de realizar la detección de los componentes en fase (I) y en cuadratura (Q) de la señal DQPSK. El desplazamiento de fase entre las dos ramas del MZDI es de 45° para la demodulación de la componente I y de -45° para la demodulación de la componente Q.

Cada MZDI tiene una salida de componente constructiva y una salida de componente destructiva y por lo tanto se requieren cuatro fotodiodos para la detección balanceada de DQPSK. Los dos puertos de salida de cada MZDI llevan la información completa, ya que la señal en la salida de un puerto es el conjugado del otro puerto (detector balanceado), por lo tanto, para recuperar la información es suficiente la detección de la salida de un único puerto de un MZDI. Sin embargo, el uso de un detector balanceado permite la mejora de la OSNR por cerca de 3 dB y por lo tanto, el uso del detector se considera generalmente balanceado. La secuencia de datos obtenida después de la detección balanceada es una mezcla de las dos secuencias de datos transmitidas.

Figura 1.6 Demodulador y receptor balanceado para (a) DPSK y (b) DQPSK [26]



1.3.2 Modulación por Supresión de Portadora con Retorno a Cero CSRZ

La codificación CSRZ es un caso especial de la codificación RZ⁴ (*Return to Zero*) en donde la portadora es eliminada, el principal objetivo de esta codificación es reducir los efectos no lineales y obtener una mayor eficiencia espectral en un sistema de alta velocidad [27].

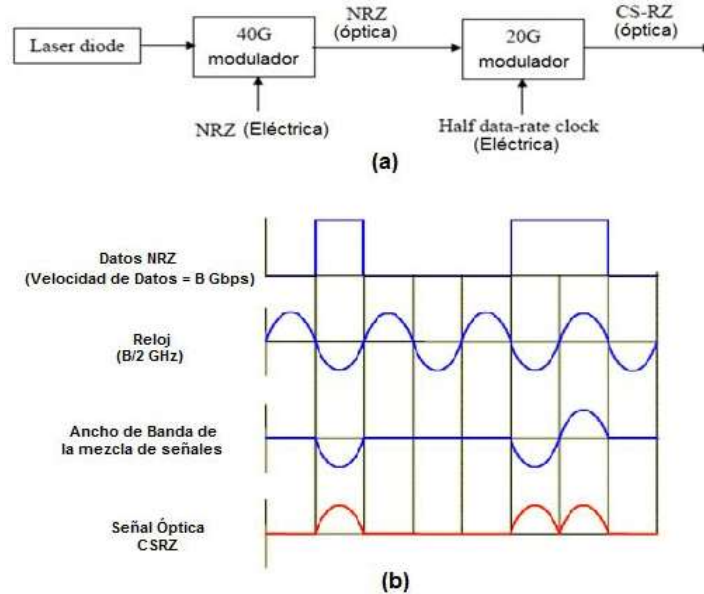
En la Figura 1.7 (a) se observa en términos generales un transmisor CSRZ, el cual consta de dos moduladores eléctrico ópticos. El primero se encarga de codificar los datos en NRZ (*Non Return to Zero*), luego estos datos son nuevamente codificados pero esta vez se obtiene la señal CSRZ [28]. Las formas de onda de las salidas de los moduladores puede observarse en la Figura 1.7 (b). La diferencia entre CSRZ y RZ, es que en la señal

³ Un interferómetro MZDI convierte una señal modulada en fase en una señal modulada en amplitud. Se basa en la interferencia de dos haces, en el que uno de los rayos se retrasa en el tiempo por un intervalo de tiempo deseado. Después de la recombinación, los dos rayos interfieren entre sí de manera constructiva o destructiva. La intensidad de la interferencia resultante es la intensidad de la señal detectada.

⁴ Es un sistema de codificación usado en telecomunicaciones en el cual la señal que representa a cada bit retorna a cero en algún instante dentro del tiempo del intervalo de bit.

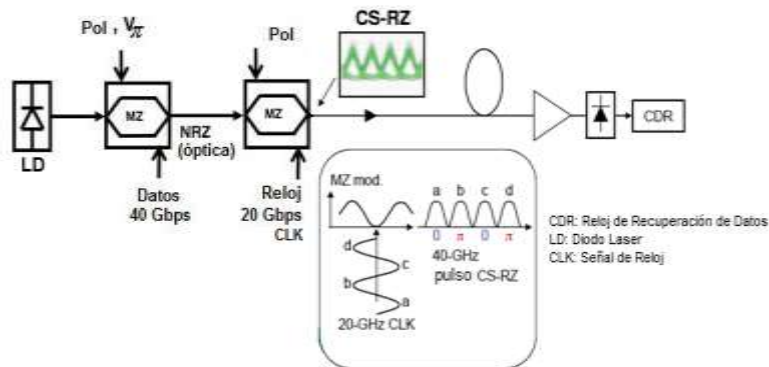
CSRZ la fase cambia 180 grados entre bits adyacentes, este cambio de fase alternado en el contexto óptico significa una reducción de la componente continua de la señal eléctrica.

Figura 1.7 (a) Diagrama en bloques y (b) Principio de operación del formato de modulación CSRZ [28]



Como se observa en esta Figura 1.8, la generación de una señal óptica CSRZ requiere de dos moduladores MZ, el primer MZ codifica los datos en NRZ, luego la señal óptica NRZ es modulada por el segundo MZ para generar la señal CSRZ [29].

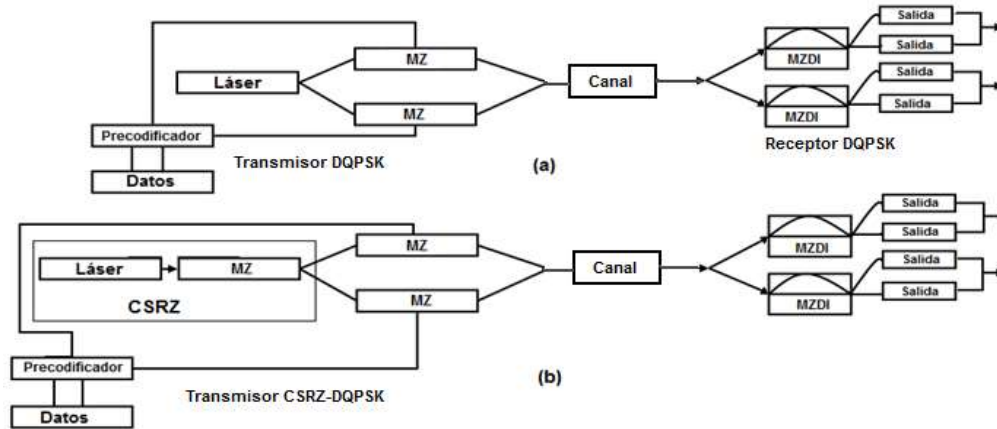
Figura 1.8 Implementación del formato de modulación CSRZ [29]



1.3.3 Modulación CSRZ-DQPSK

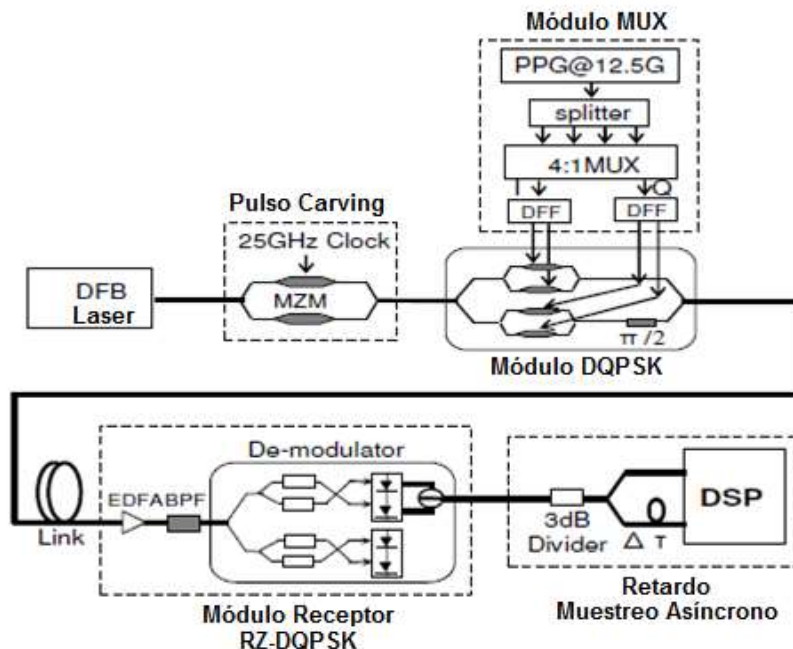
Las Figuras 1.9 (a) y (b) muestran el diagrama en bloques de un modulador DQPSK y CSRZ-DQPSK respectivamente, como se puede observar, para generar la señal CSRZ-DQPSK, primero se modula la señal del láser con CSRZ y la salida del modulador CSRZ se utiliza como entrada del modulador DQPSK [30]. Las modulaciones DQPSK y CSRZ se describieron en secciones anteriores del presente trabajo.

Figura 1.9 Diagrama en bloques del (a) Formato DQPSK y (b) Formato CSRZ DQPSK [30]



En la Figura 1.10 se puede observar un arreglo experimental de la modulación CSRZ-DQPSK a 100 Gbps. Este diseño incluye el módulo transmisor, un enlace con fibra óptica y el módulo receptor. En el primer módulo del transmisor se implementa un pulso carver a la mitad de la frecuencia de reloj (25GHz), cuya salida va a ser empleada en una estructura súper Mach-Zehnder. El segundo módulo en el transmisor es una fuente de datos, la cual proporciona dos salidas a 50 Gbps, las cuales son utilizadas como entradas de datos del modulador DQPSK. En el receptor la señal óptica es amplificada usando un pre-amplificador, y antes del foto-detector se utiliza un filtro sintonizable con un ancho de banda de 1nm. Las componentes I y Q de la señal DQPSK son separadas por un interferómetro sintonizable y cada señal es demodulada a 50Gbps [31].

Figura 1.10 Arreglo experimental de la Modulación CSRZ-DQPSK a 100 Gbps; BPF: Filtro pasa banda; DSP: Procesador de señales digitales [31].



Después de realizar el estudio de los formatos de modulación: DQPSK, CSRZ y CSRZ-DQPSK, se puede establecer que el formato CSRZ-DQPSK: al ser un formato en cuadratura tiene la ventaja de duplicar la capacidad total de la red⁵, al ser diferencial permite mejorar la sensibilidad del receptor por cerca de 3 dB, y al emplear la codificación CSRZ (en lugar de la codificación NRZ o RZ) podría presentar un buen desempeño⁶ frente a los efectos lineales y no lineales. Tales características benéficas del formato CSRZ-DQPSK permiten implementar redes con velocidades superiores del orden de los 10Gb/s, 40Gb/s y 100Gb/s; sin embargo, se debe tener en cuenta que implementar la modulación CSRZ-DQPSK implica gran complejidad en la configuración del formato e incrementos de costo inherente a la cantidad de elementos requeridos para su funcionamiento.

1.4 DESEMPEÑO DE SEÑALES ÓPTICAS MODULADAS EN FASE [26]

Últimamente han surgido gran variedad de formatos de modulación avanzados, en el marco de los sistemas de comunicaciones ópticas. En concreto, se ha demostrado que el uso del formato de modulación DPSK, mejora las prestaciones de los enlaces de comunicaciones ópticas de larga distancia y cuando se compara con el formato tradicional de modulación de intensidad OOK, DPSK proporciona una mejora en la sensibilidad del receptor, a la vez que resulta más tolerante a los efectos no lineales, especialmente a la modulación cruzada de fase en sistemas WDM [32].

Si bien el formato de modulación de intensidad OOK, constituye una opción de bajo coste, las mayores distancias de transmisión y mejores eficiencias espectrales que se consiguen con los nuevos formatos de modulación, posibilitan un aumento de la rentabilidad del sistema en el futuro. En especial, conviene destacar que la modulación DPSK supone el principio básico para duplicar la capacidad de transmisión, sin incurrir en una penalización de potencia, por efecto de la dispersión cromática o de la dispersión por modo de polarización. De igual manera la modulación DQPSK, es considerada uno de los formatos de modulación más prometedores en la generación de alta velocidad de transmisión óptica, debido a su eficiencia espectral y mayor tolerancia a la CD y a la PMD [33].

1.4.1 Degradaciones en la transmisión de señales ópticas moduladas en fase

La transmisión de la señal de información a través de un canal de fibra óptica da como resultado la acumulación de efectos ópticos, los cuales degradan la calidad de la señal en el receptor. En esta sección, se describen los efectos ópticos de mayor influencia en el desempeño de canales que implementan modulación en fase.

RUIDO ASE

La amplificación óptica frecuentemente se realiza con amplificadores EDFAs, lo cual viene acompañado con ruido de Emisión Espontánea Amplificada (ASE, *Amplified*

5 Al transmitir dos bits por símbolo, DQPSK se puede utilizar ya sea para doblar la velocidad de datos en comparación con un sistema DPSK manteniendo el mismo ancho de banda de la señal, o para mantener la velocidad de datos de DPSK, pero reduciendo el ancho de banda a la mitad.

6 El desempeño del formato de modulación CSRZ-DQPSK frente a los fenómenos lineales y no lineales se analiza en el capítulo 3 del presente trabajo.

Spontaneous Emission). En sistemas con OOK, el nivel de ruido puede ser relacionado con el parámetro de desempeño factor Q, el cual puede ser empleado para estimar la BER del sistema. Sin embargo, en sistemas con modulación de fase, la salida del receptor balanceado se determina con la fase de la señal y la distribución del ruido no es Gaussiana. Por lo tanto, el parámetro Q no es un método seguro para la determinación de la BER en sistemas con modulación en fase [34].

El nivel de ruido en el receptor puede ser completamente caracterizado por el nivel de la relación señal a ruido óptica (OSNR), cuya medición es necesaria para establecer si se obtuvo una determinada BER objetivo [35]. Por esta razón una reducción en la OSNR reduce la tolerancia a otras degradaciones del sistema. La OSNR habitualmente se determina de forma independiente a la velocidad de datos, en una resolución óptica de ancho de banda de $B_o=0.1$ nm. En investigaciones anteriores, se ha reportado una OSNR=17.5 dB, para lograr una BER objetivo de 1×10^{-9} empleando una señal RZ-DQPSK (*Return-to-Zero Differential Phase Shift Keying*) a 20 Gbps [36]. Con la misma velocidad de bit y la misma BER objetivo, se ha reportado una disminución de 2.3 dB en la OSNR, empleando una señal RZ-DPSK [37].

DISPERSIÓN CROMÁTICA

Mientras que el nivel de ruido ASE está relacionado con la OSNR y el número de amplificadores que debe atravesar la señal, el efecto de la dispersión cromática (CD, *Chromatic Dispersion*) se incrementa linealmente con la distancia y cuadráticamente con la velocidad de transmisión de datos [38].

La dispersión cromática sin compensación puede causar una penalización de potencia en el receptor. En el caso de las modulaciones en fase, se ha reportado una penalización de 2 dB, con una CD=32 ps/nm, para una señal RZ-DPSK a 42.7-Gbps [39]. Esto corresponde a una CD=512 ps/nm para la misma señal a 10-Gbps.

En el caso de una señal RZ-DQPSK a 42.7-Gb/s, la misma penalización de potencia de 2 dB, fue reportada para una CD=130 ps/nm. Esto corresponde a una CD=520 ps/nm para una señal RZ-DQPSK a 20 Gbps [37]. El acuerdo entre el resultado de RZ-DPSK a 10 Gbps (512 ps/nm) y el resultado de RZ-DQPSK a 20 Gbps (520 ps/nm), se deriva del hecho de que la señal RZ-DPSK a 10-Gb/s, ocupa el mismo ancho de banda que la señal RZ-DQPSK a 20-Gb/s.

DISPERSIÓN POR MODO DE POLARIZACIÓN

Además de la CD, la PMD (*Polarization Mode Dispersion*) es otro proceso de dispersión que afecta a la calidad de la transmisión óptica. La penalización de potencia inducida por la PMD en los canales ópticos depende predominantemente de la forma de onda de la señal. Por esta razón, la PMD depende linealmente de la velocidad de bit [35]. La señal DPSK generalmente se desempeña mejor que la señal OOK [40]. En el caso de la señal DPSK a 42.7-Gbps, se ha reportado una penalización de potencia de 2 dB, cuando la PMD induce un DGD=14 ps [39]. La señal RZ-DQPSK muestra un desempeño mucho mejor que la señal OOK y la señal DPSK, debido a que reduce la velocidad por símbolo para una velocidad de bit dada [31].

La señal RZ-DQPSK a 42.7-Gbps sufre una penalización de potencia de 2 dB con un DGD= 28 ps. En ambos casos, tanto en DPSK como en DQPSK, la penalización de potencia de 2 dB ocurre en un DGD de aproximadamente el 50% de duración del símbolo. La ITU-T (Unión Internacional de Telecomunicaciones) recomienda que el DGD máximo en un enlace de fibra óptica no debiera superar el 30% de la ranura temporal de un bit (TB) para no superar una penalidad de potencia de 1 dB, producto de la distorsión provocada por PMD [41].

LA FILTRACIÓN Y EL DESPLAZAMIENTO DE FRECUENCIA

Una importante fuente de penalidad en redes ópticas, deriva del filtrado del espectro de la señal en un multiplexor óptico "add-drop". El impacto de la reducción del espectro, en el desempeño de las señales DPSK, se ha estudiado en la Referencia [42]. Se ha demostrado que la modulación DPSK con detección balanceada, aumenta la robustez del filtrado óptico, debido a la mejor tolerancia a la interferencia entre símbolos (ISI, *Inter Symbol Interference*). En el caso de la modulación DQPSK, el reducido espectro de la señal, garantiza que la penalización debida a la filtración es significativamente menor que en el caso de DPSK, con la misma velocidad de bits. Para una señal a 40 Gbps, se alcanza una penalización de 1 dB, después de la transmisión por más de 10 etapas de filtrado, con un ancho de banda de 44 GHz [37]. Los valores indicados de una penalización por filtrado, se obtienen bajo el supuesto de que la frecuencia de la portadora óptica coincide con la rejilla predeterminada y está alineada con todos los componentes ópticos en el camino de la señal.

Sin la supervisión adecuada, las frecuencias centrales de los componentes ópticos podrían variar con el tiempo y fluctuar debido a factores ambientales. La frecuencia del láser o los componentes ópticos, pueden producir una desalineación de la frecuencia en la red, lo cual puede causar pérdidas de potencia óptica, interferencia entre canales, o una penalización en el MZDI, utilizado para la demodulación de un canal DPSK o DQPSK.

Para una señal DPSK a 40-Gbps, un desalineamiento en frecuencia de 1.2-GHz en el demodulador, produce una penalización de potencia de 1 dB [43]. Para la misma velocidad de bit, una señal DQPSK incurre en la misma penalización de potencia de 1 dB, con un desalineamiento de frecuencia de sólo 0.2-GHz.

Por último, cabe señalar que el ancho de línea del láser también tiene una influencia en el rendimiento de los canales modulados en fase. Para el caso de las señales DQPSK, con ruido de fase diferente de cero, se ha demostrado que se pone en peligro la tolerancia a la CD [44]. La influencia de la anchura de línea del láser es aún más pronunciada cuando el número de niveles de fase es mayor [45].

FENÓMENOS NO LINEALES

Las degradaciones lineales descritas en los ítems anteriores, afectan el desempeño de las señales ópticas en proporción con la distancia recorrida, el número de amplificadores ópticos y la tasa de bits de la señal. Otro grupo de efectos de transmisión, que influyen en la calidad de la señal, dependen de la potencia óptica. Los efectos no lineales se

producen en todos los dieléctricos cuando existen potencias ópticas suficientemente grandes propagándose por ellos. Aquí se destacan: la Dispersión no lineal y el Efecto Kerr.

La influencia de los fenómenos no lineales en la señal, depende del formato de modulación empleado, así como de las características del sistema de transmisión óptica. Para sistemas con baja Eficiencia Espectral (SE, *Spectral Efficiency*), fenómenos como la mezcla de cuatro ondas (FWM, *Four-Wave Mixing*), la Modulación de Fase Cruzada (XPM, *Cross-phase modulation*), y la Automodulación de Fase (SPM, *Self-Phase Modulation*), tienen que ser tomados en cuenta. Cuando se emplea una fibra de baja dispersión, tal como la fibra de dispersión desplazada No-Cero (NZ-DSF), el FWM es el efecto dominante [35]. Por otra parte se ha determinado que los formatos de modulación en fase, se ven afectados por los fenómenos no lineales en menor grado [46].

El receptor de alta sensibilidad de la modulación RZ-DPSK y RZ-DQPSK, permite transmitir la señal con una potencia más baja en comparación con el caso OOK, para lograr la misma BER objetivo [47]. Esto permite reducir el efecto de los fenómenos no lineales. Por otra parte, el pulso carving de RZ, ha demostrado reducir la distorsión debida a XPM para el RZ-DPSK [48], y el RZ-DQPSK [22]. Debido a que el patrón de forma de onda no depende de los datos y no cambia de bit a bit, el efecto promedio de XPM se compensa con la CD.

Con una velocidad de símbolo de 40 Gbps y una separación entre canales de 100 GHz, tanto RZ-DPSK como RZ-DQPSK, mejoran la resistencia a los fenómenos no lineales en 3 dB, en comparación a las señales OOK [37], [22]. A pesar de una mayor tolerancia a XPM, la transmisión modulada en fase es susceptible a otra forma de deterioro, derivada de la interacción no lineal de la relación señal-ruido. El ruido de fase no lineal (NPN, *Non-Linear Noise*), también conocido como ruido de Gordon-Mollenauer, resulta de la conversión de las fluctuaciones de amplitud en fluctuaciones de fase [49]. La influencia de NPN, es especialmente pronunciada en: los sistemas de transmisión de larga distancia [50], y los sistemas con OSNR deficiente [35]. Los efectos más importantes que se originan de la interacción señal a ruido, son la SPM inducida por NPN y la XPM inducida por NPN [51]. La SPM y la XPM tienen como resultado una penalización durante la recepción de la señal DPSK y DQPSK, tal penalización depende de la potencia de la señal y la distancia de propagación, así como el nivel de ruido en la señal [44][52].

Las fibras de bajo CD, aumentan el efecto de NPN y de otras no linealidades. El efecto es más pronunciado para las señales en los sistemas de baja velocidad de símbolo, donde se requiere largo tiempo de coherencia. Por otra parte, los canales modulados con DPSK, muestran una mayor sensibilidad a la NPN que los formatos PSK [53][54]. Se ha informado que el ruido de fase anula la ventaja de 3 dB de sensibilidad del receptor diferencial [52]. En el caso de los formatos de modulación multinivel, la penalización debida a la NPN se espera que sea mayor que con DPSK, debido a la menor distancia entre los puntos en el diagrama de la constelación.

Después de realizar una recopilación de los principales parámetros que afectan la calidad de señales ópticas moduladas en fase, en el anexo 1 se realiza una introducción sobre técnicas de monitoreo del desempeño del canal óptico basado en OPM (*Optical Performance Monitoring*), haciendo especial énfasis en señales moduladas en fase.

1.5 MODELO SIMPLIFICADO DE RED

Se procede a diseñar un modelo simplificado de red, donde se reflejen las propiedades principales del formato de modulación CSRZ-DQPSK, para posteriormente diseñar e implementar a nivel de simulación el escenario que permita: evaluar el desempeño del formato de modulación CSRZ-DQPSK en redes WDM y determinar las características técnicas que requiere la red para cumplir con estándares mínimos de desempeño, empleando diferentes velocidades de transmisión.

Para la construcción del modelo simplificado de red, se parte del trabajo previo realizado en la referencia [11], en el cual se realizó un estudio de diferentes formatos de modulación empleando una velocidad de transmisión de 2.5 Gbps y se estableció un modelo basado en las características de redes de varios operadores nacionales de telecomunicaciones. Dicho modelo consiste en una topología en anillo de 3 nodos, con distancia igual entre los nodos. El análisis de simulación se hace sobre uno de los tramos entre dos nodos, ya que los efectos presentes entre cualquier par de nodos son iguales para los otros enlaces del anillo. El esquema modular de red WDM, se especifica en la sección 1.1 (Figura 1.1).

La caracterización del modelo simplificado se fundamenta en:

1. Emplear la fibra óptica SSMF-28, ya que es el tipo de fibra óptica con mayor implementación en redes WDM comerciales [55], ligadas a las características mostradas en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4 Parámetros de la Fibra Corning SSMF-28 [55].

ATRIBUTO	DETALLE	VALOR
Diámetro de campo modal	Rango de valores nominales	8.6 - 9.5 μm
	Tolerancia	$\pm 0.06 \mu\text{m}$
Diámetro de revestimiento	Nominal	125 μm
	Tolerancia	$\pm 1 \mu\text{m}$
Atenuación	1310 nm	$\leq 0.35 \text{ dB/km}$
	1550 nm	$\leq 0.25 \text{ dB/km}$
PMD	Valor de diseño para enlace	0.06 ps/km ^{1/2}
	Máximo de Fibra Individual	0.2 ps/km ^{1/2}
Coefficiente de Dispersión Cromática	1310 nm y 1550 nm	17 ps/nm.km

2. Trabajar canales en la banda C (1530-1560 nm), alrededor de los 1550 nm, banda de operación en la que la fibra G.652 presenta atenuación mínima.
3. Considerar un rango potencias de transmisión entre -10 dBm y 16 dBm, y una sensibilidad del receptor de -30 dBm, conforme al rango de potencias proporcionado por fabricantes de equipos para la modulación CSRZ-DQPSK [56], [57], [58].
4. Tener en cuenta que en el contexto nacional, las distancias típicas de los nodos oscilan entre los 80 Km y los 120 Km [11].
5. Utilizar amplificadores, ya que es necesario compensar las pérdidas por atenuación que introduce la fibra SSMF-28; sin embargo, el número de span y el número de

amplificadores, pueden generar cambios en el desempeño de la red, por lo cual estos parámetros deben variarse de acuerdo a las necesidades del caso de estudio. Por otra parte, los amplificadores EDFA son los más utilizados comercialmente, a pesar de añadir ruido a la señal, razón por la cual se utilizará este tipo de amplificadores en el modelo de red.

6. Considerar que los EDFAs implementados para el desarrollo de este trabajo de grado, se basan en las características de los amplificadores Corning Pure Gain 1500 Compact de ganancia constante, utilizados en redes WDM comerciales [59], Tabla 1.5.

Tabla 1.5 Amplificador Corning pure gain 1500 compact de ganancia constante.

Tipo de amplificador	Ganancia	Potencia máxima	Figura de Ruido
Corning Pure Gain 1500	23 dB	21 dB	5.2 dB

7. Tener en cuenta que los efectos de la dispersión cromática son una limitante significativa en los sistemas WDM, en particular para velocidades superiores a 10 Gbps. La solución a la dispersión cromática consiste en la compensación de la misma. En este estudio se utiliza para tal propósito la Fibra Compensadora de Dispersión (DCF, *Dispersion Compensating Fiber*), la cual tiene una dispersión elevada y de signo contrario a la que ha introducido la fibra óptica principal, en este caso la SSMF-28; su longitud debe ser tal que en un corto intervalo de tiempo compense la dispersión acumulada hasta ese punto; con ello, de tramo en tramo, se espera que la dispersión residual total al final del enlace sea prácticamente nula. La DCF muestra efectos no lineales despreciables, sin embargo, presenta altas pérdidas por atenuación (0.4 - 0.6 dB) [38].
8. Utilizar tecnología WDM unidireccional. El número de canales se variará en los multi-canalizadores más empleados comúnmente (4, 8, 16, 32 y 64 canales) [60], además se variará la velocidad de transmisión en: 10, 40 y 100 Gbps.
9. Teniendo en cuenta que es importante forzar el incremento de canales, ya que es uno de los principales objetivos de los operadores y una de las condiciones que más afectan el desempeño, se procederá a variar el espaciamiento entre canales en valores tales como: 200 GHz (1.6nm), 100GHz (0.8nm), 50GHz (0.4nm) y 25GHz (0.2nm). El espaciamiento de 100GHz soporta un máximo de 32 canales para transmisión o recepción [4], pero el número de canales aumenta al disminuir el espaciamiento entre canales.
10. Para la definición de los canales del modelo simplificado de red, fundamentado en el estándar ITU-T G.694.1, se utiliza el plan de frecuencias definido en el anexo 2.
11. En el lado transmisor se utilizará un láser CW (Continuous Wave) con FWHM= 2 MHz, moduladores ópticos externos Mach-Zehnder y filtros Bessel pasa-bajos de orden 5. En el receptor se empleará interferómetros MZDI, un filtro óptico Gaussiano y filtros eléctricos Bessel.
12. Después de realizar la especificación de las características de la transmisión, el modelo simplificado de red se puede resumir en Tabla 1.6.

Tabla 1.6 Características del Modelo Simplificado de Red.

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
PARÁMETRO	VALORES
Velocidad del Sistema	10, 40 y 100 Gbps
Tecnología de Red	DWDM unidireccional
Banda	Banda C (1530-1560 nm)
Ventana	alrededor de 1550 nm
Estándar Utilizado	G.652.B
Tipo de fibra	SSMF-28
Espaciamiento de los canales WDM	Variable (200 (1.6nm), 100 GHz (0.8nm) y 50 GHz (0.4nm))
Número de canales implementados	Variable (4,8,16, 32 y 64canales)
Atenuación para 1550nm	0.25 dB/Km
Coefficiente de Dispersión 1550nm	17 ps/ nm.km
CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR	
Formato de modulación	CSRZ-DQPSK
Tipo de Modulación	Externa con Mach-Zehnder
Potencia de Tx del Láser	De -10 dBm a 16 dBm
Filtros eléctricos en el Tx	Filtros Bessel de orden 5
Frecuencias Centrales Nominales	Seleccionadas según el anexo 2
CARACTERÍSTICAS DE AMPLIFICACIÓN	
Dispositivo de Amplificación	EDFA
Ganancia	23 dB
Figura de Ruido	5 dB
CARACTERÍSTICAS DEL RECEPTOR	
Sensibilidad del Rx	-30 dBm
BER	10^{-30}
Filtro de Recepción óptico	Filtro Gaussiano
Filtros eléctricos en el Rx	Filtros Bessel de orden 5

En la Figura 1.11, se ilustra el modelo simplificado de red WDM que se utilizara para evaluar el desempeño del formato CSRZ-DQPSK a 10, 40 y 100 Gbps. En dicha figura, cada transmisor CSRZ-DQPSK está a una longitud de onda diferente; de la misma manera cada receptor está centrado en la longitud de onda correspondiente a su transmisor. Para configurar en el modelo simplificado de red una velocidad de transmisión de 10 Gbps, se debe ajustar en el transmisor la frecuencia de reloj del modulador CSRZ a 2.5 GHz, y las dos salidas de la fuente de datos deben estar a 5 Gbps cada una, por otra parte en el receptor se debe ajustar cada MZDI con un retardo de 200 ps. En la Tabla 1.7

se registra los valores de configuración necesarios para cada una de las velocidades de transmisión empleadas en el trabajo.

