

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS
EN PRESENCIA DEL EFECTO FWM EN UNA ARQUITECTURA DE RED MLR
DE TIPO NG-PON2**



**Juan Ángel Gutiérrez Chito
Anyi Tatiana Gómez Córdoba**

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Telecomunicaciones

Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones- GNTT

Popayán Abril 2023

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS
EN PRESENCIA DEL EFECTO FWM EN UNA ARQUITECTURA DE RED MLR
DE TIPO NG-PON2**



**Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en:
Electrónica y Telecomunicaciones.**

**Juan Ángel Gutiérrez Chito
Anyi Tatiana Gómez Córdoba**

**Director:
MSc. Alejandro Toledo Tovar**

**Popayán
2023**

Dedico este gran logro a mi madre por su apoyo incondicional en todo momento, gracias por enseñarme el verdadero valor del esfuerzo y dedicación por cumplir nuestros sueños..

A mi padre, a mi familia y amigos por apoyarme y aconsejarme en esta etapa de mi vida, gracias de corazón..

Juan Ángel Gutiérrez Chito

A mis padres, quienes son mi motor de vida y apoyo incondicional, a ellos que con su esfuerzo y dedicación me ayudaron a culminar esta etapa.

A mi familia y hermanos que con sus palabras me hacen sentir orgullosa de lo que soy y de lo puedo dar. A mi compañero de vida, por su amor y respaldo. A mis amigos, por facilitarme los caminos para seguir, sin pedir nada a cambio. Gracias a todos los que contribuyeron para que hoy pueda cumplir con éxito esta meta propuesta.

Anyi Tatiana Gómez Córdoba

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan un total agradecimiento al MSc. Alejandro Toledo Tovar, Director del proyecto, por su valiosa orientación y compromiso durante la realización del presente trabajo de grado.

Así mismo, al Departamento de Telecomunicaciones del programa de pregrado en Electrónica y Telecomunicaciones por sus aportes y recomendaciones, como también, al grupo de investigación de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT, por su colaboración y consejos, los cuales, fueron de gran ayuda para realizar un adecuado planteamiento del presente trabajo de grado.

Por último, expresar un profundo agradecimiento a nuestros familiares y amigos por su acompañamiento y apoyo incondicional en todo momento, gracias por ser parte de esta hermosa etapa de nuestras vidas que culmina satisfactoriamente.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	IV
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABLAS	XII
LISTA ACRÓNIMOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1 GENERALIDADES SOBRE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICOS, FENÓMENOS DE PROPAGACIÓN, VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LINEA MIXTA Y FORMATOS DE MODULACIÓN	1
1.1 ESQUEMAS DE MULTIPLEXACIÓN ÓPTICA	2
1.1.1 WDM	2
1.1.2 CWDM	3
1.1.3 DWDM	4
1.2 REDES DE ACCESO	5
1.2.1 NG-PON2	9
1.3 VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA MIXTA	10
1.4 DEGRADACIONES ÓPTICAS	14
1.4.1 Efectos Lineales	14
1.4.2 Efectos No Lineales	17
1.5 FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS	25
1.5.1 NRZ-OOK	26
1.5.2 RZ-OOK	27
1.5.3 DPSK	28
1.5.4 DQPSK	30
2 MARCO METODOLÓGICO	32
2.1 MONITOREO DE DESEMPEÑO ÓPTICO	32
2.1.1 Parámetros de Desempeño Óptico:	32
2.2 HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN	35

2.2.1	OptSim	35
2.2.2	Matlab	36
2.2.3	OptiLux	37
2.2.4	OptiSystem	37
2.3	METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN	38
2.3.1	Diseño y Caracterización del Escenario General de Simulación	41
2.3.2	Construcción del Escenario General de Simulación	46
2.4	ESCENARIOS DE SIMULACIÓN Y CASOS DE ESTUDIO	57
3	ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS EN PRESENCIA DEL EFECTO FWM EN UNA ARQUITECTURA DE RED MLR-DWDM DE TIPO NG-PON2	59
3.1	ESCENARIO 1, RED MLR BASADA EN FORMATOS DE MODULACIÓN NRZ-OOK, RZ-OOK Y RZ-DPSK	60
3.1.1	Caso de estudio 1: 2 canales de 2.5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 2 canales de 40 Gbps.	60
3.1.2	Caso de estudio 2: 2 canales de 2.5 Gbps + 4 canales de 10 Gbps + 4 canales de 40 Gbps.	81
3.1.3	Caso de estudio 3: 2 canales de 2.5 Gbps + 4 canales de 10 Gbps + 6 canales de 40 Gbps.	91
3.2	ESCENARIO 2, RED MLR BASADA EN FORMATOS DE MODULACIÓN NRZ-OOK, RZ-OOK Y RZ-DQPSK	101
3.2.1	Caso de estudio 4: 2 canales de 2.5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 2 canales de 40 Gbps.	101
3.2.2	Caso de estudio 5: 2 canales de 2.5 Gbps + 4 canales de 10 Gbps + 4 canales de 40 Gbps.	116
3.2.3	Caso de estudio 6: 2 canales de 2.5 Gbps + 4 canales de 10 Gbps + 6 canales de 40 Gbps.	128
3.3	ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LOS FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS EVALUADOS, EN PRESENCIA DEL EFECTO FWM.	138
4	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	142
4.1	Conclusiones	142
4.2	Recomendaciones	144
4.3	Trabajos Futuros	145
	REFERENCIAS	146

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Multiplexación por División de Longitud de Onda [1].	2
Figura 1.2	Esquema redes FTTx [2].	5
Figura 1.3	Red PON [3].	7
Figura 1.4	Bandas de longitud de onda definidas por la ITU para NG-PON2 [4]. . .	9
Figura 1.5	Esquema básico de una red MLR [5].	10
Figura 1.6	Esquema general de un nodo OXC [6].	11
Figura 1.7	Disponibilidad de tarifas de línea basadas en restricciones de calidad de señal [7].	12
Figura 1.8	Diseño de red MLR-DWDM de tipo NG-PON2 con MMF [5].	13
Figura 1.9	Clasificación de los efectos no lineales presentes en las fibras ópticas [8].	14
Figura 1.10	Principio de distorsión [9].	15
Figura 1.11	Representación gráfica PMD [10].	15
Figura 1.12	Efectos no lineales [8].	16
Figura 1.13	Fenómeno de Dispersión Estimulada de Raman [11].	17
Figura 1.14	Fenómeno de Dispersión Estimulada de Brillouin [12].	17
Figura 1.15	Fenómeno de Modulación de Fase Inducida [13].	20
Figura 1.16	Fenómeno de Modulación por Fase Cruzada [12].	20
Figura 1.17	Efecto de FWM para tres canales [11].	21
Figura 1.18	Código de línea NRZ [14].	26
Figura 1.19	Transmisor NRZ-OOK [13].	26
Figura 1.20	Formato NRZ-OOK [15].	26
Figura 1.21	Código de línea RZ [14].	27
Figura 1.22	Transmisor RZ-OOK [13].	27
Figura 1.23	Formato RZ-OOK [15].	27
Figura 1.24	Transmisor RZ-DPSK [16].	28
Figura 1.25	Diagramas de ojos medidos para RZ-DPSK [16].	28
Figura 1.26	Formato RZ-DPSK [17].	29
Figura 1.27	Codificación de los datos DQPSK [16].	29
Figura 1.28	Transmisor DQPSK [16].	29

Figura 1.29	Diagramas de ojos medidos para RZ-DQPSK [16].	30
Figura 1.30	Formato RZ-DQPSK [18].	30
Figura 2.1	Relación entre la función de densidad de probabilidad y la BER [19].	31
Figura 2.2	OSNR acumulado por trayecto de fibra [20].	32
Figura 2.3	Medición de la OSNR para un sistema DWDM [21].	32
Figura 2.4	Componentes del diagrama de ojo [21].	33
Figura 2.5	Logo del Software Optsim [22].	34
Figura 2.6	Logo de la herramienta Matlab y Simulink [23].	35
Figura 2.7	Logo de la herramienta Optilux [24].	35
Figura 2.8	Logo de la herramienta OptiSystem [25].	36
Figura 2.9	Diagrama de flujo.	38
Figura 2.10	Escenario General de Simulación.	45
Figura 2.11	Propiedades del láser.	47
Figura 2.12	Trasmisor para cada canal.	47
Figura 2.13	Medio de transmisión.	47
Figura 2.14	Propiedades del receptor.	48
Figura 2.15	Recepción para cada canal.	48
Figura 2.16	Diagramas de ojo en la configuración Back to Back.	49
Figura 2.17	Espectro óptico en la configuración Back to Back.	49
Figura 2.18	OSNR real.	50
Figura 2.19	Espectro óptico de los tres canales.	52
Figura 2.20	Componentes del medio.	52
Figura 2.21	Diagrama de ojo al variar la compensación.	54
Figura 2.22	Diagramas de ojo con compensación del 90%.	54
Figura 2.23	Espectro óptico con amplificación y compensación.	55
Figura 2.24	Casos de estudio.	56
Figura 3.1	Espectro óptico en transmisión.	61
Figura 3.2	Espectro óptico en recepción.	61
Figura 3.3	Diagramas de ojo en transmisión.	62
Figura 3.4	Diagramas de ojo en recepción.	62
Figura 3.5	Parámetros Compensador Ideal.	63
Figura 3.6	Parámetro Fibra Óptica PMD.	63
Figura 3.7	Diagrama de ojo al variar la compensación.	64
Figura 3.8	Modelo de red Caso 1.	65
Figura 3.9	Bloques de transmisión.	66
Figura 3.10	Bloque de transmisión- RZ-DPSK	66
Figura 3.11	Diagramas de ojo en recepción.	66
Figura 3.12	Espectro en diferentes etapas de la red.	67
Figura 3.13	BER, Factor Q vs Potencia - Separación 100 GHz	69

Figura 3.14 Diagrama de ojo en recepción.	70
Figura 3.15 Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.	70
Figura 3.16 BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 0dBm	71
Figura 3.17 BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 10dBm	71
Figura 3.18 BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 19dBm	71
Figura 3.19 Variación del coeficiente de dispersión.	72
Figura 3.20 BER, Factor Q vs Potencia - Separación 50 GHz	73
Figura 3.21 Diagrama de ojo en recepción.	73
Figura 3.22 Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.	74
Figura 3.23 BER, Factor Q vs CD- Separación 50 GHz- Potencia 0 dBm	74
Figura 3.24 BER, Factor Q vs CD-Separación 50GHz-Potencia 10dBm	75
Figura 3.25 Variación del coeficiente de dispersión.	75
Figura 3.26 BER, Factor Q vs Potencia - Separación 25 GHz	76
Figura 3.27 Salida modulada para el canal 1 con una potencia de 0 dBm.	77
Figura 3.28 Salida modulada para el canal 6 con una potencia de 0 dBm.	77
Figura 3.29 Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.	77
Figura 3.30 Modelo de red Caso 2.	78
Figura 3.31 Espectro en diferentes etapas de la red.	80
Figura 3.32 BER, Factor Q vs Potencia- Separación 100 GHz	80
Figura 3.33 Diagrama del ojo- Canal 1- Potencia 19 dBm	81
Figura 3.34 Diagrama de ojo con una potencia de 18 dBm.	81
Figura 3.35 Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.	82
Figura 3.36 BER, Factor Q vs CD-Separación 100 GHz-Potencia 0 dBm	82
Figura 3.37 BER, Factor Q vs CD-Separación 100 GHz-Potencia 10dBm	83
Figura 3.38 BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 19dBm	83
Figura 3.39 Variación del coeficiente de dispersión.	84
Figura 3.40 BER, Factor Q vs Potencia- Separación 50 GHz	85
Figura 3.41 Salida modulada para el canal 1 con una potencia de 0 dBm.	85
Figura 3.42 Salida modulada para el canal 2 con una potencia de 0 dBm.	86
Figura 3.43 Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.	86
Figura 3.44 BER, Factor Q vs Potencia- Separación 25 GHz	87
Figura 3.45 Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.	87
Figura 3.46 Modelo de red Caso 3.	88
Figura 3.47 Espectro en diferentes etapas de la red.	90
Figura 3.48 BER, Factor Q vs Potencia- Separación 100 GHz	91
Figura 3.49 Salida modulada para los canales de 40 Gbps- Potencia 17 dBm.	91
Figura 3.50 Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.	92
Figura 3.51 BER, Factor Q vs CD-Separación 100 GHz-Potencia 0 dBm	92
Figura 3.52 BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 10dBm	93
Figura 3.53 BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 17dBm	93

Figura 3.54 Variación del coeficiente de dispersión.	94
Figura 3.55 BER, Factor Q vs Potencia- Separación 50 GHz	94
Figura 3.56 Salida modulada para los canales de 40 Gbps.	95
Figura 3.57 Espectro óptico en recepción en los canales de 40 Gbps.	95
Figura 3.58 Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.	96
Figura 3.59 BER, Factor Q vs Potencia- Separación 25 GHz	97
Figura 3.60 Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.	97
Figura 3.61 Espectro óptico en transmisión.	99
Figura 3.62 Espectro óptico en recepción.	99
Figura 3.63 Diagramas de ojo en transmisión.	100
Figura 3.64 Diagramas de ojo en recepción.	100
Figura 3.65 Modelo de red Caso 4.	101
Figura 3.66 Bloque de transmisión para canales de 40 Gbps Gbps (RZ-DQPSK)	101
Figura 3.67 Diagramas de ojo en recepción.	102
Figura 3.68 Espectro en diferentes etapas de la red.	103
Figura 3.69 BER, Factor Q vs Potencia - Separación 100 GHz	103
Figura 3.70 Diagrama de ojo en recepción- Potencia 17 dBm.	104
Figura 3.71 Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.	105
Figura 3.72 BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 0 dBm	106
Figura 3.73 BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 10dBm	106
Figura 3.74 BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 17dBm	106
Figura 3.75 Variación del coeficiente de dispersión.	107
Figura 3.76 BER, Factor Q vs Potencia - Separación 50 GHz	108
Figura 3.77 Salida modulada para el canal 1 con una potencia de 10 dBm.	108
Figura 3.78 Salida modulada para el canal 6 con una potencia de 0 dBm.	108
Figura 3.79 Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.	109
Figura 3.80 BER, Factor Q vs CD-Separación 50 GHz-Potencia 0dBm	110
Figura 3.81 BER, Factor Q vs CD-Separación 50GHz-Potencia 10dBm	110
Figura 3.82 BER, Factor Q vs CD-Separación 50GHz-Potencia 16dBm	110
Figura 3.83 Variación del coeficiente de dispersión.	111
Figura 3.84 BER, Factor Q vs Potencia - Separación 25 GHz	112
Figura 3.85 Salida modulada para el canal 1 con una potencia de 0 dBm.	112
Figura 3.86 Salida modulada para el canal 6 con una potencia de 0 dBm.	112
Figura 3.87 Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.	113
Figura 3.88 Modelo de red Caso 5	114
Figura 3.89 Espectro en diferentes etapas de la red.	115
Figura 3.90 BER, Factor Q vs Potencia - Separación 100 GHz	116
Figura 3.91 Diagrama de ojo en recepción- Potencia de 17 dBm.	117
Figura 3.92 Diagrama de ojo en recepción- Potencia de 17 dBm.	117
Figura 3.93 Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.	118
Figura 3.94 BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 0dBm	118

Figura 3.95 BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 10dBm	119
Figura 3.96 BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 17dBm	119
Figura 3.97 Variación del coeficiente de dispersión.	120
Figura 3.98 BER, Factor Q vs Potencia - Separación 50 GHz	121
Figura 3.99 Salida modulada para el canal 1 con una potencia de 0 dBm.	121
Figura 3.100 Salida modulada para el canal 2 con una potencia de 0 dBm.	122
Figura 3.101 Salida modulada para el canal 9 con una potencia de 0 dBm.	122
Figura 3.102 Salida modulada para el canal 10 con una potencia de 0 dBm.	122
Figura 3.103 Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.	123
Figura 3.104 BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 0dBm	123
Figura 3.105 Potencia = 0 dBm	124
Figura 3.106 BER, Factor Q vs Potencia - Separación 25 GHz	125
Figura 3.107 Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.	125
Figura 3.108 Modelo de red Caso 6.	126
Figura 3.109 Espectro en diferentes etapas de la red.	128
Figura 3.110 BER, Factor Q vs Potencia- Separación 100 GHz	128
Figura 3.111 Salida modulada para los canales de 40 Gbps- Potencia 17 dBm.	129
Figura 3.112 Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.	130
Figura 3.113 BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 0dBm	130
Figura 3.114 BER, Facto rQ vs CD-Separación 100GHz-Potencia 10dBm	131
Figura 3.115 BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 17dBm	131
Figura 3.116 Variación del coeficiente de dispersión.	132
Figura 3.117 BER, Factor Q vs Potencia- Separación 50 GHz	132
Figura 3.118 Salida modulada para los canales de 40 Gbps.	133
Figura 3.119 Espectro óptico en recepción en los canales de 40 Gbps.	133
Figura 3.120 BER, Factor Q vs Potencia- Separación 25 GHz	134
Figura 3.121 BER, Factor Q VS Separación entre canales – Potencia 0 dBm	136

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Comparación entre CWDM y DWDM. Adaptada de [26]	4
Tabla 1.2	Características de las redes PON [27]	7
Tabla 1.3	Número máximo de componentes FWM para sistemas DWDM de varios tamaños. Adaptada de [11]	22
Tabla 2.1	Cuadro comparativo de herramientas de simulación.	36
Tabla 2.2	Formatos de modulación implementados.	40
Tabla 2.3	Características de tecnologías de láser. Adaptada de [28],[29].	41
Tabla 2.4	Características y parámetros del modelo de red definidos	44
Tabla 2.5	Características escenario general.	45
Tabla 2.6	Plan de frecuencias.	46
Tabla 2.7	Parámetros OPM escenario general en Tx.	49
Tabla 2.8	Resultados OPM.	50
Tabla 2.9	Parámetros OPM variando la compensación, para una distancia de 60 kms. 53	
Tabla 3.1	Parámetros generales- Escenario 1	58
Tabla 3.2	Asignación de frecuencias.	59
Tabla 3.3	Medida de la atenuación.	59
Tabla 3.4	Variación de la ganancia del EDFA.	60
Tabla 3.5	Variación de los porcentajes de compensación.	64
Tabla 3.6	Parámetros OPM.	67
Tabla 3.7	Parámetros OPM.	79
Tabla 3.8	Parámetros OPM.	89
Tabla 3.9	Parámetros generales- Escenario 2	98
Tabla 3.10	Parámetros OPM.	102
Tabla 3.11	Parámetros OPM.	114
Tabla 3.12	Parámetros OPM.	127
Tabla 3.13	Análisis comparativo de los formatos de modulación con respecto a los valores OPM.	135
Tabla 3.14	Análisis comparativo de los formatos de modulación RZ-DPSK y RZ-DQPSK	138

LISTA ACRÓNIMOS

APD	<i>Avalanche Photodiode</i>	Fotodiodos de Avalancha
APON	<i>Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network</i>	Red Óptica Pasiva de Modo de Transferencia Asíncrona
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>	Emisiones Espontáneamente Amplificadas
BER	<i>Bit Error Rate</i>	Tasa de Error de Bit
BPON	<i>Broadband Passive Optical Network</i>	Red Óptica Pasiva de Banda Ancha
CD	<i>Chromatic Dispersion</i>	Dispersión Cromática
CDM	<i>Code Division Multiplexing</i>	Multiplexación por División de Código
CW	<i>Continuous Wave</i>	Onda Continua
CWDM	<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i>	Multiplexación por División de Longitud de Onda Ampliamente Espaciada
DB	<i>Duobinary Modulation</i>	Modulación Duobinaria
DCF	<i>Dispersion-Compensating Fiber</i>	Fibra Compensadora de Dispersión
DCM	<i>Dispersion Compensation Module</i>	Módulo de Compensación de Dispersión
DGD	<i>Differential Group Delay</i>	Retardo de Grupo Diferencial
DPSK	<i>Differential Phase Shift Keying</i>	Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial
DQPSK	<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i>	Modulación por Desplazamiento de Fase y Cuadratura Diferencial
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>	Multiplexación Por División de Longitud de Onda Densa
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>	Amplificador de Fibra Dopada de Erbio
EPON	<i>Ethernet Passive Optical Network</i>	Red Óptica Pasiva para Redes Ethernet
FSAN	<i>Full Service Access Network</i>	Red de Acceso al Servicio Completo
FTTB	<i>Fiber To The Building</i>	Fibra Hasta el Edificio
FTTC	<i>Fiber To The Curb</i>	Fibra Hasta el Gabinete
FTTH	<i>Fiber To The Home</i>	Fibra Hasta la Casa
FTTN	<i>Fiber To The Neighborhood</i>	Fibra Hasta el Barrio
FTTx	<i>Fiber To The X</i>	Fibra Hasta la X
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum</i>	Anchura a Media Altura
FWM	<i>Four-Wave Mixing</i>	Mezcla de Cuatro Ondas
GNLSE	<i>General Schrodinger Nonlinear Equation</i>	Ecuación No Lineal de Schrodinger Generalizada
GPON	<i>Gigabit Passive Optical Network</i>	Red Óptica Pasiva con Capacidad de Gigabit
ICI	<i>Inter-carrier Interference</i>	Interferencia Interportadora
ISI	<i>Intersymbol Interference</i>	Interferencia Intersimbólica

ISP	<i>Internet Service Provider</i>	Proveedor de Servicios de Internet
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>	Unión Internacional de Telecomunicaciones
M-ASK	<i>Multinivel Amplitud Shift Keying</i>	Modulación por Desplazamiento de Amplitud Multinivel
MLR	<i>Mixed Line Rates</i>	Velocidades de Línea Mixta
MMF	<i>Multiple Modulation Formats</i>	Múltiples Formatos de Modulación
MZM	<i>Mach-Zenhder Modulator</i>	Modulador Mach-Zenhder
NG-PON	<i>Next-Generation Passive Optical Network</i>	Red Óptica Pasiva de Próxima Generación
NRZ	<i>Nonreturn to Zero</i>	No Retorno a Cero
ODN	<i>Optical Distribution Network</i>	Red de Distribución Óptica
OLT	<i>Optical Line Terminal</i>	Terminal de Línea Óptica
ONU	<i>Optical Network Unit</i>	Unidad de Red Óptica
OOK	<i>On-Off Keying</i>	Manejo por Conmutación de Encendido y Apagado
OPM	<i>Optical Performance Monitoring</i>	Monitoreo de Desempeño Óptico
OSNR	<i>Optical Signal to Noise Ratio</i>	Relación Señal a Ruido Óptico
OXC	<i>Conector Óptico Cruzado</i>	Optical Cross-Connect
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i>	Dispersión por Modo de Polarización
PNL	<i>Non-Linear Polarization</i>	Vector de Polarización no Lineal
PON	<i>Passive Optical Network</i>	Redes Ópticas Pasivas
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>	Modulación de Amplitud en Cuadratura
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>	Modulación por Desplazamiento de Cuadratura de Fase
ROF	<i>Radio Over Fiber</i>	Radio Sobre Fibra
RZ	<i>Return to Zero</i>	Retorno a Cero
SBS	<i>Stimulated Brillouin Scattering</i>	Dispersión Estimulada de Brillouin
SPM	<i>Self-phase Modulation</i>	Auto-Modulación de Fase
SRS	<i>Stimulated Raman Scattering</i>	Dispersión Estimulada de Raman
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>	Multiplexación por División de Tiempo
WDM	<i>Wavelength División Multiplexing</i>	Multiplexación por División de Longitud de Onda
XG-EPON	<i>Gigabit-Capable Ethernet Passive Optical Network</i>	Red Óptica Pasiva Ethernet con Capacidad Gigabit
XG-GPON	<i>10-Gigabit-capable Passive Optical Network</i>	Red Óptica Pasiva con Capacidad de 10 Gigabit
XGS-PON	<i>Gigabit-Capable Symmetric Passive Optical Network</i>	Red Óptica Pasiva Simétrica con Capacidad de 10 Gigabit
XPM	<i>Cross-Phase Modulation</i>	Modulación de Fase Cruzada

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las redes basadas en fibra óptica deben tener la capacidad de ofrecer grandes velocidades de transmisión y elevados niveles de ancho de banda, debido a la demanda generada por la implementación de nuevos servicios de telecomunicaciones como videoconferencias, videojuegos, aplicaciones multimedia, operaciones en tiempo real, plataformas educativas a distancia, entre otros. Dicha necesidad requiere nuevos conceptos e innovaciones que permitan implementar redes más robustas, de mayor capacidad y alcance. De este modo, el desarrollo tecnológico ha hecho de la fibra óptica un medio interesante y de gran proyección para soportar altos flujos de información [30].

Por lo tanto, para abordar la creciente demanda de tráfico existente, las redes ópticas implementan técnicas de multiplexación como aquellas basadas en multiplexación por división de longitud de onda, WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), siendo la multiplexación por división de longitud de onda densa, DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) una de las más utilizadas por su capacidad de transmitir múltiples longitudes de onda a través de una única fibra óptica. Además, la industria de las comunicaciones ópticas ha incurrido en adoptar una nueva estrategia de redes DWDM con velocidad de línea mixta, MLR (*Mixed-Line Rate*) en conjunto con las Redes ópticas pasivas de próxima generación 2, NG-PON2 (*NextGeneration Passive Optical Network 2*), dado que, tienen la capacidad de manejar distintas tasas de transmisión en un mismo hilo de fibra, mediante arquitecturas de red de nueva generación que admiten velocidades de datos de hasta 40 Gbps [31]. Sin embargo, los sistemas MLR-DWDM diseñados para altas velocidades de transmisión, se ven afectados por degradaciones ópticas producto de los efectos lineales y no lineales generando alteraciones no deseadas de la señal original hasta el punto de no ser posible la identificación clara en recepción, limitando así el rendimiento [32].

Por consiguiente, para optimizar el desempeño de un enlace de comunicaciones, es necesario tener en cuenta el formato de modulación, que brinde una alta eficiencia espectral, alta capacidad y tolerancia ante los efectos lineales y no lineales, en especial, la mezcla de cuatro ondas o fenómeno de intermodulación [33], el cual, es más predominante en sistemas MLR-DWDM, debido al número de canales y el espaciamiento ejercido entre ellos, produciendo la aparición de nuevas componentes en frecuencia, las cuales, pueden generar degradaciones ópticas con el aumento en la potencia de transmisión o la variación de la

dispersión en la fibra [34].

Teniendo en cuenta lo mencionado previamente, en el presente trabajo de investigación se realiza el análisis comparativo del desempeño de diferentes formatos de modulación avanzados en una arquitectura de red MLR-DWDM de tipo NG-PON2 en presencia del fenómeno FWM. A continuación, se describe el contenido de este trabajo de grado, el cual se distribuye en cuatro capítulos de acuerdo con la información obtenida en el desarrollo de la investigación.

Capítulo 1. Generalidades de los sistemas de comunicaciones ópticos, fenómenos de propagación, velocidad de transmisión de línea mixta y formatos de modulación avanzados.

En este capítulo se detallan aspectos generales sobre los sistemas de telecomunicaciones basados en fibra óptica, seguido de una descripción de los sistemas WDM haciendo énfasis en DWDM. Posteriormente, se hace una caracterización de PON con enfoque en NG-PON2 y luego se define el concepto de las redes MLR con sus características más relevantes para el presente trabajo, se detallan los efectos lineales y no lineales que los afecta, en especial, el fenómeno FWM y finalmente se presentan los formatos de modulación avanzados más implementados en este tipo de redes MLR-DWDM.

Capítulo 2. Desempeño Óptico, metodología y escenario de simulación.

Se presentan los parámetros de monitoreo óptico primordiales para el diseño de una red de comunicaciones ópticas. Posteriormente, se define la metodología y herramienta de simulación, mediante las cuales se hará el diseño y desarrollo de un modelo de red inicial y que posteriormente permitirán el planteamiento de los casos de estudio y escenarios de simulación para el presente trabajo.

Capítulo 3. Simulación, pruebas, análisis de resultados y selección del mejor formato de modulación avanzado teniendo en cuenta el fenómeno FWM.

Se desarrolla el proceso de simulación que permitirá evaluar el desempeño de la red MLR-DWDM de tipo NG-PON2, haciendo uso de diferentes formatos de modulación avanzados en presencia del efecto FWM. Por último, a partir de los resultados obtenidos en simulación, se selecciona el formato de modulación avanzado que tenga un mejor desempeño considerando la presencia del fenómeno FWM.

Capítulo 4. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

Se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros relacionados con

los aspectos más importantes de la presente investigación que permitieron implementar una arquitectura de red MLR-DWDM de tipo NG-PON2 eficiente.

Los anexos contienen las tablas que muestran los resultados obtenidos mediante las simulaciones, a partir de las cuales se generan algunas figuras que se presentan.

Capítulo 1

GENERALIDADES SOBRE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICOS, FENÓMENOS DE PROPAGACIÓN, VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LINEA MIXTA Y FORMATOS DE MODULACIÓN

El surgimiento y desarrollo de nuevos servicios de telecomunicaciones, hace necesaria la implementación de tecnologías como la fibra óptica, capaz de satisfacer las demandas tanto de velocidad como de ancho de banda, que en conjunto con arquitecturas de red de acceso como NG-PON2 (*Next Generation Passive Optical Network 2*), han logrado consolidar una solución en los requisitos actuales de tráfico de red a nivel mundial. Sin embargo, estas opciones basadas en arquitecturas modernas presentan diferentes inconvenientes al momento de transmitir a grandes velocidades, debido a la aparición de fenómenos de tipo lineal y no lineal, que degradan la señal óptica afectando el desempeño del sistema. Por lo anterior, se hace necesario la implementación de formatos de modulación avanzados, puesto que ofrecen una alta eficiencia espectral mejorando la calidad del enlace óptico. Para la realización de este capítulo, se toman como referencia diversas investigaciones al respecto, estudiando en primera instancia diferentes esquemas de multiplexación, donde se mencionan ventajas y deficiencias en cuanto a la capacidad permitida y su vulnerabilidad a los efectos no lineales. También se evalúan las generalidades de las arquitecturas FSAN (*Full Service Access Network*), específicamente NG-PON2, además se exponen los conceptos que fundamentan las redes de Velocidad de Línea Mixta, MLR (*Mixed-Line Rate*) y la descripción detallada de los efectos de propagación de tipo no lineal, enfatizando en el efecto de Mezcla de Cuatro Ondas, FWM (*Four Wave Mixing*), dado que es objeto de estudio en el presente trabajo de grado. Por último, se analizan diferentes formatos de modulación avanzados teniendo en cuenta su eficiencia espectral y comportamiento a altas velocidades de transmisión.

1.1. ESQUEMAS DE MULTIPLEXACIÓN ÓPTICA

Dada la necesidad de mejorar la eficiencia de los sistemas de transmisión basados en fibra óptica, surge la idea de la multiplexación, impulsada con el fin de explotar toda la capacidad que posee la red, logrando así la transmisión simultánea de dos o más señales en un mismo canal. A lo largo de los años se han desarrollado varias formas de multiplexar, cada una diseñada para trabajar bajo ciertas condiciones, algunas de las técnicas más usadas se mencionan a continuación:

- Multiplexación por División de Longitud de Onda, WDM (*Wavelength Division Multiplexing*)
- Multiplexación por División de Tiempo, TDM (*Time Division Multiplexing*)
- Multiplexación por División de Código, CDM (*Code Division Multiplexing*)

La principal diferencia entre las técnicas de multiplexación anteriormente mencionadas radica en la asignación de canales, dado que WDM divide el canal en dos o más rangos de longitud de onda que no se superponen entre sí, TDM asigna determinados períodos de tiempo a cada canal, en CDM se emplean diferentes codificaciones para cada canal permitiendo así, la transmisión de las señales, compartiendo tiempo y frecuencia simultáneamente [32].

1.1.1. WDM

El principio fundamental de WDM es permitir la transmisión de varias señales independientes sobre una sola fibra óptica, mediante portadoras de diferente longitud de onda. En la figura 1.1 se muestra el esquema general de WDM, en donde cada canal es transportado de manera independiente de los demás, teniendo cada uno su propio ancho de banda y mismo tiempo de llegada al receptor, logrando con esto aumentar la capacidad del medio [35].

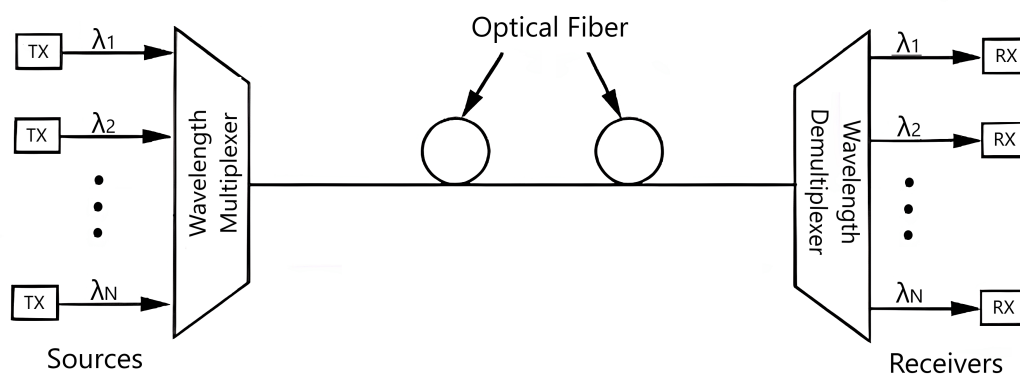


Fig 1.1: Multiplexación por División de Longitud de Onda [1].

Esta técnica de multiplexación es altamente atractiva para comunicaciones ópticas de larga distancia, dado que presenta un mejor aprovechamiento del ancho de banda de la fibra, además, los efectos causados por degradaciones como la dispersión son menos nocivos para este tipo de redes. En WDM el espaciado de canales puede ser de 50 GHz o de hasta 25 GHz [36], lo que permite emplear una cantidad mayor de canales, sin embargo, al reducir este espaciado, el sistema presenta mayor vulnerabilidad a los efectos no lineales. Dentro de la técnica WDM se consideran dos tipos de esquemas: Multiplexación por División de Longitud de Onda Ampliamente Espaciada, CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*) y Multiplexación Por División de Longitud de Onda Densa, DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), siendo soluciones prácticas que satisfacen el continuo aumento en la demanda de ancho de banda [37].

1.1.2. CWDM

CWDM se define en la recomendación ITU-T G.694.2, en donde se especifica que es una tecnología del tipo WDM caracterizada por [38]:

- Permitir la transmisión de varias señales mediante una misma fibra, con un espaciado de canales de 2500 GHz (20nm).
- Usar longitudes de onda entre 1270 y 1610 nm.
- Presentar un menor consumo de energía.
- Permitir un máximo de 18 canales dentro de la banda disponible.
- Cobertura alrededor de los 50 a 80 km.

Debido a las características anteriormente mencionadas, CWDM presenta un menor costo en comparación que DWDM, sin embargo, no puede ser utilizada para distancias muy largas, ya que según la ITU, en este tipo de redes las señales no están adecuadamente espaciadas para que puedan ser amplificadas, es decir, que en esta tecnología no se cuenta con amplificadores [39].

1.1.3. DWDM

En DWDM se tiene capacidades y anchos de banda mayores a los de CWDM, debido a que la separación entre canales es más pequeña, lo cual permite tener un mayor número de portadoras en la misma banda. DWDM opera principalmente en la banda C y L (1530 a 1605 nm) y soporta hasta 40 Gbps por cada longitud de onda, al igual que puede operar con 40, 80 o 160 canales ópticos espaciados entre sí, a 100 GHz, 50 GHz, o 25 GHz respectivamente. Si bien en este tipo de sistemas los canales se combinan para ser transportados por la fibra, se pueden procesar individualmente en recepción mediante nodos de conmutación óptica.

Uno de los parámetros de transmisión más importante a considerar en este tipo de redes es el espaciamiento de los canales ópticos, correspondiente a la mínima frecuencia de separación entre las señales multiplexadas en la fibra, por lo cual, entre menor sea este espaciado, mayor es la diafonía. Así mismo, la máxima velocidad de datos por longitud de onda es limitada y el sistema se hace más vulnerable a los efectos producidos por las no linealidades de la fibra.

En la tabla 1.1 se puede apreciar la comparación de las tecnologías pertenecientes a WDM, según parámetros como separación entre canales, número de canales, capacidad, distancia y amplificación óptica.

Aplicación / Parámetro	CWDM Acceso/MAN	DWDM MAN/WAM	DWDM Largo Alcance
Canales por fibra	16	32 a 80	80 a 160
Espaciado entre canales	20 nm (2500 GHz)	0.8 nm (100 GHz)	0.4 nm (50 GHz)
Capacidad por canal	2.5 Gbps	10 a 40 Gbps	10 a 40 Gbps
Distancia	Hasta 80 km	Cientos de km	Miles de km
Amplificación óptica	Ninguna	EDFA	EDFA, RFA

Tabla 1.1: Comparación entre CWDM y DWDM. Adaptada de [26]

Aunque las redes DWDM resultan útiles para cumplir requisitos de distancia, flexibilidad y confiabilidad, existen ciertas restricciones tecnológicas; una de ellas es la limitada ventana de transmisión disponible en la fibra óptica, pues en la banda C se tiene un espectro de 35 nm y en la banda L de 95 nm, fuera de este rango espectral, los amplificadores no pueden operar y la comunicación DWDM sería inviable; de igual manera, la eficiencia espectral de las señales en DWDM debe mejorarse para aumentar la velocidad por canal de manera que se pueda transmitir más datos dentro del espectro posible, lo que se puede lograr utilizando esquemas de modulación avanzados, es decir, formatos que usan la fase, intensidad o amplitud multinivel, tales como Modulación por Desplazamiento de Cuadratura de Fase, QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), Modulación por Desplazamiento de Amplitud de Multinivel, M-ASK (*Multilevel Amplitude Shift Keying*), Modulación de Amplitud en Cuadratura, QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), entre otros [40].

1.2. REDES DE ACCESO

La aparición de nuevos servicios y aplicaciones soportados en internet que necesitan de mayores velocidades de transmisión, han impulsado a la industria de las telecomunicaciones al estudio e implementación de nuevas tecnologías que junto a la fibra óptica permitan un mejor rendimiento a costos accesibles. Con estos objetivos planteados, surgen las redes

ópticas pasivas, PON (Passive Optical Network) y el concepto de Fibra hasta la X, FTTx (Fiber To The x), expresión que reúne un importante número de estándares y soluciones cuyo objetivo es la prestación de servicios a través de fibra óptica, como lo son los servicios multimedia avanzados (IPTV, HDTV), acceso a Internet de alta velocidad, aplicaciones corporativas de banda ancha y demás. En la siglas FTTx, la x indica que tan cerca está el extremo de la fibra del usuario real; los distintos tipos de arquitecturas FTTx según el punto de terminación de la fibra, se detallan a continuación [41]:

- Fibra hasta el Edificio, FTTB (*Fiber To The Building*): Se refiere al despliegue de fibra óptica directamente desde un conmutador de oficina central hacia una empresa o edificio.
- Fibra hasta el Gabinete, FTTC (*Fiber To The Curb*): Se refiere al tendido de cables de fibra óptica desde el equipo de la oficina central hasta un conmutador de comunicación ubicado dentro de 300 metros de una empresa o un hogar.
- Fibra hasta el Hogar, FTTH (*Fiber To The Home*): Es una tecnología que utiliza fibra óptica para brindar internet de alta velocidad y otros servicios de comunicaciones directamente a las instalaciones de un cliente residencial o comercial. La distancia que puede cubrir FTTH depende de varios factores, incluido el tipo de cable de fibra óptica utilizado, los equipos y dispositivos empleados y la calidad de la instalación, considerando que la fibra puede transmitir datos a distancias mucho más largas que las tecnologías tradicionales basadas en cobre y cable. Para clientes residenciales o comerciales, la distancia del cable de fibra óptica utilizada será entre la oficina central y las instalaciones del cliente, que normalmente es de menos de unos pocos kilómetros.
- Fibra hasta el Barrio, FTTN (*Fiber To The Neighborhood*): Se refiere a la arquitectura PON en la que los cables de fibra óptica se extienden hasta 1000 metros aproximadamente.

En la figura 1.2 se muestra el esquema general de FTTx con las aplicaciones descritas anteriormente.

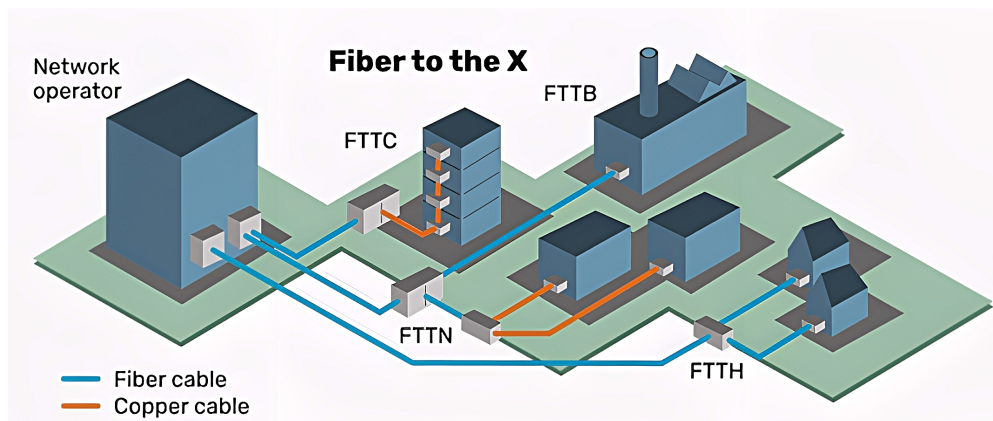


Fig 1.2: Esquema redes FTTx [2].

Para el presente trabajo de grado se elige implementar a nivel de simulación una red de tipo FTTH, debido a que una de las finalidades de este, es evaluar el desempeño de la red en presencia del efecto FWM, fenómeno no lineal propio de las transmisiones por fibra óptica, debido a esto, los tipos de arquitectura FTTx como FTTN y FTTC no serán objeto de estudio, ya que necesitan de otros medios de transmisión en sus sistemas.

Entre las arquitecturas implementadas con FTTx se encuentran las topologías de red: punto a multipunto, comúnmente denominado PON y punto a punto (P2P). En cuanto a las redes PON, estas se han convertido en una solución de red de acceso de fibra altamente usada debido a la transparencia de su servicio, rentabilidad, ahorro de energía y mayor seguridad en comparación con otras redes de este tipo. PON utiliza componentes pasivos de baja potencia que eliminan la necesidad de alimentación de energía en la red de distribución de fibra donde, desde una única terminal de línea óptica, OLT (*Optical Line Terminal*), es posible dar servicio a decenas de usuarios denominados ONUs (*Optical Network Units*) [42]. En estas redes, al eliminarse todos los elementos activos se reducen los costos y se posibilita el diseño de arquitecturas a altas velocidades de datos.

Las PON están formadas típicamente por los elementos que se describen a continuación:

- **OLT:** Es un dispositivo utilizado para proporcionar la interfaz entre la red del proveedor de servicios y las instalaciones del cliente individual. La OLT generalmente se encuentra en la oficina central del proveedor y es responsable de administrar la red PON y asignar ancho de banda a los clientes, también puede incluir funciones como gestión de calidad de servicio (QoS), seguridad y gestión de red.

En una red PON, este dispositivo está conectado a una o más fibras que llegan a un splitter, que luego divide la señal en múltiples fibras que llegan a las instalaciones del cliente, en el caso de NG-PON2, la OLT puede admitir múltiples longitudes de onda, velocidades simétricas y asimétricas y dar soporte para múltiples servicios como acceso a Internet, IPTV y telefonía.

- **Red de Distribución Óptica, ODN (*Optical Distribution Network*):** Es la infraestructura física que conecta la red del proveedor de servicios con las instalaciones del cliente. Estas redes están compuestas por fibras de alimentación y distribución.
- **Divisor óptico, (*Splitter*):** Es un dispositivo utilizado para dividir la señal óptica de la OLT en múltiples fibras que llegan hasta las instalaciones del cliente, lo que permite que varios usuarios compartan el medio de transmisión, lo que aumenta la eficiencia y la capacidad de la red.

Un divisor óptico funciona dividiendo una sola señal óptica en múltiples señales, cada una de las cuales puede transmitirse a través de una fibra separada. Esto se hace usando un proceso llamado multiplexación por división de longitud de onda (WDM).

- **ONU:** Es un dispositivo que se utiliza para conectar las instalaciones del cliente a la red del proveedor de servicios. Por lo general, se encuentra ubicado en el domicilio del usuario y es responsable de recibir la señal óptica de la red y convertirla en señales eléctricas.

Una ONU normalmente incluye varios componentes diferentes, como una fuente de alimentación, un transceptor óptico y un enrutador. El transceptor óptico recibe la señal óptica y la convierte en señales eléctricas, mientras que el enrutador se encarga de administrar la red del cliente y brindar acceso a internet y otros servicios.

En la figura 1.3 se muestra el diseño de una red PON:

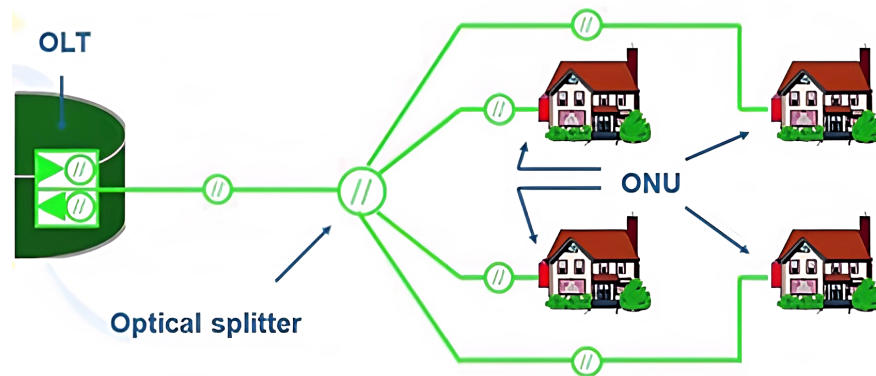


Fig 1.3: Red PON [3].

Actualmente, se pueden encontrar diferentes estándares para redes PON, algunas características de estos se pueden visualizar en la tabla 1.2.

CARACTERÍSTICAS	APON/BPON	GPON	EPON
Velocidad de subida	622- 155 Mbps	155- 622-2488-1244 Mbps	1250 Mbps
Velocidad de bajada	622- 155 Mbps	24488-1244 Mbps	1250 Mbps
Alcance máximo	20 Km	60 Km (Con 20 km de distancia máxima entre ONTs)	20 Km
Estándares	ITU-G.983.X	ITU-G.984.X	IEEE 802.3ah
Eficiencia	83 % downstream	93 % downstream	98 % downstream
	73 % upstream	93 % upstream	97 % upstream
Usuarios máximos por ONU	32 usuarios	64 usuarios	32 usuarios

Tabla 1.2: Características de las redes PON [27]

Considerando el crecimiento del tráfico de internet, se hizo necesario que la industria de las telecomunicaciones estudiará nuevos escenarios para lograr la actualización y convergencia de las redes de acceso ya disponibles. Para el caso de EPON, se ha implementado

la Red Óptica Pasiva Ethernet con capacidad Gigabit, XG-EPON (*Gigabit-Capable Ethernet Passive Optical Network*), la cual admite dos modos de capas física, una de transmisión asimétrica con 10 Gbps para transmisión descendente y 1 Gbps para transmisión ascendente. XG-EPON utiliza la banda de longitud de onda de 1260 a 1280 nm para el tráfico ascendente y la banda de longitud de onda de 1575 a 1580 nm para el tráfico descendente [43].

GPON también ha heredado algunas de sus características a la Red Óptica Pasiva con Capacidad de 10 Gigabit, XG-GPON (*10-Gigabit-capable Passive Optical Network*), la cual se divide en dos clases. La primera clase denominada XG-GPON1 proporciona transmisión asimétrica con 10 Gbps de bajada y 2.5 Gbps de subida. La segunda clase es XG-GPON2 que proporciona una transmisión simétrica de 10 Gbps [43].

Por último, se tiene la Red Óptica Pasiva Simétrica con Capacidad de 10 Gigabit, XGS-PON (*Gigabit-Capable Symmetric Passive Optical Network*), estandarizada mediante la norma de la ITU-T G.9807.1, la cual funciona sobre una infraestructura de acceso óptico de punto a multipunto a la velocidad de datos nominal de 10 Gbps tanto de bajada como de subida. XGS-PON opera sobre una longitud de onda descendente de 1570-1580 nm y una longitud de onda ascendente de 1260 - 1280 nm, lo que permite una mayor compatibilidad a través de la red de distribución óptica con GPON que utiliza diferentes longitudes de onda [44].

1.2.1. NG-PON2

NG-PON2 es una versión avanzada de la tecnología PON, que utiliza la fibra óptica para brindar internet de alta velocidad y otros servicios de comunicaciones a hogares y empresas; superando los sistemas ya existentes en cuanto a compatibilidad, ancho de banda y capacidad.

Algunas de las características más notorias de este tipo de redes son [40]:

- Utiliza WDM para transmitir múltiples señales a través de una sola fibra, lo que permite una mayor capacidad y velocidades más rápidas.
- NG-PON2 puede admitir velocidades de datos de hasta 40 Gbps, que es significativamente más rápida que las tecnologías PON anteriores.
- Puede admitir servicios simétricos (velocidades de carga y descarga iguales) y asimétricos (velocidades de carga y descarga diferentes).
- NG-PON2 está diseñado para ser escalable, lo que significa que se puede actualizar fácilmente para admitir nuevos servicios y mayores capacidades según sea necesario.
- Cuenta con soporte para múltiples servicios como acceso a Internet, IPTV y telefonía, además de servicios de datos.

- NG-PON2 está diseñada para ser interoperable con otras tecnologías PON, lo que permite una migración fluida y gradual.
- Soporte desde 256 hasta 1024 ONUs (clientes por fibra alimentadora).
- Soporte de alcance extendido de 20 a 60 km, sin uso de regeneradores de la señal.

En 2010, la FSAN estandariza la tecnología NG-PON2, bajo el marco de la serie ITU-T G.989 y se define que estas operarán en la banda C y L, como se puede observar en la figura 1.4.

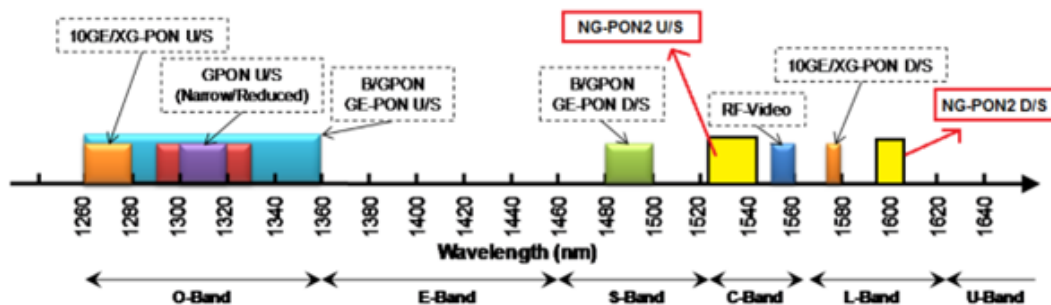


Fig 1.4: Bandas de longitud de onda definidas por la ITU para NG-PON2 [4].

1.3. VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA MIXTA

El surgimiento y desarrollo de aplicaciones con un consumo elevado de ancho de banda ha llevado a un crecimiento exponencial del tráfico heterogéneo en las redes de comunicación. Por lo cual, para satisfacer la(s) demanda(s) de diferentes servicios, las redes que operan a una velocidad de línea de 10 Gbps deben mejorar su capacidad a 40 Gbps y/o 100 Gbps. Sin embargo, este aumento en la tasa de datos requiere una inversión de capital significativa y también puede resultar en el desperdicio de recursos de la red [45].

De esta manera, el concepto de tasa de línea mixta, MLR (*Mixed Line Rate*) en redes WDM, es una buena alternativa para satisfacer la demanda de tráfico actual, puesto que, asigna canales de alta velocidad junto a los canales heredados existentes, además, es un proceso rentable desde el punto de vista energético, donde se implementan transpondedores que utilizan formatos de modulación eficientes, lo que da como resultado un consumo de energía reducido [46]. Por lo tanto, una arquitectura WDM de próxima generación puede admitir MLR, tal y como se muestra en la figura 1.5.

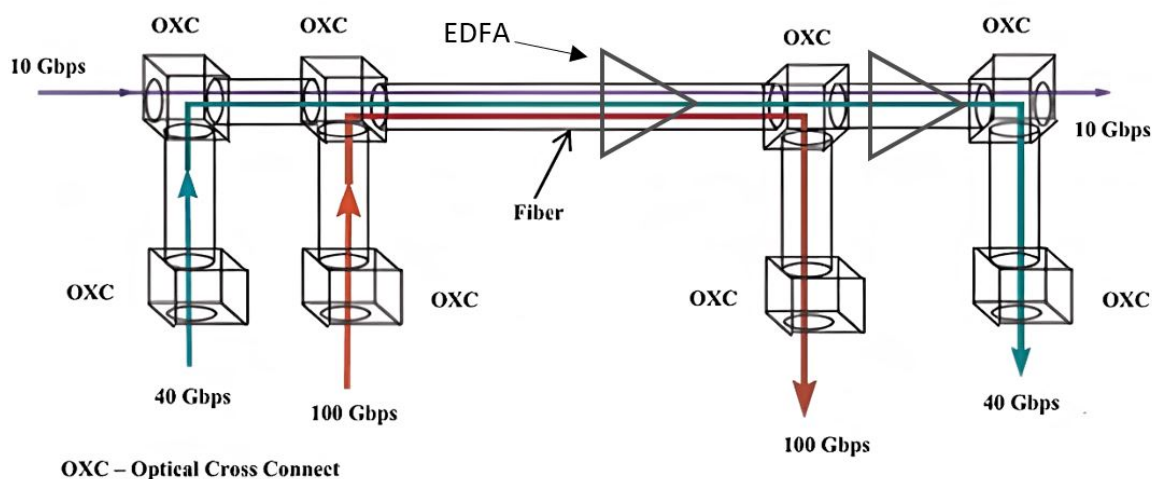


Fig 1.5: Esquema básico de una red MLR [5].

Además, en la figura 1.5 se pueden apreciar algunos componentes de la red, como son:

- **Conector Óptico Cruzado, OXC (*Optical Cross-Connect*):** Puede gestionar de forma flexible y eficiente las redes de transmisión mediante la conexión cruzada de señales ópticas, que está comprendida por varias fibras de entrada, cada una de ellas transportando un canal WDM, y varias fibras de salida que transportan también canales WDM [6]. De este modo, tienen la capacidad de conversión de longitud de onda y la posibilidad de cruzar señales de diferentes formatos de códigos de transmisión y diferentes niveles de velocidad de bits [47].

Con respecto a la funcionalidad de un OXC, este lleva los datos desde una longitud de onda de un puerto de entrada hasta una longitud de onda en un puerto de salida y puede contener los siguientes bloques [6]:

- **Conmutación de Fibras:** Encamina todas las longitudes de onda de una fibra de entrada a una de salida (diferente a la de entrada), lo que se conoce como una conmutación de tipo espacial.
- **Conmutación de longitud de onda (MUX/DEMUX):** Realiza la conmutación de longitudes de onda específicas desde una fibra de entrada hacia múltiples fibras de salida.
- **Conversión de longitudes de onda:** Recibe longitudes de onda entrantes y las convierte a otra frecuencia óptica de salida.

A continuación, en la figura 1.6, se muestra el esquema general de un nodo OXC:

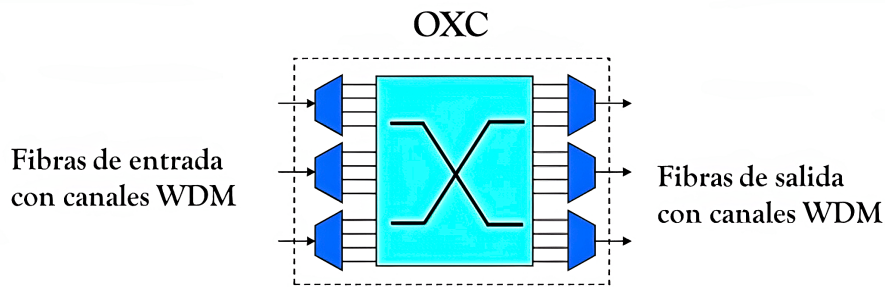


Fig 1.6: Esquema general de un nodo OXC [6].

- **Amplificador de Fibra Dopado con Erblio, EDFA:** Estos amplificadores presentan una buena optimización en el suministro de potencias de bombeo (de varias decenas de mW) por lo que es posible que alcancen altas ganancias de señal, de hasta 50 dB. Además, opera en las bandas C y L (1530 a 1605 nm) de alta empleabilidad en las redes de telecomunicaciones y se puede configurar de tres maneras posibles [48]:
 - **Co-propagación:** La fuente de bombeo es unidireccional, es decir, se propaga en la misma dirección de la señal de información.
 - **Contra-propagación:** Las longitudes de onda de bombeo y la señal se propagan en dirección opuesta.
 - **Bidireccional:** La propagación de la longitud de onda de bombeo es en ambas direcciones.

La gran capacidad de DWDM y los dispositivos de OXCs permitirán una conectividad gestionable, con una alta escalabilidad en distintos escenarios de red, por lo tanto, se puede utilizar no solo para la red local sino también para las redes de transmisión de larga distancia [49]. El análisis detallado de la asignación de tráfico de los OXCs no será tema de estudio para el presente trabajo de grado, debido a que no forma parte de los objetivos planteados inicialmente.

En el diseño de una red óptica MLR, los canales pueden transportar señales de 10/40/100 Gbps, por lo que tendrán diferentes alcances de transmisión según su BER respectiva. Como es el caso de una longitud de onda que opera a 10 Gbps, la cual viaja normalmente a una distancia mayor en comparación con una de 100 Gbps aplicando el mismo formato de modulación [50]. Por lo cual, uno de los retos más importantes es incorporar longitudes de onda con diferentes velocidades de línea, puesto que algunas presentan un alcance más limitado [51]. En la figura 1.7 se representa el concepto de la disponibilidad de la velocidad de línea basado en la restricción de la calidad de la señal, donde rutas largas con mucho tráfico y sujetas a degradación debido a no linealidades, por ejemplo, se verán obligadas a utilizar canales con baja tasas, como sucede del nodo 2 al nodo 13 que permite rutas de 10, 40 o 100 Gbit/s. Sin embargo, solo es posible el tráfico con una velocidad de 10 Gbit/s [50].

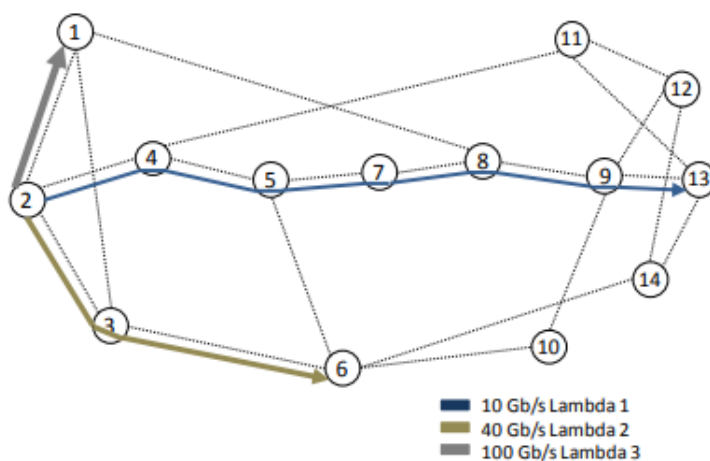


Fig 1.7: Disponibilidad de tarifas de línea basadas en restricciones de calidad de señal [7].

Por otro lado, se debe considerar el espaciado entre canales y los formatos de modulación a utilizar en la red MLR-DWDM, puesto que, a velocidades de línea de hasta 10 Gbps con un espaciado de 100 GHz será compatible con diferentes formatos de modulación simple, como la Modulación Binaria Sencilla Sin Retorno a Cero, NRZ-OOK (*Non Return To Zero On-Off Keying*), Modulación Binaria Sencilla Con Retorno a Cero, RZ-OOK (*Return To Zero On-Off Keying*), entre otros. Sin embargo, adaptar una señal con una alta velocidad de transmisión de 40 Gbps y un espaciado entre canal inferior de 50 GHz, hace que el papel de los formatos de modulación se vuelva importante, dado que, su eficiencia espectral debe ser superior para soportar altas tasas de bit en un espacio de canal angosto. Por lo cual, se proponen formatos de modulación avanzados, como Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura Diferencial, DQPSK (*Differential Quadrature Phase-shift Keying*), Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial, DPSK (*Differential Phase Shift Keying*), Modulación Duobinaria, DB (*Duobinary Modulation*), entre otros, que se adapten a grandes tasas de bits sobre una infraestructura ya existente [52].

