

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS EN  
PRESENCIA DE LOS EFECTOS DE SCATTERING SRS Y SBS, EN UNA  
ARQUITECTURA DE RED MLR DE TIPO NG-PON2.**



**Trabajo de grado**

**LESLY TATIANA GÓMEZ INSUASTI**

**DAVID ANDRÉS GÜENDICA QUINTERO**

**Director: MsC. ALEJANDRO TOLEDO TOVAR**

**Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT)  
Popayán, 2023**

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS EN  
PRESENCIA DE LOS EFECTOS DE SCATTERING SRS Y SBS, EN UNA  
ARQUITECTURA DE RED MLR DE TIPO NG-PON2.**

**LESLY TATIANA GÓMEZ INSUASTI**

**DAVID ANDRÉS GÜENDICA QUINTERO**

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

**Director**

**MsC. ALEJANDRO TOLEDO TOVAR**

**Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT)  
Popayán, 2023**

## DEDICATORIAS

*Te doy gracias, Dios, por este logro y por la maravillosa familia que me has concedido, la cual ha desempeñado un papel esencial en mi éxito.*

*A mi madre Flor Miriam Insuasti, la mujer que me ha enseñado y transmitido los valores que me han permitido convertirme en la valiente mujer que soy hoy en día. A ti, mamá, te agradezco profundamente por tu apoyo constante a lo largo de mi camino, por nunca permitir que me rinda ante la adversidad y por estar a mi lado en cada momento. Este logro es, en gran parte, un tributo a ti.*

*A mi padre, Luis Germán Gómez, el hombre cuyo amor y entrega han infundido en mí la fuerza necesaria para perseguir mis metas cada día. A mis hermanas, Daniela y Mayoli, y a mi querida sobrina Lina, quienes me han acompañado en cada paso de este camino, brindándome su apoyo inquebrantable. A mi pequeña Fátima, que, con tan solo 8 meses de vida, me ha dado aún más razones para esforzarme y proporcionar lo mejor tanto para ella como para mi familia.*

*Por último, a mis leales amigos de cuatro patas, y en especial a Mylo, por su compañía incondicional durante mis días y noches de estudio intensivo.*

*Lesly Tatiana Gómez Insuasti*

*“Memento mori e la gloria di questo successo proviene da Dio”*

*David Andrés Guendica Quintero*

# AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos y estima al MsC. Alejandro Toledo Tovar, director del trabajo de grado, por su orientación y su apoyo en el proceso.

Al comité del programa de pregrado en Electrónica y Telecomunicaciones por sus aportes y recomendaciones, al grupo de Investigación de nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones – GNTT, por su colaboración en el presente trabajo y a todos los ingenieros y profesores que hicieron parte del proceso en la institución y que se recordarán con mucha alegría y aprecio.

Así mismo, desean expresar un agradecimiento muy especial a sus amigos Karen, Daniela, Leyder, Brandon y demás que, por su inquebrantable apoyo, constante acompañamiento, y paciencia incondicional, sin los cuales no habría sido posible culminar este proceso con tanta satisfacción

# CONTENIDO

DEDICATORIAS.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABLAS.....	X
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	XII
INTRODUCCIÓN.....	XIV
ABSTRACT.....	XVI
1 GENERALIDADES SOBRE SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS.....	1
1.1 SISTEMAS WDM.....	1
1.1.1 CWDM.....	3
1.1.2 DWDM.....	3
1.2 REDES DE ACCESO ÓPTICO.....	4
1.2.1 Tecnología FTTx.....	5
1.2.2 Red óptica pasiva (PON).....	6
1.3 VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA ÚNICA (SLR).....	10
1.4 VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA MIXTA (MLR).....	10
1.5 FORMATOS DE MODULACIÓN.....	12
1.5.1 NRZ-OOK.....	13
1.5.2 RZ-OOK.....	14
1.5.3 RZ-DPSK.....	15
1.5.4 RZ-DQPSK.....	16
1.6 EFECTOS DE DEGRADACIÓN ÓPTICA.....	17
1.6.1 Efectos lineales.....	19
1.6.2 Efectos no lineales.....	20
1.7 MONITOREO DE DESEMPEÑO ÓPTICO.....	25
1.7.1 Parámetros de monitoreo óptico.....	25
2 ELECCIÓN DE ENTORNO, METODOLOGÍA Y COMPROBACIÓN DEL MODELO BACK TO BACK.....	30
2.1 HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN DE REDES ÓPTICAS.....	30
2.1.1 OptSim.....	30
2.1.2 OptiSystem.....	31
2.1.3 OptiFiber 2.1.....	32

2.2	METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN .....	34
2.2.1	Diseño del modelo conceptual .....	37
2.2.2	Definición, construcción y validación del modelo general de simulación	37
3	ESCENARIOS DE SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE CASOS DE ESTUDIO .....	56
3.1	DEFINICIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	56
3.2	IMPLEMENTACIÓN Y SIMULACIÓN DE LOS ESCENARIOS PLANTEADOS	58
3.2.1	Ejecución de las simulaciones .....	58
3.3	CASOS DE ESTUDIO .....	60
3.3.1	Parámetros para análisis de SRS .....	60
3.3.2	Parámetros para análisis de SBS .....	61
3.4	SIMULACIÓN, PROCESO Y RESULTADOS .....	62
3.5	RED MLR DE TIPO NG-PON2 BASADA EN FORMATOS DE MODULACION NRZ-OOK, RZ-OOK y RZ-DPSK, PARA ANÁLISIS SRS. ....	64
3.5.1	Caso de estudio 1: Escenario 1 – SRS OFF, Fabricante Corning, Separación entre canales de 100 GHz, 4 canales de 2.5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 2 canales de 40 Gbps. ....	64
3.5.2	Caso de estudio 2: Escenario 1 – SRS ON, Fabricante Corning, Separación entre canales de 100 GHz, 4 canales de 2.5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 2 canales de 40 Gbps. ....	69
3.6	RED MLR DE TIPO NG-PON2 BASADA EN FORMATOS DE MODULACION NRZ-OOK, RZ-OOK y RZ-DPSK PARA ANÁLISIS SBS. ....	74
3.6.1	Caso de estudio 1: Escenario 1 – SBS OFF, Fabricante Corning, Separación entre canales de 100 GHz, 4 canales de 2.5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 2 canales de 40 Gbps, ancho de línea 100 MHz. ....	74
3.6.2	Caso de estudio 2: Escenario 1 – SBS ON, Fabricante Corning, Separación entre canales de 100 GHz, 4 canales de 2.5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 2 canales de 40 Gbps, ancho de línea 100 MHz. ....	79
4	ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LOS FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS EN PRESENCIA DE LOS EFECTOS DE SCATTERING SRS Y SBS.....	85
4.1	ANÁLISIS COMPARATIVO PARA SRS .....	85
4.1.1	Comparación SRS ON Escenario 1 y Escenario 2 para una fibra óptica Corning con separación de canal de 100 GHz.....	86
4.1.2	Comparación SRS ON Escenario 1 y Escenario 2 para una fibra óptica Furukawa con separación de canal de 100 GHz.....	90
4.2	ANÁLISIS COMPARATIVO PARA SBS.....	93
4.2.1	Comparación SBS ON Escenario 1 y Escenario 2 para una fibra óptica Corning con separación de canal de 100 GHz y Ancho de línea 100 MHz.....	94

4.2.2	Comparación SBS ON Escenario 1 y Escenario 2 para una fibra óptica Furukawa con separación de canal de 100 GHz y Ancho de línea de 100 MHz...	98
4.2.3	Comparación del comportamiento de la red MLR con la variación del ancho de línea de la señal de 100, 300 y 500 MHz.....	101
4.2.4	Análisis comparativo de los formatos de modulación RZ-DPSK vs RZ-DQPSK a 40 Gbps en presencia de los efectos no lineales SRS y SBS identificados en las fibras Corning y Furukawa. ....	104
5	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	107
5.1	CONCLUSIONES.....	107
5.2	RECOMENDACIONES.....	108
5.3	TRABAJOS FUTUROS.....	109
	REFERENCIAS .....	110
	ANEXOS.....	115

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Esquema básico del funcionamiento de un sistema WDM. Tomado de [5].	2
Figura 1.2: Jerarquía de red global. Adaptado de [5].	2
Figura 1.3: Regiones de longitud de onda. Adaptado de [5].	4
Figura 1.4: Topologías de Red FTTx. Tomado de [19].	5
Figura 1.5: Distribución espectral de las tecnologías PON. Tomado de [30].	9
Figura 1.6: Coexistencia de redes PON e implementación de servicios. Adaptado de [31].	9
Figura 1.7: Esquema SLR-WDM. Tomado de [21].	10
Figura 1.8: Esquema general de una red MLR. Tomado de [41].	12
Figura 1.9: Diagrama en bloques del transmisor y espectro óptico NRZ-OOK. Tomado de [43].	14
Figura 1.10: Diagrama en bloques RZ-OOK. Tomado de [45].	15
Figura 1.11: Diagrama en bloques del transmisor RZ-DPSK. Tomado de [43].	15
Figura 1.12: Esquema de la modulación DQPSK. Tomado de [46].	16
Figura 1.13: Diagrama de constelación de una modulación DQPSK. Tomado de [46].	16
Figura 1.14: Diagrama en bloques del transmisor RZ-DQPSK. Tomado de [47].	17
Figura 1.15: Efectos de degradación óptica en un sistema de telecomunicaciones. Adaptado de [51].	17
Figura 1.16: Dispersión de Rayleigh. Tomado de [49].	19
Figura 1.17: Principios de dispersión. Tomado de [49].	19
Figura 1.18: Efectos lineales.	19
Figura 1.19: Proceso de generación del efecto SBS. Tomado de [59].	23
Figura 1.20: Efectos no lineales.	23
Figura 1.21: Visualización de efectos no lineales de segundo y tercer orden.	25
Figura 1.22: Niveles de OSNR para transmisiones WDM con múltiples etapas. Tomada de [64].	27
Figura 1.23: Propiedades fundamentales del diagrama de ojo. Adaptada de [66].	28
Figura 2.1: Entorno de simulación software OptSim. Tomado de [69].	31
Figura 2.2: Entorno de simulación OptSystem. Tomada de [63].	32
Figura 2.3: Entorno de simulación OptiFiber. Tomado de [70].	33
Figura 2.4: Diagrama de flujo del modelo de simulación.	36
Figura 2.5: Diagrama funcional del proceso de una red de distribución en fibra óptica.	37
Figura 2.6: Estados de modulador Mach-Zehnder de dos brazos. Tomado de [75].	39
Figura 2.7: Configuraciones para distintas etapas de amplificación.	43
Figura 2.8: Modelo general de simulación.	46
Figura 2.9: Fuente de datos lógicos.	47
Figura 2.10: Driver NRZ rectangular.	48
Figura 2.11: Driver RZ rectangular.	48
Figura 2.12: Láser CW tipo Lorentziano.	48
Figura 2.13: Modulador Mach-Zehnder.	49
Figura 2.14: Modulador de amplitud externo.	49
Figura 2.15: Componentes de la ODN.	49
Figura 2.16: Módulo SMF-28e.	49
Figura 2.17: Módulo compensador de dispersión cromática ideal.	50

Figura 2.18: Módulo para fibra de última milla.....	50
Figura 2.19: OSNR real para un canal.....	53
Figura 3.1: Variables de estimulación de SRS en OptSim.....	57
Figura 3.2: Opciones de control avanzado.....	58
Figura 3.3: Variables de estimulación de SBS en OptSim.....	58
Figura 3.4: Nivel de supresión de FWM en dB.....	59
Figura 3.5: Frequency Domain para parámetros generales del sistema.....	59
Figura 3.6: Time Domain para parámetros generales del sistema.....	60
Figura 3.7: Diagrama general de escenarios de simulación y casos de estudio.....	62
Figura 3.8: Diagrama espectral 8 canales, 15 dBm de penalidades de potencia. (a) Escenario 1 (b) Escenario 2.....	63
Figura 3.9: Diagrama espectral 8 canales SRS OFF, 15 dBm - 20 dBm - 25 dBm a la salida del amplificador de potencia.....	64
Figura 3.10: Diagrama espectral 8 canales SRS OFF, 15 dBm - 20 dBm - 25 dBm a la salida del módulo de fibra óptica de 40 km.....	65
Figura 3.11: Diagrama espectral 8 canales SRS OFF, 15 dBm - 20 dBm - 25 dBm a la salida del módulo compensador de dispersión cromática.....	65
Figura 3.12: Diagrama espectral 8 canales SRS ON, 15 dBm - 20 dBm - 25 dBm a la salida del amplificador de potencia.....	69
Figura 3.13: Diagrama espectral 8 canales SRS ON, 15 dBm - 20 dBm - 25 dBm a la salida del módulo de fibra óptica de 40 km.....	69
Figura 3.14: Diagrama espectral 8 canales SRS ON, 15 dBm - 20 dBm - 25 dBm a la salida del módulo compensador de dispersión cromática.....	70
Figura 3.15: Diagrama espectral 8 canales SBS OFF, 15 dBm - 23 dBm - 29 dBm a la salida del amplificador de potencia.....	74
Figura 3.16: Diagrama espectral 8 canales SBS OFF, 15 dBm - 23 dBm - 29 dBm - 37dBm a la salida del módulo de fibra óptica de 40 km.....	75
Figura 3.17: Diagrama espectral 8 canales SBS OFF, 15 dBm - 23 dBm - 29 dBm - 37dBm a la salida del módulo compensador de dispersión cromática.....	76
Figura 3.18: Diagrama espectral 8 canales SBS ON, 15 dBm - 23 dBm - 29 dBm a la salida del amplificador de potencia.....	79
Figura 3.19: Diagrama espectral 8 canales SBS ON, 15 dBm - 23 dBm - 29 dBm - 37dBm a la salida del módulo de fibra óptica de 40 km.....	80
Figura 3.20: Diagrama espectral 8 canales SBS ON, 15 dBm - 23 dBm - 29 dBm - 37dBm a la salida del módulo compensador de dispersión cromática.....	81

# LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Comparación entre técnicas de multiplexación. Adaptado de [10] [11] [13] [15] [16].....	4
Tabla 1.2. Principales estándares PON de nueva generación. Adaptado de [21] [25] [26]. .....	9
Tabla 1.3: Degradaciones ópticas. Tomado de [52]. .....	18
Tabla 1.4: Principales características de SRS y SBS. Adaptado de [56] [59]. .....	24
Tabla 1.5: Correspondencia aproximada entre Factor Q y BER.....	26
Tabla 2.1: Comparación de herramientas de simulación.....	34
Tabla 2.2: Características de tecnologías de láser. Adaptado de [74]. .....	38
Tabla 2.3: Resumen de formatos de modulación usados en los escenarios de simulación.....	41
Tabla 2.4: Fibras ópticas comerciales disponibles en el software OptSim. Tomado de [77]. .....	42
Tabla 2.5: Plan de frecuencias para 8 canales, separación de 50 y 100 GHz.....	43
Tabla 2.6: Etapas y módulos del escenario general .....	45
Tabla 2.7: Parámetros y características generales del escenario de simulación. ....	46
Tabla 2.8: Formatos de modulación que componen los bloques de transmisión.....	47
Tabla 2.9: Diagrama en bloques formato de modulación para recepción. ....	50
Tabla 2.10: Diagramas en bloques del modelo Back To Back para velocidades de 2.5, 10 y 40 Gbps. ....	51
Tabla 2.11: Validación del modelo B2B para los formatos de modulación de los escenarios de simulación.....	52
Tabla 2.12: Parámetros de monitoreo óptico del modelo B2B para escenario con formato de modulación avanzado RZ-DPSK.....	53
Tabla 2.13: Parámetros de monitoreo óptico del modelo B2B para escenario con formato de modulación avanzado RZ-DQPSK.....	53
Tabla 2.14: Espectros ópticos por canal para formatos de modulación usados. ....	55
Tabla 3.1: Escenarios de simulación planteados para SRS y SBS. ....	56
Tabla 3.2: Variables de estimulación para efectos de Scattering SRS y SBS, respecto al elemento variado. ....	58
Tabla 3.3: Casos para análisis con efecto SRS del Escenario 1 y 2 con separación: 50GHz y 100GHz.....	61
Tabla 3.4: Casos para análisis con efecto SBS del Escenario 1 Y 2 con separación 100 GHz. ....	61
Tabla 3.5: Análisis de parámetros OPM para Caso de estudio 1: Escenario 1 – SRS OFF. ....	68
Tabla 3.6: Análisis de parámetros OPM Caso de estudio 2: Escenario 1 – SRS ON. .	73
Tabla 3.7: Análisis de parámetros OPM Caso de estudio 1: Escenario 1 – SBS OFF. 78	
Tabla 3.8: Análisis de parámetros OPM Caso de estudio 2: Escenario 1 – SBS ON... 83	
Tabla 4.1: Análisis comparativo del desempeño de formatos de modulación avanzados en presencia de SRS: Escenario 1 Caso 8 vs Escenario 2 Caso 8 separación entre canales 100 GHz presentado en la Tabla 3.3 .....	88
Tabla 4.2: Análisis comparativo del desempeño de formatos de modulación avanzados en presencia de SRS: Escenario 1 caso 10 vs Escenario 2 caso 10, separación entre canales 100 GHz, presentado en la Tabla 3.3. ....	92

Tabla 4.3:Análisis comparativo del desempeño de formatos de modulación avanzados en presencia de SBS: Escenario 1 caso 2 vs Escenario 2 caso 2, ancho de línea de la señal 100 MHz; tomado de la Tabla 3.4;.....	96
Tabla 4.4: Análisis comparativo del desempeño de formatos de modulación avanzados en presencia de SBS: Escenario 1 caso 6 vs Escenario 2 caso 6 Tabla 3.4; ancho de línea de la señal 100 MHz.....	100
Tabla 4.5: Comparación del compartimento de la red MLR con la variación del ancho de línea de la señal para SBS, fibra Corning. ....	102
Tabla 4.6:Comparación del compartimento de la red MLR con la variación del ancho de línea de la señal para SBS, fibra Furukawa. ....	103
Tabla 4.7: Análisis comparativo del desempeño de los formatos de modulación RZ-DPSK y RZ-DQPSK en una red MLR a 40 Gbps, en presencia de los efectos no lineales SRS identificados en las fibras Corning y Furukawa. ....	105
Tabla 4.8: Análisis comparativo del desempeño de los formatos de modulación RZ-DPSK y RZ-DQPSK en una red MLR a 40 Gbps, en presencia de los efectos no lineales SBS identificados en las fibras Corning y Furukawa. ....	106

# LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>AON</b>	<i>Active Optical Network, Red Óptica Activa.</i>
<b>ASE</b>	<i>Amplified Spontaneous Emission, Emisión Espontánea Amplificada.</i>
<b>ATM</b>	<i>Asynchronous Transfer Mode, Modo de Transferencia Asíncrona.</i>
<b>BER</b>	<i>Bit Error Rate, Tasa de Error de Bit.</i>
<b>CAPEX</b>	<i>Capital Expenditure, Costos de Inversión Inicial.</i>
<b>CATV</b>	<i>Community Antenna Television, Televisión por Cable.</i>
<b>CD</b>	<i>Chromatic Dispersion, Dispersión Cromática.</i>
<b>CW</b>	<i>Continuous Wave, Onda Continua.</i>
<b>COP</b>	<i>Colombian Pesos, Pesos Colombianos.</i>
<b>CSRZ</b>	<i>Carrier Suppressed Return to Zero, Retorno a Cero con Portador Suprimida.</i>
<b>CWDM</b>	<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing, Multiplexación por División Aproximada de Longitud de Onda.</i>
<b>DBF</b>	<i>Distributed Feedback Laser, Láser de Realimentación Distribuida.</i>
<b>DCF</b>	<i>Dispersion Compensation Fiber, Fibra Compensadora de Dispersión.</i>
<b>DCM</b>	<i>Dispersion Compensation Module, Módulo de Compensación de Dispersión.</i>
<b>DPSK</b>	<i>Differential Phase Shift Keying, Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial.</i>
<b>DQPSK</b>	<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying, Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura Diferencial.</i>
<b>DWDM</b>	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing, Multiplexación por División de Onda Densa.</i>
<b>EAM</b>	<i>Electro Absorption Modulator, Modulador de Absorción Eléctrica.</i>
<b>EON</b>	<i>Elastic Optical Networks, Redes Ópticas Elásticas.</i>
<b>ECL</b>	<i>External Cavity Laser, Láser de Cavidad Externa.</i>
<b>EDFA</b>	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier, Amplificadores de Fibra Dopada con Erbio.</i>
<b>EPON</b>	<i>Ethernet Passive Optical Network, Redes Ópticas Pasivas Ethernet</i>
<b>FSAN</b>	<i>Full Service Access Network, Red de Acceso de Servicio Completo.</i>
<b>FTTX</b>	<i>Fiber To The x, Fibra Hasta la Terminación.</i>
<b>FTTB</b>	<i>Fiber To The Building, Fibra Hasta el Edificio.</i>
<b>FTTC</b>	<i>Fiber To The Cabinet, Fibra Hasta el Gabinete.</i>
<b>FTTN</b>	<i>Fiber To The Node, Fibra Hasta el Nodo.</i>
<b>FTTH</b>	<i>Fiber To The Home, Fibra Hasta el Hogar.</i>
<b>FWM</b>	<i>Four Wave Mixing, Mezcla de Cuatro Ondas.</i>
<b>FWHM</b>	<i>Full Width Half Maximum, Anchura a Media Altura</i>
<b>GBPS</b>	<i>Gigabit per Second, Gigabits por Segundo.</i>
<b>GPON</b>	<i>Gigabit capable Passive Optical Network, Red Óptica Pasiva con capacidad de Gigabit.</i>
<b>HFC</b>	<i>Hybrid Fiber-Coaxial, Híbrido de Fibra-Coaxial.</i>
<b>ICI</b>	<i>Inter-carrier Interference, Interferencia entre Portadoras.</i>
<b>IP</b>	<i>Internet Protocol, Protocolo de Internet.</i>
<b>ISI</b>	<i>Intersymbol Interference, Interferencia Intersimbólica.</i>
<b>ISP</b>	<i>Internet Service Provider, Proveedor de Servicios de Internet.</i>

<b>ITU-T</b>	<i>International Telecommunication Union</i> , Unión Internacional de Telecomunicaciones.
<b>MDU</b>	<i>Multi Dwelling Units</i> , Equipos de Terminales de Red.
<b>MLR</b>	<i>Mixed Line Rate</i> , Línea de Tasa Mixta.
<b>MZM</b>	<i>Mach-Zehnder Modulator</i> , Modulador Mach-Zehnder.
<b>NG-PON</b>	<i>New Generation Passive Optical Networks</i> , Redes Ópticas Pasivas de Nueva Generación.
<b>NG-PON2</b>	<i>Next-Generation Passive Optical Network 2</i> , Red Óptica Pasiva de Próxima Generación 2.
<b>NRZ</b>	<i>NonReturn to Zero</i> , No Retorno a Cero.
<b>NRZ-OOK</b>	<i>NonReturn to Zero On Off Keying</i> , Modulación por Encendido y Apagado sin Retorno a Cero.
<b>NRZ-DPSK</b>	<i>NonReturn to Zero Differential Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase sin Retorno a Cero.
<b>ODN</b>	<i>Optical Distribution Network</i> , Red Óptica de Distribución.
<b>OLT</b>	<i>Optical Line Terminal</i> , Terminal Óptico de Línea.
<b>ONT</b>	<i>Optical Network Terminal</i> , Terminal Óptico de Red.
<b>ONU</b>	<i>Optical Network Unit</i> , Unidad de Red Óptica.
<b>OOK</b>	<i>On-Off Keying</i> , Modulación Digital de Amplitud.
<b>OXC</b>	<i>Optical Cross Connect</i> , Conector Óptico Cruzado.
<b>OSNR</b>	<i>Optical Signal to Noise Ratio</i> , Relación señal a Ruido Óptico.
<b>OPEX</b>	<i>Operational Expenditure</i> , Costos operacionales.
<b>PON</b>	<i>Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva.
<b>PMD</b>	<i>Polarization Mode Dispersion</i> , Dispersión por Modo de Polarización.
<b>PSK</b>	<i>Phase Shift Keying</i> , Manejo por Conmutación de Fase.
<b>P2MP</b>	<i>Point to Multipoint</i> , Punto a Multipunto.
<b>RZ</b>	<i>Return to Zero</i> , Retorno a Cero.
<b>RZ-DPSK</b>	<i>Return to Zero Differential Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial de Retorno a Cero.
<b>RZ-DQPSK</b>	<i>Return to Zero Differential Quadrature Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura Diferencial de Retorno a Cero.
<b>RZ-OOK</b>	<i>Return to Zero On Off Keying</i> , Modulación de Desplazamiento de Encendido y Apagado con Retorno a Cero.
<b>SBS</b>	<i>Stimulated Brillouin Scattering</i> , Dispersión de Brillouin Estimulada.
<b>SDH</b>	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i> , Jerarquía Digital Síncrona.
<b>SLR</b>	<i>Single Line Rate</i> , Velocidad de Transmisión de Línea Única.
<b>SMF</b>	<i>Single Mode Fiber</i> , Fibra Monomodo.
<b>SPM</b>	<i>Self Phase Modulation</i> , Automodulación de Fase.
<b>SRS</b>	<i>Stimulated Raman Scattering</i> , Dispersión de Raman Estimulada.
<b>SSMF</b>	<i>Standard Single Mode Fiber</i> , Fibra Monomodo Estándar.
<b>WAN</b>	<i>Wide Area Network</i> , Red de Área Amplia.
<b>WDM</b>	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda.
<b>xDSL</b>	<i>Digital Subscriber Lines</i> , Conexiones Línea de Abonado Digital.
<b>XG-PON</b>	<i>10 Gbps Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva a 10 Gbps
<b>XPM</b>	<i>Cross Phase Modulation</i> , Modulación de Fase Cruzada.

# INTRODUCCIÓN

Los sistemas de telecomunicaciones han tenido una gran evolución a lo largo de los años debido a las demandas de los usuarios, relacionadas con grandes avances tecnológicos, el surgimiento de novedosos servicios y plataformas que son capaces de soportarlos. A su vez, estos avances acarrearán diversos retos que deben ser abordados por las empresas de telecomunicaciones para cubrir las demandas de los usuarios finales; entre estos se destacan: mayor capacidad de los sistemas, uso de ancho de banda eficiente, aumento de velocidades de transmisión, mejora en los porcentajes de disponibilidad y fiabilidad de los sistemas, entre otros. La aparición del virus SARS-COV-2 en la ciudad de Wuhan (China) y posterior declaración de esta emergencia mundial como pandemia en marzo del año 2020, generó un estado de crisis de salud a nivel global, el cual obligó a los gobiernos y ciudadanos a establecer nuevos modelos de vida, los cuales generaron cambios significativos en sus costumbres asociadas a diferentes hábitos de consumo, entre los cuales afectó al uso de los sistemas de información y telecomunicaciones. Con el aislamiento de los individuos en los seis continentes y la utilización masiva, como se indica en [1] *“La cuarentena, en definitiva, ha acelerado a pasos agigantados el uso de las TIC para casi todas las actividades diarias, obligando a los usuarios a utilizar dispositivos móviles inteligentes conectados a la red para efectuar cualquier labor cotidiana”* lo que generó una demanda sin precedentes para la base de los sistemas de telecomunicaciones globales, los cuales se soportan en fibra óptica.

En noviembre del año 2021, según un estudio realizado por la Comisión de Regulación de Comunicaciones de la República de Colombia, denominado Data Flash 2021 - 031 - Internet Fijo, con toda la información del servicio de internet fijo (hogar) reportado por los proveedores de servicio de internet (ISP, *Internet Service Provider*), se mencionan las diferentes especificaciones dadas para suscripciones internet fijo contratado por usuarios residenciales, en el cual se evidencia un continuo y exponencial crecimiento en función de ingresos, despliegue y uso de tecnologías de acceso para diferentes ISP en el marco nacional; entre los cuales se destacan Claro, DirecTV, Movistar, TIGO-UNE, entre otros. Además de identificar las tecnologías de acceso más desplegadas e implementadas en el país: *“Las agrupaciones presentadas se construyen a partir de los tipos de tecnología usados para el acceso fijo a Internet establecidos en el Formato 1.5 de la Resolución CRC 5050 de 2016 de la siguiente manera: Cable e Híbrido de fibra Coaxial (HFC, Hybrid Fiber-Coaxial), Conexiones Línea de Abonado Digital (xDSL, Digital Subscriber Lines), FTTx, WiFi, WiMax, Satelital y otras tecnologías fijas.”* [2].