Figura 1.11 Modelo Simplificado de Red

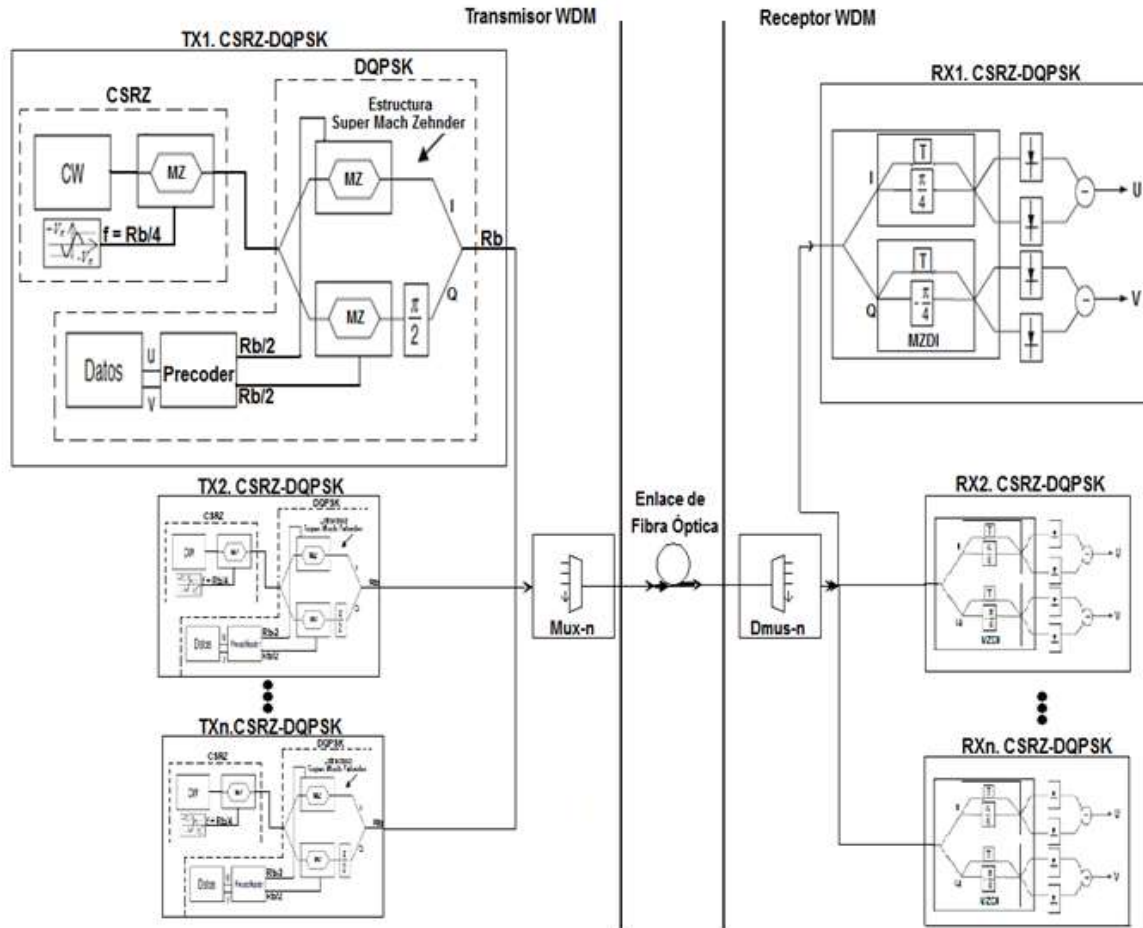


Tabla 1.7. Parámetros de configuración en el modelo simplificado de red, necesarios para obtener diferentes velocidades de transmisión.

Velocidad de Transmisión [Gbps]	Transmisor		Receptor
	Frecuencia de Reloj Modulador CSRZ [GHz]	Fuente de datos [Gbps]	Tiempo de retardo en el MZDI [ps]
10	2.5	5	200
40	10	20	50
100	25	50	20

Después de realizar un análisis detallado de la información acerca del formato de modulación CSRZ-DQPSK y de las redes WDM, se definió un modelo simplificado de red, determinando sus principales características y rangos de operación fundamentales presentados en la Tabla 1.6. Dicho modelo, posteriormente servirá para generar las posibles configuraciones de simulación en donde se evaluará el desempeño a nivel físico del formato de modulación, en relación con los efectos lineales y no lineales, y otras degradaciones presentes en las comunicaciones sobre fibra óptica.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y ESCENARIO DE SIMULACIÓN

En este capítulo se define la metodología de simulación que permitirá evaluar el desempeño del formato de modulación CSRZ-DQPSK. La herramienta OptSim® de Rsoft será utilizada para el desarrollo de las simulaciones, las cuales implementaran las características definidas por el modelo simplificado de red, resumidas en la Tabla 1.6.

2.1 METODOLOGIA DE SIMULACION

Se define simulación como una técnica que imita el comportamiento de un sistema del mundo real conforme evoluciona el tiempo. Por lo tanto se podrá analizar y observar características, sin necesidad de acudir al sistema real [61], [62]. Para la metodología de simulación se hace referencia a dos conceptos importantes, el modelo de simulación y el proceso de simulación, los cuales se explican a continuación.

2.1.1 Modelo de Simulación

El modelo de simulación se refiere al conjunto de hipótesis acerca del funcionamiento del sistema. El modelo hace alusión a la representación del sistema real que se va a analizar, las condiciones de funcionamiento y las variables que emplea. Dentro del modelo de simulación se definen tres fases, que son requeridas para generar un buen entorno de simulación, las cuales son pertinentes para este proyecto:

A) Formulación del problema

Ante el interrogante: ¿Cuál es el desempeño⁷ del formato de modulación CSRZ-DQPSK en redes WDM de alta capacidad con velocidades mayores o iguales a 10 Gbps y cuáles son las características técnicas⁸ mínimas de una red WDM que implementa este formato?, se plantea como objetivo general del proyecto, “evaluar el desempeño del formato de modulación CSRZ-DQPSK en redes WDM a 10, 40 y 100 Gbps”.

Para lograr dicho objetivo se plantea un modelo simplificado de red en un escenario de simulación y tres configuraciones: 10, 40 y 100 Gbps, que permitan observar el comportamiento del sistema, variando parámetros tales como la potencia, el número de canales y el espaciamiento entre ellos, para lo cual fue necesaria una investigación previa, realizada de la siguiente manera:

- En la sección 1.2 se determinan las principales degradaciones que afectan la calidad de la señal óptica en una red WDM. Para el desarrollo de este trabajo de grado se seleccionan para medir aquellas degradaciones de mayor frecuencia de ocurrencia en redes WDM (Tabla 1.2) y además, aquellas que mayormente afectan la transmisión de señales ópticas moduladas en fase (sección 1.4.1). Los efectos lineales a medir son: el ruido, la atenuación, la CD y la PMD, así mismo, los efectos no lineales a medir son: SPM, XPM y FWM.

7 El desempeño se evalúa tomando en cuenta medidas de rendimiento: el factor Q, la BER, la OSNR, la potencia del canal óptico, diagrama del ojo, respecto a los efectos lineales y no lineales.

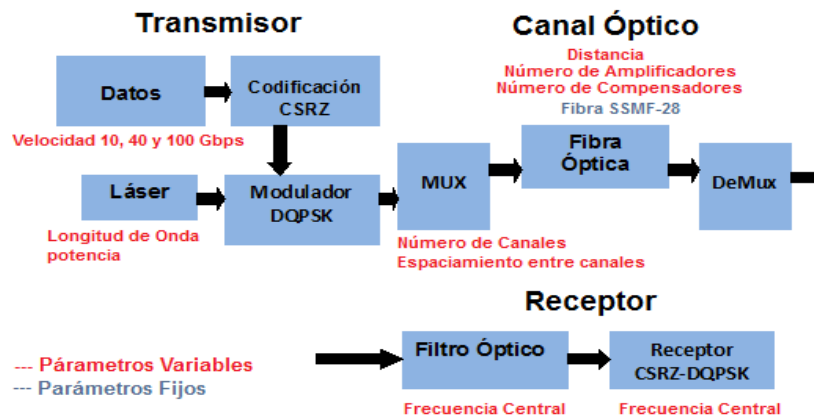
8 Número de canales, longitud de onda de trabajo, espaciamiento entre canales, entre otros.

- Se determinan los parámetros de monitoreo óptico (sección 1.2), que serán utilizados como medida para determinar el desempeño del formato de modulación, seleccionando: BER, Factor Q, ONSR, diagrama del ojo y potencia del canal.
- Se investiga sobre el funcionamiento y la implementación del formato de modulación CSRZ-DQPSK (sección 1.3).
- Se analizan las técnicas de monitoreo del desempeño de señales ópticas moduladas en fase, basadas en OPM (anexo 1).
- Se seleccionan los equipos a emplear, el tipo de fibra y características técnicas tales como el rango de la potencia de transmisión, sensibilidad del receptor, el número de canales y el espaciamiento entre los mismos, mediante el análisis del estado del arte dentro del contexto comercial nacional e internacional de las comunicaciones ópticas en redes WDM (sección 1.5).

B) Generación del escenario de simulación

Con base en el modelo simplificado de red (Tabla 1.6, Figura 1.11) y teniendo en cuenta que se deben generar condiciones en la red para medir los efectos lineales y no lineales seleccionados en la formulación del problema, se determina el escenario general de simulación por medio del cual se analizará el comportamiento de la señal CSRZ-DQPSK en una red WDM.

Figura 2.1 Esquema del escenario general de simulación.



En la Figura 2.1 se representa el esquema del escenario general de simulación, en dicho escenario se realizarán tres diferentes configuraciones variando la velocidad de transmisión y en cada configuración se determinan como parámetros fijos y variables los siguientes:

Parámetros Variables:

- **En el transmisor:** la potencia por canal, el número de canales y el espaciamiento entre los mismos.

- **En el canal:** debe variarse el nivel de compensación de dispersión cromática, la longitud del span y el número de amplificadores EDFA a utilizar.
- **En el receptor:** debe estar acorde a la configuración del transmisor.

Parámetros Fijos:

- **En el transmisor y receptor:** el formato de modulación CSRZ-DQPSK.
- **En el canal:** el tipo de fibra: SSMF-28

Según lo expuesto anteriormente, el escenario general de simulación debe implementar las características definidas en el modelo simplificado de red. Como la velocidad de transmisión es variable (tres variaciones), se requieren tres configuraciones diferentes del escenario general de simulación. En cada configuración se definen varios casos de estudio, debido a que el número de canales en la red es variable. Cada caso de estudio corresponde a un número fijo de canales y la variación se realiza modificando el espaciamiento entre canales adyacentes. Las configuraciones a realizar son las siguientes:

Configuración 1.

- Tasa de Transmisión: 10Gbps
- Número Casos de estudio: variable, dependiendo de la capacidad máxima de la red (mayor número de canales con menor espaciamiento entre ellos).

Configuración 2.

- Tasa de Transmisión: 40Gbps
- Número Casos de estudio: variable, dependiendo de la capacidad máxima de la red (mayor número de canales con menor espaciamiento entre ellos).

Configuración 3.

- Tasa de Transmisión: 100Gbps
- Número Casos de estudio: variable, dependiendo de la capacidad máxima de la red (mayor número de canales con menor espaciamiento entre ellos).

C) Plan de evaluación y pruebas

Para analizar el formato de modulación desde la perspectiva de las diferentes velocidades de transmisión, se tendrá en cuenta:

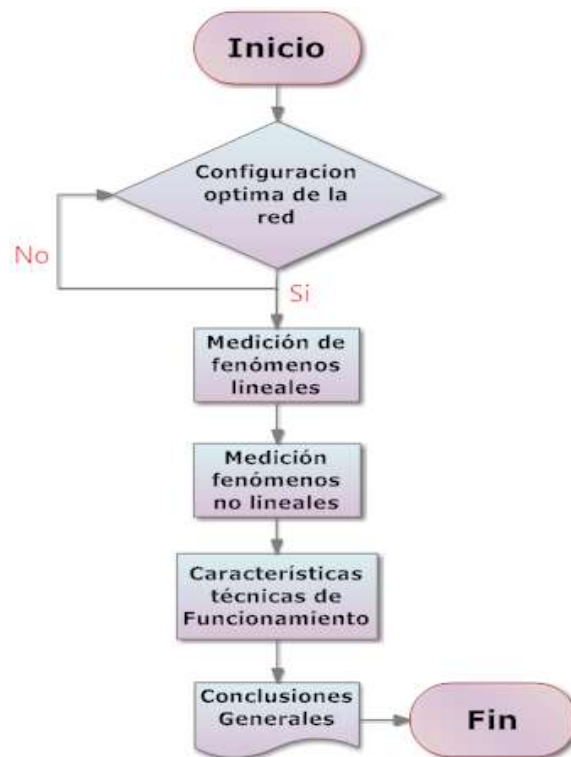
- a) La capacidad máxima de la red (mayor número de canales con menor espaciamiento entre ellos), con segmentos de red de por lo menos 80 Km.
- b) El desempeño que presenta el formato de modulación frente a la máxima distancia alcanzable por un solo segmento de red y mediante enlaces concatenados.
- c) Su comportamiento frente a las diferentes degradaciones ópticas: ruido y pérdidas por atenuación, CD, PMD, SPM, XPM y FWM.
- d) Las mediciones se realizan tomando como base a los parámetros mínimos implementados por algunos operadores nacionales del orden de $1e-30$ para la tasa de error (BER) y 20 dB para el Factor Q [11].

2.1.2 Proceso de simulación

El proceso de simulación hace referencia a una ejecución concreta, con unos valores asociados a las variables que se pueden ajustar en el modelo, y que se realiza para obtener los resultados referidos a ciertos parámetros que especifican el comportamiento del sistema [62], [63]. Para el proceso de simulación se siguen una serie de procedimientos determinados: enunciar los objetivos que se plantean, creación del modelo de red, Implementación del modelo de red, validación del modelo de red, utilización del modelo para alcanzar los objetivos planteados y reunir, procesar y analizar los resultados obtenidos.

Mediante el diagrama de flujo de la Figura 2.2 se explica el proceso de simulación a seguir, por medio del cual se evalúa el desempeño del formato de modulación CSRZ-DQPSK.

Figura 2.2 Diagrama de flujo del proceso de simulación



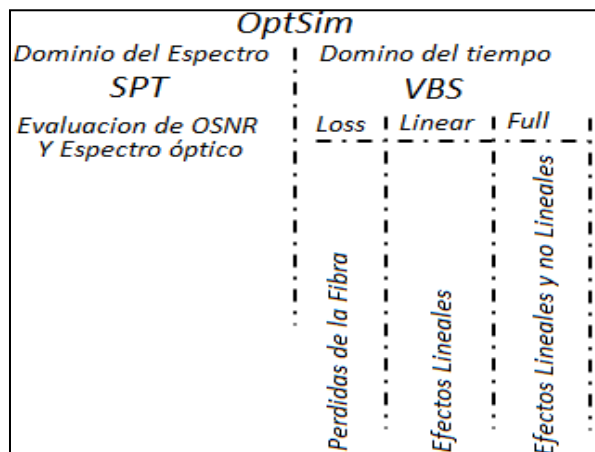
El procedimiento se realiza de la misma manera para cada una de las configuraciones:

1. Se encuentra la configuración óptima de red: mayor número de canales con menor espaciamiento entre ellos, midiendo longitudes por span de al menos 80 Km y garantizando una BER de $1e-30$.
2. En la configuración óptima de red, se evalúan los fenómenos lineales.
3. En la configuración óptima de red, se evalúan los fenómenos no lineales.
4. Se determinan las características técnicas que garanticen una BER de $1e-30$ y factor Q de 20 dB.

Estrategias de simulación

Para el caso específico de la herramienta de simulación OptSim de RSoft, en su documento “User Guide” se definen dos modos de simulación los cuales pueden ser utilizados dependiendo del tipo de resultados que se deseen obtener: simulaciones en modo muestra y simulaciones en modo bloque. 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 la fidelidad de forma 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 [30]. En la figura 2.3 se puede observar las dos técnicas de simulación con las cuales cuenta la herramienta de simulación OptSim.

Figura 2.3 Técnicas de simulación de la Herramienta OptSim [30].



- **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.

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

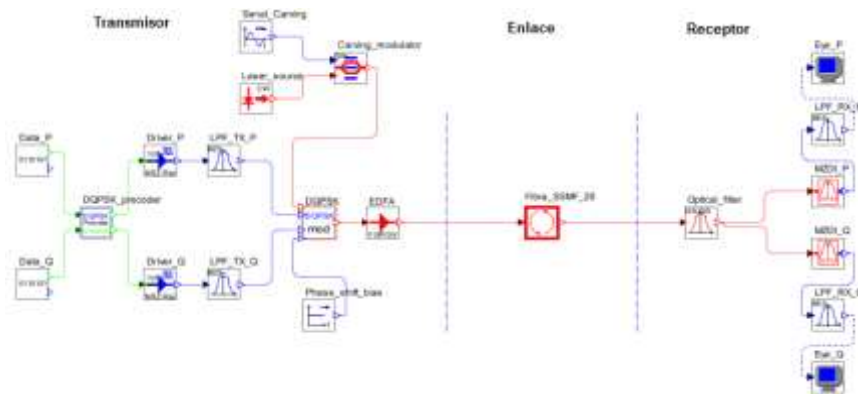
Es una simulación en el dominio del espectro, donde las señales ópticas son propagadas como espectros de potencia, cada componente es caracterizada por una función de transferencia que no toma en cuenta las no linealidades de la fibra. Sin embargo, esta técnica es utilizada por VBS para estimar los puntos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

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 la metodología de simulación.

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL FORMATO DE MODULACIÓN CSRZ-DQPSK A 10, 40 Y 100 Gbps

Después de estudiar en el capítulo 1 el fundamento teórico del formato de modulación CSRZ-DQPSK, en este capítulo se presentan los resultados obtenidos después de implementar el escenario general de simulación descrito en la sección 2.1.1, con el fin de evaluar en dicho escenario: el factor Q, la BER, la OSNR, la potencia del canal óptico, el diagrama del ojo, los efectos lineales y no lineales, presentes en las redes WDM a 10, 40 y 100 Gbps, que implementan el formato CSRZ-DQPSK. En la Figura 3.1 se observa la grafica del escenario implementado en la herramienta de simulación, para el formato de modulación estudiado.

Figura 3.1 Escenario implementado en la herramienta de simulación para el formato de modulación CSRZ-DQPSK



Una de las particularidades de la implementación de este formato de modulación es su complejidad y gran cantidad de elementos utilizados tanto en el transmisor como en el receptor, para generar la modulación y demodulación de la señal CSRZ-DQPSK (Figura 3.1). El transmisor requiere: un pulso carver localizado entre el láser y un modulador DQPSK, una fuente y un precodificador de datos. En el receptor los datos primero son filtrados y luego la señal resultante se divide en dos y se introduce en un par de moduladores DPSK, con el fin de realizar la detección de los componentes en fase y cuadratura de la señal DQPSK.

Como se menciona en la sección 1.3.1, en DPSK la información está codificada en la diferencia de fase entre bits consecutivos en lugar de en la fase absoluta de la señal. Por esta razón en el receptor, para convertir la diferencia de fase en modulación de intensidad⁹, comúnmente se utiliza el dispositivo MZDI, el cual consta de dos brazos, los cuales están uno retrasado con respecto del otro en un periodo exacto de bit, de esta manera se logra que la fase de un bit en el flujo de datos pueda ser comparada con la fase del siguiente bit. Los dos puertos de salida del MZDI representan la interferencia constructiva y destructiva entre las fases de bits adyacentes.

En una configuración back-to-back se obtiene la mayor eficiencia (mayor apertura del ojo) del MZDI, porque los dos bits adyacentes se comparan exactamente por un periodo de bit.

⁹ La modulación de intensidad puede ser detectada por fotodiodos estándar.

Sin embargo, degradaciones en el MZDI, tales como desajustes en el retraso de bit y frecuencia offset, y degradaciones en la transmisión óptica tales como la CD, PMD, los fenómenos no lineales y la combinación de todas las degradaciones mencionadas, pueden distorsionar la fase de la señal DPSK y reducir la sensibilidad del receptor.

Como se puede observar, la configuración de formatos en fase es mucho más compleja en el receptor que en el transmisor [21], [26]. Por tal razón y para determinar las condiciones iniciales de trabajo, a continuación se realiza el estudio en configuración back-to-back, del formato de modulación CSRZ-DQPSK y posteriormente se estudia la influencia que tiene en el desempeño del formato un desajuste en el receptor DQPSK. Para ambos estudios se utiliza una librería proporcionada por OptSim (Karhunen-Loeve BER estimator), la cual permite simular la imperfección del desajuste en el receptor, con un parámetro de simulación (Mach Zehnder Delay mismatch), que corresponde a un porcentaje del periodo de bit.

3.1 CONDICIONES INICIALES: CONFIGURACIÓN BACK-TO-BACK

De la configuración back-to-back (Figura 3.2) del formato de modulación CSRZ- DQPSK, se obtienen las condiciones iniciales de funcionamiento del formato, con respecto al diagrama del ojo, el espectro óptico alrededor de los 194nm y la curva de BER vs OSNR (Figuras 3.3). Dichas graficas corresponden a las medidas en un enlace óptico ideal en el que no se consideran las imperfecciones del canal, por tal razón serán consideradas durante el transcurso del trabajo, como el patrón de referencia empleado para comparar el efecto negativo originado por una determinada degradación. En la Tabla 3.1 se registran los valores iniciales de los parámetros de monitoreo óptico BER y factor Q, medidas en una configuración transmisor-receptor (sin enlace de fibra).

Figura 3.2. Configuración Back to Back para el formato de modulación CSRZ-DQPSK

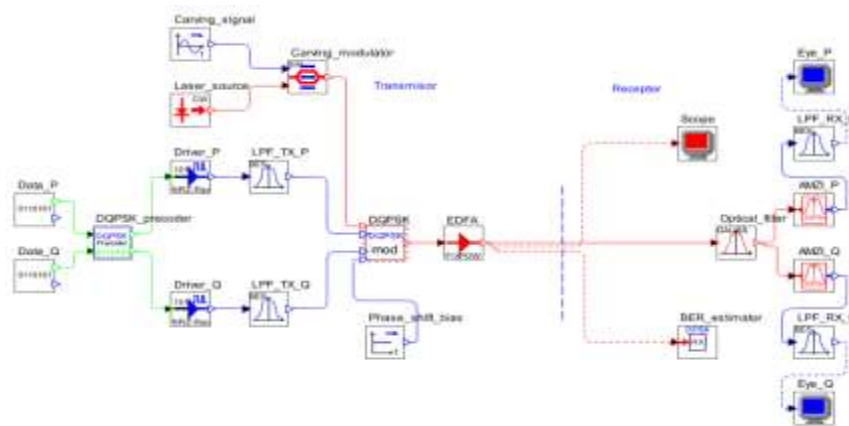


Tabla 3.1 Condiciones Iniciales de funcionamiento del formato CSRZ-DQPSK

Velocidad de Transmisión [Gbps]	Factor Q	BER
10	40	1e-40
40	31,84	1e-40
100	24,56	1e-40

Figura 3.3 Condiciones Iniciales. Configuración Back to Back para el formato de modulación CSRZ-DQPSK

Figura 3.3 (a) Espectro óptico de CSRZ-DQPSK a 10 Gbps.

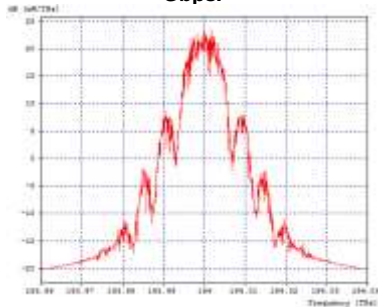


Figura 3.3 (b) Espectro óptico de CSRZ-DQPSK a 100 Gbps.

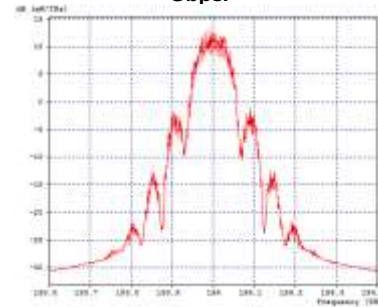


Figura 3.3 (c) Diagrama del ojo para un receptor Back to Back a 10 Gbps.

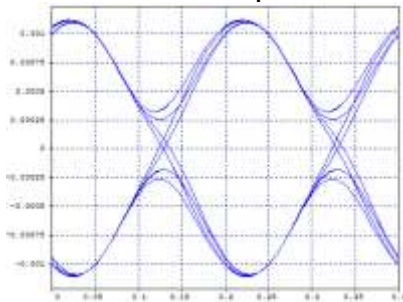


Figura 3.3 (d) Diagrama del ojo para un receptor Back to Back a 100 Gbps.

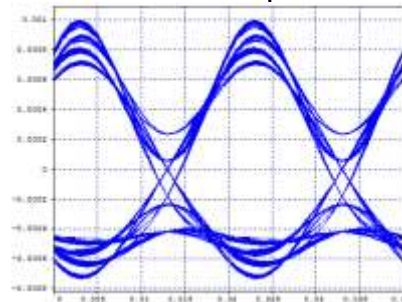


Figura 3.3 (e) BER vs OSNR para 10 Gbps.

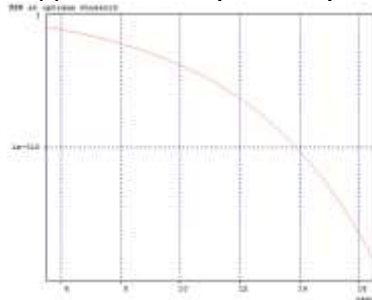
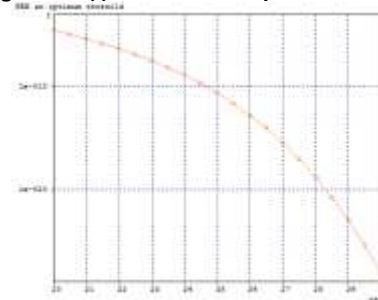


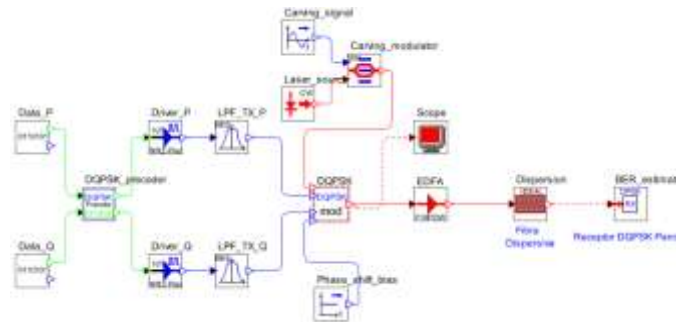
Figura 3.3 (f) BER vs OSNR para 100 Gbps.



3.1.1 Desajuste en el receptor a altas velocidades con canales dispersivos [64].

Siguiendo con la determinación de las características iniciales de funcionamiento del formato CSRZ-DQPSK, ahora se procede a estudiar la influencia que tiene en el desempeño del formato un desajuste en el receptor DQPSK. Como se explicó en la sección 1.3.1, un receptor DQPSK está conformado por dos receptores DPSK. El receptor DPSK convencional tiene un retraso exacto de un bit, entre los dos brazos que conforman el MZDI. Cualquier desajuste en el retraso entre los dos brazos del MZDI, corresponde a un cambio en su función de transferencia. Estos desajustes pueden deberse a degradaciones en la transmisión óptica tales como la Interferencia Intersimbólica (ISI), causada principalmente por la CD y la PMD. La Figura 3.4 ilustra el montaje de simulación empleado para estudiar la influencia que tiene el desajuste en el MZDI, cuando se utiliza un canal dispersivo y el formato de modulación CSRZ-DQPSK a altas velocidades.

Figura 3.4 Esquema de simulación para el formato de modulación CSRZ DQPSK, utilizando un receptor DQPSK Parcial.



A continuación se representan las curvas de BER vs Desajuste (Figuras 3.5), variando el parámetro desajuste en el retraso de un MZDI desde -30% a 30% en pasos de 5% (porcentaje de un periodo de bit). La dispersión se varia para 10 Gbps en: 0 ps/nm y 1360 ps/nm (corresponde a una distancia de 80 Km, empleando una fibra con constante de CD= 17 ps/nm/km, sin considera la PMD) y para 100 Gbps en: 0 ps/nm y 40 ps/nm (corresponde a una distancia de 2.4 Km, empleando una fibra con constante de CD= 17 ps/nm/km).

Figura 3.5 Graficas de BER vs Desajuste, variando la dispersión de la fibra.

Figura 3.5 (a) BER vs Desajuste del MZDI para una dispersión de 0 ps/nm. Transmisión a 10 Gbps

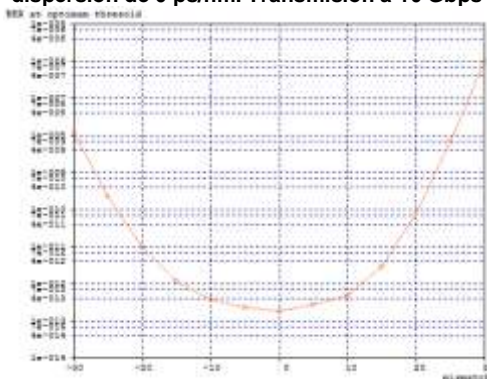


Figura 3.5 (b) BER vs Desajuste del MZDI para una dispersión de 1360 ps/nm. Transmisión a 10 Gbps

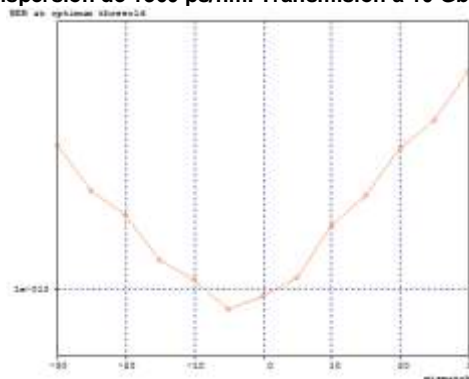


Figura 3.5 (c) BER vs Desajuste del MZDI para una dispersión de 0 ps/nm. Transmisión a 100 Gbps

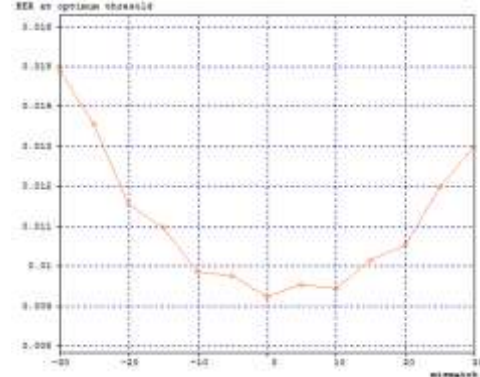
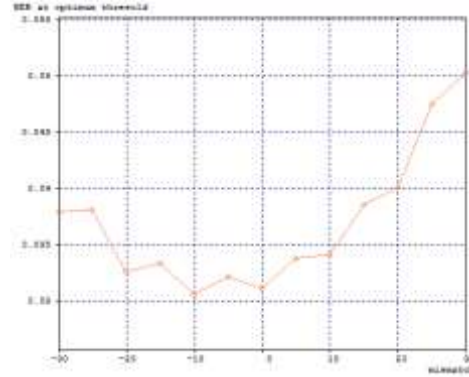
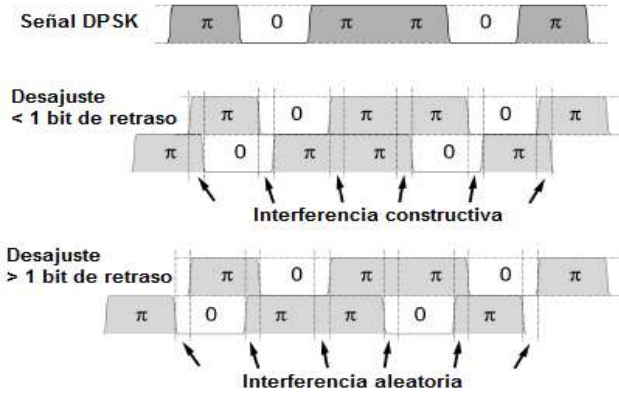


Figura 3.5 (d) BER vs Desajuste del MZDI para una dispersión de 40 ps/nm. Transmisión a 100 Gbps



Cuando hay presencia de dispersión, un retardo menor a un bit proporciona mejor rendimiento (mejor BER) que un retardo mayor a un bit (Figuras 3.5 (b) y (d)). Además, es interesante darse cuenta de que el óptimo desempeño en presencia de dispersión, no corresponde a un cero en el desajuste del retraso del MZDI (un retraso exacto de un periodo de bit), esto es debido a que cuando el retraso es menor a un periodo de bit (retraso parcial), parte del bit interfiere consigo mismo, ocasionando interferencia constructiva y cuando el retraso es mayor a un bit la interferencia es aleatoria (Figura 3.6).

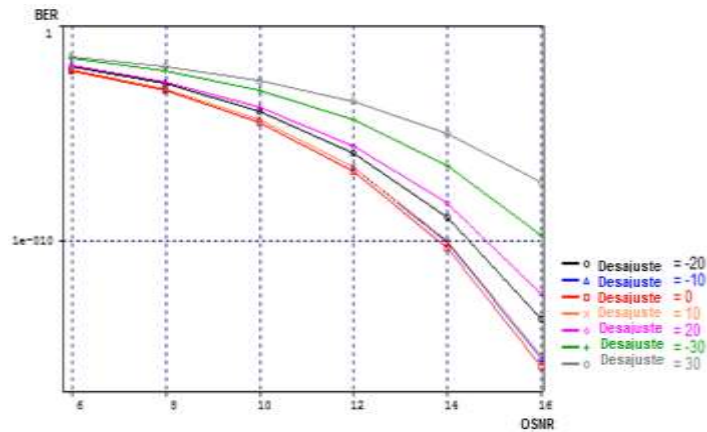
Figura 3.6 Concepto del Desajuste en el retraso de un MZDI [64].



Para determinar cuantitativamente la influencia que tiene el desajuste en el retraso del MZDI, en un sistema de transmisión que emplea un formato de modulación diferencial en fase como es el caso del CSRZ-DQPSK, se procede a determinar cuál es la penalización en potencia, cuando se emplea un canal dispersivo que trabaja a altas velocidades de transmisión. Para este propósito se procede a variar la dispersión en el canal en: 0 ps/nm, 240 ps/nm, 480 ps/nm, 960 ps/nm y 1360 ps/nm.