Finalmente, el hecho de usar una red MLR-DWDM de tipo NG-PON2 con diferentes capacidades (2.5, 10, 40 Gbps) también permite emplear múltiples formatos de modulación, MMF (*Multiple Modulation Formats*) sobre cada portadora de la señal, en la cual, una tasa de bit de 10 Gbps aplica un formato de modulación simple (NRZ-OOK) y una superior de 40 Gbps utiliza un formato de modulación avanzado (DQPSK) [52], como se puede observar en la figura 1.8.

El diseño de una red MLR con Múltiples Formatos de Modulación ayuda a optimizar el costo general de la red comparado con una MLR a un solo formato de modulación. Por ejemplo, el uso de MMF con DB y DQPSK, aumenta la viabilidad y alcance en los enlaces con altas tasas de bits, puesto que es menos susceptible a las posibles degradaciones en la transmisión, por lo cual, no es necesario la adición de componentes para corregir las

interferencias presentes en el sistema, lo que conlleva a tener un diseño de red de menor costo. No obstante, considerando solo una carga de tráfico baja (2.5/10 Gbps), la diferencia en los costos de dichos modelos de red no es significativa, dado que, el uso de un formato de modulación simple será suficiente para abordar todos los canales de red. De este modo, el diseño de nuevos sistemas ópticos con elevada capacidad de tráfico de datos, deben utilizar MMF. [49].

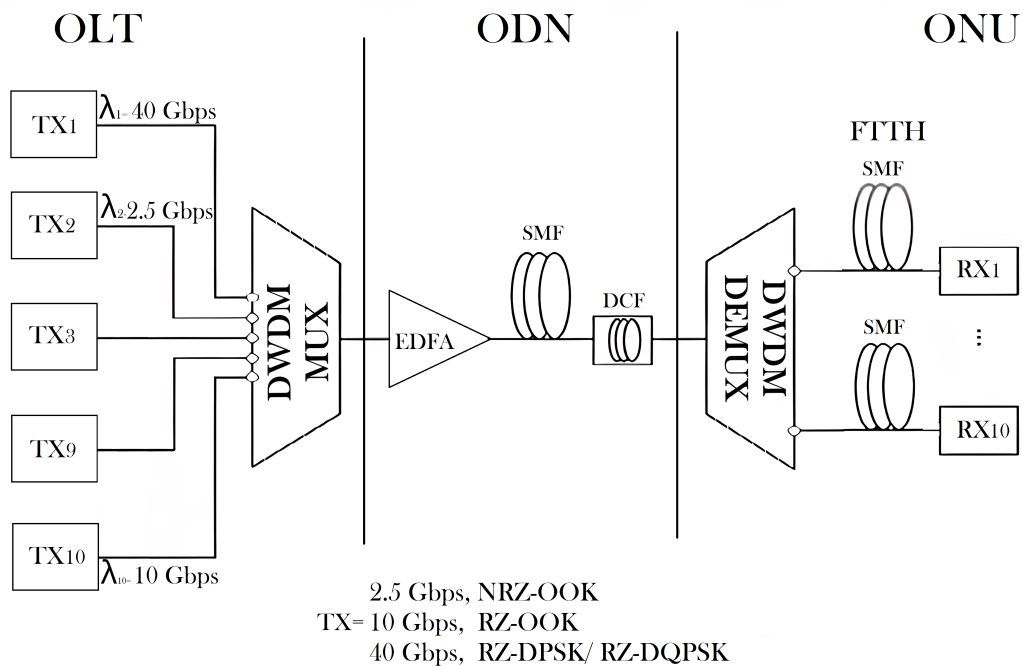


Fig 1.8: Diseño de red MLR-DWDM de tipo NG-PON2 con MMF [5].

1.4. DEGRADACIONES ÓPTICAS

Actualmente, los sistemas de comunicaciones ópticas se enfocan en proponer soluciones para satisfacer la creciente necesidad de ancho de banda, como es el caso de las redes DWDM, las cuales pueden multiplexar gran cantidad de canales para soportar una alta demanda de tráfico. No obstante, dichas tecnologías presentan diferentes degradaciones en el sistema, puesto que a altas tasas de transmisión y un espaciado estrecho entre canales surge la aparición de efectos no lineales del tipo elástico e inelástico [53].

1.4.1. Efectos Lineales

Son degradaciones ópticas que no dependen de la potencia de transmisión y limitan el desempeño de las redes. La figura 1.9, muestra la clasificación de los efectos lineales, donde se encuentran los efectos de pérdidas que corresponden a la atenuación y ruido,

así como, los efectos de dispersión por modo de polarización (PMD) y dispersión cromática (CD).

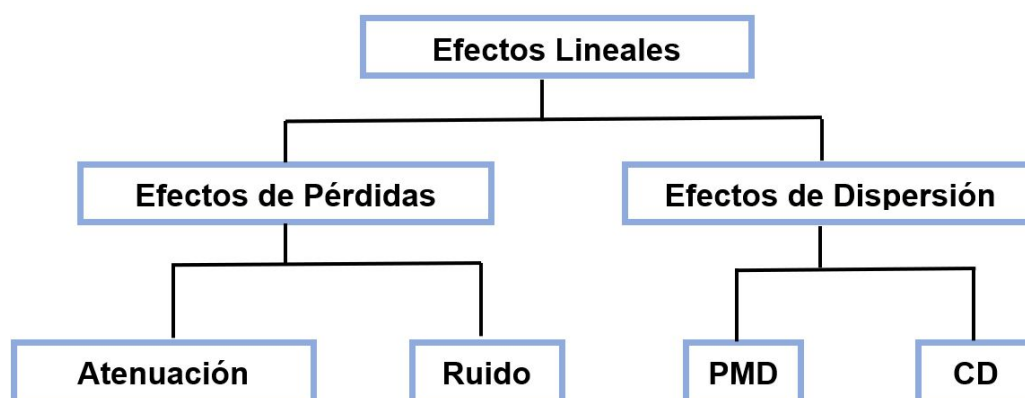


Fig 1.9: Clasificación de los efectos no lineales presentes en las fibras ópticas [8].

- **Efectos de Pérdidas:** Cuando se transmite una señal a través de la fibra, ocurre una disminución en la potencia de la señal, debido a propiedades físicas del medio de transmisión. En la ecuación 1.1 se representan estas pérdidas.

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

Donde,

P_T Potencia transmitida [w].

P_O Potencia de la señal óptica a la entrada de la fibra [w].

α Constante de atenuación [dB/Km].

L Longitud de la fibra óptica [Km]

Con respecto a la atenuación, es un factor que define la distancia máxima que la señal puede alcanzar. En redes DWDM, se encuentran diferentes tipos de fibras con un coeficiente de atenuación menor o igual a 0.2 dB/ Km. Sin embargo, en este tipo de redes cuando se tienen distancias muy extensas, la atenuación disminuye la potencia de la señal, lo que dificultará la buena recepción de los datos [54].

En términos de ruido, la fibra óptica no se ve afectada por fuentes de ruido externo, puesto que la luz del entorno no puede adherirse a la fibra, sin embargo, pueden existir ruidos en el sistema debido a la luz externa que ingresa a la fibra por los extremos del transmisor y receptor. De este modo, es recomendable revestir adecuadamente tanto el transmisor como el receptor con el propósito de enviar la información a la fibra de manera adecuada [54].

- Efectos de Dispersión:** Estos provocan grandes limitaciones en el rendimiento de los sistemas de fibra óptica, dado que, como se muestra en la figura 1.10, la dispersión es un efecto que produce distorsión en la señal, debido a que ensancha el pulso de luz mientras este viaja por el medio, mezclándose dentro de pulsos adyacentes, dificultando la recuperación de la información en el receptor. En el caso de las redes DWDM, éstas son afectadas por dos tipos generales de dispersión: Dispersión por Modo de Polarización y la Dispersión Cromática [9].

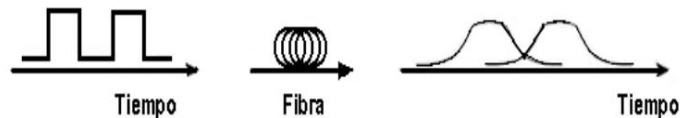


Fig 1.10: Principio de distorsión [9].

- Dispersión por Modo de Polarización:** Presente en fibras de tipo monomodo, causado por la diferencia en las velocidades de grupo de los modos de polarización, donde, diferentes tiempos de llegada producen un ensanchamiento y distorsión en los pulsos, lo que provoca un retardo de grupo diferencial, DGD (*Differential Group Delay*), el cual, es utilizado para determinar la PMD, tal como se observa en la figura 1.11. Este efecto es considerado para velocidades mayores a 2.5 Gbps [55].

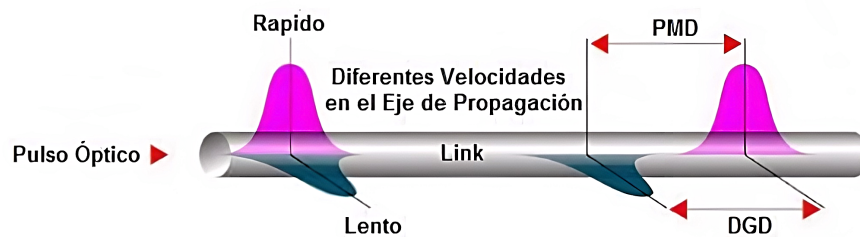


Fig 1.11: Representación gráfica PMD [10].

- Dispersión Cromática:** Es un fenómeno lineal que se produce cuando distintas longitudes de onda se propagan a diferentes velocidades, provocando ensanchamiento de los pulsos transmitidos, lo que a lo largo de la transmisión, degrada la señal. La CD es dependiente de la longitud de onda, puesto que, a mayor longitud de onda, mayor será el tiempo de transición en la fibra, lo que genera mayor dispersión en la señal. De la misma manera, a medida que la distancia del enlace y la velocidad de transmisión aumentan, los efectos de la dispersión cromática también se incrementan [9]. Sin embargo, existen diferentes dispositivos que ayudan a mitigar estas afecciones, como lo son los Módulos de Compensación de Dispersión (DCM), la Fibra Compensadora de Dispersión (DCF), entre otros. Debido a que la dispersión cromática puede dispersar la señal óptica en el tiem-

po, se ha comprobado que este comportamiento ayuda a disminuir los efectos causados por ejemplo, por FWM, dado que estos empeoran al operar a la potencia máxima de transmisión del sistema y esta no será alcanzable si actúa la CD a lo largo de la transmisión. No obstante, es importante tener en cuenta que la relación entre estos dos fenómenos es compleja y depende de la configuración de la red y las condiciones de funcionamiento.

1.4.2. Efectos No Lineales

En cuanto a los fenómenos no lineales, uno de los más predominantes es la Mezcla de Cuatro Ondas, que se produce debido a la interacción de múltiples señales en la fibra óptica ocasionando la generación de componentes no deseadas. Además, el impacto de dicho fenómeno es más predominante con el aumento en el número de canales en una configuración DWDM. Por consiguiente, FWM es una de las alteraciones más importantes a tener en cuenta al momento de diseñar una red en comparación con otros subtipos de no linealidades [53].

En la figura 1.12, se aprecian los principales efectos no lineales y su clasificación, donde un efecto óptico es no lineal cuando sus parámetros dependen de la intensidad de la señal óptica, en este caso, aumenta en mayor medida si se transmite a velocidades superiores a 10 Gbps, dichos fenómenos aparecen por los cambios del índice de refracción del medio con respecto al efecto de dispersión inelástica (Scattering) y la intensidad óptica de la señal (efecto Kerr) [56].

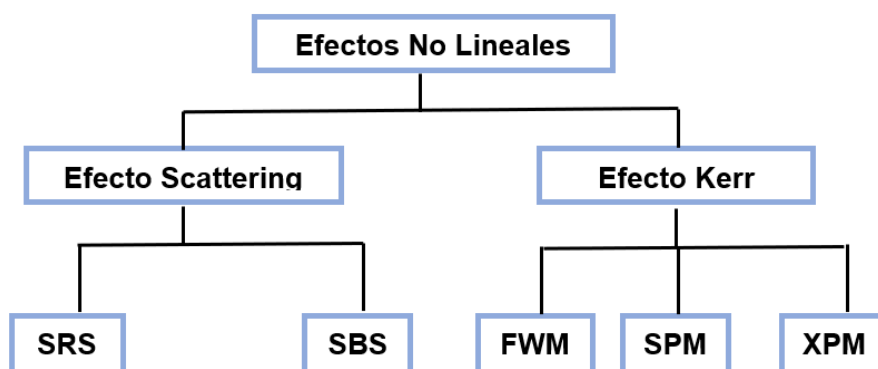


Fig 1.12: Efectos no lineales [8].

1.4.2.1. Efectos No Lineales De Tipo Inelástico

El fenómeno de dispersión inelástico se produce por la interacción entre las señales ópticas transmitidas y el material de la fibra óptica (vidrio o silicio), donde las ondas incidentes se dispersan al entrar en contacto con la fibra óptica, dicha transferencia de energía causa

ganancia o atenuación no lineal en el medio. A este grupo de fenómenos pertenece: Dispersión Estimulada de Brillouin, SBS (*Stimulated Brillouin Scattering*) y Dispersión Estimulada de Raman, SRS (*Stimulated Raman Scattering*), efectos que se derivan de la dispersión de Rayleigh, la cual se debe a las no uniformidades del material, como la densidad, la constante dieléctrica o el índice de refracción [57].

- Dispersión Estimulada De Raman, SRS:** Este efecto puede limitar severamente el rendimiento de los sistemas de ondas de luz multicanal al transferir energía de un canal a los canales vecinos, puesto que, en cualquier medio molecular, la dispersión estimulada de Raman puede transferir una pequeña fracción de potencia de un campo óptico a otro, cuya frecuencia se reduce en una cantidad determinada por los modos de vibración del medio. Este proceso se denomina efecto Raman y se describe como la dispersión de un fotón por una de las moléculas a un fotón de menor frecuencia, mientras que la molécula hace la transición a un estado vibratorio de mayor energía [58]. En la figura 1.13 se aprecia el efecto mencionado.

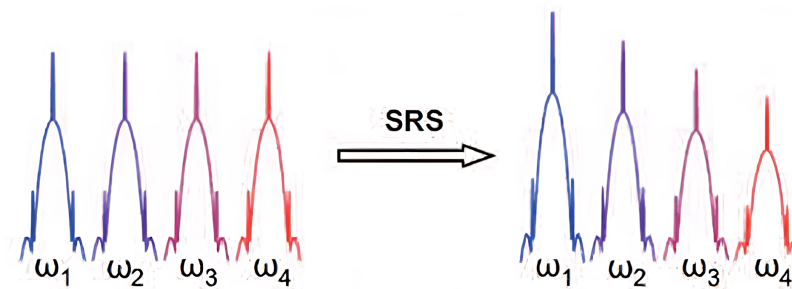


Fig 1.13: Fenómeno de Dispersión Estimulada de Raman [11].

- Dispersión Estimulada de Brillouin, SBS:** Es un proceso no lineal que ocurre en la fibra óptica a nivel de potencia de entrada. Este fenómeno surge de la interacción entre el campo óptico y fotones en la fibra, cuando la potencia de inserción es muy elevada se generan vibraciones en el medio de transmisión y este, a su vez produce ondas acústicas que cambian la densidad del material provocando una alteración del índice de refracción. El efecto Brillouin puede incidir tanto hacia adelante como hacia atrás, afectando solo en el sentido contrario a la onda de luz transmitida [58]. En la figura 1.14, se puede apreciar el efecto SBS.

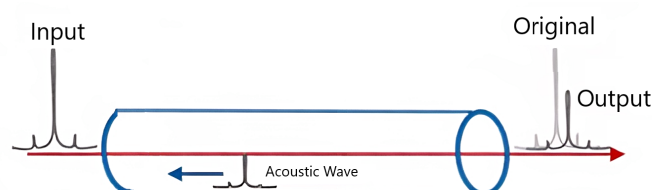


Fig 1.14: Fenómeno de Dispersión Estimulada de Brillouin [12].

1.4.2.2. Efectos No Lineales De Tipo Elástico

Los efectos no lineales del tipo elástico lo constituyen todos aquellos fenómenos en los que se produce una variación del índice de refracción ante el aumento de la intensidad óptica a altas potencias de transmisión [57]. Los fenómenos que pertenecen a este tipo de no linealidad son: Auto-Modulación de Fase, SPM (*Self-phase Modulation*), Modulación de Fase Cruzada, XPM (*Cross-phase Modulation*) y FWM.

De manera general, se describe la propagación de onda a través de un núcleo de fibra a cierta distancia, donde se tiene la Ecuación No Lineal de Schrödinger Generalizada, GNLSE (*General Schrodinger Nonlinear Equation*) [21].

$$\frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{\alpha(z)}{2}E - \frac{\beta_2(z)\partial^2 E}{2\partial t^2} + \frac{\beta_3(z)\partial^3 E}{6\partial t^3} + j\gamma|E^2|E \quad (1.2)$$

La ecuación 1.2 representa la propagación de un campo óptico $E(z, t)$, el cual muestra la presencia de diferentes campos DWDM como las Emisiones Espontáneamente Amplificadas, ASE (*Spontaneous Amplified Emission*), generadas durante el fenómeno de Kerr que hace referencia a la dependencia de la intensidad de la señal con el índice de refracción del medio en el cual no se genera transferencia de energía [21], donde:

$ E^2 $	Potencia del canal óptico.
γ	Coefficiente de no-linealidades de Kerr.
$\alpha(z)$	Constante de atenuación.
β	Constante del modo de propagación en la frecuencia central

El efecto Kerr, provoca la dependencia no lineal del índice de refracción respecto de la intensidad de la onda incidente, generando los efectos no lineales SPM, XPM y FWM. Por lo cual, el índice de refracción de la fibra óptica va a depender de la potencia de la señal transmitida y se expresa mediante la siguiente ecuación 1.3 [59].

$$n = n_o + n_2 \frac{P_{in}}{A_{eff}} \quad (1.3)$$

Donde,

n_o	Índice de refracción lineal.
n_2	Índice de refracción no lineal.
$\frac{P_{in}}{A_{eff}}$	Intensidad de la onda incidente.

La no linealidad del índice de refracción produce un cambio de fase en la señal propagada, como se muestra en la ecuación 1.4.

$$\phi_{NoLineal} = \gamma L_{eff} \quad (1.4)$$

Se define el coeficiente no lineal en la ecuación 1.5.

$$\gamma = \frac{2\pi f_p n_2}{CA_{eff}} \quad (1.5)$$

Donde,

c Velocidad de la luz.

f_p Frecuencia del pulso.

La longitud efectiva, referente a la distancia que debe transitar la luz para que sucedan los fenómenos no lineales, se calcula mediante la ecuación 1.6 [13].

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (1.6)$$

Donde,

α Atenuación de la fibra.

L Longitud total del enlace.

Además, dependiendo de la potencia aplicada, la constante de propagación se vuelve no lineal.

$$\beta_{NL} = \beta + \gamma P \quad (1.7)$$

La ecuación 1.7 muestra el efecto Kerr que se está tratando, donde tener una onda a una alta intensidad produce un cambio en la fase [59]. A continuación, se describen cada uno de los efectos no lineales mencionados (SPM, XPM, FWM), enfatizando en el efecto FWM, puesto que su aparición va a ser determinante en el diseño de las arquitecturas a considerar en el presente trabajo de grado.

- Automodulación de fase, SPM:** Este efecto surge debido a que el índice de refracción de la fibra tiene un componente dependiente de la intensidad. Este índice de refracción no lineal provoca un cambio de fase inducido que es proporcional a la intensidad del pulso. Así, diferentes partes del pulso experimentan diferentes cambios de fase. Este efecto es proporcional a la potencia de la señal transmitida, por lo que los efectos de SPM son más pronunciados en sistemas que utilizan altas potencias de transmisión [13].

En la figura 1.15 se observa el fenómeno SPM, donde el desplazamiento de la fase, denominada "Chirp", produce frecuencias bajas o altas en la señal, provocando un ensanchamiento del pulso [57].

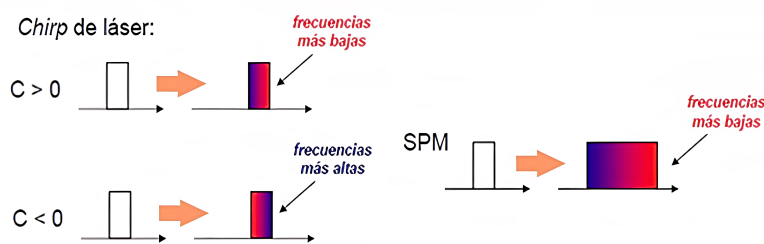


Fig 1.15: Fenómeno de Modulación de Fase Inducida [13].

- Modulación por fase cruzada, XPM:** Este fenómeno aparece cuando se transmiten dos canales o más simultáneamente a través de la fibra óptica, por lo que el índice de refracción efectivo va a depender de la intensidad de onda que se transmite y cualquier señal que se propague dentro del medio. En este caso, la interacción que ocurre entre los dos pulsos, genera que la potencia de uno incida sobre el desplazamiento de fase del otro, provocando un ensanchamiento de dicho pulso [11]. XPM puede generar asimetrías en el pulso óptico, además de que su efecto puede llegar a ser más nocivo si se combina con la dispersión propia del material, dado que puede alterar la forma del pulso en el dominio del tiempo [13]. Cabe mencionar que la principal diferencia entre XPM y SPM radica en la forma del ensanchamiento del pulso asimétrico, puesto que XPM desarrolla oscilaciones solo a un lado de este y no en ambos como se presenta en SPM [11].

En la figura 1.16 se muestra el fenómeno XPM.

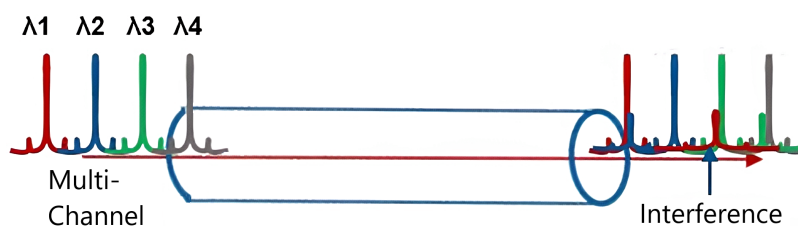


Fig 1.16: Fenómeno de Modulación por Fase Cruzada [12].

- Mezcla de cuatro ondas, FWM:** FWM, es un fenómeno que se produce cuando se propagan dos o más frecuencias centrales $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ con potencias p_i, p_j, p_j por un mismo hilo de fibra óptica, de manera que, al interactuar en el interior de la fibra se produce una cuarta onda, la cual se origina a causa de la dependencia entre el índice de refracción de la fibra y la intensidad de las señales ocasionando la aparición de nuevas componentes de frecuencia o longitudes de onda, lo que genera un medio de propagación no lineal, conocido como efecto Kerr. Las frecuencias centrales adicionales se pueden calcular sumando los múltiplos enteros positivos o negativos N_i de todas las frecuencias centrales de la señal contribuyente, así como se muestra

en la ecuación 1.8 [60].

$$f_{IM} = N_1 f_1 \pm N_2 f_2 \pm N_3 f_3 \dots \quad (1.8)$$

$$IM_{Order} = \sum_{i=1}^M |N_i| \quad (1.9)$$

Donde,

- f_{IM} Frecuencia central del componente de la señal generada [THz].
- f_i Frecuencia central de la señal DWDM [THz].
- N_i Cualquier número entero con coeficientes, incluido cero, donde $i = 1$ a M .
- M Número total de señales DWDM en la fibra.
- IM_{Order} Orden de intermodulación.

Para el caso en el que se propagan 3 señales DWDM en la fibra, donde N será igual a $0, \pm 1$ o ± 2 , su combinación puede inducir hasta nueve componentes de señal, tal como se muestra en las ecuaciones 1.10 a 1.17.

$$f_{123} = f_1 + f_2 - f_3 \text{ (igual a } f_{213} = f_2 + f_1 - f_3) \quad (1.10)$$

La generación de nuevas componentes de frecuencia, son de gran consideración en sistemas DWDM, debido a las limitaciones que producen en los canales de transmisión. Incluso, aumenta su importancia cuando los canales del sistema DWDM están más próximos, por lo tanto, se debe realizar un análisis adecuado del espaciamiento entre canales para evitar las degradaciones del efecto FWM [11]. La figura 1.17, muestra la generación de nuevas frecuencias en un sistema DWDM con 3 señales igualmente espaciadas a 100 GHz.

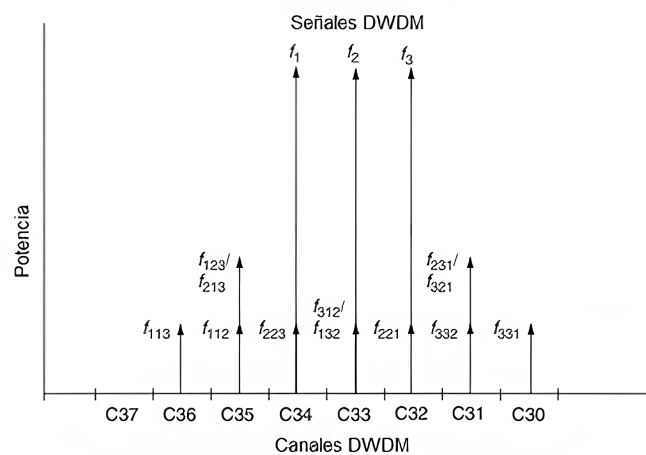


Fig 1.17: Efecto de FWM para tres canales [11].

Para calcular el número total de componentes FWM se puede estimar a través de la siguiente ecuación 1.11, donde el número de frecuencias adicionales aumenta expo-

nencialmente con el número de señales en la fibra óptica [59].

$$N_{IM} = \frac{M^2(M-1)}{2} \quad (1.11)$$

Donde,

N_{IM} Número máximo posible de componentes FWM generados.

M Número de señales que se propagan en la fibra.

La tabla 1.3, muestra el número total de componentes FWM que pueden aparecer en los mismos canales DWDM.

Número de Señales (M)	Número total posible de componentes FWM generados (NIM)
2	2
3	9
4	24
8	224
16	1920
32	15872
40	31200
80	352800

Tabla 1.3: Número máximo de componentes FWM para sistemas DWDM de varios tamaños. Adaptada de [11]

A medida que aumenta la cantidad de señales que se propagan en la fibra, la cantidad posible de componentes generados por FWM incrementa exponencialmente. Sin embargo, no todos estos componentes serán lo suficientemente fuertes como para causar interferencia, puesto que se requieren ciertas condiciones en la fibra, para que ocurra FWM, tales como [11]:

- La fase de las constantes de propagación de las señales DWDM debe coincidir.
- Espaciado estrecho de canales WDM (DWDM).
- Altos niveles de densidad de potencia de señal de canal.

Por lo tanto, el efecto FWM en sistemas DWDM da como resultado:

- Generación de componentes FWM que interfieren con la señal original y otras señales DWDM que causan interferencia de diafonía entre canales, lo que reduce la OSNR y aumenta la BER.
- La potencia óptica se transfiere desde la señal DWDM original a los componentes de interferencia generados.

De esta manera, para comprender en detalle el efecto FWM se considera el sistema DWDM con “n canales”, donde el campo eléctrico se determina a partir de la ecuación 1.12 [46].

$$E(r, t) = \sum_{i=1}^n E_i \cos(w_i t - \beta_i z) \quad (1.12)$$

Por otro lado, se tiene el Vector de Polarización no Lineal, PNL (*Non-Linear Polarization*) presente en la ecuación 1.13 [60].

$$P_{NL} = \varepsilon_o X^3 E^3 \quad (1.13)$$

Donde,

X^3 Susceptibilidad de Tercer Orden

Para el caso FWM, la PNL se determina a partir de la ecuación 1.14, donde aparece un conjunto de términos en los que las “n frecuencias” presentes se mezclan de todas las formas posibles. Por lo cual, los nuevos campos que se generan tendrán frecuencias $w_i \pm w_j \pm w_k$. La aparición de estas nuevas componentes, que surgen de la suma o resta de los valores de las tres frecuencias iniciales, justifica el nombre que se le da a este fenómeno no lineal, denominado Mezcla de cuatro ondas, debido al surgimiento de una cuarta onda [60].

$$P_{NL} = \varepsilon_o X^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n E_i \cos(w_i t - \beta_i z) E_j \cos(w_j t - \beta_j z) E_k \cos(w_k t - \beta_k z) \quad (1.14)$$

El desarrollo de la ecuación 1.14 lleva al modelo descrito de la ecuación 1.15, donde los términos de la forma $w_i \pm w_j \pm w_k$ con $i, j \neq k$ son los que generan este fenómeno [60].

$$w_{ijk} = w_i + w_j - w_k \quad (1.15)$$

Por último, para el caso en que únicamente hay dos frecuencias distintas, las nuevas componentes que se generen están definidas en la ecuación 1.16 [60].

$$2w_1 - w_2, 2w_2 - w_1 \quad (1.16)$$

Por lo tanto, si están presentes “n canales”, con “n frecuencias” diferentes, el número de nuevas señales M que podrían aparecer, vienen de la ecuación 1.17. De esta manera, el efecto FWM será más pronunciado cuantos más canales estén presentes [60].

$$M = \frac{1}{2}(N^3 - N^2) \quad (1.17)$$

Para el caso de un sistema MLR de tipo NG-PON2, este fenómeno de intermodulación se vuelve más predominante, debido al aumento en el número de canales, lo que genera una reducción en el espaciamiento entre ellos, produciendo así, un mayor

deterioro en la transmisión [61]. Además, al requerir altas velocidades de datos, se debe considerar una mayor potencia de entrada para lograr una relación señal a ruido óptico, OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*) óptima, lo que conlleva a un aumento significativo del fenómeno FWM [61]. Por lo tanto, teniendo en cuenta los efectos de FWM y los factores que pueden llegar a empeorarlo, se considera utilizar formatos de modulación avanzados con una alta eficiencia espectral, garantizando una disminución considerable de dicho efecto.

1.5. FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS

El uso adecuado de formatos de modulación avanzados disminuye considerablemente la aparición de efectos lineales y no lineales, puesto que, al presentar una mejor eficiencia espectral, va a influir directamente en la tolerancia a dichos efectos. Incluso, para sistemas DWDM, permite un espaciamiento menor en comparación con formatos de modulación básicos que tienen un espectro óptico más amplio [15]. Por consiguiente, se hace necesario el estudio de diferentes formatos de modulación con el apoyo de distintos artículos que describan los que mejor desempeño presentan ante los efectos no lineales. A continuación, se muestran las investigaciones seleccionadas:

Simulation of FWM effects in WDM systems with various modulations formats [34].

Se presenta un análisis del efecto FWM en sistemas ópticos WDM, teniendo en cuenta factores como la separación entre canal, variación de la dispersión y la potencia de entrada aplicando diferentes formatos de modulación RZ/NRZ-OOK, M-PSK, M-QAM. De este modo, en el artículo se hace un incremento de la dispersión en la fibra, lo cual, disminuye el efecto no lineal FWM, además, se demuestra que aumentar considerablemente la potencia en entrada puede llegar a degradar la señal. En [34] se concluye que el formato de modulación RZ-OOK presenta la mejor respuesta ante las consideraciones expuestas a tasas de transmisión bajas, sin embargo, el artículo recomienda el uso de esquemas de modulación avanzados M-PSK o M-QAM para un mejor rendimiento.

Effects of Cross-phase Modulation and Four-Wave Mixing in DWDM Optical Systems Using RZ and NRZ Signal [62].

Se comparan los formatos de modulación RZ-OOK y NRZ-OOK para sistemas DWDM, haciendo una variación en los niveles de dispersión y el número de canales para analizar el efecto de FWM. De este modo, la modulación RZ-OOK presenta un mejor desempeño ante las variaciones del sistema con respecto a NRZ-OOK.

Optical Network Design with Mixed Line Rates and Multiple Modulation Formats

[50].

En [50] se explora el uso de múltiples velocidades de transmisiones con diferentes formatos de modulación, llegando a la conclusión que el uso de la Modulación por Desplazamiento de Cuadratura de Fase Diferencial, DQPSK es la mejor opción en cuanto a la reducción de los efectos degradantes de la señal, debido a su tolerancia a la dispersión y diafonía de WDM.

Investigation of launch power and regenerator placement effect on the design of mixed-line-rate (MLR) optical WDM networks [63].

En [63] se realiza el diseño de una red MLR-WDM, con el fin de analizar la potencia de lanzamiento y como la variación de esta puede reducir significativamente el costo de la red. Además dentro del artículo se estudia también el uso de diferentes formatos de modulación, especificando que los mejores resultados fueron obtenidos al hacer uso de RZ-DPSK para los canales de 10 Gbps y de RZ-DQPSK para los canales de 40 Gbps.

Spectral and power efficiency investigation in single- and multi-line-rate optical wavelength division multiplexed (WDM) networks [5].

En [5] se compara la eficiencia energética entre una red MLR y una SLR, estudiando también el uso de múltiples formatos de modulación dentro de un mismo sistema, es así como se concluye que para velocidades bajas de transmisión (2.5/10 Gbps) la técnica de modulación NRZ-OOK entrega mejores resultados, mientras que para 40 Gbps la mejor opción es el uso del formato NRZ-DPSK.

Por otro lado, uno de los aspectos a tener en cuenta en la elección de un formato de modulación, es el espectro óptico, el cual, preferiblemente debe ser angosto para que permita un reducido espaciado entre canal, puesto que, influye directamente en la aparición de los efectos no lineales como FWM, por lo tanto, mientras menor sea el rango del espectro óptico, mejor será el desempeño óptico del sistema disminuyendo la aparición de componentes adicionales, como ocurre con el formato RZ-DQPSK que presenta un espectro más compacto en comparación con RZ-DPSK [18].

Teniendo en cuenta lo mencionado y los artículos expuestos anteriormente, se procede a seleccionar los formatos de modulación que mejor desempeño presenten ante las diferentes exigencias de diseño en las redes MLR-DWDM de tipo NG-PON2, por lo cual, se determina que los formatos NRZ-OOK, RZ-OOK, RZ-DPSK y RZ-DQPSK proporcionan la mejor adaptación ante estos requisitos. A continuación, se describen sus principales características.

1.5.1. NRZ-OOK

El formato de modulación NRZ-OOK es uno de los más predominantes en los sistemas de comunicación de fibra óptica, debido a que combina una estructura rentable de transmisor y receptor con un rendimiento adecuado al trabajar a velocidades de 2.5 o 10 Gbps [16]. Sin embargo, NRZ-OOK no es lo suficientemente robusto para redes ópticas que exijan gran capacidad de transmisión [17]. En la figura 1.18 se puede visualizar el código de línea de una señal NRZ-OOK, donde el nivel de tensión se mantiene constante durante toda la duración del bit.

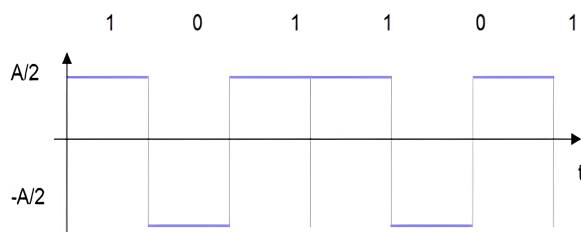


Fig 1.18: Código de línea NRZ [14].

La figura 1.19 muestra el diagrama de bloques de un transmisor NRZ-OOK, en el cual, se presenta un láser y un generador de pulsos para los datos a transmitir, que pasan por un controlador de amplitud NRZ para definir la amplitud de los bits 1 y 0, de esta manera, la señal eléctrica se modula con un modulador de intensidad externo, Mach-Zehnder (MZ), encargado de convertir una señal eléctrica en una señal óptica junto a un voltaje de polarización que establece la señal en intensidad. Se utiliza también un fotodiodo simple en el receptor para detectar la señal óptica NRZ que convierte la potencia óptica de la señal en corriente eléctrica [17]. La figura 1.20 muestra el espectro óptico de la señal modulada NRZ-OOK y la representación del diagrama de ojo ideal. El cual, presenta un buen desempeño a bajas tasas de transmisión, sin embargo, es muy sensible frente al ruido de sistemas de amplificación, por lo que no es adecuado para velocidades superiores a 10 Gbps, debido a su baja tolerancia frente a los efectos no lineales [17].

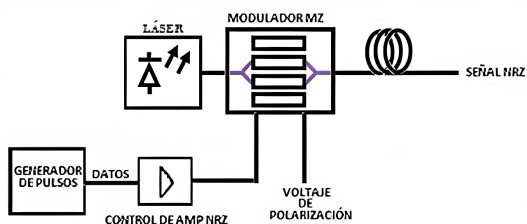


Fig 1.19: Transmisor NRZ-OOK [13].

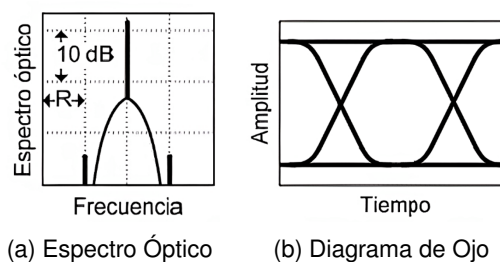


Fig 1.20: Formato NRZ-OOK [15].

1.5.2. RZ-OOK

RZ-OOK, al igual que el formato anterior, es uno de los más utilizados en sistemas de comunicaciones ópticas, además, debido a su configuración es más robusto frente a las degradaciones generadas por los efectos de tipo lineal y no lineal [21]. En la figura 1.21, se indica el código de línea de una señal RZ-OOK, en el cual, el pulso ocupa solo una parte de la ranura de bits, por lo que tiene la mitad del ciclo útil de trabajo.

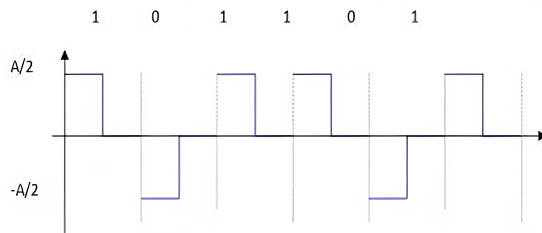


Fig 1.21: Código de línea RZ [14].

En la figura 1.22 se muestra el diagrama de bloques de un transmisor RZ-OOK, en el cual, el formato RZ-OOK se produce a través de una señal NRZ, donde, otro Modulador Mach-Zenhdler o Pulso Carver coloca al 1 una intensidad con un tiempo de duración de bit mucho menor [64]. En la figura 1.23 se muestra el espectro óptico y el diagrama de ojo ideal de una señal RZ-OOK, que es muy diferente al visto en NRZ-OOK debido a los cambios realizados en la transmisión de la señal [17].

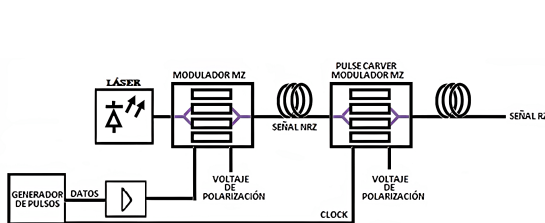
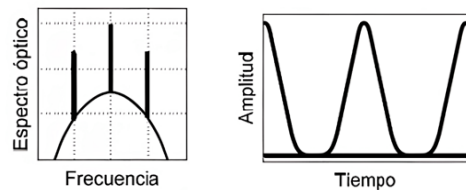


Fig 1.22: Transmisor RZ-OOK [13].



(a) Espectro Óptico (b) Diagrama de Ojo

Fig 1.23: Formato RZ-OOK [15].

1.5.3. DPSK

La modulación PSK (Desplazamiento de Fase) modifica la fase de la portadora en función de los bits transmitidos, mientras que su amplitud se mantiene constante, lo que provoca una ventaja mayor para este tipo de formatos de modulación, puesto que los efectos no lineales producidos por los cambios de amplitud de la señal son eliminados. Ahora bien, el formato de modulación DPSK se considera una forma no-coherente de PSK y por ello, en la recepción se evita la necesidad de una señal coherente de referencia para la recuperación de la señal portadora. La implementación de el esquema de modulación DPSK es muy usada en sistemas con altas tasas de transmisión como 40 Gbps, debido a su efi-

ciencia para mitigar los efectos no lineales, permitiendo alcanzar mayores distancias con poca pérdida de información [16]. Además, el hecho de actuar sobre la fase y no sobre la amplitud, permite obtener resultados adecuados para altos niveles de potencia, por lo cual, no estimula penalidades de potencia en comparación con otros formatos de modulación como DQPSK que si es susceptible frente a las variaciones de intensidad de la señal [21]. En la figura 1.24 se puede observar los elementos que componen un transmisor RZ-DPSK común, donde, en primer lugar, se encuentra un láser de onda continua que transmite la información seguido por un modulador de fase electroóptico que genera una señal óptica NRZ-DPSK convencional, y luego, esta señal óptica es modulada por una señal de reloj de la misma tasa de datos con el segundo modulador para el cambio de fase 0 o Π entre bits adyacentes. Posteriormente, se detecta la señal DPSK con un Interferómetro MZD para obtener las fases de la señal, donde a través de un Detector Coherente o Detector Balanceado recupera los datos transmitidos [16].

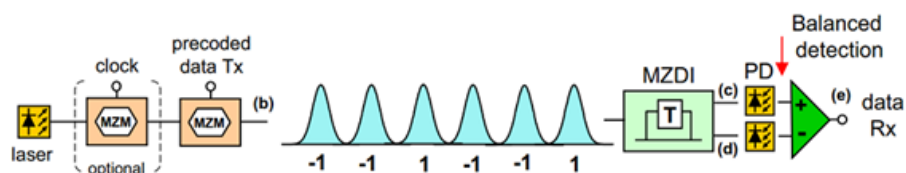


Fig 1.24: Transmisor RZ-DPSK [16].

En la figura 1.25 se observan los diferentes tipos de señales, en el cual, en (a) se encuentra el diagrama de ojo después de la demodulación, para (b) la componente constructiva, (c) la componente destructiva y en (d) finalmente, se muestra el diagrama de ojo después del Detector Coherente una señal RZ-DPSK.

En la figura 1.26 se muestran el espectro óptico de la señal RZ-DPSK. Seguidamente, en (b) el diagrama de símbolos DPSK, en el cual, el bit 1 digital es codificado si se presenta un cambio en la fase de Π entre los bits de datos consecutivos de la portadora óptica, mientras que el bit 0 digital será codificado si no se presenta dicho cambio de fase. Por último, en la figura c, el diagrama de ojo ideal [16].

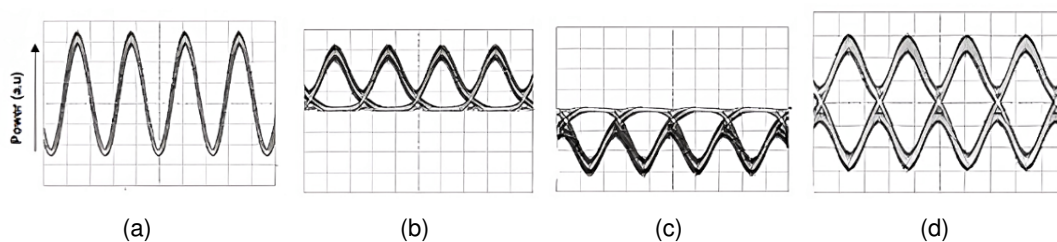


Fig 1.25: Diagramas de ojos medidos para RZ-DPSK [16].

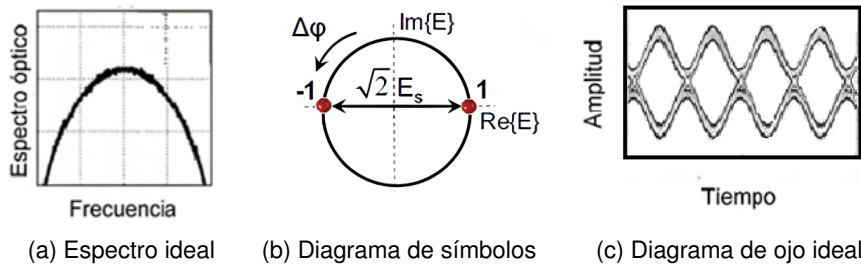


Fig 1.26: Formato RZ-DPSK [17].

1.5.4. DQPSK

DQPSK es el único formato de modulación multinivel debido a que transmite 2 bits por símbolo, es decir, presenta los cuatro cambios de fase $0, +\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2}, \pi$ a una tasa de símbolo de la mitad de la tasa de bits agregada. Además, una de sus características más importantes de este esquema de modulación es la capacidad de ofrecer el doble de ancho de banda incrementando significativamente la eficiencia espectral [21]. En la figura 1.27 se muestra la codificación de los datos, donde no se codifica 1 bit, si no, 2 bits con diferentes cambios de la señal [16].

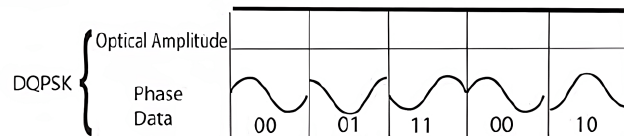


Fig 1.27: Codificación de los datos DQPSK [16].

En la figura 1.28 se puede observar la configuración de un transmisor DQPSK común, que consta de una fuente láser de onda continua, dos MZM que funcionan como moduladores de fase, un desfasador óptico $\frac{\pi}{2}$ en uno de los caminos y un combinador para producir una sola señal de salida. Usando esta estructura de transmisor, se aprovechan los cambios de fase π casi perfectos producidos por los MZM. En el receptor, la señal DQPSK se divide en dos partes iguales, y se usan receptores balanceados con interferómetros de retardo polarizados en paralelo para demodular simultáneamente los dos flujos de datos binarios contenidos en la señal DQPSK [16].

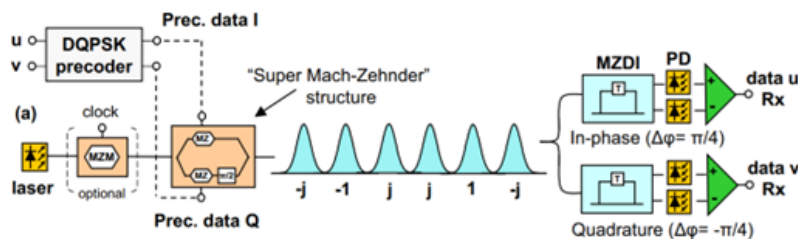


Fig 1.28: Transmisor DQPSK [16].

En la figura 1.29 se observan los diferentes tipos de señales, en el cual, en el diagrama de ojo (a) se encuentra la señal NRZ-DQPSK, para (b) después de la fase de demodulación y (c) la señal RZ-DQPSK, en (d) finalmente la señal RZ-DQPSK luego de la fase de demodulación.

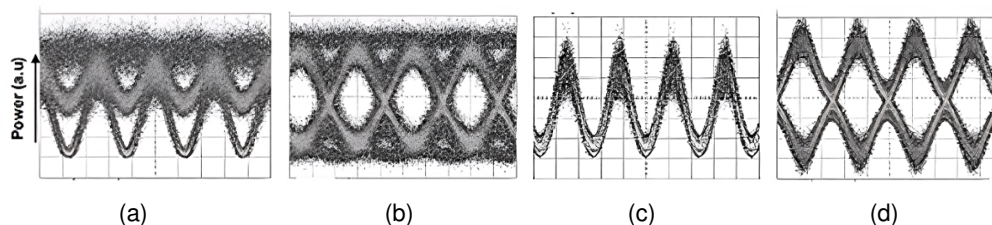


Fig 1.29: Diagramas de ojos medidos para RZ-DQPSK [16].

En la figura 1.30 (a) se muestra el espectro óptico del formato DQPSK, el cual, es más angosto comparado con DPSK, permitiendo tener una proximidad mayor entre canales adyacentes obteniendo resultados eficientes [17]. DQPSK es una de las mejores alternativas en altas tasas de transmisión como 40 Gbps o 100 Gbps, permitiendo una mejor tolerancia frente a los efectos no lineales como el fenómeno FWM. [16]. En (b), se encuentra el diagrama de constelación de la modulación DQPSK, en el cual, el número de símbolos es el doble y la distancia entre los puntos de cada constelación es reducida a la mitad que en DPSK, donde dicha reducción requiere al menos una OSNR de 3 dB por encima, para conservar la misma BER. Por último, en la figura c, el diagrama de ojo ideal [16].

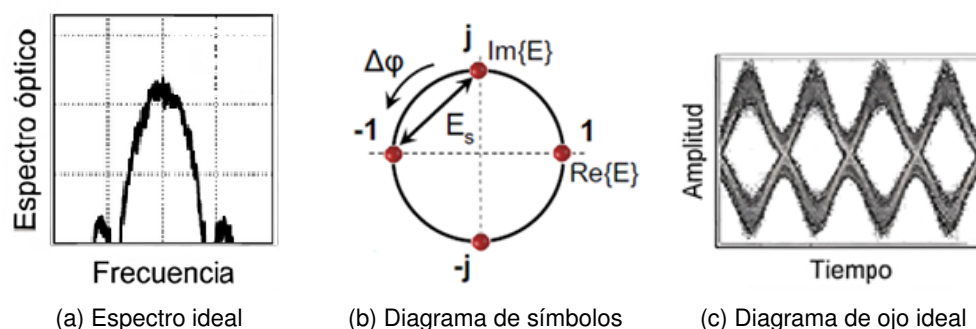


Fig 1.30: Formato RZ-DQPSK [18].

Nota de Autor:

Mediante la realización de este capítulo se definieron las características de una red MLR-DWDM de tipo NG-PON2 (figura 1.8) y se identificaron los formatos de modulación que cumplan con los requerimientos necesarios para operar en una arquitectura de red en presencia del efecto FWM, esto en base a una investigación realizada tomando diferentes libros y artículos de interés, dando así cumplimiento al primer objetivo específico propuesto para el presente trabajo de grado.

Capítulo 2

MARCO METODOLÓGICO

2.1. MONITOREO DE DESEMPEÑO ÓPTICO

El monitoreo de Desempeño Óptico, OPM (*Optical Performance Monitoring*) permite obtener información sobre el rendimiento de una señal de comunicación óptica, mediante la evaluación de los cambios que se puedan presentar en los datos, resultado de diversas degradaciones; de modo que, la alteración de un efecto particular cambiará un parámetro medido [65]. En sistemas WDM, OPM es altamente usado como mecanismo para mejorar el control de la gestión de fallos de capa física y de transmisión, con el propósito de determinar el buen funcionamiento del sistema y garantizar la eficiencia de la red en general.

2.1.1. Parámetros de Desempeño Óptico:

En el estándar ITU-T G.697 [66] se definen una serie de parámetros que proveen información sobre el desempeño de una red DWDM, entre estos se encuentran:

- **Tasa de Error de Bit, BER (*Bit Error Rate*):** Este parámetro representa el número esperado de bits que se han transmitido de manera errónea. Los sistemas ópticos actuales presentan una tasa de error baja, de alrededor de 10^{-12} , lo que indica que existe un bit erróneo por cada mil millones de bits transmitidos. En la figura 2.1 se muestra la distribución de probabilidad Gaussiana para "0" y "1" lógicos, basado en la relación entre la función de densidad de probabilidad y la BER [19].

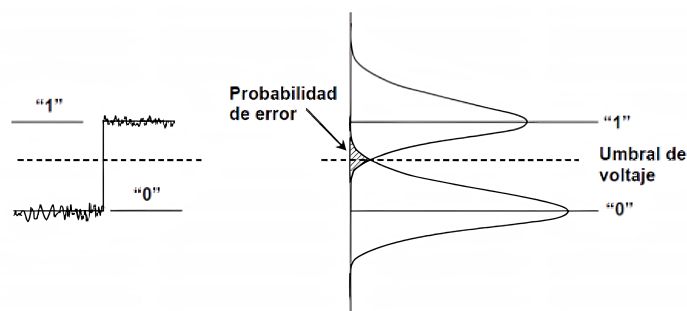


Fig 2.1: Relación entre la función de densidad de probabilidad y la BER [19].

- Relación Señal a Ruido óptica, OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*):** Hace referencia a la medida de la relación de la potencia de la señal con respecto a la potencia de ruido en un canal óptico. La OSNR muestra la degradación que sufre la señal óptica por las atenuaciones presentes a lo largo de la red y puede calcularse mediante la siguiente ecuación 2.1 [21]:

$$OSNR = 10\log\frac{P_i}{N_i} + 10\log\frac{B_m}{B_r} \quad (2.1)$$

Donde,

P_i Potencia de la señal óptica del i -ésimo canal.

N_i Valor promedio de la potencia de ruido acumulada.

B_m Ancho de banda ocupado por el i -ésimo canal.

B_r Ancho de banda óptico de referencia, típico a 0.1 nm.

En la figura 2.2 se muestra un mapeo de la OSNR, indicando el nivel de la señal óptica y el nivel de ruido a medida que la señal cruza cada etapa de amplificación:

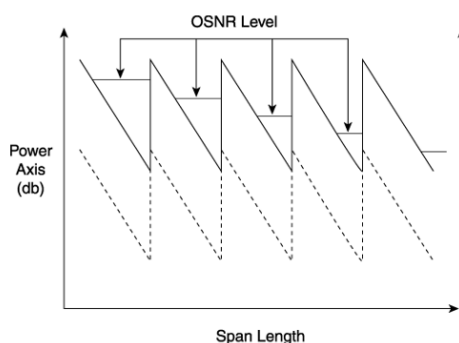


Fig 2.2: OSNR acumulado por trayecto de fibra [20].

Finalmente, en la figura 2.3 se puede observar que para realizar una adecuada medición de la OSNR dentro de un canal DWDM, se deben tener en cuenta múltiples factores los cuales permitirán minimizar el error en la cuantificación del parámetro, uno de ellos es la sensibilidad del receptor.

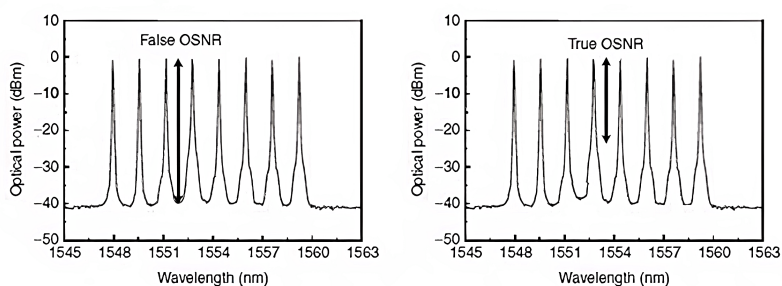


Fig 2.3: Medición de la OSNR para un sistema DWDM [21].

- Factor Q (Factor de Calidad):** Se define como la relación señal/ruido eléctrica (ESNR) en la entrada de un circuito de decisión de un receptor, este parámetro mide los deterioros ocasionados por los defectos ópticos y eléctricos en un punto examinado de la red y resulta de utilidad en ocasiones en las que no se puede realizar una medición correcta de la BER para determinar el desempeño de la red. El factor de calidad Q, se define en la ecuaciones 2.2 y 2.3, como:

$$Q[l] = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (2.2)$$

$$Q[dB] = 20 \log_{10} Q(l) \quad (2.3)$$

Donde,

Q Factor de calidad

μ_0, μ_1 Niveles lógicos

σ_0, σ_1 Desviaciones típicas definidas por la distribución de ruido Gaussiano

- Diagrama del ojo:** Es usado para el análisis de formas de onda por medio de dos tipos de cruces, de amplitud, correspondiente al nivel de voltaje en la apertura y cierre del ojo, en donde entre menor sea la apertura, se compromete más el desempeño del sistema, debido a diferentes efectos degradantes. En el cruce del tiempo, se observa la incidencia del sincronismo y del jitter. Con todo lo anterior se puede deducir la BER, el factor Q, entre otros parámetros que ayudan a establecer la calidad de la señal [9].

En la figura 2.4, se observan las componentes fundamentales de un diagrama del ojo, donde la apertura definida por la máscara de la región 2, es determinada por la diferencia que existe entre los niveles de las marcas "1" y los espacios "0".

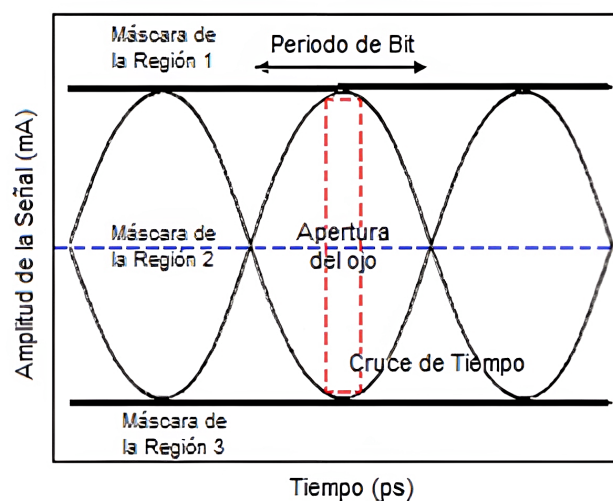


Fig 2.4: Componentes del diagrama de ojo [21].

2.2. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

Un software de simulación es una herramienta que permite reproducir la esencia de un fenómeno aplicando diferentes condiciones y parámetros. Por lo cual, la simulación de redes ópticas hace posible diseñar y mostrar las propiedades, características y funcionamiento del sistema para su respectivo estudio sin necesidad de recurrir a la experimentación sobre un modelo real [67].

Se realizó la investigación de diferentes herramientas de simulación para sistemas ópticos. A continuación, se presentan cuatro programas de simulación mostrando sus principales características y haciendo una comparación entre ellas, a fin de elegir la herramienta que permita cumplir con los objetivos propuestos en la realización del trabajo de grado.

2.2.1. OptSim

Optsim es una herramienta de software adquirida por Synopsys Inc, empleada para el diseño y simulación de sistemas de comunicación ópticos a nivel de propagación de señales, la cual comprende una interfaz gráfica de usuarios sencilla de usar con diferentes parámetros de medición similares a un modelo real [22]. Además, Optsim cuenta con una gran librería de componentes y algoritmos de simulación que proporcionan fiabilidad en los resultados obtenidos [22]. La figura 2.5 identifica el logo del software Optsim.



Fig 2.5: Logo del Software Optsim [22].

OptSim provee métodos matemáticos como Dominio del tiempo por pasos separados, TDSS (Time-Domain Split-Step) y Dominio de la frecuencia por pasos separados, FDSS (Frequency-Domain Split-Step) permitiendo una simulación más precisa y eficiente de cualquier arquitectura. Además, proporciona modelos personalizados con la interfaz de programación de aplicaciones, API (Application Programming Interface) para lenguajes de programación como C / C ++, y un modelado eléctrico avanzado basado en el Programa de simulación con énfasis en circuitos integrados, SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis*) [22].

Esta herramienta es ideal para el diseño asistido por computadora de sistemas de comunicación óptica que incluyen, entre otros: Formatos de modulación avanzados, Sistema DWDM / CWDM con amplificación óptica, EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*), RFA (*Raman Fiber Amplifier*) o SOA (*Service Oriented Architecture*), Sistemas de comunicación

óptica coherentes, Redes FTTX / PON, Sistemas de acceso Múltiple por división de Código en el campo óptico, OCDMA (*Optical Code Division Multiple Access*), Sistemas de red basados en Multiplexación por División de Tiempo Óptico, OTDM (*Optical Time Division Multiplexing*), Radio sobre Fibra, ROF (*Radio Over Fiber*), Enlaces fotónicos de microondas e interconexiones ópticas [22].

2.2.2. Matlab

Matlab o denominado también Matrix Laboratory es un software desarrollado por MathWorks, que cuenta con una herramienta de simulación llamada Simulink, la cual opera bajo un entorno visual de diagramas en bloques sin requerir de ningún tipo de código, resultando útil antes de convertir un diseño en hardware. Además, tiene la capacidad de generar automáticamente el código de un modelo y efectuar pruebas de forma constante y fácil [68]. En la figura 2.6 se encuentra el logo que representa a esta herramienta.



Fig 2.6: Logo de la herramienta Matlab y Simulink [23].

2.2.3. OptiLux

Optilux está conformado por una colección de herramientas de código abierto que incorpora técnicas avanzadas para el diseño, simulación y análisis de sistemas ópticos. A su vez, se implementa como una caja de herramientas de Matlab / Octave, que incluye rutinas para analizar y describir diferentes aspectos de los sistemas ópticos, como: Formatos de modulación avanzados, transmisión WDM, fibras ópticas en régimen no lineal, efectos de polarización, operación en campos eléctricos de polarización simple o dual, entre otros [24]. En la figura 2.7 se encuentra el logo que representa a esta herramienta.



Fig 2.7: Logo de la herramienta Optilux [24].