Para cumplir con los requerimientos de redes ópticas ultra confiables las cuales permitan mantener comunicaciones con tasas de error cercanas a cero, además de denotar la escalabilidad y rentabilidad como factores claves en la operación de las mismas, todo ello en función de las demandas de los usuarios finales en cuanto a capacidad y el uso de mayores velocidades de transmisión; los operadores de telecomunicaciones se encuentran en constantes procesos de innovación para propiciar el mejoramiento de las tecnologías de altas velocidades, combinando sistemas y generando redes híbridas basadas en arquitecturas como Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM,

*Wavelength Division Multiplexing*) y diferentes tipos de acceso Fibra Hasta la Terminación (FTTx, *Fiber To The x*)

En el presente trabajo de grado se analiza de forma comparativa el desempeño de algunos formatos de modulación avanzados en la red híbrida WDM, Tasa de Línea Mixta (MLR, *Mixed Line Rate*) con Acceso de Próxima Generación fase 2 (NG-PON2, *Next Generation Passive Optical Network 2*) propuesta; los cuales han presentado mayor relevancia para los sistemas de comunicaciones ópticos en la actualidad. Estos sistemas se encuentran en constante necesidad de proveer a los usuarios de mayores capacidades, velocidades de transmisión y robustez; lo cual se traduce en mayores niveles de potencia óptica y eficiencia espectral. Esta necesidad acarrea consigo diversos retos, entre los cuales se destaca la coexistencia en transmisión de las señales de información con los efectos de dispersión no lineales presentes en todo sistema de transmisión por fibra óptica.

# ABSTRACT

The telecommunications systems have experienced significant evolution over the years due to user demands related to major technological advancements and the emergence of novel services and platforms capable of supporting them. These advancements bring various challenges that telecommunications companies must address to meet the demands of end users. Some of these challenges include increased system capacity, efficient bandwidth utilization, higher transmission speeds, improved system availability and reliability percentages, among others. The emergence of the SARS-COV-2 virus in Wuhan city, China, and its subsequent declaration as a global pandemic in March 2020, generated a global health crisis that compelled governments and citizens to establish new models of life, leading to significant changes in consumption habits associated with various behaviors. This also affected the use of information and telecommunications systems. With individuals isolated on all six continents and the massive utilization, as stated in [1], "Quarantine has accelerated the use of ICT for almost all daily activities, forcing users to use smart mobile devices connected to the network to perform any routine task." This generated an unprecedented demand for the foundation of global telecommunications systems, which rely on fiber optics.

In November 2021, according to a study conducted by the Commission for Communications Regulation of the Republic of Colombia, called Data Flash 2021 - 031 - Fixed Internet, which includes all the information on fixed internet service (home) reported by internet service providers (ISPs), different specifications for fixed internet subscriptions contracted by residential users are mentioned. The study reveals a continuous and exponential growth in terms of income, deployment, and use of access technologies for different ISPs in the national framework. Some notable ISPs include Claro, DirecTV, Movistar, TIGO-UNE, among others. The study also identifies the most deployed and implemented access technologies in the country: "*The presented groupings are constructed based on the types of technology used for fixed internet access established in Format 1.5 of Resolution CRC 5050 of 2016 as follows: Cable and Hybrid Fiber-Coaxial (HFC), Digital Subscriber Lines (xDSL), FTTx, WiFi, WiMax, Satellite and Other fixed technologies.*" [2].

To meet the requirements of ultra-reliable optical networks that maintain communication with error rates close to zero, while ensuring scalability and profitability as key factors in their operation, telecommunications operators are constantly engaged in innovation processes to improve high-speed technologies. They combine systems and create hybrid networks based on architectures such as Wavelength Division Multiplexing (WDM) and various types of Fiber To The x (FTTx) access.

In this thesis, we comparatively analyze the performance of some advanced modulation formats in the WDM hybrid network, Mixed Line Rate (MLR) with Next Generation Passive Optical Network 2 (NG-PON2) access, which have gained significant relevance in optical communication systems today. These systems constantly need to provide users with higher capacities, transmission speeds, and robustness, resulting in higher levels of optical power and spectral efficiency. This necessity brings various challenges, among which the coexistence of information signals with the effects of non-linear dispersion present in every optical fiber transmission system stands out.

# 1 GENERALIDADES SOBRE SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS.

## 1.1 SISTEMAS WDM

Dentro de las tecnologías que soportan las redes de telecomunicaciones a nivel global y nacional, existe un común denominador que a lo largo de los años se ha mantenido como el corazón de dichas redes de telecomunicaciones basadas en fibra óptica, esta tecnología es WDM. La cual hace referencia a un tipo de multiplexación ampliamente usado por los proveedores de servicios en la industria; puesto que tuvo una gran acogida en el mercado debido al evidente incremento en la demanda del ancho de banda y altas tasas de transmisión, con la convergencia de las redes de telecomunicaciones hacia servicios soportados sobre Protocolo de Internet (IP, *Internet Protocol*) [3] [4].

WDM se propuso como un estándar capaz de soportar cualquier protocolo de nivel uno o de capa física, sin recurrir a un tipo de encapsulamiento especial, lo cual se tradujo en el uso eficiente y versátil de diversos canales sobre el mismo hilo de fibra óptica, el cual, de forma muy versátil y adaptativa, puede soportar variaciones de tráfico según los requerimientos planteados de extremo a extremo. Por lo tanto en el transmisor, mediante un multiplexor, se logra acoplar múltiples flujos de datos de alta velocidad a distintas tasas de transferencia; se tiene además que cada señal de entrada es totalmente independiente de las demás, por lo tanto cada canal tiene un ancho de banda propio y dedicado, los cuales van a ser captados en el receptor, donde las señales portadoras son separadas con base al uso de un demultiplexor, para luego ser procesadas y recuperadas con ayuda de un receptor óptico. Entre las principales características distintivas de WDM se tienen [4]:

- Gran aprovechamiento del ancho de banda y aumento en la capacidad de transmisión de la fibra.
- Se puede considerar de gran flexibilidad al permitir realizar la transmisión de señales de forma bidireccional sin la necesidad de realizar cambios demasiado complejos en el sistema.
- Reducción en costos de inversión inicial (CAPEX, *Capital Expenditure*)<sup>1</sup> y Costos operacionales (OPEX, *Operating Expenses*) dada la reducción de uso de hilos de fibra óptica y la posibilidad de gestionar fallas de forma más centralizada.
- Reducción de la necesidad de implementar dispositivos activos en el sistema.
- En un principio, la única topología usada en despliegues WDM era la denominada punto a punto.

El funcionamiento de WDM se ilustra en la Figura 1.1.

---

<sup>1</sup> Gastos de creación orientada al beneficio futuro, se refiere a la compra de activos fijos que añaden valor a un activo fijo existente.

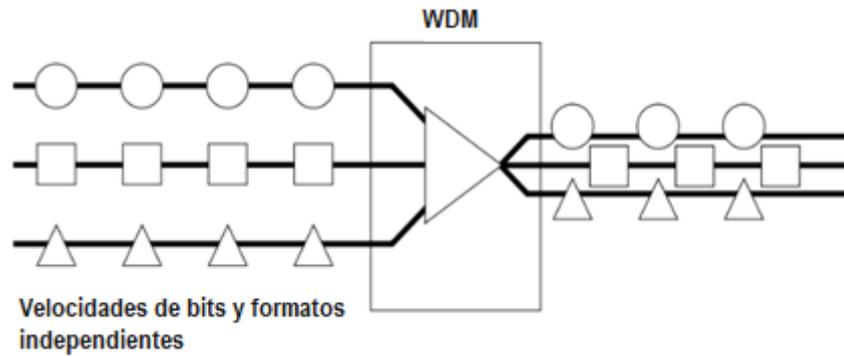


Figura 1.1: Esquema básico del funcionamiento de un sistema WDM. Tomado de [5].

## Técnicas de multiplexación derivadas de WDM

Con el continuo avance tecnológico y la aparición de nuevos servicios soportados en las redes a lo largo de los años, surgió a su vez la necesidad de cumplir requerimientos funcionales y no funcionales que eran cada vez más rigurosos; esto con el fin de garantizar la alta calidad de la red y confiabilidad de esta para el usuario final. Surge entonces la necesidad de implementar nuevas técnicas de multiplexación capaces de aumentar aún más la eficiencia espectral, capacidad de los sistemas y mejorar su desempeño; algunas de estas técnicas son: Multiplexación por División Aproximada de Longitud de Onda (CWDM, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*), Multiplexación por División de Onda Densa (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*) y sus derivados. [3] [6] [7]. Además, se considera de gran importancia localizar de forma adecuada el sector de la red donde es necesario implementar dichas técnicas de multiplexación, tal como se indica en la Figura 1.2 “Jerarquía de Red Global” planteada por [5] en la cual se define una clasificación específica para cada tipo de red según su alcance y las prestaciones para las cuales fue diseñada.

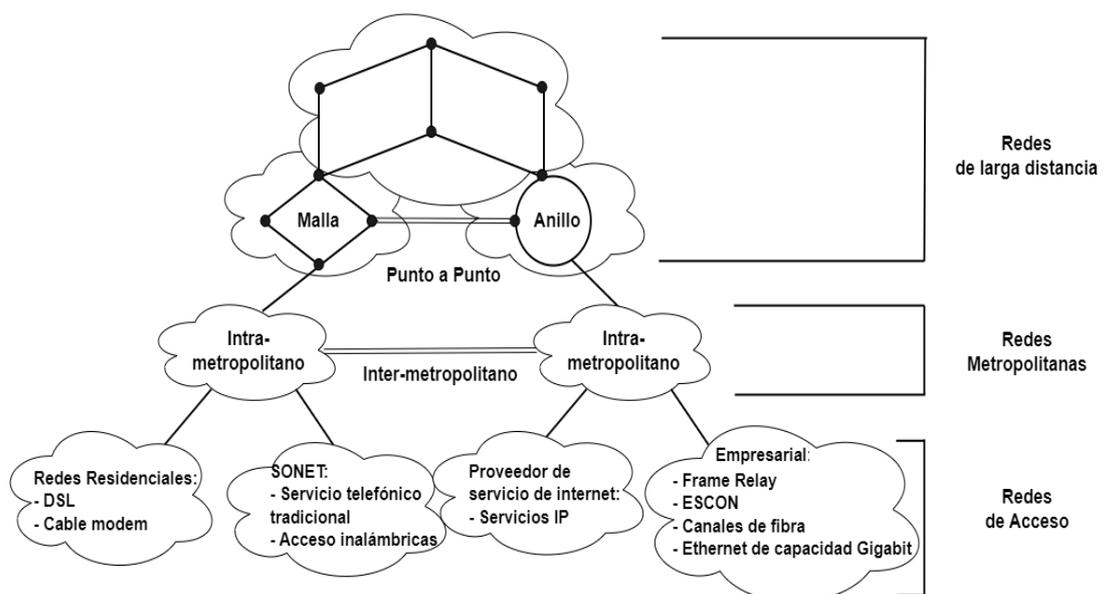


Figura 1.2: Jerarquía de red global. Adaptado de [5].

### 1.1.1 CWDM

CWDM presenta un bajo costo de operación y gestión frente a DWDM en el ámbito empresarial y metropolitano, las cuales son: mayor espaciado entre longitudes de onda y mayor espectro óptico. Lo cual permite emplear componentes ópticos bastante más sencillos y económicos, buscando aprovechar en mayor proporción el espaciado entre canales con una separación de onda de  $20\text{ nm}$  ( $2500\text{ GHz}$ ) dentro del rango de  $1270\text{ nm}$  a  $1610\text{ nm}$  lo cual se traduce en capacidad de transporte 18 longitudes de onda en un único hilo de fibra óptica monomodo, pudiendo alcanzar distancias de 50 a 80  $\text{km}$ , llegando a alcanzar distancias de hasta 160  $\text{km}$  mediante el uso de configuraciones con amplificadores de señales [7] [8] [9] [10].

#### Características principales de CWDM.

- Espaciado de frecuencias de  $20\text{ nm}$ , habilitando el uso de láseres de gran ancho espectral con Láser de Realimentación Distribuida (DBF, *Distributed Feedback Laser*) no refrigerado.
- 18 longitudes de onda, definidas en el intervalo de 1270 a 1610  $\text{nm}$ .
- Capacidad de canal límite en 10  $\text{Gbps}$ .
- Distancia máxima de cobertura con el uso de amplificadores 160  $\text{km}$ .
- Uso de filtros ópticos de banda ancha, multiplexores y demultiplexores basados en TFF (tecnología de película delgada).
- Mayor espectro óptico, lo cual permite tener un número de canales para utilizar sin que estos sean disminuidos a causa de la separación entre ellos.
- Admite las siguientes topologías: Anillos punto a punto y Redes Ópticas Pasivas (PON, *Passive Optical Network*), Anillos locales CWDM que se conectan con anillos metropolitanos DWDM, Anillos de acceso y las redes ópticas pasivas.
- Menor consumo energético.
- Soporte de servicios de corto alcance como: Jerarquía Digital Síncrona (SDH, *Synchronous Digital Hierarchy*), Televisión por Cable (CATV, *Community Antenna Television*), Modo de Transferencia Asíncrono (ATM, *Asynchronous transfer mode*), FTTH-PON, entre otros.