La familia de curvas que se representan en la Figura 3.7, se obtiene al variar la OSNR en el sistema de la Figura 3.4, empleando una velocidad de 10 Gbps en el transmisor CSRZ-DQPSK, un receptor parcial DQPSK (Karhunen-Loeve BER estimator), una CD acumulada igual a 0 ps/nm y se varía el desajuste en el receptor desde -30% a 30% en pasos de 10%.

Figura 3.7 BER vs OSNR como función del desajuste en el retraso de un MZDI para una CD = 0 ps/nm.



Posteriormente se gráfica la familia de curvas para cada una de las variaciones de dispersión y tomando como referencia una BER= $1e-3$, se procede a medir el valor de OSNR, para cada uno de los desajustes del receptor. Los valores obtenidos se consignan en la Tabla 3.2, donde se puede observar en cada columna que a pesar de los datos estar medidos para un mismo valor de dispersión, con la misma BER ($1e-3$), los valores de OSNR cambian levemente debido al desajuste presente en el receptor DPSK.

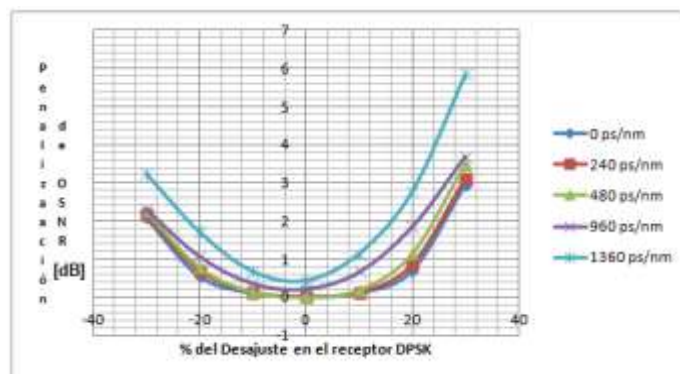
La diferencia entre la OSNR medida en cada caso y el valor de OSNR con desajuste=0% y dispersión=0 ps/nm (8,0083), da como resultado la penalización en la OSNR (para una BER= $1e-3$) debida al desajuste en el receptor y la presencia de dispersión en el canal óptico.

Tabla 3.2 Valores de OSNR, para una BER= $1e-3$, con variaciones en el desajuste del receptor y en la dispersión acumulada.

Desajuste %	OSNR, 0 ps/nm	OSNR, 240 ps/nm	OSNR, 480 ps/nm	OSNR, 960 ps/nm	OSNR, 1360 ps/nm
-30	10,0854	10,1707	10,2684	10,3145	11,254
-20	8,5459	8,6987	8,7964	9,0898	9,7217
-10	8,1060	8,1249	8,1477	8,3795	8,6758
0	8,0083	8,0251	8,023	8,2326	8,4326
10	8,1060	8,1249	8,1976	8,6734	9,1380
20	8,6925	8,8484	9,1456	9,8491	10,7676
30	10,9406	11,1188	11,4909	11,6861	13,8565

En la Figura 3.8 se grafica la penalización en la OSNR en función del desajuste en el receptor, para cada una de las variaciones en la dispersión, de la cual se puede determinar que cuando hay presencia de dispersión (cromática y/o PMD), un receptor parcial DPSK (con un retardo menor a un periodo de bit), tiene mejores características de desempeño (menos penalización en la OSNR, y mejor BER), que un receptor DPSK clásico (con desajuste= 0 =retraso exacto de un bit).

Figura 3.8 Penalización en la OSNR para diferentes valores de dispersión en función del Desajuste en el receptor DPSK



Una vez determinadas las condiciones iniciales de trabajo (y evidenciadas las deficiencias inherentes a los receptores diferenciales como es el caso del receptor DQPSK), se procede a realizar la evaluación del desempeño del formato de modulación CSRZ-DQPSK, midiendo para cada configuración (a 10, 40 y 100 Gbps): la capacidad máxima de la red, la distancia máxima alcanzable por un segmento de red variando la potencia de transmisión, la distancia máxima que alcanza el formato con enlaces concatenados, el

efecto de ruido de fase del láser, el ruido y las pérdidas por atenuación, CD, PMD, SPM, XPM y FWM. Las mediciones se realizan según la metodología de simulación establecida en el capítulo 2.

3.2 FORMATO DE MODULACIÓN CSRZ-DQPSK EMPLEANDO UNA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE 10 Gbps

3.2.1 Distancia máxima alcanzable por un segmento de red

La distancia máxima se mide con base en los parámetros mínimos establecidos en el modelo simplificado de red (Sección 1.5), del orden de $1e-30$ para la BER, 20dB para el Factor Q y -30 dBm para la sensibilidad del receptor. Para realizar esta medida se debe contar con todas las degradaciones típicas de las redes ópticas (fenómenos lineales y no lineales entre otros), posteriormente se analizarán de manera independiente.

Los parámetros variables utilizados para realizar la medición son: el número de canales y el espaciamiento entre ellos. Inicialmente se trabaja con un número de canales pequeño (cuatro canales) y se analiza el comportamiento de la red al disminuir progresivamente el espaciamiento entre dichos canales. Posteriormente se aumenta el número de canales y se realiza un análisis similar al realizado para cuatro canales. En cada caso de estudio se varía la potencia de transmisión y se mide la longitud del enlace de fibra SSMF 28.

Las variaciones se realizan con el fin de conseguir: la red de mayor capacidad posible (mayor número de canales con menor espaciamiento entre ellos, de tal manera que se cumpla con los parámetros de calidad objetivo), potencia de transmisión óptima y segmentos de red lo más largos posible, dado que potencias altas de transmisión y segmentos de red muy cortos (inferiores a 80 Km) no son económicamente viables.

▪ Caso de estudio uno: Red de cuatro canales

En la Tabla 3.3 se registran los parámetros de calidad y la distancia máxima por segmento de red medida al aumentar la potencia de transmisión, empleando una red de cuatro canales espaciados entre ellos 200 GHz. Los datos en rojo corresponden a mediciones que están por debajo de las condiciones establecidas: para una potencia de transmisión de -10 dBm la potencia en recepción está por debajo del umbral establecido, y para las potencias de transmisión de 5, 10 y 16 dBm, la longitud del segmento de red es inferior a los 80 Km.

Tabla 3.3 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de cuatro canales espaciados entre sí 200 GHz. OSNR In 56,78 dB.

Potencia Tx [dBm]	Potencia Rx [dBm]	OSNR Out [dB]	BER	Q [dB]	Distancia Máxima [Km]
-10	-30,59	56,73	6,88e-31	21,33	80
-5	-25,59	56,73	1,84e-30	21,31	80
0	-20,57	56,73	1,39e-30	21,30	80
5	-15,04	57,08	8,90e-31	21,34	78
10	-9,65	56,66	1,14e-30	21,39	76
16	0,29	56,07	6,43e-31	21,39	58

La distancia máxima de un segmento de red disminuye al aumentar la potencia de transmisión (Tabla 3.3), por tanto los parámetros de calidad BER y factor Q se degradan

al aumentar la potencia de transmisión. Tal hecho se puede evidenciar en las Figuras 3.9 (a) y (b), en las cuales se puede observar la degradación del patrón del diagrama del ojo al pasar de una potencia de transmisión de -10 dBm (Figura 3.9 (a)) a una potencia de 16 dBm (Figura 3.9 (b)), con una distancia de transmisión fija de 80 Km.

Figura 3.9 (a) Diagrama del ojo, enlace de 80Km con PTX=-10dBm. BER = 6,95e-31.

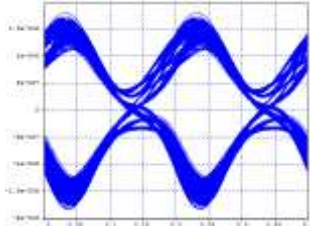
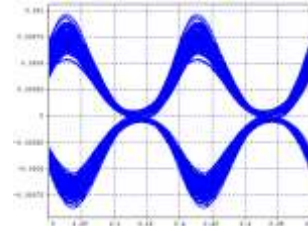
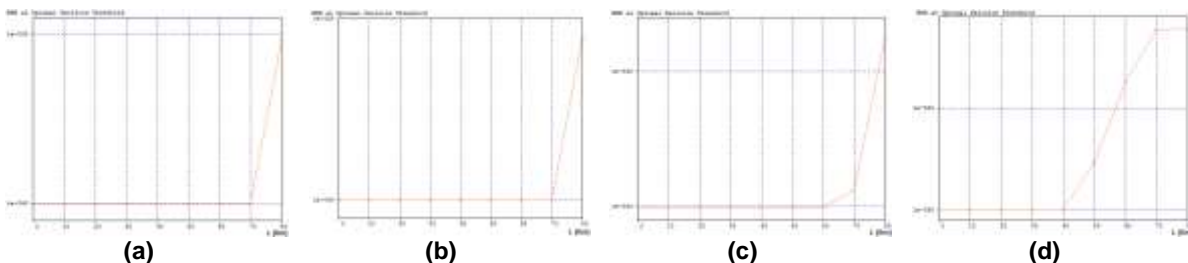


Figura 3.9 (b) Diagrama del ojo, enlace de 80Km con PTX=16dBm. BER = 8,57e-23.



Con el fin de observar el comportamiento de la BER cuando se aumenta la potencia de transmisión, en las Figuras 3.10 se ilustran las graficas de BER vs Distancia, en función de la potencia de transmisión: (a) -10 dBm (b) 0 dBm (c) 10 dBm y (d) 16 dBm. En ellas se observa que a pequeñas distancias de transmisión la BER se mantiene constante en un valor de $1e-40$, pero a partir de una distancia determinada la BER se degrada rápida y progresivamente con el aumento de la distancia.

Figura 3.10 BER vs Distancia empleando una Potencia de Transmisión de (a) -10 dBm, (b) 0 dBm, (c) 10 dBm y (d) 16 dBm. Red de cuatro canales espaciados entre sí 200 GHz.



La longitud hasta la cual la BER se mantiene estable es diferente para cada potencia de transmisión, siendo mayor para bajas potencias (70 Km para -10 y -5 dBm, 60 Km para 0 dBm) y menor para altas potencias (40 Km para 16 dBm). En las Tablas 3.4 y 3.5, se registra la máxima distancia medida al disminuir el espaciado entre los cuatro canales en 100 y 50 GHz, respectivamente, donde se observa un comportamiento parecido al espaciado de 200 GHz, ya que a bajas potencias de transmisión (-10, -5 y 0 dBm) se alcanza una distancia de 80 Km, y cuando se aumenta la potencia de transmisión se degradan los parámetros de calidad.

Exceptuando los fenómenos dispersivos (CD y PMD), se podría suponer que bastaría con inyectar suficiente potencia en una fibra óptica para compensar las pérdidas por atenuación, pero los datos registrados en las Tablas 3.3, 3.4 y 3.5, implican que a partir de una determinada potencia de entrada no se mejoran los parámetros de calidad y por el contrario se degradan. Tales resultados se producen porque ocurre un trasvase de potencia desde el modo guiado a campo difundido, presentándose la ocurrencia de los fenómenos no lineales, los cuales son despreciables a bajas potencias de transmisión.

Más adelante se estudian por separado los efectos de los fenómenos no lineales que más comúnmente afectan los sistemas WDM.

Tabla 3.4 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de cuatro canales espaciados entre sí 100 GHz.

Potencia Tx [dBm]	Potencia Rx [dBm]	BER	Distancia Máxima [Km]
-10	-30,59	7,75e-31	80
-5	-25,59	5,18e-31	80
0	-20,59	2,43e-30	80
5	-15,05	4,15e-31	78
10	-8,89	1,98e-30	73
16	14,74	4,27e-30	5

Tabla 3.5 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de cuatro canales espaciados entre sí 50 GHz.

Potencia Tx [dBm]	Potencia Rx [dBm]	BER	Distancia Máxima [Km]
-10	-30,59	4,13e-31	80
-5	-25,59	6,23e-31	80
0	-20,58	2,99e-30	80
5	-14,83	6,95e-31	77
10	-9,38	4,86e-30	75
16	15,94	9,82e-26	0,6

Se concluye que para el caso de estudio de una red de cuatro canales con una velocidad de transmisión de 10 Gbps (Tablas 3.3, 3.4 y 3.5):

- La mayor distancia medida a la cual se consiguen todos los parámetros de calidad mínimos establecidos es de 80 Km.
- El rango de potencia óptimo de transmisión es desde -5 a 0 dBm, ya que es el menor rango de potencia en el cual se consiguen todos los parámetros objetivos.
- A partir de una potencia de 5 dBm, los parámetros de calidad se degradan considerablemente, siendo esta degradación más fuerte cuando se disminuye el espaciamiento entre canales.

• **Caso de estudio dos: Red de ocho canales**

En las Tablas 3.6, 3.7 y 3.8, se registran los parámetros de calidad y la distancia máxima por segmento de red medida al aumentar la potencia de transmisión, empleando una red de ocho canales espaciados entre ellos : 200, 100 y 50 GHz, respectivamente.

Tabla 3.6 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de ocho canales espaciados entre sí 200 GHz. OSNR In 56,79 dB.

Potencia Tx [dBm]	Potencia Rx [dBm]	OSNR Out [dB]	BER	Q [dB]	Distancia Máxima [Km]
-10	-30,59	56,74	3,90e-30	21,28	80
-5	-25,59	56,74	5,88e-30	21,28	80
0	-20,07	57,04	7,71e-31	21,43	78
5	-15,09	57,05	1,67e-32	21,48	78
10	-8,41	56,94	8,51e-32	21,61	71
16	14,56	56,37	6,70e-35	21,86	3

Tabla 3.7 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de ocho canales espaciados entre sí 100 GHz.

Potencia Tx [dBm]	Potencia Rx [dBm]	BER	Distancia Máxima [Km]
-10	-30,59	5,44e-30	80
-5	-25,61	5,79e-30	80
0	-20,05	1,87e-31	78
5	-15,06	2,29e-30	78
10	-7,15	5,29e-33	66
16	14,38	6,23e-31	3

Tabla 3.8 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de ocho canales espaciados entre sí 50 GHz.

Potencia Tx [dBm]	Potencia Rx [dBm]	BER	Distancia Máxima [Km]
-10	-30,58	4,88e-30	80
-5	-25,33	3,67e-30	79
0	-20,04	1,99e-30	78
5	-14,06	6,67e-30	74
10	0,13	6,51e-30	37
16	13,63	2,47e-31	3

Se concluye que para el caso de estudio de una red de ocho canales con una velocidad de transmisión de 10 Gbps (Tablas 3.6, 3.7 y 3.8):

- La mayor distancia obtenida a la cual se consiguen todos los parámetros de calidad objetivo es de 80 Km y la potencia óptima de transmisión es -5 dBm.
- A partir de una potencia de 0 dBm, los parámetros de calidad se degradan considerablemente, siendo esta degradación más fuerte cuando se disminuye el espaciamiento entre canales.
- Para la red de ocho canales espaciados entre sí 50 GHz, con ninguna de las potencias de transmisión se consigue las condiciones requeridas, ya que a bajas potencias de transmisión la potencia en recepción está por debajo del umbral de -30 dBm, y al aumentar la potencia de transmisión la longitud de los segmentos de red está por debajo de los 80 Km, por lo cual esta red resulta económicamente poco viable.

• Caso de estudio tres: Red de dieciséis canales

En las Tablas 3.9, 3.10 y 3.11, se registran los parámetros de calidad y la distancia máxima por segmento de red medida al aumentar la potencia de transmisión, empleando una red de dieciséis canales espaciados entre ellos : 200, 100 y 50 GHz, respectivamente.

Tabla 3.9 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de dieciséis canales espaciados entre sí 200 GHz. OSNR In 56,79 dB.

Potencia Tx [dBm]	Potencia Rx [dBm]	OSNR Out [dB]	BER	Q [dB]	Distancia Máxima [Km]
-10	-30,33	56,91	5,26e-30	21,38	79
-5	-25,32	56,92	4,75e-30	21,38	79
0	-19,84	56,82	8,78e-30	21,13	77
5	-14,32	56,86	4,66e-31	21,25	75
10	-2,99	56,86	3,60e-33	21,66	50
16	14,47	56,37	5,55e-22	19,71	3

Tabla 3.10 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de dieciséis canales espaciados entre sí 100 GHz.

Potencia Tx [dBm]	Potencia Rx [dBm]	BER	Distancia Máxima [Km]
-10	-30,35	2,12e-30	79
-5	-25,36	3,95e-30	79
0	-20,05	2,03e-30	78
5	-13,92	2,79e-30	74
10	-5,61	2,62e-33	60
16	14,33	1,62e-10	3

Tabla 3.11 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de dieciséis canales espaciados entre sí 50 GHz.

Potencia Tx [dBm]	Potencia Rx [dBm]	BER	Distancia Máxima [Km]
-10	-30,34	2,14e-30	79
-5	-25,34	1,71e-30	79
0	-19,61	2,48e-31	76
5	-13,10	2,36e-31	70
10	6,76	1,80e-26	10
16	13,15	7,30e-10	3

Se concluye que para el caso de estudio de una red de dieciséis canales con una velocidad de transmisión de 10 Gbps (Tablas 3.9, 3.10 y 3.11):

- La mayor distancia obtenida a la cual se consiguen todos los parámetros de calidad objetivo es de 79 Km, tal distancia se consigue con una potencia de transmisión de -5 dBm, pero al aumentar la potencia de transmisión, los parámetros de calidad se degradan en gran magnitud.

Después de analizar los datos medidos para los tres casos de estudio propuestos (red de cuatro, ocho y dieciséis canales) se puede determinar qué:

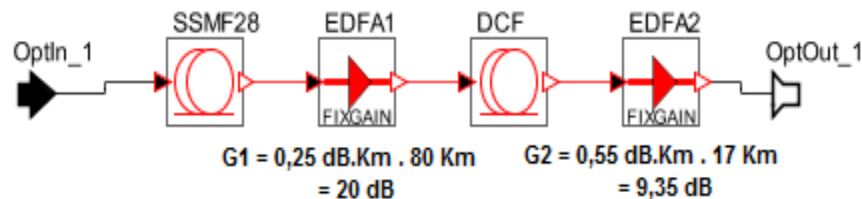
- Hay mayor degradación de los parámetros de calidad cuando se aumenta el número de canales y se reduce el espaciamiento entre ellos. Tal degradación se hace mucho más fuerte con altas potencias de transmisión del orden de los 5 dBm en adelante.
- La mayor distancia medida para la cual se consiguen todos los parámetros de calidad objetivo, empleando una velocidad de transmisión de 10 Gbps, y contando con todas las degradaciones presentes en las redes de fibra óptica es de 80 Km.
- El rango de potencia óptimo de transmisión es desde -5 a 0 dBm, ya que es el menor rango de potencia con el cual se consiguen todos los parámetros objetivos.
- La red de mayor capacidad con la cual se consiguen todas las condiciones requeridas (1e-30 para la BER, 20dB para el Factor Q, 30 dBm para la sensibilidad del receptor y segmentos de red de por lo menos 80 Km), con la potencia de transmisión óptima, es la red de ocho canales con espaciamientos de 100 GHz.

A continuación se procede a determinar cuál es la influencia de las degradaciones ópticas (fenómenos lineales y no lineales), cuando se emplea el formato de modulación CSRZ-DQPSK con una velocidad de transmisión de 10 Gbps. Las mediciones se llevan a cabo en una red WDM de ocho canales espaciados a 100 GHz, monitoreando los parámetros de calidad en el canal 193,5 THz.

3.2.2 Distancia máxima alcanzable mediante enlaces concatenados

El alcance de la red mediante enlaces concatenados será determinado por el número de tramos que aseguren una BER de 1e-30, factor Q = 20 dB y sensibilidad del receptor de -30 dBm. Para realizar la concatenación de tramos de red se debe recurrir a procedimientos tales como: técnicas de compensación de dispersión cromática para conseguir la BER y el factor Q objetivo, ajustar la ganancia de los amplificadores de línea para alcanzar la sensibilidad del receptor y evitar segmentos de red inferiores a los 80 Km. Cada tramo del enlace se configura de la siguiente manera: un segmento de fibra SSMF 28 de longitud igual a 80 Km, un segmento de fibra compensadora de dispersión de 17 Km y dos amplificadores EDFA, ubicados tal como se observa en la Figura 3.11.

Figura 3.11 Tramo individual del enlace implementando mejoras en la amplificación y la técnica de post-compensación óptica para la CD.



En la Tabla 3.12 se registran los valores medidos de los parámetros de calidad, concatenando tramos de red de 97 Km (como el que se observa en la Figura 3.11). En dicha tabla se observa que la máxima distancia mediante tramos concatenados es de 582 Km (seis tramos), teniendo en cuenta los valores establecidos como mínimos, para los parámetros de calidad.

Tabla 3.12 Distancia Máxima mediante enlaces concatenados. Potencia de transmisión de -5,58 dBm, OSNR_{IN} = 56,79 dB. Red de 8 canales espaciados 100 GHz. Velocidad de Transmisión de 10 Gbps.

Número De Tramos	Distancia Total [Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
1	97	1e-40	25,11	-5,61	56,76
2	194	1e-40	24,07	-5,56	56,92
3	291	1e-40	23,66	-5,58	56,65
4	388	1,24e-38	22,41	-5,60	56,56
5	485	8,57e-37	22,03	-5,56	56,88
6	582	4,95e-31	21,25	-5,56	56,69
7	679	7,77e-26	20,41	-5,57	56,65
8	776	4,30e-26	20,58	-5,53	56,82

3.2.3 Efecto del ruido de fase del láser

Uno de los parámetros a considerar mediante la implementación de formatos de modulación en fase es el ancho de línea del láser FWHM (Full Width at Half Maximum, anchura a media altura), dicho parámetro ocasiona el efecto de ruido de fase del láser el cual puede aportar significativamente en la degradación de los parámetros de calidad. En la Tabla 3.13 se registran los datos medidos para una configuración a 10 Gbps, cuando se incrementa el parámetro FWHM del láser, empleando un enlace de 80 Km. En dicha tabla se puede observar que a medida que aumenta el parámetro FWHM, los parámetros de calidad BER y factor Q se degradan. Tal degradación se hace evidente en las Figuras 3.12 (a) y (b), donde se representan los diagramas del ojo, empleando un FWHM ideal de 0 MHz y un FWHM típico de 5 MHz.

Tabla 3.13 Parámetros de monitoreo óptico dependientes del FWHM. Con potencia de transmisión de -5 dBm en un enlace de 80 Km.

FWHM [MHz]	BER	Factor Q [dB]
0	1e-40	22,74
1,0	3,69e-34	21,95
2,0	5,79e-30	21,34
3,0	7,43e-26	20,69
4,0	1,64e-24	20,28
5,0	4,25e-22	19,81

Figura 3.12 (a) Diagrama del ojo empleando un tramo de distancia máxima (80Km) con un FWHM= 0 MHz

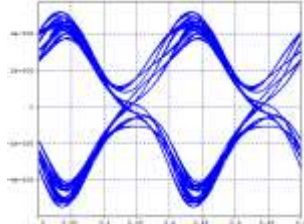
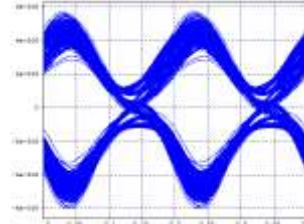


Figura 3.12 (b) Diagrama del ojo empleando un tramo de distancia máxima (80Km) con un FWHM= 5 MHz



3.2.4 Análisis de los efectos lineales: Ruido y Pérdidas por Atenuación

La atenuación y el ruido son parámetros intrínsecos introducidos por los elementos de red, que se ven afectados mediante el incremento de la distancia o el aumento de los dispositivos de amplificación. Por tal razón, para determinar el impacto de dichos efectos en una red WDM que implementa el formato de modulación CSRZ-DQPSK, se realizan

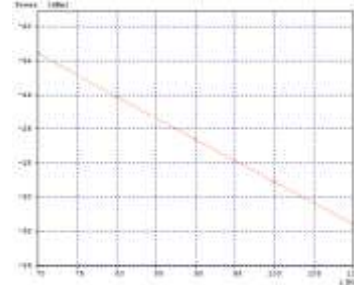
mediciones variando la distancia del enlace, de tal manera que se genere un rango de atenuación. Para realizar la medición se trabaja con potencias de transmisión pequeñas (potencia del láser de -5 dBm), para no excitar los efectos no lineales, se desprecia la dispersión cromática y la dispersión por modo de polarización introducida por la fibra, se desprecia el efecto de ruido de fase del láser dado que este formato es susceptible a degradaciones debido al incremento de este parámetro y se deben considerar en el sistema el ruido de los dispositivos transmisores y receptores que conforman una red WDM de ocho canales.

Para la toma de datos se varía la longitud del enlace en valores cercanos a la máxima longitud de un segmento de red (80Km). Debido a que la fibra introduce unas pérdidas de 0.25 dB/Km, al variar la distancia se está generando un rango de atenuación. Por ejemplo para un rango de 70Km a 110Km, se introducen al modelo unas pérdidas totales desde 17.5 dB hasta 27.5 dB. Los valores medidos de los parámetros de calidad para el canal 193.5 THz se registran en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones por pérdidas por atenuación y ruido con PTX = -5,58 dBm.

Distancia [Km]	P _{RX} [dBm]	Penalización [dB]
80	-22,91	17,33
85	-25,43	19,85
90	-27,92	22,34
95	-30,43	24,85
100	-32,91	27,33

Figura 3.13 Potencia en Recepción vs Distancia de Transmisión.



Al aumentar la longitud del enlace se determina que los parámetros de calidad BER, factor Q, OSNR a la entrada de la fibra y OSNR a la salida de la fibra, se mantienen constantes en 1e-40, 40 dB, 56.78 dB y 56.80 dB, respectivamente. Pero la potencia en recepción decrece linealmente hasta el punto de estar por debajo de la sensibilidad del receptor, a medida que aumenta la distancia de transmisión, debido a la atenuación característica de la fibra SSMF28 (Tabla 3.14 y Figura 3.13).

3.2.5 Análisis de Dispersión Cromática (CD) [38]

La dispersión cromática es un fenómeno que ensancha los impulsos ópticos, causada por la interacción de la luz con el material utilizado para construir la fibra. Por cada kilómetro de fibra, los impulsos quedan afectados por una cantidad de dispersión cromática; de este modo, después de cierta distancia unos impulsos empiezan a solaparse con otros adyacentes, lo que provoca un incremento del nivel de los ceros. Esto da lugar a que sea más difícil recuperar los símbolos transmitidos en el receptor, ya que los ceros han aumentado su nivel y los unos lo han disminuido. Después de la transmisión, la dispersión cromática acumulada se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$CD_{Acumulada} \left[\frac{ps}{nm} \right] = D \left[\frac{ps}{nm.Km} \right] \cdot L [Km] \quad (3.1)$$

Donde D es la constante de dispersión de la fibra y L es la distancia de transmisión. Para analizar el efecto de la dispersión cromática, a continuación se realizan las siguientes mediciones sobre la configuración propuesta (red de ocho canales espaciados entre sí 100 GHz, con una velocidad de transmisión de 10 Gbps):

- (a) Se determina la máxima tolerancia del formato de modulación CSRZ-DQPSK a la CD.
- (b) Se determina el efecto de compensar la CD en un segmento de red.
- (c) Se determina el efecto de compensar la CD sobre enlaces concatenados.

(a) Determinación de la máxima tolerancia del formato CSRZ-DQPSK a la dispersión cromática empleando una velocidad de transmisión de 10 Gbps.

Para realizar esta medida inicialmente se analiza el sistema teniendo en cuenta las siguientes consideraciones: potencias bajas para no excitar los efectos no lineales, se utiliza un enlace manteniendo constante la distancia máxima encontrada por Span (80 Km), no se realiza ningún tipo de compensación de CD, no se tienen en cuenta los efectos de atenuación y ruido introducidos por los dispositivos EDFA y no se tiene en cuenta el efecto del FWHM del láser. Para obtener este resultado se varía el parámetro dispersión cromática de la fibra (D), hasta conseguir los valores objetivo de los parámetros de monitoreo óptico (BER y factor Q). La máxima tolerancia del formato de modulación a la CD se puede asociar mediante la máxima longitud alcanzada para un Span de fibra y la máxima constante de CD soportada por el sistema, de tal manera que se mantengan los parámetros de calidad objetivos, de la siguiente manera:

$$CD_{max} = L_{max}D_{max} \tag{3.2}$$

Dónde CD_{max} es la máxima CD total soportada por el sistema, L_{max} es la distancia máxima por Span y D_{max} es la constante de dispersión máxima soportada por el sistema. Reemplazando en la ecuación 3.2 los valores medidos en la simulación, se tiene:

$$CD_{max-10\text{ Gbps}} = (80[Km]) \left(18,7 \left[\frac{ps}{nm.Km} \right] \right) = 1496 \left[\frac{ps}{nm} \right] \tag{3.3}$$

Las Figuras 3.6 (a) y (b), evidencian el efecto negativo de la dispersión cromática en el diagrama del ojo medido en un enlace de 80Km con: (a) $D=0$ ps/nm/Km y (b) $D=18,7$ ps/nm/Km.

Figura 3.14 (a) Diagrama del ojo sin efecto de la Dispersión Cromática ($D=0$ ps/nm/Km)

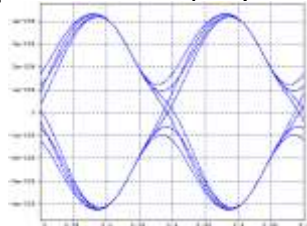
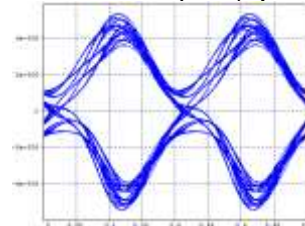


Figura 3.14 (b) Diagrama del ojo con efecto de la Dispersión Cromática ($D=18,7$ ps/nm/Km)



(b) Determinación de los efectos de la compensación de la CD en un Span.

Para determinar los efectos de la compensación de la CD sobre un tramo equivalente a la distancia máxima por Span (80Km), en la Tabla 3.15 se registran los datos medidos

cuando se compensa en: (100%, 75%, 50%, 25%) compensado mediante DCF y no compensado. En las Figuras 3.15 (a) y (b), se observan los diagramas del ojo cuando: (a) no hay compensación de la CD y (b) se compensa al 100% la CD.

Tabla 3.15 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la compensación de la CD en un enlace de 80 Km.

Longitud DCF [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]
17	1e-40	25,11	0,004660
12,75	1e-40	25,09	0,004180
8,5	1e-40	24,63	0,004393
4,25	1e-40	23,20	0,005492
0	5,79e-30	21,35	0,008035

Figura 3.15 (a) Diagrama del Ojo sin compensación de la CD para un Span de 80 Km.

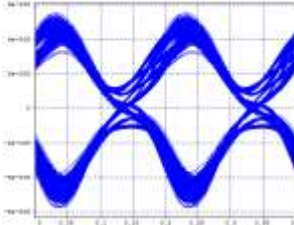
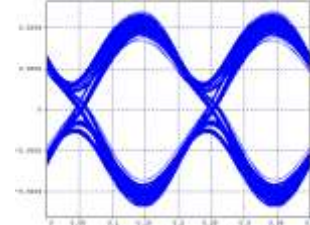


Figura 3.15 (b) Diagrama del Ojo compensando en 100% la CD para un Span de 80 Km.



Al compensar la dispersión cromática los parámetros de calidad BER y factor Q se mejoran considerablemente (Tabla 3.15), de tal manera que se puede aumentar la longitud del segmento de red tanto como las pérdidas por atenuación lo permitan, concluyéndose de esta manera que la CD degrada considerablemente el desempeño de la red y realizar compensación es fundamental para mejorar su rendimiento. Por otra parte, cuando se realiza compensación de la CD y se emplean bajas potencias de transmisión, la restricción de la longitud del segmento de red está determinada por las pérdidas de potencia por atenuación (introducidas en gran parte por la fibra DCF) y por la sensibilidad del receptor.

Se debe tener presente que realizar compensación al 100% para un solo span de fibra estándar de 80 Km, no es necesario ni eficiente¹⁰, dado que se consiguen buenos resultados de los parámetros de calidad con un porcentaje de compensación mucho menor (Tabla 3.15).

Concluido este análisis se determina que el formato de modulación CSRZ-DQPSK para la configuración a 10 Gbps, es poco tolerante a la dispersión cromática y altamente susceptible a su compensación, requiriendo para mejorar sus prestaciones el uso de más dispositivos de compensación y amplificación, incrementando de esta manera el costo de su implementación.

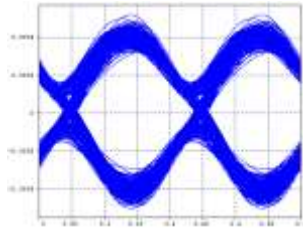
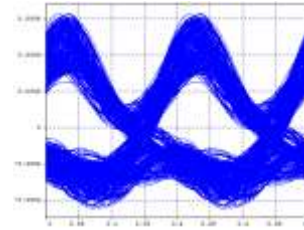
(c) Determinación de los efectos de la compensación de la CD sobre enlaces concatenados.