2.2.4. OptiSystem

OptiSystem es una herramienta de software licenciada perteneciente a Optiwave Systems Inc, que permite la planificación, prueba y simulación de enlaces ópticos modernos [69]. En la figura 2.8 se visualiza el logo del software OptiSystem.



Fig 2.8: Logo de la herramienta OptiSystem [25].

Entre las aplicaciones de OptiSystem, se destacan [69]:

- Realizar pruebas tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia.
- La evaluación en el rendimiento del sistema (Potencia de la señal, OSNR, Diagrama de Ojo, Factor Q, BER, Diagramas de constelación, Diagramas de ojo).
- Diseño de redes ópticas que incluyen OTDM, anillos SONET / SDH, CWDM, DWDM, PON, NG-PON2.
- Radio sobre Fibra, ROF (*Radio Over Fiber*).
- Formatos de modulación (RZ, NRZ, DB, DPSK, QPSK, QAM-16, QAM-64).

En la tabla 2.1, se hace la comparación de las principales características de los cuatro softwares investigados anteriormente.

Características	OptSim	Matlab	Optilux	OptiSystem
Licenciado	Sí	Sí	No	Sí
Interfaz gráfica	Alta	Alta	Baja	Alta
Requerimientos Hardware	Bajo	Medio	Bajo	Medio
Integración con otras herramientas	Sí	Sí	Sí	Sí
Complejidad de Manejo	Media	Alta	Baja	Media
Requisitos del Sistema	Windows y Linux	Unix, Windows, MAC OS y Linux	Windows	Windows
Obtención del Software	Fácil	Media	Fácil	Media

Tabla 2.1: Cuadro comparativo de herramientas de simulación.

Una vez hecho el análisis de las cuatro herramientas de simulación, se puede concluir que, las herramientas licenciadas proporcionan mejores características que son necesarias para la realización del presente trabajo de grado. Teniendo en cuenta esto, se optó por escoger el software Optsim, dado que, la Universidad del Cauca cuenta con su licenciamiento y además, proporciona el diseño de los sistemas usando diagramas en bloque, lo cual facilita la buena elaboración de los diferentes esquemas de red a implementar.

2.3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Para el desarrollo de la fase de simulación se tendrán en cuenta los conceptos propuestos en el libro “Modelado y simulación” de Antonio Guash Petit, Miguel Ángel Piera y Josep Casanovas” [70]. En el cual, se describen las etapas más significativas de un proyecto de simulación, haciendo énfasis en la elaboración de un modelo sencillo con el objetivo de que su contenido sea más fácil de implementar, validar y analizar. A continuación, se explican con detenimiento las fases comprendidas por la metodología de simulación planteada:

- **Formulación del problema:** Para el desarrollo de esta etapa es de vital importancia plantear objetivos claros, razonables y medibles, los cuales permitirán abordar adecuadamente el problema a estudiar y servirán de guía a lo largo del proyecto de simulación.
- **Diseño del modelo conceptual:** Una vez establecidos los objetivos del proyecto, se diseña un modelo lógico de la solución, teniendo en cuenta las relaciones estructurales más importantes del sistema que se intenta simular y los parámetros que afectan su comportamiento.
- **Construcción del modelo:** Se construye el modelo de comportamiento del sistema y se define las herramientas a utilizar para la elaboración y/o adaptación del modelo de simulación según las necesidades pertinentes del proyecto.
- **Colección y tratamiento de datos:** Para obtener resultados coherentes es indispensable recolectar e identificar datos adecuados que sean relevantes para la simulación, con el fin de obtener hipótesis razonables mediante un correcto ejercicio de análisis.
- **Verificación y validación:** La verificación consiste en corroborar que el modelo se ejecuta adecuadamente y la validación en comprobar que las hipótesis del trabajo, así como suposiciones, son correctas. Por ende, se evalúa el comportamiento del modelo implementado, verificando si las relaciones y las variables planteadas son las adecuadas.
- **Análisis:** En esta etapa se realizan las simulaciones pertinentes y se estudian los resultados obtenidos con el fin de sugerir posibles cambios al modelo. Es importante comprender que el conocimiento adquirido en el proceso de análisis tiene mayor valor que los resultados obtenidos en las simulaciones, dado que este permitirá generar argumentos válidos a favor o en contra de las opciones de diseño planteadas.
- **Documentación:** Se considera necesario mantener documentado el estado del proyecto diariamente, con el objetivo de actualizar los aspectos técnicos del modelo propuesto y su modo de operación con respecto a los avances que se ejecuten del mismo. Incluso, es recomendable la creación de un manual de usuario.

- Implementación: Una vez se valida el modelo con todas las correcciones pertinentes, se procede a la implementación de este.

En la figura 2.9, se observa el diagrama de flujo para el desarrollo de las simulaciones del presente trabajo de grado.

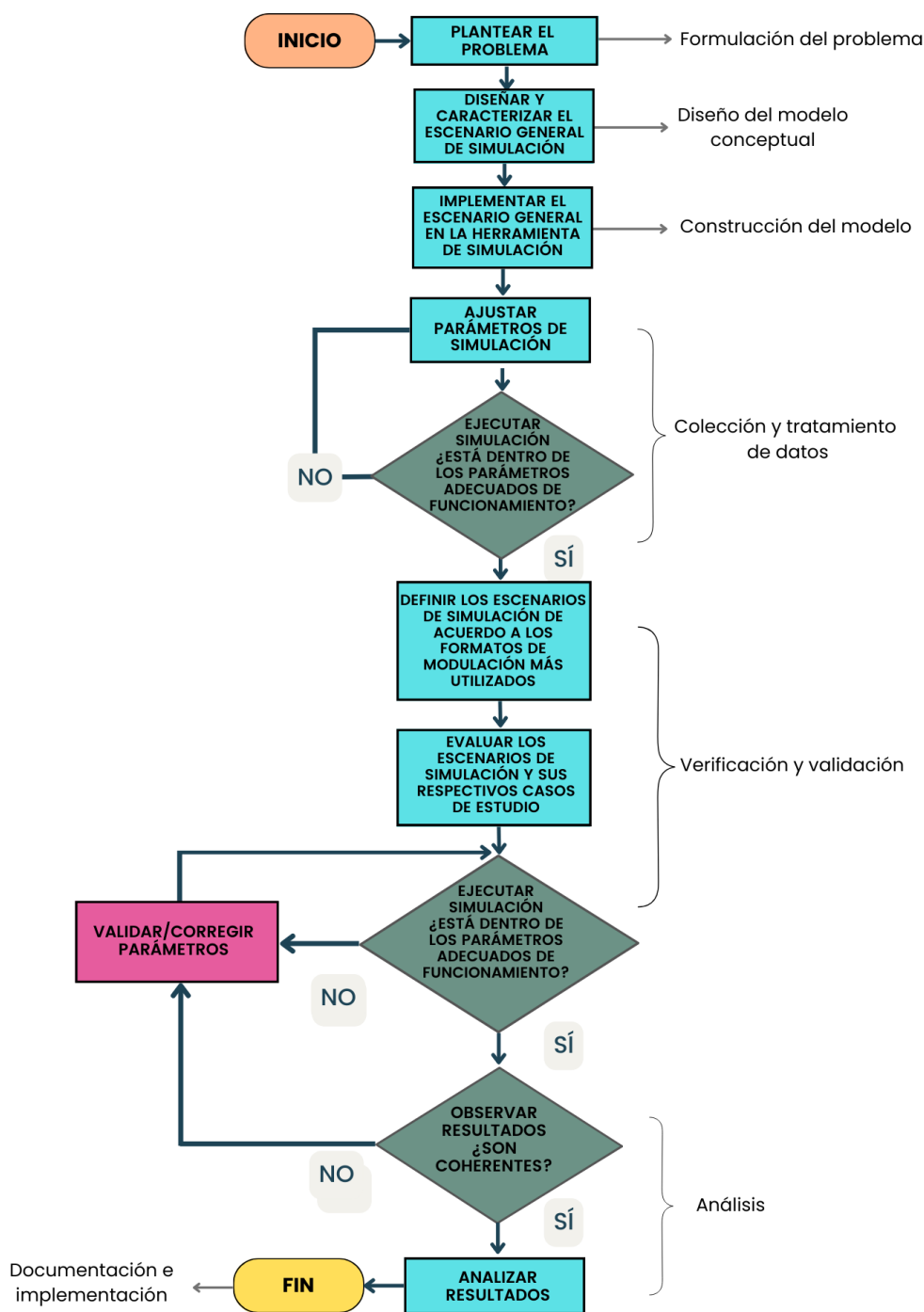


Fig 2.9: Diagrama de flujo.

2.3.1. Diseño y Caracterización del Escenario General de Simulación

Con el fin de incrementar la capacidad de envío de la información, las redes que emplean fibra óptica utilizan diferentes técnicas de multiplexación, una de ellas y la más rentable en relación a costos, es WDM, sin embargo, el uso de este método presenta diferentes limitaciones debido a los efectos lineales y no lineales. Dado lo anterior, para el presente trabajo de grado, se plantea una red de tipo PON que trabaja con tecnología DWDM, la cual permite alcanzar mayores distancias de transmisión, con un aumento significativo en la capacidad de transporte, puesto que, el espaciamiento entre longitudes de onda es menor en comparación con WDM [71]. Además, al trabajar con una red óptica pasiva, se debe tener en consideración la teoría planteada en el capítulo anterior, en donde se mencionan diferentes estándares pertenecientes a las redes punto a multipunto, entre ellas NG-PON2, la cual, esta estandarizada bajo la recomendación ITU-T G. 989.

En la recomendación ITU-T G.989 se encuentran todos los requisitos que describen los sistemas de red óptica pasiva con capacidad de 40 Gigabits, donde se plantean las técnicas de multiplexación a usar en este tipo de arquitecturas, como lo es la Multiplexión por División de Tiempo-Red Óptica Pasiva, TDM-PON (*Time Division Multiplexing-Passive Optical Network*), en la que todos los usuarios comparten la misma longitud de onda para transmitir la información, o la Multiplexación por División de Longitud de Onda-Red Óptica Pasiva, WDM-PON (*Wavelength Division Multiplexing-Passive Optical Network*), donde las señales de datos son transportadas en longitudes de onda independientes para cada usuario final [72]. Teniendo en cuenta que el objetivo es mejorar el desempeño de la red, se decide utilizar DWDM en lugar de WDM, puesto que aumenta considerablemente la capacidad del sistema. Finalmente, se considera el último tramo de la red, en el cual, se tiene en cuenta las especificaciones planteadas en el capítulo 1, donde se elige implementar a nivel de simulación una red de tipo FTTH, debido a que es una arquitectura que usa únicamente como medio de transmisión la fibra óptica.

Para la implementación de un sistema DWDM se debe realizar una correcta elección del espaciamiento entre canales, para esto, la recomendación ITU-T G.694.1 indica una separación que va desde 12,5 GHz a 100 GHz, donde las frecuencias permitidas (en THz) se definen así [73]:

$$12,5 \text{ GHz} = 193,1 + n \times 0,0125 \text{ [THz]}$$

$$25 \text{ GHz} = 193,1 + n \times 0,025 \text{ [THz]}$$

$$50 \text{ GHz} = 193,1 + n \times 0,05 \text{ [THz]}$$

$$100 \text{ GHz} = 193,1 + n \times 0,1 \text{ [THz]}$$

Donde, 193.1 THz es la frecuencia central por trabajar y n corresponde a un entero positivo o negativo, incluyendo el 0.

En la recomendación ITU-T G.694.1 también se sugiere utilizar las bandas L y C para redes DWDM, por lo cual, en el presente trabajo de grado se hace uso de la región comprendida desde los 1530 a 1560 nm, ventana correspondiente a la banda C, la cual, presenta una menor atenuación y es mayormente utilizada en arquitecturas NG-PON2 [72].

El posicionamiento de los canales es un factor por considerar en el diseño del sistema, teniendo en cuenta que las redes MLR ofrecen una grilla espectral asimétrica, es decir, pueden tomar diferentes espaciamientos en cada canal dependiendo de la necesidad que tengan. Sin embargo, es preferible ubicar los canales de mayor intensidad en los extremos del sistema, dado que a altas tasas de transmisión, se producen réplicas infinitas en el dominio del espectro y necesitan utilizar mayores capacidades de potencia, lo que hace aún más crítica la comunicación con los canales adyacentes, empeorando así, la Interferencia Inter Portadora, ICI (*Intercarrier Interference*), dado lo anterior, en el presente trabajo se ubicarán los canales de mayor capacidad (10 y 40 Gbps) en los extremos de la red DWDM-MLR. Además, mediante diferentes investigaciones, se ha comprobado que los formatos de modulación avanzados presentan un mejor rendimiento para velocidades altas como 40 Gbps, al igual que los formatos OOK, los cuales son los predilectos para trabajar con tasas de transmisión de hasta 10 Gbps, es por esto, que en la tabla 2.2 se muestran los formatos elegidos para el esquema MLR.

Velocidad del Canal	Tipo de Modulación
2.5 Gbps	NRZ-OOK
10 Gbps	RZ-OOK
40 Gbps	RZ-DPSK/RZ-DQPSK

Tabla 2.2: Formatos de modulación implementados.

En cuanto a los componentes de una red DWDM, estos se distribuyen en tres partes: transmisión, enlace y recepción. A continuación, se detallan los elementos más relevantes a considerar:

- **Transmisor:** Comprende por diodos láser, interferómetros, fuentes de información, entre otros.
 - **Láser:** Es el dispositivo encargado de generar pulsos de luz a una determinada longitud de onda, las cuales, al ser diferentes unas de otras, no interfieren entre sí dentro del medio. Estos constan de una cavidad resonante, un medio de ganancia que emite fotones al absorber energía y una fuente de bombeo, el cual puede ser lumínico, eléctrico o químico [28].
Existen diferentes diseños o tecnologías de láser, en la tabla 2.3, se detallan algunas de las características de estos dispositivos.

Tipo de dispositivo	Longitud de onda [nm]	Potencia de salida [mW]	Ancho de Banda	Tipo de Fibra
LED	850, 1300	0.001 -0.1	<250 MHz	Multimodo
Láser Fabry-Perot	850, 1300, 1500	1 a 10	>10 GHZ	Multimodo Monomodo
Láser DFB	1550	40 a 100	>10 GHZ	Monomodo
VCSEL	850	<10	>10 GHZ	Monomodo
Láser CW	Hasta 1565	Hasta 1 W	>10 GHZ	Monomodo

Tabla 2.3: Características de tecnologías de láser. Adaptada de [28],[29].

Cabe resaltar que el láser de onda continua, CW (*Continuous Wave*) es mayormente utilizado en redes ópticas que trabajan a altas velocidades de transmisión [19], además, a nivel de simulación, no es limitante en cuanto al rango de longitudes de onda a utilizar, por tal motivo, se escoge para el presente trabajo de grado. Por último, se debe considerar que según la recomendación G.691, la potencia aplicada en transmisión debe estar en un rango de 0-6 dBm.

- **Interferómetro:** Es un dispositivo óptico que inicia con un haz de entrada el cual se separa en dos, empleando un espejo parcialmente transmisivo, que después se recombinan empleando otro espejo parcialmente transmisivo o un divisor de haz [28]. El interferómetro Mach-Zehnder es uno de los más usados en los sistemas ópticos debido a las prestaciones que ofrece sobre el sistema, además de que su diseño es más económico en comparación con otros dispositivos similares [29]. El funcionamiento de un Mach- Zehnder se basa en aplicar un voltaje a una de las dos guías de onda, creando un campo eléctrico que da lugar a que las señales en las guías estén en fase o desfasadas 180°, causando interferencia de forma constructiva o destructiva, dado lo anterior, la luz que emite el láser pasará a través del dispositivo o será bloqueada [74].
- **Enlace:** Conformado por un medio físico, filtros, amplificadores ópticos, multiplexores y módulos de compensación de dispersión. Para este caso, el medio corresponde a la fibra óptica, la cual puede ser categorizada dependiendo del modo de propagación y del perfil de índice de la fibra. En cuanto al modo de propagación, se puede clasificar en:
 - Fibra monomodo: Existe una sola trayectoria de luz.
 - Fibra multimodo: Múltiples trayectorias de longitud de onda.

Con respecto al perfil de índice de la fibra, corresponde a una representación gráfica del índice de refracción en la sección transversal de la fibra, donde se indican dos

tipos, escalonado y graduado, el primero cuenta con revestimiento y un índice de refracción uniforme, mientras que el segundo, no tiene revestimiento y un índice de refracción que no es uniforme [56].

Dada las características anteriores, se puede hacer una clasificación de la fibra en:

- Monomodo de índice escalonado
- Multimodo de índice escalonado
- Multimodo de índice gradual

De este modo, en el presente trabajo de grado, se hace uso de la fibra monomodo de índice escalonado la cual se rige bajo la recomendación ITU-T G.652, donde a nivel de simulación se elige la fibra Corning SMF 28e con una longitud de onda de 1550 nm, atenuación de 0.19 dB/km y una dispersión de 16 ps/nm/km.

También, es de suma importancia considerar las diferentes distorsiones presentes en las redes DWDM, en especial, las causadas por la dispersión cromática. Considerando lo anterior, se hace necesario hacer uso de técnicas de compensación óptica, las cuales se basan en el módulo de compensación de dispersión, cuyas propiedades contribuyen a disminuir las degradaciones causadas por la CD. Existen tres técnicas de compensación, pre-compensación, post-compensación y compensación simétrica, donde cada una es definida según la ubicación del módulo o fibra compensadora. Para el presente capítulo, se hace uso de la pre-compensación, debido a que la misma permite presenciar un menor ensanchamiento de los pulsos, característica importante a tener en cuenta cuando se busca disminuir el impacto de los efectos no lineales, entre ellos la mezcla de cuatro ondas [71]. No obstante, en el capítulo 3, se utilizará la post-compensación, con el propósito de tener una mayor incidencia de los efectos no lineales para analizar la robustez de los formatos de modulación avanzados ante estas variaciones.

- **Rejilla de Bragg:** A nivel de simulación, se hace uso de la rejilla de Bragg, el cual, es un dispositivo construido dentro del núcleo de la fibra óptica a partir de alteraciones en el índice de refracción, actuando como un filtro que bloquea la banda de transmisión y ocasiona retrasos en ciertas longitudes de onda, lo que permite que las más lentas alcancen a las más rápidas, compensando así los retardos que produce la dispersión cromática, especialmente en las componentes de menor frecuencia de un pulso [19].
- **Amplificadores:** A pesar de que la fibra óptica es un medio de transmisión con un coeficiente de atenuación pequeño y un gran ancho de banda, se debe considerar que a medida que la señal viaja por este medio, la potencia en el sistema va disminuyendo, razón por la cual se considera necesaria la implementación de amplificadores ópticos que sean capaces de regenerar la amplitud de la señal para que esta se encuentre dentro del rango de sensibilidad del receptor. Los amplificadores de fibra dopada con Erblio (EDFA) representan una excelente opción debido a su relación costo-beneficio,

teniendo una ganancia típica de hasta 30 o 40 dB en la región de 1525-1560 nm, además de permitir que las señales ópticas sean amplificadas independientemente de que cada longitud de onda tenga distintas velocidades [19].

- **Splitters:** Los divisores son elementos que se integran a los despliegues de redes FTTH, cumplen la función de repartir la señal óptica de cada fibra conectada. La configuración de estos dispositivos depende primordialmente del diseño de la red, en donde los divisores vienen dados por la expresión 1:n, lo que implica que cada entrada de fibra conectada a este, será dividida en n usuarios. Cabe resaltar que los splitters introducen atenuación, considerando la cantidad de usuarios por cubrir [29], es por esta razón que en el presente trabajo de grado se opta por tener un número de usuarios igual a la cantidad de canales en transmisión, evitando así, el tener que usar una mayor cantidad de estos dispositivos.

Recepción: Para esta sección, se cuenta con fotodetectores los cuales se encargan de convertir la señal óptica proveniente del transmisor en una señal eléctrica, los más usados en los sistemas ópticos son los fotodiodos PIN y los Fotodiodos de Avalancha, APD (*Avalanche Photodiode*) [35]. Además, del demultiplexor que se encarga de separar las longitudes de onda para transmitir a cada usuario.

- **Fotodetector tipo PIN:** Este elemento convierte la señal óptica al dominio eléctrico, recuperando los datos que son transmitidos a través del sistema, estos pueden clasificarse en dos tipos, detectores de tipo coherente, donde la información de fase es utilizada en la codificación y detección de la señal. Por otro lado se encuentran los detectores incoherentes, los cuales realizan la detección directa, mediante un fotodetector que convierte el haz de fotones modulado en intensidad en un haz de electrones [74].

Por último se tienen los filtros, que permiten seleccionar y delimitar un rango de frecuencias específico, para esto, en el presente trabajo de grado se utiliza el filtro de Bessel, cuya distorsión depende únicamente de las restricciones de ancho de banda, además cuenta con un retardo de grupo constante, haciéndolo óptimo para transmisiones analógicas [75]. Del mismo modo, se usa el filtro de coseno alzado, que corresponde a un tipo de filtro electrónico, utilizado frecuentemente en sistemas de telecomunicaciones debido a que es capaz de reducir al mínimo la interferencia entre portadora (ICI).

En la tabla 2.4 se detallan las características generales a considerar para el desarrollo de las simulaciones:

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
PARÁMETRO	VALORES
Topología de red	Punto a multipunto
Velocidad del sistema	2.5-10- 40 Gbps
Tecnología de red	DWDM Unidireccional
Banda de operación	Banda C (1530- 1560 nm)
Ventana	Alrededor de 1550 nm
Número de canales en la OLT	6-10-12 canales
Espaciamiento de canales	25, 50 y 100 GHz
Equipos de amplificación	EDFA
Técnica de compensación	Rejilla de Bragg/ Pre-compensación
CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR	
Formatos de modulación	NRZ-OOK, RZ-OOK, RZ- DQPSK, RZ-DPSK
Potencia Inicial del Tx del láser	0 dBm
Tipo de láser	Onda continua
Filtro en Tx	Filtro eléctrico tipo Bessel
CARACTERÍSTICAS DE LA FIBRA ÓPTICA Corning SMF-28 e 1550	
Coeficiente de dispersión	16 ps/nm/km
Coeficiente de atenuación	0.19 dB/km
CARACTERÍSTICAS DEL RECEPTOR	
Sensibilidad del Rx	>-30 dBm
Filtros en Rx	Filtro eléctrico tipo Bessel, Filtro óptico Coseno Alzado

Tabla 2.4: Características y parámetros del modelo de red definidos

2.3.2. Construcción del Escenario General de Simulación

En esta sesión, se describen los diferentes componentes que hacen parte del escenario general de simulación para una red DWDM-MLR, donde se consideran las frecuencias centrales de cada canal con un espaciamiento acorde a las recomendaciones de la ITU-T para DWDM, con el propósito de observar el comportamiento del sistema ante las diferentes degradaciones producidas por los efectos lineales y no lineales.

De este modo, el escenario de simulación consta de tres canales multiplexados a diferentes velocidades de transmisión, 40 Gbps (CH1), 2.5 Gbps (CH2), 10 Gbps (CH3) con el objetivo de cumplir con el escenario de red MLR. Además, se determinan los canales de mayor capacidad en los extremos del sistema, puesto que, generan mayores replicas infinitas en el espectro, por lo que, causarán un aumento significativo de la interferencia entre canales adyacentes [76].

Por otro lado, se definen los parámetros objetivos del sistema según las recomendaciones de la ITU-T [77], como son:

- $BER \leq 10^{-12}$
- Factor Q ≥ 7 , 16.9 dB
- Sensibilidad del Receptor > -30 dBm

Por consiguiente, en la tabla 2.5 se presenta el escenario inicial de una arquitectura de red MLR-DWDM con un único formato de modulación RZ-OOK, que comprende tres sesiones:

<p>Terminal de Línea Óptica (OLT)</p>	<p>Láser de Onda Continua Driver RZ Rectangular Modulador MZ de Seno Cuadrado Modulación: NRZ/RZ-OOK, RZ-DPSK, RZ-DQPSK Acceso Nominal: 2.5 Gbps, 10 Gbps, 40 Gbps</p>
<p>Red de Distribución Óptica (ODN)</p>	<p>Splitter 3:1 Fibra tipo Corning SMF-28e Distancia del enlace: 60 - 100 km Tipo de servicio FTTH</p>
<p>Unidad de red Óptica (ONU)</p>	<p>Fibra de última milla: 100 m Filtro óptico de Coseno Rizado Receptor Óptico de Sensibilidad Filtro Electro Bessel</p>

Tabla 2.5: Características escenario general.

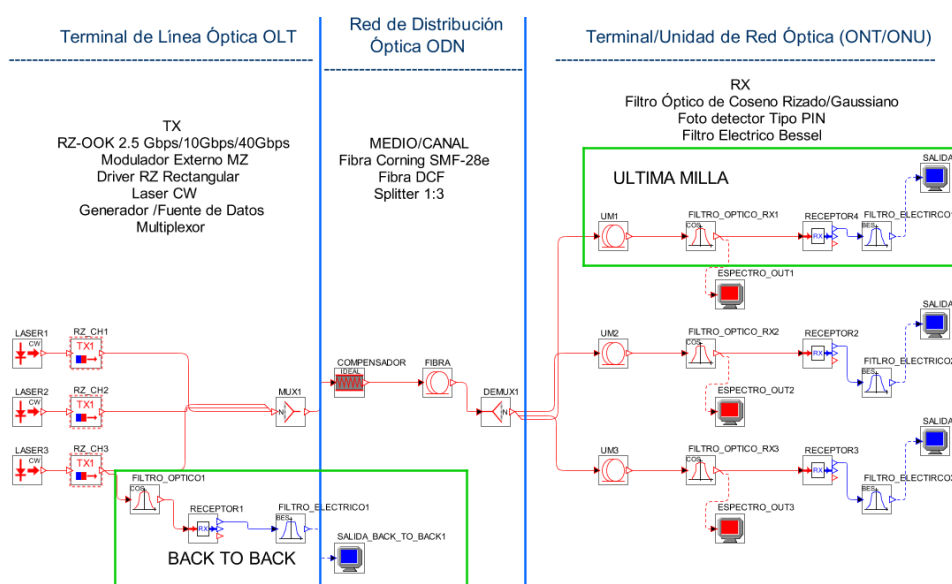


Fig 2.10: Escenario General de Simulación.

Uno de los aspectos más importantes a considerar con respecto a la presencia del efecto FWM, es la separación entre canales, debido a la generación de nuevas componentes en frecuencia que son de gran consideración en los sistemas actuales, puesto que, producen limitaciones en los canales de transmisión [57]. De este modo, se determina una separación entre canal de 100 GHz en base a la recomendación de la ITU-T para sistemas DWDM. Además, se asignan las frecuencias de canal permitidas (en THz) mediante la ecuación 2.4 [73]:

$$100 \text{ GHz} = 193,1 + n \times 0,1 \text{ [THz]} \quad (2.4)$$

Donde, 195.5 THz es la frecuencia central del primer canal y n es un entero positivo o negativo.

En la tabla 2.6, se muestra el plan de frecuencias a trabajar en el escenario de simulación.

Espaciamiento de Canales [GHz]	Número de Canales	Frecuencia Central Nominal [THz]	Longitud de Onda [nm]
100 GHz	Canal 1	193.4; n=0	1551.18
	Canal 2	193.5; n=1	1550.38
	Canal 3	193.6; n=2	1549.58

Tabla 2.6: Plan de frecuencias.

■ Transmisión:

Para el medio de transmisión, se tiene un láser de onda continua con una anchura a media altura, FWHM (*Full Width at Half Maximum*) de 5 MHz, con el propósito de establecer un escenario real, puesto que este valor está relacionado proporcionalmente con la coherencia temporal del láser, es decir, el láser presentará una vibración en el rango de $5\text{MHz} - f(\text{láser}) + 5\text{MHz}$ [78]. De igual modo, se determina una potencia inicial de 0 dBm según recomendaciones expuestas por la ITU-T. Por último, se implementa una recepción Back to Back con el objetivo de obtener valores que no estén afectados por degradaciones debido a otros elementos que se encuentran en el sistema. En la figura 2.11 se observa las propiedades del láser a través del software OptSim, donde se determina un tipo de ruido ideal para evitar mayores degradaciones que afecten al desempeño de los canales en transmisión.

En la figura 2.12 se muestra el bloque general de transmisión de canal, compuesto por un generador de datos a 40 Gbps, un Driver RZ, y un Modulador óptico externo Mach-Zehnder, el cual, se configura en modulación polar, transmitiendo el bit 1 con una señal encendida y el bit 0 como off, es decir, la señal luminosa apagada.

LASER1		
Parameter	Value	Units
Center emission frequency	= 193.41449	THz
Center emission wavelength	1550.0	nm
Source Status	1	
CW Power	0.0	dBm
CW Power	1.0	mW
FWHM Linewidth	5	MHz
-20 dBm Linewidth	49.74937	MHz
Initial Phase	"Random"	
Deterministic Initial Phase	0.0	rad
Noise Type	"Ideal"	

Fig 2.11: Propiedades del láser.

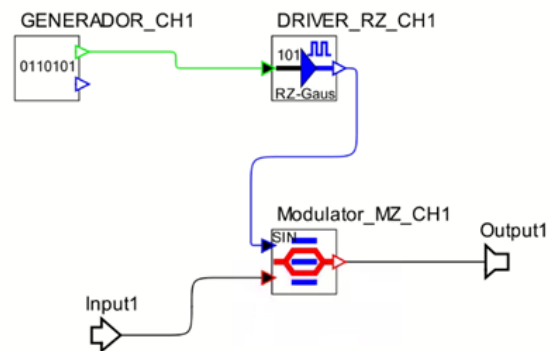


Fig 2.12: Transmisor para cada canal.

■ Medio de transmisión:

Con respecto al medio de transmisión, se implementa una fibra Corning SMF-28e con una distancia inicial de 60 km, atenuación de 0.19 dB/Km, dispersión de 16 ps/nm/km y una PMD de $0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ según características definidas por el software. También, se agrega un splitter con una atenuación igual a 0 dB en cada salida, con el propósito de establecer un divisor ideal sin ninguna pérdida por atenuación, es decir, un componente que divide perfectamente las señales de entrada. En la figura 2.13 se observan los elementos del medio de transmisión, compuesto por un Multiplexor, una fibra Corning SMF-28e y un Splitter 1:3.

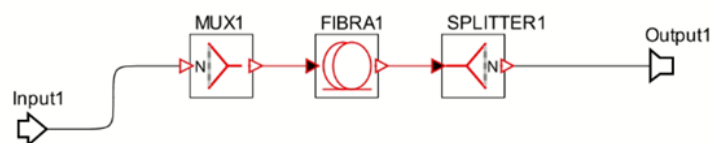


Fig 2.13: Medio de transmisión.

- Recepción:** Para la última sección del sistema, OptSim dispone de 3 receptores Ópticos, como son: Sensitivity Optical Receiver, Single Channel Optical Receiver y Compound Optical Receiver, de los cuales, se destaca la opción Sensitivity Optical Receiver, puesto que se compone de un receptor óptico completo (fotodetector, el amplificador y el filtro postdetección), por ende, será utilizado en las simulaciones realizadas a lo largo del presente trabajo de grado. Del mismo modo, se define el umbral de detección de la señal en -30 dBm para una BER de 10^{-12} . En la figura 2.14 se observan los parámetros del receptor óptico aplicados.

RECEPTOR			
Parameter	Value	Units	Range
Bit Rate	1.00000000001E32	Gbit/s	(0, Inf)
Optical test pulse shape	"RZ_Rectangular"		
Duty Cycle	0.5		(0, 1]
Normalized FWHM	0.5	fraction of bit...	(0, 1]
Sensitivity under test condition	- 286.07752	dBm	(261.07752, 1e+32]
Sensitivity reference error probability	1.0E-12		(1e-015, 0.1)
Overall Receiver Responsivity	1.0	A/W or V/W	

Fig 2.14: Propiedades del receptor.

En la figura 2.15 se observa el bloque de recepción, compuesto por un filtro óptico de coseno rizado, un Receptor óptico de Sensibilidad y un Filtro eléctrico tipo Bessel.

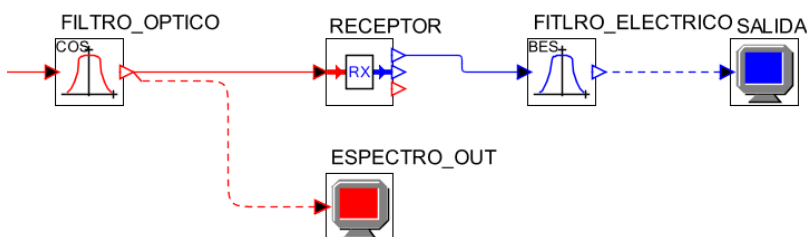


Fig 2.15: Recepción para cada canal.

2.3.2.1. Resultados del Escenario General de Simulación

Para este apartado, se presentan los diferentes resultados obtenidos del escenario general de simulación, en el cual, a nivel de transmisión se observa el comportamiento del sistema en condiciones ideales a través de la configuración Back-to-Back, seguidamente, en el lado de recepción, el desempeño de la red ante las degradaciones causadas por los efectos lineales y no lineales con el propósito de comparar el nivel de afectación que provocan estos fenómenos. Por consiguiente, se presentan los diagramas de ojo y espectros de

la señal en las figuras 2.16 y 2.17 del canal 1, 2 y 3, donde adicionalmente se muestran los valores de BER, Jitter y Factor Q en la tabla 2.7.

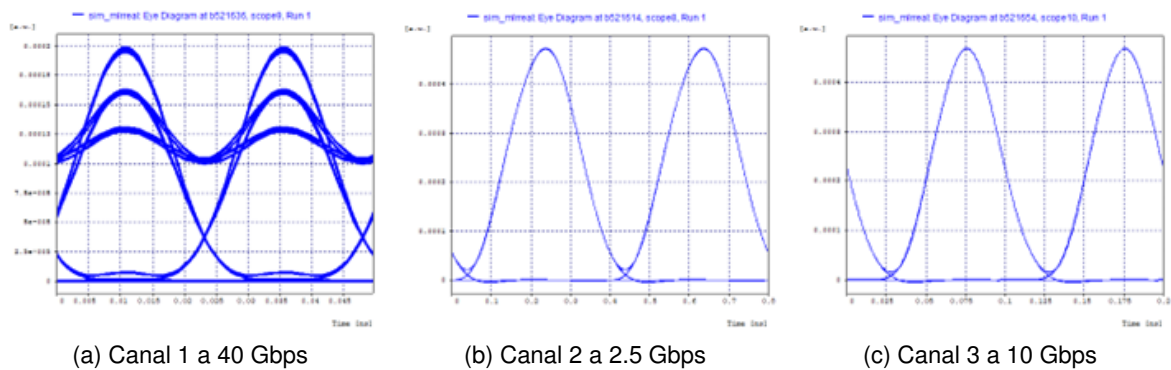


Fig 2.16: Diagramas de ojo en la configuración Back to Back.

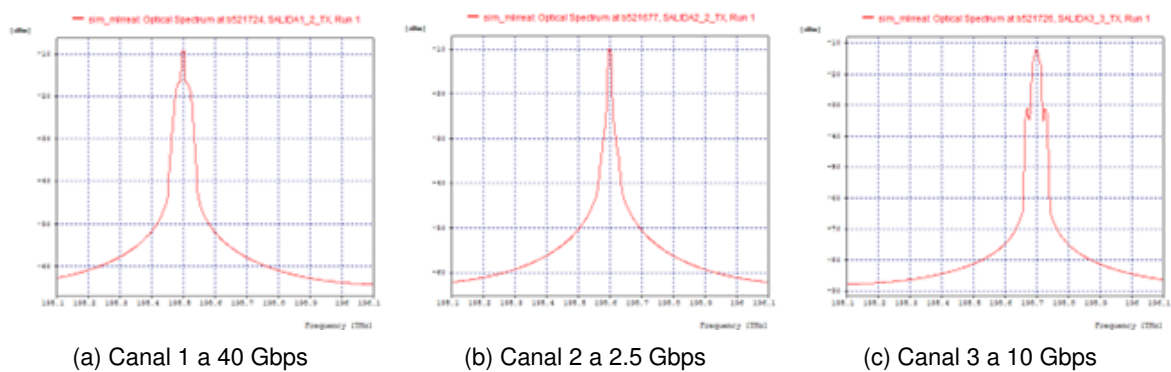


Fig 2.17: Espectro óptico en la configuración Back to Back.

Canal	Tasa de Bit (Gbps)	BER	Factor Q (dB)
1	40	1.24e-32	21.67
2	2.5	1e-40	40
3	10	1e-40	40

Tabla 2.7: Parámetros OPM escenario general en Tx.

Posteriormente, se exponen los resultados obtenidos en simulación tomando como referencia distancias entre los 60 a 100 km, según las recomendaciones del estándar NG-PON2 [79], donde se especifica que este tipo de redes deben alcanzar una distancia mínima de 60 kms. Además, se define una longitud de última milla de máximo 100 m, debido a que corresponde a una red FTTH, la cual, usa únicamente como medio de transmisión la fibra óptica.

En la tabla 2.8 se observan los resultados obtenidos para cada canal, donde se encuentran diferentes valores de OSNR entregados por la herramienta OptSim. Sin embargo, es un OSNR falsa, debido a que se mide desde el piso de ruido hasta -30 dBm (Sensibilidad en Rx), lo que conlleva a obtener valores elevados. Por tal motivo, se debe hacer uso de los marcadores que proporciona la herramienta para calcular la OSNR real, por ejemplo, para el canal 1 a 40 Gbps en la distancia de 60 Kms se obtuvo una potencia en RX de -20.935 dBm, de tal modo que, se establecen los marcadores del eje “Y” en -30 dBm y en -20.935 dBm, de esta manera, se adquiere una OSNR real de 9.065 dB, tal como se muestra en la figura 2.24.

Canal (Tasa de Tx)	Distancia del Enlace (Km)	Última Milla (Km)	Potencia TX/RX (dBm)	BER	Jitter (ns)	Factor Q (dB)	OSNR (dB)	OSNR Real (dB)
1 (40 Gbps)	60	0.1	0/-20.94	0.0227	0.0060	6.02	46.32	9.06
	70		0/-22.89	0.0227	0.0065	6.02	46.70	7.11
	80		0/-24.87	0.0227	0.0067	6.02	49.69	5.13
	90		0/-26.78	0.0227	0.0065	6.02	48.97	3.22
	100		0/-28.77	0.0227	0.0063	6.02	46.64	1.23
2 (2.5 Gbps)	60	0.1	0/-20.94	1e-40	0.0028	24.41	54.22	9.06
	70		0/-23.05	1e-40	0.0033	25.01	52.79	6.95
	80		0/-24.83	1e-40	0.0022	24.03	57.93	5.17
	90		0/-27.02	1.7e-29	0.0036	19.87	49.60	2.98
	100		0/-28.99	1.6e-21	0.0051	18.69	58.52	1.01
3 (10 Gbps)	60	0.1	0/-23.69	1.7e-3	0.0256	9.51	52.61	6.31
	70		0/-25.59	1.4e-2	0.0208	6.82	54.59	4.41
	80		0/-27.61	0.0227	0.0116	6.02	52.94	2.39
	90		0/-29.59	0.0227	0.0254	6.02	53.78	0.41
	100		0/-31.55	0.0227	0.0110	6.02	53.54	-1.55

Tabla 2.8: Resultados OPM.

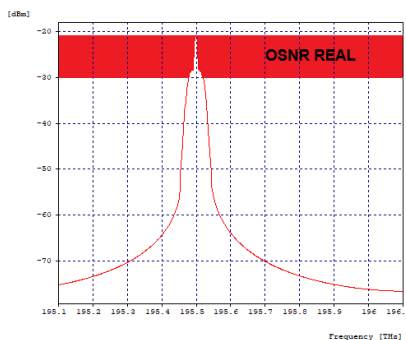


Fig 2.18: OSNR real.

Con base a los resultados de la tabla 2.8, se observa que, para una tasa de transmisión de 40 Gbps, el sistema no presenta una buena recepción de los datos, debido al gran tráfico de información que debe soportar a través del esquema de modulación simple RZ-OOK. De este modo, el uso de formatos de modulación avanzados como RZ-DPSK o RZ-DQPSK es una buena alternativa a considerar, puesto que, son sumamente robustos frente a las degradaciones ópticas y de gran implementación para altas tasas de transmisión [37].

Por otro lado, para la tasa de transmisión de 2.5 Gbps, muestra una BER adecuada para todos los trayectos establecidos, puesto que, están por encima del umbral determinado por la ITU-T, para una $BER \leq 10^{-12}$ [73]. Sin embargo, a medida que aumenta la distancia empieza a disminuir dicho valor, debido a las diferentes degradaciones del sistema que empiezan a interferir en el canal. De igual modo, para el canal 3 a 10 Gbps, en ninguna de las distancias definidas se obtiene una BER aceptable, dado que, son más predominantes los efectos lineales y no lineales para este tipo de velocidades, incluso, las componentes no deseadas que se han generado por el canal 1, afectarán en gran proporción su anchura espectral, provocando que no se detecte adecuadamente la frecuencia central establecida.

Por consiguiente, con base a lo mencionado anteriormente, es necesario para una red MLR-DWDM a altas tasas de transmisión, el uso de formatos de modulación avanzados con una mayor eficiencia espectral, puesto que, presentan una mejor tolerancia a los efectos lineales y no lineales, en especial al fenómeno FWM, debido a que, son más robustos frente a la aparición de componentes adicionales que interfieren a los canales adyacentes.

En la figura 2.19 se observan los 3 canales transmitidos con una separación entre canal de 100 GHz para una distancia de 60 kms, donde se destaca la aparición de varias componentes adicionales (círculos azules), las cuales surgen a partir de la interacción entre los canales adyacentes, lo que provoca nuevas longitudes de onda de las réplicas infinitas del espectro. En cuanto, al canal 1 a una tasa de transmisión de 40 Gbps, representa un mayor riesgo en el sistema, puesto que la magnitud de sus componentes adicionales es bastante considerable causando demasiada ISI.

Además, con respecto al efecto XPM, el cual, se produce debido a la interacción del índice de refracción del medio en función del nivel de potencia de la señal óptica [21], se evidencia un ensanchamiento asimétrico del espectro y una distorsión de la forma del pulso (círculos negros), por lo cual, causa un aumento de la interferencia entre los canales adyacentes. Por otra parte, considerando el fenómeno SPM, el cual, se automodula en fase por motivo del cambio en el índice de refracción basado en la intensidad [21], se observa un gran ensanchamiento indeseado del espectro (círculos verdes).

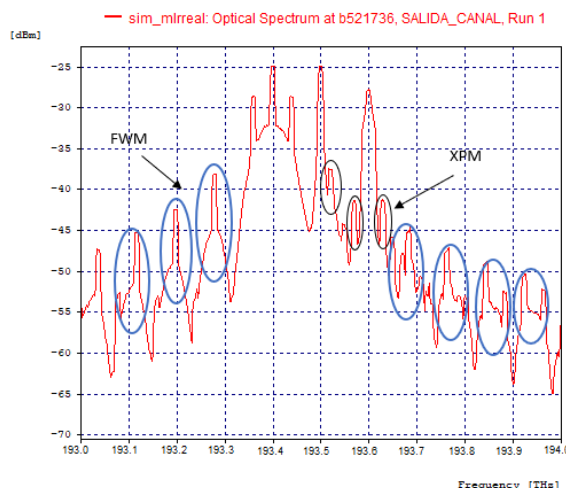


Fig 2.19: Espectro óptico de los tres canales.

Con el propósito de contrarrestar las degradaciones producidas por la dispersión cromática y la atenuación, se hace uso del dispositivo “Rejilla de Bragg” que permite compensar la CD en el medio. De esta manera, se configura en modo “pre-compensación”, puesto que, muestra una mejor respuesta ante los efectos no lineales, en comparación con el modo “post-compensación” que tiene un uso más frecuente por los ISP [76]. Por consiguiente, para poder apreciar el efecto de la compensación, en especial para el canal de 40 Gbps que es el más afectado por la CD, se hace en intervalos superiores de 70 % hasta el 100 %, debido a que, se deben tener niveles altos de compensación para poder mejorar el desempeño del canal, tal como se muestra en la tabla 2.9.

Por otro lado, con respecto a la atenuación, se hace uso del amplificador EDFA, dado que, permite amplificar las señales ópticas que pasan a través de la fibra óptica independientemente de que cada canal posea distintas velocidades, permitiendo compensar la atenuación de dichas señales [48]. De igual modo, en base a los resultados obtenidos en la tabla 2.8, se determina un valor de 20 dBm de ganancia, dado que, este dispositivo amplifica también el ruido existente en el sistema, por lo que, el receptor no sería capaz de restaurar la señal adecuadamente. En la figura 2.20 se observan los elementos descritos anteriormente que conforman el medio de transmisión.

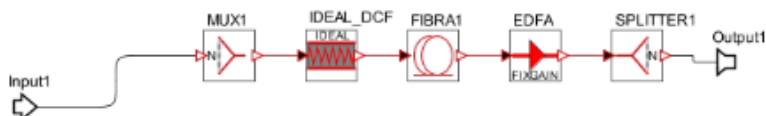


Fig 2.20: Componentes del medio.

En la tabla 2.9 se encuentran los resultados obtenidos para una red MLR-DWDM haciendo uso de la Rejilla Ideal de Bragg y el amplificador EDFA. Se estableció como distancia mínima 60 kms, debido a que, se obtuvieron valores críticos para el canal de 40 Gbps, por lo

que, es necesario que el sistema sea más robusto frente a las distorsiones de la red empezando con una distancia menor. Además, es recomendable utilizar compensaciones altas, desde 70 % con tal de minimizar adecuadamente la dispersión existente y evitar posibles inconvenientes, debido a que, al ser un sistema tan crítico para los canales a altas tasas de transmisión, compensar a niveles bajos no sería lo adecuado.

Compensación (%)	Canal	Potencia RX (dBm)	BER	Jitter (ns)	Factor Q (dB)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
70	1	-0.93	0.0227	0.0061	6.02	56.57	29.07
	2	-1.26	1e-40	0.0039	26.01	52.27	28.74
	3	-3.86	1.1e-22	0.0009	19.94	49.18	26.14
80	1	-0.87	0.0024	0.0069	9.14	54.93	29.13
	2	-1.42	1e-40	0.0041	26.09	52.73	28.58
	3	-3.99	8.2e-27	0.0007	20.63	49.11	26.01
90	1	-0.89	5.4e-25	0.0003	20.42	56.17	29.11
	2	-1.37	1e-40	0.0038	26.73	53.30	28.63
	3	-3.84	9.4e-32	0.0009	21.36	50.59	26.16
100	1	-0.95	0.0042	0.0069	8.47	55.67	29.05
	2	-1.36	1e-40	0.0037	26.79	51.12	28.64
	3	-3.88	2.3e-29	0.0009	21.04	51.04	26.12

Tabla 2.9: Parámetros OPM variando la compensación, para una distancia de 60 kms.

De los datos de la tabla 2.9 y las figuras 2.21, se puede apreciar la mejora de la señal para el canal de 40 Gbps a medida que aumenta el porcentaje de compensación, donde, el diagrama del ojo muestra una disminución del ruido presente en la señal en su región de marca de ceros y unos (parte inferior y superior del diagrama); con respecto al jitter, exhibe una simetría en los cruces de tiempo cada vez mejor. En cuanto, a los datos de BER y factor Q, estos superan los parámetros objetivos del sistema al 90 % de compensación para una distancia de 60 kms. Por último, los niveles de potencia en recepción son mejores debido a la influencia del dispositivo EDFA, puesto que, aumento también considerablemente el factor Q en cada canal.

De igual manera, en la figura 2.22, se observan los diagramas de ojos al simular con el mejor resultado obtenido anteriormente (90 % de compensación), para cada canal con una potencia de transmisión de 0 dBm, donde, el canal 1 en su región de marca de unos (parte superior del diagrama) muestra una gran dispersión a causa del ruido presente en la señal, además, posee un cierre bastante importante del ojo en los cruces de amplitud debido a la distorsión considerada. Del mismo modo, el ensanchamiento de los pulsos y la separación entre canal de 100 GHz para una tasa de transmisión de 40 Gbps usando un esquema de modulación simple produce una degradación considerable en la red, aumentando en mayor medida la ISI y la aparición de componentes parásitas que perjudican el rendimiento

adecuado. Por último, respecto a la máxima compensación aplicada del 100 %, figura 2.21d, se aprecia gran dispersión, dado que, RZ-OOK al ser una modulación de banda angosta, una compensación de la Rejilla de Bragg demasiado alta puede afectar el ancho de banda de la señal transmitida, además se deben considerar las degradaciones causadas por los fenómenos no lineales que serán más predominantes cuando el sistema se enfrenta a una dispersión nula, es decir, el compensador esta anulando todos los efectos de la dispersión cromática.

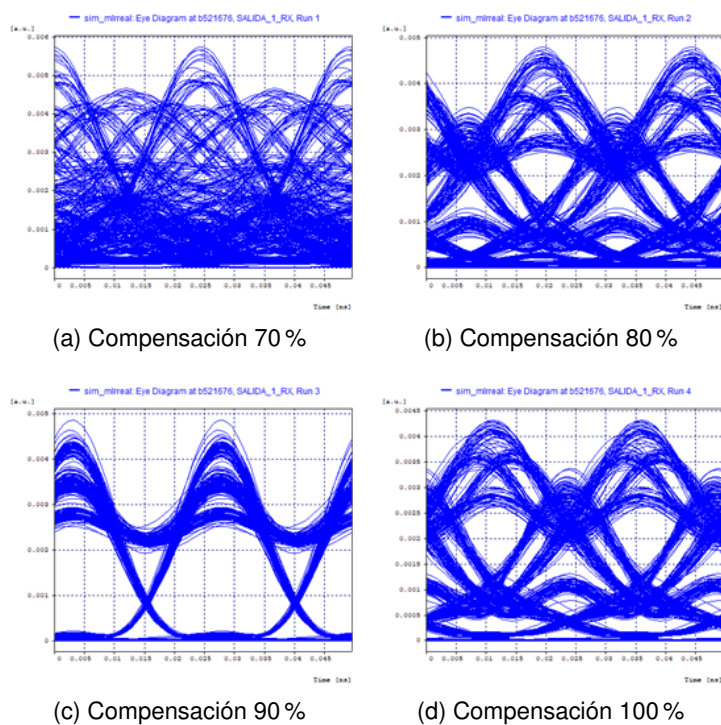


Fig 2.21: Diagrama de ojo al variar la compensación.

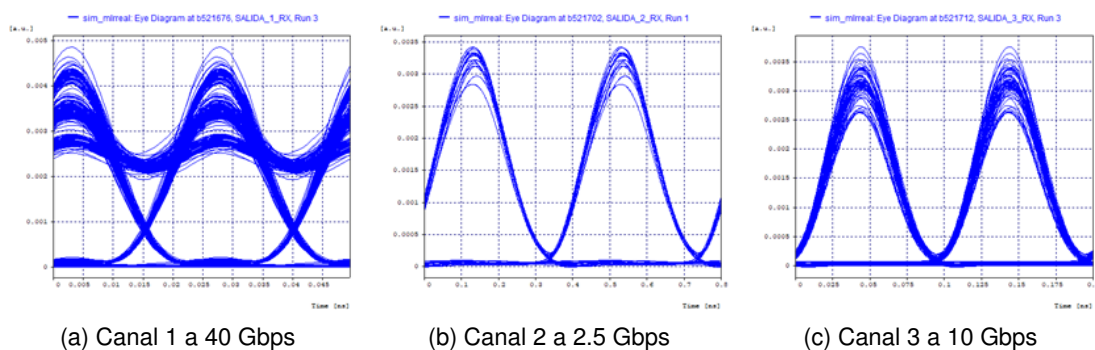


Fig 2.22: Diagramas de ojo con compensación del 90 %.

Por último, en la figura 2.23 se observan los 3 canales transmitidos implementando la compensación ideal a través de la rejilla de Bragg y el amplificador EDFA, donde, se evidencia que aún son considerables los canales adicionales (círculos azules) y el ensancha-

miento de los pulsos (círculo verde) debido a los fenómenos no lineales, los cuales, siguen afectando el desempeño del sistema. Sin embargo, la implementación del compensador ideal permitió mejorar la respuesta del sistema, dado que, están por encima del umbral establecido para cada uno de los canales configurados.

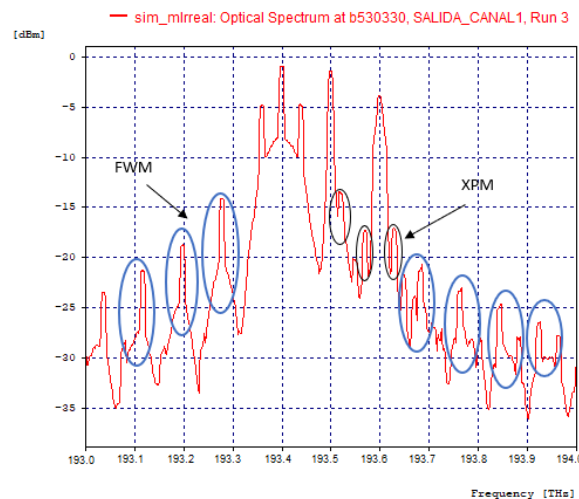


Fig 2.23: Espectro óptico con amplificación y compensación.

El análisis realizado hasta este punto permitió conocer el comportamiento propio de una red DWDM-MLR de tipo NG-PON2 con un único formato de modulación simple RZ-OOK, en la cual, existe un ensanchamiento de los pulsos debido al fenómeno SPM, una deformación de cada uno de los canales en el medio, producto de XPM y la presencia de varias señales diferentes a las transmitidas (FWM), las cuales, serán más predominantes a medida que se aumente los niveles de potencia y disminuya la separación entre canales. De este modo, es necesario la caracterización de diferentes formatos de modulación avanzados que puedan suplir las necesidades de transmisión a 40 o 100 Gbps, donde, sean tolerantes frente a los fenómenos lineales y no lineales presentes en el medio. Además, el uso de múltiples formatos de modulación en una red MLR permite el mejoramiento del sistema, debido a que, a una tasa de transmisión de 10 Gbps se usa un formato de modulación simple (NRZ/RZ-OOK) y una velocidad superior de 40 o 100 Gbps un esquema de modulación avanzado como RZ-DPSK o RZ-DQPSK, consiguiendo de este modo, que la red sea más eficiente.

2.4. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN Y CASOS DE ESTUDIO

Luego de identificar las características generales del escenario inicial de simulación, se proceden a realizar los casos de estudio que permitan realizar un análisis comparativo de los diferentes formatos de modulación seleccionados para una red MLR-DWDM de tipo NG-PON2 en presencia del efecto FWM. En la figura 2.24 se presentan los casos de estudio definidos para el presente trabajo de grado.

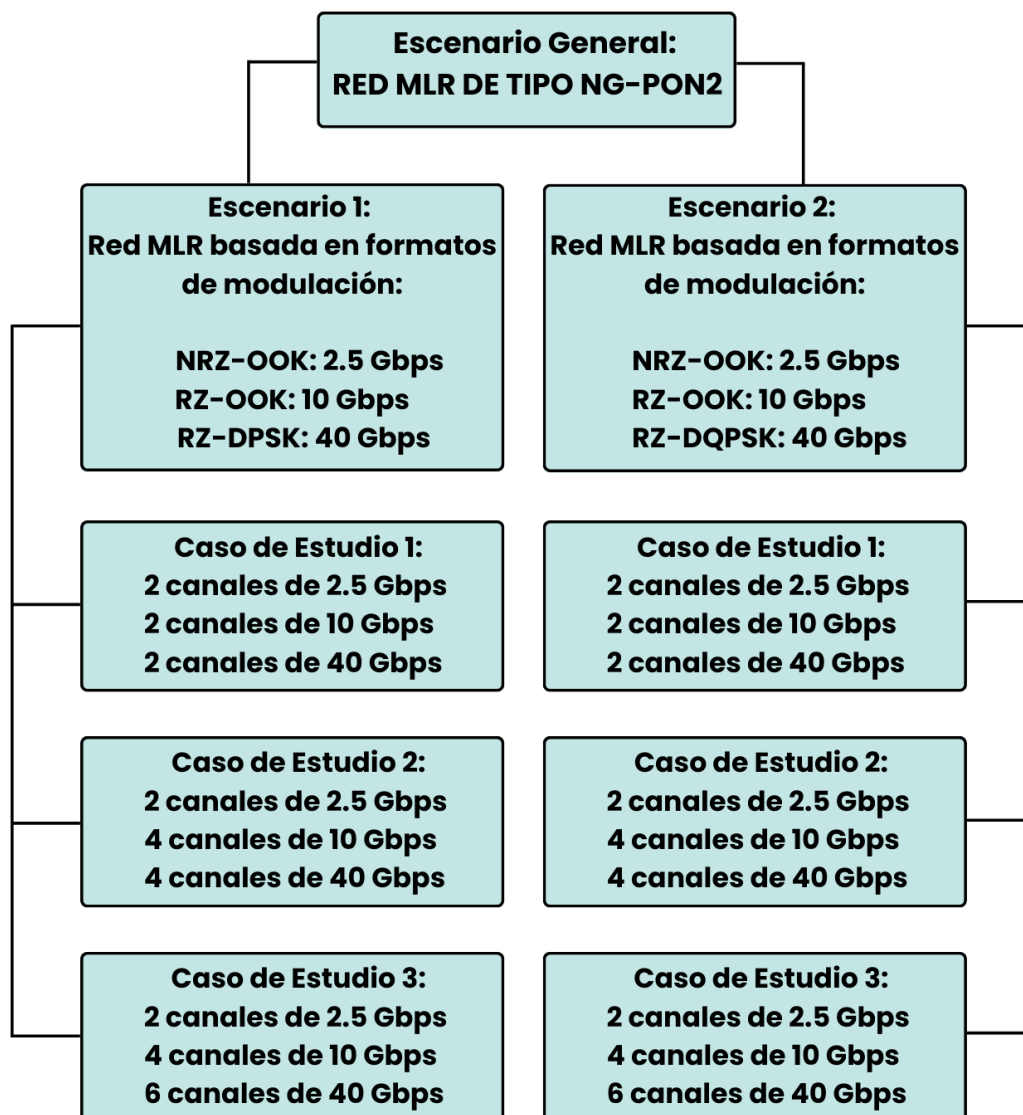


Fig 2.24: Casos de estudio.

Nota de autor

En este capítulo se definió el modelo de simulación del enlace de bajada de una arquitectura MLR de tipo NG-PON2 para diferentes formatos de modulación, considerando sus principales componentes de arquitectura de red, del mismo modo, se analizaron las características del sistema que influyen en la aparición de los efectos lineales y no lineales, en especial la Mezcla de Cuatro Ondas o FWM variando la potencia de transmisión y la separación entre canales, por ende, se evaluó el desempeño de cada canal partiendo de los esquemas espectrales obtenidos, que garantiza condiciones óptimas para una adecuada implementación de la red MLR-DWDM con múltiples formatos de modulación avanzados y una cantidad mayor de canales configurados.

Capítulo 3

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS EN PRESENCIA DEL EFECTO FWM EN UNA ARQUITECTURA DE RED MLR-DWDM DE TIPO NG-PON2

En el presente capítulo, se desarrolla el proceso de simulación de una red MLR-DWDM de tipo NG-PON2, mediante la herramienta Optisim®, con el objetivo de realizar un análisis comparativo de diferentes formatos de modulación avanzados en presencia del efecto FWM, por lo cual, se efectúa la selección de frecuencias y configuración para cada canal, de acuerdo con las características técnicas descritas en anteriores sesiones. Adicionalmente, se hace un proceso complementario para disminuir los efectos lineales (Atenuación, PMD, Dispersión), con el fin, de observar la incidencia explícita de los fenómenos no lineales, en especial el de FWM.

Posteriormente, se analiza el desempeño del sistema MLR-DWDM, evaluando parámetros como, separación entre canales, potencia de transmisión y dispersión cromática, puesto que, son factores determinantes en la aparición de FWM, tal como se mencionó en los capítulos anteriores. De igual manera, para cada caso de estudio se hace un aumento significativo en el número de canales, debido a que es otra variable importante por considerar.

3.1. ESCENARIO 1, RED MLR BASADA EN FORMATOS DE MODULACIÓN NRZ-OOK, RZ-OOK Y RZ-DPSK

Los formatos de modulación conocidos como On-Off Keying (OOK) se caracterizan por ser altamente utilizados a nivel comercial por los proveedores de servicios de internet (ISP), debido a su relación costo-eficiencia y fácil implementación [80], de este modo, serán usa-

dos como objeto de estudio para las velocidades de transmisión de 2.5 y 10 Gbps. Por otro lado, para los canales de 40 Gbps, se considera el uso del formato de modulación avanzado RZ-DPSK, debido a que es sumamente robusto frente a las degradaciones ópticas y penalidades de potencia, parámetros muy importantes a considerar en las redes MLR-DWDM [50].