### 1.1.2 DWDM

Esta técnica de multiplexación basa su principio de operación en WDM, donde varias señales portadoras son transmitidas por un único hilo de fibra óptica, formando un canal exclusivo por portadora usada, el cual es independiente de los demás y del tipo de tráfico soportado. A diferencia de WDM, al usar un gran número de longitudes de onda de trabajo y una menor separación entre canales, es posible multiplicar el ancho de banda efectivo de la fibra y por ende soportar transmisiones de información de muy alta capacidad en la banda C y L. En la recomendación ITU-T G.694.1 [11] se plantea el plan de frecuencias para soportar aplicaciones por este tipo de multiplexación; entre las características principales se tiene [5]:

- Espaciado de canales, con frecuencias centrales nominales para el espaciado de canales de 100, 50 o 25  $\text{GHz}$ .

- Capacidad de transmisión en longitudes de onda, de hasta 160 longitudes de onda.
- Capacidad límite en 40 Gbps.
- Distancia máxima de cobertura con el uso de amplificadores, 4500 Km.
- Uso de láser de alta precisión, DFB refrigerado y Láser Cavity Externa (ECL, *External Cavity Laser*).
- Muy alto consumo energético.
- Admite las siguientes topologías: anillo, punto a punto, bus.
- Despliegue orientado a redes Red de Área Amplia (WAN, *Wide Area Network*), Red de Área Metropolitana (MAN, *Metropolitan Area Network*) y empresariales.
- Transmisión unidireccional o bidireccional.
- Gran impacto de los efectos no lineales en el desempeño del sistema, dada la separación entre canales, dando origen a efectos como diafonía e Interferencia Intersimbólica (ISI, *Intersymbol Interference*). [12] [13].

Finalmente retomando las técnicas de multiplexación, es importante realizar una comparación entre dichas técnicas y sus derivados, las cuales se pueden apreciar en la Tabla 1.1 [14].

Características	CWDM / MAN	DWDM / MAN	DWDM / LH	DWDM / ULH
Estándar ITU-T	G. 694.2	G.694.1		
N° de canales	18	32 – 80	80 – 160	160
Banda de operación	O, E, S, C, L	S, C, L		C, L
Espaciado entre canales	2500 GHz 20 nm	100 GHz 0.8 nm	50 GHz 0.4 nm	25 GHz 0.2 nm
Capacidad de canal	2.5 Gbps	10 Gbps	10 – 40 Gbps	10 Gbps
Tipo de láser	Uncooled DFB	Cooled DFB	Cooled DFB	Cooled DFB
Alcance con amplificación	80 Km	Cientos de km	Miles de km	Decenas de miles de km
Amplificación óptica	N. A	EDFA	EDFA	EDFA / RAMAN
Costo	Alto	Alto	Alto	Alto

Tabla 1.1 Comparación entre técnicas de multiplexación. Adaptado de [10] [11] [13] [15] [16].

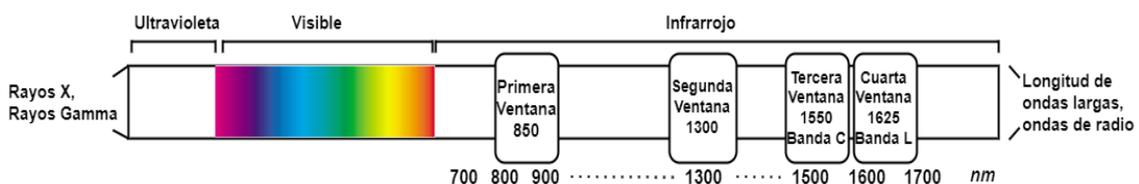


Figura 1.3: Regiones de longitud de onda. Adaptado de [5].

## 1.2 REDES DE ACCESO ÓPTICO

Se tiene que las redes de acceso se encargan de interconectar al abonado o usuario final con el borde de la red del proveedor de servicios local. En cuanto a los servicios soportados, son de banda ancha, posibilitando así presentar diversas características

mejoradas frente a los servicios soportados por las redes de cobre existentes. Algunas de sus principales características son [17]:

- Transporte de servicios como: voz, datos, TV, multimedia.
- Capacidades del orden de los *Gbps*.
- Representan gran porcentaje del despliegue de una red.
- Simetría en carga y descarga.

Características deseables de una red de acceso:

- Gran cobertura.
- Alta disponibilidad.
- Alta capacidad.
- Escalabilidad.
- Tolerancia a fallos y redundancia.
- Autonomía energética.
- Confidencialidad.

### 1.2.1 Tecnología FTTx

Se tiene que, dependiendo de la distancia entre la fibra óptica y el usuario final, lo que es conocido como acceso de última milla. Pueden clasificarse diferentes tipos de despliegues y tipo de terminación; son denotados como FTTx, donde la “x” indica la terminación en el despliegue de fibra de la red, lo cual tiene una relación directa con las velocidades ofertadas por el proveedor.

Está conformada por un transmisor/receptor en el Terminal de Línea Óptica (OLT, *Optical Line Terminal*), que es la encargada de convertir los impulsos eléctricos en pulsos de luz, para poder ser transmitidos por la red de fibra óptica.

El Terminal de Red Óptica (ONT, *Optical Network Terminal*), debe estar incorporado en el punto terminal del usuario, llevando a cabo consigo la función de convertir la luz que llega por la fibra nuevamente a impulsos eléctricos digitales [18].

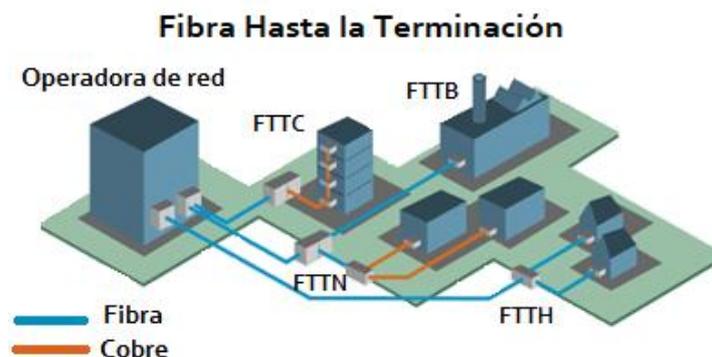


Figura 1.4: Topologías de Red FTTx. Tomado de [19].

- **Fibra Hasta el Nodo (FTTN, *Fiber To The Node*):** El tramo de fibra termina en una cabina situada en la calle de entre 1.15 a 3 *km* del usuario. En el nodo existen equipos que convierten las señales ópticas provenientes desde la central

a señales eléctricas, que a través del medio de transmisión de cables de cobre dan cobertura a una zona específica.

- **Fibra Hasta el Gabinete (FTTC, *Fiber To The Cabinet*):** Esta cabina se encuentra ubicada lo más próxima al usuario, a una distancia entre 300 y 600 m ofreciendo servicios de banda ancha a viviendas o negocios. Debido a que la fibra no llega hasta el cliente, desde la cabina suele utilizarse cable coaxial y este suele denominarse también como HFC.
- **Fibra Hasta el Edificio (FTTB, *Fiber To The Building*):** El proveedor del servicio llega hasta el cuarto de distribución del edificio, haciendo uso de un par de cobre. La caja de terminación óptica instalada en la edificación, suele encontrarse en el sótano.
- **Fibra Hasta el Hogar (FTTH, *Fiber To The Home*):** Es la topología que realiza el despliegue completo en fibra óptica hasta cada Unidad de Red Óptica (ONU, *Optical Network Unit*). Normalmente se ofrecen servicios avanzados como voz, vídeo y datos de muy altas velocidades. Además de ello FTTH mejora la eficiencia en la entrega de los datos con una mayor rentabilidad, reduce el consumo de energía y ayuda a que no se tenga el escape de la señal a otros puntos [20].

## Topologías en la red de acceso

Existen dos amplias categorías para las soluciones de las tecnologías que ofrece FTTx: PON, que está conformada de elementos electrónicos pasivos entre el usuario final y la central del operador; y Red Óptica Activa (AON, *Active Optical Network*), donde se encuentran instalaciones de componentes activos entre el usuario final y la central del operador.

Para poder brindar un buen servicio a los usuarios y conseguir una red eficiente, la arquitectura de la red debe contar con elementos básicos pasivos, ya que no es demandable hacer uso de una inversión alta. En implementaciones de redes FTTx comúnmente se encuentran las topologías de red: punto a punto (P2P) y las también conocidas como PON, punto a multipunto; siendo estas el tipo de red más factible para la distribución de los servicios, además de ello ayuda a disminuir los costos y tiene mayor seguridad en comparación a las demás [21] [22].

### 1.2.2 Red óptica pasiva (PON)

En una red de óptica pasiva, a excepción de una red óptica activa, no existe alimentación directa en la fibra y componentes divisores o combinadores de la misma; esta alimentación es requerida únicamente en los puntos de transmisión y recepción, lo cual hace que su mantenimiento sea mucho más económico. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-T, *International Telecommunication Union*) ha definido dos grupos principales para este tipo de tecnología de acceso [23]; en primera instancia se tiene a las redes ópticas pasivas basadas en ATM, nombradas Red Óptica Pasiva con capacidad de Gigabit (GPON, *Gigabit capable Passive Optical Network*) (ITU-T

G.984.1); adicionalmente se tiene a las Redes Ópticas Pasivas basadas en Ethernet, conocidas también como Ethernet sobre Redes Ópticas Pasivas (EPON, *Ethernet Passive Optical Network*) (IEEE 802.3), siendo ambas planteadas como redes de acceso de banda ancha, escalables y altamente seguras con capacidad de soportar los requerimientos de los usuarios finales. Este tipo de redes emplea una arquitectura punto - multipunto; además puede dividirse en diferentes secciones que acarrean funciones específicas dentro de la red, y además estarán siempre presentes en su arquitectura [24]:

- **Terminal de Línea Óptica (OLT):** es el elemento activo situado en la parte central de la red, de este parte la fibra óptica principal hacia los usuarios y este a su vez se encarga de controlar el tráfico hacia los usuarios, es decir que cumple las funciones de *Router*, ofreciendo todos los servicios demandados por los usuarios. Cada terminal de línea óptica tiene como característica principal proporcionar un servicio a cientos de usuarios, y además de ello puede actuar como puente externo para el resto de redes, permitiendo así dar comunicaciones de tráfico al exterior. Otros de los objetivos principales de los OLT son:
  - Realizar las funciones de control en la red de distribución
  - Coordinar la multiplexación de los canales de subida y bajada.
  
- **Red Óptica de Distribución (ODN):** es una red compuesta por elementos pasivos que ayudan a economizar el mantenimiento de la red y además de ello permite la transmisión desde la OLT hacia el usuario, y viceversa.
  - Fibras ópticas.
  - *Splitters*.
  - Empalmes.
  - Conectores ópticos.
  
- **Equipos Terminales de Red (MDU, *Multi Dwelling Units*):** provisión de interfaces de fibra óptica hacia el ODN y hacia los Equipos Terminales de Usuario.
  
- **Equipos Terminales de Usuario (ONT):** son elementos encargados de recibir y filtrar la información destinada a un usuario determinado proveniente de la OLT. Además de ello esta información recibida la envía al usuario en un formato adecuado, cumple la función inversa. Es decir que toma la información del usuario y la encapsula y luego la envía en dirección a la OLT de cabecera, para que esta a su vez sea direccionada a la red que corresponda.

El impacto de las redes PON en los despliegues para accesos FTTH es muy claro y provechoso; entre las principales características se listan [24]:

- Tasa de multiplexación  $\geq 64$ .
- Velocidad de transmisión  $> 1 \text{ Gbps}$ .
- Tasa de transmisión simétrica.

- El alcance físico de cobertura de este tipo puede extenderse de 10 a 60 *km*.
- Implementación de dispositivos pasivos, lo cual se traduce en menor inversión en consumo eléctrico y de operación.
- Asignación dinámica de recursos.
- Alta escalabilidad.
- Gestión centralizada de red, configuración y mantenimiento remoto.
- Menor degradación de las señales por presentar inmunidad a ruidos eléctricos o electromagnéticos, mejorando así la calidad del servicio.
- Mayor ancho de banda para el usuario.

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) y el Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la ITU, se han mantenido en un constante proceso de investigación y desarrollo de estándares que puedan suplir las demandas de los nuevos servicios y los usuarios finales en la red. Actualmente existen varios tipos de tecnologías PON que se presentan como el fruto de los procesos mencionados anteriormente, algunas de sus principales características son [22]:

- **GPON (ITU-T G.984.1) [25]**

- Maneja 7 combinaciones de velocidades de transmisión, la más utilizada en el país es de 1.24416 *Gbps* en subida y 2.48832 *Gbps* en bajada.
- Relación de tasa de transmisión nominal 2:1.
- Alcance físico máximo con extensores, 40 *Km*.
- Alcance físico máximo entre OLT y ONT, 20 *Km*.
- Tasa de multiplexación alcanzable de 1:128.
- Antecesor de Red Óptica Pasiva a 10 *Gbps* (XG-PON, 10 *Gbps Passive Optical Network*).

- **XGS-PON (ITU-T G.9807) [26]**

- Tasa nominal simétrica de 10 *Gbps*.
- Relación de tasa nominal de transmisión 1:1.
- Tasa de multiplexación alcanzable de 1:256.
- Flexibilidad de coexistencia con tecnologías como XG-PON y GPON.
- Alcance físico máximo con extensores, 60 *Km*.
- Alcance físico máximo entre OLT y ONT, 40 *Km*.
- Asignación de ancho de banda dinámico.

- **NG-PON2 (ITU-T G.989) [27] [28] [29]**

- Tasa nominal de subida (OLT), 40 *Gbps*, para el Upstream con base al uso de cuatro canales de 10 *Gbps*.
- Tasa nominal de bajada (OLT), 10 *Gbps* para el Downstream, con base al uso de cuatro canales de 2.5 *Gbps*.
- Relación de tasa nominal de transmisión 4:1.

- Alcance físico máximo con extensores, 40 Km.
- Alcance físico máximo entre OLT y ONT, 20 Km.
- Pensada para la coexistencia con conceptos de redes NGN.

En Colombia, los dos tipos de servicios fijos en las redes de telecomunicaciones: servicios residenciales y servicios para empresas gubernamentales, tienen la necesidad de implementar una tecnología de acceso que esté a la altura de los requerimientos propuestos por configuraciones de redes orientadas a servicios banda ancha de alta velocidad; por lo tanto, se propone a NG-PON2 como una tecnología de acceso adecuada [2].