Se procede a verificar la mejora que se introduce en el desempeño de la red cuando se realiza compensación, teniendo en cuenta un modelo con todas las degradaciones y mediante la implementación de seis enlaces concatenados de 80 Km de fibra estándar SSMF 28, compensando al 100% la CD mediante fibra DCF, para una distancia total de 582 Km. Las Figuras 3.16 (a) y (b), muestran el efecto de compensar la CD en enlaces concatenados, y en la Tabla 3.16 se registran las medidas realizadas para los parámetros de calidad, cuando se realiza y no se realiza compensación de la CD, en enlaces concatenados.

¹⁰ Compensar al 100% la CD, en un entorno real implica implementar más dispositivos y degradar la potencia

Tabla 3.16 Parámetros de monitoreo óptico medidos en segmentos de red concatenados dependientes de la compensación de la CD.

Fibra de Bragg	Distancia Total [Km]	Distancia por Span [Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]	Jitter [ns]
Con	582	97	4,95e-31	21,25	-5,56	56,69	0,008459
Sin	160	80	1,83e-6	13,30	-5,58	56,97	0,010122

Figura 3.16 (a) Diagrama del ojo para seis (6) tramos de fibra concatenados de 80km con compensación de la CD**Figura 3.16 (b)** Diagrama del ojo para dos (2) tramos de fibra concatenados de 80km sin compensación de la CD

3.2.6 Análisis de Dispersión por Modo de Polarización (PMD)

La Dispersión por Modo de Polarización es una limitante en los sistemas de transmisión por fibra óptica de alta velocidad (≥ 10 Gbps) y de larga distancia, ocurre cuando las dos componentes ortogonales de polarización, llamados modos de polarización del modo fundamental de propagación, viajan a distinta velocidad de grupo, llegando en distintos tiempos al final de la fibra óptica, ensanchando y distorsionando los pulsos. Esta diferencia de retardo entre los modos de polarización se denomina retardo diferencial de grupo (DGD, *Differential Group Delay*) y es este parámetro el que se utiliza para determinar la PMD [65].

La variación de la velocidad de grupo se produce por las características birrefringentes¹¹ de la fibra óptica, tales características tienen un carácter aleatorio en función de la distancia y del tiempo, lo que implica que el DGD varía de la misma forma. Para verificar el efecto aleatorio de la PMD sobre el desempeño de la red, en el presente trabajo de grado se utiliza una librería brindada por OptSim (All-Order PMD), la cual permite evaluar el parámetro DGD.

Para la obtención de los resultados se debe tener en cuenta: utilizar un tramo de distancia fija, emplear el emulador de efectos concentrados proporcionado por OptSim teniendo en cuenta los efectos de polarización (PMD y las Birrefringencias) dentro del canal, no se tendrán en cuenta las atenuaciones y el ruido introducidos por los dispositivos, ni los efectos de la dispersión cromática y los efectos no lineales.

El valor típico de PMD introducido por las fibras SSMF-28 es del orden de los 0.2 ps/ $\sqrt{\text{Km}}$, por tal razón se procede a variar el coeficiente de PMD, en valores cercanos a este valor. Los datos medidos en un enlace de longitud igual a 80 Km se registran en la Tabla 3.17, donde se observa que los parámetros de monitoreo óptico no cambiaron su valor cuando se aumento el coeficiente de PMD en la fibra (Figura 3.17). De los resultados obtenidos se

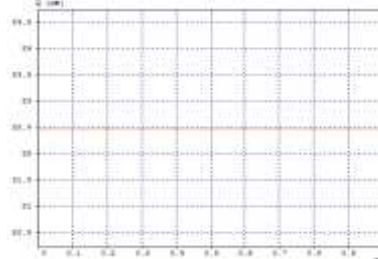
¹¹ La birrefringencia es el cambio en el índice de refracción "n" de los ejes transversales de la fibra óptica, llamados ejes de birrefringencia.

puede concluir que el formato de modulación CSRZ-DQPSK, para la configuración establecida, es tolerante a la PMD.

Tabla 3.17 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la PMD.

PMD [ps/√Km]	DGD [ps]	BER
0,2	1,78	1e-40
0,4	3,57	1e-40
0,6	5,36	1e-40
0,8	7,15	1e-40
1,0	8,94	1e-40

Figura 3. 17 Factor Q vs PMD



A continuación se procede a determinar cuál es la máxima tolerancia del formato de modulación CSRZ-DQPSK frente a esta degradación lineal, para lo cual se toman diferentes valores de PMD hasta conseguir un valor limite hasta el cual se consiguen los parámetros de calidad objetivo (BER=1e-30 y Q=20 dB). Los resultados obtenidos se registran en la tabla 3.18.

Tabla 3.18 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la PMD en un Span de longitud de 80Km. P. transmisión= -5.58 dBm.

PMD [ps/√Km]	DGD [ps]	BER	Factor Q [dB]
8	71,55	1e-40	36,79
10	89,44	1e-40	37,90
11,7	104,64	5,71e-37	22,19
12	107,33	1,82e-23	19,93
14	125,21	0,01390	7,10
16	143,10	4,11e-38	22,39
18	160,99	3,43e-8	14,64

La máxima PMD soportada por la red es del orden de los 104.64 ps (Tabla 3.18), lo cual equivale a una distancia aproximada de 273000 Km, para una fibra con coeficiente de PMD igual a 0.2 ps/√Km, resultando un efecto no significativo para la degradación del desempeño del modelo establecido, haciendo del formato CSRZ-DQPSK un formato con alta tolerancia a los efectos de la dispersión por modo de polarización, cuando se emplea una velocidad de transmisión de 10 Gbps. En las Figuras 3.18 (a) y (b), se observa el cambio en el patrón del diagrama del ojo cuando se emplea un coeficiente de PMD de (a) 0.2 ps/√Km y (b) 11.7 ps/√Km.

Figura 3.18 (a) Diagrama del ojo sin considerar otras degradaciones, con una PMD= 0,2 ps/√Km.

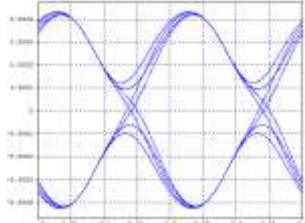
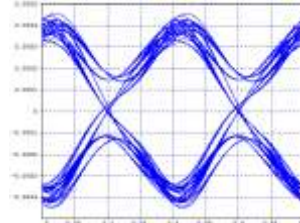


Figura 3.18 (b) Diagrama del ojo sin considerar otras degradaciones con una PMD= 11,7 ps/√Km.



La DGD y por tanto los parámetros de calidad (BER y factor Q) cambia aleatoriamente con la variación del parámetro seed, generando distorsión o retardo debido a las características birrefringentes de la fibra óptica (Figuras 3.19).

Figura 3.19 (a) Diagrama de la DGD vs Parámetro Fuente (Seed).

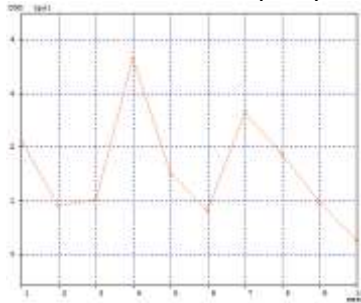


Figura 3.19 (b) Diagrama de la DGD vs Parámetro PMD

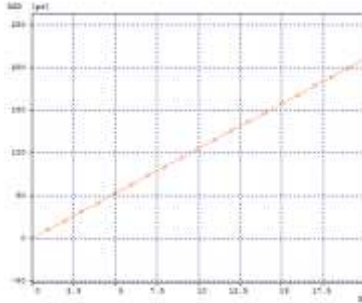
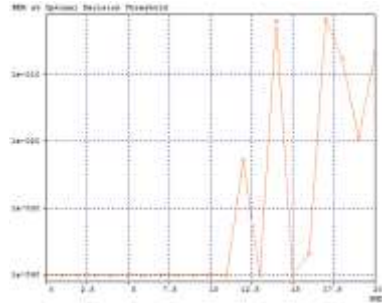


Figura 3.19 (c) BER vs Parámetro PMD



3.2.7 Análisis del efecto no lineal SPM [66]

El fenómeno de SPM se produce debido a la existencia de una componente del índice de refracción de la fibra dependiente de la intensidad de las señales ópticas. Este fenómeno es conocido como efecto óptico Kerr, donde el cambio del índice de refracción de la fibra depende de la potencia de la señal modulada que viaja a través de ella generando un desplazamiento temporal de su fase. La variación temporal de dicha fase conlleva a un ensanchamiento del espectro de la señal y la intensidad de dicho cambio de fase se verá fuertemente determinado por la magnitud del producto de la potencia de la señal por la longitud efectiva de la fibra ó longitud equivalente de generación del efecto no lineal teniendo en cuenta las pérdidas que se producen en la fibra. La auto-modulación de fase empieza a tener un efecto significativo cuando se cumple la expresión de la ecuación (3.4), que es cuando la fase no lineal de la fibra $\phi_{NL} = \pi/2$.

$$P_o L_e \cong 1 \quad [W.Km] \quad (3.4)$$

Donde P_o es la potencia de la señal y L_e es la longitud efectiva de la fibra, la cual es igual a la longitud del enlace de fibra para distancias cortas y para distancias largas se puede determinar con la expresión (3.5).

$$L_e \cong \frac{1}{\alpha} \quad (3.5)$$

Siendo α la atenuación de la fibra que para este caso es del orden de 0.25 dB/Km.

Se determina que para un enlace de 80 Km la potencia de transmisión donde es significativo el impacto de SPM es de 24 dBm (ecuaciones (3.4) y (3.5)). En la Figura 3.20 (a) se observa que para una red mono canal cuando aumenta la potencia de transmisión, aumenta linealmente la potencia en recepción, pero después de los 24 dBm de potencia de transmisión cambia la pendiente de la recta de tal manera que el aumento en la potencia en recepción es más lento. En las Figuras 3.20 (b) y (c), se muestran los espectros de salida de la red cuando se emplea una potencia de transmisión de (12, 24 y 36) dBm, en (b) no se tienen en cuenta los fenómenos no lineales y en (c) se observa el efecto del fenómeno no lineal SPM. Es de anotar que el ensanchamiento de los pulsos genera aumento en la ISI y degradación de la BER, ocasionando pérdida de la información e impidiendo recuperar la señal procedente del transmisor.

Figura 3.20 (a) Potencia de Recepción Vs Potencia de Transmisión

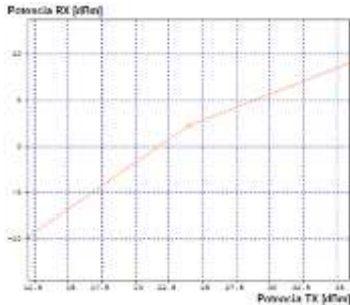


Figura 3.20 (b) Espectros de Salida sin considerar el efecto de SPM

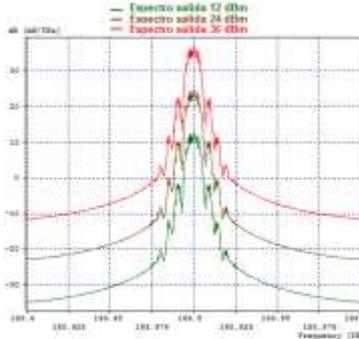
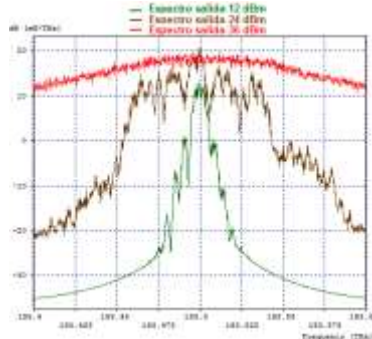


Figura 3.20 (c) Espectros de Salida considerando el efecto de SPM



Posteriormente se varía la potencia de transmisión en la red mono canal, empleando un enlace con $D=17$ ps/nm/Km, hasta medir la potencia a partir de la cual se empieza a notar el efecto de SPM, midiendo para la configuración a 10 Gbps una potencia de 12 dBm a partir de la cual el ensanchamiento del espectro empieza a notarse.

Para medir el impacto de SPM en la red que se ha venido estudiando (ocho canales, velocidad de transmisión de 10 Gbps y los parámetros de calidad se monitorean en la frecuencia de 193.5 THz), en este caso se emplea un espaciado de 200 GHz entre canales, esto con el fin de minimizar el efecto de otros fenómenos no lineales (XPM y FWM). Además se debe tener en cuenta que en el modelo simplificado de red se establece que la máxima potencia del láser es de 16 dBm.

Para realizar este estudio se compensa los efectos de la dispersión cromática con una fibra ideal de Bragg (no considera efectos de atenuación por compensación de CD), se compensan los efectos de la atenuación de la fibra con un amplificador EDFA de ganancia fija (sin considerar el ruido), se varía la potencia de transmisión y se realiza la gráfica de potencia en recepción versus potencia de transmisión, con el fin de observar el comportamiento de la red. Posteriormente se verifica el efecto combinado de la dispersión cromática y el ensanchamiento del espectro originado por SPM. Se debe tener en cuenta que para un valor de dispersión normal donde $D < 0$, implica un ensanchamiento del pulso, mientras para un valor de dispersión anómalo donde $D > 0$, implica un estrechamiento del pulso provocado por SPM.

Una vez realizadas las pruebas se determina que para la máxima potencia de transmisión establecida en el modelo simplificado de red de 16 dBm, el efecto de SPM no es visible en el espectro (Figura 3.21 (b)), ni en la gráfica de potencia de recepción versus potencia de transmisión (Figura 3.21 (a)), por tal razón se procede a medir el impacto de SPM en el diagrama del ojo y los parámetros de calidad BER y factor Q.

Se realizan pruebas fijando la potencia de transmisión en 16 dBm y se varía el coeficiente de dispersión de la fibra: en el régimen de dispersión normal -17 ps/nm/km y en el régimen de dispersión anómalo 17 ps/nm/km. En las Figuras 3.22 (a), (b) y (c), se ilustra la degradación del diagrama de ojo ocasionada por SPM empleando un enlace con coeficiente de CD de (a) $D=0$ ps/nm/Km, (b) $D=17$ ps/nm/Km y (c) $D=-17$ ps/nm/Km. En la Figura 3.22 (d) se pueden comparar los espectros de la señal de salida para un enlace con constante de CD de 0 ps/nm/Km (espectro verde) y un enlace con constante de CD de 17 ps/nm/Km (espectro rojo).

Figura 3.21 (a) Potencia en Recepción Vs Potencia de Transmisión.

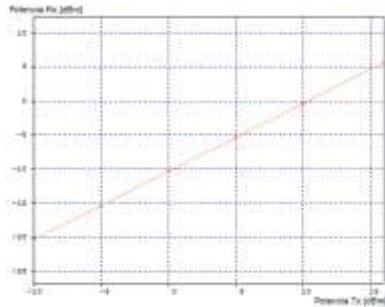
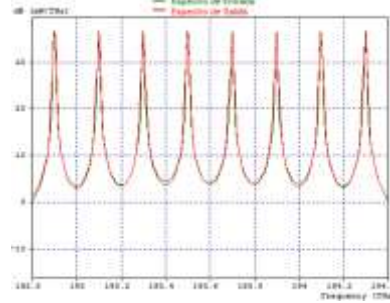


Figura 3.21 (b) Espectro de entrada (verde) y espectro de salida (rojo) considerando el efecto de SPM. PTX de 16 dBm.



Cuando la CD es igual a cero hay mayor degradación de los parámetros de monitoreo óptico (Figuras 3.22 (a) y (d)), razón por la cual se puede determinar que el formato de modulación CSRZ-DQPSK para la configuración a 10 Gbps, es sensible a la compensación del fenómeno no lineal SPM, mediante la CD. Por otra parte, se determina que el régimen de dispersión normal no afecta en mayor medida los parámetros de calidad (Figura 3.22 (c)), pero en el régimen de dispersión anómalo (considerado en el modelo simplificado de red) se degradan los parámetros de calidad (figuras 3.22 (b)), por tal razón se concluye que la SPM es uno de los efectos degradantes que se debe tener en cuenta mediante la implementación de esta configuración.

Figura 3.22 (a) Degradación del Diagrama del ojo ocasionada por el efecto de SPM con $D = 0$ ps/nm/Km. (BER = $2,56e-11$, Q= 18,49 dB).

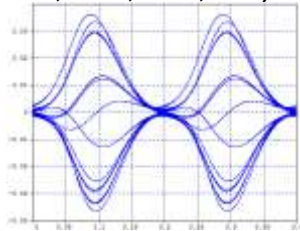


Figura 3.22 (b) Degradación del Diagrama del ojo ocasionada por el efecto de SPM con $D = 17$ ps/nm/Km. (BER = $4e-26$, Q= 20 dB).

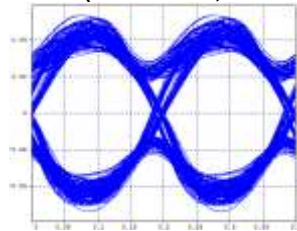


Figura 3.22 (c) Degradación del Diagrama del ojo ocasionada por el efecto de SPM con $D = -17$ ps/nm/Km. (BER = $1e-40$, Q= 22 dB).

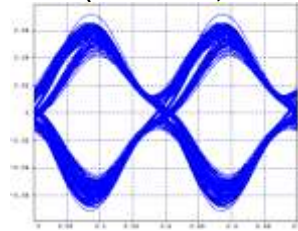
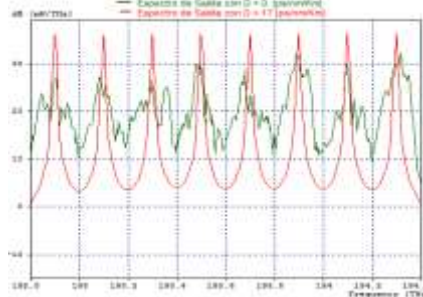


Figura 3.22 (d) Espectros de señales de salida resultantes para $D = 0$ (verde) y $D = 17$ ps/nm/Km (rojo).



3.2.8 Análisis del efecto no lineal XPM [67]

La modulación cruzada de fase es el término por el que se conoce el conjunto de efectos de la refracción no lineal producida por un canal sobre canales co-propagantes. XPM está presente en los enlaces WDM, donde debido a la dispersión de la fibra, las fluctuaciones de fase son convertidas en fluctuaciones de intensidad degradando el desempeño del

sistema. Para entender mejor este fenómeno, en este estudio se emplea una red WDM de ocho canales donde los canales adyacentes tienen diferentes potencias de transmisión. Se le llama a un canal con potencia más alta, canal de bombeo y a otro de menor potencia, canal de prueba. Al propagar estos dos tipos de ondas en un canal óptico, se observa que XPM provoca un ensanchamiento asimétrico del canal de prueba debido a que el cambio de fase no lineal incluye un desequilibrio de velocidades de grupo a diferentes potencias. La diferencia entre SPM y XPM es que el pulso de prueba se ensancha más del lado en el que se encuentra el pulso de bombeo que tiene mayor potencia (cuando las potencias son iguales, no se observa el fenómeno de XPM ya que este efecto depende fuertemente de la potencia del canal de bombeo).

Para las pruebas se seleccionan como canales de bombeo: $f_1=193.2$ THz, $f_2=193.3$ THz, $f_5=193.6$ THz y $f_6=193.7$ THz y como canales de prueba: $f_3=193.4$ THz, $f_4=193.5$ THz, $f_7=193.8$ THz y $f_8=193.9$ THz. Las medidas se registran para el canal de prueba $f_4=193.5$ THz. En el desarrollo de este estudio los canales de prueba siempre utilizan una potencia de transmisión constante de -5 dBm, pero en los canales de bombeo se varía la potencia de transmisión en un rango de -10 a 16 dBm, manteniendo constante el coeficiente de dispersión de la fibra seleccionada en el modelo simplificado de red ($D=17$ ps/nm/Km). Esto con el objetivo de observar el comportamiento de la red debida a los efectos negativos del fenómeno no lineal XPM. Posteriormente se procede a mantener fija la potencia de transmisión de los canales de bombeo en 16 dBm y se varía el coeficiente de dispersión de la fibra en un rango de 0 a 18 ps/nm/Km, esto con el objetivo de observar la relación entre el impacto de XPM en la red, con la variación de la CD en la fibra.

En este análisis se emplea una longitud de enlace fija de 80 Km, se compensa al 100% la dispersión cromática con una fibra ideal de Bragg y no se tienen en cuenta el ruido de los dispositivos, ni el efecto FWHM del láser.

Los valores objetivo de los parámetros de calidad ($BER=1e-30$ y $Q=20$ dB) en el canal de prueba $f_2=193.5$ THz, se consiguen hasta una potencia de transmisión de los canales de bombeo inferior a los 5 dBm (Figuras 3.23 (a) y (b)), a partir de este valor los parámetros de calidad decaen rápidamente debido al efecto de XPM y para una potencia de transmisión de 7 dBm se obtienen los parámetros de calidad mínimos establecidos por la norma ($BER=1e-9$ y $Q=6$ dB). Las Figuras 3.23 (c), (d) y (e), muestran la degradación del diagrama del ojo en el canal de prueba debida al efecto de XPM, cuando se aumenta la potencia de transmisión en los canales de bombeo.

Figura 3.23 (a) BER vs Potencia de Transmisión de los canales de bombeo. Medida en el canal 193,5 THz

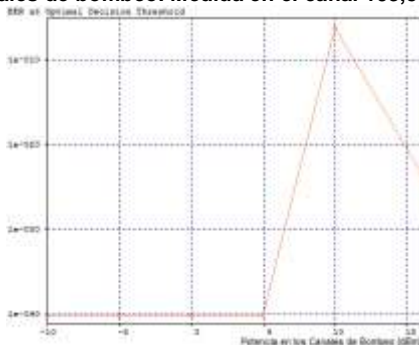


Figura 3.23 (b) Factor Q vs Potencia de Transmisión de los canales de bombeo. Medida en el canal 193,5 THz

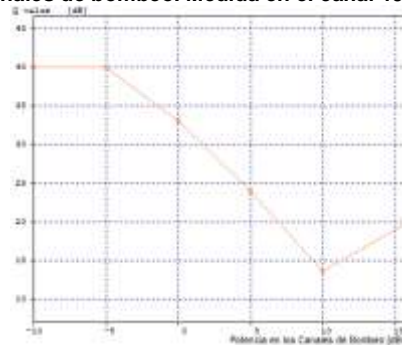


Figura 3.23 (c) Diagrama del ojo con P. Transmisión de -5 dBm. BER= 1e-40, Q=40 dB.

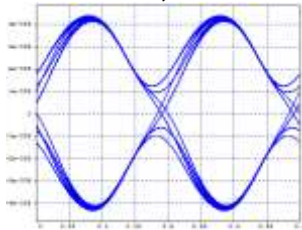


Figura 3.23 (d) Diagrama del ojo con P. Transmisión de 0 dBm. BER= 1e-40, Q=33,11 dB.

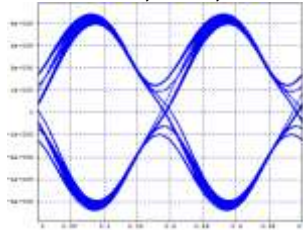
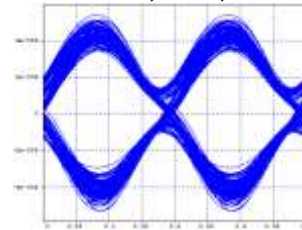


Figura 3.23 (e) Diagrama del ojo con P. Transmisión de 16 dBm. BER= 4e-24, Q= 20,22 dB.



Ahora se procede a fijar la potencia de los canales de bombeo en 16 dBm y se varía la constante de dispersión de la fibra, con lo cual se determina que cierta cantidad de dispersión cromática ayuda a compensar el efecto negativo de XPM (Figuras 3.24 (a) y (b)), tal hecho se ve reflejado en la mejora de los parámetros de calidad BER y factor Q.

Figura 3.24 (a) BER vs Coeficiente de Dispersión. P. Transmisión de de los canales de bombeo de 16 dBm.

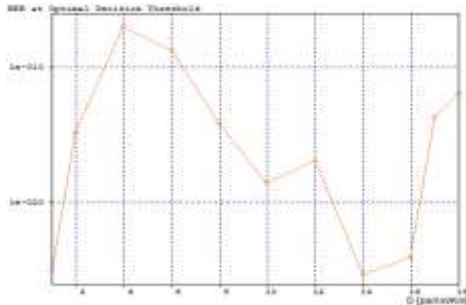


Figura 3.24 (b) Factor Q vs Coeficiente de Dispersión. P. Transmisión de de los canales de bombeo de 16 dBm.

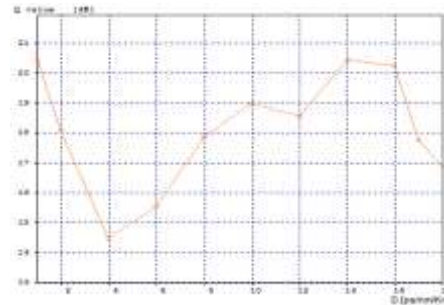


Figura 3.24 (c) Espectro de la señal de salida con D = 0 ps/nm/Km. P. Transmisión de los canales de bombeo de 16 dBm.

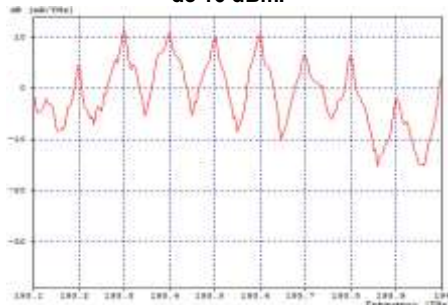
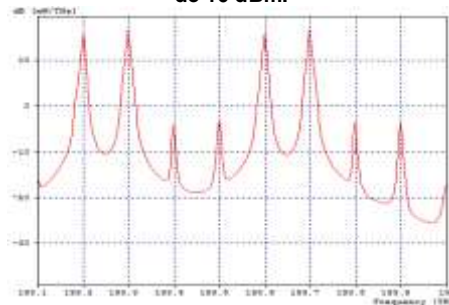


Figura 3.24 (d) Espectro de la señal de salida con D = 17 ps/nm/Km. P. Transmisión de los canales de bombeo de 16 dBm.



En la Figura 3.24 (c) se representa el espectro de salida cuando se emplea un coeficiente de dispersión de 0 ps/nm/Km, en la cual se nota una total desmejora de la señal que llega al receptor y en la Figura 3.24 (d) se representa el espectro de salida cuando se emplea un coeficiente de dispersión de 17 ps/nm/Km, en dicha figura se observa la asimetría del ensanchamiento espectral de los canales de prueba originada por XPM. Los canales de bombeo presentan débiles cambios en su estructura debido a que la intensidad del pulso de prueba es muy pequeña comparada con la intensidad del pulso de bombeo, por lo que el espectro es simétrico (a diferencia del espectro de los canales de prueba que presentan un ensanchamiento que es más grande del lado donde se encuentran los canales de bombeo). Al comparar la Figura 3.24 (c) con la (d), se observa que la señal con

coeficiente de dispersión de 17 ps/nm/km se vio menos afectada por la XPM, así que se puede establecer que el formato de modulación CSRZ-DQPSK en la configuración a 10 Gbps es sensible a la XPM y la presencia de la dispersión cromática es capaz de compensar en parte el impacto negativo de dicho fenómeno no lineal en la red.

3.2.9 Análisis del efecto no lineal FWM [68]

FWM o mezcla de cuatro ondas, es un efecto no lineal de tercer orden¹² y ocurre cuando luz de al menos dos longitudes de onda distintas viaja por la fibra. El efecto consiste en la generación de productos espectrales o mezclas de las ondas, cuya frecuencia consiste en la mezcla de las frecuencias originales, provocando como resultado la interacción de las ondas ópticas transmitidas, esto produce: daño espectral, afectan la BER, atenuación de potencia y efectos de diafonía. Las ondas más dañadas están descritas mediante la siguiente ecuación.

$$F_{ijk} = f_i + f_j - f_k \quad (3.6)$$

La potencia de la onda generada por FWM tiene proporción directa al espaciamiento entre canales e inversa al valor de dispersión. Así, para una dispersión nula, el espaciamiento tiende a infinito, lo cual indica que siempre debe haber algo de dispersión.

Para observar el impacto de este fenómeno en la red que se ha venido estudiando (ocho canales con espaciamiento de 100 GHz, distancia del enlace de 80 Km, velocidad de transmisión por canal de 10Gbps y se monitorea el canal 193.5 THz) se realiza compensación ideal con una fibra de Bragg y se varía la potencia de transmisión. Inicialmente se observa el comportamiento de la red empleando un enlace con constante de dispersión $D = 17$ ps/nm/Km. En las Figuras 3.25 (a), (b) y (c) se observa la aparición de canales productos de la intermodulación cuando aumenta la potencia de transmisión.

Figura 3.25 (a) Espectro de salida para una señal con P. Transmisión de -5 dBm.

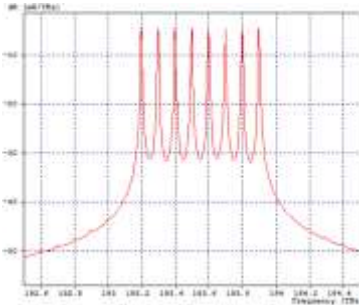


Figura 3.25 (b) Espectro de salida para una señal con P. Transmisión de 0 dBm.

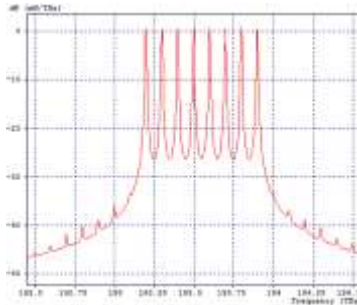
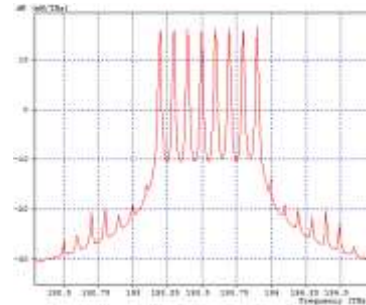


Figura 3.25 (c) Espectro de salida para una señal con P. Transmisión de 16 dBm.



Ahora se procede a fijar la potencia de transmisión de los canales en 16 dBm y se varía el coeficiente de CD de la fibra, con el fin de comprobar si la dispersión cromática es capaz de compensar en parte los efectos negativos de FWM. En la Figura 3.26 (a) se observa el espectro de la señal de salida cuando el enlace de fibra tiene un coeficiente de dispersión cromática $D = 0$ ps/nm/Km, como puede observarse en dicha figura, el espectro está totalmente distorsionado y no se diferencian los canales enviados por el transmisor de los

¹² Un efecto no lineal de tercer orden involucra el producto de tres componentes del campo (iguales o distintos) que tiene como consecuencia la generación de una cuarta longitud de onda.

canales que son producto de la intermodulación. En la Figura 3.26 (b) se observa el espectro de la señal de salida con $D = 18$ ps/nm/Km, en esta figura se observa que la potencia de los canales no deseados (productos de FWM), han disminuido notablemente su potencia, resultado de la compensación por dispersión del efecto no lineal FWM.

Figura 3.26 (a) Espectro de la señal de salida para un enlace con coeficiente de dispersión $D = 0$ [ps/nm/Km]. P. Transmisión por canal de 16 dBm.

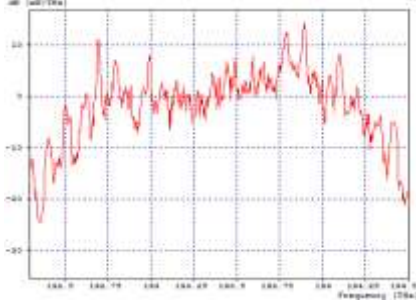


Figura 3.26 (b) Espectro de la señal de salida para un enlace con coeficiente de dispersión $D = 18$ [ps/nm/Km]. P. Transmisión por canal de 16 dBm.

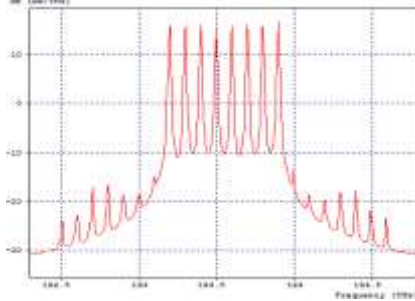


Figura 3.26 (c) Canal 193,5 THz. Potencia de recepción Vs Coeficiente de dispersión de la fibra.