Los parámetros generales de configuración para este escenario de simulación se detallan en la tabla 3.1.

Parámetros	Valor
Número De Canales Inicial en la OLT	6-10-12
Potencia De Láser Inicial	0 dBm
Longitud De Onda	1530-1560 nm
Tipo de Fibra Óptica	Corning SMF-28e
Compensación DCF	Ideal
Amplificación EDFA	20 dB
Longitud del Enlace	100km
Esquema De Modulación a 2.5 Gbps	NRZ-OOK
Esquema De Modulación a 10 Gbps	RZ-OOK
Esquema De Modulación a 40 Gbps	RZ-DPSK

Tabla 3.1: Parámetros generales- Escenario 1

3.1.1. Caso de estudio 1: 2 canales de 2.5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 2 canales de 40 Gbps.

Para este primer caso de estudio se realizó el montaje de 2 canales externos de 40 Gbps con el esquema de modulación RZ-DPSK, 2 canales de 10 Gbps con RZ-OOK y 2 canales internos de 2.5 Gbps con NRZ-OOK partiendo del esquema general elaborado en el anterior capítulo (ver Figura 2.18). Además, se define una separación entre canal de 100 GHz (0,8 nm), 50 GHz (0,4 nm) y 25 GHz (0,2 nm), considerando la grilla espectral para este tipo de redes DWDM según la ITU-T G.694.1 [73], de este modo, en la tabla 3.2, se muestran las frecuencias asignadas basadas en la recomendación NG-PON2. [4]

El propósito del presente trabajo de investigación es analizar el efecto FWM en la red MLR-DWDM, por lo que, se debe hacer un proceso complementario para reducir la aparición de los fenómenos de tipo lineal. Considerando lo anterior, se realiza un primer análisis a nivel de potencia permisible en el sistema relacionando solo las pérdidas por atenuación (*VBS Loss Only Fiber*). De este modo, se fija una potencia en transmisión por canal de 0 dBm con una longitud de la fibra óptica que oscila entre los 60 y 120 km, dado que, según las recomendaciones del estándar NG-PON2 [79], este tipo de redes deben soportar una distancia mínima de 60 km, sin hacer uso de regeneradores de señal, razón por la

cual, se define este valor como el mínimo a alcanzar. Por consiguiente, se lleva a cabo un incremento del trayecto óptico de 10 km, como se observa en la tabla 3.3.

Canal	Velocidad Tx (Gbps)	Frecuencia (THz)
1	40	193.2
2	10	193.3
3	2.5	193.4
4	2.5	193.5
5	10	193.6
6	40	193.7

Tabla 3.2: Asignación de frecuencias.

Velocidad de Tx (Canal)	Distancia (km)	Potencia RX (dBm)	BER	Factor Q (dB)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
40 Gbps (Canal 1)	60	-22.52	1e-40	33.25	49.29	7.48
	70	-24.52	1e-40	33.25	49.29	5.48
	80	-26.52	1e-40	33.25	49.29	3.48
	90	-28.52	1e-40	33.25	49.29	2.48
	100	-30.52	1e-40	33.25	49.29	-0.52
	110	-32.52	1e-40	33.25	49.29	-2.52
	120	-34.52	1e-40	33.25	49.29	-4.52
10 Gbps (Canal 2)	60	-24.47	5.6e-29	21.13	51.36	5.53
	70	-26.47	6.9e-28	20.71	51.36	3.53
	80	-28.47	3.6e-22	19.87	51.36	1.53
	90	-30.47	3.7e-18	18.66	51.36	-0.47
	100	-32.47	4.6e-12	17.05	51.36	-2.47
	110	-34.47	1.4e-10	15.40	51.36	-4.47
	120	-36.47	7.5e-8	11.28	51.36	-6.47
2.5 Gbps (Canal 3)	60	-18.89	1e-40	37.88	54.62	11.11
	70	-21.89	1e-40	37.32	54.62	8.11
	80	-23.89	1e-40	31.81	54.62	6.11
	90	-25.89	1e-40	30.22	54.62	4.11
	100	-27.89	1e-40	24.27	54.62	2.11
	110	-29.89	3.4e-23	20.06	54.62	0.11
	120	-31.34	4.1e-9	15.26	54.56	-1.36

Tabla 3.3: Medida de la atenuación.

En base a los resultados obtenidos en la tabla 3.3, se evidencia una BER objetiva cons-

tante de 10^{-40} para los canales 1 (40 Gbps) y 3 (2.5 Gbps), no obstante, para el canal 2 a 10 Gbps, se muestra una gran afectación producto de la atenuación, puesto que, los niveles de BER disminuyen proporcionalmente a medida que se aumenta la distancia, llegando a su límite para un enlace de 100 km con una BER de $4,6^{-12}$ y un factor Q de 17.05 dB, la cual, se encuentra en el margen objetivo según las recomendaciones de la ITU-T [77].

Sin embargo, con respecto a los niveles de potencia en recepción, todos los canales presentan una disminución considerable, que corresponde al valor de atenuación en la fibra de 0.19 dB/km, proporcionando una salida en potencia inferior a la establecida. De manera que, se hace necesario la implementación de un amplificador EDFA con una ganancia fija en el rango de 18 a 22 dB con base a los resultados de la tabla 3.3 entre la fibra óptica y el receptor, puesto que, con esto se refuerza la señal y mejora la sensibilidad, además, esta configuración proporciona un factor de ganancia mayor y un ancho de banda más amplio [8]. En la tabla 3.4, se muestra los niveles de variación del amplificador EDFA implementado en el sistema.

Ganancia del Amplificador (dB)	Velocidad de TX (Canal)	Potencia RX (dBm)	BER	Factor Q (dB)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
18	40 Gbps (Canal 1)	-12.52	1e-40	24.144	49.230	17.48
19		-11.49	1e-40	24.938	49.196	18.51
20		-10.48	1e-40	24.446	49.185	19.52
21		-9.51	1e-40	24.855	49.283	20.49
22		-8.49	1e-40	24.879	49.302	21.51
18	10 Gbps (Canal 2)	-14.42	9.3e-23	20.001	51.530	15.58
19		-13.46	3e-23	20.716	51.255	16.54
20		-12.44	1.1e-25	20.576	51.419	17.56
21		-11.44	4.5e-23	20.076	51.335	18.56
22		-10.41	4.2e-25	20.426	51.303	19.59
18	2.5 Gbps (Canal 3)	-8.90	1e-40	32.744	54.512	21.10
19		-7.88	1e-40	33.780	54.476	22.12
20		-6.89	1e-40	33.510	54.620	23.11
21		-5.89	1e-40	36.175	54.649	24.11
22		-4.89	1e-40	34.111	54.602	25.11

Tabla 3.4: Variación de la ganancia del EDFA.

Respecto a los resultados de la tabla 3.4, se define el amplificador de ganancia fija con un valor de 20 dB, puesto que, presenta el mejor nivel objetivo de todo el rango de valores analizados. Además, no es adecuado el incremento excesivo de la amplificación, debido a que, representa una proporción mayor del ruido en el sistema [19], adicionalmente, solo

es necesario el uso de un único amplificador para que aumente simultáneamente todos los canales con diferentes tasas de transmisión.

En las figura 3.1 se observa el Back to Back de los espectros ópticos en transmisión, los cuales, se encuentran en niveles inferiores de la potencia establecida de 0 dBm, debido a la atenuación que está incurriendo por los componentes que conforman los bloques de transmisión. En cuanto a la recepción, en las figura 3.2 se visualizan los niveles de potencia de cada canal acordes a los de transmisión, lo que permite comprobar la disminución de la atenuación debido a la implementación del amplificador EDFA.

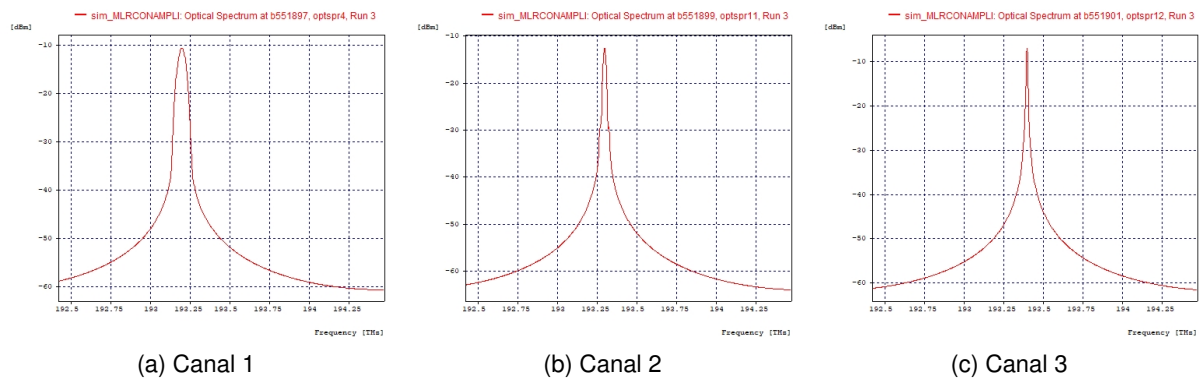


Fig 3.1: Espectro óptico en transmisión.

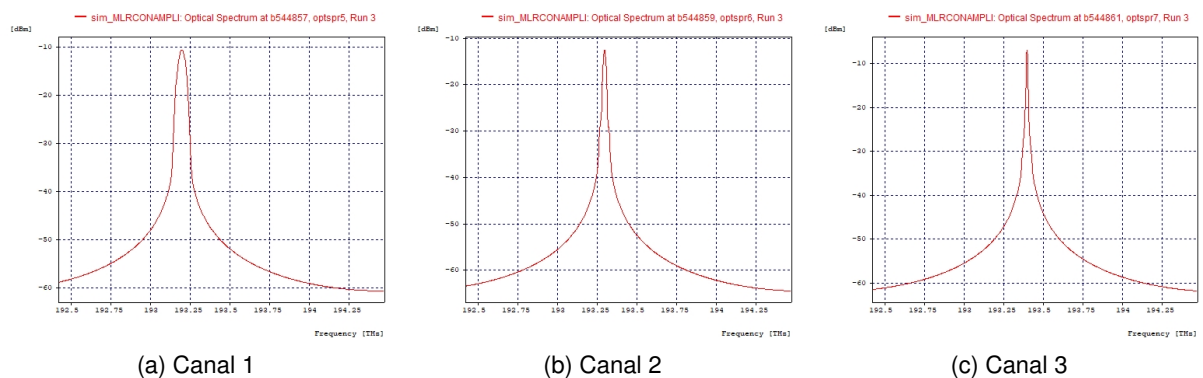


Fig 3.2: Espectro óptico en recepción.

En las figura 3.3 se aprecia el Back to Back de los diagramas de ojo en transmisión que servirán de referencia para el estudio de los canales, debido a que son un buen indicador de las posibles afectaciones que sufre la señal en el medio, puesto que, se pueden identificar problemas relacionados con pérdidas (atenuación y ruido), dispersión (CD y PMD) o efectos no lineales (FWM, SPM, XPM). Luego, se obtienen los diagramas de ojo en recepción, tal como se muestra en las imagen 3.4, en la cual, se evidencia los niveles de pulso y apertura de ojo acordes a los de transmisión, indicando una disminución considerable de la atenuación.

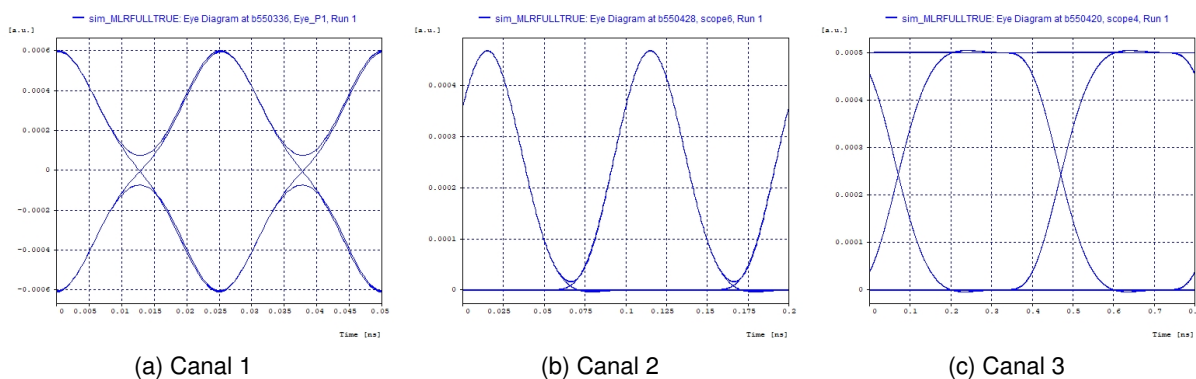


Fig 3.3: Diagramas de ojo en transmisión.

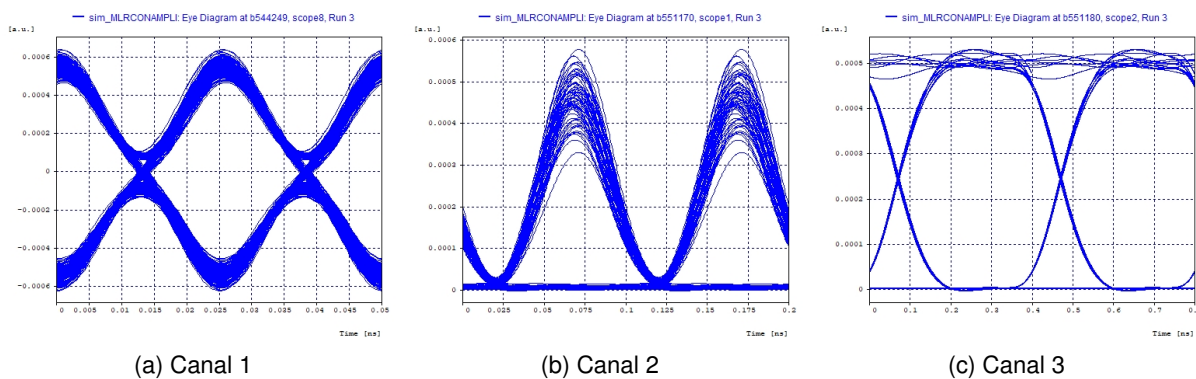


Fig 3.4: Diagramas de ojo en recepción.

Cabe denotar que las tablas 3.3 y 3.4 corresponden solamente a los primeros tres canales de la red, puesto que, al considerar las pérdidas por atenuación, el sistema muestra una simetría en los resultados obtenidos, es decir, con respecto a los canales 1 y 6 con un esquema de modulación RZ-DPSK y una tasa de transmisión de 40 Gbps presentan un desempeño similar, por lo cual, no es necesario exponer todos los canales ópticos que hacen parte de la estructura de red. Sin embargo, para análisis posteriores se tendrán en cuenta cada uno de los canales implementados, dado que, contemplar todos los efectos lineales y no lineales provocan una diferencia en los resultados, así estén configurados de manera similar.

Después de determinar la longitud máxima de 100 km en el medio de transmisión y de realizar la disminución de las pérdidas causadas por la atenuación, se procede a evaluar la Dispersión Cromática, puesto que, es otro de los fenómenos predominantes y más complejos en la propagación lineal, por lo cual, se hace una compensación de manera ideal mediante el dispositivo “Ideal Fiber Grating”, este componente tiene en cuenta variables como frecuencia o longitud de onda de referencia para los parámetros de dispersión y pendiente de dispersión total, tal como se muestra en la imagen 3.5. De este modo, se define

una compensación de dispersión cromática ideal en la frecuencia mitad del sistema que corresponde a 193.45 THz, esta frecuencia de referencia se elige debido a que, se busca tener un distanciamiento equivalente entre los canales de alta capacidad, para que no influya solamente en ciertos canales ópticos, presentando mejores resultados en comparación con las frecuencias más altas o bajas. Los parámetros de la imagen 3.5, como pendiente de dispersión total se obtiene a través del datasheet de la fibra óptica implementada SMF28e1550, además, la compensación total de dispersión se define mediante la ecuación 3.1.

$$Compensación_{Total} = -Dispersión_{de la Fibra} \times Distancia_{de la Fibra} \times \%Compensación \quad (3.1)$$

Parameter	Value	Units	Range
Reference Frequency	193.45	THz	(0, Inf)
Reference Wavelength	1549.71547	nm	(0, Inf)
Total Compensating Dispersion D at the reference frequency	-1600.0	ps/nm	
Total Compensating Dispersion Beta2 at the reference frequency	2039.96797	ps ²	
Total Compensating Dispersion D Slope at the reference frequency	-5.93785	ps/nm ²	
Total Compensating Dispersion Beta2 Slope at the reference frequency	-13.00905	ps ³	

Fig 3.5: Parámetros Compensador Ideal.

En el desarrollo de los siguientes casos de estudio, se tiene en cuenta la técnica de Post-Compensación con el fin de presenciar más significativamente los efectos no lineales, en especial FWM, debido a un menor decremento del nivel de potencia en comparación con la técnica Pre-Compensación [80].

Para poder apreciar el efecto de la compensación, se determina un rango de valores que oscila entre 0.7 y 1, es decir, 70 % y 100 % con incrementos de 0.1, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la sección anterior, donde se comprobó que una compensación mayor al 70 % se obtienen mejores resultados. En cuanto a la PMD que afecta en mayor medida a los canales con velocidades superiores a 10 Gbps, se procede a hacer una configuración a nivel de la fibra óptica, desactivando la PMD en modo “off” para que no tenga incidencia en el sistema, tal como se muestra en la imagen 3.6.

Parameter	Value	Units	Range
Fiber Non-Linearity	"On"		
Raman Crosstalk	"Off"		
Fiber PMD	"Off"		
Fiber Birefringence	"On"		
Polarization original frame recovering	"On"		

Fig 3.6: Parámetro Fibra Óptica PMD.

Dado lo anterior, en la tabla 3.5 se observa los resultados obtenidos para el canal 1 y 6 que corresponden a una tasa de transmisión de 40 Gbps, puesto que, al tener una

capacidad mayor con respecto a los otros canales, son más susceptibles a presentar afectaciones con respecto a la CD y PMD. Cabe denotar que las simulaciones fueron realizadas considerando únicamente las linealidades de la fibra (*VBS Linear Fiber*).

Compensación (%)	Velocidad de TX	Potencia RX (dBm)	BER	Factor Q (dB)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
70	40 Gbps (Canal 1)	-10.45	0.0227	6.02	48.29	19.55
80		-10.69	0.0227	6.02	49.28	19.31
90		-10.59	0.0227	6.02	48.56	19.41
100		-10.46	1e-40	24.62	49.45	19.54
70	40 Gbps (Canal 6)	-10.48	0.0227	6.02	49.85	19.52
80		-10.42	0.0227	6.02	50.82	19.58
90		-10.51	0.0227	6.02	49.62	19.49
100		-10.51	1e-40	23.51	50.22	19.49

Tabla 3.5: Variación de los porcentajes de compensación.

Con respecto a la tabla 3.5, el mejor porcentaje de compensación fue del 100% alcanzando una BER de 10^{-40} y un factor Q de 24.62 dB para ambos canales a 40 Gbps. En la figura 3.7 se observa el diagrama de ojo obtenido para cada compensación en el canal 1, donde existe una influencia considerable de la dispersión sobre la señal a niveles bajos de compensación, no obstante, el sistema funciona adecuadamente y cumple con los requerimientos establecidos por la ITU [77] para una compensación del 100%.

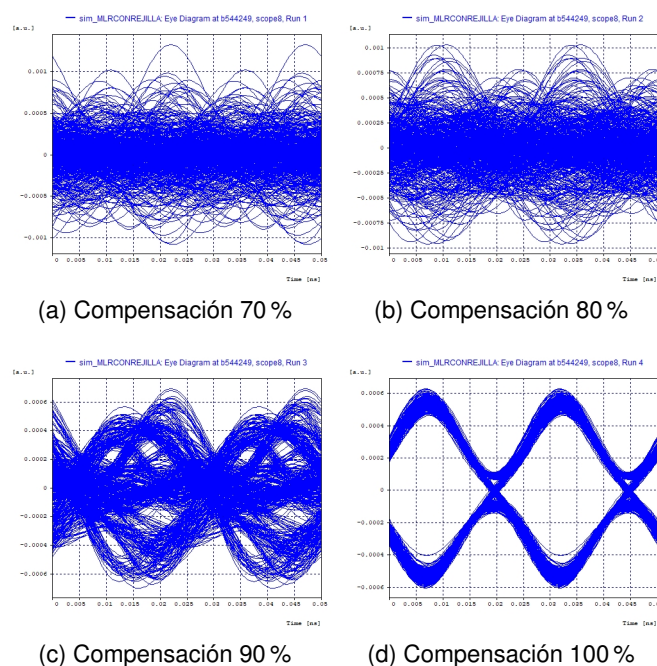


Fig 3.7: Diagrama de ojo al variar la compensación.

Después de disminuir la incidencia de los efectos lineales como atenuación, CD y PMD, se procede a realizar el desarrollo del primer caso de estudio. Por lo tanto, en la figura 3.8, se observa el modelo inicial de red MLR-DWDM, en el cual, se considera primeramente una separación entre canal de 100 GHz para los 6 canales configurados con una longitud del enlace de 100 km para la red de distribución y 100 m de fibra óptica para la última milla, implementando post-compensación al 100 % con una rejilla ideal de Bragg y una preamplificación con el dispositivo EDFA.

De igual manera, en la figura 3.9 se muestran los bloques de transmisión de los canales RZ-OOK y NRZ-OOK respectivamente, los cuales, se caracterizan por ser formatos de modulación de fácil implementación y que necesitan de pocos elementos para generar la forma de onda requerida. Estos transmisores contienen un driver RZ/NRZ rectangular, un láser de modulación externa y un modulador MZ de seno cuadrado.

Por último, en la figura 3.10 se muestra el esquema de modulación RZ-DPSK, el cual, está compuesto por un driver NRZ-OOK, un filtro Bessel y dos moduladores MZM, donde, uno cumple la función de modulador Carver, que obtiene la señal eléctrica proveniente de un generador de ondas polarizadas y un generador de ondas sinusoidales la cual detectará los cambios diferenciales de fase y ajustará la señal óptica proveniente del primer interferómetro para poder generar la señal RZ-DPSK deseada [76].

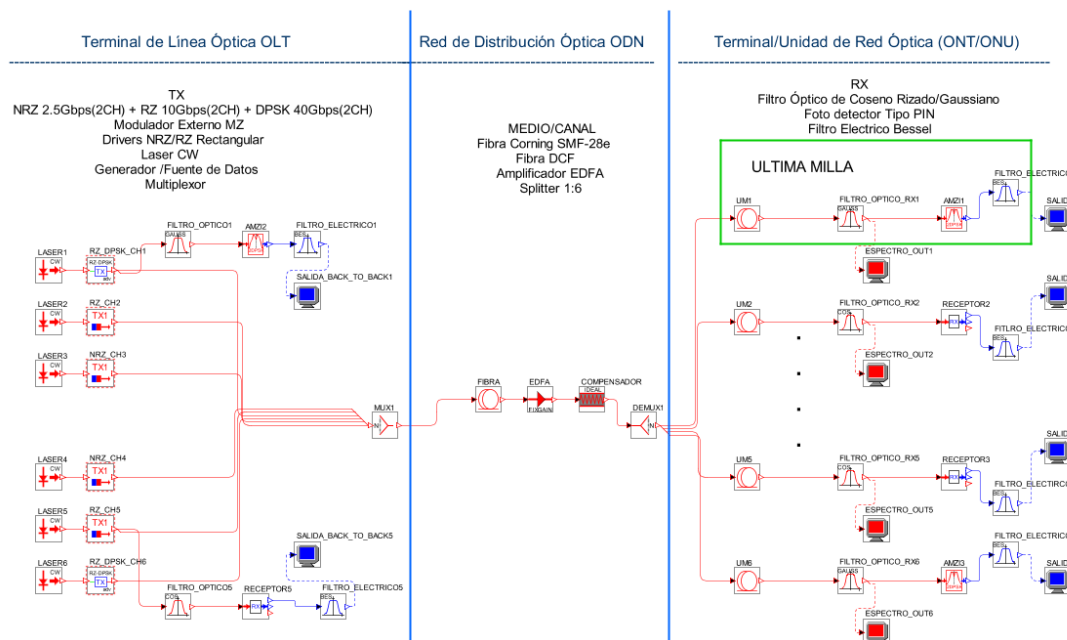


Fig 3.8: Modelo de red Caso 1.

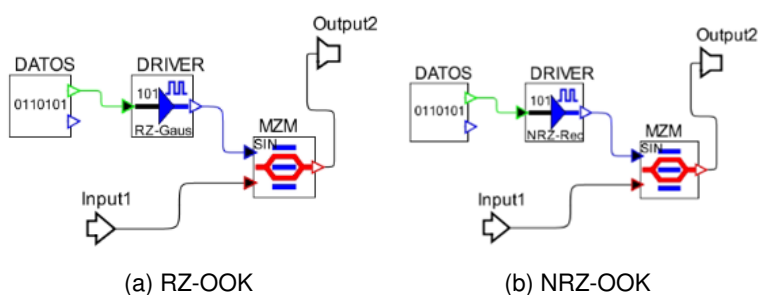


Fig 3.9: Bloques de transmisión.

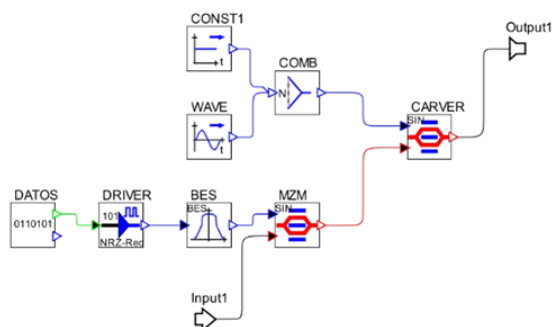


Fig 3.10: Bloque de transmisión- RZ-DPSK

3.1.1.1. Desempeño:

Se procede a analizar el desempeño de la red propuesta. Por lo cual, se obtienen los diagramas del ojo en recepción de todos los canales, como se indica en la imagen 3.11, y otros datos referentes a los parámetros OPM considerando los efectos que pueden incidir en la transmisión (*VBS Full*), tal como se observa en la tabla 3.6.

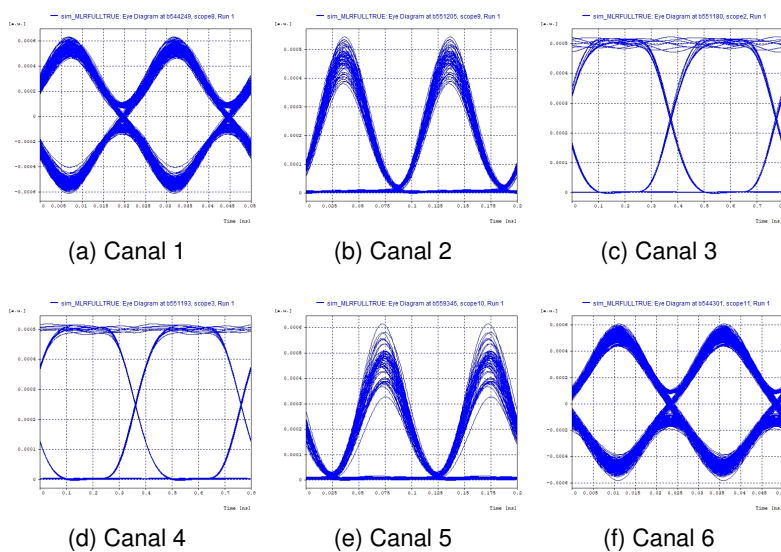


Fig 3.11: Diagramas de ojo en recepción.

Canal	Velocidad Tx (Gbps)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
1	40	-10.46	1e-40	24.59	49.36	19.56
2	10	-12.25	2e-30	21.35	53.19	17.75
3	2.5	-6.47	1e-40	35.25	54.17	23.53
4	2.5	-6.49	1e-40	34.69	54.66	23.51
5	10	-12.39	2.9e-17	19.72	52.02	17.61
6	40	-10.47	1e-40	23.53	50.19	19.53

Tabla 3.6: Parámetros OPM.

En las figuras 3.12a y 3.12b, se presenta el espectro óptico para cada una de las etapas de la red con la potencia inicial de 0 dBm, donde se evidencian las frecuencias de los 6 canales implementados. Respecto a la imagen 3.12a, se aprecian pequeños canales adicionales (circulo azul) luego de pasar por la fibra óptica, los cuales, son producto de la coincidencia de fase de las señales transmitidas, es decir, el fenómeno FWM. Estas señales de onda “fantasmas” pueden generar altas degradaciones ópticas a medida que se aumente la potencia debido a que serán fácilmente detectadas por el receptor. Además, se percibe (circulo negro) una deformación del espectro del canal de 40 Gbps producida por el efecto XPM, donde, las variaciones de potencia de un canal se traduzcan en variaciones de fase en el canal adyacente. Por otro lado, en la ilustración 3.12b, que representan el uso del amplificador EDFA y la compensación ideal mediante el módulo “Ideal Fiber Grating” respectivamente, indican una disminución efectiva de las degradaciones causadas por el medio de transmisión, además de un nivel de potencia adecuado en cada canal. Sin embargo, se presenta cierto ruido debido a la interferencia entre canales (ICI) del sistema producto de la no linealidad de la fibra.

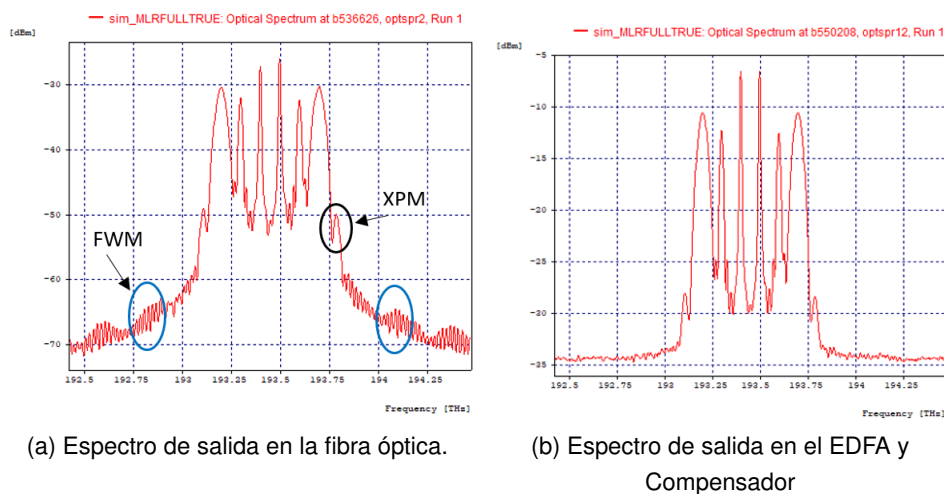


Fig 3.12: Espectro en diferentes etapas de la red.

Un adecuado análisis del fenómeno FWM, debe tener en cuenta parámetros como:

- Número de canales
- Separación entre canal.
- Niveles de potencia.
- Coeficiente de dispersión cromática.

Estos dos últimos ítems (Potencia, Dispersión) son variables que se estudiarán a continuación, con el objetivo de observar su influencia en el aumento del efecto FWM. De este modo, se realiza el siguiente proceso:

1. Variación simétrica de los niveles de potencia para cada uno de los canales, en el rango de 0, 5, 10, 15, 16, 17, 18, 19 y 20 dBm.
2. Variación de la dispersión cromática de la fibra óptica en el rango de 0 a 16 ps/nm*km.

Por último, se determina no analizar el desempeño del sistema al variar la posición de los canales en la grilla espectral, dado que al realizar este procedimiento y situar los canales de 10 Gbps entre los de 40 Gbps, se produjeron deterioros notables en los canales de menor velocidad, además, se observó que el posicionamiento de los mismos no tiene influencia sobre el efecto FWM y la amplitud de las señales adicionales formadas por este fenómeno se mantiene igual sin importar si los canales externos o internos varían su frecuencia en la grilla espectral, es por eso que teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente y considerando la teoría expuesta en el capítulo 1, se decide que para todos los casos de estudio se localicen los canales de mayor intensidad en los extremos de la red, para garantizar una mejora en el desempeño de la misma.

Cabe resaltar que el proceso de variación de parámetros realizado en este primer caso de estudio se replica para el resto de escenarios de simulación.

3.1.1.2. Análisis del efecto FWM al variar la potencia con una separación de 100 GHz entre canales.

Se configuran los 6 canales espaciados entre sí por 100 GHz, con el fin de determinar el comportamiento del sistema frente al aumento de los niveles de potencia. Las gráficas obtenidas de BER y factor Q del primer caso de estudio bajo esta condición, se muestran en las figura 3.13.

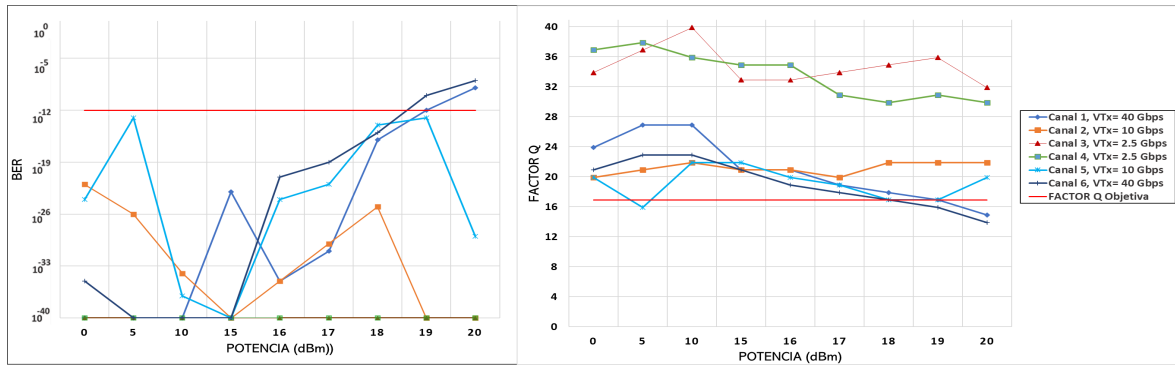


Fig 3.13: BER, Factor Q vs Potencia - Separación 100 GHz

Como se puede observar en las gráficas anteriores (Anexo A, tabla 1)¹, los valores obtenidos en los parámetros de monitoreo óptico para los canales 1 y 6 con el esquema de modulación RZ-DPSK son adecuados hasta una potencia límite de 19 dBm y 18 dBm respectivamente, debido a que presenta una BER de 3^{-12} , 2^{-15} y factor Q de 17.02 dB, 17.93 dB, cada uno por encima de los criterios de calidad establecidos. Sin embargo, con respecto a los canales 2 y 5, muestran una disminución de los parámetros objetivos para algunos intervalos de potencia, debido a que, el espectro óptico del formato de modulación RZ-DPSK tiene una anchura espectral que interfiere con los canales adyacentes, no obstante, se encuentran dentro de los márgenes de calidad estipulados. Por otro lado, los canales 3 y 4 entregan un comportamiento totalmente idóneo para cada una de las variaciones de potencia ejercidas. Cabe de notar, que los resultados obtenidos por los diferentes canales a través del mismo medio no se comportan de manera similar (Anexo a, tabla 1), debido a la influencia en la posición relativa de la frecuencia, donde la fibra óptica responde de manera diferente a cada una de las longitudes de onda que viajan con diferentes velocidades, como ocurre con los canales 1 y 6 a una tasa de transmisión de 40 Gbps distribuidos en los extremos de la red, donde se muestra un mejor desempeño cuando tiene una menor frecuencia (192.2 THz) y una baja respuesta cuando está posicionado en una frecuencia alta (192.7 THz), de este modo, así estén configurados de la misma forma su comportamiento es distinto.

En la figura 3.14 se observa el diagrama de ojo del canal 193.2 THz y 193.7 THz para la potencia de transmisión de 19 dBm y 18 dBm respectivamente, las cuales, en su región de marca de unos y ceros (parte superior e inferior del diagrama) manifiesta una ligera dispersión de datos como consecuencia del ruido presente en la señal, en la región de la apertura del ojo (centro del diagrama) se muestra simetría en los cruces de tiempo, por lo que la dispersión cromática no está siendo un factor determinante.

En la figura 3.15, se muestra el espectro óptico de los canales en recepción para varios

¹ Algunas de las figuras presentadas en el presente trabajo de grado, son resultado de los datos tomados en las simulaciones y que se registran en las tablas de los anexos.

niveles de potencia (0, 10, 15, 19 dBm), donde, se observa primeramente que no existe un ensanchamiento de los pulsos, es decir, que no hay presencia del fenómeno SPM, sin embargo, se percibe una deformación del espectro del canal a 40 Gbps para cada uno de los niveles de potencia producto de XPM (círculo negro). No obstante, el efecto no lineal predominante es FWM, tal como se muestra en los círculos azules, puesto que, en el espectro de salida se generan pulsos diferentes a los transmitidos, los cuales coinciden con los canales originales produciendo pérdida de la información. Además, a medida que aumentan los niveles de potencia, las ondas “fantasmas” son más prolongadas causando problemas de recepción y disminuyendo el valor de los parámetros OPM de calidad establecidos, como sucedió a partir de la potencia de 19 dBm (Canal 1) y 18 dBm (Canal 6) con respecto a la modulación RZ-DPSK para este caso de estudio.

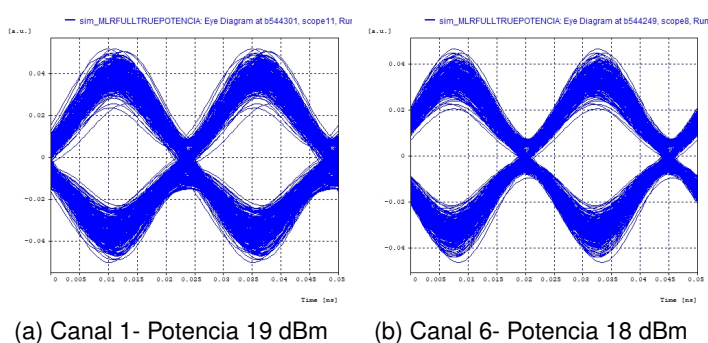


Fig 3.14: Diagrama de ojo en recepción.

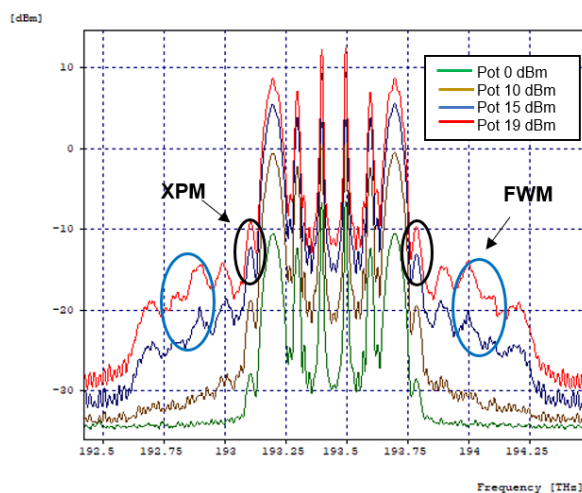


Fig 3.15: Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.

3.1.1.3. Análisis del efecto FWM al variar la dispersión con diferentes niveles de Potencia.

Para el segundo análisis, se hace la variación de la dispersión cromática de la fibra SMF-28 Corning manteniendo fijo los niveles de potencia, de este modo, se define un rango

desde 0 a 16 ps/nm*km.

En las figuras 3.16 a 3.18, se muestra el comportamiento del enlace frente a la variación del coeficiente de dispersión de la fibra para las potencias de 0, 10 y 19 dBm (Anexo A, tablas 2, 3 y 4).

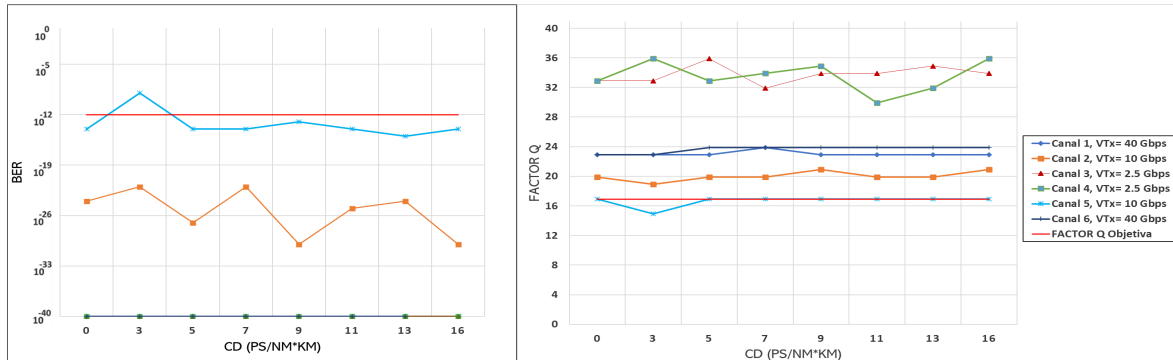


Fig 3.16: BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 0dBm

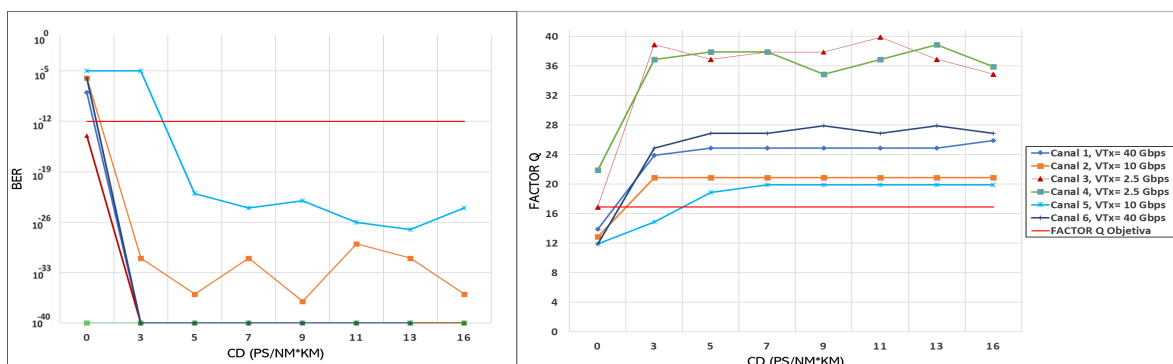


Fig 3.17: BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 10dBm

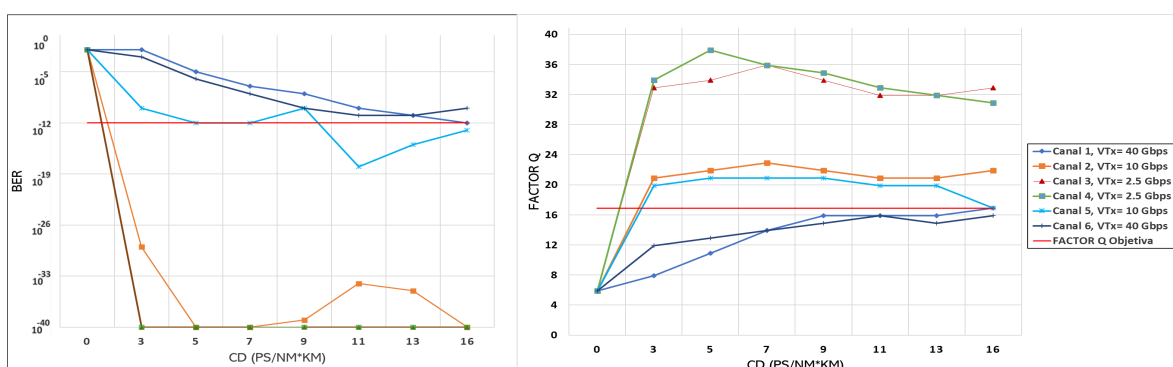


Fig 3.18: BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 19dBm

Con respecto a las figuras anteriores (Anexo A, tablas 2,3 y 4), para niveles de potencia superiores a 0 dBm, los canales configurados presentan una respuesta deficiente cuando se encuentran por debajo de los 5 ps/nm*km., no obstante, a medida que se hace un aumento gradual de la dispersión el sistema empieza a estar acorde a los niveles de umbral

definidos. En cuanto al canal 1 con una potencia límite de 19 dBm, solamente presenta un nivel aceptable cuando los valores están por encima de los 13 ps/nm*km, por lo que, el efecto FWM tiene una menor afectación cuando la CD está en el intervalo de 13 a 16 ps/nm*km, también, es recomendable que el coeficiente de dispersión este por debajo de los 16 o 17 ps/nm*km para evitar degradaciones producto de la misma dispersión cromática. Para los demás niveles de potencia, los canales presentan niveles adecuados de BER y factor Q, a excepción de la dispersión nula.

En la imagen 3.19, se destaca la degradación que presenta el sistema, la cual, es producto del fenómeno SPM relacionado con la potencia del láser en TX, el régimen de dispersión aplicado y el FWHM del laser. De este modo, para una dispersión de 0 ps/nm*km se disparan todos los efectos no lineales con una mayor proporción para niveles altos de potencia.

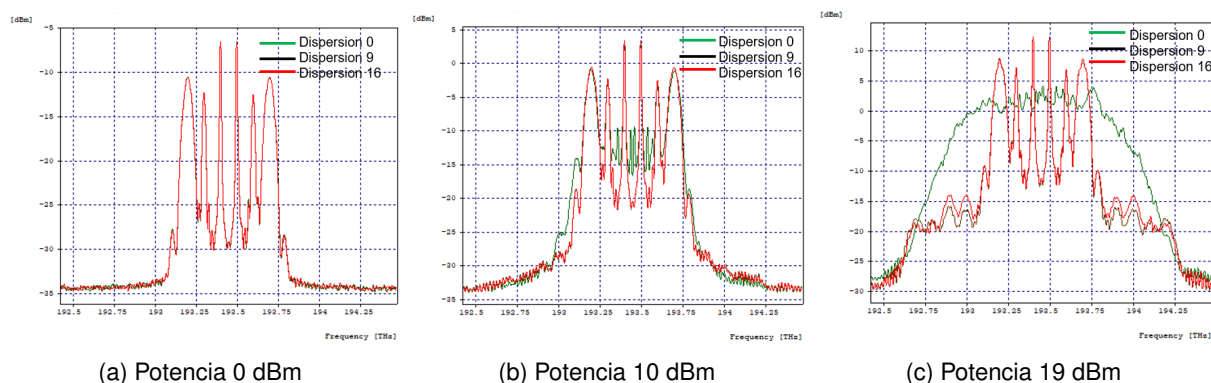


Fig 3.19: Variación del coeficiente de dispersión.

3.1.1.4. Análisis del efecto FWM al variar la potencia con una separación de 50 GHz entre canales.

Se configuran los 6 canales para una separación de 50 GHz, con el fin de determinar el comportamiento del sistema frente al aumento en los niveles de potencia y la proximidad mayor entre canales.

Como se puede observar en la gráfica 3.20 (Anexo A, tabla 5), el desempeño del canal 1 con el esquema de modulación RZ-DPSK es adecuado hasta una potencia límite de 10 dBm, debido a que presenta una BER de $1,1^{-12}$ con un factor Q de 17.675 dB, que está por encima de los criterios de calidad establecidos. Sin embargo, el canal 6 con la misma tasa de transmisión y formato de modulación no presenta en ningún momento valores adecuados de BER y Factor Q (Anexo A, tabla 5), debido a la influencia en la posición relativa de la frecuencia, donde, su ubicación en la grilla espectral con una frecuencia alta (193.55 THz), provoca una degradación aún mayor en el desempeño del canal, de este modo, así estén configurados de la misma forma su comportamiento es totalmente distinto en el mismo

medio de transmisión. Por otro lado, con respecto a los canales 2 y 5, muestran una gran afectación debido a la ocupación espectral del formato RZ-DPSK, puesto que, sus valores en ningún momento están por encima del umbral establecido. En cuanto, a los canales 3 y 4 entrega un comportamiento totalmente idóneo para cada una de las variaciones de potencia ejercidas.

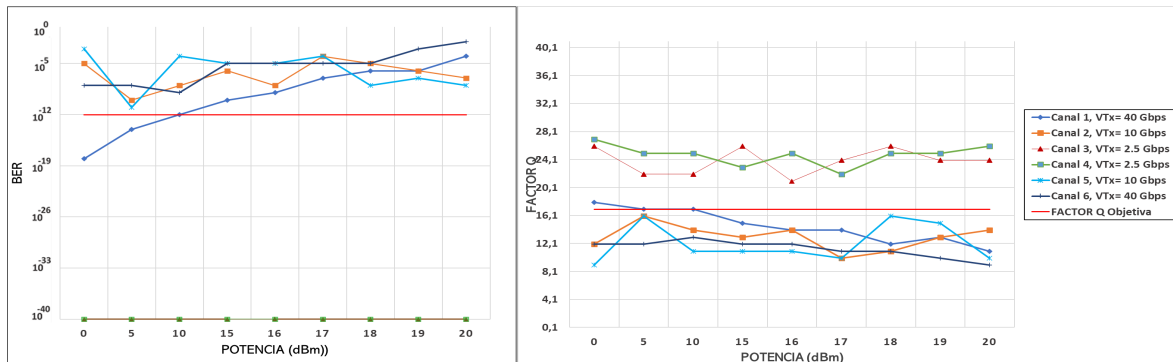


Fig 3.20: BER, Factor Q vs Potencia - Separación 50 GHz

En la figura 3.21 , se observa el diagrama de ojo del canal 193.30 THz y 193.55 THz para la potencia de transmisión de 10 dBm y 0 dBm respectivamente, las cuales, en su región de marca de ceros (parte inferior del diagrama) exhibe bastante dispersión de datos como consecuencia del ruido presente en la señal, en la región de la apertura del ojo (centro del diagrama) se muestra simetría en los cruces de tiempo, por lo que la dispersión cromática no está siendo un parámetro determinante.

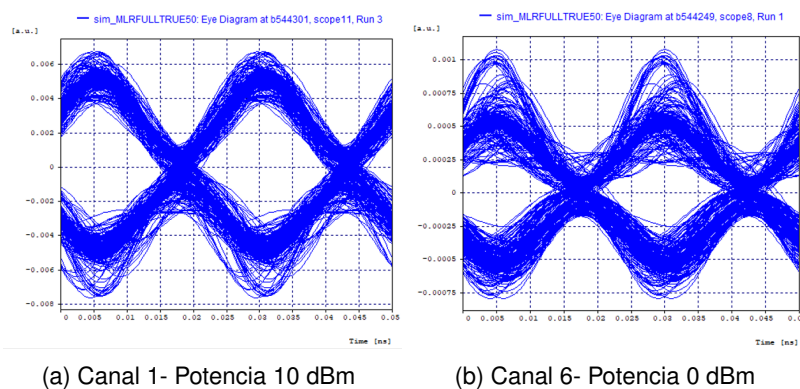


Fig 3.21: Diagrama de ojo en recepción.

En la figura 3.22, se muestra el espectro óptico de los canales en recepción para varios niveles de potencia (0, 5, 10 dBm), donde, se observa que no existe un ensanchamiento de los pulsos, es decir, que no hay presencia del fenómeno SPM. No obstante, la separación entre canal establecida de 50 GHz, genera una afectación mayor al medio debido a la ocupación espectral ocasionada por el esquema de modulación RZ-DPSK hacia los canales adyacentes como RZ-OOK, lo cual, incrementa considerablemente la ICI, siendo más crítico mantener los niveles de calidad definidos.

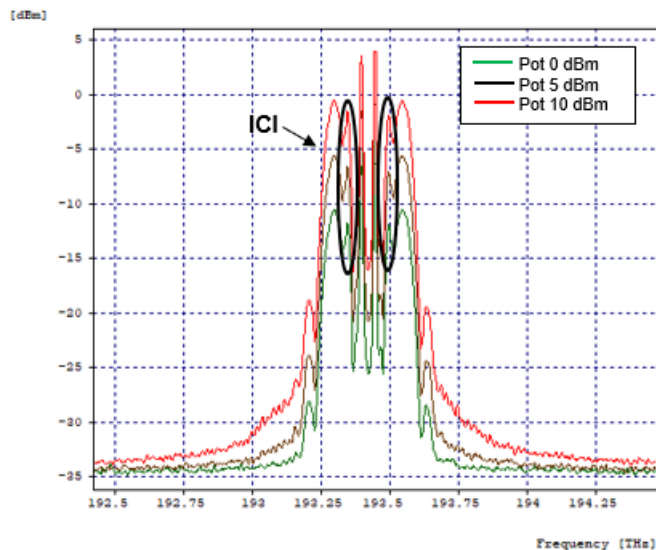


Fig 3.22: Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.

3.1.1.5. Análisis del efecto FWM al variar la dispersión con diferentes niveles de potencia.

Se procede a hacer el segundo análisis, en el cual, se realiza la variación de la dispersión cromática de la fibra SMF-28 Corning manteniendo fijo los niveles de potencia, de este modo, se define un rango desde 0 a 16 ps/nm*km.

En las figuras 3.23 y 3.24, se muestra el comportamiento del enlace frente a la variación del coeficiente de dispersión de la fibra para las potencias de 0 y 10 dBm. (Anexo A, tablas 6 y 7)

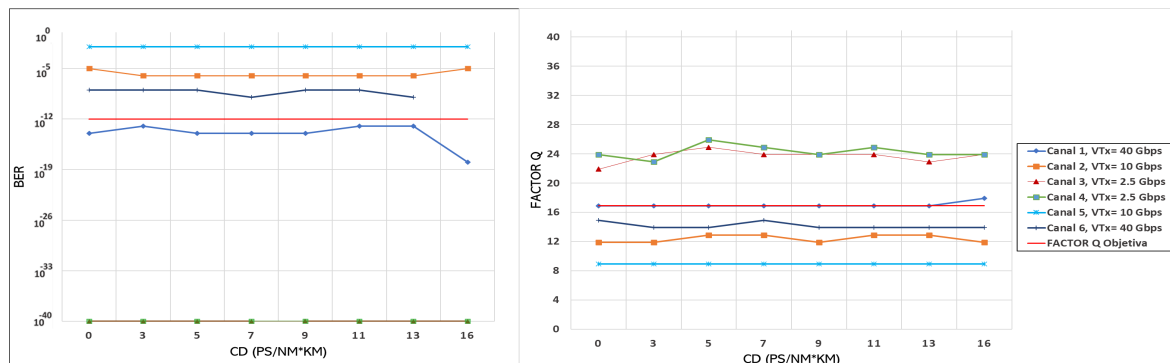


Fig 3.23: BER, Factor Q vs CD- Separación 50 GHz- Potencia 0 dBm

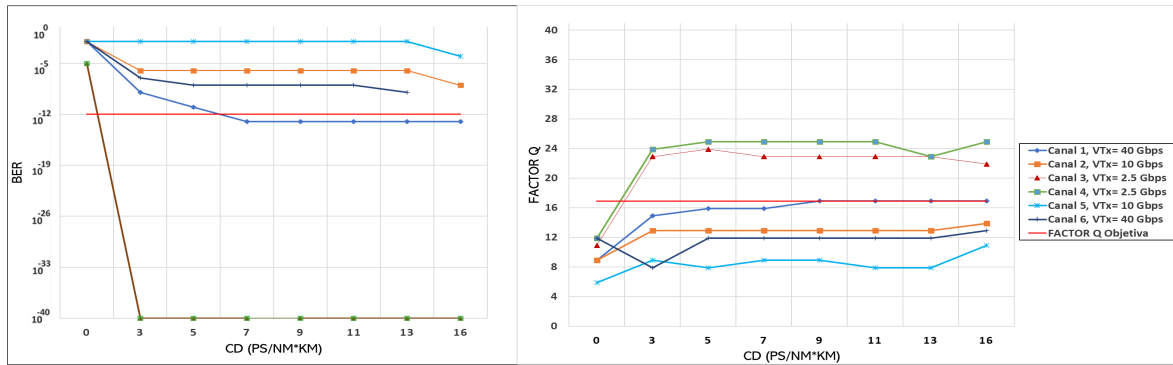
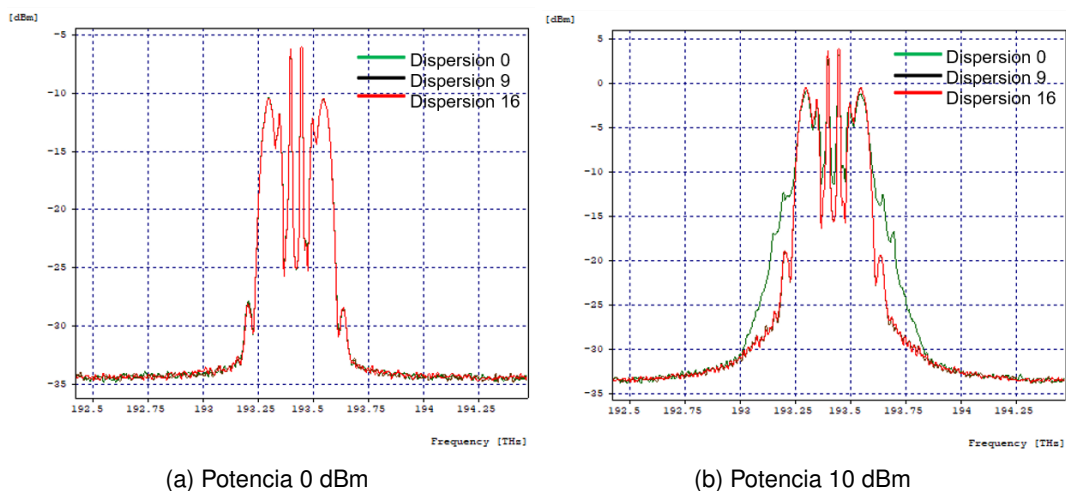


Fig 3.24: BER, Factor Q vs CD-Separación 50GHz-Potencia 10dBm

Con base a las imágenes anteriormente expuestas (Anexo A, tablas 6 y 7), se observa que, para niveles de potencia superiores a 0 dBm, los canales configurados presentan una respuesta deficiente cuando se encuentran por debajo de los 5 ps/nm²*km, no obstante, a medida que se hace un aumento gradual de la dispersión el sistema empieza a estar acorde a los niveles de umbral definidos. Sin embargo, con respecto al canal 1 con una tasa de transmisión de 40 Gbps, solamente presenta un nivel adecuado cuando los valores Q están por encima de los 7 ps/nm²*km para la potencia de 10 dBm, por lo que, el efecto FWM tiene una menor afectación cuando la CD está en el intervalo de 7 a 16 ps/nm²*km. Para los demás niveles de potencia, los canales 3 y 4 son los únicos que presentan niveles adecuados de BER y factor Q, a excepción de la dispersión nula.

En la imagen 3.25, se destaca la degradación que presenta el sistema cuando se establece una dispersión nula (línea verde), la cual, es más predominante con el aumento en los niveles de potencia.



(a) Potencia 0 dBm

(b) Potencia 10 dBm

Fig 3.25: Variación del coeficiente de dispersión.

3.1.1.6. Análisis del efecto FWM al variar la potencia con una separación de 25 GHz entre canales.

Se configuran los 6 canales para una separación de 25 GHz, con el fin de determinar el comportamiento del sistema frente al aumento en los niveles de potencia y la proximidad aún mayor entre canales.

Como se puede observar en la gráfica 3.26 (Anexo A, tabla 8), no fue posible obtener resultados acordes a los parámetros de calidad establecidos, debido a la ocupación espectral del esquema de modulación RZ-DPSK, el cual, para esta separación entre canal está afectando al formato de modulación básico NRZ-OOK, que en anteriores escenarios había presentado parámetros totalmente idóneos para cada uno de los niveles de potencia. De esta forma, se concluye que el sistema no es capaz de soportar un distanciamiento entre canal de 25 GHz para 6 canales implementados.