A continuación, se presenta en la Figura 1.5 la distribución espectral de las tecnologías PON usadas para acceso FTTH, mencionadas anteriormente:

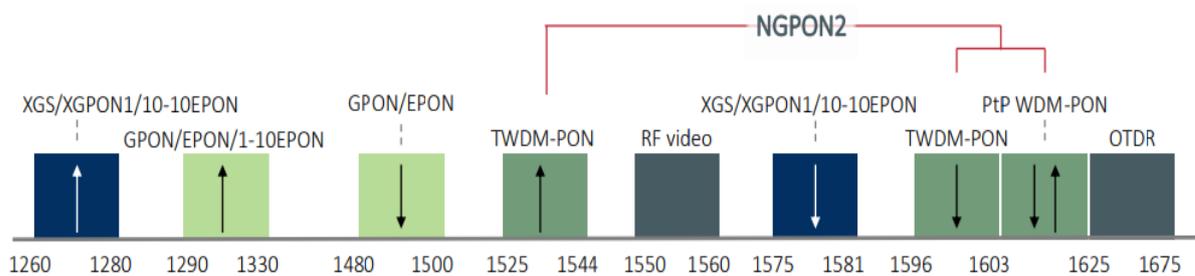


Figura 1.5: Distribución espectral de las tecnologías PON. Tomado de [30].

		GPON	XGS-PON	NG-PON2
STANDARD		ITU-T G-984	ITU-T G.9807	ITU-T G.989
ANCHO DE BANDA	UP	2.5	10	40
	DOWN	1.25	10	10
LONGITUD DE ONDA	UP	1290 - 1330	1260 - 1280	1525 - 1544
	DOWN	1480 - 1500	1575 - 1580	1598 - 1605

Tabla 1.2. Principales estándares PON de nueva generación. Adaptado de [21] [25] [26].

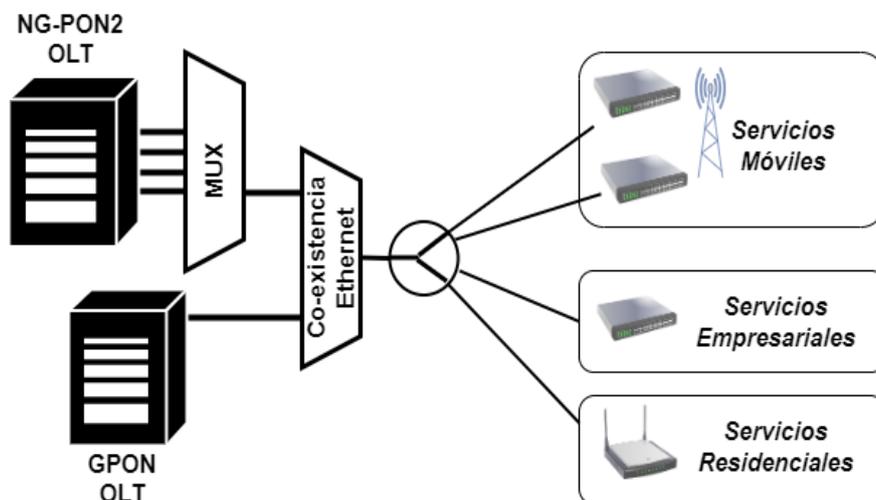


Figura 1.6: Coexistencia de redes PON e implementación de servicios. Adaptado de [31].

## 1.3 VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA ÚNICA (SLR)

La tasa de línea fija o única se define dentro de las redes, las cuales emplean un único tipo de transpondedor, el cual está configurado a una frecuencia fija, permitiendo así establecer una única tasa de transmisión de *bits*. El principio de operación de las redes convencionales se basa en Velocidad de Transmisión de Línea Única (SLR, *Single Line Rate*), donde se busca tener el máximo alcance transparente, con base a una velocidad de transmisión de línea determinada para la aplicación requerida. Sin embargo, en este tipo de redes, la eficiencia espectral es considerablemente menor, dado que los enlaces primarios están limitados por las características de SLR [32].

Para redes WDM que implementan SLR, se tiene que todos los canales multiplexados operan a la misma tasa de transmisión de bit, por lo tanto, tienen una eficiencia espectral mayor a las redes no multiplexadas. Los sistemas SLR normalmente operan con señales de 2.5, 10, 40 hasta 100 *Gbps*, usando formatos de modulación propuestos para redes de alta capacidad, algunos de estos son: Modulación por Encendido y Apagado sin Retorno a Cero (NRZ-OOK, *NonReturn to Zero On Off Keying*), Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase Sin Retorno a Cero (NRZ-DPSK, *NonReturn to Zero Differential Phase Shift Keying*) Manejo por Conmutación de Fase (PSK, *Phase Shift Keying*), Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura Diferencial (DP-QPSK, *Differential Quadrature Phase Shift Keying*), entre otros [33].

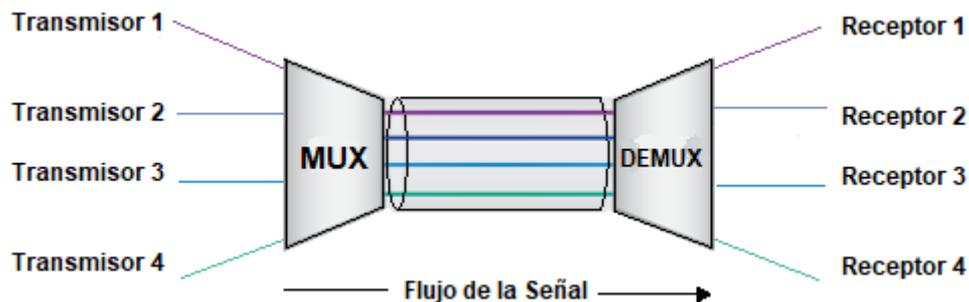


Figura 1.7: Esquema SLR-WDM. Tomado de [21].

## 1.4 VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA MIXTA (MLR)

La aparición de rigurosos requerimientos para la prestación de nuevos servicios, representa un gran reto para las redes WDM existentes y las de nueva generación; por ende, la migración a soluciones heterogéneas que operan con base a la asignación de espectro flexible, con canales que soportan tráficos mixtos de 2.5, 10, 40 y 100 *Gbps* es cada vez más necesaria [34]. A esta solución se le conoce como la Velocidad de Transmisión Mixta (MLR, *Mixed Line Rate*), la cual se puede definir como una tecnología transitoria entre redes ópticas de tasa de transmisión de línea fija y Redes Ópticas Elásticas (EON, *Elastic Optical Networks*) basadas en el soporte de tráfico heterogéneo y uso de transpondedores variables, que trabajan para distintos anchos de banda, permitiendo así hacer un uso más eficiente de los recursos de la red [35] [36] [37].

Sin embargo, existen ciertas limitaciones que impiden la implementación idónea de MLR transparente en diferentes escenarios; entre las falencias más determinantes que acarrea su uso se tienen [38]:

- Mayor susceptibilidad a efectos no lineales dadas las altas tasas de transmisión para canales colindantes o vecinos, lo cual obliga a los proveedores de servicios a aumentar la eficiencia espectral de los sistemas, usando formatos de modulación avanzados más eficientes espectralmente hablando [39].
- Limitaciones en alcance de las transmisiones, teniendo en cuenta que una señal óptica alcanza un punto máximo de distancia previo al proceso de degradación de calidad de la señal y la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*) de la misma, por debajo de un mínimo aceptable, viéndose influenciado por el nivel de potencia inyectada, formato de modulación, tipo de amplificación, dispersión, tasa de transmisión entre otros factores [34].

Basado en la metodología para un análisis técnico-económico propuesto por [40], es muy importante comprender el presupuesto del modelo de red, dado que es en función de los costos CAPEX y OPEX (ligados a costos de despliegue de infraestructura y de operación / mantenimiento respectivamente), que se podrá materializar la mejora de MLR frente a SLR [34] [36].

Dentro de los costos CAPEX se cubren conceptos relacionados con:

- Transpondedores y regeneradores.
- Amplificador de Fibra Dopada con Erbium (EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifier*) / RAMAN y espectro electromagnético.
- Conexión cruzada óptica (OXC, *Optical Cross Connect*).
- Equipamiento IP.

Dentro de los costos OPEX se cubren conceptos relacionados con:

- Consumo energético.
- Costos de reparación.
- Renta y mantenimiento.

A continuación, en la Figura 1.8, se presenta el esquema general de una red MLR transparente sin etapas de amplificación, la cual combina velocidades de transmisión de 10, 40 y 100 Gbps.

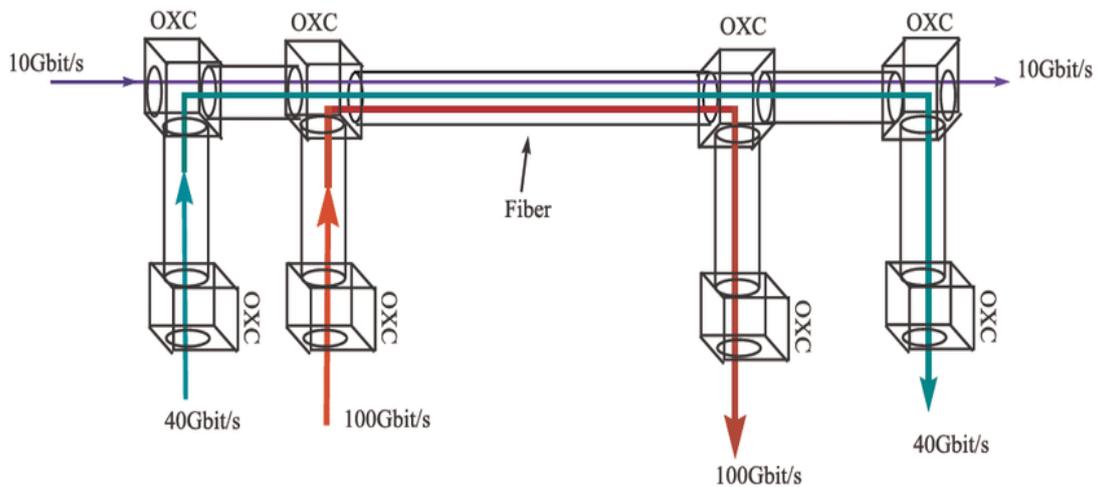


Figura 1.8: Esquema general de una red MLR. Tomado de [41].

Tal como se mencionó anteriormente el elemento conocido como OXC es utilizado para gestionar de forma eficiente las redes de transmisión que operan a altas velocidades, con base a la conexión cruzada de las señales ópticas; este se encarga de llevar los datos desde una longitud de onda de un puerto de entrada, hasta una longitud de onda en un puerto de salida.

Se tiene que, internamente los procesos realizados por el OXC se basan en realizar:

- Conmutación espacial de fibras.
- Conmutación de longitud de onda desde una fibra específica en la entrada hacia múltiples fibras en la salida (multiplexación y demultiplexación).
- Conversión de longitudes de onda donde se recibe una señal con una frecuencia óptica específica a la entrada y se convierte a una frecuencia óptica de interés en la salida.

Por lo tanto, el impacto real del uso de la tecnología MLR en redes WDM, se centra en la reducción del costo de implementación con base al mínimo uso posible de transpondedores en su despliegue, implementación de formatos de modulación que promuevan un desempeño eficiente de los recursos espectrales del sistema, capacidad de soportar la demanda de alto volumen de tráfico y la alta disponibilidad de equipos, el cual es un factor que juega un rol muy importante en los costos OPEX [34].

## 1.5 FORMATOS DE MODULACIÓN

Se conoce como modulación óptica al proceso de superponer información sobre una señal luminosa para ser transmitida a través de un hilo de fibra óptica; esta modulación puede ser aplicada de forma directa sobre fuente óptica, proceso que es denominado “Modulación Directa” o de forma indirecta, proceso el cual se denomina “Modulación Externa”. Estos procesos pueden enfocarse en tres atributos físicos sobre los cuales es posible realizar la modulación para la transmisión de información: intensidad, fase y polarización [42].

Para caracterizar un formato de modulación, se deben tener dos componentes indispensables, un tipo de modulación óptica y un tipo de codificación de línea; donde un código de línea es un tipo de modulación en banda base, a través del cual se busca representar una señal en formato digital asignando formas de onda a cada bit o símbolo que representa la señal, esta representación se realiza con un número determinado de impulsos, dando origen a los códigos más conocidos como lo son: Retorno a Cero (RZ, *Return to Zero*), No Retorno a Cero (NRZ, *NonReturn to Zero*), y Manchester; con la combinación de los procesos anteriores se da origen a formatos de modulación tales como [43] [44]:

- NRZ-OOK
- RZ-OOK
- RZ-DPSK
- RZ-DQPSK

El formato de modulación es uno de los factores más determinantes en el desempeño de un sistema basado en fibra óptica pues este establece entre otros factores, al nivel de potencia de transmisión del sistema, el cual influye directamente en la generación de los efectos de degradación óptica. Existen tasas de transmisión las cuales se consideran más susceptibles a la aparición de dichos efectos de degradación, dados los altos niveles de potencia inyectados al sistema, puesto que a mayor tasa de transmisión se requiere mayor nivel de potencia; es por ello que se hace necesario el uso de formatos de modulación que hagan un uso eficiente del espectro óptico, incrementen la Relación Señal a Ruido Óptico (OSNR, *Optical Signal to Noise Ratio*) global del sistema, promuevan la mitigación de los efectos que degradan la señal de interés y logren incrementar la longitud de los tramos entre etapas de amplificación [42].

A continuación, se presentan algunos de los formatos de modulación más comúnmente usados en la actualidad, junto a sus principales características:

### **1.5.1 NRZ-OOK**

El formato de modulación dominante en los sistemas de comunicación de fibra óptica durante mucho tiempo ha sido NRZ, dado a que requiere un ancho de banda bajo para los transmisores y receptores, no es sensible al ruido de fase del láser y tiene una configuración simple en el transmisor y receptor. En este formato de modulación, la presencia o ausencia de una señal óptica representa un "1" o un "0", respectivamente. La estructura rentable de transmisor y receptor de NRZ-OOK permite la implementación de sistemas de comunicación de fibra óptica a velocidades de 2,5 o 10 *Gbps* con un rendimiento adecuado.