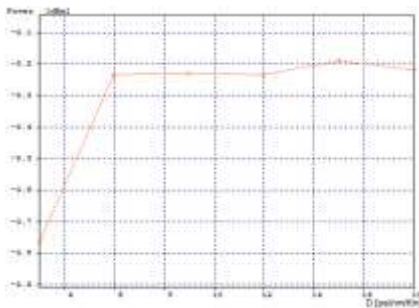
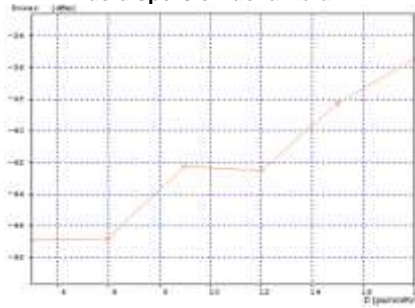


Figura 3.26 (d) Canal 192,7 THz (Producto de Intermodulación). Potencia de recepción Vs Coeficiente de dispersión de la fibra.



La Figura 3.26 (c), muestra cuantitativamente el incremento de la potencia en recepción en el canal $f_2 = 193.5$ THz, resultado de compensar el impacto de FWM en la red, mediante el incremento del coeficiente de dispersión cromática. Según esta figura se observa que después de un valor de dispersión igual a 6 ps/nm/km, la potencia en recepción en el canal tiende a ser un valor constante, es decir que después de este valor, el efecto de la compensación por aumento de la dispersión es poco considerable. Se debe tener en cuenta que valores elevados de dispersión cromática conducen a otro tipo de degradaciones.

En la Figura 3.26 (d), se ilustra la grafica de potencia en recepción versus coeficiente de dispersión, medida en el canal 193.2 THz (canal producto de la intermodulación). En dicha figura se observa que la potencia en recepción medida cuando se varía el coeficiente de dispersión en un rango de 0 a 18 ps/nm/Km, siempre está por debajo de la sensibilidad del receptor, así que bajo estas características de la red (enlace de 80 Km, velocidad de transmisión de 10 Gbps, espaciamento entre canales de 100 GHz, $D = 17$ ps/nm/Km y máxima potencia de transmisión por canal de 16 dBm) el formato de modulación CSRZ-DQPSK es resistente a las degradaciones por FWM.

De acuerdo a lo visto hasta ahora, se puede resumir que el formato de modulación CSRZ-DQPK para la configuración a 10 Gbps (implementando las características establecidas en el modelo simplificado de red): soporta un espaciamento mínimo entre canales de 100

GHz y un número máximo de ocho canales (tal limitación fue impuesta por que al aumentar el número de canales y disminuir el espaciamento entre dichos canales, el tamaño de los segmentos de red sin compensar la CD era inferior a 80 Km), es poco tolerante a la CD pero responde favorablemente ante su compensación, es tolerante a la PMD y al fenómeno no lineal FWM y es poco tolerante al efecto de ruido de fase del láser y a los fenómenos no lineales SPM y XPM. A continuación se re realiza el estudio cuando se emplea en el escenario general de simulación una velocidad de 40 Gbps.

3.3 FORMATO DE MODULACIÓN CSRZ-DQPSK EMPLEANDO UNA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE 40 Gbps

3.3.1 Distancia máxima alcanzable por un segmento de red

La distancia máxima se mide teniendo en cuenta los valores mínimos de los parámetros de calidad establecidos en el modelo simplificado de red. Para realizar esta medida se debe contar con todas las degradaciones típicas de las redes ópticas.

- **Caso de estudio uno: Red de cuatro canales**

En las Figuras 3.27 (a) y (b), se ilustra el espectro y el diagrama del ojo a la salida del transmisor de una red de cuatro canales con espaciamento de 200 GHz, empleando una velocidad de transmisión de 40 Gbps. Para el espaciamento de 200 GHz se determina que la máxima distancia por span (sin compensar la dispersión cromática) es de 9 Km y se consigue con una potencia de transmisión de 16 dBm. Además se puede observar que a largas distancias la BER se degrada más rápidamente a medida que aumenta la potencia de transmisión (Figuras 3.27 (c), (d) y (e)).

Figura 3.27 Red de cuatro canales con espaciamento de 200 GHz. Velocidad de TX de 40 Gbps.

Figura 3.27 (a) Espectro a la salida del transmisor.

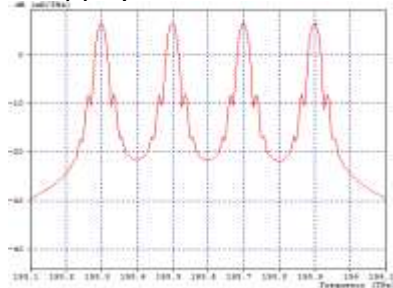


Figura 3.27 (b) Diagrama del ojo a la salida del transmisor. BER = 1e-40. Q = 28,86.

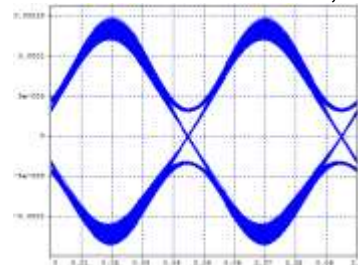


Figura 3.27 (c) BER vs Distancia. Potencia de TX -10 dBm

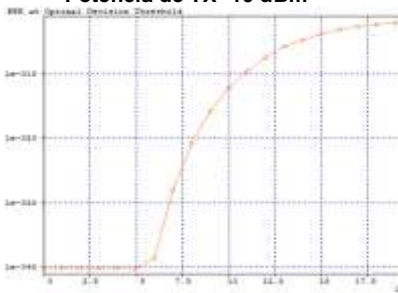
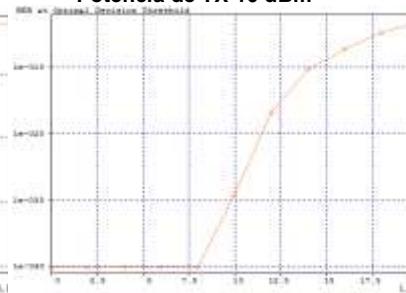


Figura 3.27 (d) BER vs Distancia. Potencia de TX 10 dBm



Figura 3.27 (e) BER vs Distancia. Potencia de TX 16 dBm



A continuación se procede a reducir el espaciamento entre los canales en 100 GHz (Figuras 3.28 (a) y (b)) y 50 GHz (Figuras 3.28 (c) y (d)). Se determina que cuando se emplea el espaciamento a 50 GHz y la velocidad de transmisión por canal a 40 Gbps, se presenta solapamiento entre los espectros de canales adyacentes, de tal manera que los parámetros de calidad a la salida del transmisor ya están por debajo de los valores establecidos como mínimos, por tal razón se concluye que para la configuración a 40 Gbps, el espaciamento mínimo entre canales debe ser de 100 GHz.

Figura 3.28 Red de cuatro canales con espaciamento de 100 y 50 GHz. Velocidad de TX de 40 Gbps.

Figura 3.28 (a) Diagrama del ojo a la salida del TX.
BER = $1e-40$. Q = 28,78.
Espaciamento de 100 GHz.

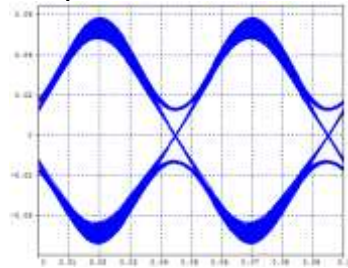


Figura 3.28 (b) Espectro a la salida del TX con espaciamento de 100 GHz.

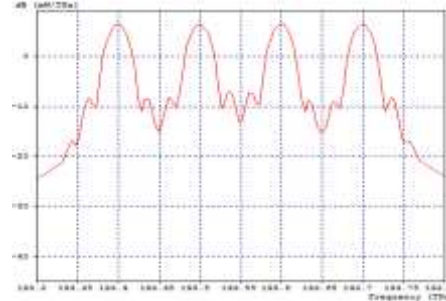


Figura 3.28 (c) Diagrama del ojo a la salida del TX.
BER = $6,68e-17$. Q = 18,51.
Espaciamento de 50 GHz.

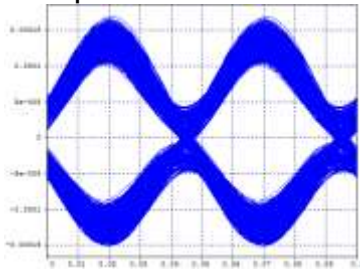
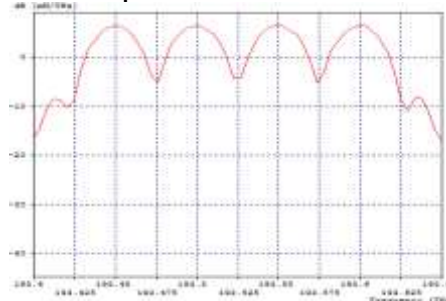


Figura 3.28 (d) Espectro a la salida del TX con espaciamento de 50 GHz.



En las Tablas 3.19 y 3.20, se registran los parámetros de calidad y la distancia máxima por segmento de red medida al aumentar la potencia de transmisión, empleando una red de cuatro canales espaciados entre ellos : 200 y 100 GHz, respectivamente.

Tabla 3.19 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de cuatro canales espaciados entre sí 200 GHz.

Potencia Tx [dBm]	Potencia Rx [dBm]	BER	Distancia Máxima [Km]
-10	-15,37	4,75e-30	6,9
-5	-10,38	5,57e-30	6,9
0	-5,46	9,22e-30	6,9
5	-0,43	5,22e-30	7,0
10	4,48	2,39e-30	7,4
16	10,24	1,17e-30	9,9

Tabla 3.20 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de cuatro canales espaciados entre sí 100 GHz.

Potencia Tx [dBm]	Potencia Rx [dBm]	BER	Distancia Máxima [Km]
-10	-15,37	5,71e-30	6,9
-5	-10,29	1,41e-30	6,8
0	-5,36	4,65e-30	6,9
5	-0,44	7,92e-30	7,0
10	4,48	5,83e-30	7,3
16	10,19	6,74e-30	9,8

Se concluye que para el caso de estudio de una red de cuatro canales con una velocidad de transmisión de 40 Gbps (Figuras 3.27 y 3.28 y Tablas 3.19 y 3.20):

- La mayor distancia medida a la cual se consiguen todos los parámetros de calidad objetivo es de 9.9 Km, tal distancia se consigue con una potencia de transmisión de 16 dBm.
- A largas distancia de transmisión, los parámetros de calidad se degradan más rápidamente cuando aumenta la potencia de transmisión.
- Los parámetros de calidad medidos a la salida del transmisor empleando el espaciamiento a 50 GHz, están por debajo de los valores establecidos como mínimos.

• **Caso de estudio dos: Red de ocho canales**

En las Tablas 3.21 y 3.22, se registran los parámetros de calidad y la distancia máxima por segmento de red medida al aumentar la potencia de transmisión, empleando una red de ocho canales espaciados ente ellos : 200 y 100 GHz, respectivamente.

Tabla 3.21 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de ocho canales espaciados entre sí 200 GHz.

Potencia Tx [dBm]	Potencia Rx [dBm]	BER	Distancia Máxima [Km]
-10	-15,38	1,57e-30	6,9
-5	-10,38	1,95e-30	6,9
0	-5,36	1,60e-30	6,9
5	-0,44	3,73e-31	7,0
10	4,46	1,32e-30	7,4
16	10,25	1,19e-31	9,9

Tabla 3.22 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de ocho canales espaciados entre sí 100 GHz.

Potencia Tx [dBm]	Potencia Rx [dBm]	BER	Distancia Máxima [Km]
-10	-15,36	1,44e-30	6,9
-5	-10,44	8,02e-30	7,0
0	-5,34	9,57e-31	6,9
5	-0,43	2,33e-30	7,0
10	4,57	3,13e-30	7,2
16	10,42	5,55e-30	9,6

• **Caso de estudio tres: Red de dieciséis canales**

En las Tablas 3.23 y 3.24, se registran los parámetros de calidad y la distancia máxima por segmento de red medida al aumentar la potencia de transmisión, empleando una red de dieciséis canales espaciados ente ellos : 200 y 100 GHz, respectivamente.

Tabla 3.23 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de dieciséis canales espaciados entre sí 200 GHz.

Potencia Tx [dBm]	Potencia Rx [dBm]	BER	Distancia Máxima [Km]
-10	-15,37	1,89e-30	6,9
-5	-10,38	4,15e-30	6,9
0	-5,33	4,09e-30	6,8
5	-0,31	3,20e-30	6,9
10	4,77	6,93e-30	6,8
16	10,35	5,11e-31	9,6

Tabla 3.24 Distancia Máxima variando la Potencia de Transmisión. Red de dieciséis canales espaciados entre sí 100 GHz.

Potencia Tx [dBm]	Potencia Rx [dBm]	BER	Distancia Máxima [Km]
-10	-15,37	9,95e-31	6,9
-5	-10,38	5,07e-31	6,9
0	-5,35	6,49e-30	6,9
5	-0,37	9,62e-31	6,9
10	4,47	1,10e-31	7,0
16	10,15	1,40e-30	9,0

Después de observar los datos medidos para los tres casos de estudio propuestos (red de cuatro, ocho y dieciséis canales) se puede determinar qué:

- La máxima distancia por span sin compensación de la dispersión cromática es de 9.9 Km, la cual se obtiene con una potencia de transmisión de 16 dBm. Tal longitud es muy pequeña si se considera que distancias por span inferiores a 80 km no son económicamente viables.
- La distancia máxima por span medida para una determinada potencia de transmisión, se mantiene prácticamente constante al aumentar el número de canales.

- Al aumentar la potencia de transmisión aumenta la distancia máxima por span, pero dicho aumento (aproximadamente 3 Km) es muy poco considerando que se aumentó la potencia de transmisión en 26 dB.

La notable disminución en la longitud del enlace que se presenta al aumentar la tasa de transmisión de 10 a 40 Gbps, es debida a que muchos de los efectos que se presentan en una transmisión por fibra óptica, se incrementan al aumentar la velocidad de transmisión. Tal es el caso de los fenómenos dispersivos como la CD y la PMD cuya tolerancia se disminuye con el aumento de la velocidad de transmisión. En la Tabla 3.25, se muestra la influencia de diferentes tipos de dispersión sobre una transmisión óptica en función de la tasa de transmisión:

Tabla 3.25 Comparación del efecto de la CD, la DGD y la PMD sobre distintas tasas binarias

Parámetro	40Gbps frente a 10Gbps	100Gbps frente a 10Gbps	100Gbps frente a 40Gbps
Tolerancia a la CD	16 veces menor	100 veces menor	6,25 veces menor
Tolerancia al DGD	4 veces menor	10 veces menor	2,5 veces menor
Alcance limitado por PMD	16 veces menor	100 veces menor	6,25 veces menor

A continuación se procede a determinar cuál es la influencia de las degradaciones ópticas (fenómenos lineales y no lineales), cuando se emplea el formato de modulación CSRZ-DQPSK con una velocidad de transmisión de 40 Gbps. Las mediciones se llevan a cabo en una red WDM de ocho canales espaciados a 100 GHz, empleando una potencia de transmisión de -5 dBm para una distancia de 7 Km, monitoreando los parámetros de calidad en el canal 193.5 THz.

3.3.2 Distancia máxima alcanzable mediante enlaces concatenados

El alcance de la red mediante enlaces concatenados será determinado por el número de tramos que aseguren una BER de $1e-30$, factor Q = 20 dB y sensibilidad del receptor de -30 dBm. Cada tramo del enlace se configura tal y como se ilustra en la Figura 3.11. En la Tabla 3.26 se registran los valores medidos de los parámetros de calidad para una velocidad de transmisión de 40Gbps, concatenando tramos de red de 97 Km, logrando una distancia máxima de 194 Km (dos tramos), teniendo en cuenta los valores establecidos como mínimos para los parámetros de calidad. En los datos registrados se puede observar el notable aumento del segmento de fibra SSMF 28, que paso de 7 Km sin compensación a 80Km cuando se compensa la dispersión cromática.

Tabla 3.26 Distancia Máxima mediante enlaces concatenados. Potencia de transmisión de -8,70 dBm, OSNR_{IN} = 52,95 dB. Red de 8 canales espaciados 100 GHz. Velocidad de Transmisión de 40 Gbps.

Número De Tramos	Distancia Total [Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
1	97	1e-40	24,01	-8,69	53,76
2	194	1,16e-34	21,92	-8,73	54,12
3	291	4,00e-22	19,85	-8,66	53,48
4	388	1,98e-20	19,28	-8,67	53,61
5	485	7,37e-17	18,46	-8,70	54,04
6	582	4,06e-15	17,85	-8,55	53,60
7	679	1,42e-11	16,60	-8,63	53,50
8	776	1,19e-10	16,09	-8,76	54,07

3.3.3 Efecto del ruido de fase del láser

En la Tabla 3.27 se registran los datos medidos para una configuración a 40 Gbps, empleando un enlace de 7 Km. Al igual que para la configuración a 10 Gbps, se puede determinar que para la configuración a 40 Gbps, a medida que aumenta el parámetro FWHM en el láser, los parámetros de calidad BER y factor Q se degradan. Tal degradación se puede observar en las Figuras 3.29 (a) y (b), donde se representan los diagramas del ojo, empleando un FWHM de 0 MHz y un FWHM de 5 MHz, respectivamente.

Tabla 3.27 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de FWHM. Con potencia de transmisión de -5 dBm en un enlace de 7 Km.

FWHM [MHz]	BER	Factor Q [dB]
0	3,11e-31	21,42
1,0	7,46e-31	21,31
2,0	6,79e-30	21,20
3,0	6,22e-29	21,08
4,0	5,59e-28	20,96
5,0	4,74e-27	20,84

Figura 3.29 (a) Diagrama del ojo empleando un tramo de distancia máxima (7 Km) con un FWHM= 0 MHz

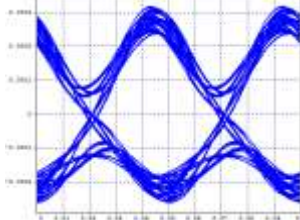
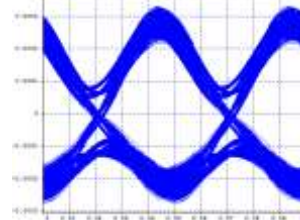


Figura 3.29 (b) Diagrama del ojo empleando un tramo de distancia máxima (7 Km) con un FWHM= 5 MHz



3.3.4 Ruido y Pérdidas por Atenuación

De la misma manera que para la configuración a 10 Gbps, en este caso se varía la distancia en valores cercanos a la máxima longitud de un segmento de red (7 Km). Al realizar la variación de la distancia de 5 Km a 25 Km, se genera un rango de atenuación de 1.25 dB a 6.25 dB.

Para la configuración a 40 Gbps se observa que los parámetros de calidad BER y factor Q se mantienen constantes, pero hay una penalización en la potencia de recepción de 5dB, originada por la atenuación de la fibra y el aumento de la distancia de transmisión (Tabla 3.28).

Tabla 3.28 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones por pérdidas por atenuación y ruido con FWHM=0 MHz. Potencia de Transmisión de -8,70 dB.

Distancia [Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	Penalización [dB]
5	1e-40	31,08	-10,00	1,3
10	1e-40	31,10	-10,96	2,26
15	1e-40	31,10	-12,29	3,59
20	1e-40	31,10	-13,56	4,86
25	1e-40	31,10	-14,85	6,15

3.3.5 Análisis de Dispersión Cromática

(a) Determinación de la máxima tolerancia del formato CSRZ-DQPSK a la dispersión cromática empleando una velocidad de transmisión de 40 Gbps.

Se considera un solo span de 7 Km, no se realiza compensación de la CD y no se tienen en cuenta el ruido y las no linealidades. Reemplazando en la ecuación 3.2 el valor medido en simulación para la máxima constante de CD soportada por la red, se determina la máxima tolerancia a la CD del formato CSRZ-DQPSK en una configuración a 40 Gbps (ecuación 3.7), manteniendo una BER aproximada de $1e-30$ y un factor Q de 20 dB. La Figura 3.30 muestra el efecto de la dispersión cromática en el diagrama del ojo cuando se emplea un coeficiente de CD de (a) $D=0$ ps/nm/Km y (b) $D=17,3$ ps/nm/Km.

$$CD_{max-40\text{ Gbps}} = (7 \text{ [Km]}) \left(17,3 \left[\frac{\text{ps}}{\text{nm.Km}} \right] \right) = 121,1 \left[\frac{\text{ps}}{\text{nm}} \right] \quad (3.7)$$

Figura 3.30 (a) Diagrama del ojo sin efecto de la Dispersión Cromática (CD=0 ps/nm/Km)

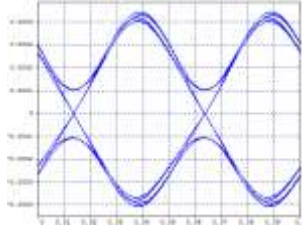
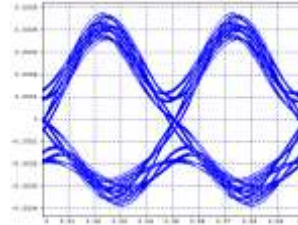


Figura 3.30 (b) Diagrama del ojo con efecto de la Dispersión Cromática (CD=17.3 ps/nm/Km)



Al emplear una velocidad de transmisión de 40 Gbps, la máxima tolerancia a la CD es de 121.1 ps/nm. Teniendo en cuenta que la máxima tolerancia a la CD medida para la configuración a 10 Gbps es de 1496 ps/nm, se puede observar que el formato de modulación CSRZ-DQPSK disminuye notablemente su tolerancia a la dispersión cromática, cuando aumenta la velocidad de transmisión (12 veces menor cuando pasa de 10 a 40 Gbps).

(b) Determinación de los efectos de la compensación de la CD en un span.

Para determinar los efectos de la compensación de la CD en un span, se emplea un segmento de fibra SSMF 28 de 80 Km y se compensa la CD mediante fibra DCF. En las Figuras 3.31 (a) y (b), se observan los diagramas del ojo cuando: (a) se compensa al 100% la CD y (b) se compensa al 75% la CD.

Figura 3.31 (a) Diagrama del Ojo compensando al 100 % la CD en un span de 80 Km. BER = $1e-40$, Factor Q = 24.01 dB.

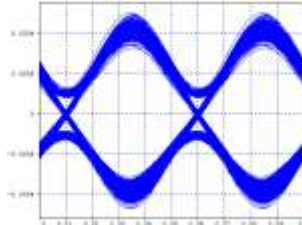
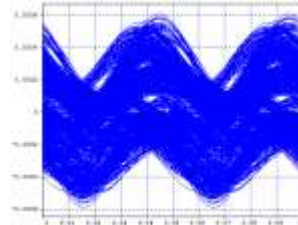


Figura 3.31 (b) Diagrama del Ojo compensando al 75 % la CD en un span de 80 Km. BER = 0.017804, Factor Q = 6.47 dB.



Se determina que para la configuración a 40 Gbps, si se quieren segmentos de fibra estándar de al menos 80 Km, la compensación de la CD debe ser al 100% (Figuras 3.31).

(c) Determinación de los efectos de la compensación de la CD sobre enlaces concatenados.

Se procede a verificar la mejora que se introduce en el desempeño de la red cuando se realiza compensación, teniendo en cuenta un modelo con todas las degradaciones y mediante la implementación de dos enlaces concatenados de 80 Km de fibra estándar SSMF 28, compensando al 100% la CD mediante fibra DCF, para una distancia total de 194 Km. Las Figuras 3.32 (a) y (b), muestran el efecto de compensar la CD en enlaces concatenados, y en la Tabla 3.14 se registran las medidas realizadas para los parámetros de calidad, cuando se realiza y no se realiza compensación de la CD.

Tabla 3.29 Parámetros de monitoreo óptico medidos en segmentos de red concatenados dependientes de la compensación de la CD.

Fibra de Bragg	Distancia Total [Km]	Distancia por Span [Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
Con	194	97	1,16e-34	21,92	-8,73	54,12
Sin	80	80	0,022750	6,02	-8,75	53,83

Figura 3.32 (a) Diagrama del ojo para dos (2) tramos de fibra de 80km concatenados. Con compensación de la CD.

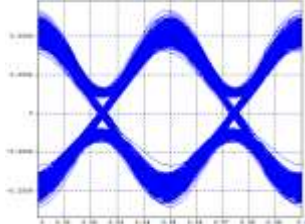
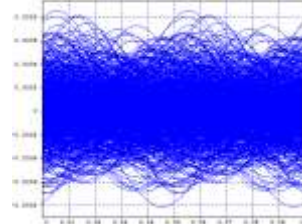


Figura 3.32 (b) Diagrama del ojo para un (1) tramo de fibra de 80km. Sin compensación de la CD.



3.3.6 Análisis de PMD

En las Figuras 3.33 (a) y (b), se observan las graficas de BER versus PMD y factor Q versus PMD, para un enlace de longitud de 7 Km, cuando se emplean valores de coeficiente de PMD cercanos a 0.2 ps/√Km.

Figura 3.33 (a) BER vs PMD. Variando el coeficiente de PMD en valores cercanos a 0.2ps/√Km.

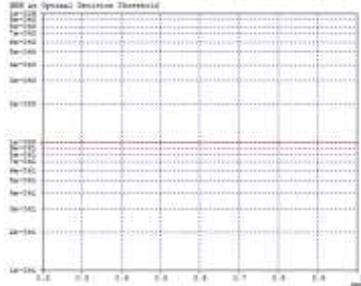
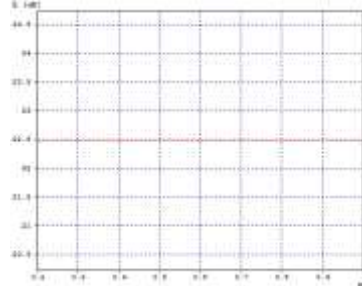


Figura 3.33 (b) Factor Q vs PMD. Variando el coeficiente de PMD en valores cercanos a 0.2ps/√Km.



Los parámetros de monitoreo óptico no cambiaron (BER = 1e-40 y Q = 22,5 dB) cuando se aumento el coeficiente de PMD en valores cercanos a los 0.2 ps/√Km (Figuras 3.33 (a) y (b)). De los resultados obtenidos se puede concluir que el formato de modulación CSRZ-

DQPSK, es tolerante a la PMD para el modelo y la configuración establecida. A continuación se procede a medir cual es la máxima tolerancia del formato de modulación CSRZ-DQPSK frente a la PMD, cuando se emplea una velocidad de transmisión de 40 Gbps. Los resultados obtenidos se registran en la Tabla 3.31.

Tabla 3.30 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la PMD en un span de longitud de 7 Km. P. transmisión= -8.70 dBm.

PMD [ps/√Km]	DGD [ps]	BER	Factor Q [dB]
10	26,45	1e-40	32,84
20	52,91	1e-40	22,70
24	63,49	1e-40	23,64
30	79,37	1,35e-8	14,89
40	105,83	1e-40	32,51
50	132,28	9,96e-14	17,41

Figura 3.34 (a) Diagrama del ojo sin considerar otras degradaciones, con una PMD= 0,2 ps/√Km.

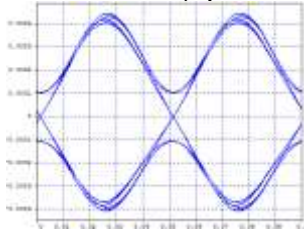


Figura 3.34 (b) Diagrama del ojo sin considerar otras degradaciones, con una PMD= 24 ps/√Km.

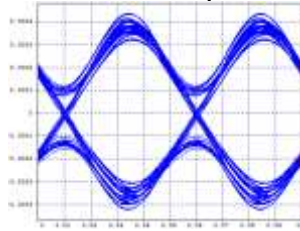
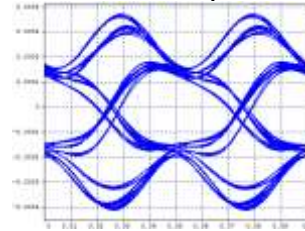


Figura 3.34 (c) Diagrama del ojo sin considerar otras degradaciones, con una PMD= 26 ps/√Km.



Teniendo en cuenta que la máxima tolerancia a la PMD medida para la configuración a 10 Gbps es de 104.64 ps, teóricamente se esperaba para la configuración a 40 Gbps un valor cuatro veces menor del orden de los 26.16 ps, pero como se puede observar en la Tabla 3.31, la máxima PMD soportada por el sistema es del orden de los 63.49 ps (lo cual equivale a una distancia aproximada de 100.000 Km, para una fibra con coeficiente de PMD igual a 0.2 ps/√Km), resultando un efecto poco significativo para la degradación del desempeño de la configuración establecida. En las Figuras 3.34 (a), (b) y (c) se observa la degradación del patrón del ojo, cuando se pasa de un coeficiente de PMD de (a) 0.2 ps/√Km a (b) un valor de 24 ps/√Km y (c) un valor de 26 ps/√Km. También se puede observar que la DGD y por tanto los parámetros de calidad BER y factor Q cambian aleatoriamente con la variación del parámetro seed, generando distorsión de la señal debido a las características birrefringentes de la fibra óptica (Figuras 3.35).

Figura 3.35 (a) Diagrama de la DGD vs Parámetro Fuente (Seed).

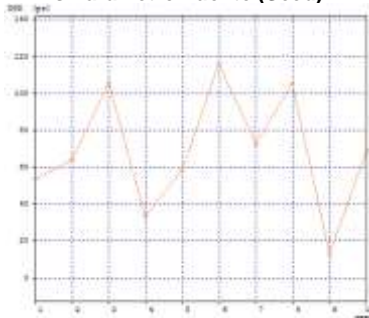


Figura 3.35 (b) BER vs PMD

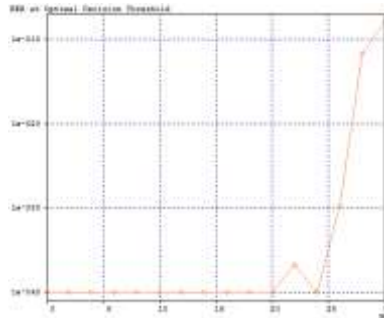
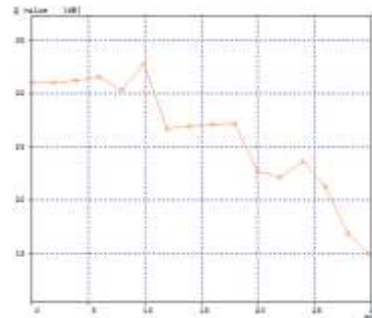


Figura 3.35 (c) Factor Q vs PMD



3.3.7 Análisis del efecto no lineal SPM

Se determina que para un enlace de 7 Km la potencia de transmisión donde es significativo el impacto de SPM es de 22 dBm (ecuación (3.4)). En la Figura 3.36 (a) se observa que para una red mono canal cuando aumenta la potencia de transmisión, aumenta linealmente la potencia en recepción, pero después de los 22 dBm de potencia de transmisión cambia levemente la pendiente de la recta de tal manera que el aumento en la potencia en recepción es un poco más lento. En la Figura 3.36 (b) y (c) se muestran los espectros de salida de la red cuando se emplea una potencia de transmisión de (14, 22 y 32) dBm, en (b) no se tienen en cuenta los fenómenos no lineales y en (c) se observa el efecto del fenómeno no lineal SPM. Posteriormente se varía la potencia de transmisión en la red, empleando un enlace con $D= 17$ ps/nm/Km, hasta medir la potencia a partir de la cual se empieza a notar el efecto de SPM, midiendo para la configuración a 40 Gbps una potencia de 16 dBm a partir de la cual el ensanchamiento del espectro empieza a notarse.

Figura 3.36 (a) Potencia de Recepción Vs Potencia de Transmisión

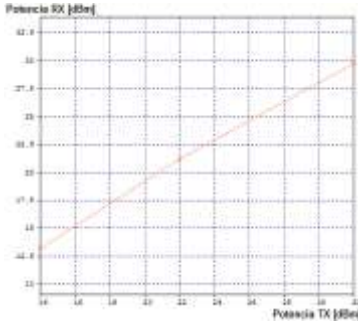


Figura 3.36 (b) Espectros de Salida sin considerar el efecto de SPM

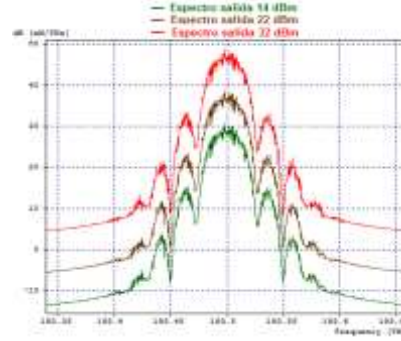
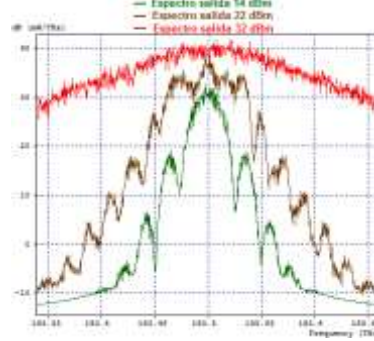


Figura 3.36 (c) Espectros de Salida considerando el efecto de SPM



Para verificar el impacto de SPM cuando se emplea el formato de modulación CSRZ-DQPSK con una velocidad de transmisión de 40 Gbps en la red que se ha venido estudiando, en este análisis se emplea una red WDM de ocho canales con espaciamento de 200 GHz y los parámetros de calidad se monitorean en la frecuencia de 193.5 THz.