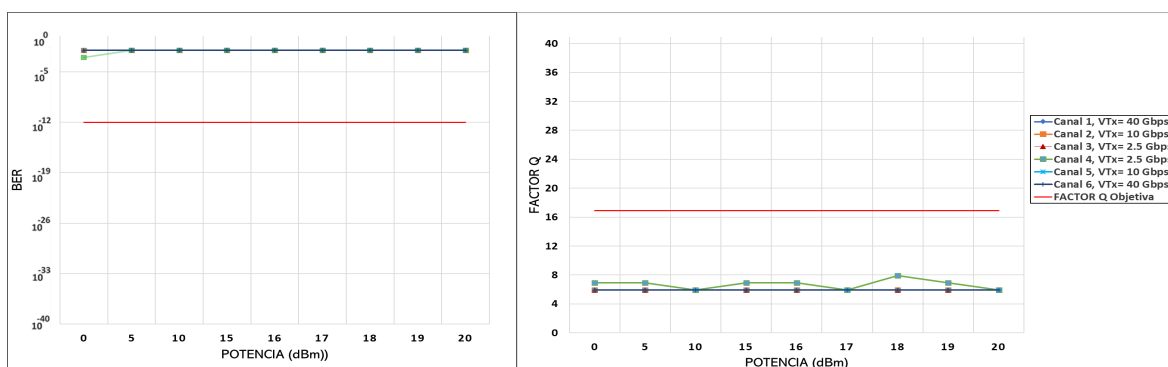


Fig 3.26: BER, Factor Q vs Potencia - Separación 25 GHz

En las figuras 3.27 y 3.28, se observa el diagrama de ojo del canal 193.350 Thz y 193.475 THz para la potencia de transmisión de 0 dBm, las cuales, en su región de marca de unos y ceros (parte superior e inferior del diagrama) exhibe gran dispersión de datos como consecuencia del ruido presente en la señal, en la región de la apertura del ojo (centro del diagrama) se muestra simetría en los cruces de tiempo, pero un cierre bastante importante del ojo en los cruces de amplitud debido a los niveles de voltaje y a la distorsión considerada. En cuanto al espectro óptico, muestra una gran afectación por la presencia de FWM debido a los canales de 2,5 Gbps y 10 Gbps que solo cuentan con una separación de 25 GHz entre sí, dado que, cuando se transmiten canales con diferentes velocidades sobre un mismo medio, los canales de mayor velocidad tienden a verse perjudicados por los de una velocidad de transmisión menor.

En la figura 3.29, se muestra el espectro óptico de los canales en recepción para varios niveles de potencia (0, 5, 10 dBm), donde, se destaca que para una separación de 25 GHz afecta totalmente el rendimiento de todos los canales de la red, razón por la cual, para ningún intervalo de potencia se pudo obtener parámetros de calidad adecuados, de este

modo, no se realizara el análisis de dispersión para este escenario.

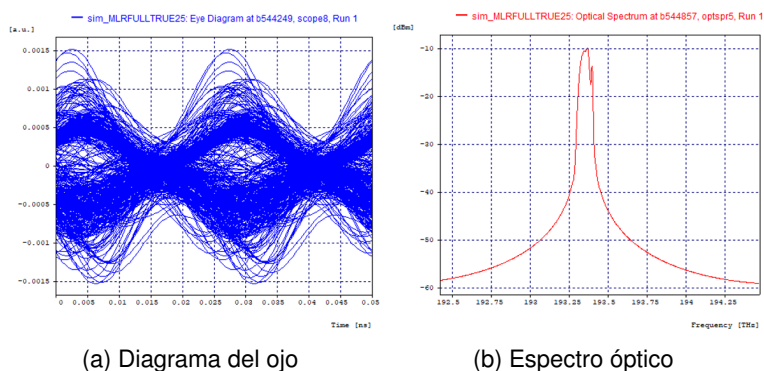


Fig 3.27: Salida modulada para el canal 1 con una potencia de 0 dBm.

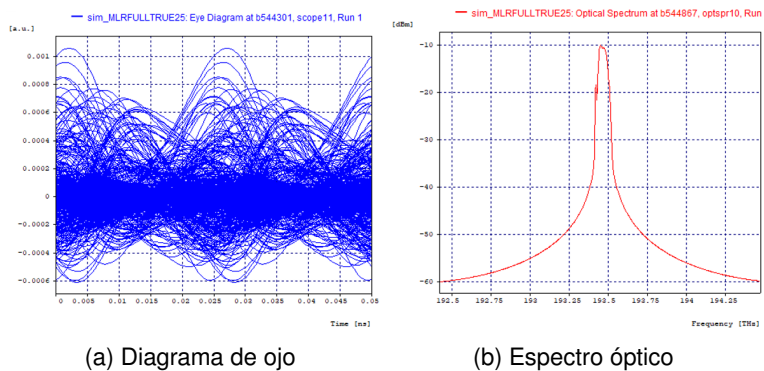


Fig 3.28: Salida modulada para el canal 6 con una potencia de 0 dBm.

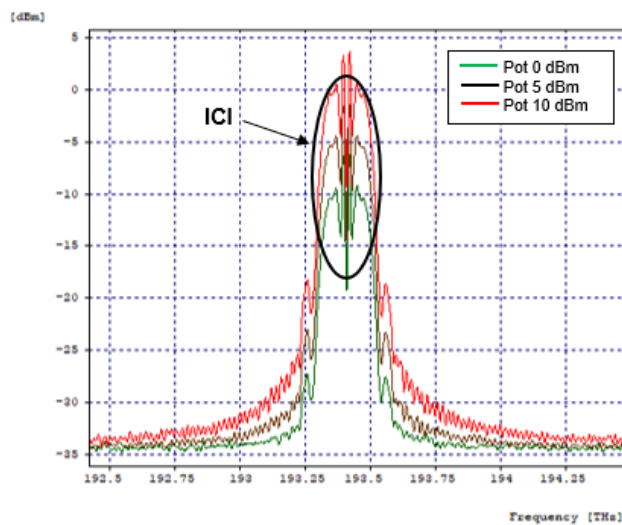


Fig 3.29: Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.

3.1.2. Caso de estudio 2: 2 canales de 2.5 Gbps + 4 canales de 10 Gbps + 4 canales de 40 Gbps.

Para este segundo caso de estudio se toma como referencia el escenario anterior (Caso de estudio 1), adicionando 2 canales de 40 Gbps y 2 canales de 10 Gbps, con el propósito de observar la influencia de FWM frente al aumento de canales, dado que, es un parámetro importante a considerar cuando se analiza dicho fenómeno. De este modo, se configuran 4 canales externos de 40 Gbps con el esquema de modulación RZ-DPSK, 4 canales de 10 Gbps con RZ-OOK y 2 canales internos de 2.5 Gbps con NRZ-OOK. Además, se define la misma separación entre canal de 100 GHz (0,8 nm), 50 GHz (0,4 nm) y 25 GHz (0,2 nm) considerando la grilla espectral para este tipo de redes DWDM según la ITU-T G.694.1 [73], teniendo como frecuencia de referencia (frecuencia del primer canal) de 193.0 Thz.

El esquema general del sistema óptico propuesto se puede apreciar en la figura 3.30, donde se implementa un total de 10 canales ópticos cada uno con una tasa de transmisión diferente según el formato de modulación establecido. Los parámetros generales de configuración para este segundo caso de estudio se detallan en la tabla 3.1.

- Desempeño:** Se procede a analizar el desempeño de la red propuesta mediante los parámetros OPM, medidos para cada canal implementado a una potencia de 0 dBm, estos se presentan en la tabla 3.7, considerando todos los efectos que pueden incidir en el sistema.

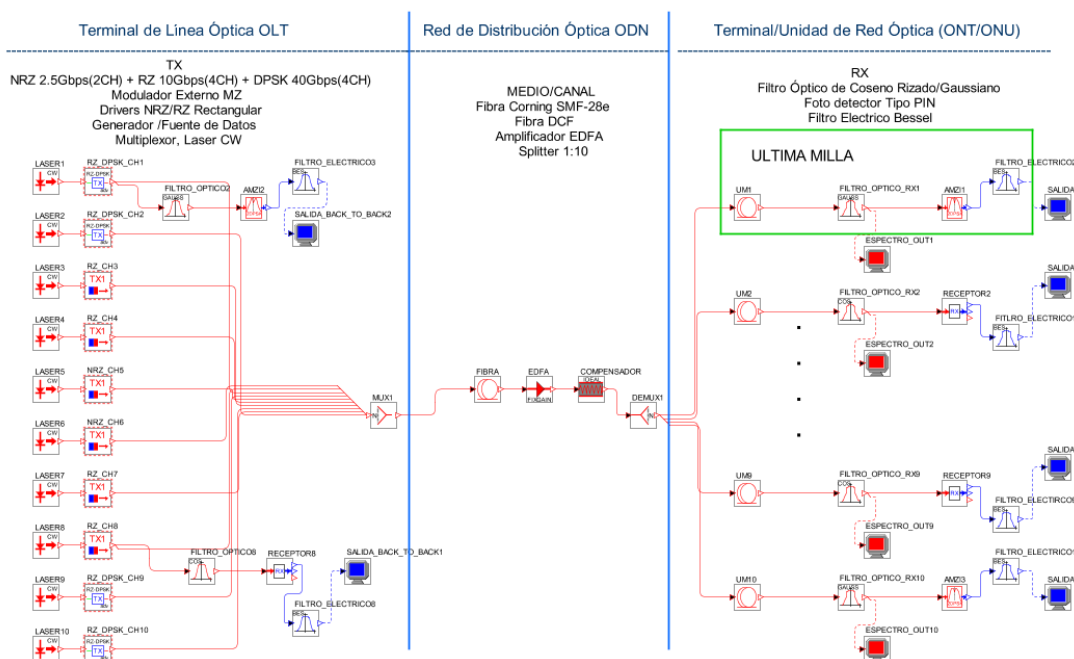


Fig 3.30: Modelo de red Caso 2.

Canal	Velocidad Tx (Gbps)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
1	40	-10.45	1e-40	22.69	48.02	19.55
2	40	-10.41	1e-40	22.46	48.39	19.59
3	10	-12.34	1e-40	24.18	53.1	17.66
4	10	-12.34	1e-40	24.16	53.1	17.66
5	2.5	-6.49	1e-40	33.74	54.16	23.51
6	2.5	-6.71	1e-40	36.52	54.38	23.29
7	10	-12.45	1e-40	26.07	51.23	17.55
8	10	-12.29	4.9e-24	20.27	51.37	17.71
9	40	-10.51	1.4e-35	22.09	49.89	19.49
10	40	-10.51	1e-40	23.58	49.75	19.49

Tabla 3.7: Parámetros OPM.

En las figuras 3.31a y 3.31b, se presenta el espectro óptico para cada una de las etapas de la red con una potencia inicial de 0 dBm, donde se evidencian las frecuencias de los 10 canales implementados. Respecto a la imagen 3.31a, se aprecian pequeños canales adicionales (circulo azul) luego de pasar por la fibra óptica, tal como sucedió en el caso de estudio anterior, no obstante, estas réplicas de onda (FWM) no son tan determinantes debido al nivel de potencia aplicado, por lo cual, un incremento considerable de la intensidad de la señal de cada canal va a influir aún más en la degradación del sistema, producto del aumento en el número de canales. Además, en este escenario, es importante resaltar la configuración de los 4 canales externos con una capacidad de 40 Gbps, los cuales, no reflejan una afectación en la calidad de la señal debido a su espectro angosto, lo que demuestra el buen funcionamiento del formato de modulación avanzado DPSK. A su vez, se sigue percibiendo (circulo negro) una deformación del espectro del canal de 40 Gbps producida por el efecto XPM. Por otro lado, la imagen 3.31b, que representa la salida de la señal después del uso del amplificador EDFA y la compensación ideal mediante el módulo "Ideal Fiber Grating", indica una disminución efectiva de las degradaciones causadas por el medio de transmisión, además de un nivel de potencia adecuado en cada canal.

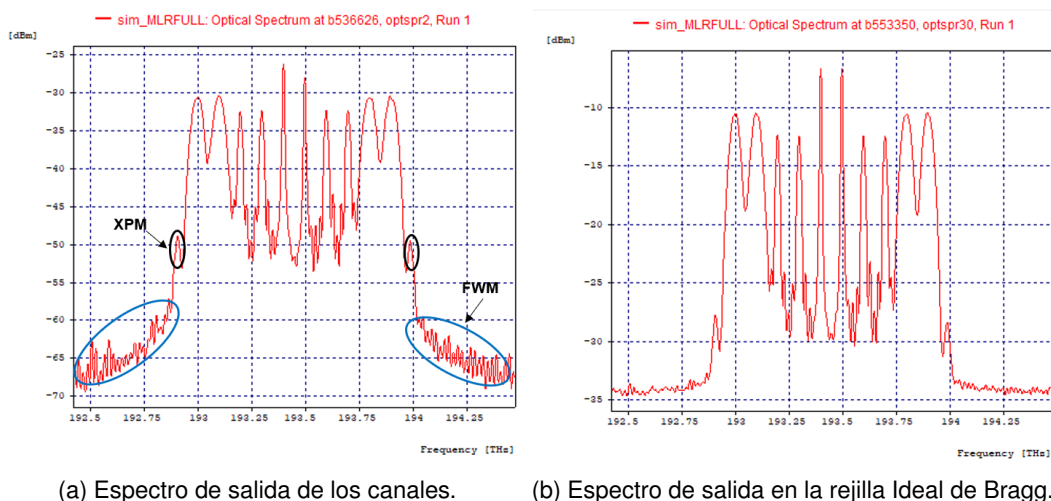


Fig 3.31: Espectro en diferentes etapas de la red.

■ Análisis del efecto FWM al variar la potencia con una separación de 100 GHz entre canales.

Se configuran los 10 canales espaciados entre sí por 100 GHz, con el fin de determinar el comportamiento del sistema frente al aumento de los niveles de potencia. Las gráficas obtenidas de BER y factor Q del segundo caso de estudio bajo esta condición, se muestra en la figura 3.32.

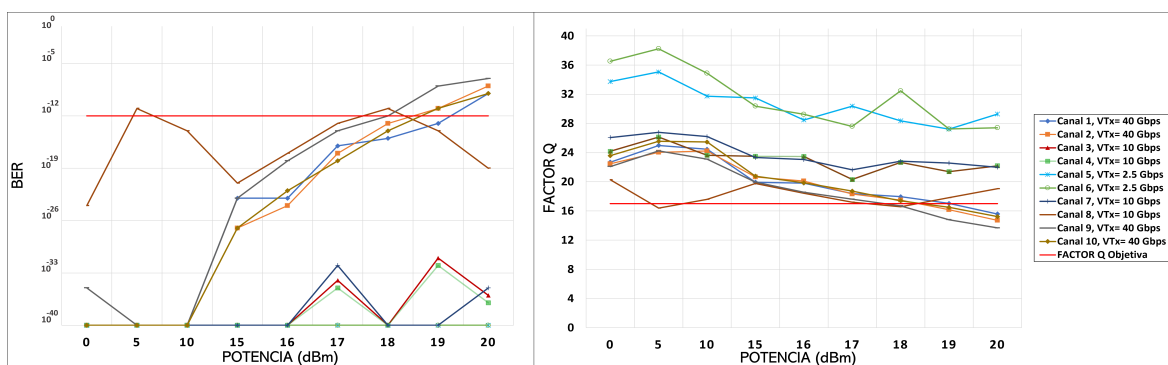


Fig 3.32: BER, Factor Q vs Potencia- Separación 100 GHz

Como se puede observar en las gráficas anteriores (Anexo A, tabla 9), los valores obtenidos en los parámetros de monitoreo óptico para los canales externos (1, 2, 9, 10) con el esquema de modulación RZ-DPSK son adecuados hasta una potencia límite de 19 dBm, para el canal 1 y 18 dBm para los canales 2, 9 y 10, debido a que presentan una BER de 8^{-13} , 1^{-13} , 5^{-12} , 9^{-14} con un factor Q de 17.03 dB, 17.49 dB, 16.69 dB, 17.39 dB, respectivamente, que están por encima de los criterios de calidad establecidos. Sin embargo, con respecto a los canales (7, 8) presentan una disminución de la BER, debido a la influencia que están obteniendo de los canales adyacentes y su posición relativa en frecuencia dentro

del rango establecido en la grilla espectral, puesto que, los canales (3, 4) con la misma tasa de transmisión tienen una respuesta mejor. Por otro lado, los canales 5 y 6 con una baja tasa de transmisión muestran un comportamiento totalmente idóneo para cada una de las variaciones de potencia ejercidas, dado que, el formato de modulación avanzado tiene un espectro óptico mucho más angosto, por lo cual, evita la interferencia a los canales adyacentes para este tipo de espaciamiento.

En las figuras 3.33, 3.34, se observa el diagrama de ojo de los canales con frecuencias de 193.0 THz, 193.1 THz, 193.8 THz, 193.9 THz para las potencias de transmisión de 19 dBm y 18 dBm, las cuales, en su región de marca de unos y ceros (parte superior e inferior del diagrama) exhibe dispersión de datos como consecuencia del ruido presente en la señal, en la región de la apertura del ojo (centro del diagrama) se muestra simetría en los cruces de tiempo, por lo que la dispersión cromática no está siendo un factor determinante.

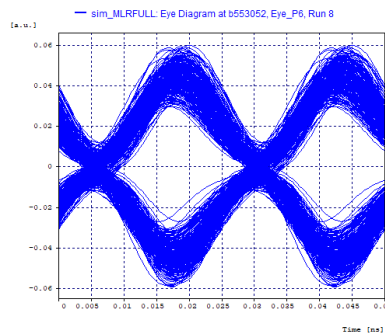


Fig 3.33: Diagrama del ojo- Canal 1- Potencia 19 dBm

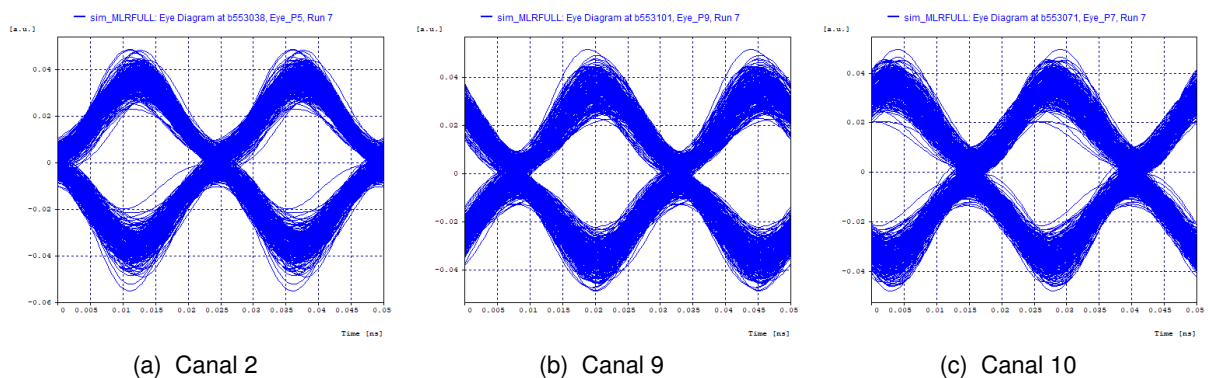


Fig 3.34: Diagrama de ojo con una potencia de 18 dBm.

En la figura 3.35, se muestra el espectro óptico de los canales en recepción para varios niveles de potencia (0, 10, 15, 19 dBm), donde, en primer lugar se observa que no existe un ensanchamiento de los pulsos, es decir, que no hay presencia del fenómeno SPM, sin embargo, se sigue percibiendo una deformación del espectro de los canales para cada uno de los niveles de potencia producto de XPM (circulo negro), en especial para el canal 1 y

10, correspondientes a los canales externos de la red. No obstante, el efecto no lineal predominante es FWM, tal como se muestra en los círculos azules, puesto que, en el espectro de salida se generan pulsos diferentes a los transmitidos, los cuales coinciden con los canales originales produciendo pérdida de la información, además se nota un aumento en la amplitud en estos canales parásitos, al aumentar la potencia, lo cual reafirma la importancia de una correcta elección de la potencia en transmisión.

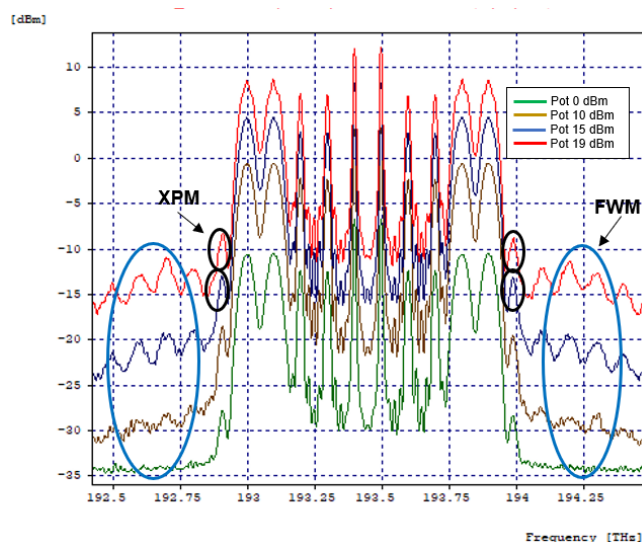


Fig 3.35: Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.

■ Análisis del efecto FWM al variar la dispersión con diferentes niveles de potencia.

Para el segundo análisis, se hace la variación de la dispersión cromática de la fibra SMF-28 Corning manteniendo fijo los niveles de potencia, de este modo, se define un rango desde 0 a 16 ps/nm²*km. En las figuras 3.36, 3.37, 3.38, se muestra el comportamiento del enlace frente a la variación del coeficiente de dispersión de la fibra para las potencias de 0, 10 y 19 dBm (Anexo A, tablas 10,11,12).

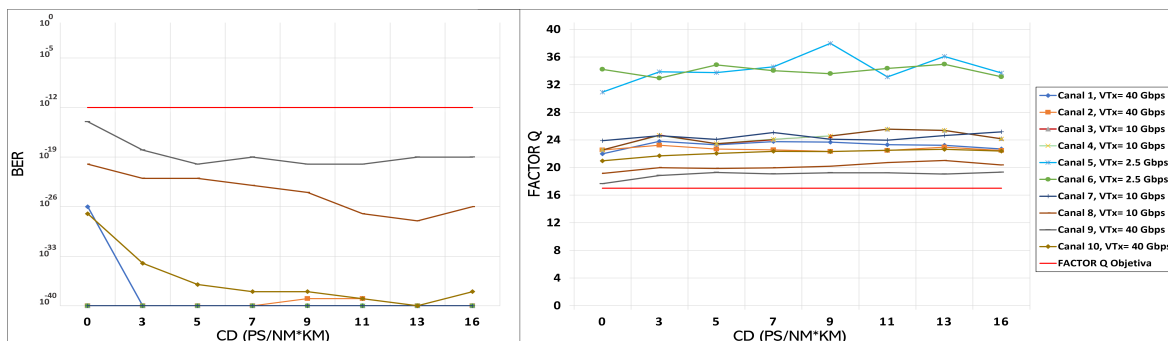


Fig 3.36: BER, Factor Q vs CD-Separación 100 GHz-Potencia 0 dBm

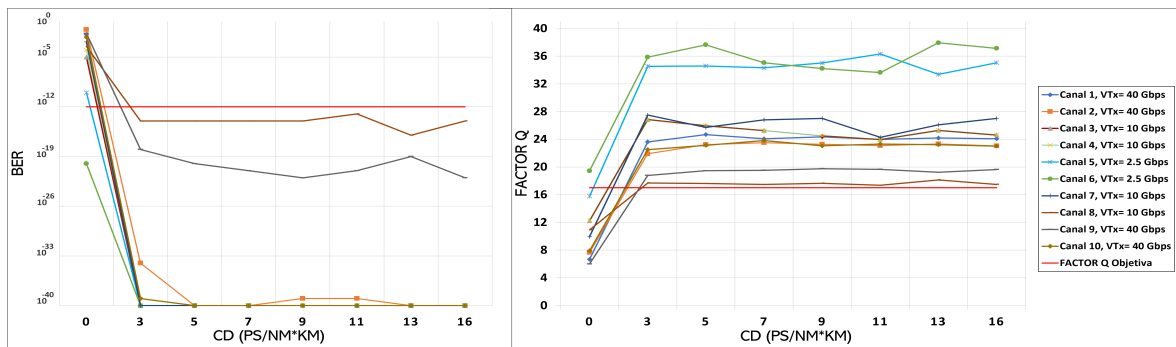


Fig 3.37: BER, Factor Q vs CD-Separación 100 GHz-Potencia 10dBm

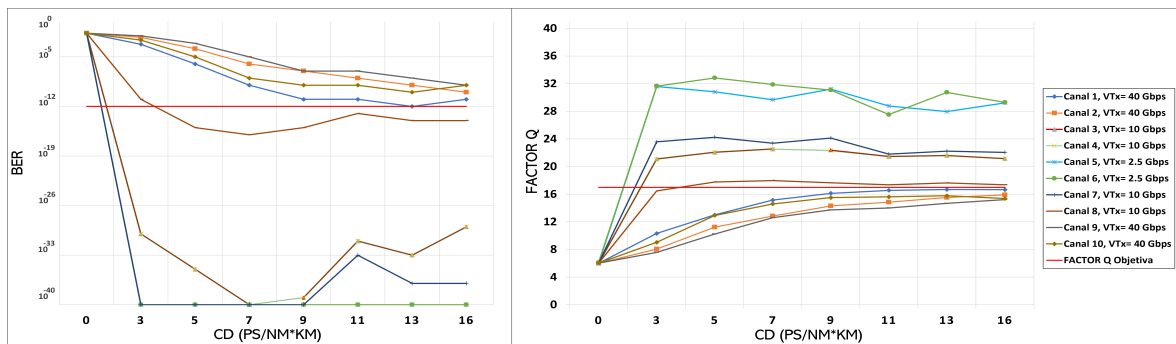


Fig 3.38: BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 19dBm

En las imágenes anteriores se observa que para niveles de potencia superiores a 0 dBm, los canales configurados presentan una respuesta deficiente cuando se encuentran por debajo de los 3 ps/nm*km, no obstante, a medida que se hace un aumento gradual del coeficiente de dispersión, el sistema empieza a estar acorde a los niveles de umbral definidos. En cuanto al primer canal con una potencia límite de 19 dBm, presenta un nivel adecuado cuando tienen una dispersión superior a 13 ps/nm*km, esto dado que el efecto FWM tiene una gran afectación en los parámetros de calidad cuando la CD está por debajo de dicho valor. Por otro lado, los canales 2, 9 y 10, no soportan este nivel de potencia, para ninguno de los valores de CD analizados, dado que, la posición relativa en frecuencia de estos canales está siendo altamente afectada por las variaciones de dispersión y esto denota la importancia de elegir correctamente la potencia en transmisión, para garantizar una buena recepción de todas las longitudes de onda. Por último, los demás canales que hacen parte del sistema tienen niveles adecuados de BER y factor Q, a excepción de la dispersión nula, para cada uno de los niveles de potencia.

En la figura 3.39, se destaca la degradación que presenta el sistema, la cual, es producto del fenómeno SPM relacionado con la potencia del láser en TX, el régimen de dispersión aplicado y el FWHM del laser. De este modo, para una dispersión de 0 ps/nm*mk se dispa-

ran todos los efectos no lineales con una mayor proporción para niveles altos de potencia. De esta manera, se concluye que para el esquema de modulación RZ-DPSK, la variación de los niveles de dispersión influye en el aumento del fenómeno FWM, presentando valores adecuados solamente cuando la dispersión está en un rango mayor de 3 ps/nm*km y en algunos casos solamente cuando esta es igual a 16 ps/nm*km.

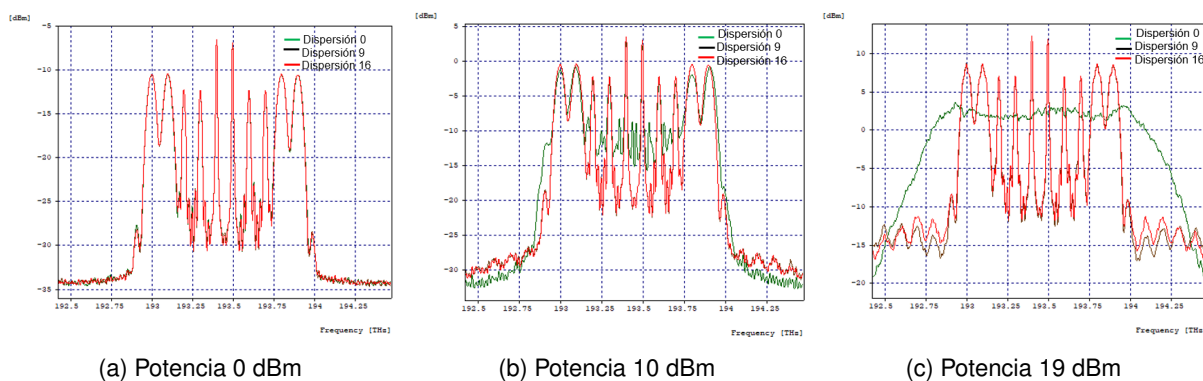


Fig 3.39: Variación del coeficiente de dispersión.

■ Análisis del efecto FWM al variar la potencia con una separación de 50 GHz entre canales.

Se configuran los 10 canales para una separación de 50 GHz, con el fin de determinar el comportamiento del sistema frente al aumento de potencia.

De esta manera, en la figura 3.40 (Anexo A, tabla 13) se observa el desempeño de los canales, analizando que ninguno de los que operan a 40 Gbps soporta este espaciado, sin importar que se esté simulando con una potencia pequeña de 0 dBm, lo que indica que el esquema de modulación RZ-DPSK no es lo suficientemente robusto en sistemas de alta velocidad que necesiten emplear separaciones entre canales menores a 100 GHz. Con respecto a los canales 7 y 8 con una tasa de transmisión de 10 Gbps, se repara que están siendo perjudicados por la anchura espectral de la modulación elegida, puesto que, los canales 3 y 4 con la misma velocidad implementada exponen mejores parámetros de BER y factor Q en cada intervalo de potencia. Por último, los canales 5 y 6 siguen entregando un comportamiento totalmente idóneo para cada una de las variaciones de potencia ejercidas.

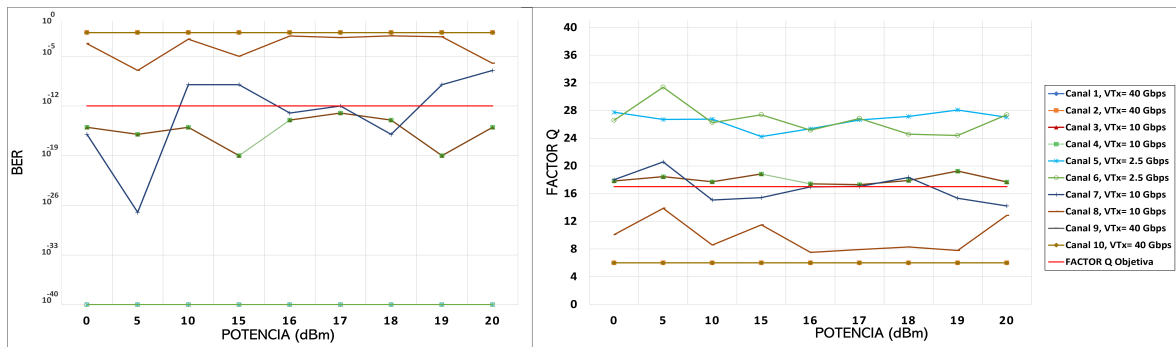


Fig 3.40: BER, Factor Q vs Potencia- Separación 50 GHz

En las figuras 3.41, 3.42, se observan los diagramas de ojo de los canales 193.20 THz, 193.25 THz, para una potencia de transmisión de 0 dBm, los cuales, en su región de marca de unos y ceros (parte superior e inferior del diagrama) exhiben bastante dispersión de datos como consecuencia del ruido presente en la señal y la separación entre canales, en cuanto a la región de la apertura del ojo (centro del diagrama) se muestra que no hay simetría en los cruces de tiempo y amplitud, lo que comprueba que los canales de 40 Gbps no son aptos para una óptima transmisión de información.

En cuanto al espectro óptico, se percibe una deformación de la señal (círculo negro) producto de la separación ejercida, dado que, la proximidad entre los canales genera un aumento en la ISI, la cual, es más perjudicial para el canal 2 (193.25 THz) debido a la interacción de este con los canales de 10 Gbps y 40 Gbps. Cabe resaltar la importancia de la posición relativa en frecuencia, puesto que, el canal 1 al estar ubicado en la frecuencia menor y en el extremo de la grilla espectral presenta un comportamiento mejor que los demás que operan a la misma velocidad de transmisión, sin embargo al observarse que ninguno de los canales de mayor velocidad funcionan adecuadamente con una separación de 50 GHz, no se realiza el análisis de los diagramas y espectro para el resto de estos canales.

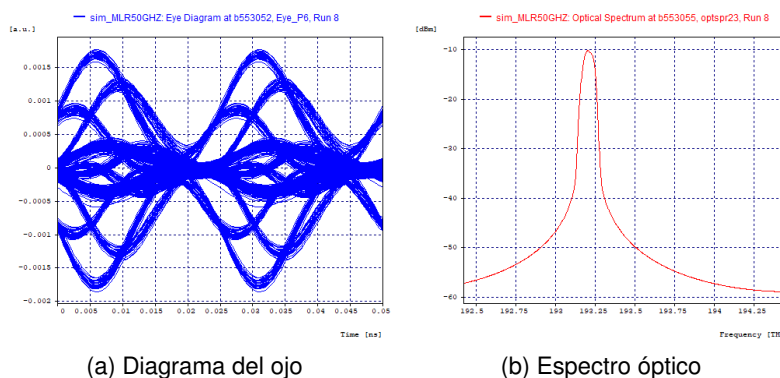


Fig 3.41: Salida modulada para el canal 1 con una potencia de 0 dBm.

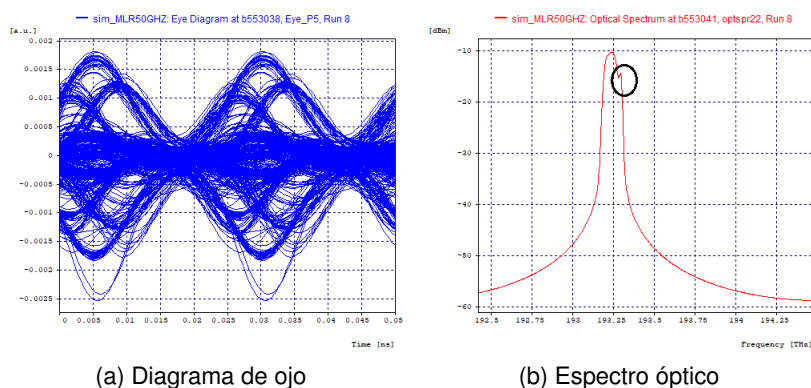


Fig 3.42: Salida modulada para el canal 2 con una potencia de 0 dBm.

En la figura 3.43, se muestra el espectro óptico de los canales en recepción para varios niveles de potencia (0, 5, 10 dBm), donde, se observa que no existe un ensanchamiento de los pulsos, es decir, que no hay presencia del fenómeno SPM. No obstante, la separación entre canal establecida de 50 GHz, genera una afectación mayor al medio debido a la ocupación espectral ocasionada por el esquema de modulación RZ-DPSK hacia los canales adyacentes como RZ-OOK, lo cual, incrementa considerablemente la ICI, siendo más crítico mantener los niveles de calidad definidos.

Se concluye que la proximidad de los canales afecta totalmente el rendimiento de la red, asimismo, para ningún intervalo de potencia se pudo obtener parámetros de calidad adecuados en los canales de 40 Gbps, los cuales son de interés para el presente trabajo de grado, debido a la utilización del formato de modulación avanzado, de este modo, no se realizará el análisis de dispersión para este escenario.

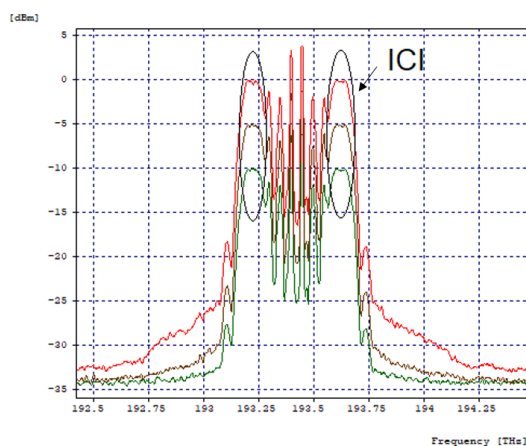


Fig 3.43: Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.

- **Análisis del efecto FWM al variar la potencia con una separación de 25 GHz entre canales.**

Se configuran los 10 canales para una separación de 25 GHz, con el fin de determinar el

comportamiento del sistema frente al aumento en los niveles de potencia y la proximidad aún mayor entre canales.

Como se puede observar en las gráfica 3.44 (Anexo A, tabla 14), no fue posible obtener resultados acordes a los parámetros de calidad establecidos, debido a la ocupación espectral del esquema de modulación RZ-DPSK, el cual, para esta separación entre canal está afectando al formato de modulación básico NRZ-OOK, que en anteriores escenarios había presentado parámetros totalmente idóneos para cada uno de los niveles de potencia. De esta forma, se concluye que el sistema no es capaz de soportar un distanciamiento entre canal de 25 GHz para 10 canales implementados.

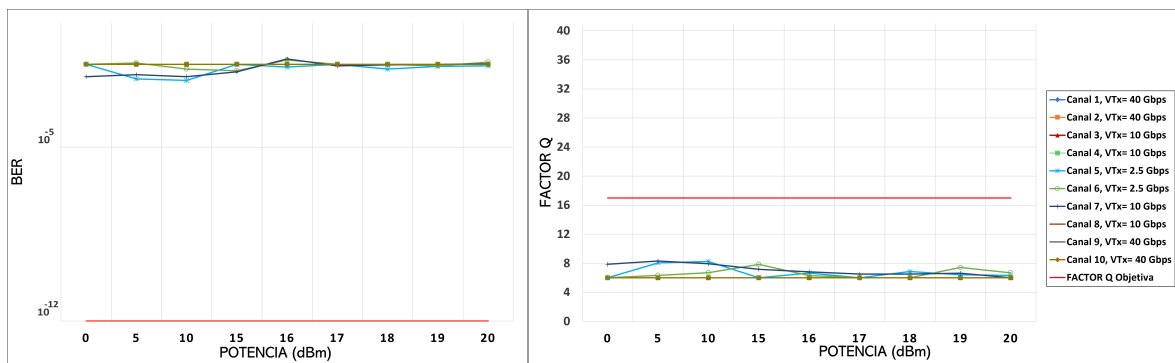


Fig 3.44: BER, Factor Q vs Potencia- Separación 25 GHz

En la figura 3.45, se muestra el espectro óptico de los canales en recepción para varios niveles de potencia (0, 5, 10 dBm), donde, se observan pequeños canales adicionales producto del efecto FWM (círculos azules) y una deformación del espectro del canal a 40 Gbps debido a XPM (círculos negros), los cuales, no generan mayor alteración al sistema, sin embargo, la proximidad de los canales afecta totalmente el rendimiento de la red, razón por la cual, para ningún intervalo de potencia se pudo obtener parámetros de calidad adecuados, de este modo, no se realizará el análisis de dispersión para este escenario.

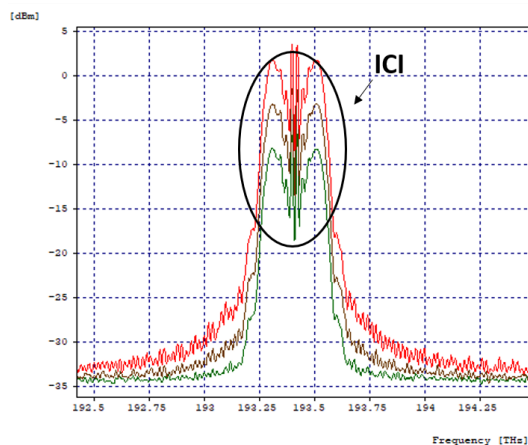


Fig 3.45: Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.

3.1.3. Caso de estudio 3: 2 canales de 2.5 Gbps + 4 canales de 10 Gbps + 6 canales de 40 Gbps.

Para este tercer caso de estudio se toma como referencia el escenario anterior (Caso de estudio 2), adicionando 2 canales de 40 Gbps, con el propósito de observar la influencia de FWM frente al aumento de canales, dado que, es un parámetro importante a considerar si se analiza a detalle este fenómeno. De este manera, se configuran 6 canales externos de 40 Gbps con el esquema de modulación RZ-DPSK, 4 canales de 10 Gbps con RZ-OOK y 2 canales internos de 2.5 Gbps con NRZ-OOK. Además, se define la misma separación entre canal de 100 GHz (0,8 nm), 50 GHz (0,4 nm) y 25 GHz (0,2 nm) considerando la grilla espectral definida para este tipo de redes DWDM según la ITU-T G.694.1 [73], teniendo como frecuencia de referencia (frecuencia del primer canal) de 192.9 THz.

El esquema general del sistema óptico propuesto se puede apreciar en la figura 3.46, donde se implementa un total de 12 canales ópticos cada uno con una tasa de transmisión diferente según el formato de modulación establecido. Los parámetros generales de configuración para este tercer caso de estudio se detallan en la tabla 3.1.

■ Desempeño:

Se procede a analizar el desempeño de la red propuesta mediante los parámetros OPM, medidos para cada canal implementado a una potencia de 0 dBm, estos se presentan en la tabla 3.8, considerando todos los efectos que pueden incidir en el sistema.

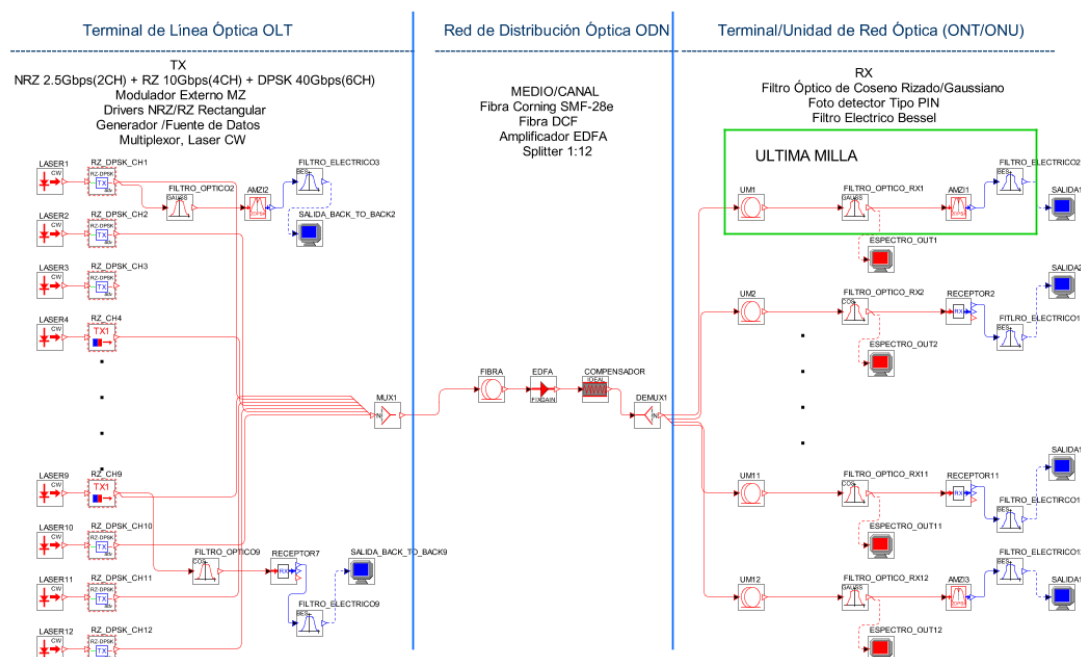


Fig 3.46: Modelo de red Caso 3.

Canal	Velocidad Tx (Gbps)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
1	40	-10.5	1e-40	22.65	47.68	19.50
2	40	-10.42	7e-21	19.37	48.09	19.58
3	40	-10.46	2e-32	21.67	48.36	19.54
4	10	-12.48	1e-40	25.99	51.66	17.52
5	10	-12.46	1e-40	26.05	51.68	17.54
6	2.5	-6.69	1e-40	33.97	54.61	23.31
7	2.5	-6.71	1e-40	37.07	54.48	23.29
8	10	-12.43	1e-40	26.47	51.23	17.57
9	10	-12.25	6e-38	22.40	51.27	17.75
10	40	-10.48	1e-34	21.88	50.07	19.52
11	40	-10.49	1e-19	19.08	49.45	19.51
12	40	-10.56	1e-40	23.38	49.76	19.44

Tabla 3.8: Parámetros OPM.

En las figuras 3.119a y 3.119c, se presenta el espectro óptico para cada una de las etapas de la red con una potencia inicial de 0 dBm, donde se evidencian las frecuencias de los 12 canales implementados. Respecto a la imagen 3.119a, se aprecian pequeños canales adicionales (circulo azul) luego de pasar por la fibra óptica, tal como sucedió en el caso de estudio anterior, no obstante, estas réplicas de onda (FWM) no tienen una amplitud considerable, por lo tanto, no ocasionan distorsiones significativas, tomando en cuenta de que se esta operando a un nivel de potencia bajo, por lo cual, se espera que al incrementar dicho valor, el fenómeno FWM sea más predominante. Además, en este escenario, es importante resaltar la configuración de los 6 canales externos con una capacidad de 40 Gbps, los cuales, no reflejan una afectación en la calidad de la señal debido a su espectro bastante angosto, lo que demuestra el buen funcionamiento del formato de modulación avanzado DPSK. A su vez, se sigue percibiendo (circulo negro) una deformación del espectro del canal externo de 40 Gbps producida por el efecto XPM. Por otro lado, la imagen 3.119c, representa las señales después de pasar por el amplificador EDFA y la rejilla ideal y se observa una disminución efectiva de las degradaciones causadas por el medio de transmisión, además de brindar un nivel de potencia adecuado en cada canal, permitiendo superar la sensibilidad del receptor igual a -30 dBm, lo que garantiza la correcta transmisión de la información.

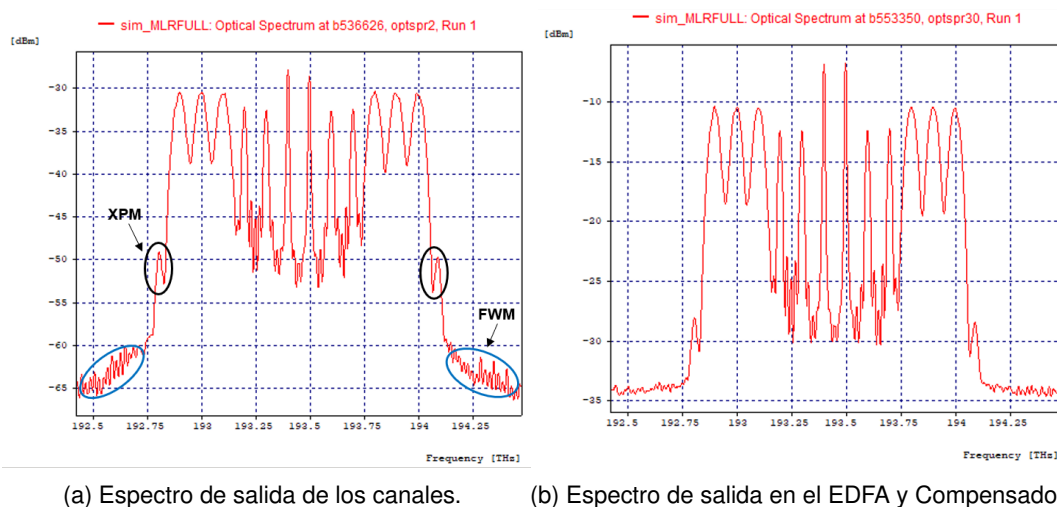


Fig 3.47: Espectro en diferentes etapas de la red.

- **Análisis del efecto FWM al variar la potencia con una separación de 100 GHz entre canales.**

Se configuran los 12 canales espaciados entre sí por 100 GHz, con el fin de determinar el comportamiento del sistema frente al aumento de los niveles de potencia. Las gráficas obtenidas de BER y factor Q del tercer caso de estudio bajo esta condición, se muestran en la figura 3.48 (Anexo A, tabla 15), donde se observa que los valores obtenidos en los parámetros de monitoreo óptico para los canales de 40 Gbps (1, 2, 3, 10, 11, 12) con el esquema de modulación RZ-DPSK son adecuados hasta una potencia límite de 17 dBm, debido a que presentan una BER de 1^{-12} , 9^{-12} , 5^{-13} , 4^{-12} , 7^{-13} , 1^{-14} con un factor Q de 16.98 dB, 16.55 dB, 17.24 dB, 16.73 dB, 17.05 dB y 16.67 dB respectivamente, que están por encima de los criterios de calidad establecidos. Sin embargo, se visualiza que uno de los canales más afectados es el 9 con una velocidad de transmisión de 10 Gbps, esto debido a la influencia que están obteniendo de los canales adyacentes y su posición relativa en frecuencia dentro del rango establecido en la grilla espectral, puesto que, los canales (4,5,8) con la misma tasa de transmisión tienen una respuesta mejor. Por otro lado, los canales 6 y 7 con una baja tasa de transmisión muestran un comportamiento totalmente idóneo para cada una de las variaciones de potencia ejercidas, dado que, el formato de modulación avanzado tiene un espectro óptico mucho más angosto, por lo cual, evita la interferencia a los canales adyacentes para este tipo de espaciamiento.

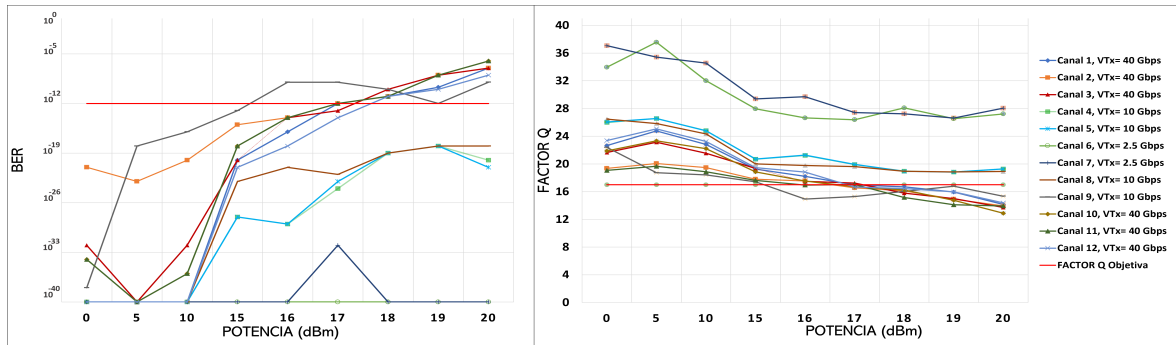


Fig 3.48: BER, Factor Q vs Potencia- Separación 100 GHz

En la figura 3.49, se observa el diagrama de ojo de los canales con frecuencias de 192.9 THz, 193.0 THz, 193.1 THz, 193.8 THz, 193.9 THz y 194.0 THz, para la potencia de transmisión de 17 dBm, las cuales, en su región de marca de unos y ceros (parte superior e inferior del diagrama) exhibe dispersión de datos como consecuencia del ruido presente en la señal, en la región de la apertura del ojo (centro del diagrama) se muestra simetría en los cruces de tiempo, por lo que la dispersión cromática no está siendo un factor determinante.

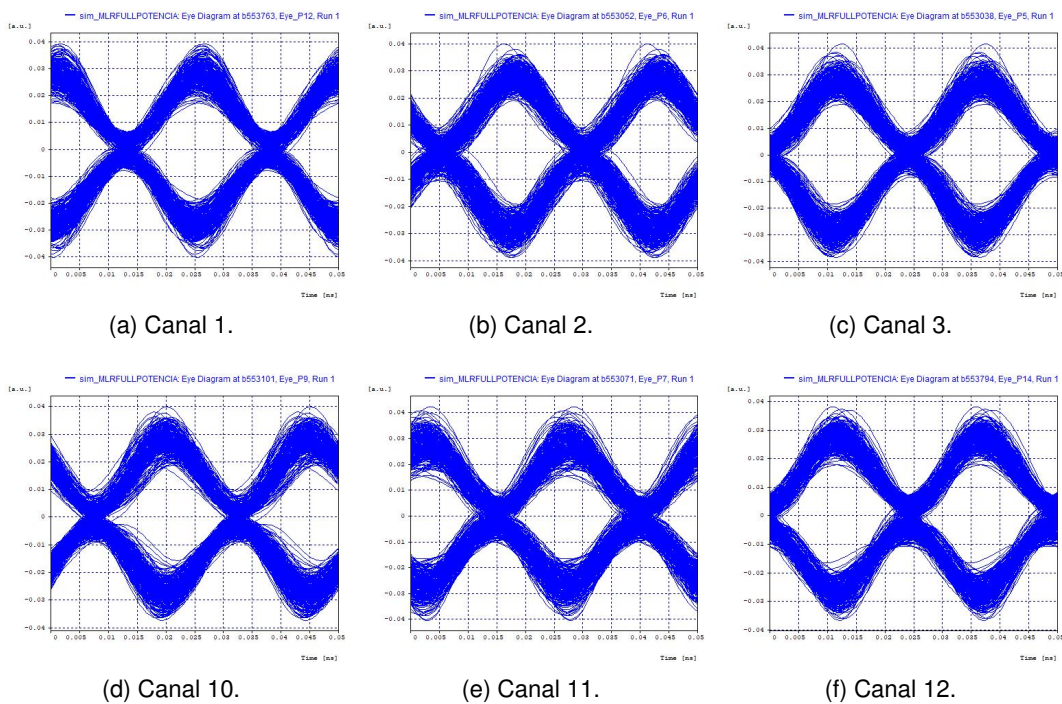


Fig 3.49: Salida modulada para los canales de 40 Gbps- Potencia 17 dBm.

En la figura 3.50, se muestra el espectro óptico de los canales en recepción para varios niveles de potencia (0, 10, 15, 17 dBm), donde, en primer lugar se observa que no existe un ensanchamiento de los pulsos, es decir, que no hay presencia del fenómeno SPM, sin embargo, se sigue percibiendo una deformación del espectro de los canales para cada uno de los niveles de potencia producto de XPM (circulo negro), en especial para el canal 1 y

12, correspondientes a los canales externos de la red. No obstante, el efecto no lineal predominante es FWM, tal como se muestra en los círculos azules, puesto que, en el espectro de salida se generan pulsos diferentes a los transmitidos, los cuales coinciden con los canales originales produciendo pérdida de la información, además se nota un aumento en la amplitud en estos canales parásitos, al aumentar la potencia, lo cual reafirma la importancia de una correcta elección de la potencia en transmisión.

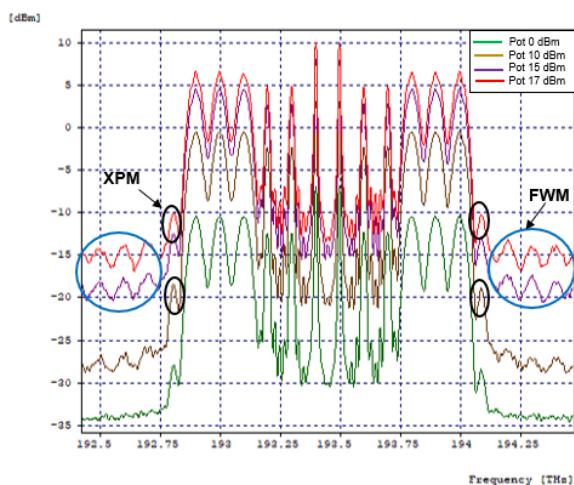


Fig 3.50: Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.

■ **Análisis del efecto FWM al variar la dispersión con diferentes niveles de potencia.**

Para el segundo análisis, se hace la variación de la dispersión cromática de la fibra SMF-28 Corning manteniendo fijo los niveles de potencia, de este modo, se define un rango desde 0 a 16 ps/nm*km. En las figuras 3.51, 3.52, 3.53, se muestra el comportamiento del enlace frente a la variación del coeficiente de dispersión de la fibra para las potencias de 0, 10 y 17 dBm (Anexo A, tablas 16, 17, 18).

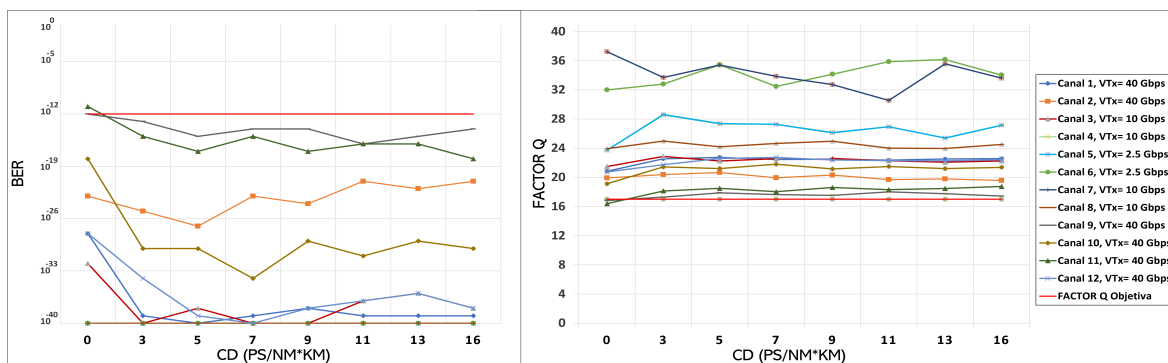


Fig 3.51: BER, Factor Q vs CD-Separación 100 GHz-Potencia 0 dBm

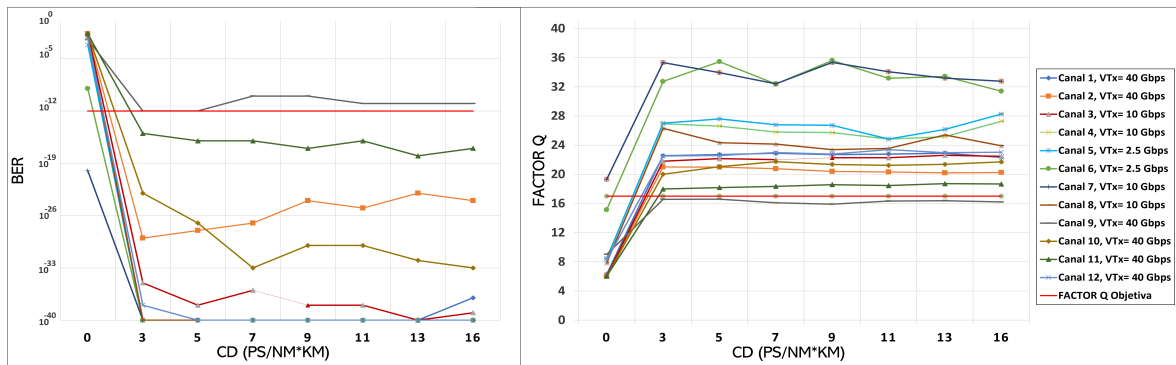


Fig 3.52: BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 10dBm

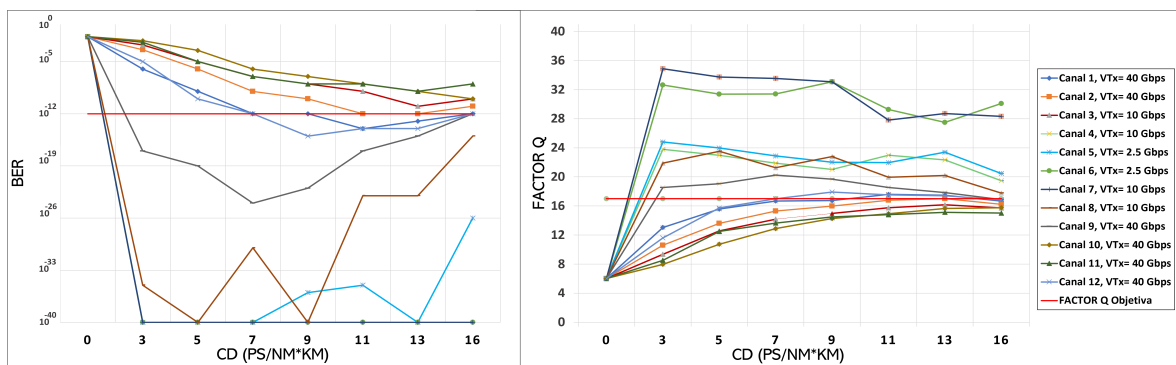


Fig 3.53: BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 17dBm

En las imágenes anteriores se observa que para niveles de potencia superiores a 0 dBm, los canales configurados presentan una respuesta deficiente cuando se encuentran por debajo de los 3 ps/nm*km, no obstante, a medida que se hace un aumento gradual del coeficiente de dispersión, el sistema empieza a estar acorde a los niveles de umbral definidos. En cuanto a la potencia límite de 17 dBm, se visualiza que los canales que mejor desempeño presentan son el 6 y 7, correspondientes a la menor velocidad de transmisión, mientras que el resto de canales necesitan de al menos 13 ps/nm*km para alcanzar los parámetros de calidad adecuados.