Cuando un bit de datos es "1", se enciende el modulador y se emite un pulso óptico, mientras que cuando el bit de datos es "0", el modulador permanece apagado y no emite ningún pulso óptico. Para la decodificación, los pulsos eléctricos recuperados se muestran y se comparan con un umbral con el fin de determinar si cada pulso representa un bit de datos "1" o "0".

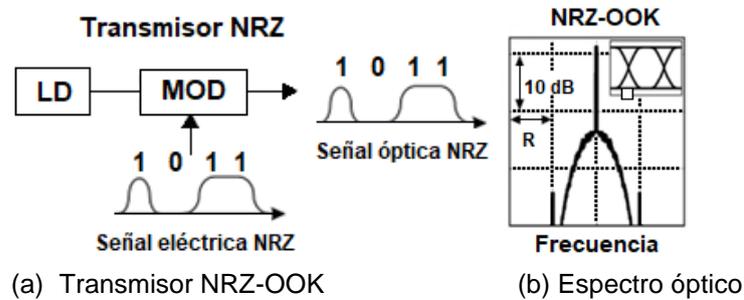


Figura 1.9: Diagrama en bloques del transmisor y espectro óptico NRZ-OOK. Tomado de [43].

En la Figura 1.9, se observa el diagrama en bloques del transmisor *NRZ OOK*, donde la señal eléctrica es modulada por medio de un modulador de intensidad externo. Este modulador puede ser de tipo Modulador Mach-Zehnder (MZM, *Mach Zehnder Modulator*) o Tipo Electro Absorción (EAM, *Electro Absorption Modulator*), que se encarga de convertir la señal eléctrica por medio de la técnica de Modulación Digital de Amplitud (OOK, *On-Off Keying*), teniendo un OOK con una tasa de datos  $R_b$  en una señal óptica con la misma tasa de datos.

Sin embargo, este formato tiene algunas limitaciones. Debido a la falta de transiciones en la señal, puede sufrir de una mayor sensibilidad a la dispersión cromática y a la interferencia Intersímbolica, lo que se traduce en una reducción del rendimiento en sistemas de comunicación de larga distancia y alta velocidad.

### 1.5.2 RZ-OOK

Las señales ópticas RZ, son generadas con base al uso de una señal de reloj con la misma velocidad de datos que la señal eléctrica; además, el ancho de banda de la señal, es menor que el periodo de bits. Se tiene que la señal óptica modulada se divide en pulsos de corta duración llamados, pulsos RZ. Cada pulso RZ representa un bit de información, al cual se le aplica la técnica de Modulación Digital de Amplitud, la cual consiste en encender y apagar la señal óptica para transmitir información binaria.

Para transmitir un "1" lógico, se enciende la señal óptica y se emite un pulso RZ con una amplitud alta. Para transmitir un "0" lógico, la señal óptica se apaga y no se emite ningún pulso RZ. Este formato de modulación, permite operar a velocidades de transmisión de datos de hasta 10 Gbps.

Una de las principales ventajas del formato de modulación RZ-OOK sobre NRZ-OOK se centra en la mayor tolerancia a altas potencias, donde puede asimilar una potencia umbral mayor, lo que finalmente se traduce en mayor resistencia a las afecciones generadas por efectos no lineales que surgen en el sistema. Finalmente, esta característica se traduce en una mayor robustez frente a ISI, distorsiones y ruido en el canal, para el sistema en general [42].

En la Figura 1.10, se observa el diagrama en bloques que representa el transmisor RZ-OOK, dicho transmisor está conformado por un láser de onda continua (CW, *Continuous Wave*), seguida de dos moduladores MZM de intensidad externa conectados en cascada. El primer modulador actúa como un pulso Carver, este es impulsado por una

fuente de señal de microondas  $X_1(t)$ . En el siguiente modulador se tiene un un generador de datos NRZ  $X_2(t)$  generado por un binario pseudoaleatorio y al final  $E(t)$  denotando la intensidad del campo óptico en el puerto de entrada y salida de cada modulador MZM [45].

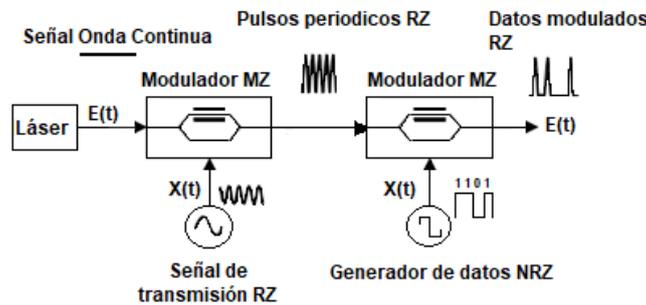


Figura 1.10: Diagrama en bloques RZ-OOK. Tomado de [45].

### 1.5.3 RZ-DPSK

En RZ-DPSK se tiene un pulso óptico en cada ranura de bit, con los datos binarios codificados con un cambio de fase "0" o " $\pi$ " entre bits adyacentes. Por lo tanto, para transmitir un "1" lógico, la fase de la señal óptica se cambia en  $180^\circ$  en comparación con la fase del bit anterior, y, por consiguiente, para transmitir un "0" lógico, la fase de la señal óptica se mantiene igual que la fase del bit anterior.

En el extremo receptor, la señal óptica se compara con la fase de la señal anterior para determinar si se transmitió un "1" lógico o un "0" lógico.

Una de las ventajas de RZ-DPSK es que es menos susceptible a la ISI y a la dispersión cromática en comparación con RZ-OOK, lo que permite una mayor transmisión de datos a mayores distancias. Este formato es capaz de trabajar a velocidades de transmisión de datos de hasta  $40 \text{ Gbps}$ , debido a su capacidad para mitigar los efectos no lineales de la fibra óptica y permitir la transmisión de señales de alta calidad a distancias mayores con una pérdida de información relativamente baja.

En la Figura 1.11, se observa un diagrama en bloques típico de un transmisor RZ-DPSK, primero se tiene un modulador de fase electro-óptico que genera una señal óptica NRZ-DPSK convencional, para ser modulada por un pulso tipo MZM a la misma velocidad de datos, mediante la implementación de otro modulador de intensidad electro-óptico [43].

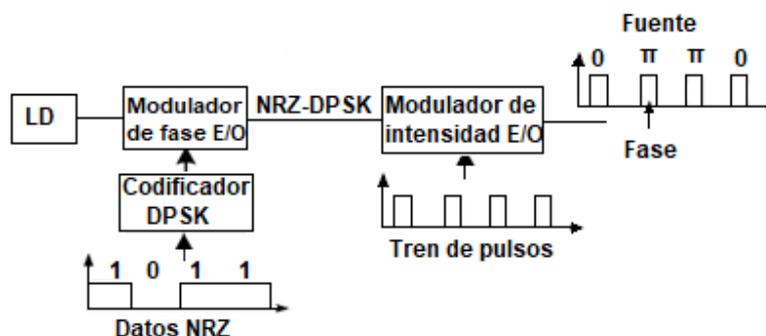


Figura 1.11: Diagrama en bloques del transmisor RZ-DPSK. Tomado de [43].

### 1.5.4 RZ-DQPSK

Es un formato de modulación multinivel, puesto que transporta más de un bit por símbolo, véase la Figura 1.12. Este tipo de formato puede ser implementado con codificación NRZ o RZ y no se tiene impacto en la amplitud. La ventana de este formato multinivel es básicamente el mismo que en DPSK, pero esta vez la fase no es dividida por dos sino por cuatro, permitiendo así una codificación de 2 bits por símbolo.

Su funcionamiento se basa en el cambio de fase de la señal óptica en dos pasos, donde cada paso representa un bit de información. Para transmitir un "11" lógico, se cambia la fase de la señal óptica en 90° en ambos pasos. Para transmitir un "10" lógico, se cambia la fase de la señal óptica en 90° en el primer paso y se mantiene igual en el segundo paso. Para transmitir un "01" lógico, se mantiene la fase de la señal óptica en el primer paso y se cambia en 90° en el segundo paso. Finalmente, para transmitir un "00" lógico, se mantiene la fase de la señal óptica en ambos pasos.

En el extremo receptor, se compara la fase de la señal óptica con la fase de la señal anterior para determinar si se transmitió un "11", "10", "01" o "00" lógico.

RZ-DQPSK es efectiva para sistemas de comunicación de fibra óptica de alta velocidad que requieren una alta eficiencia en la transmisión de datos a largas distancias, buena tolerancia a la Interferencia Intersimbólica y a la Dispersión Cromática.

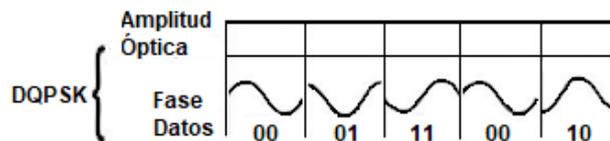


Figura 1.12: Esquema de la modulación DQPSK. Tomado de [46].

La Figura 1.13, muestra un diagrama de constelaciones de la modulación DQPSK, en el cual se observa que la distancia entre símbolos es reducida a la mitad comparada con un DPSK dependiente del tipo de receptor, dicha reducción requiere realmente una necesidad mayor de OSNR comparado con el DPSK, esto con el fin de poder mantener la BER objetivo.

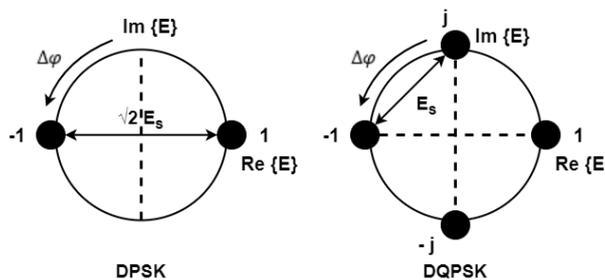


Figura 1.13: Diagrama de constelación de una modulación DQPSK. Tomado de [46].

En la Figura 1.14, se puede observar el diagrama en bloques de un transmisor RZ-DQPSK implementado con un láser de retroalimentación, un modulador tipo *Mach-Zehnder* de accionamiento dual impulsado en una configuración *push-pull* para con ello poder dividir la luz en dos trayectos, dos MZM realizando modulación DQPSK, un conmutador óptico de  $\frac{\pi}{2}$  en uno de sus dos trayectos y por último un combinador para producir la única señal de salida hacia el receptor [47] [48].

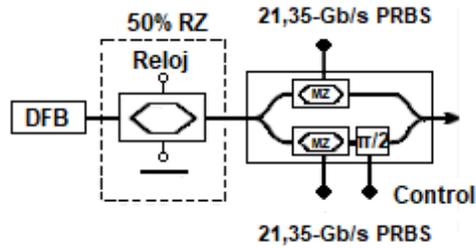


Figura 1.14: Diagrama en bloques del transmisor RZ-DQPSK. Tomado de [47].

## 1.6 EFECTOS DE DEGRADACIÓN ÓPTICA

La propagación de señales a través de la fibra óptica implica que se tenga una interacción con ciertas partículas en dicho entorno, como lo son átomos e iones; de estas interacciones se generan a su vez ciertos accidentes dados por la variación del índice de refracción, micro curvaturas e imperfecciones en la fibra óptica originados durante su fabricación; dichos accidentes en conjunto con las características de configuración planteadas para el sistema, generan a su vez, efectos de degradación óptica los cuales afectan en gran proporción al desempeño del sistema; estos pueden catalogarse como lineales y no lineales [49] [50].

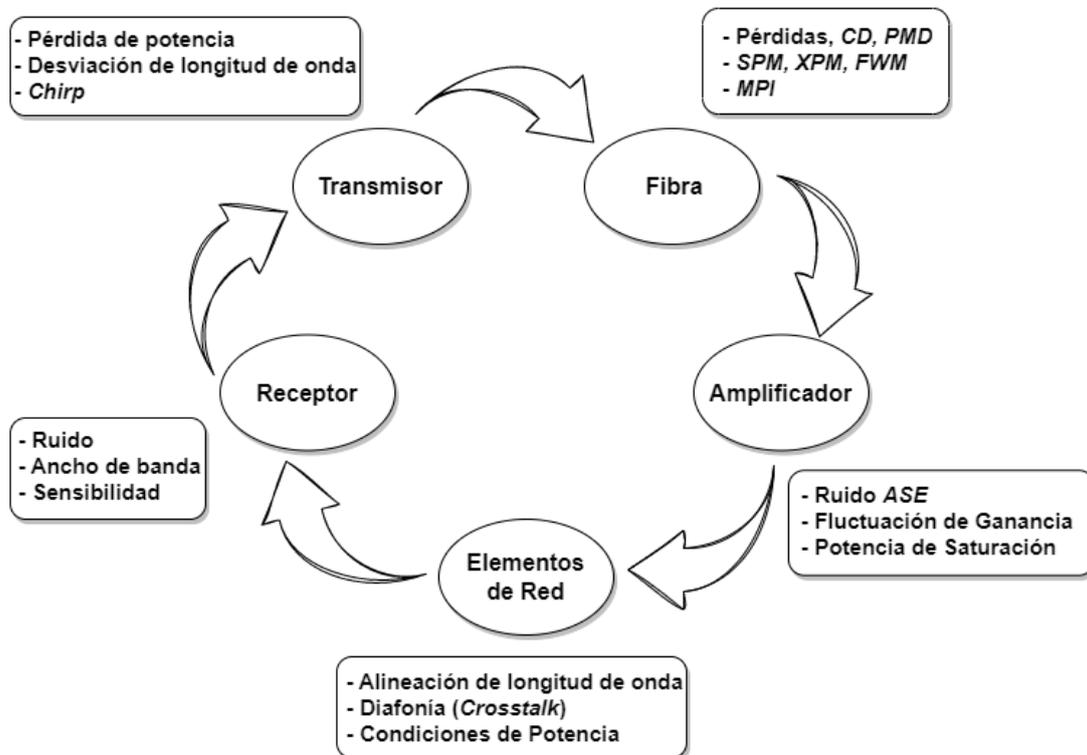


Figura 1.15: Efectos de degradación óptica en un sistema de telecomunicaciones. Adaptado de [51].