Se determina que para la máxima potencia de transmisión establecida en el modelo simplificado de red (16 dBm) el efecto de SPM no es visible en el espectro (Figura 3.37 (b)), ni en la grafica de potencia de recepción versus potencia de transmisión (Figura 3.37 (a)).

Figura 3.37 (a) Potencia en Recepción Vs Potencia de Transmisión.

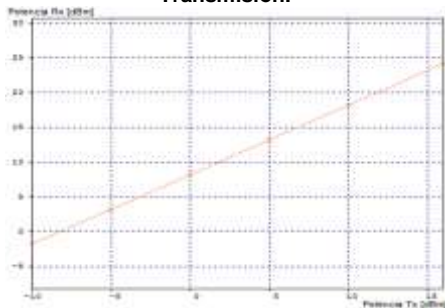
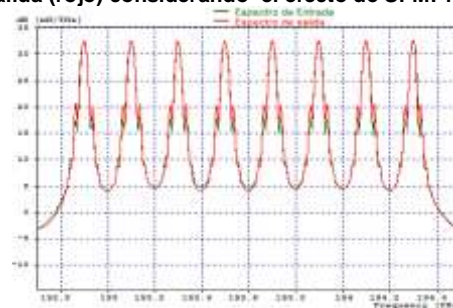


Figura 3.37 (b) Espectros de entrada (verde) y Espectro de salida (rojo) considerando el efecto de SPM. 16dBm.



Después de observar el efecto de aumentar la potencia de transmisión en la red, se realizan pruebas fijando la potencia de transmisión en 16 dBm y se varía el coeficiente de dispersión de la fibra en el régimen de dispersión normal: -17 ps/nm/km y en el régimen de dispersión anómalo 17 ps/nm/km. En la Figura 3.38 (a) se ilustra el espectro de la señal de salida con $D = -17$ ps/nm/Km (espectro verde) y el espectro de la señal de salida con $D = 17$ ps/nm/Km (espectro rojo). Se determina que el implementar el régimen de dispersión normal (Figuras 3.38 (a) y (c)) y anómalo (Figuras 3.38 (a) y (b)), no afecta en mayor medida los parámetros de monitoreo óptico. Teniendo en cuenta las condiciones del modelo simplificado de red ($D = 17$ ps/nm/Km y máxima potencia a la salida del láser de 16 dBm) se determina que SPM no es uno de los efectos degradantes que se debe tener en cuenta mediante la implementación de este formato de modulación para la configuración a 40 Gbps.

Figura 3.38 (a) Espectros de señales de salida resultantes para $D = 17$ ps/nm/Km y para $D = -17$ ps/nm/Km.

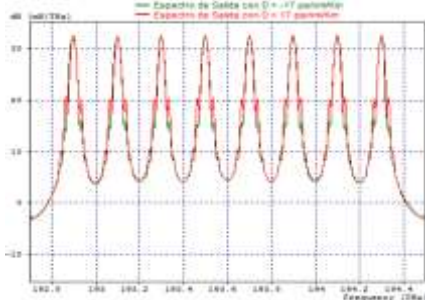


Figura 3.38 (b) Degradación del Diagrama del ojo ocasionada por el efecto de SPM con $D = 17$ ps/nm/Km. (BER = $1e-40$, Q = 29.36 dB)

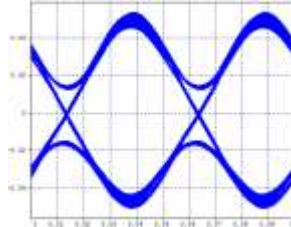
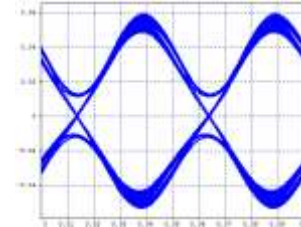


Figura 3.38 (c) Degradación del Diagrama del ojo ocasionada por el efecto de SPM con $D = -17$ ps/nm/Km. (BER = $1e-40$, Q = 27.78 dB)



3.3.8 Análisis del efecto no lineal XPM

Para observar el impacto de XPM en la red que se ha planteado durante el transcurso del análisis de la configuración a 40 Gbps (red de ocho canales con espaciado de 100 GHz y distancia del enlace de 7 Km), se seleccionan como canales de bombeo: $f_1=193.2$ THz, $f_2=193.3$ THz, $f_5=193.6$ THz y $f_6=193.7$ THz y como canales de prueba: $f_3=193.4$ THz, $f_4=193.5$ THz, $f_7=193.8$ THz y $f_8=193.9$ THz. Las medidas se registran para el canal de prueba $f_4= 193.5$ THz. En el desarrollo de este estudio los canales de prueba utilizan una potencia de transmisión de -5 dBm y en los canales de bombeo se varía la potencia de transmisión, manteniendo constante el coeficiente de dispersión de la fibra en $D= 17$ ps/nm/Km.

Figura 3.39 (a) BER vs Potencia de Transmisión de los canales de bombeo. Medida en el canal 193,5 THz

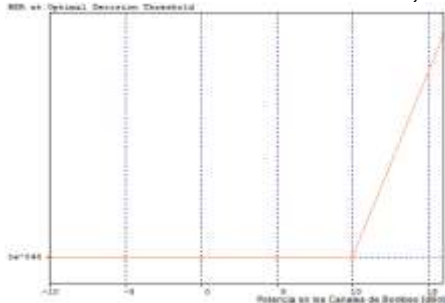


Figura 3.39 (b) Factor Q vs Potencia de Transmisión de los canales de bombeo. Medida en el canal 193,5 THz

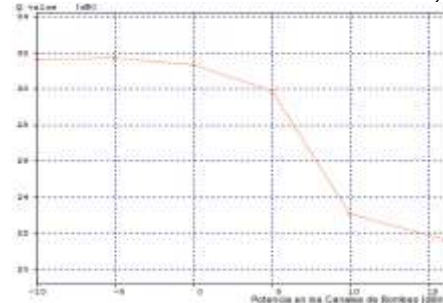


Figura 3.39 (c) Diagrama del ojo con P. Transmisión de -5 dBm. BER= 1e-40, Q= 31.71 dB.

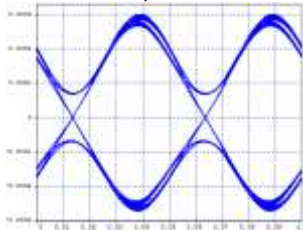


Figura 3.39 (d) Diagrama del ojo con P. Transmisión de 0 dBm. BER= 1e-40, Q=31.35 dB.

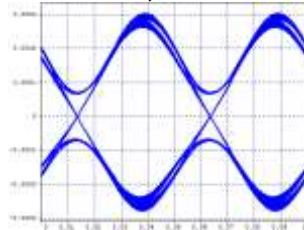
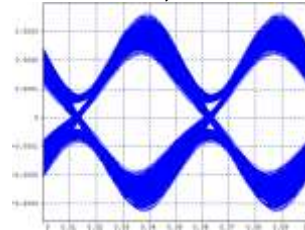


Figura 3.39 (e) Diagrama del ojo con P. Transmisión de 16 dBm. BER= 1.78e-32, Q= 21.71 dB.



Los parámetros de calidad medidos en el canal de prueba $f_2 = 193.5$ THZ, degradan su valor debido al efecto de XPM a partir de una potencia de transmisión de los canales de bombeo de 10 dBm (Figuras 3.39 (a) y (b)). En las Figuras 3.39 (c), (d) y (e), se evidencia la degradación del diagrama del ojo en el canal de prueba debida al efecto de XPM, cuando se aumenta la potencia de transmisión en los canales de bombeo.

Ahora se procede a fijar la potencia de los canales de bombeo en 16 dBm y se varía la constante de dispersión de la fibra, con lo cual se determina que cierta cantidad de dispersión cromática ayuda a compensar el efecto negativo de XPM, tal hecho se ve reflejado en la mejora de los parámetros de calidad BER y factor Q (Figuras 3.40 (a) y (b)).

Figura 3.40 (a) BER vs Coeficiente de Dispersión. P. Transmisión de de los canales de bombeo de 16 dBm.

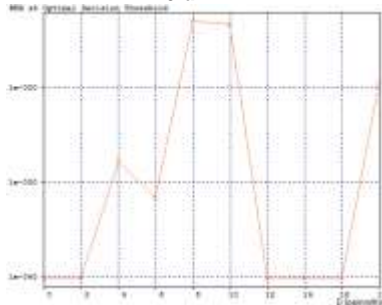


Figura 3.40 (b) Factor Q vs Coeficiente de Dispersión. P. Transmisión de de los canales de bombeo de 16 dBm.

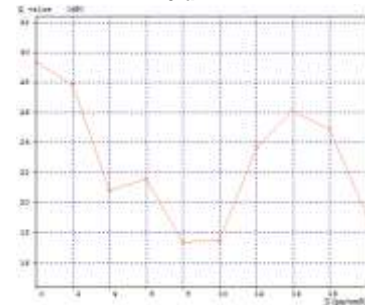


Figura 3.40 (c) Espectro de la señal de salida con $D = 0$ ps/nm/Km. P. Transmisión de los canales de bombeo de 16 dBm.

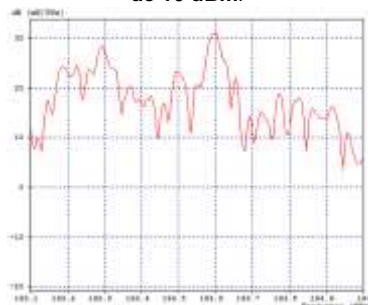
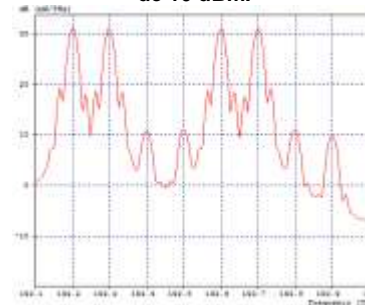


Figura 3.40 (d) Espectro de la señal de salida con $D = 17$ ps/nm/Km. P. Transmisión de los canales de bombeo de 16 dBm.



Para un coeficiente de CD de 0 ps/nm/Km se presenta una total desmejora de la señal que llega al receptor (Figura 3.40 (c)) y para un coeficiente de CD de 17 ps/nm/Km se observa la asimetría del ensanchamiento espectral de los canales de prueba originada por XPM (Figura 3.40 (d)). De esta manera se puede establecer que el formato de modulación

CSRZ-DQPSK para la configuración a 40 Gbps se ve afectado por el efecto no lineal XPM, y es sensible a compensar dicho efecto mediante la CD (Figura 3.40 (c) y (d)).

3.3.9 Análisis del efecto no lineal FWM

Para observar el impacto de este fenómeno en la red que se ha venido estudiando (ocho canales con espaciamiento de 100 GHz, distancia del enlace de 7 Km, velocidad de transmisión por canal de 40Gbps y se monitorea el canal 193.5 THz) se realiza compensación ideal con una fibra de Bragg y se varía la potencia de transmisión. Inicialmente se observa el comportamiento de la red empleando un enlace con constante de dispersión $D = 17$ ps/nm/Km. En las Figuras 3.41 (a), (b) y (c) No se observa la aparición de canales productos de la intermodulación cuando aumenta la potencia de transmisión hasta 16 dBm.

Figura 3.41 (a) Espectro de salida para una señal con P. Transmisión de -5 dBm.

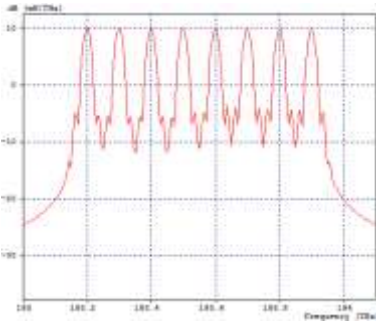


Figura 3.41 (b) Espectro de salida para una señal con P. Transmisión de 0 dBm.

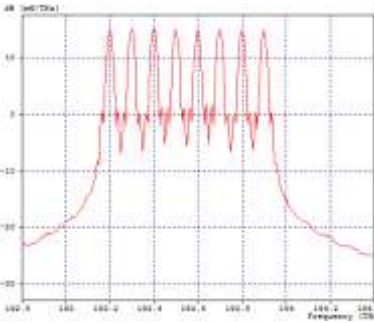
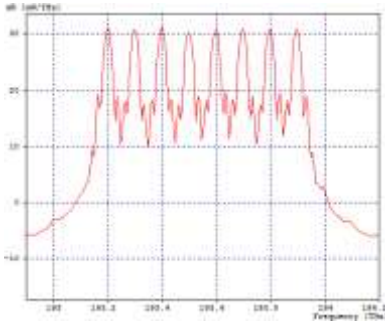


Figura 3.41 (c) Espectro de salida para una señal con P. Transmisión de 16 dBm.



Ahora se procede a fijar la potencia de transmisión de los canales en 16 dBm y se varía el coeficiente de CD de la fibra, con el fin de comprobar si la dispersión cromática es capaz de compensar en parte los efectos negativos de FWM, donde se observa que para un coeficiente de dispersión cromática $D = 0$ ps/nm/Km, el espectro de la señal de salida está totalmente distorsionado (Figura 3.42 (a)) y para $D = 3$ y $D = 18$ ps/nm/Km, se observa que la potencia de los canales no deseados (productos de FWM), han disminuido notablemente su potencia, resultado de la compensación por dispersión del efecto no lineal FWM (Figura 3.42 (b) y (c)).

Figura 3.42 (a) Espectro de la señal de salida. $D = 0$ [ps/nm/Km]. P. Transmisión por canal de 16dBm

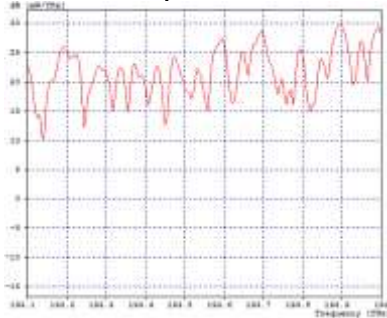


Figura 3.42 (b) Espectro de la señal de salida. $D = 3$ [ps/nm/Km]. P. Transmisión por canal de 16dBm

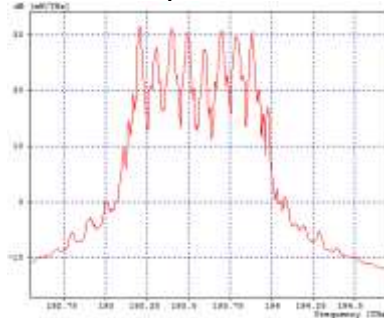


Figura 3.42 (c) Espectro de la señal de salida. $D = 18$ [ps/nm/Km]. P. Transmisión por canal de 16dBm

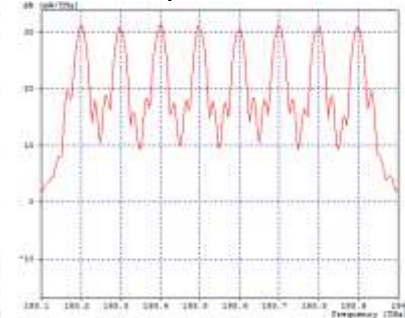


Figura 3.42 (d) Canal 193,5 THz. Potencia de recepción Vs Coeficiente de dispersión de la fibra.

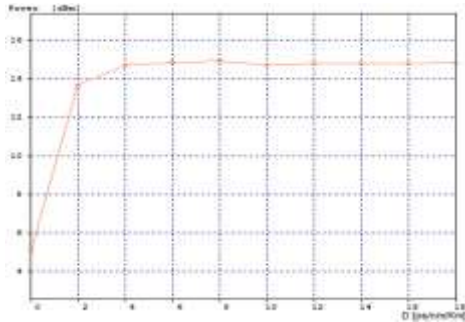
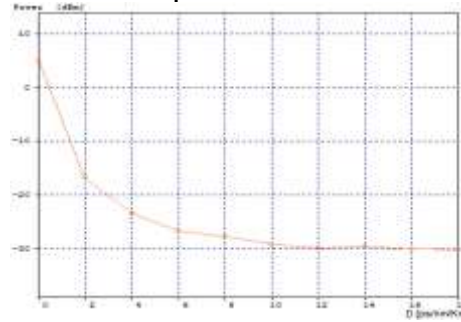


Figura 3.42 (e) Canal 192,9 THz (Producto de Intermodulación). Potencia de recepción Vs Coeficiente de dispersión de la fibra.



La Figura 3.42 (d), muestra cuantitativamente el incremento de la potencia de recepción en el canal $f_2 = 193.5$ THz, resultado de compensar el impacto de FWM en la red, mediante el incremento del coeficiente de dispersión cromática. Según esta figura se observa que después de un valor de dispersión igual a 4 ps/nm/km, la potencia en recepción en el canal tiende a ser un valor constante, es decir que después de este valor, el efecto de la compensación por aumento de la dispersión es poco considerable.

En la Figura 3.42 (e), se ilustra la grafica de potencia en recepción versus coeficiente de dispersión, medida en el canal 192.9 THz (canal producto de la intermodulación). En dicha figura se observa que la potencia en recepción medida cuando se varía el coeficiente de dispersión en un rango de 0 a 18 ps/nm/Km, no está en el rango de la sensibilidad del receptor. Teniendo en cuenta que el modelo simplificado de red emplea la fibra SSMF 28, se puede concluir que para estas condiciones el formato CSRZ DQSK es tolerante a los efectos negativos del fenómeno no lineal FWM.

De acuerdo a lo visto hasta ahora, se puede resumir que el formato de modulación CSRZ-DQPK para la configuración a 40 Gbps (implementando las características establecidas en el modelo simplificado de red): soporta un espaciado mínimo entre canales de 100 GHz (tal limitación fue impuesta por que al disminuir el espaciado entre canales, se presenta solapamiento entre canales adyacentes), es poco tolerante a la CD pero responde favorablemente ante su compensación, es tolerante a la PMD y a los fenómenos no lineales SPM y FWM y es poco tolerante al efecto de ruido de fase del láser y a al fenómeno no lineal XPM. A continuación se re realiza el estudio cuando se emplea en el escenario general de simulación una velocidad de 100 Gbps.

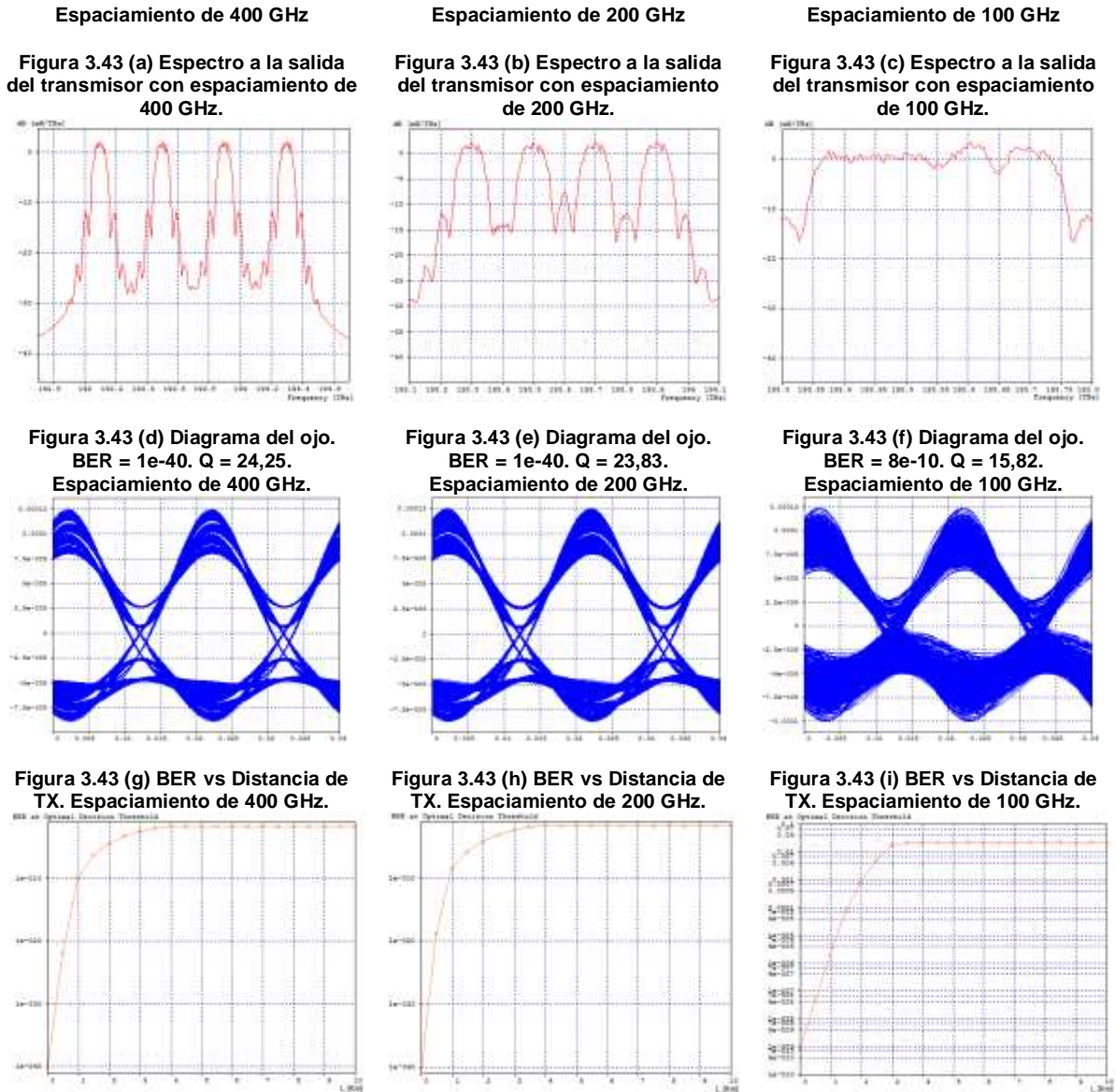
3.4 FORMATO DE MODULACIÓN CSRZ-DQPSK EMPLEANDO UNA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE 100 Gbps

3.4.1 Distancia máxima alcanzable por un segmento de red

La distancia máxima se mide teniendo en cuenta los valores mínimos de los parámetros de calidad establecidos en el modelo simplificado de red. Para realizar esta medida se debe contar con todas las degradaciones típicas de las redes ópticas.

▪ **Caso de estudio uno: Red de cuatro canales**

Figura 3.43 Condiciones Iniciales. Configuración Back to Back para una red de cuatro canales espaciados en 400, 200 y 100 GHz. Velocidad de Transmisión de 100 Gbps.



En la Figura 3.43 se ilustran los espectros, los diagrama del ojo y las graficas de BER versus distancia de transmisión, en una red de cuatro canales espaciados entre sí en 400, 200 y 100 GHz, empleando una velocidad de transmisión de 100 Gbps y una potencia de transmisión de -10 dBm, por canal.

Para los espaciamientos de 400 y 200 GHz, los valores de los parámetros de calidad objetivo se obtienen con una distancia inferior a 1 Km, y con el espaciamiento a 100 GHz los parámetros de calidad justo a la salida del transmisor ya están muy por debajo del los valores establecidos como mínimos (Figura 3.43).

En la Tabla 3.31 se consiguen los datos medidos con el fin de determinar la máxima longitud de un segmento, empleando una red de cuatro canales con espaciamiento de 200 GHz y potencia de transmisión de -10 dBm, en ella se puede determinar que la máxima distancia por span sin compensación de la CD es de 300 mts. Con el fin de establecer si aumentando la potencia del láser se mejoran los valores de los parámetros de calidad y es posible aumentar la distancia del enlace, en la Tabla 3.32 se registran los datos obtenidos para diferentes potencias de transmisión del láser, manteniendo constante la distancia de transmisión en 300 mts, pero como se puede observar en dicha tabla, a medida que se aumenta la potencia de transmisión, los parámetros de calidad BER y factor Q se mejoran pero en unas proporciones muy pequeñas teniendo en cuenta que el aumento de potencia es de 26 dB.

Tabla 3.31 Parámetros de calidad variando la longitud de la fibra. Potencia del láser de -10 dBm. Velocidad de Transmisión de 100 Gbps.

Distancia [mts]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]
200	1,59e-38	22,23	-18,34
300	1,15e-30	21,17	-18,38
400	3,05e-24	20,09	-18,43
500	1,85e-19	19,08	-18,28
600	9,43e-16	18,12	-18,30
700	4,10e-13	17,29	-18,51
800	4,28e-11	16,51	-18,48
900	1,15e-9	15,83	-18,49
1000	4,75e-9	15,35	-18,35

Tabla 3.32 Parámetros de calidad variando la potencia del láser. Velocidad de Transmisión de 100 Gbps. Longitud del enlace de 300 mts.

Potencia [dBm]	BER	Factor Q [dB]	PRX [dBm]
-10	1,15e-30	21,17	-18,38
-5	1,26e-30	21,18	-13,38
0	1,23e-30	21,19	-8,38
5	3,64e-31	21,25	-3,37
10	3,87e-31	21,26	1,61
16	6,09e-33	21,50	7,62

Después de analizar los datos medidos para el caso de estudio propuesto (red de cuatro canales), se puede determinar qué:

- La mayor distancia medida para la cual se consiguen todos los parámetros de calidad objetivo, empleando una velocidad de transmisión de 100 Gbps, y contando con todas las degradaciones presentes en las redes de fibra óptica es de 300 mts.

La notable disminución en la longitud del enlace que se presenta al aumentar la velocidad de transmisión de 10 y 40 Gbps a 100 Gbps, es debida a que muchos de los efectos que se presentan en una transmisión por fibra óptica, incrementan su valor (ver Tabla 3.25). A continuación se procede a determinar cuál es la influencia de las degradaciones ópticas (fenómenos lineales y no lineales), cuando se emplea el formato de modulación CSRZ-DQPSK con una velocidad de transmisión de 100 Gbps. Las mediciones se llevan a cabo en una red WDM de cuatro canales espaciados a 200 GHz, con una potencia de transmisión de -10 dBm, para una distancia de 300 mts, monitoreando los parámetros de calidad en el canal 193,5 THz.

3.4.2 Distancia máxima alcanzable mediante enlaces concatenados

En la Tabla 3.33 se registran los valores medidos de los parámetros de calidad para una velocidad de transmisión de 100Gbps, concatenando tramos de red de 97 Km. Se puede determinar que mediante la técnica empleada (Figura 3.11) no se pueden concatenar segmentos de fibra SSMF 28 de 80 Km de longitud. A continuación se procede a disminuir

el segmento de fibra estándar (lo cual no es económicamente viable), logrando una distancia máxima de 80 Km (dos segmentos de fibra estándar de 40 Km), teniendo en cuenta los valores establecidos como mínimos para los parámetros de calidad. Para esta configuración el segmento de fibra SSMF 28 pasa de 300mt sin compensación a 40 Km cuando se compensa la CD.

Tabla 3.33 Distancia Máxima mediante enlaces concatenados. Potencia de transmisión de -13,06 dBm, OSNR_{IN} = 49,21 dB. Red de 8 canales espaciados 100 GHz. Velocidad de Transmisión de 100 Gbps.

Número De Tramos	Distancia Total [Km]	BER	Factor Q [dB]	P _{RX} [dBm]	OSNR _{OUT} [dB]
1	97	2,52e-13	17,50	-13,26	50,99
2	194	7,45e-8	14,41	-13,27	51,12

3.4.3 Efecto del ruido de fase del láser

Para una red de cuatro canales espaciados a 200 GHz, empleando un enlace de 0.3 Km, se determina que los parámetros de calidad BER y factor Q tienen una pequeña mejoría a medida que aumenta el parámetro FWHM en el láser, debido a que se está empleando un espaciamiento de 200 GHz (Tabla 3.34 y Figura 3.34 (a)).

Para un espaciamiento entre canales de 100 GHz, a pesar de la corta distancia de transmisión (0.3 Km), a medida que aumenta el parámetro FWHM en el láser, los parámetros de calidad BER y factor Q se degradan rápidamente (Tabla 3.35 y Figura 3.34 (b)).

Tabla 3.34 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de FWHM. Red de cuatro canales con espaciamiento de 200 GHz.

FWHM [MHz]	BER	Factor Q [dB]
0	2,32e-29	21,09
1,0	5,26e-30	21,09
2,0	1,10e-30	21,18
3,0	4,16e-31	21,24
4,0	2,30e-31	21,28
5,0	2,13e-31	21,31
6,0	3,20e-31	21,32

Tabla 3.35 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de FWHM. Red de cuatro canales con espaciamiento de 100 GHz.

FWHM [MHz]	BER	Factor Q [dB]
0	1,41e-40	22,77
1,0	5,39e-13	17,23
2,0	1,57e-8	15,01
3,0	5,52e-8	14,50
4,0	1,28e-7	14,24
5,0	1,72e-7	14,14
6,0	1,80e-7	14,14

Figura 3.44 (a) Diagrama del ojo empleando FWHM = 5 MHz. Red de cuatro canales con espaciamiento de 200 GHz.

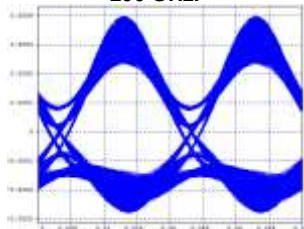
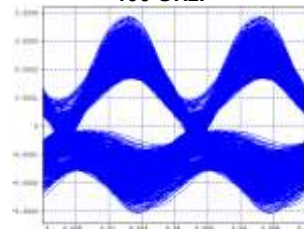


Figura 3.44 (b) Diagrama del ojo empleando FWHM = 5 MHz. Red de cuatro canales con espaciamiento de 100 GHz.



3.4.4 Ruido y Pérdidas por Atenuación: configuración a 100 Gbps

Para la configuración a 100Gbps se varía la distancia de 0.3 Km a 2.1 Km, generando un rango de atenuación de 0.075 dB a 0.525 dB, los datos medidos se registran en la Tabla 3.36. Al igual que en las configuraciones anteriores, los parámetros de calidad BER y

factor Q se mantienen constantes en 1e-40 y 24.08 dB respectivamente, pero la potencia en recepción sufre una penalización de 0.45 dB con el aumento de la distancia.

Tabla 3.36 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las degradaciones por pérdidas por atenuación y ruido con FWHM = 0MHz. Potencia de Transmisión de -13,06 dB.

Distancia [Km]	P _{RX} [dBm]	Penalización [dB]
0,3	-13,13	0,07
0,6	-13,18	0,12
0,9	-13,24	0,18
1,2	-13,30	0,24
1,5	-13,37	0,31
1,8	-13,47	0,41
2,1	-13,59	0,53

3.4.5 Análisis de Dispersión Cromática

(a) Determinación de la máxima tolerancia del formato CSRZ-DQPSK a la dispersión cromática empleando una velocidad de transmisión de 100 Gbps.

Se considera un solo span de 0.3 Km, no se realiza compensación de la CD y no se tienen en cuenta el ruido, la atenuación y las no linealidades. Reemplazando en la ecuación 3.2 el valor medido en simulación para la máxima constante de CD soportada por la red, se determina la máxima tolerancia a la CD del formato CSRZ-DQPSK en una configuración a 100 Gbps (ecuación 3.8), manteniendo una BER aproximada de 1e-30 y un factor Q de 20 dB. La Figura 3.45 evidencia el efecto negativo de la dispersión cromática en el diagrama del ojo cuando se emplea un coeficiente de CD de (a) D=0 ps/nm/Km y (b) D=16,8 ps/nm/Km.

$$CD_{max-100\text{ Gbps}} = (0.3 \text{ [Km]}) \left(16,8 \left[\frac{\text{ps}}{\text{nm.Km}} \right] \right) = 5,04 \left[\frac{\text{ps}}{\text{nm}} \right] \quad (3.8)$$

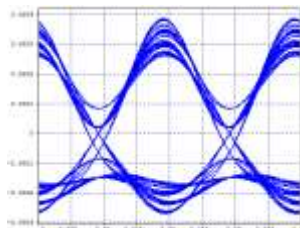


Figura 3.45 (a) Diagrama del ojo sin efecto de la Dispersión Cromática (CD=0 ps/nm/Km)

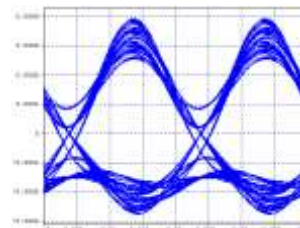


Figura 3.45 (b) Diagrama del ojo con efecto de la Dispersión Cromática (CD=16.8 ps/nm/Km)

Cuando se aumenta la velocidad de transmisión a 100 Gbps, la máxima tolerancia a la CD es de solo 5.04 ps/nm (ecuación 3.8), determinándose de esta manera que el formato de modulación CSRZ-DQPSK para la configuración a 100 Gbps, es poco tolerante a los efectos de la dispersión cromática (297 veces menor con el paso de 10 a 100 Gbps y 24 veces menor con el paso de 40 a 100 Gbps).