En la figura 3.54, se destaca la degradación que presenta el sistema cuando se establece una dispersión nula (línea verde), puesto que, determinar una fibra óptica con 0 de coeficiente de dispersión, aumenta considerablemente todos los efectos no lineales, incluso, para niveles altos de intensidad es más notoria la influencia de tener niveles bajos de dispersión. De esta manera, se concluye que para el esquema de modulación RZ-DPSK, la variación de los niveles de dispersión influye en el aumento del fenómeno FWM, presentando valores adecuados solamente cuando la dispersión está en un rango mayor de 3 ps/nm*km y en algunos casos solamente cuando esta es igual a 16 ps/nm*km.

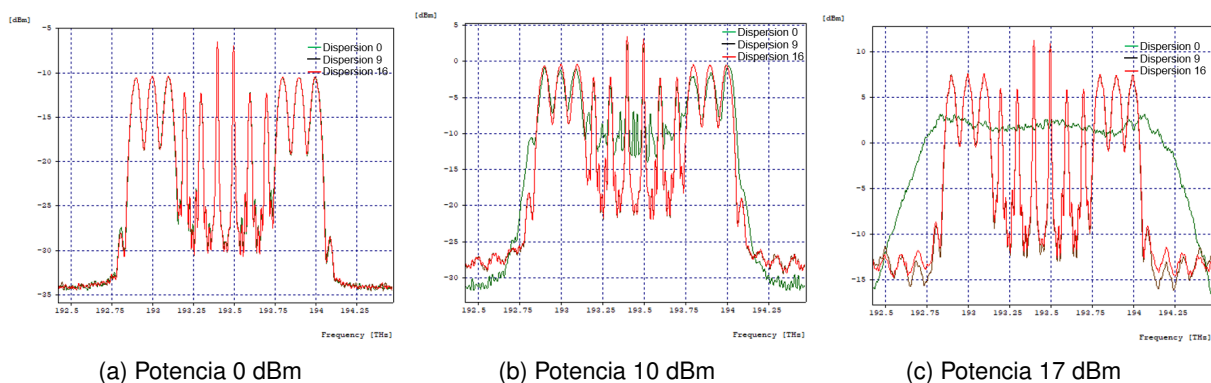


Fig 3.54: Variación del coeficiente de dispersión.

■ **Análisis del efecto FWM al variar la potencia con una separación de 50 GHz entre canales.**

Se configuran los 12 canales para una separación de 50 GHz, con el fin de determinar el comportamiento del sistema frente al aumento de potencia.

De esta manera, en la figura 3.55 (Anexo A, tabla 19) se observa el desempeño de los canales, analizando que ninguno de los que operan a 40 Gbps soporta este espaciado, sin importar que se esté simulando con una potencia pequeña de 0 dBm, lo que indica que el esquema de modulación RZ-DPSK no es lo suficientemente robusto en sistemas de alta velocidad que necesiten emplear separaciones entre canales menores a 100 GHz. De igual manera que para análisis anteriores, se visualiza que el canal 9 es el más perjudicado por la anchura espectral de la modulación elegida, puesto que, los otros canales que cuentan con la misma velocidad implementada exponen mejores parámetros de BER y factor Q en cada intervalo de potencia. Por último, los canales 6 y 7 (2.5 Gbps) siguen entregando un comportamiento eficaz para cada una de las variaciones de potencia ejercidas.

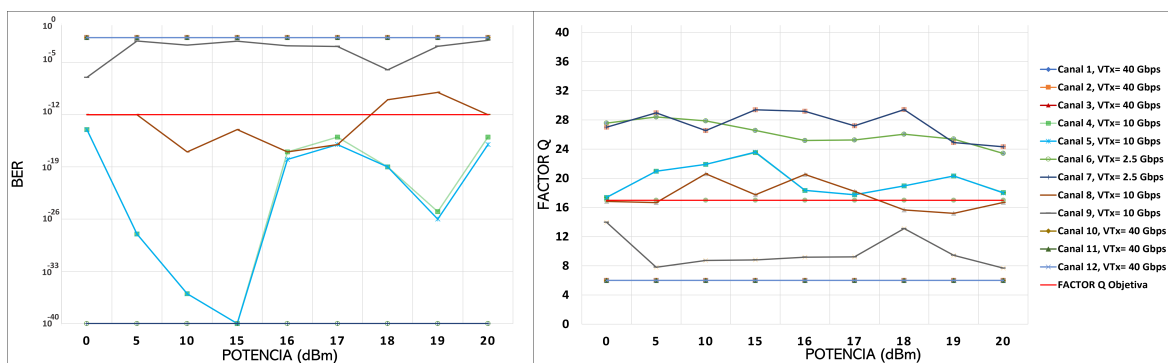


Fig 3.55: BER, Factor Q vs Potencia- Separación 50 GHz

En las figura 3.56 se observan los diagramas de ojo de los canales 193.15 THz, 193.20 THz y 193.25 THz, para una potencia de transmisión de 0 dBm, los cuales, en su región de

marca de unos y ceros (parte superior e inferior del diagrama) exhiben bastante dispersión de datos como consecuencia del ruido presente en la señal y la separación entre canales, en cuanto a la región de la apertura del ojo (centro del diagrama) se muestra que no hay simetría en los cruces de tiempo y amplitud, lo que comprueba que los canales de 40 Gbps no son aptos para una óptima transmisión de información.

En cuanto al espectro óptico (Figura 3.57), en el canal 3, se percibe una deformación de la señal (círculo negro) producto de la separación ejercida, dado que, la proximidad entre los canales genera un aumento en la ISI, la cual, es más perjudicial para este canal (193.25 THz) debido a la interacción de este con los canales de 10 Gbps y 40 Gbps. Cabe resaltar la importancia de la posición relativa en frecuencia, puesto que, el canal 1 al estar ubicado en la frecuencia menor y en el extremo de la grilla espectral presenta un comportamiento mejor que los demás que operan a la misma velocidad de transmisión, sin embargo al observarse que ninguno de los canales de mayor velocidad funcionan adecuadamente con una separación de 50 GHz, no se realiza el análisis de los diagramas y espectro para el resto de estos canales.

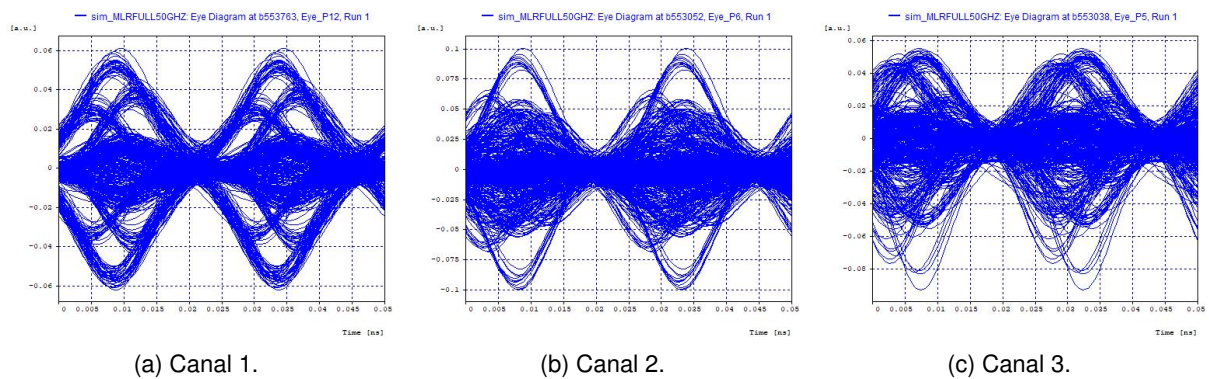


Fig 3.56: Salida modulada para los canales de 40 Gbps.

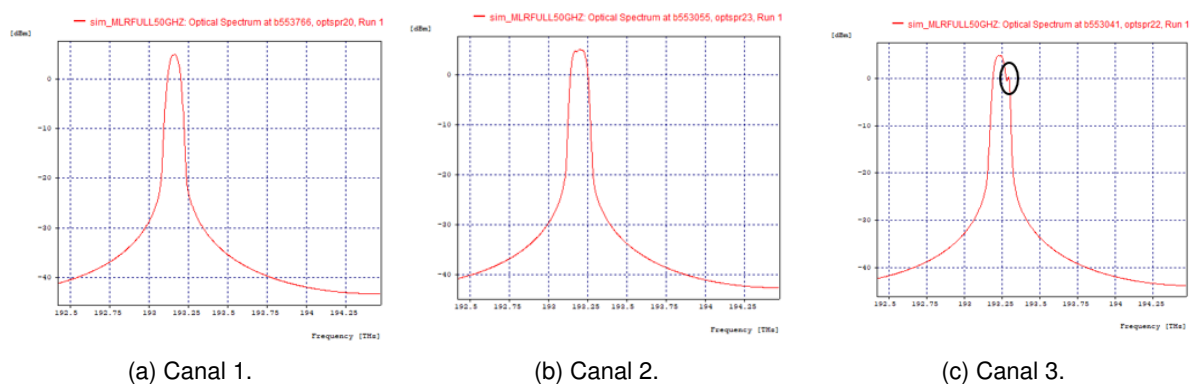


Fig 3.57: Espectro óptico en recepción en los canales de 40 Gbps.

En la figura 3.58, se muestra el espectro óptico de los canales en recepción para varios

niveles de potencia (0, 5, y 10 dBm), donde, se muestra el espectro óptico de los canales en recepción para varios niveles de potencia (0, 5, 10 dBm), aquí se observa que no existe un ensanchamiento de los pulsos, es decir, que no hay presencia del fenómeno SPM. No obstante, la separación entre canal establecida de 50 GHz, genera una afectación mayor al medio debido a la ocupación espectral ocasionada por el esquema de modulación RZ-DPSK hacia los canales adyacentes como RZ-OOK, lo cual, incrementa considerablemente la ICI, siendo más crítico mantener los niveles de calidad definidos.

Se concluye que la proximidad de los canales afecta totalmente el rendimiento de la red, asimismo, para ningún intervalo de potencia se pudo obtener parámetros de calidad adecuados en los canales de 40 Gbps, los cuales son de interés para el presente trabajo de grado, debido a la utilización del formato de modulación avanzado, de este modo, no se realizará el análisis de dispersión para este escenario.

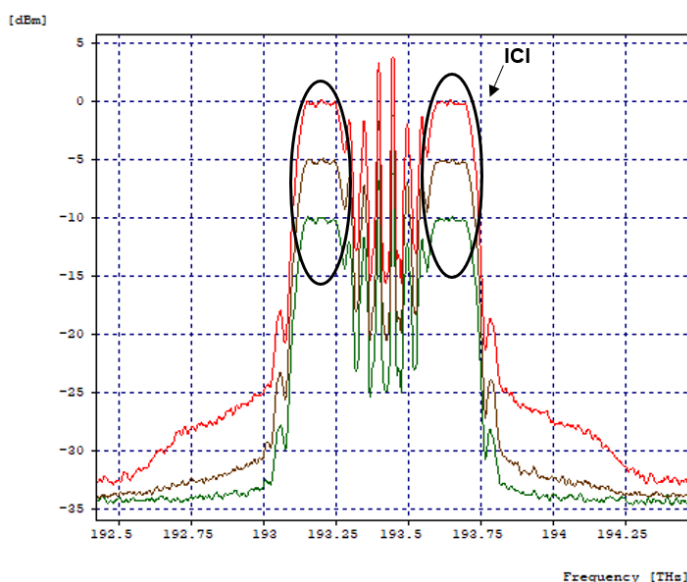


Fig 3.58: Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.

■ **Análisis del efecto FWM al variar la potencia con una separación de 25 GHz entre canales.**

Se configuran los 12 canales para una separación de 25 GHz, con el fin de determinar el comportamiento del sistema frente al aumento en los niveles de potencia y la proximidad aún mayor entre canales.

Como se puede observar en las gráfica 3.59 (Anexo A, tabla 20), no fue posible obtener resultados acordes a los parámetros de calidad establecidos, debido a la ocupación espectral del esquema de modulación RZ-DPSK, el cual, para esta separación entre canal está afectando al formato de modulación básico NRZ-OOK, que en anteriores escenarios había presentado parámetros totalmente idóneos para cada uno de los niveles de potencia. De

esta forma, se concluye que el sistema no es capaz de soportar un distanciamiento entre canal de 25 GHz para 10 canales implementados.

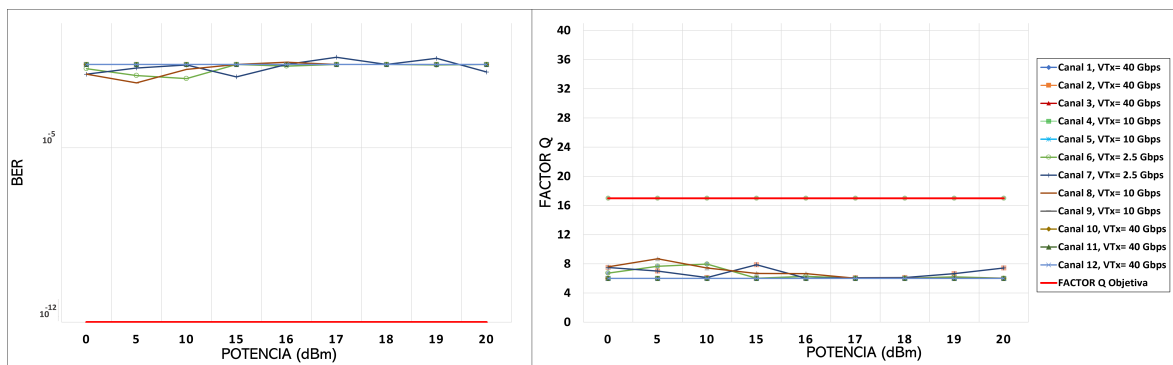


Fig 3.59: BER, Factor Q vs Potencia- Separación 25 GHz

En la figura 3.60, se muestra el espectro óptico de los canales en recepción para varios niveles de potencia (0, 5, 10 dBm), donde, se observan pequeños canales adicionales producto del efecto FWM (círculos azules) y una deformación del espectro del canal a 40 Gbps debido a XPM (círculos negros), los cuales, no generan mayor alteración al sistema, sin embargo, la proximidad de los canales afecta totalmente el rendimiento de la red, razón por la cual, para ningún intervalo de potencia se pudo obtener parámetros de calidad adecuados, de este modo, no se realizará el análisis de dispersión para este escenario.

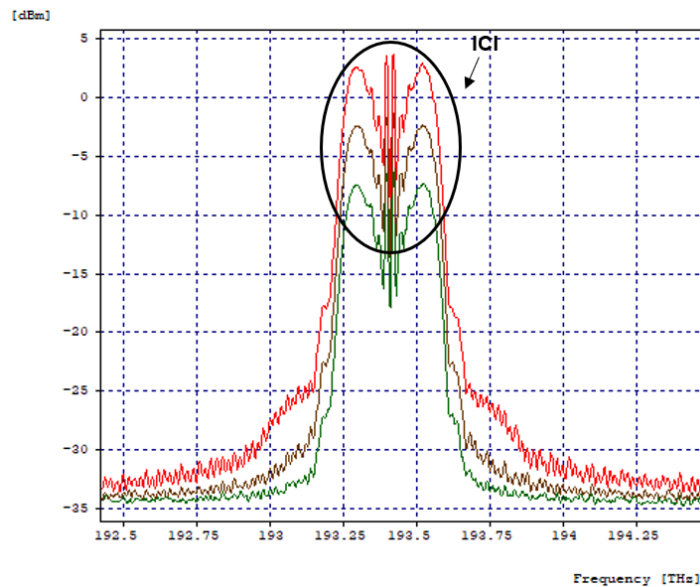


Fig 3.60: Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.

3.2. ESCENARIO 2, RED MLR BASADA EN FORMATOS DE MODULACIÓN NRZ-OOK, RZ-OOK Y RZ-DQPSK

Para el desarrollo de los siguientes escenarios de simulación, se hace uso del esquema de modulación RZ-DQPSK, el cual, es capaz de soportar grandes tasas de transmisión con una alta eficiencia espectral, por lo tanto, para los canales de 40 Gbps se implementa la modulación RZ-DQPSK, manteniendo los parámetros objetivos definidos anteriormente. Asimismo, el formato de modulación avanzado RZ-DQPSK presenta un espectro óptico más estrecho, permitiendo un espaciamiento entre canal mucho menor, además, es altamente tolerante frente a la dispersión Cromática [14]. Por otro lado, para las velocidades de transmisión de 2.5 Gbps y 10 Gbps se seguirá haciendo uso los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-OOK respectivamente, con el propósito de hacer un análisis comparativo con respecto al formato de modulación avanzado RZ-DPSK implementado en el escenario anterior.

Los parámetros generales de configuración para este escenario de simulación se detallan en la tabla 3.9.

Parámetros	Valor
Número De Canales Inicial en la OLT	6-10-12
Potencia De Láser Inicial	0 dBm
Longitud De Onda	1550 nm
Tipo de Fibra Óptica	Corning SMF-28e
Compensación DCF	Ideal
Amplificación EDFA	20 dB
Longitud del Enlace	100km
Esquema De Modulación a 2.5 Gbps	NRZ-OOK
Esquema De Modulación a 10 Gbps	RZ-OOK
Esquema De Modulación a 40 Gbps	RZ-DQPSK

Tabla 3.9: Parámetros generales- Escenario 2

3.2.1. Caso de estudio 4: 2 canales de 2.5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 2 canales de 40 Gbps.

Para este cuarto caso de estudio se realizó el montaje de 2 canales externos de 40 Gbps con el esquema de modulación RZ-DQPSK, 2 canales de 10 Gbps con RZ-OOK y 2 canales internos de 2.5 Gbps con NRZ-OOK partiendo del esquema general elaborado en el anterior capítulo. Además, se define una separación entre canal de 100 GHz (0,8 nm), 50 GHz (0,4 nm) y 25 GHz (0,2 nm) considerando la grilla espectral para este tipo de redes DWDM según la ITU-T G.694.1 [73], de este modo, las frecuencias asignadas son las mis-

mas que se utilizaron para el caso de estudio 1 y se muestran en la tabla 3.2.

De la misma forma que para los casos anteriores, se debe tratar de garantizar únicamente la presencia del efecto FWM en la red MLR-DWDM, con el propósito de estudiar adecuadamente dicho fenómeno. Sin embargo, para realizar el análisis comparativo de los esquemas de modulación avanzado RZ-DPSK y RZ-DQPSK, se deben establecer las mismas configuraciones obtenidas del caso de estudio 1. Por lo tanto, se determina la misma longitud del enlace de 100km y el amplificador EDFA con una ganancia fija de 20 dB. En la figura 3.61, se observa el Back to Back de los espectros ópticos en transmisión y en la figura 3.62, se visualizan los niveles de potencia de los primeros tres canales de la red (1, 2 y 3), puesto que, al considerar las pérdidas por atenuación, el sistema muestra una simetría en los resultados obtenidos con los otros canales (4, 5 y 6), de este modo, los niveles de intensidad están acorde a los de transmisión, lo que permite comprobar la disminución de la atenuación debido a la implementación del amplificador EDFA.

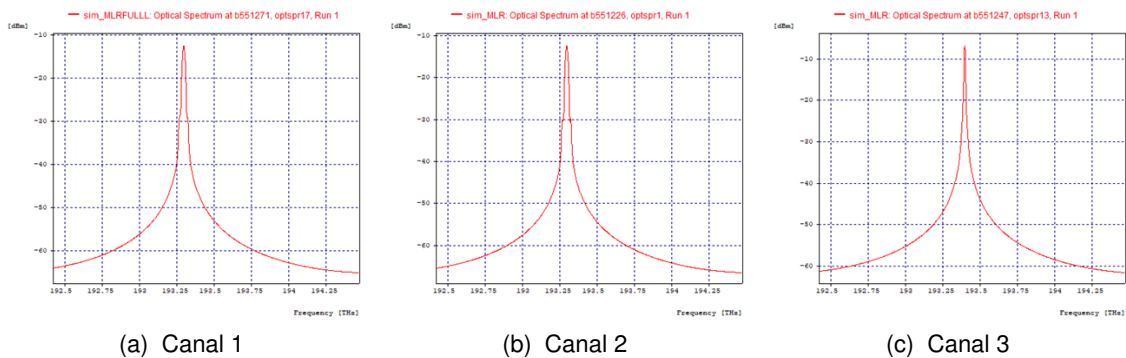


Fig 3.61: Espectro óptico en transmisión.

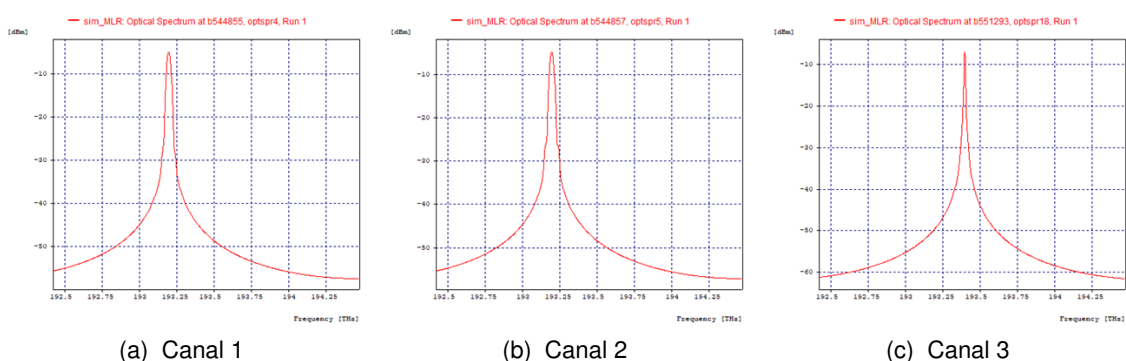


Fig 3.62: Espectro óptico en recepción.

En la figura 3.63, se aprecia el Back to Back de los diagramas de ojo en transmisión de los canales 1, 2 y 3, que servirán de referencia para el estudio posterior de los canales frente a las degradaciones presentes en el medio. Luego, se obtienen los diagramas de ojo en recepción, tal como se muestra en la imagen 3.64, en las cuales, en su región de marcas

de unos y cerros se evidencia los niveles de pulso acordes a los de transmisión, indicando una disminución considerable de la atenuación.

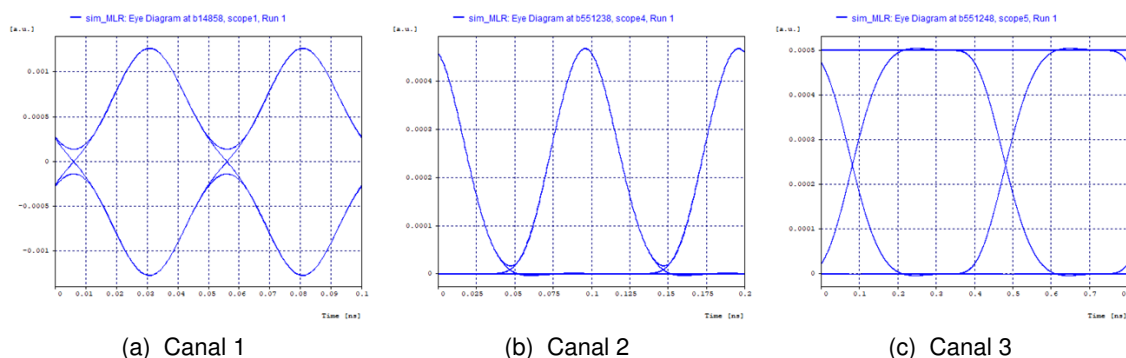


Fig 3.63: Diagramas de ojo en transmisión.

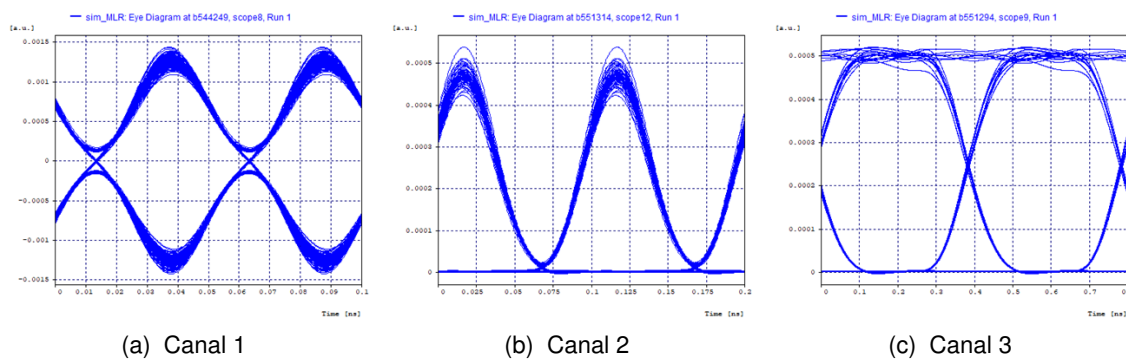


Fig 3.64: Diagramas de ojo en recepción.

Del mismo modo, se procede a compensar de manera ideal al 100% mediante el módulo “Ideal Fiber Grating”, suministrado por la herramienta en Post-Compensación, además, se desactiva a nivel de la fibra óptica la PMD en modo “off” para que no tenga incidencia en el sistema.

El esquema general del sistema óptico propuesto se puede apreciar en la figura 3.65, donde se implementa un total de 6 canales ópticos cada uno con una tasa de transmisión diferente según el formato de modulación establecido.

En la figura 3.66 se observan los bloques de transmisión del esquema de modulación RZ-DQPSK, el cual, dispone de un láser de emisión continua, un divisor de potencia para separar la luz en dos caminos de igual intensidad, además, dos MZM como moduladores de fase y en uno de estos se dispone de un conmutador óptico de fase de $\pi/2$, al final un acoplador produce la señal de salida, en esta configuración se obtiene desplazamientos de fase en π , independiente de las perturbaciones de la señal de polarización [76].

DQPSK presenta una mejor eficiencia espectral, siendo más tolerante frente a la PMD y CD, incluso, tiene un espectro óptico más estrecho comparado con la modulación DPSK permitiendo tener un distanciamiento entre canal menor con resultados adecuados. No obstante, el diseño del transmisor tiene un nivel de complejidad mayor, ya que requiere de dos moduladores de fase y uno de intensidad [14].

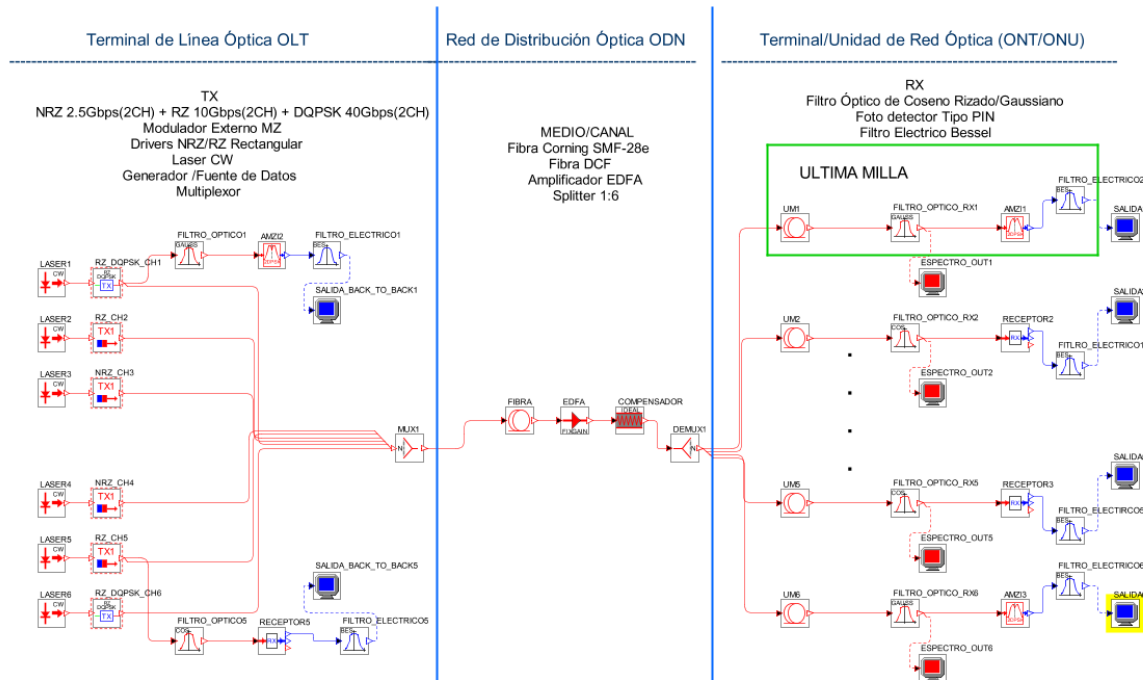


Fig 3.65: Modelo de red Caso 4.

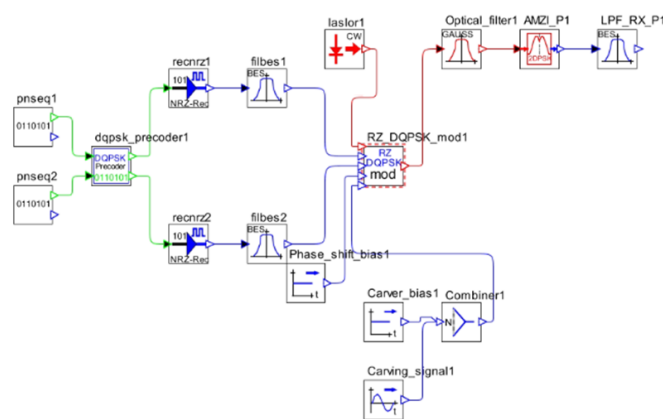


Fig 3.66: Bloque de transmisión para canales de 40 Gbps Gbps (RZ-DQPSK)

■ **Desempeño:**

Se procede a analizar el desempeño de la red propuesta. Por lo cual, se obtienen los diagramas del ojo en recepción de todos los canales, como se indica en la figura 3.67, y otros

datos referentes a los parámetros OPM considerando los efectos que pueden incidir en la transmisión (*VBS Full*), tal como se observa en la tabla 3.10.

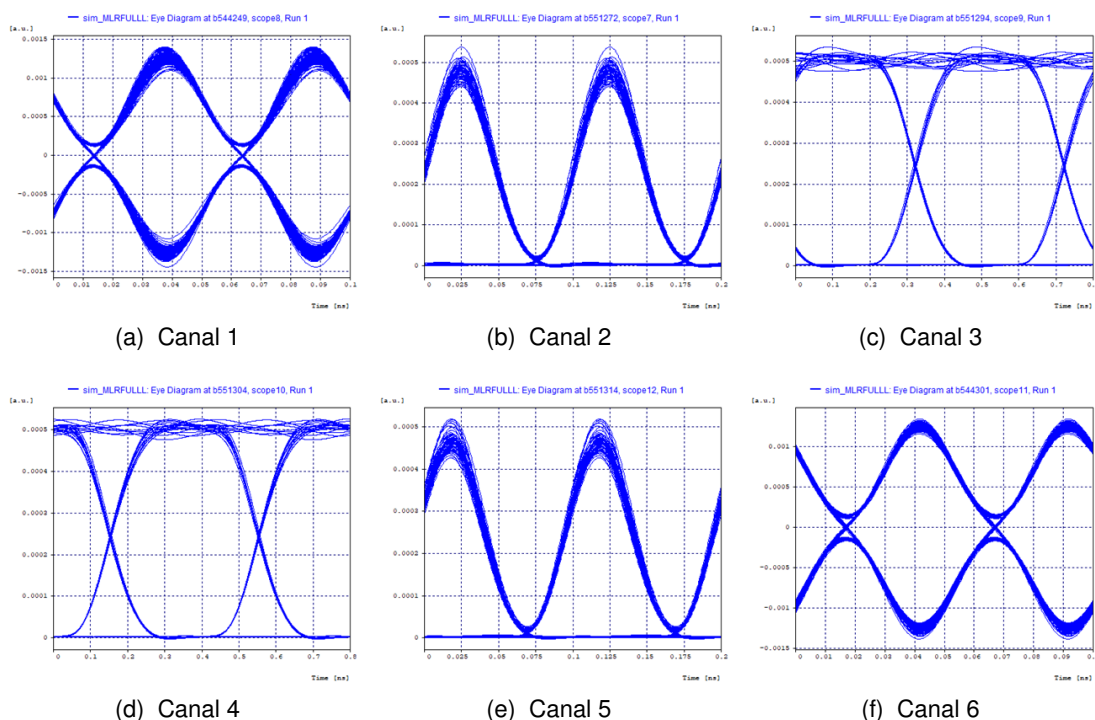


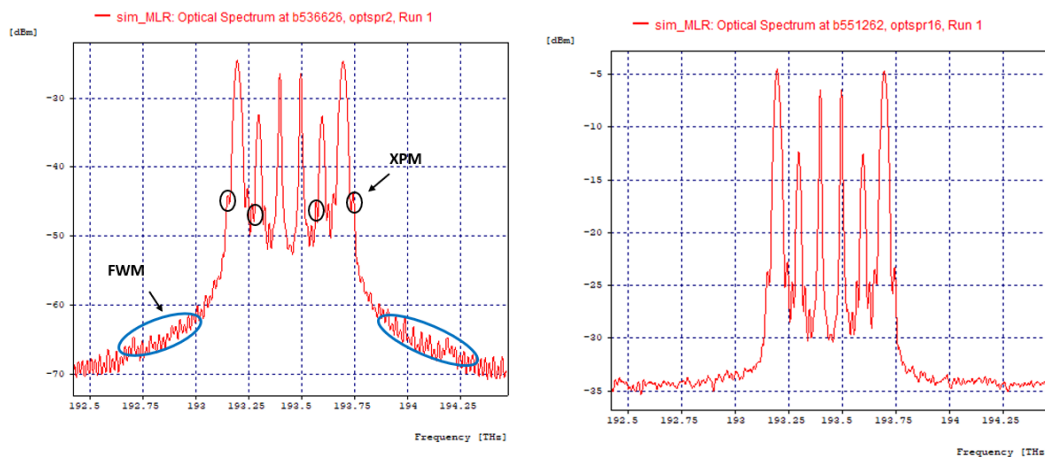
Fig 3.67: Diagramas de ojo en recepción.

Canal	Velocidad Tx (Gbps)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
1	40	-4.58	1e-40	29.08	51.90	25.41
2	10	-12.41	1e-40	27.79	52.13	17.58
3	2.5	-6.62	1e-40	34.84	54.32	23.37
4	2.5	-6.55	1e-40	34.34	54.62	23.44
5	10	-12.41	1e-40	26.73	53.15	17.58
6	40	-4.47	1e-40	30.85	52.58	25.27

Tabla 3.10: Parámetros OPM.

En las figuras 3.68a y 3.68b, se presenta el espectro óptico para cada una de las etapas de la red con la potencia inicial de 0 dBm, donde se evidencian las frecuencias de los 6 canales implementados. Con respecto a la imagen 3.68a, se aprecian pequeños canales adicionales (círculo azul) luego de pasar por la fibra óptica, tal como sucedió en el escenario anterior, los cuales, son producto de la coincidencia de fase de las señales transmitidas, es decir, el fenómeno FWM. Estas señales de onda “fantasmas” pueden generar altas degradaciones ópticas a medida que se aumente la potencia debido a que serán fácilmente

detectadas por el receptor. No obstante, el esquema de modulación RZ-DQPSK muestra un espectro mucho más estrecho, permitiendo aproximar los canales a una distancia de separación inferior, sin afectar la calidad de la señal de los canales adyacentes. Además, se sigue percibiendo (circulo negro) una deformación del espectro del canal de 40 Gbps producida por el efecto XPM. Por otro lado, en la ilustración 3.68b, que representan el uso del amplificador EDFA y la compensación ideal mediante el módulo “Ideal Fiber Grating” respectivamente, indican una disminución efectiva de las degradaciones causadas por el medio de transmisión, además de un nivel de potencia adecuado en cada canal.



(a) Espectro de salida en la fibra óptica. (b) Espectro de salida en el EDFA y Compensador

Fig 3.68: Espectro en diferentes etapas de la red.

■ **Análisis del efecto FWM al variar la potencia con una separación de 100 GHz entre canales.**

Se configuran los 6 canales espaciados entre sí por 100 GHz, con el fin de determinar el comportamiento del sistema frente al aumento de los niveles de potencia. Las gráficas obtenidas de BER y factor Q del cuarto caso de estudio bajo esta condición, se muestran en la figura 3.69.

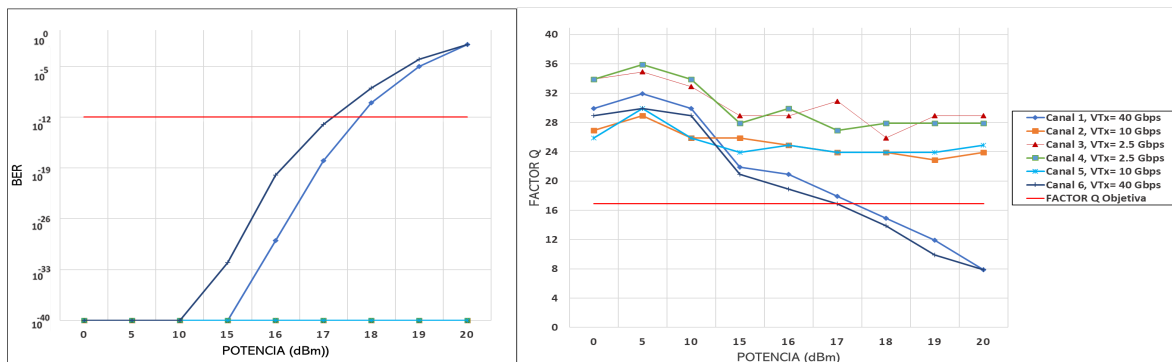


Fig 3.69: BER, Factor Q vs Potencia - Separación 100 GHz

Como se puede observar en las gráficas anteriores (Anexo A, tabla 21), los valores ob-

tenidos en los parámetros de monitoreo óptico para los canales 1 y 6 con el esquema de modulación RZ-DQPSK son adecuados hasta una potencia límite de 17 dBm, debido a que presenta una BER de 9^{-18} , 4^{-13} , con un factor Q de 18.72, 17.30 cada uno por encima de los criterios de calidad establecidos. Sin embargo, con respecto a los demás canales (2, 3, 4, 5) muestran un comportamiento totalmente idóneo para cada una de las variaciones de potencia ejercidas, dado que, el formato de modulación avanzado tiene un espectro óptico mucho más angosto, por lo cual, evita la interferencia a los canales adyacentes para este tipo de espaciamiento. Cabe de notar, que los resultados obtenidos por los diferentes canales a través del mismo medio no se comportan de manera similar (Anexo A, tabla 21), debido a la influencia en la posición relativa de la frecuencia, donde la fibra óptica responde de manera diferente a cada una de las longitudes de onda que viajan con diferentes velocidades, como ocurre con los canales 1 y 6 con una tasa de transmisión de 40 Gbps distribuidos en los extremos de la red, donde muestra un mejor desempeño cuando tiene una menor frecuencia (192.2 THz) y una baja respuesta cuando está posicionado en una frecuencia alta (192.7 THz), de este modo, así estén configurados de la misma forma su comportamiento es distinto.

En la figura 3.70, se observa el espectro óptico y diagrama de ojo del canal 193.2 THz y 193.7 THz para las potencias de transmisión de 17 dBm, las cuales, en su región de marca de unos y ceros (parte superior e inferior del diagrama) exhibe dispersión de datos como consecuencia del ruido presente en la señal, en la región de la apertura del ojo (centro del diagrama) se muestra simetría en los cruces de tiempo, por lo que la dispersión cromática no está siendo un factor determinante.

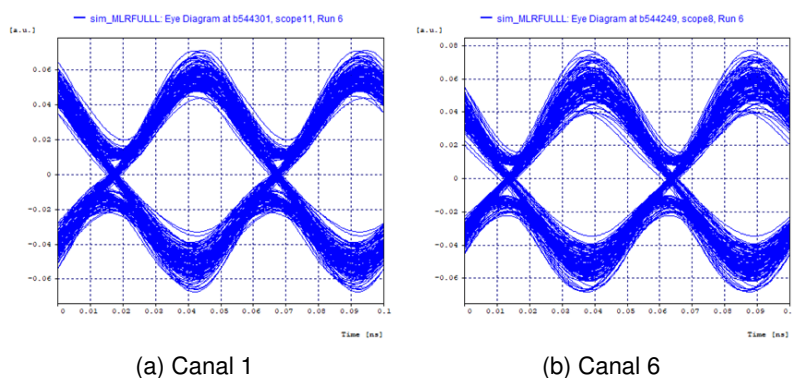


Fig 3.70: Diagrama de ojo en recepción- Potencia 17 dBm.

En la figura 3.71, se muestra el espectro óptico de los canales en recepción para varios niveles de potencia (0, 10, 15, 17 dBm), donde, se observa primeramente que no existe un ensanchamiento de los pulsos, es decir, que no hay presencia del fenómeno SPM, sin embargo, se percibe una deformación del espectro de los canales para cada uno de los niveles de potencia producto de XPM (círculo negro). No obstante, el efecto no lineal predominante es FWM, tal como se muestra en los círculos azules, puesto que, en el espectro

de salida se generan pulsos diferentes a los transmitidos, los cuales coinciden con los canales originales produciendo pérdida de la información. Además, a medida que aumentan los niveles de potencia, las ondas “fantasmas” son más prolongadas causando problemas de recepción y disminuyendo los parámetros OPM de calidad establecidos, como sucedió a partir de la potencia de 17 dBm (Canal 1 y 6) con respecto a la modulación RZ-DQPSK para este escenario.

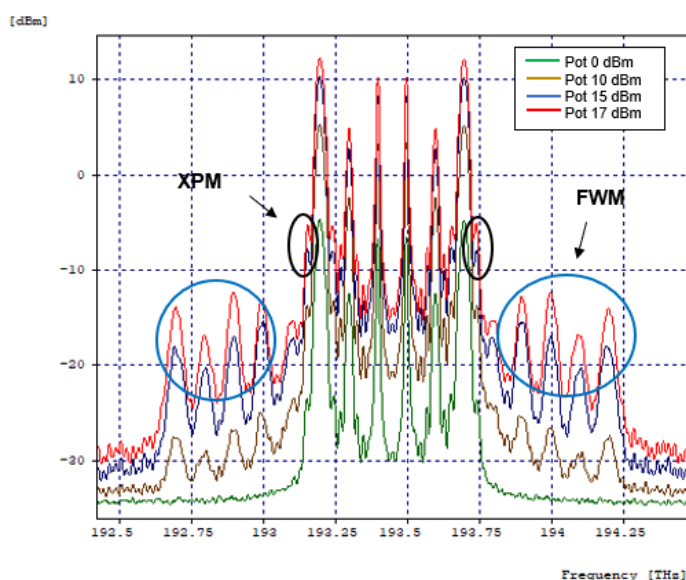


Fig 3.71: Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.

■ Análisis del efecto FWM al variar la dispersión con diferentes niveles de potencia.

Para el segundo análisis, se hace la variación de la dispersión cromática de la fibra SMF-28 Corning manteniendo fijo los niveles de potencia, de este modo, se define un rango desde 0 a 16 ps/nm*km.

En las figuras 3.72 a 3.74, se muestra el comportamiento del enlace frente a la variación del coeficiente de dispersión de la fibra para las potencias de 0, 10 y 17 dBm (Anexo A, tabla 22, 23 Y 24).

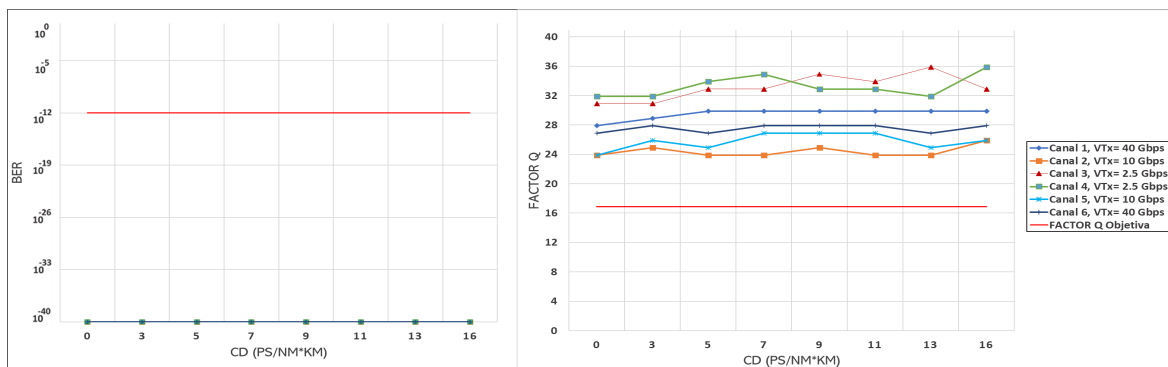


Fig 3.72: BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 0 dBm

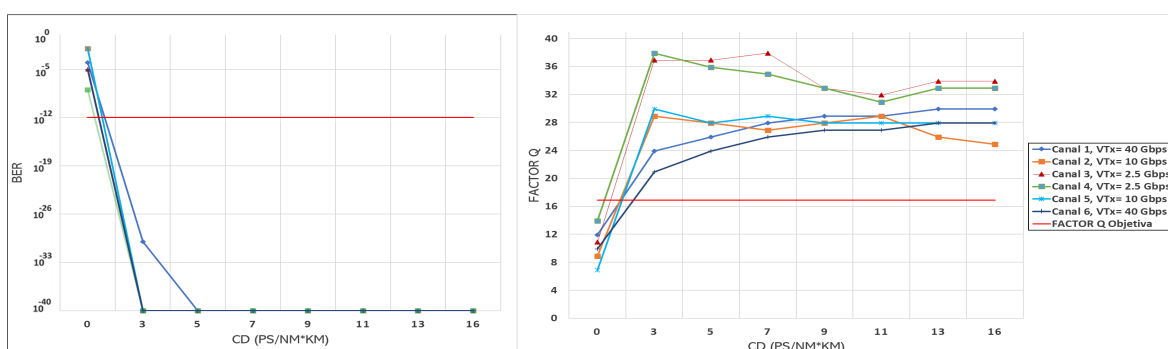


Fig 3.73: BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 10dBm

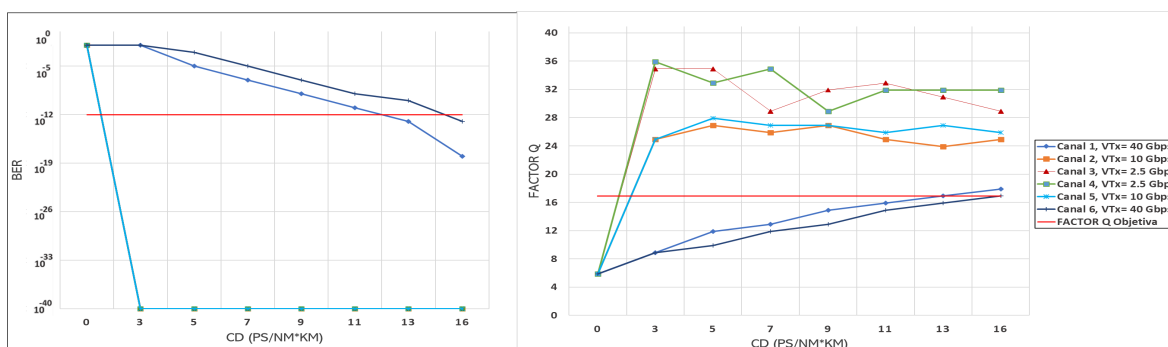


Fig 3.74: BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 17dBm

Con respecto a las figuras anteriores (Anexo A, tabla 22, 23 y 24), para los niveles de potencia superiores a 0 dBm, los canales configurados presentan una respuesta deficiente cuando se encuentran por debajo de los 5 ps/nm²km, no obstante, a medida que se hace un aumento gradual de la dispersión el sistema empieza a estar acorde a los niveles de umbral definidos. En cuanto al canal 1 con una potencia límite de 17 dBm, solamente presenta un nivel adecuado cuando está en la dispersión máxima de 16 ps/nm²km, por lo que, el efecto FWM tiene una gran afectación cuando la CD está por debajo de dicho valor. Para los demás niveles de potencia, los canales presentan niveles adecuados de BER y factor Q, a excepción de la dispersión nula.

En la figura 3.75, se destaca la degradación que presenta el sistema, la cual, es producto del fenómeno SPM relacionado con la potencia del laser en TX, el regimen de dispersión aplicado y el FWHM del laser. De este modo, para una dispersión de 0 ps/nm*km aumenta considerablemente todos los efectos no lineales con mayor proporción para altos niveles de potencia.

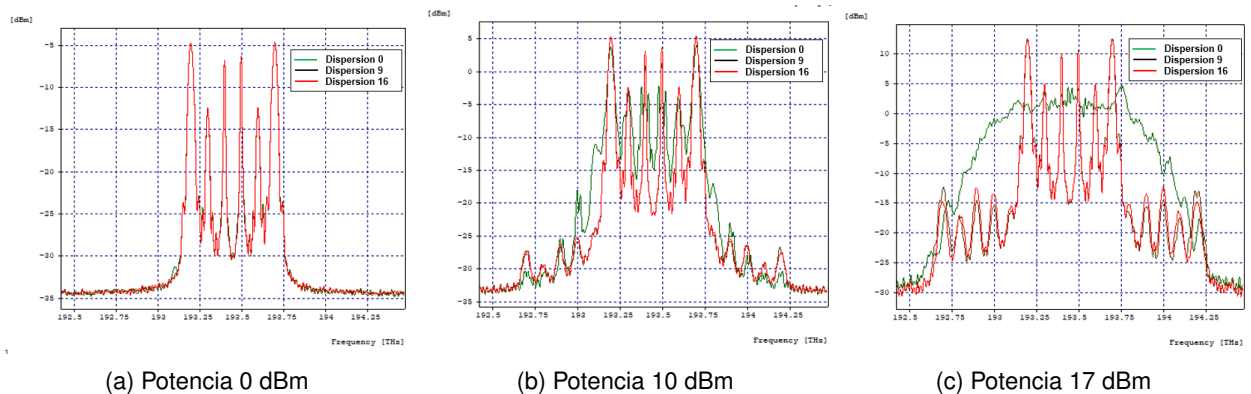


Fig 3.75: Variación del coeficiente de dispersión.

■ Análisis del efecto FWM al variar la potencia con una separación de 50 GHz entre canales.

Se configuran los 6 canales para una separación de 50 GHz, tomando en cuenta la misma asignación de frecuencias del caso de estudio 1, con el fin de determinar el comportamiento del sistema frente al aumento en los niveles de potencia y la proximidad mayor entre canales.

Como se puede observar en la gráfica 3.76 (Anexo A, tabla 25), los valores obtenidos en los parámetros de monitoreo óptico para los canales 1 y 6 con el esquema de modulación RZ-DQPSK son adecuados hasta una potencia límite de 16 dBm y 15 dBm respectivamente, debido a que presenta una BER de 2^{-14} , 3^{-15} con un factor Q de 17.93, 17.62 para cada uno por encima de los criterios de calidad establecidos. Por otro lado, comparando con los resultados del escenario anterior para una modulación RZ-DPSK, en este caso, la modulación implementada tuvo una tolerancia mayor frente al espaciado de 50 GHz hasta una potencia límite de 16 a 15 dBm, de este modo, el hecho de tener una anchura espectral angosta permite este tipo de separaciones, incluso, los canales adyacentes (2, 5) presentan una respuesta adecuada para algunos niveles de potencia. En cuanto a los canales 3 y 4 siguen entregando un comportamiento totalmente idóneo para cada una de las variaciones de potencia ejercidas.

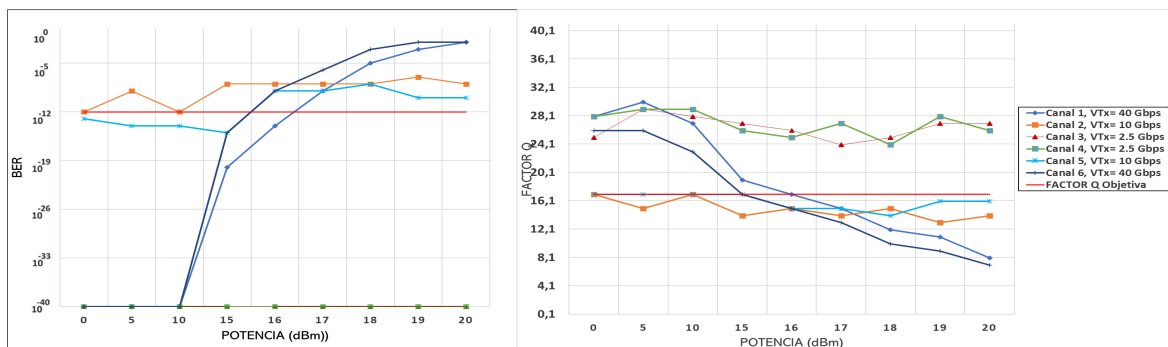


Fig 3.76: BER, Factor Q vs Potencia - Separación 50 GHz

En las figuras 3.77 y 3.78, se observa el diagrama de ojo del canal 193.30 THz y 193.55 THz para las potencias de transmisión de 10 dBm y 0 dBm respectivamente, las cuales, en su región de marca de unos y ceros (parte superior e inferior del diagrama) exhibe dispersión de datos como consecuencia del ruido presente en la señal, en la región de la apertura del ojo (centro del diagrama) se muestra simetría en los cruces de tiempo, pero un cierre de ojo menor en los cruces de amplitud debido a los niveles de voltaje. En cuanto al espectro óptico, se percibe una deformación de la señal (Circulo negro) producto de la separación ejercida y el nivel de potencia considerado, por lo cual, está siendo afectado por los canales de menor velocidad.

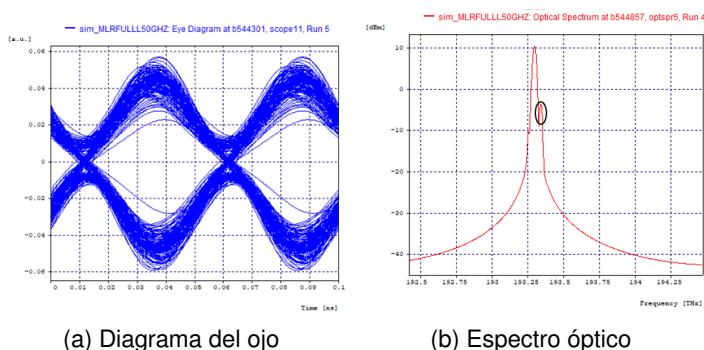


Fig 3.77: Salida modulada para el canal 1 con una potencia de 10 dBm.

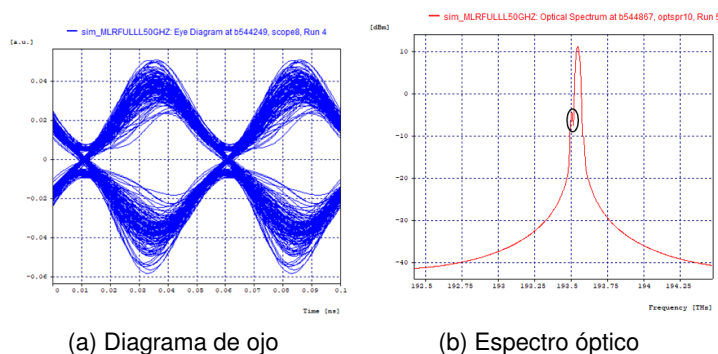


Fig 3.78: Salida modulada para el canal 6 con una potencia de 0 dBm.

En la figura 3.79, se muestra el espectro óptico de los canales en recepción para varios niveles de potencia (0, 10, 15, 16 dBm), donde, que se sigue percibiendo una deformación del espectro del canal a 40 Gbps para cada uno de los niveles de potencia producto de XPM (círculo negro). No obstante, el fenómeno FWM (círculos azules), está generando pequeños canales adicionales y dos señales que sobresalen con una potencia suficiente para ser detectadas por el receptor. Por otro lado, se observa que una separación entre canal de 50 Ghz, genera poca afectación para niveles bajos de potencia debido a la ocupación espectral angosta del esquema de modulación RZ-DPSK, sin embargo, a medida que aumenta la intensidad de la señal incrementa la ISI, siendo más crítico mantener los niveles de calidad definidos.

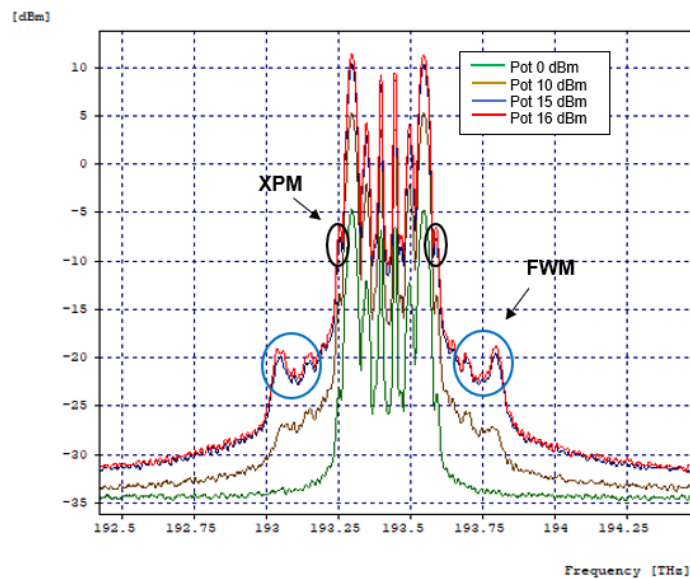


Fig 3.79: Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.

■ **Análisis del efecto FWM al variar la dispersión con diferentes niveles de potencia.**

Se procede a hacer el segundo análisis, en el cual, se realiza la variación de la dispersión cromática de la fibra SMF-28 Corning manteniendo fijo los niveles de potencia, de este modo, se define un rango desde 0 a 16 ps/nm*km.

En las figuras 3.80 a 3.82, se muestra el comportamiento del enlace frente a la variación del coeficiente de dispersión de la fibra para las potencias de 0, 10 y 16 dBm. (Anexo a, tabla 26, 27 Y 28).

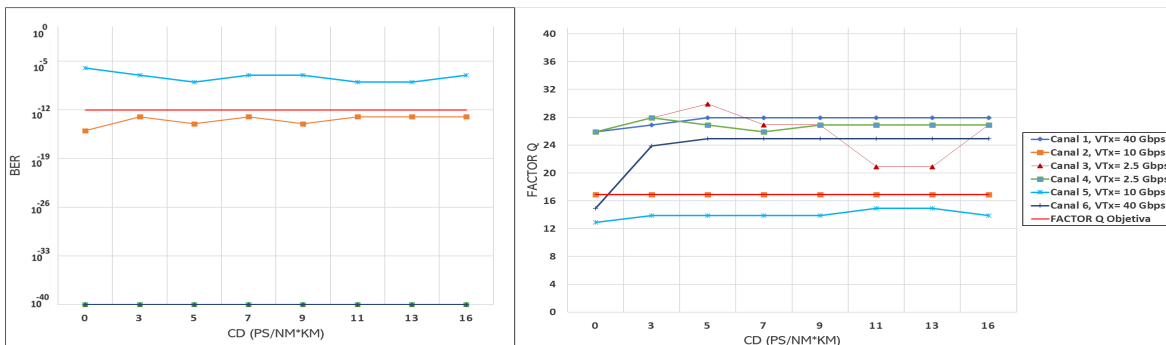


Fig 3.80: BER, Factor Q vs CD-Separación 50 GHz-Potencia 0dBm

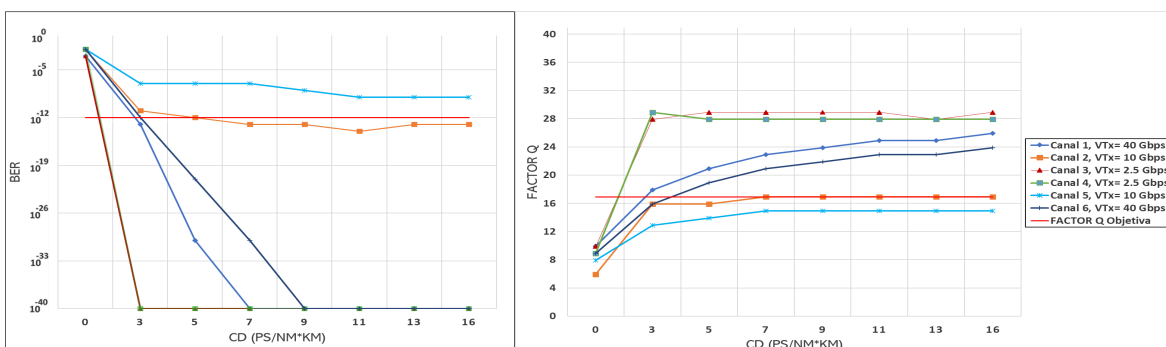


Fig 3.81: BER, Factor Q vs CD-Separación 50GHz-Potencia 10dBm

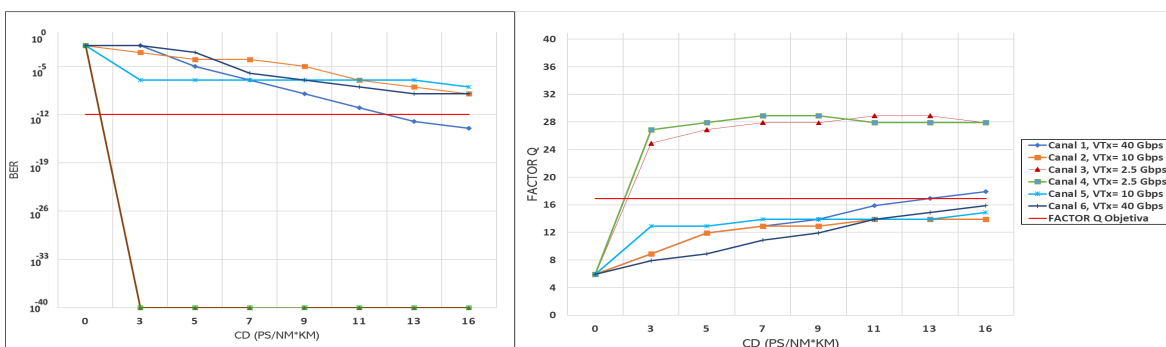


Fig 3.82: BER, Factor Q vs CD-Separación 50GHz-Potencia 16dBm

Con base a las imágenes anteriormente expuestas (Anexo A, tabla 26, 27 y 28), se observa que, para los niveles de potencia superiores a 0 dBm, los canales configurados presentan una respuesta deficiente cuando se encuentran por debajo de los 5 ps/nm*km, no obstante, a medida que se hace un aumento gradual de la dispersión el sistema empieza a estar acorde a los niveles de umbral definidos. Sin embargo, con respecto al canal 1 con una tasa de transmisión de 40 Gbps, solamente presenta un nivel adecuado cuando los valores están por encima de los 13 ps/nm*km para la potencia límite de 16 dBm, por lo que, el efecto FWM tiene una gran afectación cuando la CD está por debajo de dicho valor. Para los demás niveles de potencia, los canales 3 y 4 son los únicos que presentan niveles

adecuados de BER y factor Q, a excepción de la dispersión nula.