A continuación, se clasifican y enumeran las principales degradaciones de los sistemas en la capa óptica que limitan la capacidad del sistema para transportar información.

VARIACIÓN DE LA DEGRADACIÓN	FRECUENCIA DE OCURRENCIA RELATIVA	DESCRIPCIÓN
Atenuación	Elevada	
Variaciones de la potencia del canal óptico debido a variaciones de ganancia.	Elevada	
Desviación de la frecuencia (o longitud de onda) del valor nominal.	Elevada	[UIT-T G.692]
Dispersión por modo de polarización (PMD) (primer orden y órdenes superiores)	Media	Apéndice II [UIT-T G.663]
Mezcla de cuatro ondas (FWM)	Media	Apéndice II [UIT-T G.663]
Ruido de emisión espontánea amplificada (ASE) en amplificación óptica	Media	Apéndice II [UIT-T G.663]
Dispersión cromática	Media	Apéndice II [UIT-T G.663]
Pendiente de dispersión cromática	Media	[UIT-T G.652] [UIT-T G.663] [UIT-T G.655]
Reflexiones	Media	Apéndice III [UIT-T G.663]
Ruido de láser	Media	
Diafonía entre canales	Media	Apéndice Sup. ITU-T 39
Diafonía interferométrica	Media	[b-UIT-T G-Sup.39]
Modulación de fase cruzada (XPM)	Baja	Apéndice II [UIT-T G.663]
Auto modulación de fase (SPM)	Baja	Apéndice II [UIT-T G.663]
Dispersión de Brillouin estimulada (SBS)	Baja	Apéndice II [UIT-T G.650.2] Apéndice II [UIT-T G.663]
Dispersión de Raman estimulada (SRS)	Baja	Apéndice II [UIT-T G.663]

Tabla 1.3: Degradaciones ópticas. Tomado de [52].

*“Todas estas degradaciones pueden ser suficientemente fuertes para producir una degradación profunda en una señal óptica hasta un nivel en que el receptor ya no podrá detectar los datos con una tasa de error razonable. Para cada uno de los defectos existe una curva de penalidad en función de la probabilidad de ocurrencia por unidad de tiempo.*

Los niveles de frecuencia de ocurrencia relativa en la Tabla 1.3: Degradaciones ópticas. Tomado de .Tabla 1.3 de la recomendación son:

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

- **Alta:** cuando la probabilidad que el efecto sea suficientemente fuerte como para causar una penalidad de  $X$  dB, se produce a razón de 10 eventos por año aproximadamente” [52].

### 1.6.1 Efectos lineales

Una característica general, la cual es compartida por estos efectos es que no tienen una dependencia directa de la potencia de transmisión [49], entre ellos se tienen:

- **Efectos lineales dados por pérdidas**

Atenuación (intrínseca y *Scattering Rayleigh*), ruido. Dado que los receptores ópticos requieren poder captar un mínimo nivel de potencia para recuperar la señal de forma adecuada, y dichas pérdidas se traducen en reducción del nivel de la señal en el receptor, por lo cual se considera un factor de alta relevancia durante la transmisión.

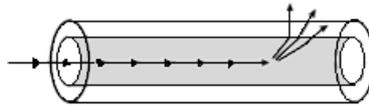


Figura 1.16: Dispersión de Rayleigh. Tomado de [49].

- **Efectos lineales dados por dispersión**

Dispersión Cromática (CD, *Chromatic Dispersion*), Dispersión por Modo de Polarización (PMD, *Polarization Mode Dispersion*). Se tiene que la CD es un efecto lineal que limita el alcance y además la tasa de bits transmitidos; bajo diversos estudios este efecto se considera como la limitación más influyente en los sistemas de comunicaciones por fibra óptica.

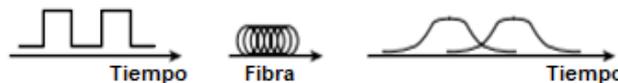


Figura 1.17: Principios de dispersión. Tomado de [49].

- **Dispersión por modo de polarización**

Es un efecto probabilístico, variable con el tiempo y sus efectos no son uniformes. Es causada por la forma ovalada de la fibra como resultado del proceso de fabricación o de las tensiones externas que sufre. La PMD puede variar con el tiempo debido a que la fibra tiene cambios en sus tensiones, a diferencia que la dispersión cromática, que está sujeta a variaciones con el tiempo [5] [49].

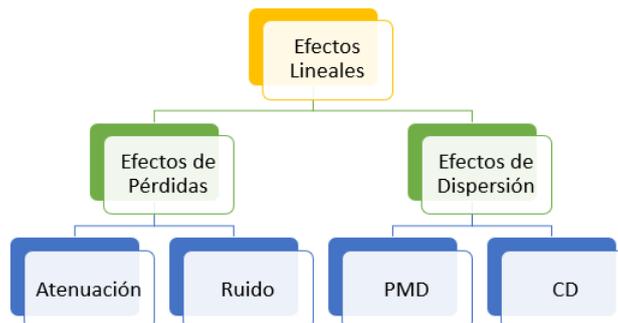


Figura 1.18: Efectos lineales.

## 1.6.2 Efectos no lineales

Según [49] “La respuesta de cualquier dieléctrico a la luz se convierte en no lineal debido a campos electromagnéticos intensos”; los efectos no lineales se producen en todo dieléctrico esencialmente originados por niveles de potencia excesivos aplicados a ellos, dada la necesidad de alcanzar *Span o Vano*<sup>2</sup> con distancias mayores a mayores tasas de transmisión de bit. Por ende, el uso de altos niveles de potencia implica a su vez la presencia de dichos campos electromagnéticos intensos, esto incluso siendo el silicio un material que no se considera altamente no lineal; en este se consideran importantes dichos efectos dado el diseño geométrico y su distribución, la cual va a confinar los haces de luz en una angosta sección a lo largo de todo el hilo de fibra [50] [53].

Los efectos no lineales pueden ser clasificados en dos grupos [49]:

- **Efectos dados por el índice de refracción no lineal/efecto KERR**

Mezcla de Cuatro Ondas (FWM, *Four Wave Mixing*); por Modulación de Fase: Modulación de Fase Cruzada (XPM, *Cross Phase Modulation*), Modulación de Auto Fase (SPM, *Self Phase Modulation*). Estos efectos no lineales de tipo elástico son encargados de producir variaciones del índice de refracción en el medio de transmisión en función de la intensidad óptica. Estos efectos son el resultado de la respuesta del medio a la presencia de campos electromagnéticos de alta intensidad y se manifiestan principalmente a altas potencias de transmisión.

De esta manera haciendo uso de las ecuaciones de Maxwell, es generalizada la ecuación No Lineal de Shrödinger (GNLSE, *General Schrodinger Nonlinear Equation*), usada para describir fenómenos de la propagación de la señal a través de un núcleo de fibra a una distancia determinada de la red, la cual se presenta a continuación:

$$\frac{\partial E}{\partial z} + \frac{\alpha(z)}{2} E + \frac{i}{2} \beta_2(z) \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3(z) \frac{\partial^3 E}{\partial t^3} = i\gamma |E|^2 E, \quad (1.1)$$

Donde:

- $|E|^2$  Potencia del canal óptico.
- $\gamma$  Coeficiente de no-linealidades de Kerr.
- $\alpha(z)$  Constante de atenuación.
- $\beta$  Constante del modo de propagación en la frecuencia central.

En esta ecuación, representa la propagación de un campo óptico  $E(z, t)$ , en donde la presencia de múltiples señales ópticas de diferentes longitudes de onda, conocidas como canales DWDM, aumentan en capacidad y eficiencia de transmisión [9].

---

<sup>2</sup> Span o vano, Es la distancia máxima de un punto A a un punto B situados a la misma altura (postes o torres), donde se localizan los puntos de amarre de la fibra óptica.

- **Efectos dados por *Scattering* inelástico estimulado**

Dispersión Inelástica Estimulada Raman (SRS, *Stimulated Raman Scattering*), dispersión inelástica estimulada Brillouin (SBS, *Stimulated Brillouin Scattering*); ambos relacionados con los modos de estimulación vibracional de la fibra. Estos son generados por el cambio de índice de refracción del medio en función de un alto nivel de intensidad óptica aplicado y los fenómenos de dispersión ya mencionados, en los cuales el canal de comunicación ya no puede ser considerado un medio lineal.

A continuación, se plantean las principales características de ambos efectos y sus afecciones en un sistema de comunicaciones por fibra óptica:

### **DISPERSIÓN INELÁSTICA ESTIMULADA RAMAN (SRS)**

Su origen radica en la estimulación de una señal de luz a una frecuencia determinada, desplazada del bombeo (operando a la frecuencia de *Stokes*), en la cual participan fonones ópticos; este efecto ocurre en tanto en coincidencia de fase como en contrafase. [49].

**Proceso para generación de SRS:** Se parte de la existencia de dos ondas ópticas (un pulso de láser, operando a una de frecuencia fundamental y otro dada la frecuencia Raman), las cuales son inyectadas de forma simultánea en el sistema, estas ondas ópticas están separadas por la frecuencia de *Stokes* en un medio Raman activo. Las ondas incidentes se dispersan al chocar con las moléculas y experimentan una reducción en su frecuencia óptica, se generan entonces unas ondas dispersas. Este desplazamiento de frecuencia coincide con la frecuencia de vibración de las moléculas (frecuencia de *Stokes*); en este caso, la onda de menor frecuencia experimentará una ganancia óptica generada por, y a expensas, de la onda de mayor frecuencia (bombeo del láser) [54] [55].

Algunos de los factores de dependencia más trascendentales en su aparición son:

- Potencia óptica de bombeo.
- Longitud efectiva de la fibra.
- Coeficiente de ganancia Raman, dependiente del material.
- Área efectiva de la fibra.
- Número de canales y espaciamiento entre ellos.

Por lo tanto, la potencia de umbral Raman se define como la mínima potencia de entrada previo al proceso de amplificación Raman y se representa mediante la siguiente fórmula:

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha}, \quad (1.2)$$

$$P_{0 (SRS)} \approx f_{th} \frac{A_{eff}}{g_R L_{eff}}, \quad (1.3)$$

Donde:

$P_0$ : nivel de potencia umbral / crítica de SRS.

$A_{eff}$ : área efectiva de la fibra.

$g_R$ : ganancia de Raman.

$\alpha$ : factor de atenuación de la fibra.

$L_{eff}$ : longitud efectiva de la fibra.

$f_{th}$ : Factor Raman para la potencia umbral.

- $f_{th}=16$ , Configuración co-propagante.
- $f_{th}= 20$ , Configuración contra propagante.

Como se indica en [56], de manera experimental en fibras monomodo de silicio, es posible utilizar una ganancia Raman de:  $g_R = 6 \times 10^{-14} \text{ mW}$ , para longitudes de onda cercanas a 1550 nm.

## DISPERSIÓN INELÁSTICA ESTIMULADA BRILLOUIN (SBS).

Su origen radica en la estimulación generada por una señal inyectada, la cual interactúa con fonones acústicos, sólo ocurre en dirección inversa al sentido de inyección de la señal [49] [57].

**Proceso para generación de SBS:** Este efecto de dispersión se genera por el efecto de electrostricción, mediante el cual los materiales tienden a comprimirse en presencia de campos eléctricos aplicados, dada la interacción entre una onda incidente y un fonón acústico, el cual es generado por ruido térmico a través de una variación de presión en el material, generando deformación del núcleo. Se tiene que cuando la potencia de inyección en la fibra óptica, dada una onda incidente, excede el nivel de potencia umbral, se produce una transferencia de energía de la onda incidente a la onda reflejada; dicha onda es conocida como onda de Stokes, esta tiene un nivel de frecuencia menor a la onda incidente y se propaga dirección opuesta al bombeo [58].

Las afecciones generadas por SBS afectan sistemas que usan niveles de potencia altos en transmisión, entre los efectos dañinos para el sistema generados por este tipo de dispersión se tienen: atenuación, potencia de saturación, retro propagación, ruido en el transmisor, saturación de amplificadores, degradación de la BER, diafonía.

Algunos de los factores de dependencia más trascendentales en su aparición son:

- La longitud de onda de trabajo.
- Tamaño del núcleo de la fibra.
- Separación entre canales.
- Ancho de línea de la señal.
- Índice de refracción de la fibra.
- Nivel de umbral de potencia bastante limitado.
- Tipo de fibra óptica usada.

Teniendo en cuenta que este efecto limita la cantidad de luz que puede ser transmitida a través del canal; se puede definir el nivel de potencia el cual una fibra óptica es capaz de soportar antes de que el efecto SBS empiece a deteriorar el desempeño del sistema; es decir en el momento en que la dispersión generada por la onda en dirección inversa aumenta. A continuación, se plantea la ecuación denotada para la potencia umbral de SBS [59].

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha}, \quad (1.4)$$

$$P_{0(SBS)} \approx \frac{21A_{eff}}{g_B(\Omega_B)L_{eff}}, \quad (1.5)$$

Donde:

- $P_0$ : nivel de potencia umbral / crítica de SBS.
- $A_{eff}$ : área efectiva de la fibra.
- $g_B(\Omega_B)$ : ganancia de Brillouin.
- $\alpha$ : factor de atenuación de la fibra
- $L_{eff}$ : longitud efectiva de la fibra.

Como se indica en [56], de manera experimental en fibras monomodo de silicio, es posible utilizar una ganancia Brillouin de:  $g_B = 5 \times 10^{-11} \text{ mW}$ , para longitudes de onda cercanas a  $1550 \text{ nm}$ .

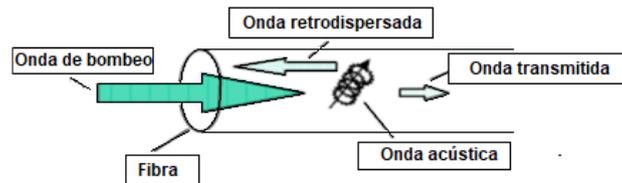


Figura 1.19: Proceso de generación del efecto SBS. Tomado de [59].