(b) Determinación de los efectos de la compensación de la CD en un span.

Para determinar los efectos de la compensación de la CD en un span, se emplea un segmento de fibra SSMF 28 de 80 Km y se compensa la CD mediante 17 Km de fibra DCF. Cuando se compensa al 100% la CD y se miden los parámetros de calidad, se

comprueba que están por debajo del mínimo establecido (Figura 3.46 (a)), por tal razón se procede a disminuir el segmento de fibra estándar hasta encontrar una distancia que asegure una BER de $1e-30$ y un factor Q de 20 dB. Se procede a realiza la grafica de BER vs Distancia de transmisión compensando al 100% la CD, midiéndose una distancia de 49 Km hasta la cual se cumplen los parámetros de calidad (Figura 3.46 (b)). En la Figura 3.46 (c) se observa el diagrama del ojo cuando se emplea un segmento de fibra SSMF 28 de 49 Km y un tramo de fibra DCF de 10.41 km.

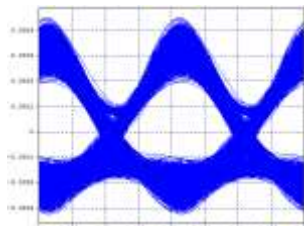


Figura 3.46 (a) Diagrama del Ojo compensando al 100% la CD un Span de 80 Km.
BER = $2,52e-13$, Q= 17,50.

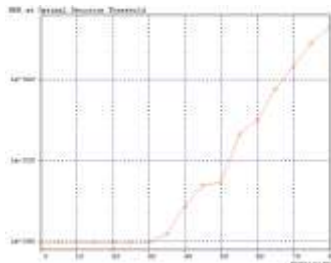


Figura 3.46 (b) BER vs Distancia de TX compensando al 100% la CD.

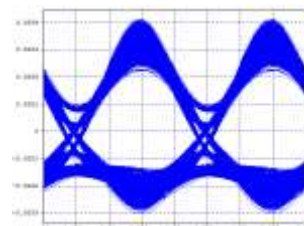


Figura 3.46 (c) Diagrama del Ojo compensando al 100% la CD un Span de 49 Km.
BER = $1,50e-31$, Q= 21,44.

3.4.6 Análisis de PMD

En las Figuras 3.47 (a) y (b) se observan las graficas de BER versus PMD y factor Q versus PMD, para un enlace de longitud de 0.3 Km, cuando se emplean valores de coeficiente de PMD cercanos a $0.2ps/\sqrt{Km}$.

Figura 3.47 (a) BER vs PMD. Variando el coeficiente de PMD en valores cercanos a $0.2ps/\sqrt{Km}$.

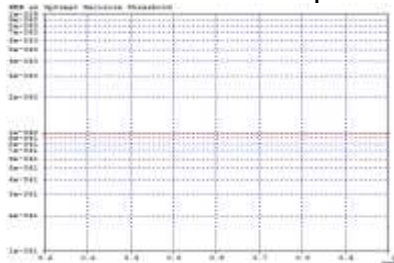
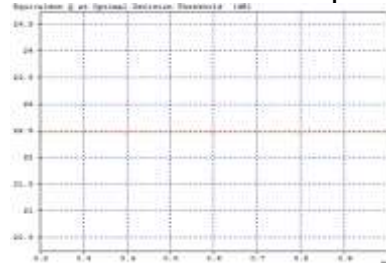


Figura 3.47 (b) Factor Q vs PMD. Variando el coeficiente de PMD en valores cercanos a $0.2ps/\sqrt{Km}$.



Los parámetros de monitoreo óptico no cambiaron (BER = $1e-40$ y Q = 22,5 dB) cuando se aumento el coeficiente de PMD en valores cercanos a los $0.2 ps/\sqrt{Km}$ (Figuras 3.47 (a) y (b)). De los resultados obtenidos se puede concluir que el formato de modulación CSRZ-DQPSK, es tolerante a la PMD para el modelo y la configuración establecida.

A continuación se procede a verificar cual es la máxima tolerancia del formato de modulación CSRZ-DQPSK frente a la PMD. Los resultados obtenidos se registran en la Tabla 3.37. Teniendo en cuenta que la máxima tolerancia a la PMD medida para la configuración a 40 Gbps es de 63.49 ps, teóricamente se esperaba para la configuración a 100 Gbps un valor 2.5 veces menor del orden de los 25 ps y como se puede observar en la Tabla 3.37, la máxima PMD soportada por el sistema es del orden de los 24.09 ps (lo cual equivale a una distancia aproximada de 14000 Km, para una fibra con coeficiente de PMD igual a $0.2 ps/\sqrt{Km}$), resultando un efecto poco significativo para la degradación del desempeño de la configuración establecida. En las Figuras 3.48 (a) y (b) se observa la

degradación del patrón del ojo, cuando se pasa de un coeficiente de PMD de (a) 0.2 ps/√Km a (b) un valor de 44 ps/√Km.

Tabla 3.37 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la PMD en un Span de longitud de 0.3 Km. P. transmisión= -13.06 dBm.

PMD [ps/√Km]	DGD [ps]	BER	Factor Q [dB]
10	5,47	1e-40	23,73
20	10,95	1e-40	23,79
30	16,43	1e-40	27,77
40	21,90	1e-40	25,70
44	24,09	3,23e-30	21,30
50	27,38	1e-40	24,04

Figura 3.48 (a) Diagrama del ojo para un Span de longitud de 0.3 Km, sin considerar otras degradaciones, con una PMD = 0.2 ps/√Km.

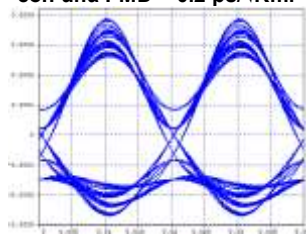
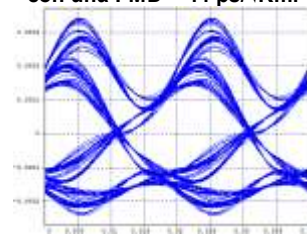


Figura 3.48 (b) Diagrama del ojo para un Span de longitud de 0.3 Km, sin considerar otras degradaciones, con una PMD = 44 ps/√Km.



Para la configuración a 100 Gbps, se observa que los parámetros de calidad BER y factor Q cambian aleatoriamente debido a las características birrefringentes de la fibra óptica (Figuras 3.49 (a) y (b)).

Figura 3.49 (a) BER vs PMD

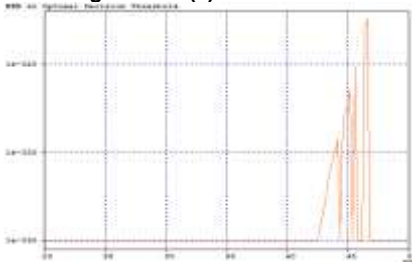
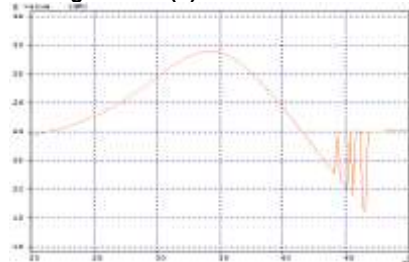


Figura 3.49 (b) Factor Q vs PMD



3.4.7 Análisis del efecto no lineal SPM

Se determina que para un enlace de 0.3 Km la potencia de transmisión donde es significativo el impacto de SPM es de 35 dBm (ecuación (3.4)). En la Figura 3.50 (a) se observa que para una red mono canal cuando aumenta la potencia de transmisión, aumenta linealmente la potencia en recepción y la pendiente de la recta siempre es la misma (incluso con altas potencias de transmisión). En las Figuras 3.50 (b) y (c) se muestran los espectros de salida de la red cuando se emplea una potencia de transmisión de (28, 34 y 40) dBm, en (b) no se tienen en cuenta los fenómenos no lineales y en (c) se observa el efecto del fenómeno no lineal SPM. Posteriormente se varía la potencia de transmisión en la red, empleando un enlace con $D= 17$ ps/nm/Km, hasta medir la potencia a partir de la cual se empieza a notar el efecto de SPM, midiendo para la configuración a

100 Gbps una potencia de 26 dBm a partir de la cual el ensanchamiento del espectro empieza a notarse.

Figura 3.50 (a) Potencia de Recepción Vs Potencia de Transmisión

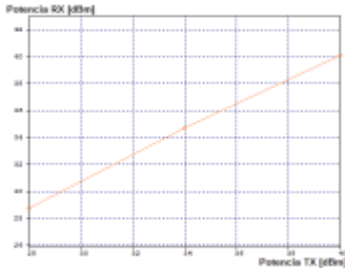


Figura 3.50 (b) Espectros de Salida sin considerar el efecto de SPM

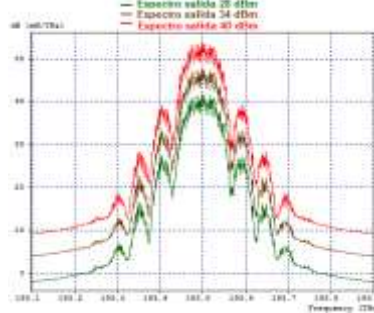
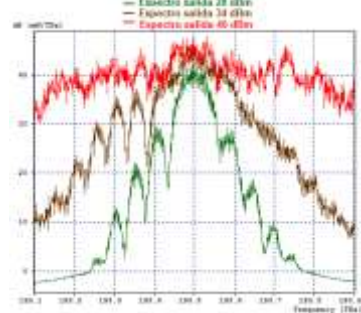
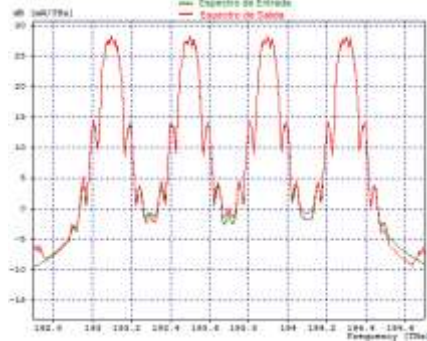


Figura 3.50 (c) Espectros de Salida considerando el efecto de SPM



Para verificar el impacto de SPM cuando se emplea el formato de modulación CSRZ-DQPSK con una velocidad de transmisión de 100 Gbps en la red que se ha venido estudiando, en este análisis se emplea una red WDM de cuatro canales con espaciamento de 400 GHz y los parámetros de calidad se monitorean en la frecuencia de 193.5 THz. En la Figura 3.51 se ilustra el espectro de entrada (espectro verde) y el espectro de salida (espectro rojo) empleando una potencia de transmisión de 16 dBm. Se determina que para la máxima potencia de transmisión establecida en el modelo simplificado de red el efecto de SPM no es notorio en el espectro (Figura 3.51).

Figura 3.51 Espectro de entrada (verde) y Espectro de salida (rojo) considerando el efecto de SPM. PTX de 16 dBm.



Después de observar el efecto de aumentar la potencia de transmisión en la red, se realizan pruebas fijando la potencia de transmisión en 16 dBm y se varía el coeficiente de dispersión de la fibra en el régimen de dispersión normal: -17 ps/nm/km y en el régimen de dispersión anómalo 17 ps/nm/km. En la Figura 3.52 (a) se ilustra el espectro de la señal de salida con $D = -17$ ps/nm/Km (espectro verde) y el espectro de la señal de salida con $D = 17$ ps/nm/Km (espectro rojo). Se establece que el implementar el régimen de dispersión normal y anómalo, no afecta en mayor medida los parámetros de monitoreo óptico (Figuras 3.52 (a), (b) y (c)). Teniendo en cuenta las condiciones del modelo simplificado de red ($D = 17$ ps/nm/Km y máxima potencia a la salida del láser de 16 dBm) se determina que SPM no es uno de los efectos degradantes que se debe tener en cuenta mediante la implementación de este formato de modulación para la configuración a 100 Gbps.

Figura 3.52 (a) Espectros de señales de salida resultantes para $D = 17$ ps/nm/Km y para $D = -17$ ps/nm/Km.

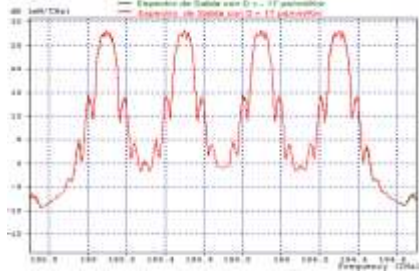


Figura 3.52 (b) Degradación del Diagrama del ojo ocasionada por el efecto de SPM con $D = 17$ ps/nm/Km. (BER = $1e-40$, Q = 24.48 dB)

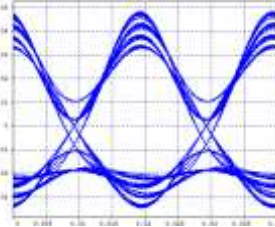
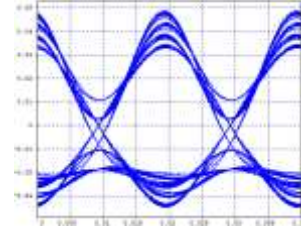


Figura 3.52 (c) Degradación del Diagrama del ojo ocasionada por el efecto de SPM con $D = -17$ ps/nm/Km. (BER = $1e-40$, Q = 24.4 dB)



3.4.8 Análisis del efecto no lineal XPM

Para observar el impacto de XPM en la red que se ha planteado durante el transcurso del análisis de la configuración a 100 Gbps (red de cuatro canales con espaciamiento de 200 GHz y distancia del enlace de 0.3 Km), se seleccionan como canales de bombeo: $f_1 = 193.3$ THz y $f_4 = 193.9$ THz y como canales de prueba: $f_2 = 193.5$ THz y $f_3 = 193.7$ THz. Las medidas se registran para el canal de prueba $f_2 = 193.5$ THz. En el desarrollo de este estudio los canales de prueba utilizan una potencia de transmisión de -5 dBm y en los canales de bombeo se varía la potencia de transmisión, manteniendo constante el coeficiente de dispersión de la fibra en $D = 17$ ps/nm/Km. Los valores objetivo de los parámetros de calidad (BER = $1e-30$ y $Q = 20$ dB) en el canal de prueba $f_2 = 193.5$ THz, se consiguen hasta una potencia de transmisión de los canales de bombeo de 5 dBm (Figuras 3.53 (a) y (b)), a partir de este valor los parámetros de calidad decaen rápidamente debido al efecto de XPM. Las Figuras 3.53 (c), (d) y (e), muestran la degradación del diagrama del ojo en el canal de prueba debida al efecto de XPM, cuando se aumenta la potencia de transmisión en los canales de bombeo.

Figura 3.53 (a) BER vs Potencia de Transmisión de los canales de bombeo. Medida en el canal 193,5 THz

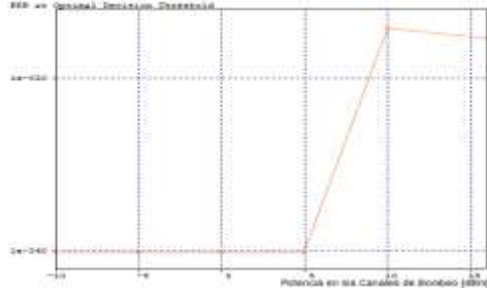


Figura 3.53 (b) Factor Q vs Potencia de Transmisión de los canales de bombeo. Medida en el canal 193,5 THz

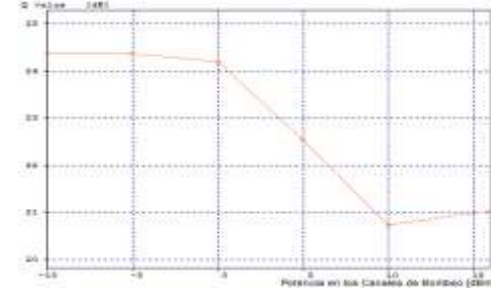


Figura 3.53 (c) Diagrama del ojo con P. Transmisión de -5 dBm. BER = $1e-40$, Q = 24.37 dB.

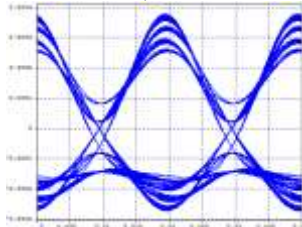


Figura 3.53 (d) Diagrama del ojo con P. Transmisión de 0 dBm. BER = $1e-40$, Q = 24.20 dB.

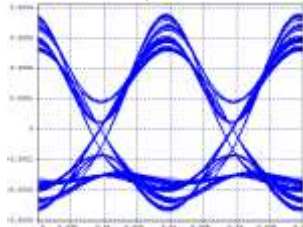
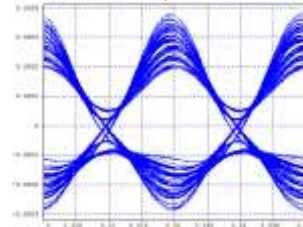


Figura 3.53 (e) Diagrama del ojo con P. Transmisión de 16 dBm. BER = $2.31e-28$, Q = 21.03 dB.



Ahora se procede a fijar la potencia de los canales de bombeo en 16 dBm y se varía la constante de dispersión de la fibra, con lo cual se observa que una pequeña cantidad de dispersión cromática de 2 ps/nm/Km, ayuda a compensar el efecto negativo de XPM, pero cuando aumenta el valor del coeficiente de dispersión, los parámetros de calidad BER y factor Q, tienden a degradarse (3.54 (a) y (b)).

Figura 3.54 (a) BER vs Coeficiente de Dispersión. P. Transmisión de de los canales de bombeo de 16 dBm.

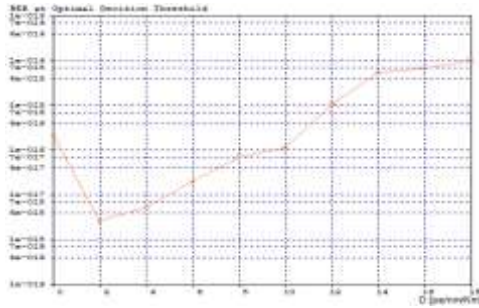


Figura 3.54 (b) Factor Q vs Coeficiente de Dispersión. P. Transmisión de de los canales de bombeo de 16 dBm.

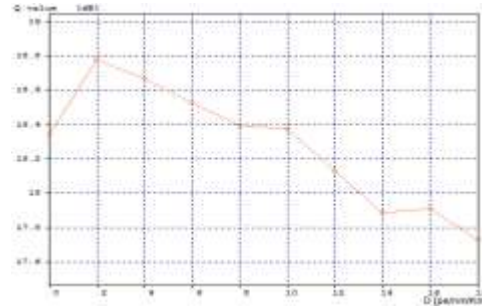


Figura 3.54 (c) Espectro de la señal de salida con D = 0 ps/nm/Km. P. Transmisión de los canales de bombeo de 16 dBm.

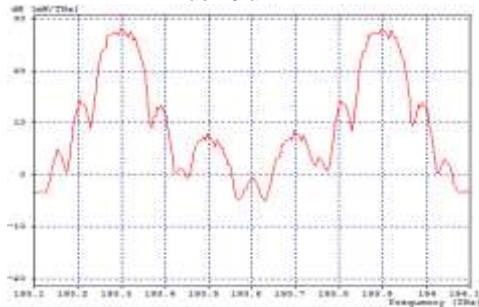
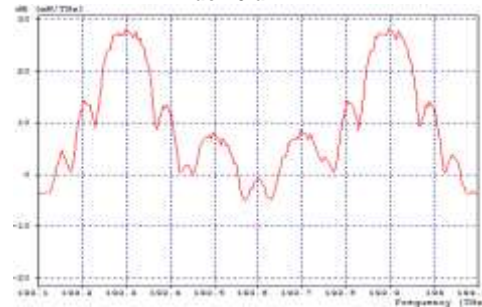


Figura 3.54 (d) Espectro de la señal de salida con D = 17 ps/nm/Km. P. Transmisión de los canales de bombeo de 16 dBm.



En la Figura 3.54 (c) se representa el espectro de salida cuando se emplea un coeficiente de dispersión de 0 ps/nm/Km y en la Figura 3.54 (d) se representa el espectro de salida cuando se emplea un coeficiente de dispersión de 17 ps/nm/Km, en dichas figuras se observa la asimetría del ensanchamiento espectral de los canales de prueba originada por XPM. Al comparar la Figura 3.54 (c) con la (d), no se observan cambios que indiquen que el aumento del coeficiente de dispersión compense el efecto negativo de XPM.

3.4.9 Análisis del efecto no lineal FWM

Para observar el impacto de este fenómeno en la red que se ha venido estudiando (cuatro canales con espaciamento de 200 GHz, distancia del enlace de 0.3 Km, velocidad de transmisión por canal de 100Gbps y se monitorea el canal 193.5 THz) se realiza compensación ideal con una fibra de Bragg y se varía la potencia de transmisión. Inicialmente se observa el comportamiento de la red empleando un enlace con constante de dispersión D = 17 ps/nm/Km.

Se procede a graficar el espectro de entrada (espectro verde) sobrepuesto al espectro de salida (espectro rojo), empleando diferentes potencias de transmisión, con lo cual no se evidencia el efecto negativo de FWM, debido a que No se observa la presencia de los

productos de intermodulación cuando se aumenta la potencia de transmisión (Figuras 3.55 (a), (b) y (c)).

Figura 3.55 (a) Espectro de salida para una señal con P. Transmisión de -5 dBm.

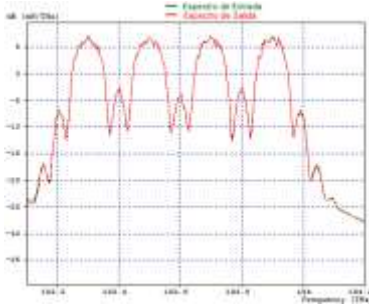


Figura 3.55 (b) Espectro de salida para una señal con P. Transmisión de 0 dBm.

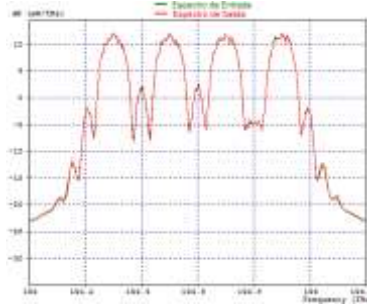
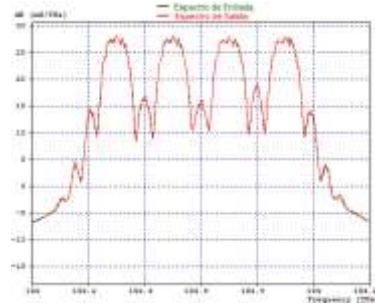


Figura 3.55 (c) Espectro de salida para una señal con P. Transmisión de 16 dBm.



Ahora se procede a fijar la potencia de transmisión de los canales en 16 dBm y se varía el coeficiente de CD de la fibra. Para un coeficiente de dispersión cromática $D = 0$ ps/nm/Km, en el espectro se notan los canales no deseados ocasionados por el efecto de FWM (Figura 3.56 (a)). Para un coeficiente de dispersión cromática $D = 17$ ps/nm/Km, la potencia de los canales productos de FWM disminuyen su potencia hasta el punto de desaparecer, resultado de la compensación por dispersión del efecto no lineal FWM (Figura 3.56 (b)).

Figura 3.56 (a) Espectro de la señal de salida para un enlace con coeficiente de dispersión $D = 0$ [ps/nm/Km]. P. Transmisión por canal de 16 dBm.

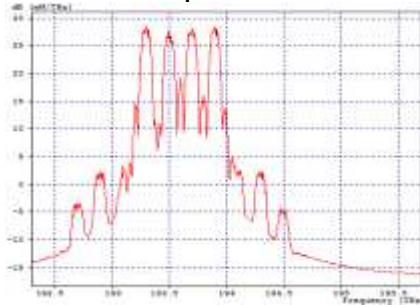


Figura 3.56 (b) Espectro de la señal de salida para un enlace con coeficiente de dispersión $D = 18$ [ps/nm/Km]. P. Transmisión por canal de 16 dBm.

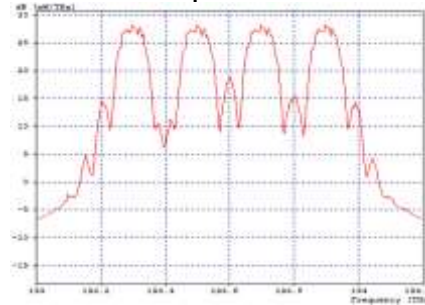


Figura 3.56 (c) Canal 193,5 THz. Potencia de recepción Vs Coeficiente de dispersión de la fibra.

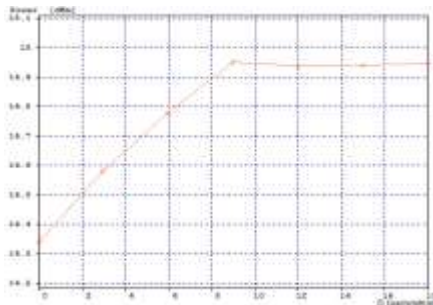
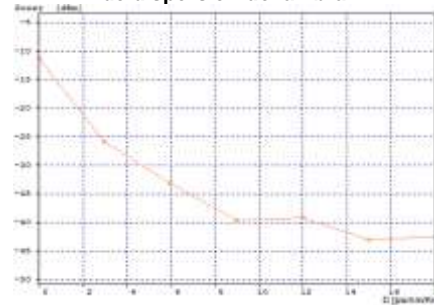


Figura 3.56 (d) Canal 192,9 THz (Producto de Intermodulación). Potencia de recepción Vs Coeficiente de dispersión de la fibra.



La Figura 3.56 (c), muestra cuantitativamente el incremento de la potencia de recepción en el canal $f_2 = 193.5$ THz, resultado de compensar el impacto de FWM en la red, mediante el incremento del coeficiente de dispersión cromática. En la Figura 3.56 (d), se ilustra la grafica de potencia en recepción versus coeficiente de dispersión, medida en el canal 192.9 THz (canal producto de la intermodulación). En dicha figura se observa que la potencia en recepción medida para un coeficiente de dispersión de 17 ps/nm/Km, no está en el rango de la sensibilidad del receptor. Teniendo en cuenta que el modelo simplificado de red emplea una fibra SSMF 28, se puede concluir que para estas condiciones el formato CSRZ-DQPSK es tolerante a los efectos negativos del fenómeno no lineal FWM.

De acuerdo a lo visto hasta ahora, se puede resumir que el formato de modulación CSRZ-DQPSK para la configuración a 100 Gbps (implementando las características establecidas en el modelo simplificado de red): soporta un espaciado mínimo entre canales de 200 GHz (tal limitación fue impuesta por que al disminuir el espaciado entre canales, se presenta solapamiento entre canales adyacentes), es poco tolerante a la CD pero responde favorablemente ante su compensación, es tolerante a la PMD y a los fenómenos no lineales SPM y FWM y es poco tolerante al efecto de ruido de fase del láser y a al fenómeno no lineal XPM. A continuación se re realiza un resumen de los principales resultados obtenidos en el transcurso de trabajo, para las tres configuraciones (con sus respectivos casos de estudio) implementadas en el escenario general de simulación.

3.5 RECOPIACIÓN DE LAS MEDICIONES REALIZADAS SOBRE DISTINTAS TASAS BINARIAS

Después de evaluar en el escenario general de simulación, las principales degradaciones presentes en las redes WDM (para las configuraciones a 10, 40 y 100 Gbps), y después de analizar mediante los parámetros de calidad (factor Q, BER, OSNR, potencia del canal óptico y diagrama del ojo) el impacto de tales degradaciones sobre la red, a continuación se procede a resumir toda la información obtenida en el transcurso del trabajo. En la Tabla 3.38 se registran los valores medidos para los principales parámetros de desempeño de la red.

Tabla 3.38 Valores medidos de los parámetros de desempeño de la red.

Parámetro	Configuración a 10 Gbps	Configuración a 40 Gbps	Configuración a 100 Gbps
Distancia de evaluación de los parámetros [Km]	80	7.0	0.3
Distancia máxima alcanzable mediante enlaces concatenados [Km]	582	194	59.41
Máxima CD soportada por la red [ps/nm]	1496	121.1	5.04
Máxima DGD soportada por la red [ps]	104.64	63.49	24.09

Del análisis realizado para cada uno de los fenómenos lineales y no lineales, se puede establecer que el parámetro que más afecta el desempeño de las redes que implementan el formato de modulación CSRZ-DQPSK a 10, 40 y 100 Gbps, es la dispersión cromática, pero presenta la ventaja que responde favorablemente a la compensación de dicha

degradación, requiriendo para mejorar sus prestaciones el uso de dispositivos de compensación.

Una vez se realiza compensación de la dispersión cromática se pueden conseguir segmentos de red mucho más largos, convirtiendo a las pérdidas de potencia debidas a la atenuación de la fibra como el parámetro limitante en la longitud de un segmento de red. Requiriendo en este caso el uso de dispositivos amplificadores que compensen las pérdidas de potencia por atenuación.

Como es de esperarse, el uso de dispositivos amplificadores conlleva a la presencia de ruido ASE, quien es en ultimas el parámetro que limita la distancia máxima alcanzable mediante enlaces concatenados, resultando un formato poco tolerante al ruido (tanto ASE como FWHM).

Es de anotar que los datos registrados en la Tabla 3.38, se midieron con una baja potencia de transmisión del láser (-5 dBm), con el fin de observar un fenómeno en específico y evitar la presencia de los fenómenos no lineales, cuyo efecto queda de manifiesto en la Figura 3.10 para la configuración a 10 Gbps, Figura 3.27 para la configuración a 40 Gbps y Tabla 3.32 para la configuración a 100 Gbps, donde se observa que el formato de modulación CSRZ-DQPSK es altamente sensible al aumento de la potencia de transmisión.

Posteriormente se realiza el estudio de los fenómenos no lineales, variando la potencia de transmisión en la red en un rango de -10 a 16 dBm, tal y como se establece en el modelo simplificado de red. En la Tabla 3.39 se resumen los resultados obtenidos en simulación, para el formato de modulación CSRZ-DQPSK frente a los fenómenos no lineales.

Tabla 3.39 Tolerancia del formato de modulación CSRZ-DQPSK frente a los fenómenos no lineales.

Fenómeno No Lineal	Configuración a 10 Gbps	Configuración a 40 Gbps	Configuración a 100 Gbps
SPM	Poco Tolerante	Tolerante	Tolerante
XPM	Poco Tolerante	Poco Tolerante	Poco Tolerante
FWM	Tolerante	Tolerante	Tolerante

Para medir el efecto no lineal SPM empleando un enlace con $D= 17$ ps/nm/Km, se varía la potencia de transmisión hasta medir la potencia a partir de la cual se empieza a notar el efecto de SPM (solo en este caso se emplearon potencias mayores a las establecidas en el modelo simplificado de red), midiendo para la configuración a 10 Gbps una potencia de 12 dBm a partir de la cual el ensanchamiento del espectro empieza a notarse, para la configuración a 40 Gbps una potencia de 16 dBm y para la configuración a 100 Gbps una potencia de 26 dBm a partir de la cual el ensanchamiento del espectro empieza a notarse.

Cuando se midió el efecto no lineal XPM, se obtuvo para las configuraciones a 10 y 100 Gbps que los valores objetivo de los parámetros de calidad ($BER= 1e-30$ y $Q= 20$ dB) en el canal de prueba $f_2= 193.5$ THZ, se consiguen hasta una potencia de transmisión de los canales de bombeo inferior a los 5 dBm y para la configuración a 40 Gbps los valores objetivo se consiguen hasta una potencia de transmisión de los canales de bombeo inferior a los 10 dBm.

De los datos obtenidos cuando se mide el fenómeno FWM, se obtiene que para las condiciones establecidas en el modelo simplificado de red ($D= 17$ ps/nm/Km y máxima potencia de transmisión del láser de 16 dBm), el formato de modulación CSRZ-DQPSK es tolerante a dicha degradación no lineal para las velocidades de transmisión de 10, 40 y 100 Gbps.

Es de anotar que la implementación del formato de modulación CSRZ-DQPSK, conlleva el empleo de filtros eléctricos y ópticos, los cuales reducen en gran medida el efecto de los fenómenos no lineales, pero como es de esperar el uso de filtros, amplificadores y compensadores aumenta considerablemente el costo de la red.

Mediante el análisis del desempeño del formato de modulación CSRZ-DQPSK y su implementación a nivel de simulación se pudo comprobar la complejidad que introduce en la red el empleo de dicho formato de modulación. Al iniciar este capítulo, en la sección 3.1.1, se realiza el análisis del receptor DQPSK, de cuyas limitaciones se puede concluir que para altas velocidades de transmisión sería recomendable emplear formatos de modulación con detección coherente como el PM-QPSK¹³ (*Polarization Multiplexed-Quadrature Phase Shift Keying*) [69], [70], [71].