En la figura 3.83, se destaca la degradación que presenta el sistema cuando se establece una dispersión nula (línea verde), puesto que, determinar una fibra óptica con 0 de Dispersión aumenta considerablemente todos los efectos no lineales. De esta manera, se concluye que FWM es más degradante cuando la dispersión es baja o nula para niveles altos de potencia.

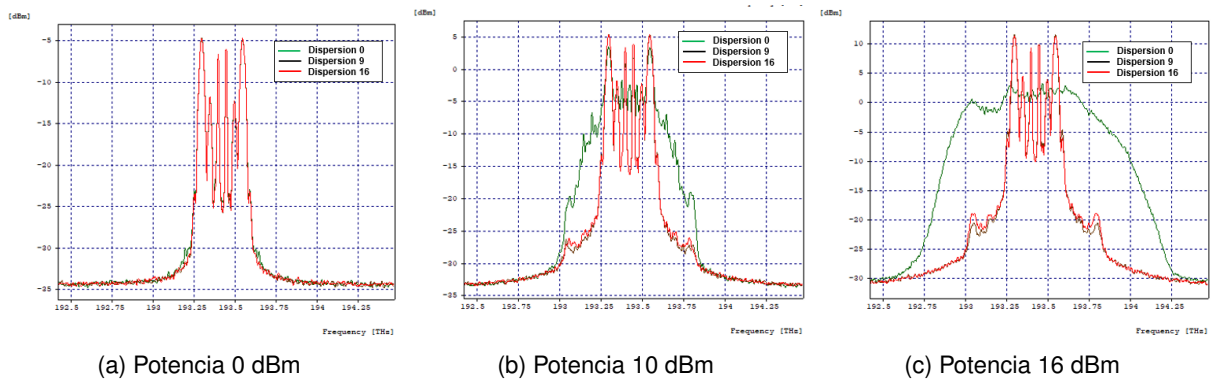


Fig 3.83: Variación del coeficiente de dispersión.

■ **Análisis del efecto FWM al variar la potencia con una separación de 25 GHz entre canales.**

Se configuran los 6 canales para una separación de 25 GHz, con el fin de determinar el comportamiento del sistema frente al aumento en los niveles de potencia y la proximidad aún mayor entre canales.

Como se puede observar en la gráfica 3.84 (Anexo A, tabla 29), no fue posible obtener resultados acordes a los parámetros de calidad establecidos, debido a la ocupación espectral del esquema de modulación RZ-DQPSK, el cual, para esta separación entre canal está afectando al formato de modulación básico NRZ-OOK, que en anteriores escenarios había presentado parámetros totalmente idóneos para cada uno de los niveles de potencia. De esta forma, se concluye que el sistema no es capaz de soportar un distanciamiento entre canal de 25 Ghz para 6 canales implementados.

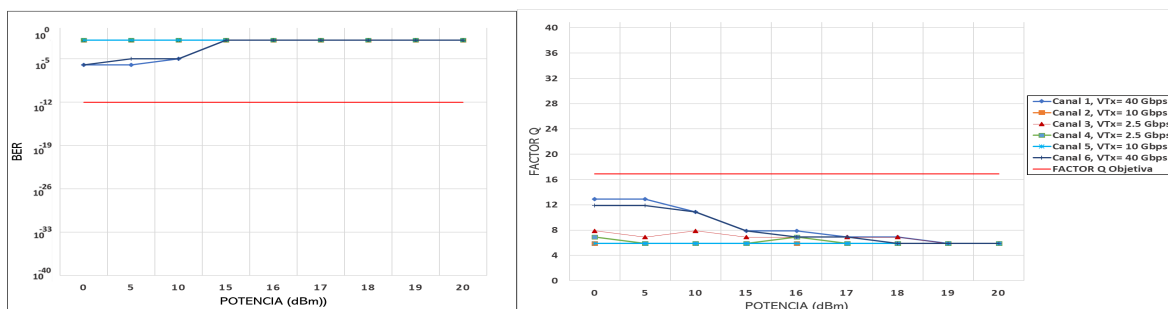
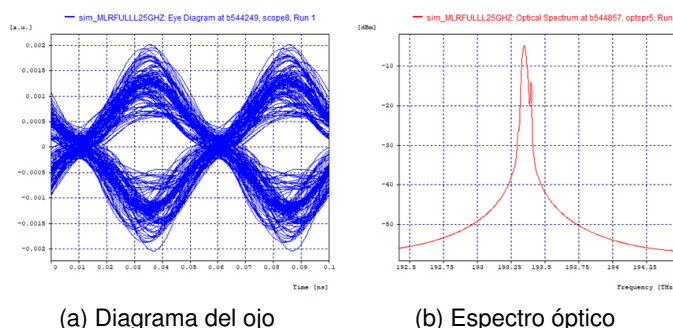


Fig 3.84: BER, Factor Q vs Potencia - Separación 25 GHz

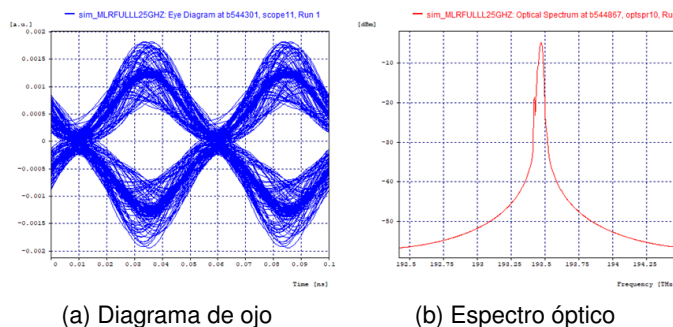
En la figura 3.85 y 3.86, se observa el diagrama de ojo del canal 193.350 THz y 193.475 THz para la potencia de transmisión de 0 dBm, las cuales, en su región de marca de unos y ceros (parte superior e inferior del diagrama) exhibe gran dispersión de datos como consecuencia del ruido presente en la señal, en la región de la apertura del ojo (centro del diagrama) se muestra simetría en los cruces de tiempo, pero un cierre bastante importante del ojo en los cruces de amplitud debido a los niveles de voltaje y a la distorsión considerada. En cuanto al espectro óptico, muestra una gran afectación por la presencia de FWM debido a los canales de 2,5 Gbps y 10 Gbps que solo cuentan con una separación de 25 GHz entre sí, dado que, cuando se transmiten canales con diferentes velocidades sobre un mismo medio, los canales de mayor velocidad tienden a verse afectados por los de una velocidad de transmisión menor.



(a) Diagrama del ojo

(b) Espectro óptico

Fig 3.85: Salida modulada para el canal 1 con una potencia de 0 dBm.



(a) Diagrama de ojo

(b) Espectro óptico

Fig 3.86: Salida modulada para el canal 6 con una potencia de 0 dBm.

En la figura 3.87, se muestra el espectro óptico de los canales en recepción para varios niveles de potencia (0, 5, 10 dBm), donde, se destaca que para una separación de 25 Ghz afecta totalmente el rendimiento de la red, razón por la cual, para ningún intervalo de potencia se pudo obtener parámetros de calidad adecuados, de este modo, no se realizara el análisis de dispersión para este escenario.

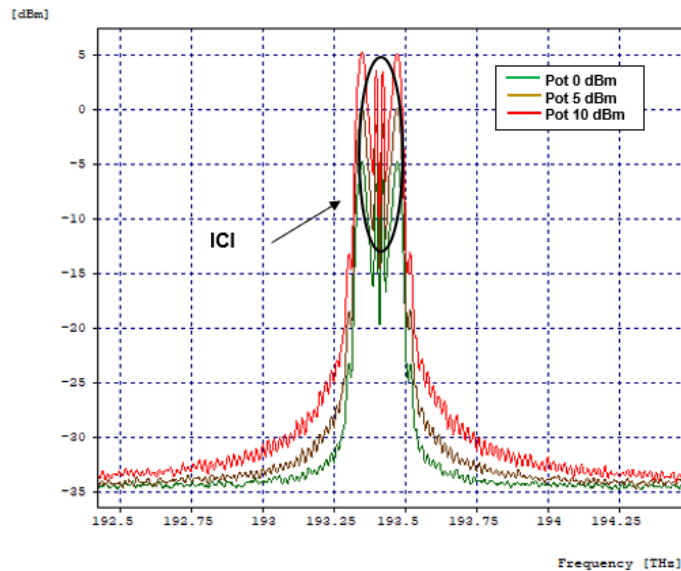


Fig 3.87: Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.

3.2.2. Caso de estudio 5: 2 canales de 2.5 Gbps + 4 canales de 10 Gbps + 4 canales de 40 Gbps.

Para este quinto caso de estudio se toma como referencia el escenario anterior (Caso de estudio 4), adicionando 2 canales de 40 Gbps y 2 canales de 10 Gbps, con el propósito de observar la influencia de FWM frente al aumento de canales, dado que, es un parámetro importante para considerar en dicho fenómeno. De este modo, se configuran 4 canales externos de 40 Gbps con el esquema de modulación RZ-DQPSK, 4 canales de 10 Gbps con RZ-OOK y 2 canales internos de 2.5 Gbps con NRZ-OOK. Además, se define la misma separación entre canal de 100 GHz (0,8 nm), 50 Ghz (0,4 nm) y 25 Ghz (0,2 nm) considerando la grilla espectral para este tipo de redes DWDM según la ITU-T G.694.1 [73], teniendo como frecuencia de referencia (frecuencia del primer canal) de 193.0 THz.

El esquema general del sistema óptico propuesto se puede apreciar en la figura 3.88, donde se implementa un total de 10 canales ópticos cada uno con una tasa de transmisión diferente según el formato de modulación establecido. Los parámetros generales de configuración para este quinto caso de estudio se detallan en la tabla 3.9.

■ Desempeño:

Se procede a analizar el desempeño de la red propuesta mediante los parámetros OPM, medidos para cada canal implementado a una potencia de 0 dBm, estos se presentan en la tabla 3.11, considerando todos los efectos que pueden incidir en el sistema.

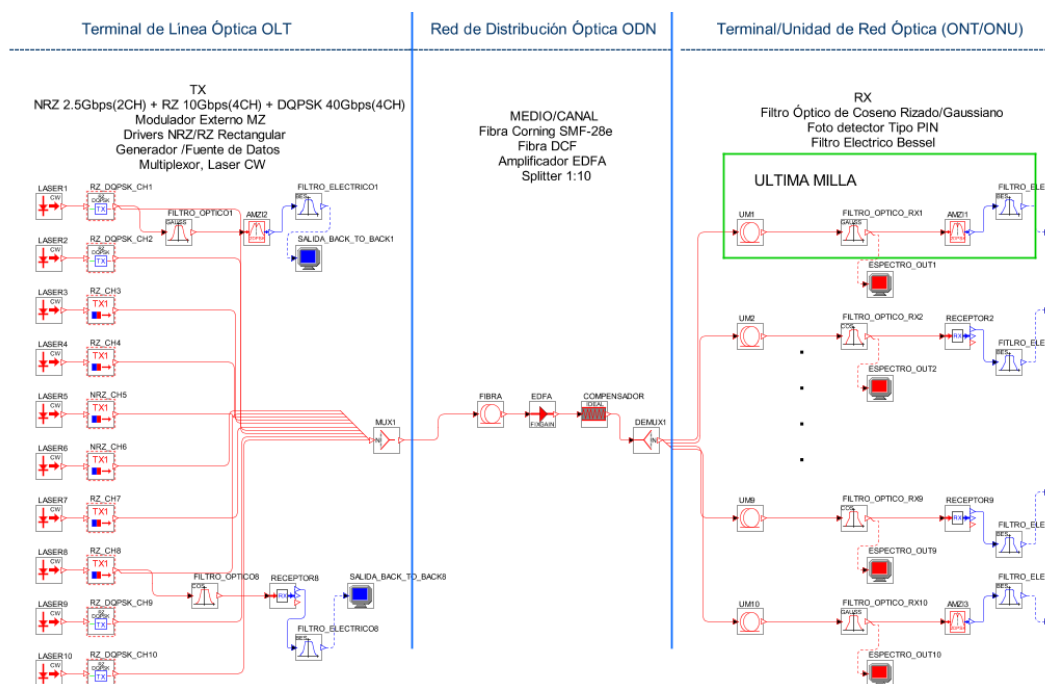


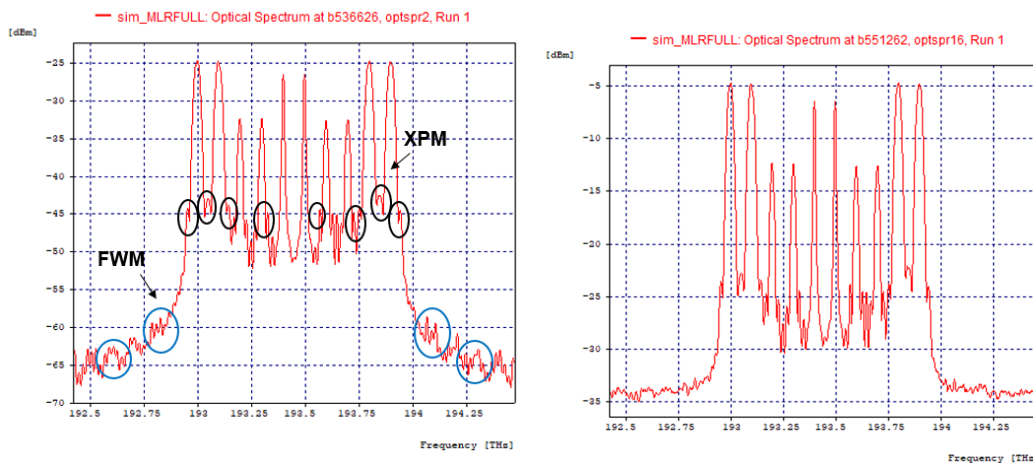
Fig 3.88: Modelo de red Caso 5

Canal	Velocidad Tx (Gbps)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
1	40	-4.73	1e-40	28.78	50.40	25.26
2	40	-4.67	1e-40	29.90	51.25	25.32
3	10	-12.33	1e-40	26.31	51.60	17.66
4	10	-12.44	1e-40	25.78	51.33	17.55
5	2.5	-6.77	1e-40	35.69	54.52	23.22
6	2.5	-6.29	1e-40	32.26	54.41	23.70
7	10	-12.33	1e-40	24.24	53.51	17.66
8	10	-12.43	1e-40	24.16	51.92	17.56
9	40	-4.64	1e-40	26.23	52.85	25.35
10	40	-4.71	1e-40	29.63	55.33	25.28

Tabla 3.11: Parámetros OPM.

En las figuras 3.89a y 3.89b, se presenta el espectro óptico para cada una de las etapas de la red con una potencia inicial de 0 dBm, donde se evidencian las frecuencias de los 10 canales implementados. Con respecto a la imagen 3.89a, se aprecian pequeños canales adicionales (circulo azul) luego de pasar por la fibra óptica, tal como sucedió en el caso

de estudio anterior, no obstante, estas réplicas de onda no son tan determinantes debido al nivel de potencia aplicado, por lo cual, un incremento considerable de la intensidad de la señal de cada canal va a influir aún más en la degradación del sistema producto del aumento en el número de canales. Además, en este escenario, es importante resaltar la configuración de los 4 canales externos con una capacidad de 40 Gbps, los cuales, no reflejan una afectación en la calidad de la señal debido a su espectro bastante angosto, incluso, para una separación menor es posible que aún se obtengan valores adecuados. A su vez, se sigue percibiendo (circulo negro) una deformación del espectro del canal de 40 Gbps producida por el efecto XPM. Por otro lado, la imagen 3.89b, que representan el uso del amplificador EDFA y la compensación ideal mediante el módulo “Ideal Fiber Grating” respectivamente, indican una disminución efectiva de las degradaciones causadas por el medio de transmisión, además de un nivel de potencia adecuado en cada canal.



(a) Espectro de salida en la Fibra Óptica.

(b) Espectro de salida en el EDFA y Compensador.

Fig 3.89: Espectro en diferentes etapas de la red.

- **Análisis del efecto FWM al variar la potencia con una separación de 100 GHz entre canales.**

Se configuran los 10 canales espaciados entre sí por 100 Ghz, con el fin de determinar el comportamiento del sistema frente al aumento de los niveles de potencia. Las gráficas obtenidas de BER y factor Q del quinto caso de estudio bajo esta condición, se muestran en las figuras 3.90.

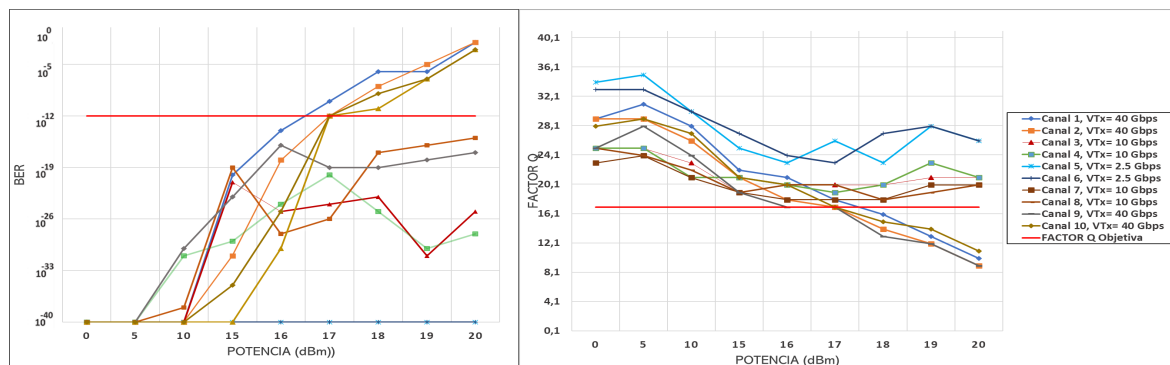


Fig 3.90: BER, Factor Q vs Potencia - Separación 100 GHz

Como se puede observar en las gráficas anteriores (Anexo A, tabla 30), los valores obtenidos en los parámetros de monitoreo óptico para los canales externos (1, 2, 9, 10) con el esquema de modulación RZ-DQPSK son adecuados hasta una potencia límite de 17 dBm, debido a que presentan una BER de 5^{-12} , 1^{-12} , 9^{-12} , 5^{-12} con un factor Q de 18.67, 17.02, 17.58, 17.09, respectivamente, que están por encima de los criterios de calidad establecidos. Sin embargo, con respecto a los canales (7, 8) presentan una disminución bastante considerable de la BER, debido a la influencia que están obteniendo de los canales adyacentes y su posición relativa en frecuencia dentro del rango establecido en la grilla espectral, puesto que, los canales (3, 4) con la misma tasa de transmisión tienen una respuesta mejor. Por otro lado, los canales 5 y 6 con una baja tasa de transmisión muestran un comportamiento totalmente idóneo para cada una de las variaciones de potencia ejercidas, dado que, el formato de modulación avanzado tiene un espectro óptico mucho más angosto, por lo cual, evita la interferencia a los canales adyacentes para este tipo de espaciamiento.

En las figuras 3.91, 3.92, se observa el diagrama de ojo de los canales 193.0 THz, 193.1 THz, 193.8 THz, 193.9 THz para las potencias de transmisión de 17 dBm, las cuales, en su región de marca de unos y ceros (parte superior e inferior del diagrama) exhibe dispersión de datos como consecuencia del ruido presente en la señal, en la región de la apertura del ojo (centro del diagrama) se muestra simetría en los cruces de tiempo, por lo que la dispersión cromática no está siendo un factor determinante. Sin embargo, con respecto al canal 10 no presenta una adecuada simetría en los cruces de amplitud y tiempo, debido a la posición relativa en frecuencia, dado que, tiene asignada la frecuencia más alta, lo cual perjudica en mayor medida su rendimiento comparado con los otros canales que trabajan con la misma tasa de transmisión.

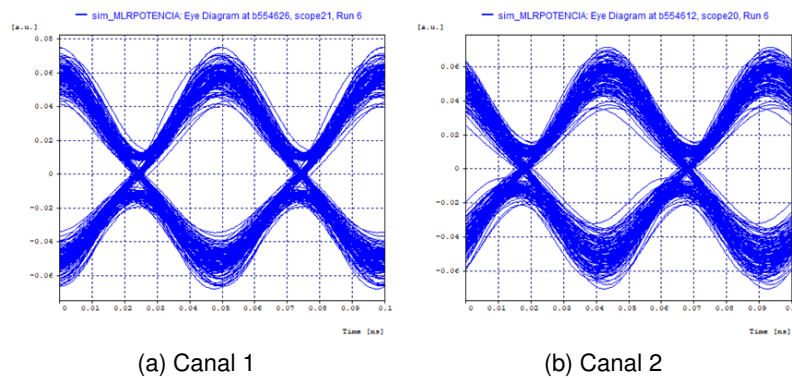


Fig 3.91: Diagrama de ojo en recepción- Potencia de 17 dBm.

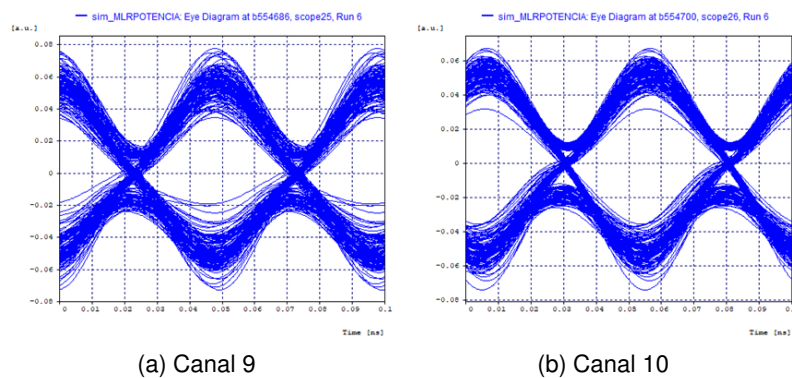


Fig 3.92: Diagrama de ojo en recepción- Potencia de 17 dBm.

En la figura 3.93, se muestra el espectro óptico de los canales en recepción para varios niveles de potencia (0, 10, 15, 17 dBm), donde, se observa primeramente que no existe un ensanchamiento de los pulsos, es decir, que no hay presencia del fenómeno SPM, sin embargo, se sigue percibiendo una deformación del espectro de los canales para cada uno de los niveles de potencia producto de XPM (circulo negro). No obstante, el efecto no lineal predominante es FWM, tal como se muestra en los círculos azules, puesto que, en el espectro de salida se generan pulsos diferentes a los transmitidos, los cuales coinciden con los canales originales produciendo pérdida de la información. Cabe resaltar que el esquema de modulación RZ-DQPSK es altamente tolerante frente al fenómeno FWM, dado que, al aumentar los niveles de potencia, se evidencia en la figura una gran ocupación en el espectro de los canales adicionales, sin embargo, hasta una potencia de 17 dBm puede estar por encima de los parámetros de calidad establecido.

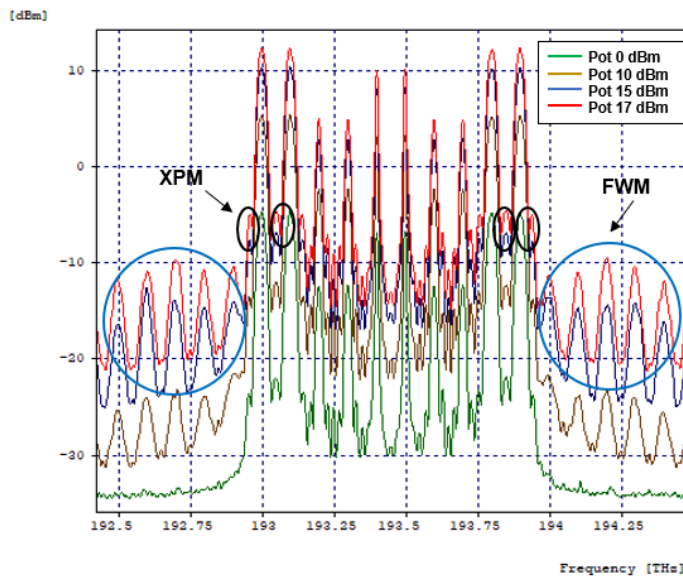


Fig 3.93: Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.

■ **Análisis del efecto FWM al variar la dispersión con diferentes niveles de potencia.**

Para el segundo análisis, se hace la variación de la dispersión cromática de la fibra SMF-28 Corning manteniendo fijo los niveles de potencia, de este modo, se define un rango desde 0 a 16 ps/nm*km.

En las figuras 3.94 a 3.96, se muestra el comportamiento del enlace frente a la variación del coeficiente de dispersión de la fibra para las potencias de 0, 10 y 17 dBm (Anexo A, tablas 31, 32 y 33).

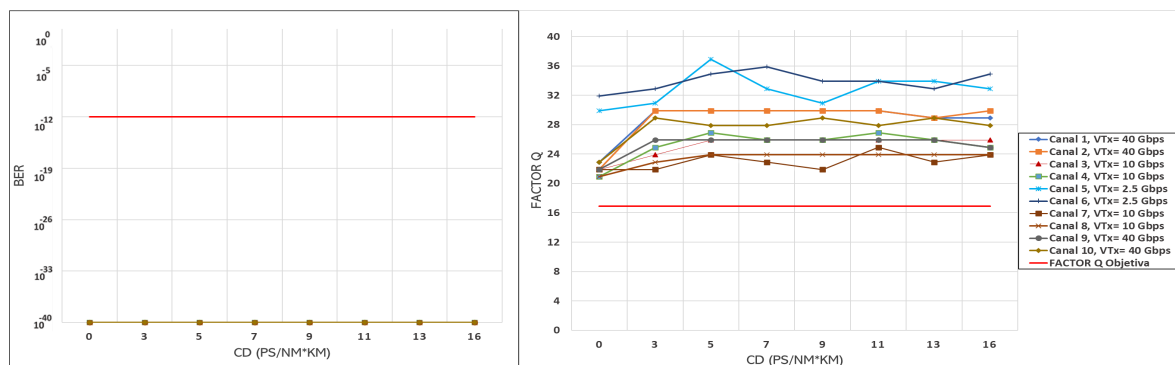


Fig 3.94: BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 0dBm

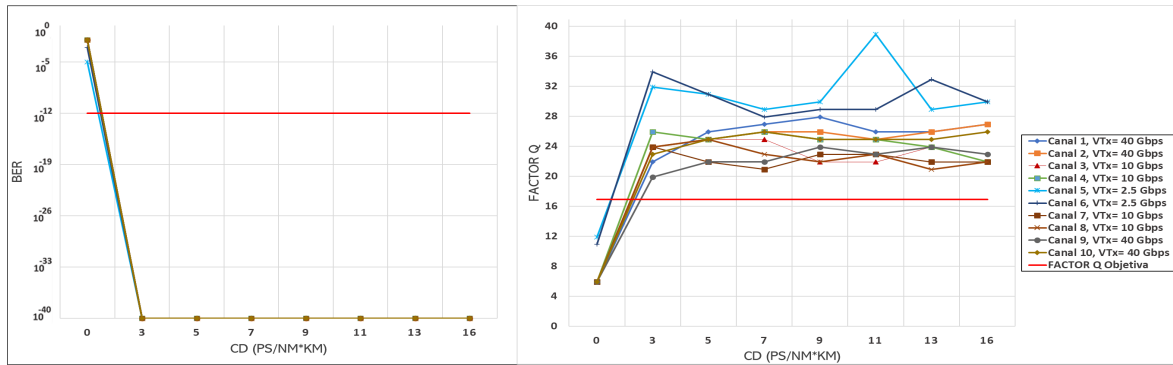


Fig 3.95: BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 10dBm

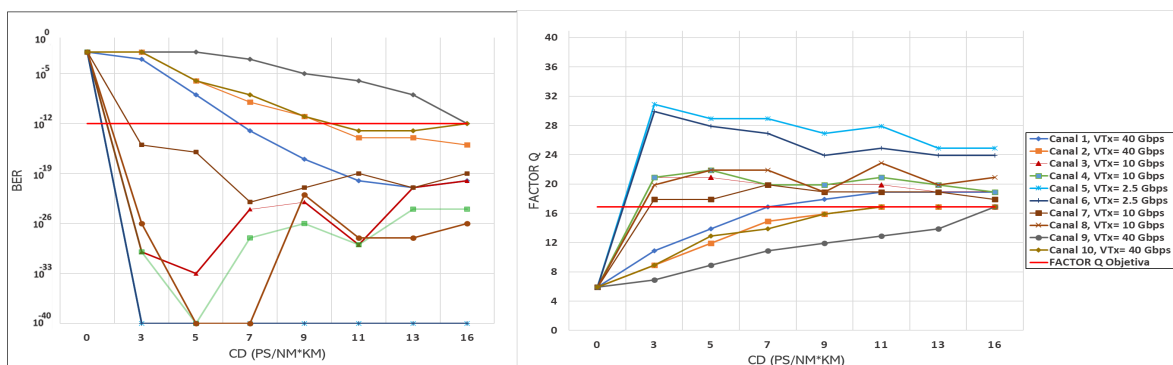


Fig 3.96: BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 17dBm

Con respecto a las figuras anteriores (Anexo A, tablas 31, 32 y 33), para niveles de potencia superiores a 0 dBm, los canales configurados presentan una respuesta deficiente cuando se encuentran por debajo de los 5 ps/nm*km, no obstante, a medida que se hace un aumento gradual de la dispersión el sistema empieza a estar acorde a los niveles de umbral definidos. En cuanto a los primeros 2 canales con una potencia límite de 17 dBm, presenta un nivel adecuado cuando tienen una dispersión después de 7 ps/nm*km, por lo que, el efecto FWM tiene gran afectación en los parámetros de calidad cuando la CD está por debajo de dicho valor. Por otro lado, el canal 9 con una tasa a 40 Gbps, muestra un valor óptimo solamente cuando la dispersión es 16 ps/nm*km, dado que, la posición relativa en frecuencia del canal está siendo altamente afectada por las variaciones de dispersión. Los demás canales que hacen parte del sistema tienen niveles adecuados de BER y factor Q, a excepción de la dispersión nula, para cada uno de los niveles de potencia.

En la figura 3.97, se destaca la degradación que presenta el sistema cuando se establece una dispersión nula (línea verde), puesto que, determinar una fibra óptica con 0 de Dispersión aumenta considerablemente todos los efectos no lineales, incluso, para niveles altos de intensidad es más notorio la influencia de tener niveles bajos de dispersión. De esta manera, se concluye que para el esquema de modulación RZ-DQPSK, la variación de los niveles de dispersión influye en el aumento del fenómeno FWM, presentando valores

adecuados solamente cuando la dispersión está en un rango mayor de 7 ps/nm*km y en algunos casos solamente cuando es 16 ps/nm*km.

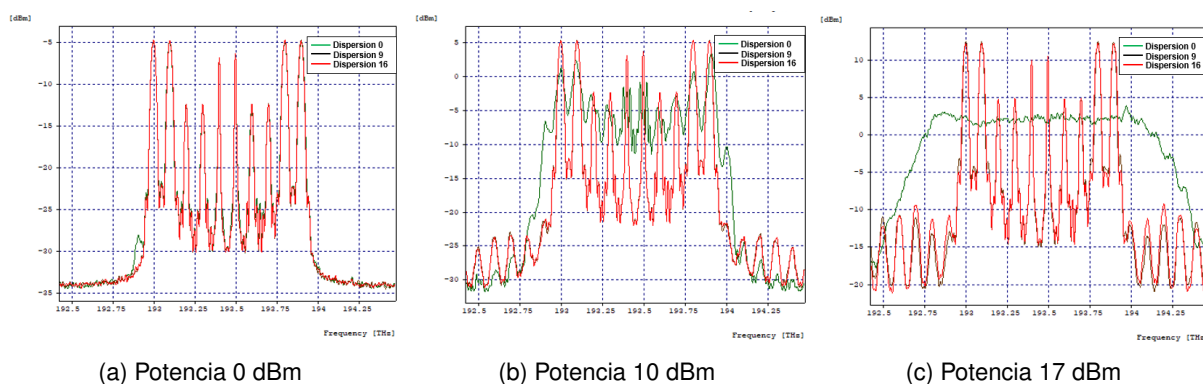


Fig 3.97: Variación del coeficiente de dispersión.

- **Análisis del efecto FWM al variar la potencia con una separación de 50 GHz entre canales.**

Se configuran los 10 canales para una separación de 50 GHz, con el fin de determinar el comportamiento del sistema frente al aumento en los niveles de potencia y la proximidad mayor entre canales.

Como se puede observar en la gráfica 3.98 (Anexo A, tabla 34), solamente el canal 1 con el esquema de modulación RZ-DQPSK entrega valores óptimos para una potencia límite de 0 dBm, debido a que presenta una BER de 9^{-12} , con un factor Q de 17.03, que está por encima de los criterios de calidad establecidos. Con respecto a los canales 2, 9 y 10 que tienen el mismo esquema de modulación no ofrecen ningún valor adecuado para cada uno de los niveles de potencia ejercidos, dado que, en el caso del canal 2 está siendo afectado por los canales adyacentes producto de la separación mínima implementada de 50 GHz, ahora bien, para los canales 9 y 10, debido a la posición relativa en frecuencia adoptada da como resultado un deterioro mayor en comparación con los demás canales. En cuanto a los canales 3 y 8 con una tasa de transmisión de 10 Gbps, están siendo bastante perjudicados por la anchura espectral de la modulación RZ-DQPSK, puesto que, los canales 4 y 7 con la misma velocidad implementada exponen parámetros ideales de BER y factor Q en cada intervalo de potencia. Por último, los canales 5 y 6 siguen entregando un comportamiento totalmente idóneo para cada una de las variaciones de potencia ejercidas.

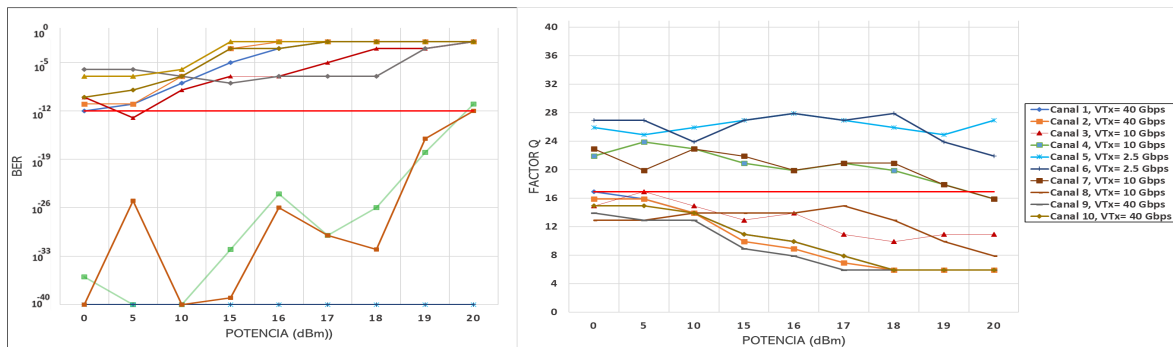


Fig 3.98: BER, Factor Q vs Potencia - Separación 50 GHz

En las figuras 3.99, 3.100, 3.101 y 3.102 se observan los diagramas de ojo de los canales 193.20 THz, 193.25 THz, 193.60 THz y 193.65 THz para la potencia de transmisión de 0 dBm, las cuales, en su región de marca de unos y ceros (parte superior e inferior del diagrama) exhiben bastante dispersión de datos como consecuencia del ruido presente en la señal y la separación entre canales, sin embargo, en la región de la apertura del ojo (centro del diagrama) se muestra simetría en los cruces de tiempo y amplitud.

En cuanto al espectro óptico, se percibe una deformación de la señal (círculo negro) producto de la separación ejercida, dado que, la proximidad entre los canales genera un aumento en la ISI, la cual, es más perjudicial para los canales 2 (193.25 THz) y 9 (193.60 THz) debido a la interacción con los canales de 10 Gbps y 40 Gbps (Canales externos). Cabe resaltar, la importancia de la posición relativa en frecuencia, puesto que, el canal 1 al estar ubicado en la frecuencia menor y en el extremo de la grilla espectral tiene un comportamiento mejor que los demás con la misma capacidad.

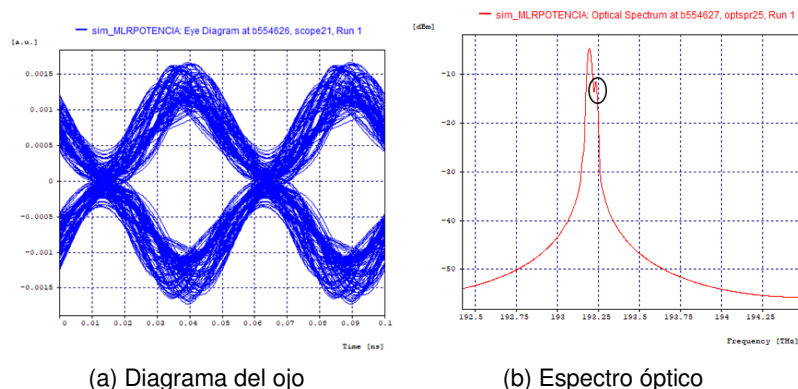


Fig 3.99: Salida modulada para el canal 1 con una potencia de 0 dBm.

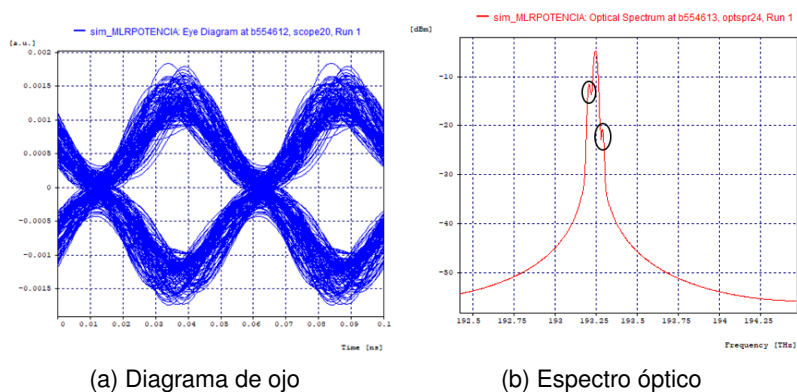


Fig 3.100: Salida modulada para el canal 2 con una potencia de 0 dBm.

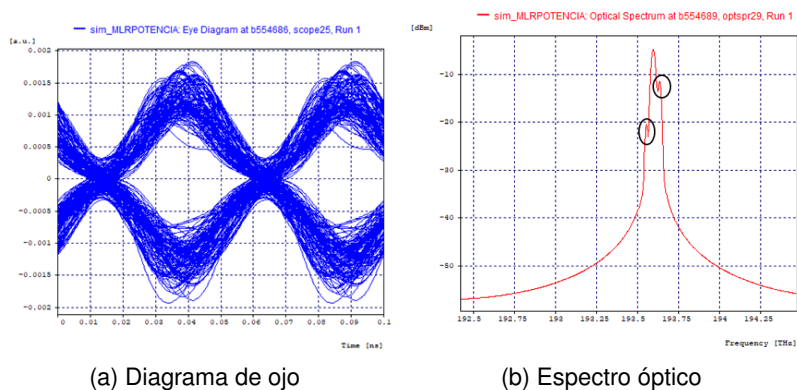


Fig 3.101: Salida modulada para el canal 9 con una potencia de 0 dBm.

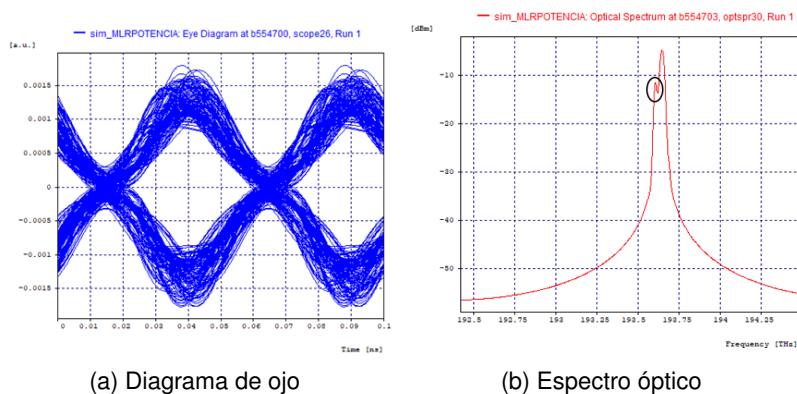


Fig 3.102: Salida modulada para el canal 10 con una potencia de 0 dBm.

En la figura 3.103, se muestra el espectro óptico de los canales en recepción para varios niveles de potencia (0, 5, y 10 dBm), donde, se sigue percibiendo una deformación del espectro del canal a 40 Gbps para cada uno de los niveles de potencia producto de XPM (círculo negro). No obstante, el fenómeno FWM (círculos azules), está siendo cada vez más

perjudicial con el aumento en la intensidad de la señal generando canales adicionales con una potencia suficiente para ser detectadas por el receptor. Por otro lado, la separación entre canal de 50 Ghz, genera gran afectación para todos los niveles de potencia considerando el esquema de modulación RZ-DQPSK, sin embargo, para una potencia pequeña de 0 dBm el canal 1 es el único que sobresale entregando resultados que están por encima de los parámetros establecidos.

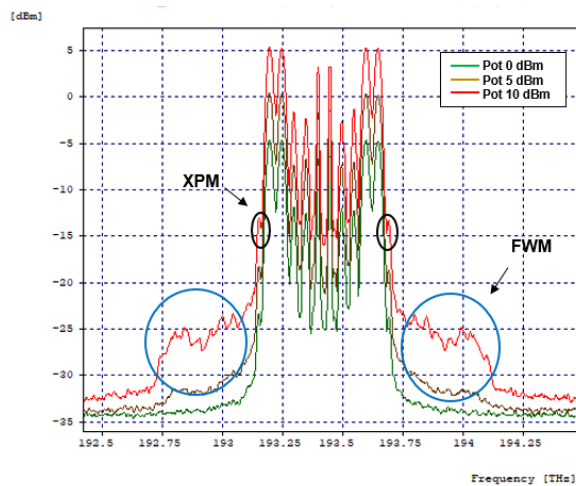


Fig 3.103: Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.

■ **Análisis del efecto FWM al variar la dispersión con diferentes niveles de potencia.**

Se procede a hacer el segundo análisis, en el cual, se realiza la variación de la dispersión cromática de la fibra SMF-28 Corning manteniendo fijo los niveles de potencia, de este modo, se define un rango desde 0 a 16 ps/nm*km.

En la figura 3.104 se muestra el comportamiento del enlace frente a la variación del coeficiente de dispersión de la fibra para la potencia de 0 dBm. (Anexo A, tabla 35).

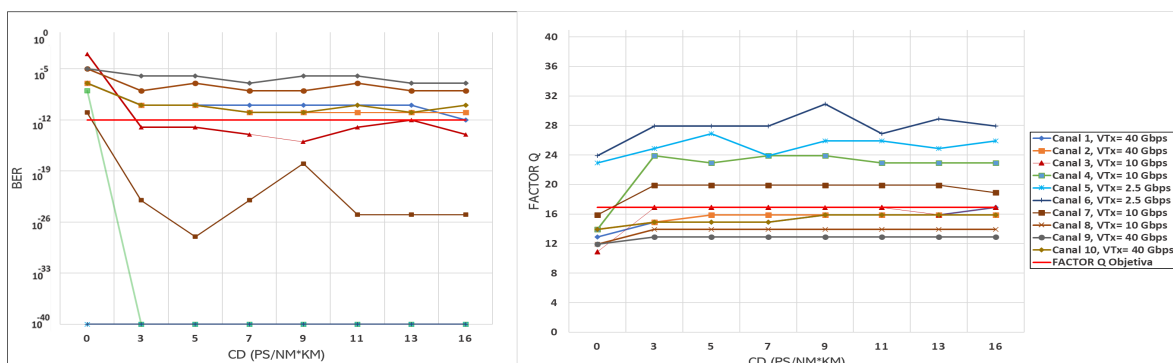


Fig 3.104: BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 0dBm

Con base a las imágenes anteriormente expuestas (Anexo A, tabla 35), se observa que, para los canales con el esquema de modulación RZ-DQPSK, solamente presenta un óp-

timo rendimiento el canal 1 cuando tienen una dispersión de 16 ps/nm*km, dado que, la afectación mayor es por el distanciamiento ejercido, por tal motivo, la potencia inicial de 0 dBm es suficiente para observar el análisis de la variación en la dispersión. Sin embargo, para los demás canales con tasas de transmisión bajas presentan niveles adecuados de BER y factor Q, para todos los niveles de potencia.

En la imagen posterior 3.105, se destaca la degradación que sufre el sistema debido a la separación entre canal implementada, dado que, la dispersión nula (línea verde), presenta los mismos niveles de potencia que las otras variaciones ejercidas (9 y 16 ps/nm*km). De esta manera, se concluye en este caso de estudio, la afectación mayor de FWM debido a la proximidad entre canales, que a la variación de la dispersión para niveles bajos de potencia.

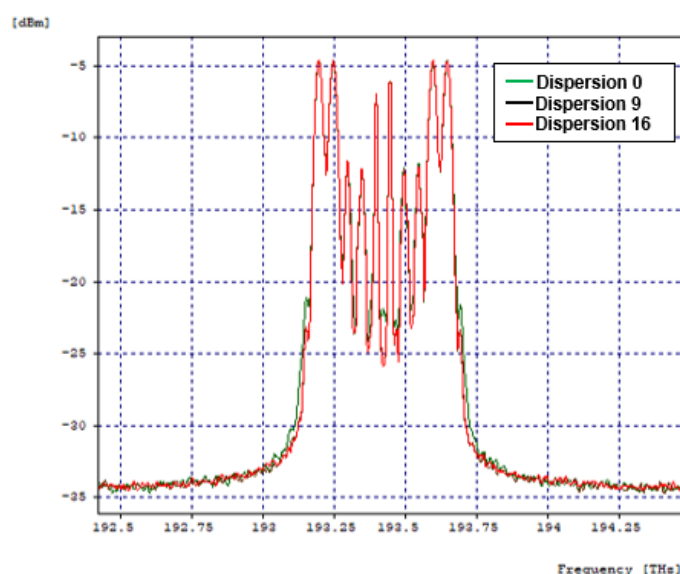


Fig 3.105: Potencia = 0 dBm

- **Análisis del efecto FWM al variar la potencia con una separación de 25 GHz entre canales.**

Se configuran los 10 canales para una separación de 25 Ghz, con el fin de determinar el comportamiento del sistema frente al aumento en los niveles de potencia y la proximidad aún mayor entre canales.

Como se puede observar en la gráfica 3.106 (Anexo A, tabla 36), no fue posible obtener resultados acordes a los parámetros de calidad establecidos, debido a la ocupación espectral del esquema de modulación RZ-DQPSK, el cual, para esta separación entre canal está afectando al formato de modulación básico NRZ-OOK, que en anteriores escenarios había presentado parámetros totalmente idóneos para cada uno de los niveles de potencia. De esta forma, se concluye que el sistema no es capaz de soportar un distanciamiento entre canal de 25 Ghz para 10 canales implementados.

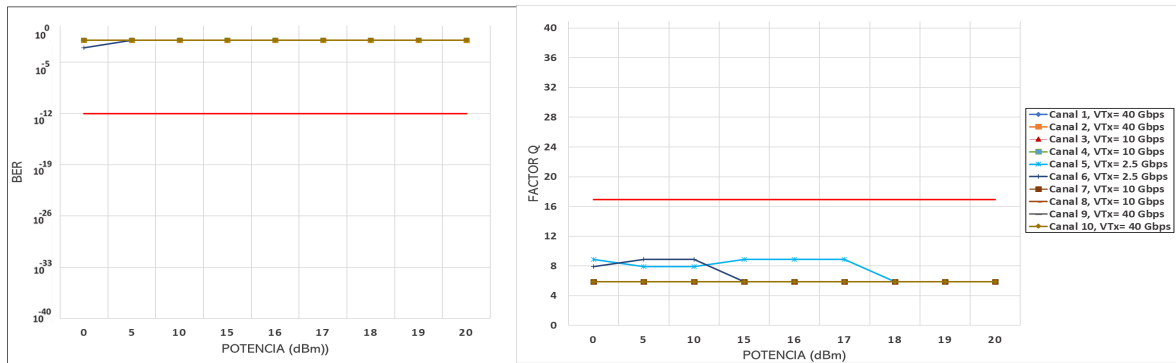


Fig 3.106: BER, Factor Q vs Potencia - Separación 25 GHz

En la figura 3.107, se muestra el espectro óptico de los canales en recepción para varios niveles de potencia (0, 5, 10 dBm), donde, se observa que para una separación de 25 GHz afecta totalmente el rendimiento de la red, razón por la cual, para ningún intervalo de potencia se pudo obtener parámetros de calidad adecuados, de este modo, no se realizara el análisis de dispersión para este escenario.

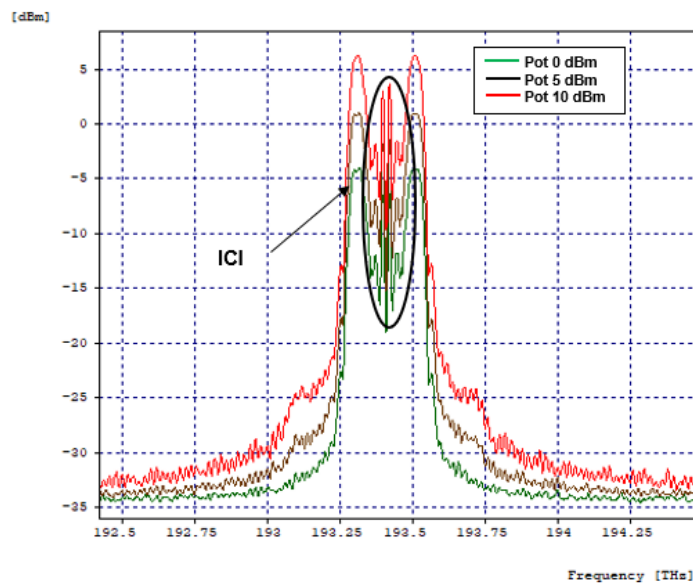


Fig 3.107: Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.

3.2.3. Caso de estudio 6: 2 canales de 2.5 Gbps + 4 canales de 10 Gbps + 6 canales de 40 Gbps.

Para este último caso de estudio se toma como referencia el escenario anterior (Caso de estudio 5), adicionando 2 canales de 40 Gbps, con el propósito de observar la influencia de FWM frente al aumento de canales, dado que, es un parámetro importante a considerar si se analiza a detalle este fenómeno. De este manera, se configuran 6 canales externos de 40 Gbps con el esquema de modulación RZ-DQPSK, 4 canales de 10 Gbps con RZ-OOK y 2 canales internos de 2.5 Gbps con NRZ-OOK. Además, se define la misma separación

entre canal de 100 GHz (0,8 nm), 50 GHz (0,4 nm) y 25 GHz (0,2 nm) considerando la grilla espectral definida para este tipo de redes DWDM según la ITU-T G.694.1 [73], teniendo como frecuencia de referencia (frecuencia del primer canal) de 192.9 THz.

El esquema general del sistema óptico propuesto se puede apreciar en la figura 3.108, donde se implementa un total de 12 canales ópticos cada uno con una tasa de transmisión diferente según el formato de modulación establecido. Los parámetros generales de configuración para este segundo caso de estudio se detallan en la tabla 3.9.

■ Desempeño:

Se procede a analizar el desempeño de la red propuesta mediante los parámetros OPM, medidos para cada canal implementado a una potencia de 0 dBm, estos se presentan en la tabla 3.12, considerando todos los efectos que pueden incidir en el sistema.

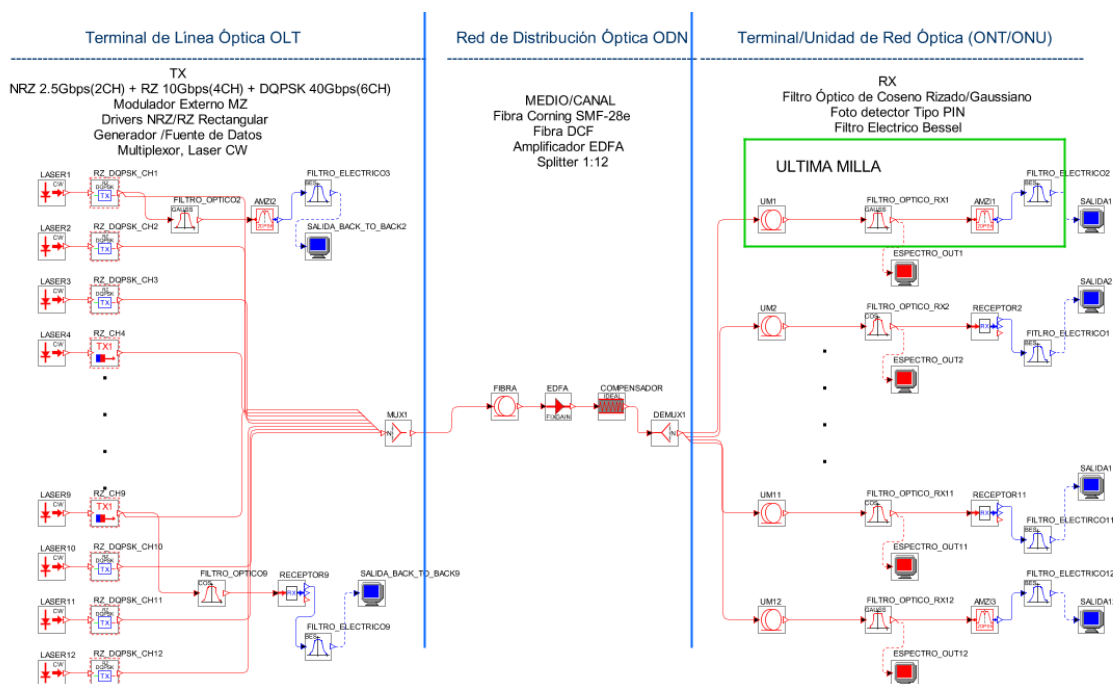


Fig 3.108: Modelo de red Caso 6.

Canal	Velocidad Tx (Gbps)	Potencia Rx (dBm)	BER	Factor Q (dB)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
1	40	-4.61	1e-40	30.19	50.02	25.39
2	40	-4.64	1e-40	28.86	50.99	25.36
3	40	-4.66	1e-40	28.71	51.20	25.34
4	10	-12.29	1e-40	24.91	52.28	17.71
5	10	-12.49	1e-40	24.49	50.39	17.51
6	2.5	-6.65	1e-40	35.26	54.12	23.35
7	2.5	-6.69	1e-40	33.62	54.71	23.31
8	10	-12.34	1e-40	25.33	51.63	17.66
9	10	-12.38	1e-40	23.72	52.33	17.62
10	40	-4.62	1e-40	26.38	52.37	25.38
11	40	-4.78	1e-40	28.23	52.15	25.22
12	40	-4.69	1e-40	28.49	52.18	25.31

Tabla 3.12: Parámetros OPM.

En las figuras 3.109a y 3.109b, se presenta el espectro óptico para cada una de las etapas de la red con una potencia inicial de 0 dBm, donde se evidencian las frecuencias de los 12 canales implementados. Respecto a la imagen 3.109a, se aprecian pequeños canales adicionales (circulo azul) luego de pasar por la fibra óptica, tal como sucedió en el caso de estudio anterior, no obstante, estas réplicas de onda (FWM) no tienen una amplitud considerable, por lo tanto, no ocasionan distorsiones significativas, tomando en cuenta de que se esta operando a un nivel de potencia bajo, por lo cual, se espera que al incrementar dicho valor, el fenómeno FWM sea más predominante. Además, en este escenario, es importante resaltar la configuración de los 6 canales externos con una capacidad de 40 Gbps, los cuales, no reflejan una afectación en la calidad de la señal y a comparación del caso 3, que cuenta con el mismo número de canales, pero diferente formato de modulación, se aprecia que RZ-DQPSK presenta mejores resultados de OPM a una potencia de 0 dBm, lo que demuestra el buen funcionamiento de este formato a velocidades altas de transmisión. A su vez, se sigue percibiendo una deformación (circulo negro) del espectro del canal externo de 40 Gbps producida por el efecto XPM, pero de igual manera, no significa una distorsión compleja de tratar. Por otro lado, la imagen 3.109b, representa las señales después de pasar por el amplificador EDFA y la rejilla ideal y se observa una disminución efectiva de las degradaciones causadas por el medio de transmisión, además de brindar un nivel de potencia adecuado en cada canal, permitiendo superar la sensibilidad del receptor igual a -30 dBm, lo que garantiza la correcta transmisión de la información.

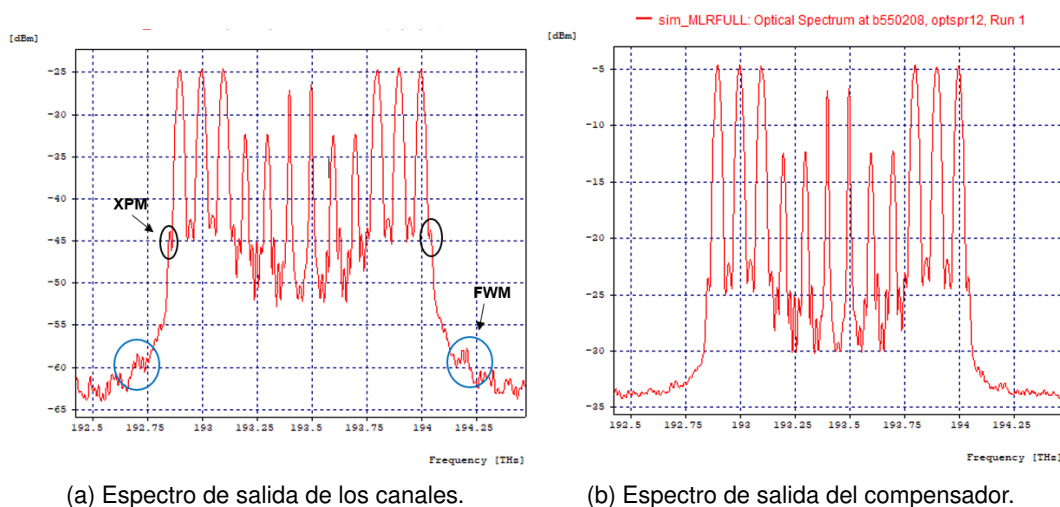


Fig 3.109: Espectro en diferentes etapas de la red.

■ **Análisis del efecto FWM al variar la potencia con una separación de 100 GHz entre canales.**

Se configuran los 12 canales espaciados entre sí por 100 GHz, con el fin de determinar el comportamiento del sistema frente al aumento de los niveles de potencia. Las gráficas obtenidas de BER y factor Q del último caso de estudio bajo esta condición, se muestra en la figura 3.110.