3.6 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS PARA CUMPLIR CON ESTÁNDARES MÍNIMOS DE DESEMPEÑO.

A continuación se presentan una recopilación de las características técnicas mínimas (número de canales, longitud de onda de trabajo, espaciamiento entre canales, entre otros) de funcionamiento de las redes WDM a 10, 40 y 100 Gbps que implementan el formato CSRZ-DQPSK, para cumplir con los estándares mínimos de desempeño¹⁴.

Configuración a 10 Gbps.

En el desarrollo de las simulaciones se operó con 4, 8 y 16 canales, espaciados a 1.6, 0.8 y 0.4 nm, en la banda C alrededor de los 1550 nm. Un aspecto para resaltar es el hecho de que el número máximo de canales WDM cuyo desempeño es satisfactorio, se determinó considerando que la mínima longitud aceptable por span es de 80 Km (sin compensar la dispersión cromática).

Para la configuración a 10 Gbps se determinó que con el aumento del número de canales, la disminución de la separación de los canales y el aumento de la potencia de transmisión, disminuye la longitud del enlace que cumple con los parámetros de calidad mínimos establecidos, debido al efecto de las no linealidades. Teniendo en cuenta estas consideraciones, en la Tabla 3.40 se hace un resumen de los criterios obtenidos a partir de simulación (Tablas 3.3 a 3.11), para el formato CSRZ-DQPSK con velocidad de transmisión a 10 Gbps.

13 La modulación PM-QPSK consiste en transmitir dos modulaciones QPSK, una en cada modo de polarización de la luz. De este modo es posible transmitir 4 bits en cada periodo de tiempo lo que posibilita una tasa de transmisión total de 100Gbps con tan solo una tasa binaria de 25Gbps.

14 Especificados en el modelo simplificado de red para redes comerciales (BER= $1e-30$, Q= 20 dB).

Tabla 3.40 Red de mayor capacidad¹⁵ obtenida a partir de simulación para el formato de modulación CSRZ-DQPSK empleando una velocidad de transmisión de 10 Gbps. Sin Compensar la CD.

Máximo número de canales	8 canales
Separación entre canales	100
Distancia por span	80 Km
Máxima distancia mediante enlaces Concatenados	582 Km
Potencia óptima de transmisión	- 5 dBm

Considerando que para el formato de modulación CSRZ-DQPSK la dispersión cromática limita en gran medida el alcance máximo y por lo tanto la capacidad máxima de la red, y teniendo en cuenta que el formato responde favorablemente ante la compensación de la dispersión cromática, es posible aumentar la capacidad de la red mediante el uso de técnicas de compensación de dispersión cromática. A continuación se determina la máxima capacidad de la red, cuando se emplea el formato de modulación CSRZ-DQPSK, en la configuración a 10 Gbps, compensando la dispersión cromática mediante fibra DCF.

- **Distancia máxima de un span compensado**

Anteriormente en las Tablas 3.7 a 3.11 donde se registran los datos para ocho y dieciséis canales, se observa que la capacidad máxima de la red fue limitada porque la distancia máxima por span era inferior a 80 Km, ahora se procede a emplear una red de ocho canales, compensando un span de 80 Km de fibra estándar, mediante fibra DCF al 75 % de compensación y se varía la separación entre canales. Los espectros de las señales de salida de la red se observan en la Figura 3.57 para una separación entre canales de (a) 100 GHz (b) 50 GHz y (c) 25 GHz.

Figura 3.57 (a) TX con 8 Canales. Enlace compensado. Separación 100 GHz.

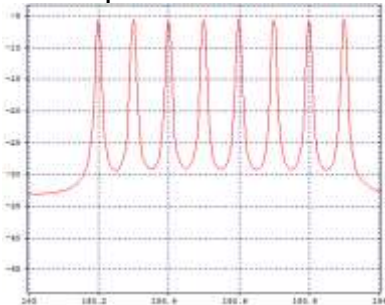


Figura 3.57 (b) TX con 8 Canales. Enlace compensado. Separación 50 GHz.

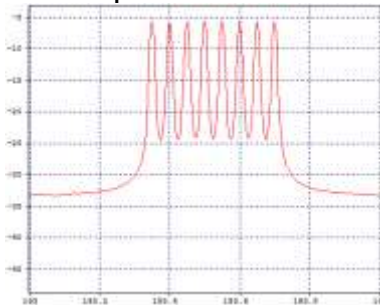
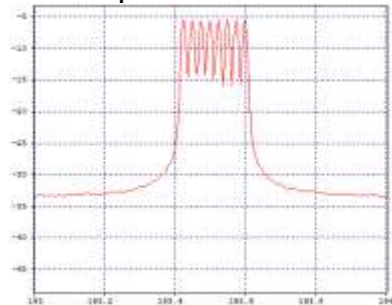


Figura 3.57 (c) TX con 8 Canales. Enlace compensado. Separación 25 GHz.



Para una separación de 25 GHz, los canales están muy juntos, de tal manera que el receptor puede captar un solo canal (Figura 3.57). De aquí se concluye que la mínima separación admisible para la configuración a 10 Gbps es igual a 50 GHz. Así, el número máximo de canales que caben en la banda de estudio (banda C) es igual a 64 canales. De esta manera se observa que debido a la compensación de la CD, la capacidad de la red se maximiza lo cual se resume en la Tabla 3.41.

¹⁵ Mayor número de canales con menor espaciamento entre ellos, de tal manera que se cumpla con los parámetros de calidad objetivo.

Tabla 3.41 Red compensada de mayor capacidad obtenida a partir de simulación para el formato de modulación CSRZ-DQPSK empleando una velocidad de transmisión de 10 Gbps. Compensando la CD.

Máximo número de canales	64 canales
Separación entre canales	50 Ghz
Distancia por span compensado	110 Km
Potencia óptima de transmisión	- 5 dBm

A continuación se encuentra la distancia máxima por span cuando se realiza compensación de la CD. Como técnica de compensación se utiliza la descrita en la Figura 3.11 del presente documento. En la Tabla 3.42 se registran los datos medidos para la máxima longitud de fibra estándar que se puede emplear en un span cuando se compensa la CD al 75 %, empleando una red con: 8, 16, 32 y 64 canales.

Tabla 3.42 Alcance máximo por span compensado la CD al 75 %, empleando redes con diferente número de canales, para el formato de modulación CSRZ-DQPSK empleando una velocidad de transmisión de 10 Gbps

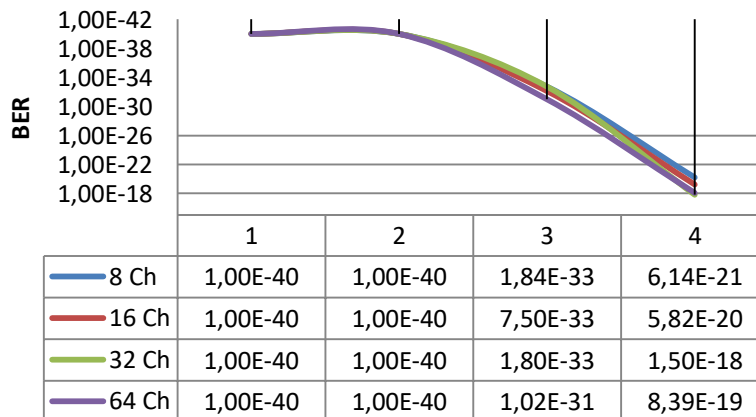
N Ch.	Distancia (Km)		BER	Q	Prx	OSNR
	SSMF-28	DCF				
8	114	18,16	2,83E-34	21,76	-5,58	55,71
16	114	18,16	1,84E-31	21,51	-5,56	16,05
32	112	17,85	5,90E-35	22,01	-5,57	56,54
64	110	17,53	1,38E-36	22,05	-5,46	56,98

- **Distancia máxima con enlaces concatenados.**

Se realizan pruebas para encontrar el número máximo de tramos concatenados soportados por la red, variando el número de canales en: 8, 16, 32 y 64 canales con espaciamiento fijo de 50 GHz. Cada tramo corresponde a un span de fibra estándar de 80 Km y un span de fibra DCF de 12.75 Km (compensación al 75 %), por lo tanto por tramo se tiene una distancia total de 92.75 Km (Figura 3.11).

El alcance máximo para los cuatro casos de estudio analizados, correspondientes a 8, 16, 32 y 64 canales, es igual a 3 tramos concatenados, lo cual corresponde a una distancia total de 278.25 Km (Figura 3.58).

Figura 3.58 BER vs Número de tramos concatenados, aumentando el número de canales en la red y empleando un espaciamiento fijo de 50 GHz.



El comportamiento de la red ante el incremento del número de canales es estable, ya que la BER se mantiene prácticamente constante para un determinado número de tramos (Figura 3.58). De aquí se puede concluir que la configuración a 10 Gbps es robusta y recomendable para enlaces de alta capacidad (64 canales espaciados a 50 GHz alcanzan una distancia máxima de 278.25 Km, garantizando una BER de $1e-30$ y compensando la CD al 75%).

Configuración a 40 Gbps.

Para la configuración a 40 Gbps se realizó un análisis similar al realizado para la configuración a 10 Gbps, se implementó simulaciones con 4, 8 y 16 canales, espaciados a 1.6, 0.8 y 0.4 nm (Tablas 3.19 a 3.24) y se determinó que el formato de modulación CSRZ-DQPSK para la velocidad de 40 Gbps, soporta un espaciamiento mínimo entre canales de 100 GHz, tal limitación en la capacidad máxima de la red fue impuesta por el solapamiento entre canales adyacentes, a diferencia de la configuración a 10 Gbps cuya capacidad máxima de red se limitó porque al aumentar el número de canales y disminuir el espaciamiento entre dichos canales, el tamaño de los segmentos de red sin compensar la CD era inferior a 80 Km, de tal manera que compensar la dispersión cromática aumentó la capacidad máxima de la red.

Como resumen de los resultados obtenidos para la configuración a 40 Gbps: se midió una distancia máxima por span sin compensación de la dispersión cromática de 9.9 Km, la cual se obtuvo con una potencia de transmisión de 16 dBm. Tal longitud es muy pequeña si se considera que distancias por span inferiores a 80 km no son económicamente viables, pero compensando la dispersión cromática mediante fibra DCF, se logró emplear dos span de fibra estándar de 80 Km, logrando una distancia máxima de 194 Km (dos tramos como los que ilustra la Figura 3.11), en una red de ocho canales con espaciamiento de 100 GHz y garantizando una BER de $1e-30$.

Mediante el análisis de los datos, también se puede observar que la transmisión de señales CSRZ-DQPSK a 40 Gbps es factible, y que en un escenario real puede tener distancias de enlace comprendidas entre 190 km y 700 km, asegurando una BER comprendida entre $1e-30$ y $1e-10$, para una red de ocho canales con espaciamiento de 100 GHz (Tabla 3.26).

Configuración a 100 Gbps.

Para la configuración a 100 Gbps se realizó un análisis similar al realizado para la configuración a 10 Gbps, se implementó simulaciones con 4 canales, espaciados a 3.2, 1.6 y 0.8 nm (Figura 3.43 y Tabla 3.31). Como resumen de los resultados obtenidos para la configuración a 100 Gbps: se midió una distancia máxima por span sin compensación de la dispersión cromática de 0.3 Km en una red de cuatro canales con espaciamiento de 1.6 nm. Tal longitud es muy pequeña, pero compensando la dispersión cromática mediante 10.41 km de fibra DCF, se logró emplear un span de fibra estándar de 49 Km, logrando una distancia máxima de 59.41 Km, teniendo en cuenta los valores establecidos como mínimos para los parámetros de calidad.

De lo estudiado anteriormente y los resultados obtenidos a lo largo del trabajo, se puede extraer las siguientes conclusiones:

Se comprobó que las distancias alcanzadas a menor velocidad de transmisión de datos son siempre mayores, para las condiciones del sistema establecidas (fibra SSMF 28), por que la dispersión cromática es proporcional al cuadrado de la velocidad de transmisión de datos, y por lo tanto a altas tasas binarias los pulsos se ven más afectados por la ISI degradando el desempeño del sistema.

Teniendo en cuenta que el formato de modulación CSRZ-DQPSK es altamente sensible a la compensación de la dispersión cromática, la solución a tal fenómeno lineal consiste en la compensación de la misma. En este estudio se empleó la compensación en línea mediante el uso de fibra compensadora (DCF) ya que esta opción presenta una solución de bajo costo comparando otras técnicas de compensación, pero debido a que los tramos de fibra compensadora introducen atenuación, es necesario compensar dicha atenuación, lo que introduce más ruido a la señal. Por tal razón es probable que la distancia máxima por span aumente con una técnica como la compensación en recepción, mediante el uso de módulos de compensación de la dispersión (DCM). La decisión girara de nuevo en torno a los costos de los equipos. Habría que estudiar si el alcance mejorado merece verdaderamente la pena.

Después de realizar compensación de la CD y de implementar enlaces concatenados mediante el uso del formato de modulación CSRZ-DQPSK, con este proyecto se ha podido cuantificar la penalización en el alcance cuando se aumenta la tasa de transmisión de datos, midiendo una penalización: del 67 % con el paso de 10 a 40 Gbps, del 90 % con el paso de 10 a 100 Gbps y del 70 % con el paso de 40 a 100 Gbps.

Por otra parte, cuando se considera la capacidad máxima de la red, se midió que la configuración a 10 Gbps soporta un espaciamiento mínimo entre canales de 0.4 nm, la configuración a 40 Gbps soporta un espaciamiento mínimo de 0.8 nm y la configuración a 100 Gbps soporta un espaciamiento mínimo de 1.6 nm. Cuando se emplean espaciamientos menores a los ya citados ocurre solapamiento entre canales adyacentes, de tal manera que los valores de los parámetros de calidad a la salida del receptor ya están por debajo de los valores mínimos establecido en el modelo simplificado de red. Tal inconveniente puede ser solucionado sometiendo a la señal a un filtrado considerablemente mayor, para que su ocupación espectral disminuya. Esta técnica se denomina Pre-filtrado Nyquist WDM, y consiste en limitar la anchura espectral de los canales transmitidos, de manera que se incremente la capacidad total de la fibra, ya que se podría incluir más canales [72]. Nuevamente habría que hacer un estudio para tomar una buena elección de los elementos de la red con el fin de tener grandes prestaciones a bajo costo.

Por último, se puede concluir que debido a su complejidad, alto costo de implementación, baja capacidad y deficiencias en la recepción, el formato de modulación CSRZ-DQPSK no es adecuado para la transmisión a la velocidad de 100 Gbps.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1 CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se determinó que a bajas potencias de transmisión la dispersión cromática es el principal parámetro que degrada el desempeño del formato de modulación CSRZ-DQPSK y se comprobó mediante simulación que el efecto de la CD se ve altamente incrementado con el aumento de la velocidad de transmisión. También se pudo comprobar que las técnicas ópticas para la compensación de la CD permiten mejorar las prestaciones del formato de modulación CSRZ-DQPSK, ya que cuando se implementó en la red compensación, se lograron mayores longitudes de span y de enlace y mayor número de canales.

Cuando se incrementó la potencia de transmisión, se determinó que el formato de modulación CSRZ-DQPSK es tolerante al fenómeno no lineal FWM en el rango estudiado (de -10 a 16 dBm), pero se debe tener especial cuidado al ampliar la potencia por encima de los 5 dBm, ya que pueden presentarse efectos no deseados ocasionados por fenómenos no lineales tales como SPM y XPM.

Por otra parte, si bien el formato de modulación CSRZ-DQPSK es eficiente por que duplica la capacidad total de la red, debido a la complejidad de su implementación y problemas en la recepción no es recomendable para tasas de transmisión de 100 Gbps, donde actualmente se prefieren formatos de modulación con detección coherente como el PM-QPSK.

A pesar de su complejidad, se encontró que el formato de modulación tiene unas características técnicas muy buenas para una velocidad de transmisión de 10 Gbps, donde se logró alcanzar longitudes de más de 500 Km para un enlace de ocho canales y espaciamiento de 100 GHz compensando al 100 % la CD, y se midió una capacidad máxima de red de 64 canales, con espaciamiento de 50 GHz, con una distancia máxima de transmisión de 278.25 Km, compensando al 75 % la CD y garantizando una BER de $1e-30$.

Por último, este trabajo de grado es de gran utilidad para los operadores de red, debido a que los resultados obtenidos se pueden emplear en proyectos de telecomunicaciones donde se requiera tomar decisiones acerca de incrementar la capacidad de la red y aumentar la velocidad de transmisión, con el uso de formatos de modulación avanzados tales como el formato CSRZ-DQPSK.

4.2 RECOMENDACIONES

Tras el trabajo realizado, hay ciertos aspectos que podrían resultar útiles cuando se realiza el estudio del desempeño de un formato de modulación, desde aquí se propone:

- Al hacer una simulación en primera instancia se deben realizar pruebas en concordancia con la teoría con el fin de definir cuáles son aplicables para el cumplimiento de los objetivos. Se recomienda utilizar los ejemplos que vienen en la herramienta de simulación debido a que presentan información resumida y de gran utilidad acerca de la forma de medir los fenómenos lineales y no lineales.

- Se debe definir un buen entorno de simulación. La herramienta OptSim además de ofrecer diferentes técnicas de simulación, permite definir la precisión de una simulación. El simulador se puede ajustar para obtener el mejor equilibrio entre la precisión y el tiempo de cómputo, por ejemplo cuando se requiere mirar un efecto que produce cambios extremadamente pequeños, es recomendable utilizar precisión rigurosa (Tight).
- Uno de los principales inconvenientes que se presentó en el desarrollo del proyecto es que la herramienta de simulación está diseñada para sistemas a 10 Gbps. Por tal razón se debe tener presente que para cambiar la tasa de transmisión (en este caso a 40 y 100 Gbps), hay que tener conocimiento previo teórico acerca del formato de modulación a implementar con el fin de configurar correctamente los parámetros de simulación.
- Se debe definir una metodología de simulación y el alcance de la investigación, debido a que el cambio de los parámetros de la red (velocidad de transmisión, número de canales, espaciamiento entre canales, entre otros), modifican el desempeño de los formatos de modulación.

4.3 TRABAJOS FUTUROS

Se proponen los siguientes trabajos futuros:

- Estudio de otros formatos de modulación que realizan mejoras al formato DQPSK, como puede ser el partial-DQPSK.
- Profundizar en el estudio de más formatos de modulación aptos para altas velocidades de transmisión con el objeto de cuantificar el desempeño de todos ellos. Prestar especial atención al formato POL-MUX QPSK a las velocidades de 40 y 100 Gbps.
- Identificar y encontrar soluciones a las debilidades que aún presentan los sistemas de transmisión a 40 y 100 Gbps, inducidas por los efectos lineales y no lineales.
- Realizar un estudio de técnicas de filtrado de transmisión y recepción, dado que pueden mejorar considerablemente el desempeño y la capacidad del sistema.
- Estudio del efecto de la Dispersión Cromática a altas velocidades de transmisión (40 y 100 Gbps), ya que es el principal efecto que degrada el desempeño de la red.
- Implementar algún método para compensar la PMD, ya que una vez compensada la dispersión cromática, la PMD es el siguiente factor a compensar debido a que degrada las transmisiones de larga distancia y altas velocidades de transmisión.
- Analizar cómo afectan los amplificadores Raman al desempeño de sistemas de alta velocidad de transmisión. En un principio, por su menor factor de ruido, parece que se comportan mejor, pero un estudio frente a los EDFA aclararía dicho concepto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. Grote, R. Olivares, F. Saavedra, “Desarrollo de una red experimental IP/WDM”, Red Óptica Reuna, Santiago de Chile. 2002..
- [2] A. Gnauck, P. Winzer, “Optical phase-shift-keyed transmission”, Lightwave Technol. 2005.
- [3] C. Xu, X. Liu, X. Wei, “Differential Phase-Shift Keying for High Spectral Efficiency Optical Transmissions”, Proc. IEEE Vol. 10, Abril. 2004.
- [4] Recomendación ITU-T G.694.1, “Spectral Grids For WDM Applications: DWDM Frequency Grid”, Junio. 2002.
- [5] Recomendación ITU-T G.694.2, “Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda: Plan de longitudes de onda con multiplexación por división aproximada de longitud de onda”, Junio. 2002.
- [6] C. Astudillo, N. Hernández, “Sistemas Ópticos Multicanal”, Presentación, Universidad Técnica Federico Santa María. 2007.
- [7] R.J. Millán Tejedor, “Estudio Y Diseño De Multiplexores Por División En Longitud De Onda (WDM) Mediante Efectos Electroópticos, Termoópticos Y Acustoópticos”. Proyecto Fin de Carrera - Ingeniero de Telecomunicación ETSIT Valladolid. 1998.
- [8] B. Chomycz, “Planning Fiber Optic Networks”, McGraw-Hill. 2009.
- [9] A.F. Portilla, J. R. Barrios Lis, “Criterios para el Monitoreo del Canal Óptico y la Incidencia de los Parámetros que Afectan la Calidad de la Señal Óptica en el Desempeño de una Red Metropolitana WDM”, Tesis para optar al título de Ingeniero Electrónico.
- [10] J.P. Peixoto de Carvalho, “Redes Ópticas WDM”. Departamento de Ingeniería Electrotécnica y de Computadores. 2002.
- [11] G. Gómez, J. F. Grijalba, “Análisis Del Desempeño De Formatos De Modulación En Comunicaciones Ópticas Sobre Redes WDM” Tesis para optar al título de Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones – Universidad del Cauca. 2010.
- [12] Internexa S.A E.S.P., “Cerrando la Brecha Digital Mejorando la Conectividad Regional en LATAN”, noviembre. 2009.
- [13] Recomendación ITU-T G.697, “Supervisión óptica para sistemas de multiplexación por división en longitud de onda densa”, Junio. 2004.
- [14] L. Chen, M. Cheung, C. Chan, “From Optical Performance Monitoring to Optical Network Management: Research Progress and Challenges”, Universidad de Hong Kong, China. 2005.
- [15] D. F. Grosz, “Sistemas de Fibra Óptica de Alta Capacidad”, Departamento de Física y Matemática, Instituto Técnico de Buenos Aires, 2004.
- [16] F. Ramos Pascual, “Moduladores Ópticos DPSK”, Universidad Politécnica de Valencia, 2009. Página Web disponible en: <http://www.conectronica.com/Redes-Opticas/Moduladores->

%C3%B3pticos-DPSK.html.

- [17] J.L. Rodríguez, S. Clavijo, "Modulación de Señales Digitales", Universidad de Sevilla, 1995.
- [18] E. Rodríguez, "Requisitos de los Sistemas de Comunicaciones Ópticas de muy alta velocidad", Universidad Autónoma de Madrid, Ene. 2009.
- [19] L. Zhao, H. Shankar, "40G QPSK and DQPSK Modulation", Paper, 2008.
- [20] G.P. Agrawal, "Fiber Optic Communication System", John Wiley & Son, 2002.
- [21] D. van den Borne, "Robust Optical Transmission Systems – Modulation and Equalization", Tesis doctoral, 2008.
- [22] C. Wree, J. Leibrich, W. Rosenkranz, "RZ-DQPSK format with High Spectral Efficiency and High Robustness towards Fiber Nonlinearities," in Proc. Eur. Conf. Optical Commun. (ECOC), Copenhagen, Denmark, Sep. 2002.
- [23] M. Ohm, T. Freckmann, "Comparison of Different DQPSK Transmitters with NRZ and RZ Impulse Shaping," in Proc. IEEE/LEOS Workshop Advanced Modulation Formats, San Francisco, CA, U.S.A., Jul. 2004.
- [24] M. Serbay, C. Wree, W. Rosenkranz, "Comparison of six Different RZ-DQPSK Transmitter Set-ups Regarding their Tolerance towards Fibre Impairments in 8x40Gb/s WDM-Systems," in Proc. IEEE/LEOS Workshop Advanced Modulation Formats, San Francisco, CA, U.S.A.,.
- [25] C.R. Doerr, L. Zhang, P.J. Winzer et al., "Compact High-Speed InP DQPSK Modulator," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 19, no. 15, pp. 1184–1186, Aug. 2007.
- [26] C.K. Chan, "Optical Performance Monitoring, Advanced Techniques for Next-Generation Photonic Networks", Universidad de Hong Kong, China. 2010.
- [27] A. Garcia Perez, J.A. Andrade Lucio, O.G. Ibarra Manzano, M. Trejo Duran, H.Gutierrez Martin, "Efficient Modulation Formats for High Bit-Rate Fiber Transmission", Acta Universitaria, vol. 16, numero 002, Universidad de Guanajuato, Mexico. 2006..
- [28] S. Kyoung Kang, D. Lee, H. Cho, J. Ko, "Demonstration of CSRZ Signal Generator Using Single-Stage Mach-Zehnder Modulator and Wideband CMOS Signal Mixer", ETRI Journal, Volumen 30, Numero 2, Abril. 2008.
- [29] Y. Miyamoto, M. Tomizawa, Y. Tada, "43-Gbit/s-channel-based DWDM System Technologies for the Photonic Transport Network", Papers, NTT Technical Review, Vol. 1 No. 8, Noviembre. 2003.
- [30] OptSim, "User Guide", RSoft, 2009.
- [31] Z. Li, Z. Jian, L. Cheng, Y. Yang, C. Lu, "Signed chromatic dispersion monitoring of 100Gbit/s CS-RZ DQPSK signal by evaluating the asymmetry ratio of delay tap sampling", The Department of Electrical & Computer Engineering, National University of Singapo.2009.

- [32] O. Vassilieva, T. Hoshida, S. Choudhary, G. Castanon, H. Kuwahara, T. Terahara, "Numerical comparison of NRZ, CS-RZ and IM-DPSK formats in 43 Gbit/s WDM transmission". 2001.
- [33] A. Hirano, Y. Miyamoto, "Novel modulation formats in ultra-high-speed transmission systems, and their applications", Los Angeles. 2004.
- [34] G. Bosco, P. Poggiolini, "On the Q factor inaccuracy in the performance analysis of optical direct-detection DPSK systems". IEEE Photon Technol. 2004.
- [35] P.J. Winzer, R. Essiambre, "Advanced optical modulation formats", New York. 2008.
- [36] P. Boffi, L. Marazzi, L. Paradiso, P. Parolari, A. Righetti, R. Siano, "Experimental comparison of RZ-IMDD and RZ-DQPSK performance in a standard 2000-km DWDM system", San Francisco, paper. 2004.
- [37] A. Gnauck, P. Winzer, C. Dorrer, S. Chandrasekhar, "Linear and nonlinear performance of 42.7-Gb/s single polarization RZ-DQPSK format", IEEE Photon Technol Lett. 2006.
- [38] D.F. Melo Fernández, J.A. Ruiz Toledo, "Análisis del Desempeño de Diferentes Técnicas de Compensación Ópticas y Electrónicas para la Dispersión Cromática en Redes WDM", Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca. Popayá.
- [39] J. Sinsky, A. Adamiecki, A. Gnauck, C. Burrus, J. Leuthold, O. Wohlgenuth, "RZ-DPSK transmission using a 42.7-Gb/s integrated balanced optical front end with record sensitivity", Lightwave Technol. 2004.
- [40] C. Xie, L. Moller, H. Haunstein, S. Hunsche, "Comparison of system tolerance to polarization-mode dispersion between different modulation formats", IEEE Photon Technol. 2003.
- [41] A. Leiva, M. Tarifeño, R. Olivares, "Efectos de la dispersión por modo de polarización (PMD) en la propagación de pulsos a través de fibras ópticas", Revista chilena de ingeniería, vol. 15 N° 3. Octubre, 2007.
- [42] P.J Winzer, S. Chandrasekhar, H. Kim, "Impact of filtering on RZ-DPSK reception", IEEE Photon Technol Lett. 2003.
- [43] H. Kim, P. Winzer, "Robustness to laser frequency offset in direct-detection DPSK and DQPSK systems", Lightwave Technol. 2003.
- [44] J. Gene, M. Soler, R. Killely, J Prat, "Investigation of 10-Gb/s optical DQPSK systems in presence of chromatic dispersion, fiber nonlinearities, and phase noise", IEEE Photon Technol Lett. 2004.
- [45] R. Freund, M. Seimetz, "Higher order modulation formats using coherent detection and electronic distortion equalisation for application in future backbone networks", IEEE/LEOS, Newport Beach. 2008.
- [46] A. Gnauck, "40-Gb/s RZ-differential phase shift keyed transmission", OFC, Atlanta. 2003.
- [47] G. Charlet, "Progress in optical modulation formats for high-bit rate WDM transmissions", IEEE

- Quantum Electron. 2006.
- [48] T. Miyano, M. Fukutoku, K. Hattori, H. Ono, "Suppression of degradation induced by SPM/XPM + GVD in WDM transmission using a bit-synchronous intensity modulated DPSK signal", OECC, Japan. 2000.
- [49] P. Gordon, L. Mollenauer, "Phase noise in photonic communications systems using linear amplifiers", Optics Lett. 1990.
- [50] C. Xu, X. Liu, L. Mollenauer, X. Wei, "Comparison of return-to-zero differential phase-shift keying and ONOFF keying in long-haul dispersion managed transmission, IEEE Photon Technol Lett. 2003.
- [51] H. Kim, "Cross-phase-modulation-induced nonlinear phase noise in WDM direct-detection DPSK systems", Lightwave Technol. 2003.
- [52] H. Kim, A. Gnauck, "Experimental investigation of the performance limitation of DPSK systems due to nonlinear phase noise", IEEE Photon Technol Lett. 2003.
- [53] K.P. Ho, "Performance degradation of phase-modulated systems due to nonlinear phase noise". IEEE Photon Technol Lett. 2003.
- [54] X. Liu, "Nonlinear effects in phase shift keyed transmission", OFC, Los Angeles. 2004.
- [55] Recomendación ITU-T G.652, "Characteristics Of A Single-Mode Optical Fiber And Cable". Junio. 2005.
- [56] SHF Communication Technologies AG Company, "Application Note DQPSK", Alemania, Agosto, 2008.
- [57] SHF Communication Technologies AG Company, "SHF 46214C Optical DQPSK Transmitter 100 GBit/s", datasheet, Alemania, Mayo, 2011.
- [58] SHF Communication Technologies AG Company, "SHF 47210A 40 Gbps Optical DPSK Receiver", datasheet, Alemania, Abril, 2006.
- [59] Avanex Corporation, "PureGain 1500, Fixed Gain, Compact EDFA with Control Electronics", datasheet. 2005.
- [60] L.G. Sienra, "WDM una Tecnología con Fibra", Centro de Investigación e Innovación en Telecomunicaciones. Agosto. 2001..
- [61] C.A. Tapia, "Sistemas, Modelo y Simulación" Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, 2009.
- [62] OPNET, "Manual De Usuario", septiembre. 2004.
- [63] C. Domínguez Valente, M. A. López Octaviano, G. Martínez, B. Martínez, M. Vázquez Hernández, "Simulador Digital", monografía del Tecnológico de estudios superiores de Jocotitlan. 2008.

- [64] Lize, Y. K., et al., "Free Spectral Range Optimization of Return-to-Zero Differential Shift Keyed Demodulation in the Presence of Chromatic Dispersion," *Optics Express*, pp. 6817-6822, vol. 15, no. 11, 28th. Mayo, 2007.
- [65] A. Leiva, M. Tarifeño, R. Olivares, "Efectos de la dispersión por modo de polarización (PMD) en la propagación de pulsos a través de fibras ópticas", *Revista chilena de ingeniería*, vol. 15 N° 3. Octubre, 2007.
- [66] M. G. Herráez, "Desarrollo de técnicas no lineales para la medida de la distribución longitudinal de dispersión cromática en fibras ópticas mono-modo", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 2004.
- [67] F. Saavedra, Á. Lamas, M. Fernández, Y. Cepeda, "Efectos de la modulación de fase cruzada sobre la propagación de ondas en fibra óptica", Universidad de Tarapacá, Chile. Octubre. 2005.
- [68] [6] E. Sotomayor Verdugo, "Minimización del FWM", Presentación, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile.
- [69] C. Laperle, B. Villeneuve, Z. Zhang, D. McGhan, "WDM performance and PMD tolerance of a coherent 40-Gbit/s dual-polarization QPSK transceiver," *Journal of Lightwave Technology*. Enero. 2008.
- [70] J. Renaudier, G. Charlet, M. Salsi, O. Mardoyan, "Linear fiber impairments mitigation of 40-Gbit/s polarization-multiplexed QPSK by digital processing in a coherent receiver", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26. Enero. 2008.
- [71] K. Grobe, M. Eiselt, J. Elbers, "Next-Generation Ultra-High-Speed DWDM Transport", ADVA AG Optical Networking Advanced Technology, Alemania, 2011.
- [72] Y. Cai, J. Xing, C. R. Davidson, "Ultra-Larga Distancia de transmisión WDM con alta eficiencia espectral", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29. Febrero. 2011.