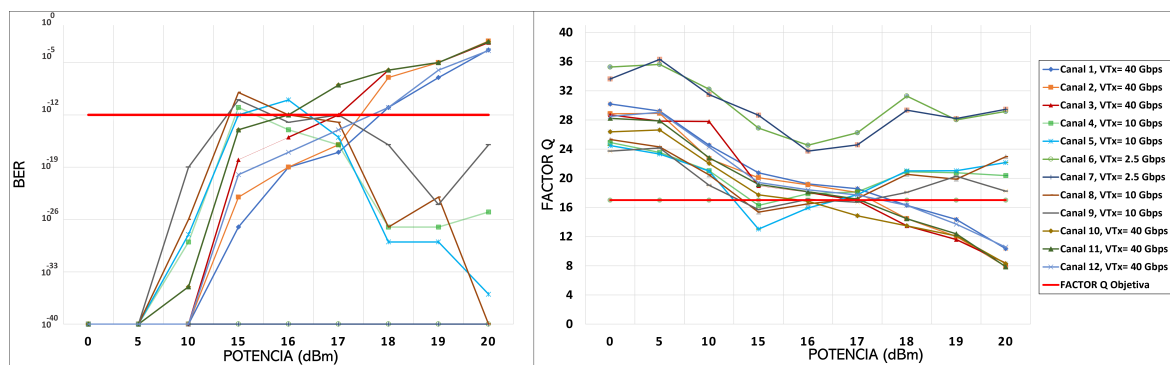


Fig 3.110: BER, Factor Q vs Potencia- Separación 100 GHz

Como se puede observar en las gráficas anteriores (Anexo A, tabla 37), los valores obtenidos en los parámetros de monitoreo óptico para los canales de 40 Gbps (1, 2, 3, 11, 12) con el esquema de modulación RZ-DQPSK son adecuados hasta una potencia límite de 17 dBm, debido a que presentan una BER de 6^{-17} , 6^{-16} , 2^{-12} , 7^{-13} , 1^{-14} , con un factor Q de 18.58 dB, 18.05 dB, 16.95 dB, 17.15 dB, 17.71 dB respectivamente, que están por encima de los criterios de calidad establecidos. Sin embargo, el canal 10, que también trabaja a 40 Gbps no cumple con los umbrales establecidos y tiene como potencia límite 16 dBm, esto debido a su interacción con sus canales adyacentes de 40 y 10 Gbps, lo que lo degrada en mayor medida. También se visualiza que uno de los canales más afectados es el 5 con una

velocidad de transmisión de 10 Gbps, esto debido a la influencia que están obteniendo de los canales vecinos y su posición relativa en frecuencia dentro del rango establecido en la grilla espectral, puesto que, los canales (4,8,9) con la misma tasa de transmisión tienen una respuesta mejor. Por otro lado, los canales 6 y 7 con una baja tasa de transmisión muestran un comportamiento totalmente idóneo para cada una de las variaciones de potencia ejercidas.

En las figuras 3.111, se observa el diagrama de ojo de los canales con frecuencias de 192.9 THz, 193.0 THz, 193.1 THz, 193.8 THz, 193.9 THz y 194.0 THz, para la potencia de transmisión de 17 dBm, las cuales, en su región de marca de unos y ceros (parte superior e inferior del diagrama) exhibe dispersión de datos como consecuencia del ruido presente en la señal, en la región de la apertura del ojo (centro del diagrama) se muestra simetría en los cruces de tiempo, por lo que la dispersión cromática no está siendo un factor determinante.

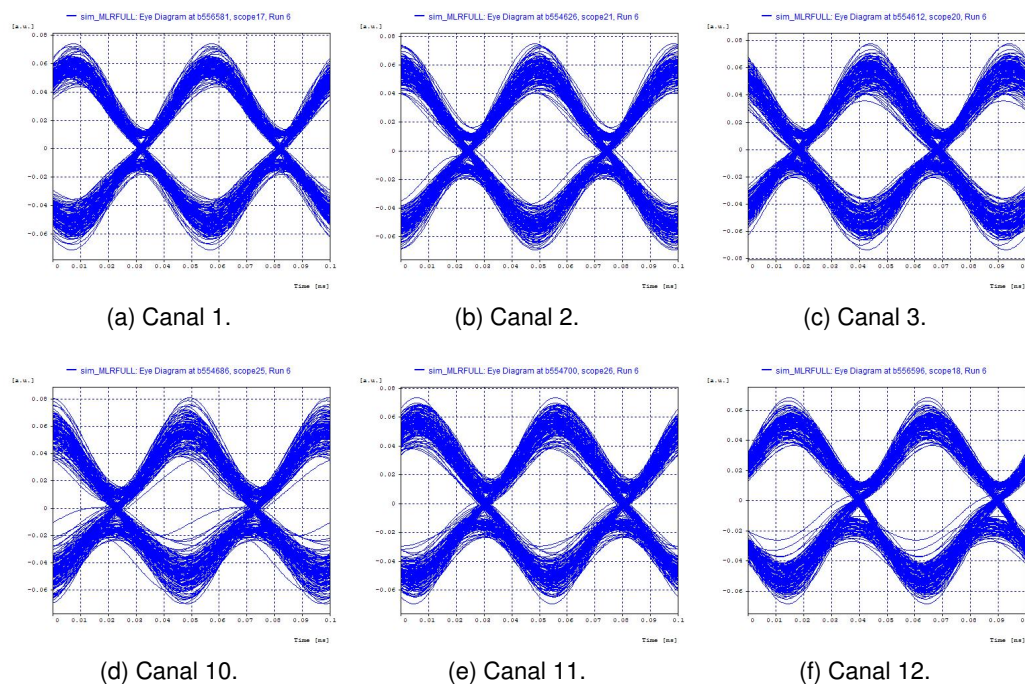


Fig 3.111: Salida modulada para los canales de 40 Gbps- Potencia 17 dBm.

En la figura 3.112, se muestra el espectro óptico de los canales en recepción para varios niveles de potencia (0, 10, 15, 17 dBm), donde, se percibe una deformación del espectro de los canales para cada uno de los niveles de potencia producto de XPM (círculo negro), en especial para el canal 1 y 12, correspondientes a los canales externos de la red. No obstante, el efecto no lineal predominante es FWM, tal como se muestra en los círculos azules, puesto que, en el espectro de salida se generan pulsos diferentes a los transmitidos, los cuales coinciden con los canales originales produciendo pérdida de la información, además se nota un aumento en la amplitud en estos canales parásitos, al aumentar la potencia, lo cual reafirma la importancia de una correcta elección de la potencia en transmisión.

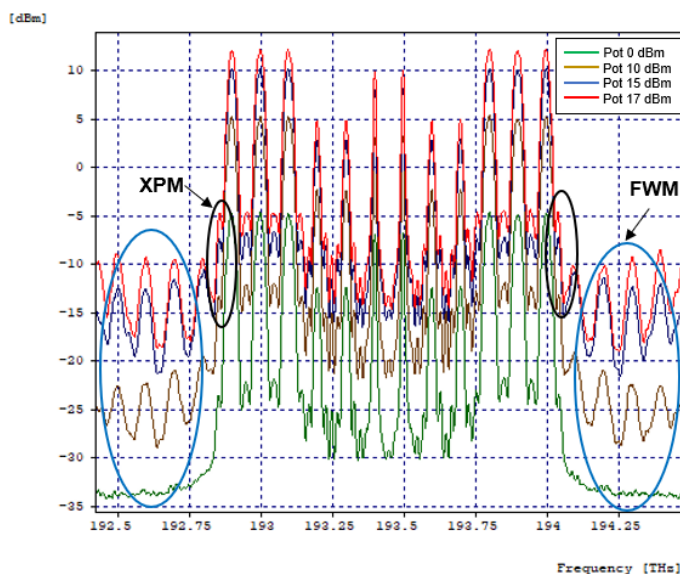


Fig 3.112: Espectro óptico de salida para varios niveles de potencia.

■ **Análisis del efecto FWM al variar la dispersión con diferentes niveles de potencia.**

Para el segundo análisis, se hace la variación de la dispersión cromática de la fibra SMF-28 Corning manteniendo fijo los niveles de potencia, de este modo, se define un rango desde 0 a 16 ps/nm*km. En las figuras 3.113, 3.114, 3.115, se muestra el comportamiento del enlace frente a la variación del coeficiente de dispersión de la fibra para las potencias de 0, 10 y 17 dBm (Anexo A, tablas 38, 39, 40).

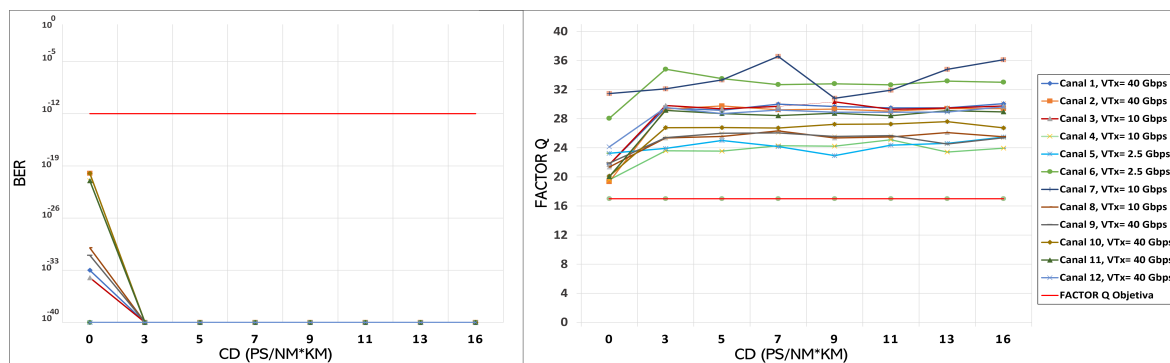


Fig 3.113: BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 0dBm

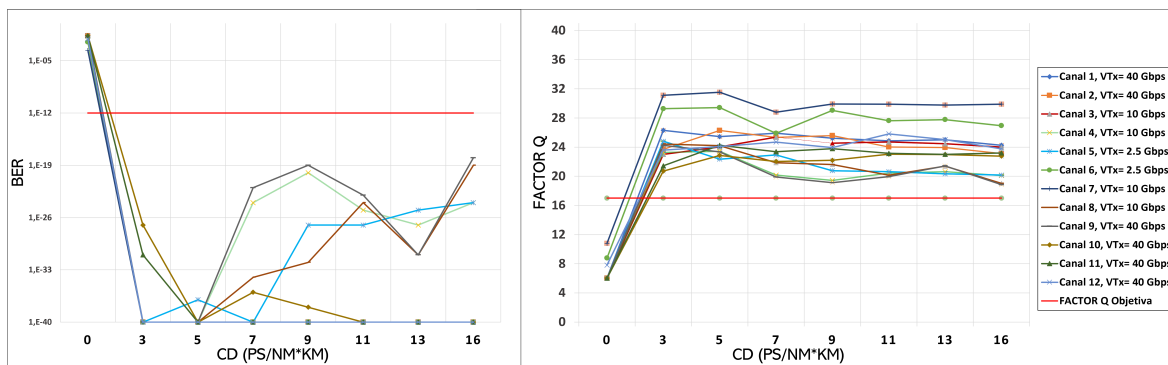


Fig 3.114: BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 10dBm

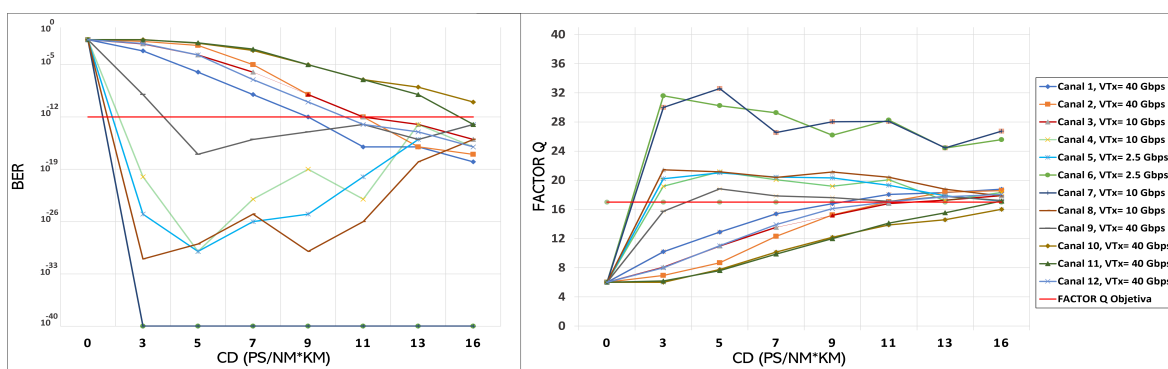


Fig 3.115: BER, Factor Q vs CD-Separación 100GHz-Potencia 17dBm

En las imágenes anteriores se observa que los niveles de potencia superiores a 0 dBm, los canales configurados presentan una respuesta deficiente cuando se encuentran por debajo de los 3 ps/nm*km, no obstante, a medida que se hace un aumento gradual del coeficiente de dispersión, el sistema empieza a estar acorde a los niveles de umbral definidos. En cuanto a la potencia límite de 17 dBm, se visualiza que los canales que mejor desempeño presentan son el 6 y 7, correspondientes a la menor velocidad de transmisión, mientras que el resto de canales necesitan de al menos 13 ps/nm*km para alcanzar los parámetros de calidad adecuados.

En la figura 3.116, se destaca la degradación que presenta el sistema cuando se establece una dispersión nula (línea verde), puesto que, determinar una fibra óptica con 0 de coeficiente de dispersión, aumenta considerablemente todos los efectos no lineales, incluso, para niveles altos de intensidad es más notoria la influencia de tener niveles bajos de dispersión. De esta manera, se concluye que para el esquema de modulación RZ-DQPSK, la variación de los niveles de dispersión influye en el aumento del fenómeno FWM, presentando valores adecuados solamente cuando la dispersión está en un rango mayor de 3 ps/nm*km y en algunos casos solamente cuando esta es igual a 16 ps/nm*km.

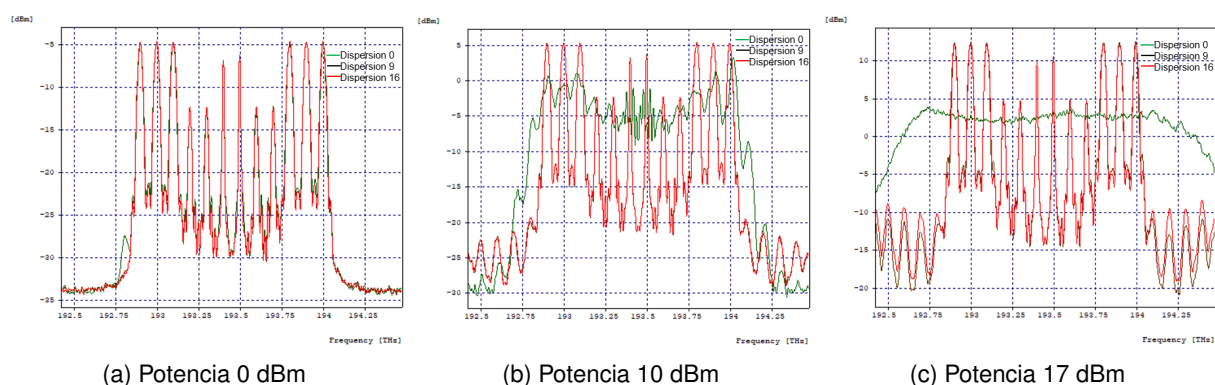


Fig 3.116: Variación del coeficiente de dispersión.

■ **Análisis del efecto FWM al variar la potencia con una separación de 50 GHz entre canales.**

Se configuran los 12 canales para una separación de 50 GHz, con el fin de determinar el comportamiento del sistema frente al aumento de potencia.

De esta manera, en la figura 3.117 (Anexo A, tabla 41) se observa el desempeño de los canales, analizando que ninguno de los que operan a 40 Gbps soporta este espaciamiento, sin importar que se esté simulando con una potencia pequeña de 0 dBm, lo que indica que el esquema de modulación RZ-DQPSK no es lo suficientemente robusto en sistemas de alta velocidad que necesiten emplear separaciones entre canales menores a 100 GHz. Por último, los canales 6 y 7 (2.5 Gbps) siguen entregando un comportamiento eficaz para cada una de las variaciones de potencia ejercidas.

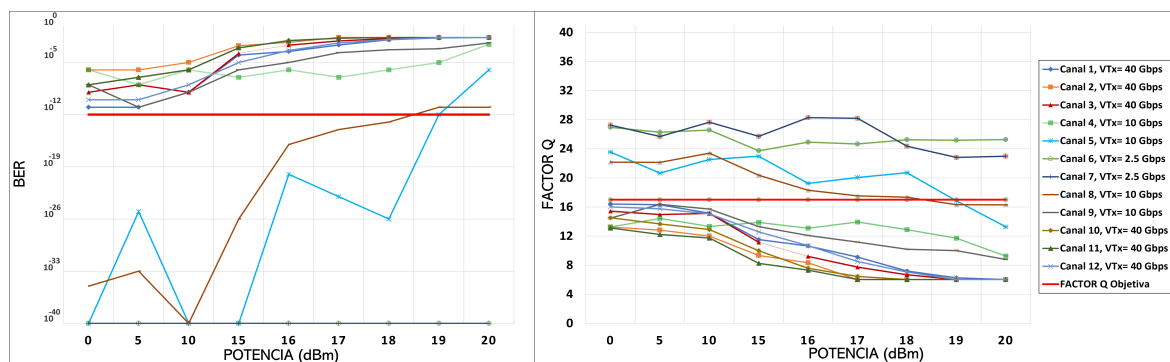


Fig 3.117: BER, Factor Q vs Potencia- Separación 50 GHz

En las figura 3.118 se observan los diagramas de ojo de los canales 193.15 THz, 193.20 THz y 193.25 THz, para una potencia de transmisión de 0 dBm, los cuales, en su región de marca de unos y ceros (parte superior e inferior del diagrama) exhiben bastante dispersión de datos como consecuencia del ruido presente en la señal y la separación entre canales, en cuanto a la región de la apertura del ojo (centro del diagrama) se muestra que hay una

ligera simetría en los cruces de tiempo y amplitud, lo que indica que la dispersión no está siendo un problema, sin embargo con el análisis de los parámetros OPM se comprueba que los canales de 40 Gbps no son aptos para una óptima transmisión de información.

En cuanto al espectro óptico (Figura 3.119), en los tres canales, se percibe una deformación de la señal (círculos negros) producto de la separación ejercida, dado que, la proximidad entre los canales genera un aumento en la ISI, la cual, es más perjudicial para este canal 3 (193.25 THz) debido a la interacción de este con los canales de 10 Gbps y 40 Gbps. Cabe resaltar la importancia de la posición relativa en frecuencia, puesto que, el canal 1 al estar ubicado en la frecuencia menor y en el extremo de la grilla espectral presenta un comportamiento mejor que los demás que operan a la misma velocidad de transmisión, sin embargo al observarse que ninguno de los canales de mayor velocidad funcionan adecuadamente con una separación de 50 GHz, no se realiza el análisis de los diagramas y espectro para el resto de estos canales.

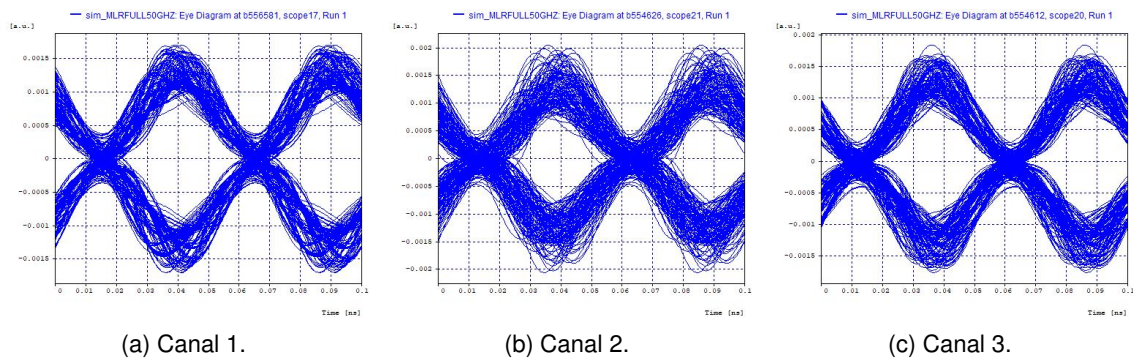


Fig 3.118: Salida modulada para los canales de 40 Gbps.

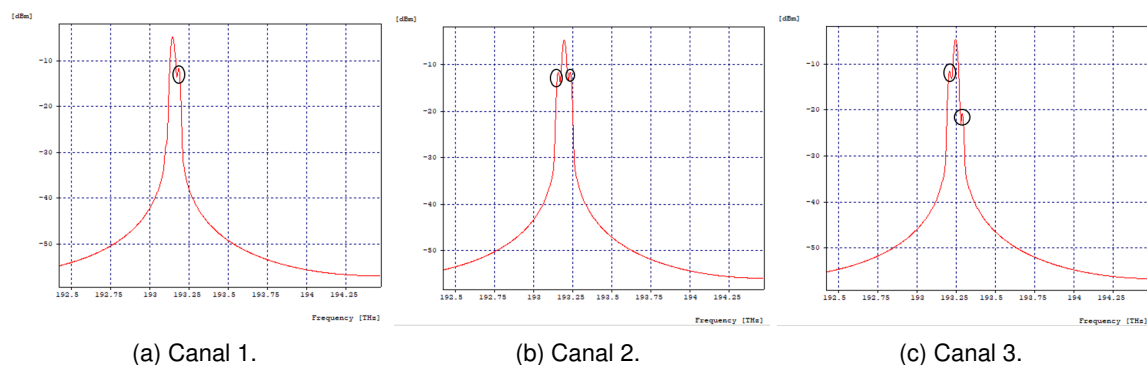


Fig 3.119: Espectro óptico en recepción en los canales de 40 Gbps.

■ **Análisis del efecto FWM al variar la potencia con una separación de 25 GHz entre canales.**

Se configuran los 12 canales para una separación de 25 GHz, con el fin de determinar el comportamiento del sistema frente al aumento en los niveles de potencia y la proximidad

aún mayor entre canales.

Como se puede observar en las gráfica 3.120 (Anexo A, tabla 42), no fue posible obtener resultados acordes a los parámetros de calidad establecidos, debido a la ocupación espectral del esquema de modulación RZ-DQPSK, el cual, para esta separación entre canal está afectando al formato de modulación básico NRZ-OOK, que en anteriores escenarios había presentado parámetros totalmente idóneos para cada uno de los niveles de potencia. De esta forma, se concluye que el sistema no es capaz de soportar un distanciamiento entre canal de 25 GHz para 10 canales implementados.

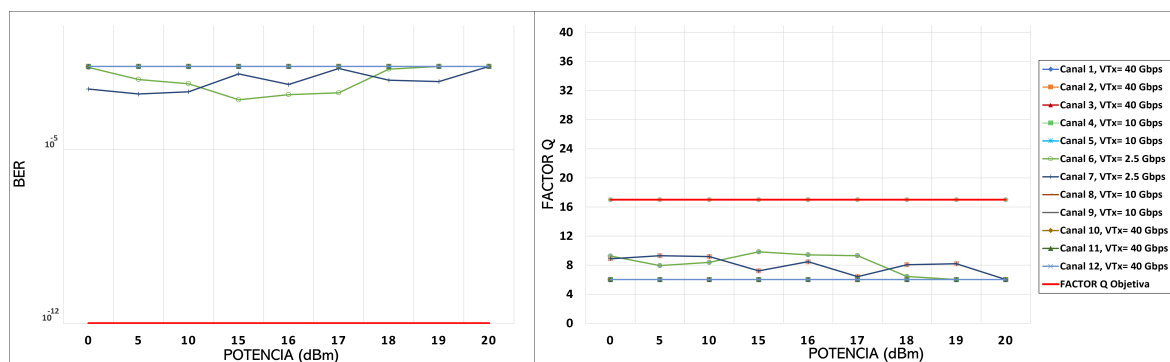


Fig 3.120: BER, Factor Q vs Potencia- Separación 25 GHz

Nota de Autor:

En este capítulo se abordaron los 6 casos de estudio ya mencionados en el capítulo 2, en el cual se define el modelo de red óptica MLR-DWDM mediante la combinación de velocidades de transmisión de 2.5, 10 y 40 Gbps y sus respectivos formatos de modulación avanzados. A partir de ello, se realizó la caracterización de requerimientos para poder implementar adecuadamente la arquitectura de red de cada caso de estudio, donde se evaluó el desempeño de dicho modelo de red con diferentes formatos de modulación avanzados en presencia del fenómeno FWM, teniendo en cuenta el aumento en el número de canales, penalidades de potencia, variación del coeficiente de dispersión cromática y la disminución de la separación entre canales cumpliendo así con el segundo objetivo específico definido para el presente trabajo de investigación.

3.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LOS FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS EVALUADOS, EN PRESENCIA DEL EFECTO FWM.

Una vez desarrollados los casos de estudio, basados en la implementación de los formatos de modulación avanzados RZ-DPSK y RZ-DQPSK que operan a una velocidad de transmisión de 40 Gbps, los cuales fueron configurados bajo las mismas condiciones (número de canales, potencia, separación) con el fin de comparar su comportamiento y definir cuál es el impacto que produce FWM en la red propuesta; se procede a consignar los resultados obtenidos respecto a parámetros como separación entre canales, máxima potencia alcanzada, entre otros, estos se muestran a continuación:

Formato de Modulación	Número de Canales	Espaciamiento Entre Canales (GHz)	BER por Canal	Factor Q por Canal (dB)	Potencia Máxima Alcanzada (dBm)
RZ-DPSK	6	100	1e-40	24.58	19
		50	1e-18	17.76	10
		25	0.022	6.87	<0
	10	100	1e-40	22.69	19
		50	0.022	6.02	<0
		25	0.022	6.02	<0
	12	100	1e40	22.65	17
		50	0.022	6.02	<0
		25	0.022	6.02	<0
RZ-DQPSK	6	100	1e-40	29.08	17
		50	1e-40	26.23	15
		25	1e-6	12.79	<0
	10	100	1e-40	29.26	17
		50	1e-12	17.03	0
		25	0.022	6.02	<0
	12	100	1e-40	30.19	17
		50	1e-11	16.42	<0
		25	0.022	6.02	<0

Tabla 3.13: Análisis comparativo de los formatos de modulación con respecto a los valores OPM.

De la tabla 3.13², se obtiene la gráfica 3.121, de la cual se puede concluir que:

²Los valores de BER y factor Q observados en la tabla 3.13 son los obtenidos mediante simulación para el canal 1 (40 Gbps) de cada caso de estudio a una potencia de 0 dBm. La potencia máxima alcanzada se extrajo del análisis realizado al variar este valor desde 0 dBm hasta 20 dBm, también para el canal 1 de la red

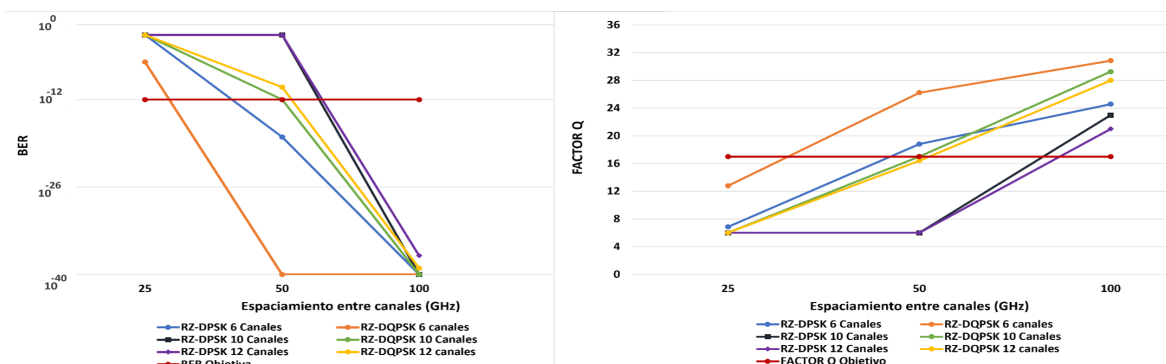


Fig 3.121: BER, Factor Q VS Separación entre canales – Potencia 0 dBm

- RZ-DPSK y RZ-DQPSK presentan un comportamiento ideal para una espaciamiento entre canales de 100 GHz, sin importar que el número de canales aumente, es decir, a esta separación el efecto FWM no es predominante para ninguno de los dos escenarios, lo cual le permite tener una transmisión óptima con 12 o más canales en la red.
- Debido al funcionamiento del formato RZ-DPSK, en donde este actúa sobre la fase de la señal y no sobre la amplitud, no se estimulan penalidades de potencia, lo cual fue comprobado mediante simulación, en donde para la mayoría de los casos de estudio que hacen uso de este esquema de modulación, se alcanza una potencia límite de 19 dBm, mientras que RZ-DQPSK solo permite operar correctamente hasta 17 dBm, teniendo en cuenta que mediante esta configuración, los datos enviados tanto en fase como en cuadratura dividen la potencia en transmisión a la mitad.
- La principal diferencia entre RZ-DPSK y RZ-DQPSK radica en la cantidad de información que se puede transmitir en un solo símbolo, lo que a su vez afecta el espaciamiento mínimo que se puede utilizar entre canales adyacentes. En el caso de RZ-DPSK, se transmite un bit por símbolo, lo que significa que el espaciamiento mínimo entre canales contiguos está limitado por la sensibilidad del receptor a la interferencia inter-canal. Por el contrario, con RZ-DQPSK, cada símbolo transmitido contiene información de dos bits diferentes, lo que indica que se pueden utilizar espaciamientos más pequeños entre canales. Lo mencionado anteriormente se comprueba mediante simulación, en donde, para una separación de 50 GHz, los casos de estudio que utilizan el formato de modulación RZ-DQPSK entregan resultados favorables para un número total de 6 o hasta 10 canales, mientras que bajo estas mismas circunstancias, RZ-DPSK se ve altamente afectado y esto se refleja en los valores de BER y factor Q obtenidos.
- Se observa que para ambos formatos de modulación, para una separación diferente a 100 GHz, al aumentar el número de canales, los valores de BER y factor Q se ven

gravemente afectados, haciendo inviable la transmisión, lo cual indica que el fenómeno FWM tendrá mayor repercusión en redes que tengan un número de canales mayor a 6, con espaciamentos menores a 100 GHz.

- RZ-DPSK y RZ-DQPSK no toleran una separación de 25 GHz a 40 Gbps, se observa que para todos los casos de estudio no se cumple con los parámetros de desempeño adecuados para garantizar la transmisión, es decir, al ser el espaciamento tan pequeño, los canales adyacentes se interfieren entre sí impidiendo que en recepción se pueda realizar una correcta demultiplexación, además el efecto FWM es más predominante y las señales adicionales generadas por este aumentan su amplitud, siendo detectadas en el receptor.

En la tabla 3.14 se resume el comportamiento de las soluciones basadas en los formatos de modulación avanzados, donde se evidencia que tanto RZ-DPSK como RZ-DQPSK permiten alcanzar velocidades de acceso de 40 Gbps, con un espaciamento adecuado entre canales. En el caso de RZ-DQPSK, este cuenta con una mejora distintiva respecto a RZ-DPSK, dado que duplica la capacidad de transmisión por canal, además de mejorar significativamente los parámetros de monitoreo óptico con un espaciamento entre canales más pequeño, es decir, tiene una mayor eficiencia espectral, sin embargo, cuenta con una fuerte dependencia a la potencia asignada en el transmisor y debido a sus componentes, presenta un alto grado de complejidad en su configuración. Ahora bien, RZ-DPSK es sumamente robusto frente a las degradaciones ópticas, es fácilmente configurable y el costo de su implementación es menor en comparación a RZ-DQPSK, tanto así que teniendo en cuenta el estado del arte estudiado, este esquema puede considerarse rentable frente a una migración de las redes a unas de mayor capacidad.

Por último, del análisis de todos los formatos estudiados (RZ/NRZ-OOK, RZ-DPSK, RZ-DQPSK) se concluye que para redes con canales con velocidades iguales o mayores a 40 Gbps, se hace necesario el uso de esquemas de modulación avanzados, debido a que los formatos básicos como RZ/NRZ-OOK no cuentan con las características necesarias para garantizar una transmisión óptima a estas tasas, además considerando el concepto de las redes MLR, se ratifica el hecho de implementar esquemas que permitan una convergencia a capacidades más altas, por ejemplo, RZ-DQPSK el cual en el contexto de investigación, es altamente estudiado para canales con velocidades de 100 Gbps, en conjunto con RZ-DPSK, para canales de 40 Gbps. También, en base a la literatura se encuentra que RZ-DPSK es casi tan económico como NRZ-OOK, ofreciendo mejoras significativas en la calidad de la señal, es decir, el uso de este formato es factible para los proveedores de servicios que busquen una mejor relación costo- eficiencia.

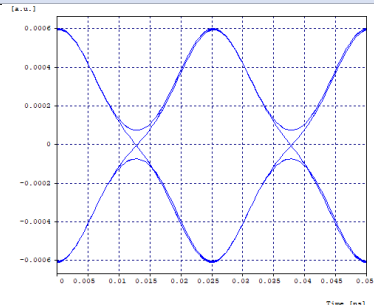
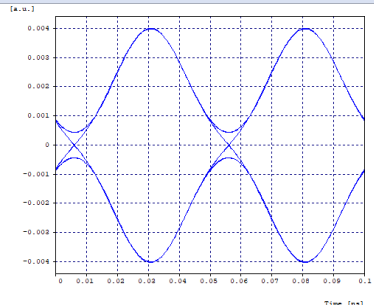
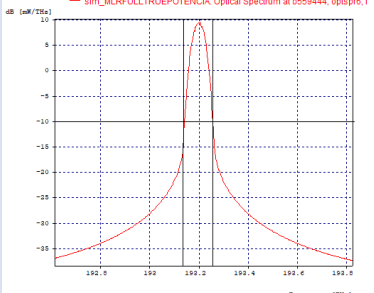
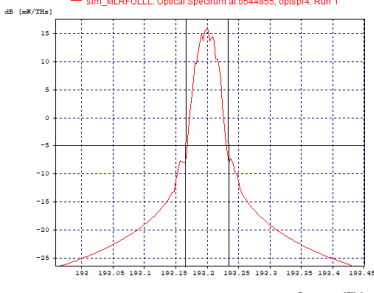
Características	RZ-DPSK	RZ-DQPSK
Diagrama del ojo característico		
Espectro óptico		
Tolerancia a las penalidades de potencia	No muy susceptible	Susceptible
Arquitectura de red alcanzada	NG-PON 40 Gbps de Acceso	NG-PON 40 Gbps de Acceso
Distancia de transmisión garantizada	100 Km	100 Km
Complejidad en la configuración	Complejo	Significativamente complejo
Tolerancia a FWM	Altamente tolerante	Altamente tolerante

Tabla 3.14: Análisis comparativo de los formatos de modulación RZ-DPSK y RZ-DQPSK

Nota de Autor:

Mediante la realización de esta última sección del presente capítulo, se analiza comparativamente el desempeño de los formatos de modulación avanzados, con el fin de determinar cual de estos presenta un mejor comportamiento al ser expuesto a las degradaciones provocadas por el efecto FWM, dando así cumplimiento al tercer objetivo específico propuesto para el presente trabajo de grado.

Capítulo 4

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y

TRABAJOS FUTUROS

En el presente trabajo de grado, se realizó el análisis del desempeño de distintos formatos de modulación en presencia del efecto FWM, para un entorno de red MLR-DWDM de tipo NG-PON2, que permitió ejecutar la comparación entre los resultados obtenidos para determinar que formato de modulación avanzado es el más apropiado frente a dichas consideraciones. En este capítulo, se presentan conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros relacionados con los aspectos más importantes que aportaron en la realización de los objetivos propuestos.

4.1. Conclusiones

- Los esquemas de modulación avanzados que presentan un mejor desempeño sobre una red MLR-DWDM son aquellos que tienen un espectro óptico más estrecho, puesto que, permiten obtener una mayor eficiencia espectral frente a una separación mínima entre canal (100 GHz, 50 GHz, 25 GHz). Sin embargo, para un aumento considerable en los niveles de potencia en transmisión, proporciona una mejor respuesta los que actúan sobre la fase y no sobre la amplitud, por lo que no estimulan penalidades de potencia, siendo más tolerante ante los efectos no lineales como FWM.
- A partir del análisis y los resultados obtenidos, se evaluó el desempeño de los formatos de modulación avanzados con respecto al fenómeno FWM, para determinar cual de las configuraciones aporta ventajas fundamentales para ser implementada en redes MLR-DWDM de tipo NG-PON2, donde fueron identificados en cada una de ellas los factores que más inciden negativamente en la calidad de la transmisión, de este modo, los resultados conseguidos pueden contribuir en decisiones futuras para el mejoramiento de dicha red y por lo cual, dependerá principalmente de las condiciones específicas del operador y del costo presupuestado para sus despliegues.
- Con los resultados obtenidos mediante simulación, se comprobó que el formato de

modulación RZ-DPSK presenta un mejor desempeño frente al aumento en los niveles de potencia en transmisión. No obstante, considerando un espaciamiento entre canal inferior a 50 GHz, el esquema de modulación RZ-DQPSK otorga una mejor tolerancia ante la ISI, dado que, tiene un espectro óptico más angosto. Además, RZ-DQPSK es más robusto a las variaciones del coeficiente de dispersión, dado que a diferencia de RZ-DPSK, puede alcanzar valores óptimos de BER y factor Q con un CD de 13 ps/nm*km, mientras que el formato RZ-DPSK necesita de valores de CD mayores o iguales a 16 ps/nm*km para poder funcionar correctamente.

- Al aumentar la potencia de transmisión se hace más evidente el efecto de las no linealidades, lo que resulta en el aumento de la tasa de error de bits, la distorsión en el diagrama de ojo y la aparición de nuevas componentes adicionales en frecuencia (FWM). Por lo cual, trabajar con niveles altos en potencia, en lugar de lograr una mejora significativa en la calidad de la señal recibida, se estaría excitando las degradaciones del sistema.
- Con cada simulación implementada, se observó que es necesario tener en cuenta una adecuada asignación en la posición relativa en frecuencia de cada canal para la red MLR-DWDM, debido a que, permite un mejor desempeño en el sistema, por lo cual, los canales presentan una respuesta adecuada cuando se les asigna una menor frecuencia en la grilla espectral comparado a cuando este se posiciona en una frecuencia alta, tal como sucedió con los canales de mayor capacidad de 40 Gbps en los casos de estudio 1 y 6, donde el canal 1 con una frecuencia menor presenta una mejor respuesta ante las variaciones de la red a diferencia del canal 6 con una mayor frecuencia.
- Los formatos de modulación avanzados RZ-DPSK y RZ-DQPSK con altas tasas de transmisión en sistemas MLR-DWDM se ven afectados normalmente por la dispersión cromática, por lo que, es necesario que haya una compensación del 100 % de este efecto lineal, de este modo, mejora la sensibilidad del receptor trabajando sobre los mínimos valores de los parámetros ópticos establecidos. Además, con respecto a la rejilla de Bragg, realiza la compensación en la frecuencia mitad del sistema MLR-DWDM, por lo cual, tendrá un distanciamiento equivalente entre los canales, de esta manera, no influye solamente a ciertas longitudes de onda.
- El aumento en el número de canales tiene una relación directamente proporcional con el throughput final de la red. Por lo cual, en cada uno de los casos de estudio al aumentar el número de canales con una separación de 100 GHz, la BER y factor Q están por encima de los parámetros ópticos requeridos, sin embargo, con una separación mínima entre canal, se presenta una degradación considerable.

4.2. Recomendaciones

Para llevar a cabo el análisis del desempeño de los formatos de modulación avanzados en presencia del efecto FWM en una arquitectura de red MLR-DWDM de tipo NG-PON2, es necesario considerar algunas recomendaciones que permitan la obtención y el análisis de los resultados, las cuales se presentan a continuación:

- Definir el alcance de la investigación, dado que, el desempeño de los formatos de modulación avanzados en una red MLR-DWDM varía con respecto a características del sistema como la posición relativa en frecuencia del canal, el acceso, throughput, entre otros.
- Realizar una búsqueda minuciosa de información teórica y práctica acerca de sistemas ópticos, esquemas de modulación, software de simulación y trabajos previos relacionados con el tema, para tener una base extensa de información a partir de la cual se pueda comenzar a desarrollar el trabajo de investigación.
- Establecer una metodología y escenarios de simulación, para garantizar una fácil obtención de resultados y que sean acordes al contexto de desarrollo del trabajo de investigación. Se debe tener en cuenta que la herramienta OptSim establece sus propias técnicas y estrategias de simulación.
- Determinar con que tipo de formatos de modulación se trabaja y bajo cuales configuraciones, analizando que variable se modifica, de tal forma que genere un cambio representativo en el desempeño de la red.
- Investigar la bibliografía disponible acorde al tema de interés para la realización del trabajo de grado, con el fin de ampliar el estado del arte y establecer opciones adecuadas para lograr el cumplimiento de los objetivos definidos.
- Tener como referencia la guía de OptSim y demás documentos que contienen información sobre los componentes y funcionalidades de esta herramienta, además de la explicación de los ejemplos que vienen por defecto.
- Garantizar primero que los resultados de los canales de velocidad más alta cumplan con los estándares establecidos, posteriormente, se realiza el ajuste a los canales de menor velocidad.
- Para la transmisión de los canales con altas tasas de transmisión (40 Gbps y 10 Gbps), tener presente que la posición en frecuencia del canal en la grilla espectral, puede afectar los resultados de BER y producir una degradación en el desempeño del canal.

4.3. Trabajos Futuros

Con el desarrollo del presente trabajo de grado, se identificaron nuevas propuestas de investigación, tales como:

- Evaluar el desempeño a nivel de simulación, de formatos de modulación avanzados, teniendo en cuenta los efectos no lineales como SPM y XPM para un entorno de red MLR-DWDM de tipo NG-PON2.
- Aprovisionamiento de tráfico dinámico en redes MLR-DWDM para tasas de transmisión de 10, 40 y 100 Gbps mediante el Conector Óptico Cruzado (OXC).
- Analizar el desempeño de formatos de modulación avanzados en presencia del fenómeno FWM en una red MLR-DWDM para una velocidad de 100 Gbps.
- Estudio de factibilidad técnico-económica para la implementación de una red MLR-DWDM basada en diferentes formatos de modulación avanzados.

REFERENCIAS

- [1] J. F. Paucar Moposita, "Diseño de una red de acceso NG-PON2 (40-gigabit-capable passive optical networks) para brindar servicio triple play a determinadas zonas urbanas de la parroquia de sangolquí." accepted: 2021-10-19. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21876>
- [2] Fiber to the x (FTTx). [Online]. Available: <https://www.alliedtelesis.com/co/en/solutions/fttx>
- [3] J. Ordóñez Mendieta, "Diseño y simulación de los efectos de FWM en una red UDWDM PON," accepted: 2015-08-25 Publication Title: Pontificia Universidad Católica del Ecuador. [Online]. Available: <http://repositorio.puce.edu.ec:80/handle/22000/8546>
- [4] J. C. Velásquez Micolta. (2014) Analysis of performances and tolerances of the second generation passive optical networks (NG-PON2) for FTTH systems. [Online]. Available: <https://babel.banrepcultural.org/digital/collection/p17054coll23/id/10/>
- [5] S. Iyer and S. P. Singh, "Spectral and power efficiency investigation in single- and multi-line-rate optical wavelength division multiplexed (WDM) networks," *Photonic Netw. Commun.*, vol. 33, no. 1, p. 39–51, feb 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11107-016-0618-3>
- [6] J. G. López Perafán, "Diseño de métodos cross layer cognitivos para redes de comunicación óptica de ráfagas (OBS)," p. 573, 2014. [Online]. Available: http://www.unicauca.edu.co/doctoradoce/publicaciones/Monografia_Lopez.pdf
- [7] M. M. Feres, "Estudo de redes ópticas heterogêneas associado à investigação de técnicas avançadas de monitoração de desempenho (OPM)," 2014. [Online]. Available: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18155/tde-11122014-160401/>
- [8] A. M. Marulanda Pungo and P. J. Paredes Cerón, "Análisis del desempeño a nivel de simulación, de amplificadores ópticos para un entorno de red (DWDM) (XGS-PON)." 2020. [Online]. Available: <https://revistas.ucc.edu.co/index.php/in/article/view/3113/2928>
- [9] A. F. E. Portilla, "Incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana (WDM)." 2008. [Online]. Available:

https://www.academia.edu/31284259/INCIDENCIA_DE_LOS_PARAMETROS_QUE_AFECTAN_LA_CALIDAD_DE_LA_SEÑAL_OPTICA_EN_EL_DESEMPEÑO_DE_UNA_RED_METROPOLITANA_WDM

- [10] How can test polarization mode dispersion (PMD) in the field. [Online]. Available: <https://www.technopediasite.com/2018/11/how-can-test-polarization-mode.html>
- [11] J. G. López Perafán, A. Toledo Tovar, H. Ordóñez, and J. P. Agredo, “Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red (WDM),” vol. 20, no. 31, pp. 23–35, 2011, publisher: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Section: Facultad de Ingeniería. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3914165>
- [12] D. Kozischek. (2019) Fiber deep and node+0 architectures: WDM transceiver parameters and transmission impairments. [Online]. Available: <https://n9.cl/vp3wv>
- [13] J. F. Grijalba Gómez and G. A. Gómez Agredo, “Análisis del desempeño de formatos de modulación en comunicaciones ópticas sobre redes WDM,” accepted: 2019-12-19 Publisher: Universidad del Cauca. [Online]. Available: <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/1916>
- [14] C. A. Ararat Mina and E. D. Paz Córdoba, “Análisis del desempeño de los formatos (RZ-NRZ)/ DQPSK a 10 y 40 Gbps en una red metropolitana (DWDM),” accepted: 2013-12-04 Publisher: Universidad del Cauca.
- [15] P. J. Winzer and R.-J. Essiambre, “Advanced modulation formats for high-capacity optical transport networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 12, pp. 4711–4728, 2006. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4063443>
- [16] D. B. Van Den, “Robust optical transmission systems: Modulation and Equalization,” 2008, publisher: Technische Universiteit Eindhoven. [Online]. Available: <https://n9.cl/n8gm4>
- [17] A. Lerín y de la Santísima Trinidad, “Modulación directa de diodos láser de alta velocidad para sistemas de transmisión coherente,” 2012, publisher: Universitat Politècnica de Catalunya. [Online]. Available: <https://recercat.cat/handle/2072/207356>
- [18] P. Winzer and R.-J. Essiambre, “Advanced optical modulation formats,” vol. 94, no. 5, pp. 952–985, 2006, conference Name: Proceedings of the IEEE. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1634536>
- [19] A. V. Trujillo Imbachí and A. D. Zemanate Trujillo, “Diseño de un módulo compensador de dispersión cromática en un entorno de co-simulación MATLAB/OPTSIM para una red DWDM a 10 Gbps,” accepted: 2019-11-20 Publisher: Universidad del Cauca. [Online]. Available: <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/1642>

- [20] (2003) OSNR and dispersion-based design > WDM network design | cisco press. [Online]. Available: <https://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=30886&seqNum=8>
- [21] G. A. Gómez Agredo, "Mejora de la eficiencia espectral en redes DWDM a 40 Gbps a través de los formatos de modulación avanzados DPSK y DQPSK," accepted: 2019-12-04 Publisher: Universidad del Cauca. [Online]. Available: <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/1780>
- [22] OptSim for optical communication | synopsys photonic solutions. [Online]. Available: <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/optsim/single-mode-network.html>
- [23] MATLAB and simulink product families get deep learning capabilities. [Online]. Available: <https://www.eletimes.com/matlab-and-simulink-product-families-get-deep-learning-capabilities>
- [24] OptiluX. [Online]. Available: <https://optilux.sourceforge.io/>
- [25] Renee Morgan. Optiwave optisystem download free for windows 7, 8, 10 | get into pc. Section: Network. [Online]. Available: <https://getintopc.today/optiwave-optisystem-free-download/>
- [26] S. Castilla Ibeas, "Planificación y diseño de redes ópticas WDM," Septiembre 2017. [Online]. Available: <https://oa.upm.es/49901/>
- [27] B. L. Calle Arriaga, "Diseño de una red GEPON para la implementación en la ciudad de Guayaquil, estudio de viabilidad técnico, económico y legal," p. 220, 2010. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2368/11/UPS-GT000131.pdf>
- [28] E. M. Rivera Castaño and A. N. Girón Zúñiga, "Medida de la eficiencia espectral de una arquitectura de red heterogénea de tipo NG-PON para un régimen de propagación cuasilineal," accepted: 2022-11-03 Publisher: Universidad del Cauca. [Online]. Available: <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/5559>
- [29] A. A. Burbano Coral and M. A. Figueroa Valenzuela, "Análisis de desempeño en un enlace de bajada XGS-PON con amplificación híbrida HOA," accepted: 2022-11-03 Publisher: Universidad del Cauca. [Online]. Available: <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/5549>
- [30] Soluciones TI | gestión de proyectos TI | infraestructura TI. [Online]. Available: <https://bitmexico.com.mx/>
- [31] FSAN | full service access network. [Online]. Available: <https://www.fsan.org/>

- [32] M. Fahmid-ul Islam, M. A. H. Chowdhury, and M. Hussain, "Performance analysis of a DWDM optical transport network with crosstalk," accepted: 2010-12-13. [Online]. Available: <http://dSPACE.bracu.ac.bd/xmlui/handle/10361/702>
- [33] Q. Zhang, C. Zhang, W. Jin, and K. Qiu, "Enabled scalable and privacy wavelength division multiplexing-radio over fiber system based on optical virtual private networks," *Optical Engineering*, vol. 53, no. 6, p. 066105, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/1.OE.53.6.066105>
- [34] J. Šajgalíková, J. Litvik, and M. Dado, "Simulation of FWM effects in WDM systems with various modulation formats," in *2016 ELEKTRO*, 2016, pp. 92–95. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7512042>
- [35] I. C. Celihueta, "Diseño e implementación de un sistema WDM mediante equipamiento de Fibernet," Julio 2015. [Online]. Available: <https://oa.upm.es/38180/>
- [36] A. Vyas and D. N. Agrawal, "Radio over fiber : Future technology of communication," 2012.
- [37] S. Kilaka and H. Sahu, "Performance analysis of optical WDM networks," 2012. [Online]. Available: <http://ethesis.nitrkl.ac.in/3772/>
- [38] G.694.2 : Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda: Plan de multiplexación por división aproximada de longitud de onda. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2-200312-I/es>
- [39] T. Freir, "Wavelength drift in CWDM systems: Impact and measurement," 2017. [Online]. Available: <https://arrow.tudublin.ie/engmas/54>
- [40] S. Bindhaiq, A. S. M. Supaát, N. Zulkifli, A. B. Mohammad, R. Q. Shaddad, M. A. Elmagzoub, and A. Faisal, "Recent development on Time and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation Passive Optical Network Stage 2 (NG-PON2)," *Opt. Switch. Netw.*, vol. 15, no. C, p. 53–66, jan 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.osn.2014.06.007>
- [41] Z. Abdellaoui, Y. Dieudonne, and A. Aleya, "Design, implementation and evaluation of a fiber to the home (FTTH) access network based on a Giga Passive Optical Network GPON," vol. 10, p. 100058, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590005621000060>
- [42] A. Abad and C. Paúl, "Análisis de factibilidad de implementación de una red con tecnología PON para la ciudad de Biblián, provincia del Cañar," p. 124, 2011. [Online]. Available: <https://dSPACE.ups.edu.ec/handle/123456789/4203>
- [43] H. S. Abbas and M. A. Gregory, "The next generation of passive optical networks: A review," vol. 67, pp. 53–74, 2016. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804516000989>

- [44] K. Mat Sharif, N. A. Ngah, A. Ahmad, K. Khairi, Z. Manaf, and D. Tarsono, "Demonstration of XGS-PON and GPON Co-existing in the same passive optical network," in *2018 IEEE 7th International Conference on Photonics (ICP)*, 2018, pp. 1–3. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8533167>
- [45] S. P. Singh, S. Sengar, R. Bajpai, and S. Iyer, "Next-generation Variable-line-rate optical WDM networks: Issues and Challenges," *J. Opt. Commun.*, vol. 34, no. 4, pp. 331–350, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1515/joc-2013-0050>
- [46] P. Chowdhury, M. Tornatore, A. Nag, E. Ip, T. Wang, and B. Mukherjee, "On the design of energy-efficient mixed-line-rate (MLR) optical networks," vol. 30, no. 1, pp. 130–139, 2012. [Online]. Available: https://www.academia.edu/4142124/On_the_Design_of_Energy_Efficient_Mixed_Line_Rate_MLR_Optical_Networks
- [47] G. D. Cárdenas Carrera, "Estudio y diseño de la red que permita la integración de la tecnología de multiplexación DWDM con la técnica de transmisión SDH, para prestar servicios de voz, datos y video, en la Región 2 (enlaces Pichincha - Napo - Orellana) de la Corporación Nacional de Telecomunicaciones CNT S.A." accepted: 2010-11-30. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2574>
- [48] P. Martín Ramos, "Complejos de erbio (III) e iterbio (III) con ligandos fluorados para aplicaciones fotónicas en telecomunicaciones: EDFAs y YEDFAs," accepted: 2013-04-24. [Online]. Available: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/2635>
- [49] Conexión cruzada óptica (OXC). [Online]. Available: <http://m.opticomfiber.com/info/optical-cross-connect-oxc-34257596.html>
- [50] A. Nag, M. Tornatore, and B. Mukherjee, "Optical network design with mixed line rates and multiple modulation formats," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 4, pp. 466–475, 2010. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5286317>
- [51] S. Ferdousi, A. Nag, A. S. Reaz, M. Tornatore, and B. Mukherjee, "Mixed-line-rate optical network design with wavebanding," vol. 9, no. 4, pp. 286–296, 2012. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427712000367>
- [52] A. Nag and M. Tornatore, "Impact of channel spacing on the design of a mixed-line-rate optical network," in *2009 IEEE 3rd International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems (ANTS)*, 2009, pp. 1–3. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5409872>
- [53] R. Róka and M. Mokrání, "Performance analysis and selection of wavelength channels based on the FWM effect influence in optical DWDM systems," vol. 118, p. 102558, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X22000533>

- [54] W. E. Castellanos Hernández, "Utilización de herramientas software para el modelado y la simulación de redes de comunicaciones." [Online]. Available: https://www.academia.edu/8016312/Utilizaci3n_de_herramientas_software_para_el_modelado_y_la_simulaci3n_de_redes_de_comunicaciones
- [55] S. TELNET Redes Inteligentes, "Fibra óptica para NGN-Dispersión Cromática y PMD," 2009. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/doc/261068039/Whitepaper-Fibra-Optica-Para-NGN-dispersion-Cromatica-y-PMD-Telnet-RI-ES>
- [56] A. Pinto García and F. Cabezas. (2014) Sistemas de comunicaciones ópticas. [Online]. Available: <https://www.coursehero.com/file/55674072/Sistemas-de-comunicaci3%B3nes-%C3%B3pticaspdf/>
- [57] S. P. Singh and N. Singh, "Nonlinear effects in optical fibers: Origin, management and applications," vol. 73, pp. 249–275, 2007. [Online]. Available: <http://www.jpier.org/PIER/pier.php?paper=07040201>
- [58] H. A. Guano Hidalgo and P. C. Molina Avalos, "Estudio y simulación de los efectos no lineales -Scattering Estimulado de Brillouin (SBS) y Scattering Estimulado de Raman (SRS)," accepted: 2013-06-27 Publisher: QUITO/EPN/2013. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6422>
- [59] J. A. Mojica Cáceres, "Modelamiento de un algoritmo para la asignación de longitudes de onda en un multiplexor DWDM minimizando el proceso de mezclado de la cuarta onda FWM (Four Wave Mixing)," vol. 4, no. 1, pp. 38–52, 2013, number: 1. [Online]. Available: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/REDES/article/view/6417>
- [60] F. Ali, F. Muhammad, U. Habib, Y. Khan, and M. Usman, "Modeling and minimization of FWM effects in DWDM-based long-haul optical communication systems," vol. 41, no. 1, pp. 36–46, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11107-020-00913-9>
- [61] M. Singh and V. Sharma, "Investigation of four wave mixing effect at different transmission power levels and channel spacing," 2015. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/283618341_Investigation_of_Four_Wave_Mixing_Effect_at_Different_Transmission_Power_Levels_and_Channel_Spacing
- [62] V. Sasikala and K. Chitra, "Effects of cross-phase modulation and four-wave mixing in DWDM optical systems using RZ and NRZ signal," in *Optical And Microwave Technologies*, ser. Lecture Notes in Electrical Engineering, G. Gnanagurunathan, R. Sangeetha, and K. U. Kiran, Eds. Springer, 2017, pp. 53–63. [Online]. Available: https://link-springer-com.acceso.unicauca.edu.co/chapter/10.1007/978-981-10-7293-2_6
- [63] S. Iyer and S. P. Singh, "Investigation of launch power and regenerator placement effect on the design of mixed-line-rate (MLR) optical WDM networks," vol. 40, no. 1, pp. 14–30, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11107-017-0714-z>

- [64] A. M. Ortiz, "Comunicaciones ópticas de banda ancha con fase modulada: Estudio de la degradación de la señal óptica," 2013.
- [65] A. Willner, X. Wu, and J.-Y. Yang, "Optical performance monitoring: Perspectives and challenges," in *Optical Performance Monitoring*, C. C. K. Chan, Ed. Academic Press, 2010, pp. 1–19. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123749505000018>
- [66] G.697 : Supervisión óptica para sistemas de multiplexación por división en longitud de onda densa. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.697-201611-I/es>
- [67] W. E. Castellanos Hernández, "Utilización de herramientas software para el modelado y la simulación de redes de comunicaciones." [Online]. Available: https://www.academia.edu/8016312/Utilizaci%C3%B3n_de_herramientas_software_para_el_modelado_y_la_simulaci%C3%B3n_de_redes_de_comunicaciones
- [68] MathWorks - productos y servicios. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/products.html>
- [69] A. P. Alarcon, "Optisystem informe." [Online]. Available: https://www.academia.edu/40579030/Optisystem_informe
- [70] M. Piera, *Modelado y simulación. Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios*. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica, 2003. [Online]. Available: <https://n9.cl/reihv>
- [71] G. A. Muñoz Castro, "DWDM networks when using Raman configurations with DCF fibers," vol. 15, no. 41, pp. 27–43, 2017, number: 41. [Online]. Available: https://www.icesi.edu.co/revistas/index.php/sistemas_telematica/article/view/2454
- [72] V. Micolta and J. Camilo, "Analysis of performances and tolerances of the second generation passive optical networks (NG-PON2) for FTTH systems," 2014. [Online]. Available: <https://n9.cl/57p6zy>
- [73] G.694.1 : Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda: Plan de frecuencias con multiplexación por división de longitud de onda densa. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-202010-I/es>
- [74] J. D. Bolaños Pérez and J. S. León Escobar, "Impacto sobre la densidad espectral de información (ISD) en el cambio de una red DWDM de 10 Gbps a 40 Gbps implementando los formatos CSNRZ-OOK y CSRZ-OOK," accepted: 2019-11-19 Publisher: Universidad del Cauca. [Online]. Available: <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/1566>
- [75] S. Winder, *Analog and Digital Filter Design*. Elsevier, 2002. [Online]. Available: <https://n9.cl/3t894>

- [76] G. A. González Parra and H. A. López Mazorra, "Análisis a nivel de simulación del desempeño en la migración de una red óptica SLR-DWDM a una red óptica MLR-DWDM implementando diferentes arquitecturas de red de banda ancha FTTx," accepted: 2022-11-15T20:28:01Z Publisher: Universidad del Cauca. [Online]. Available: <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/5628>
- [77] G.sup39 : Consideraciones sobre diseño e ingeniería de sistemas ópticos. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.Sup39-201602-l/es>
- [78] Narrow bandwidth laser sensing (FWHM). [Online]. Available: <https://lasers4lab.com/narrow-bandwidth-laser-sensing-fwhm/>
- [79] G.989.1 : Redes ópticas pasivas con capacidad de 40 gigabits (NG-PON2): Requisitos generales. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.1-201303-l/es>
- [80] N. Córdoba Valdés and G. A. Muñoz Castro, "Análisis comparativo en el desempeño de una red DWDM a 10 Gbps al usar configuraciones RAMAN con fibras DCF," accepted: 2019-11-15 Publisher: Universidad del Cauca. [Online]. Available: <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/1521>