Se tiene que, las repercusiones más notorias en el desempeño de los sistemas de larga o ultra larga distancia a tasas de transmisión mayores a  $10 \text{ Gbps}$ , se evidencia dada la aparición de dichos efectos no lineales; uno de los principales modos de mitigación de los mismos ha sido el uso de novedosos esquemas de modulación y multiplexación, los cuales han habilitado mayor eficiencia espectral y el control de niveles de potencia excesivos. En la Figura 1.20, se presenta la clasificación de estos efectos de degradación óptica no lineales:

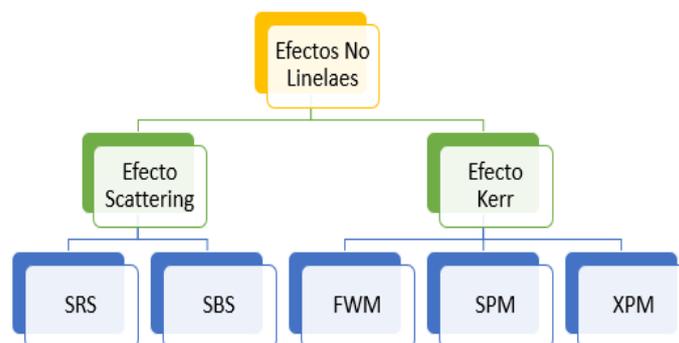


Figura 1.20: Efectos no lineales.

A continuación, se presenta una tabla comparativa, en la cual se ilustran las principales características de los efectos de *Scattering* de interés para el presente trabajo de grado.

Nombre	Scattering Raman Stimulated	Scattering Brillouin Stimulated
Origen	Interacción entre una señal de luz operando a la frecuencia de Stokes con fonones ópticos.	Interacción entre una señal inyectada con fonones acústicos.
Lugar de observación	Señal de salida y regreso.	Señal de regreso.
Efecto en la señal	Limitación de cantidad de luz que puede ser transmitida por un canal, puede generar diafonía.	Pérdidas en la señal transmitida.
Técnica de mitigación	Uso de potencia que no sobrepase la potencia de umbral SRS.	Uso de potencia que no sobrepase la potencia de umbral SBS.
Parámetros de dependencia	Potencia óptica de bombeo, longitud efectiva de la fibra, Coeficiente de ganancia Raman, área efectiva de la fibra, número de canales y espaciamiento entre ellos.	Longitud de onda de trabajo, tamaño del núcleo de la fibra, separación entre canales, ancho de línea de la señal, índice de refracción de la fibra, tipo de fibra óptica usada.
Sistemas de mayor afección	LH, ULH	LH, ULH

Tabla 1.4: Principales características de SRS y SBS. Adaptado de [56] [59].

A lo largo de los años han existido diversos estudios para determinar métodos de compensación para dichos efectos tanto lineales como no lineales, puesto que deben tener cierto grado de compensación dentro del sistema para afectar en menor proporción la calidad y alcance de la señal, y, por consiguiente, el desempeño del sistema en general. Sin embargo, es evidente que algunos efectos van a ser necesarios en una pequeña y controlable proporción, con el fin de mitigar las repercusiones causadas por otros fenómenos de degradación óptica y aprovechar correlación en favor del desempeño del sistema; como lo es el caso de la Dispersión Cromática y su importancia en el estudio de la mitigación de los efectos no lineales.

Se considera importante resaltar que estos efectos de *Scattering* se producen cuando la luz se desvía de su trayectoria original debido a irregularidades microscópicas existentes de forma inherente en el hilo de fibra óptica durante su construcción o manipulación. Dichas irregularidades pueden ser de diversos tipos como, por ejemplo, fluctuaciones en el índice de refracción, presencia de impurezas o defectos de fábrica en la misma. Nos centraremos en el efecto *Rayleigh*, el cual hace que la luz se disperse en múltiples direcciones provocando una considerable atenuación de la señal en el receptor; afectando en mayor proporción a fibras con diámetros pequeños.

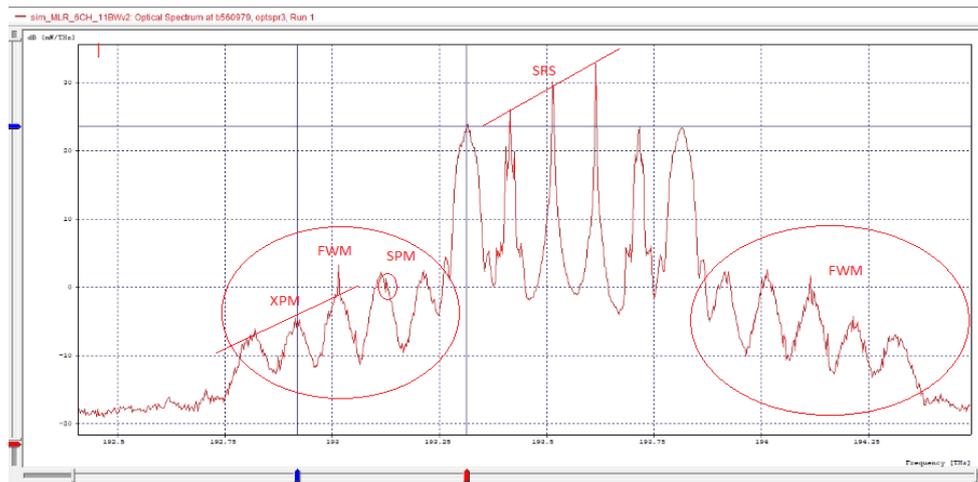


Figura 1.21: Visualización de efectos no lineales de segundo y tercer orden.

## 1.7 MONITOREO DE DESEMPEÑO ÓPTICO

El monitoreo de desempeño óptico (OPM, *Optical Performance Monitoring*) es un proceso utilizado en sistemas de comunicaciones ópticas para evaluar y supervisar el rendimiento de las señales ópticas transmitidas a lo largo de una red. Consiste en la medición y análisis de diversos parámetros ópticos clave para garantizar un funcionamiento óptimo del sistema.

### 1.7.1 Parámetros de monitoreo óptico

El objetivo principal de los parámetros de monitoreo óptico es detectar anomalías, degradaciones y fallas en una red para poder definir la calidad del desempeño de la misma. Estos parámetros están recogidos en el estándar ITU-T G.697. Cabe resaltar que dichos parámetros deben ser definidos y establecidos de acuerdo a los requisitos específicos de la red.

A continuación, se realiza una descripción de los parámetros que se pueden medir con la tecnología actual en los sistemas de transmisión óptica; considerados para el desarrollo del presente trabajo de grado.

- **Factor Q (Factor de Calidad):** es definido como la relación señal a ruido eléctrico (ESNR, *Electrical Signal to Noise Ratio*) en la entrada de un circuito de decisión de un receptor de señal digital, a través de este parámetro se plasman las degradaciones causadas por los distintos efectos ópticos y eléctricos que se producen sobre un punto específico en la red. Sus unidades de medidas son los decibelios y se define a través de las siguientes ecuaciones [60] [61].

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (1.6)$$

$$Q(\text{decibelios}) = 20 \log_{10} Q(\text{lineal}) \quad (1.7)$$

Donde:

$\mu_1$ : nivel medio de tensión del nivel 1.

$\mu_0$ : nivel medio de tensión del nivel 0.

$\sigma_1$ : desviación típica de la distribución de ruido en el nivel 1.

$\sigma_0$ : desviación típica de la distribución de ruido en el nivel 0.

- **Tasa de error de bit (BER):** es por mucho el parámetro más usado e importante en la gestión de monitoreo de fallas en una comunicación óptica, puesto que este representa el número esperado de bits que se han transmitido erróneamente respecto al total de bits transmitidos durante el proceso de comunicación. La UIT-T G. Sup39 establece para el diseño de los sistemas ópticos una BER entre  $10^{-9}$  a  $10^{-12}$ , dependiendo de los requerimientos del sistema. Matemáticamente la BER se expresa en unidades de tensión de la siguiente forma:

FACTOR Q	BER
0	$10^0$
1	$10^{-1}$
2	$10^{-2}$
3	$10^{-3}$
4	$10^{-5}$
5	$10^{-7}$
6	$10^{-9}$
7	$10^{-12}$
8	$10^{-15}$

Tabla 1.5: Correspondencia aproximada entre Factor Q y BER.

- **Relación señal a ruido óptica (OSNR):** se define como la relación entre la potencia óptica media de la señal de una señal transmitida, por el nivel de potencia de ruido existente en un canal óptico. Dicha señal disminuye su potencia a medida que la distancia aumenta, por lo tanto, debe ser elevada en forma periódica, haciendo uso de amplificadores ópticos. Sin embargo, cabe resaltar que el uso de amplificadores ópticos no sólo genera un aumento en el nivel de la señal, sino que además cada amplificador genera un aporte de ruido adicional a través de su implementación en el sistema e incluso, también amplía el ruido indeseado. En la práctica, existen dos posibles valores para la OSNR [62]:
  - i.  $< 1$ ; el cual implica que el nivel de potencia de ruido supera al nivel de potencia de la señal óptica deseada, lo cual conlleva a una degradación de la calidad de la señal captada por el receptor.
  - ii.  $> 1$ ; el cual implica que el nivel de potencia de ruido está por debajo del nivel de potencia de la señal óptica deseada, lo cual implica que la calidad de la señal captada por el receptor es adecuada.

Sin embargo, cabe resaltar que para tener un nivel de señal óptimo captado por el receptor no basta con tener un valor de  $OSNR > 1$ , esto varía entre sistemas. Sin embargo, a mayor nivel de OSNR se tiene un mejor desempeño del sistema y a su vez

una mejor calidad de la señal; según la ITU - T G.697, se recomienda una OSNR de 10 a 30 dB para sistemas DWDM con una potencia de transmisión de canal mayor o igual a 25 dBm, una separación mayor o igual a 100 GHz. En casos distintos, la OSNR debe estar en un rango de valores entre 0 dB y 42 dB. Los principales factores que afectan el nivel o valor de OSNR son [63]:

- Formato de modulación.
- Velocidad de transmisión.
- Nivel de potencia a la salida de las etapas de amplificación.
- CD y PMD.
- Espaciamiento entre canales.
- Filtrado en recepción.

$$OSNR (dB) = 10 \log \frac{P_i}{N_i} + 10 \log \frac{B_m}{B_r} \quad (1.8)$$

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 1.22, se muestra un mapeo de la OSNR, indicando el nivel de la señal óptica y el nivel de ruido a medida que es cruzado por la etapa de amplificación [62].

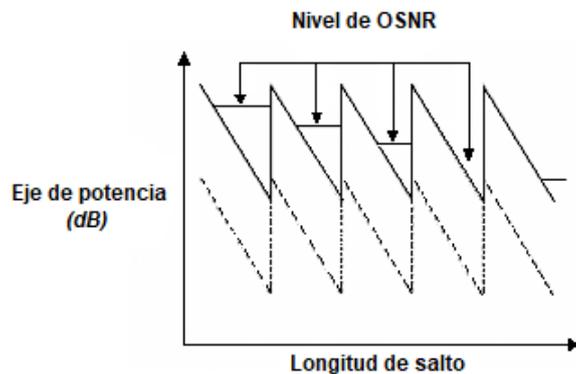


Figura 1.22: Niveles de OSNR para transmisiones WDM con múltiples etapas. Tomada de [64].

- **Potencia del canal óptico:** en sistemas DWDM, para mantener ciertas características de funcionamiento en transmisión de extremo a extremo, se hace uso de varias funciones de control interno, tales como control de la potencia de longitud de onda, control de la potencia de salida del láser, control de la potencia de equalización del canal, control de la ganancia de los amplificadores. Estos bucles de control están pensados para mejorar el funcionamiento y por ende el desempeño medible a escalas temporales de milisegundos o incluso de microsegundos, haciendo que su implementación incida de forma provechosa en la calidad de la transmisión de extremo a extremo. Es conveniente caracterizar los valores mínimos y máximos de los parámetros de entrada y salida para poder supervisar de forma adecuada la potencia del canal. La

potencia mínima del canal se relaciona con la OSNR y con la BER, pueden ser usadas en sistemas monocanal y multicanal, evidenciando así una independencia con el número de canales implementados [65].

- **Diagrama del ojo:** para realizar un análisis de formas de ondas, desfases, niveles de ruido, potencia de señales, en las telecomunicaciones digitales es utilizado el diagrama de ojo; este tipo de diagrama muestra la superposición de las diferentes posibles combinaciones de 1s y 0s en un rango de tiempo o cantidad de *bits* determinados. Estas señales transmitidas por el enlace, permiten obtener características de los pulsos generados que son propagados por el medio de transmisión, bien sean medios alambrados como la fibra óptica, cable coaxial, par trenzado, o medios inalámbricos. Adicionalmente es posible apreciar la distorsión del canal, que se presenta en forma de ISI, relacionada con la severidad de la interferencia y los errores de sincronismo captados en el receptor.

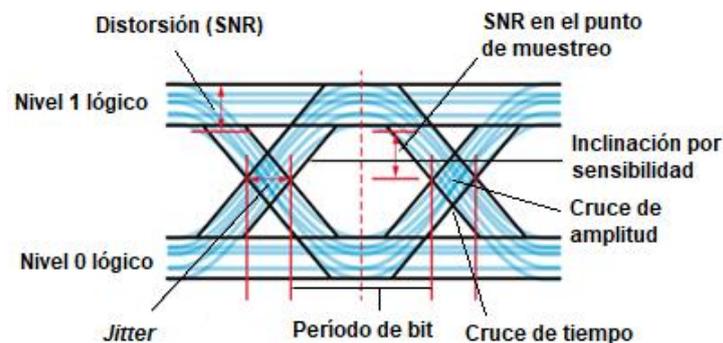


Figura 1.23: Propiedades fundamentales del diagrama de ojo. Adaptada de [66].

Figura 1.23, describe los componentes fundamentales de un diagrama del ojo donde se tiene:

- Nivel de "1" lógico; corresponde a la medición del valor promedio del nivel de un uno lógico.
  - Nivel de "0" lógico; corresponde a la medida del valor del nivel cero lógicos.
  - Cruce de amplitud o cruce por cero; nivel del voltaje en el cual se produce la apertura de ojo y su posterior cierre.
  - Cruce de tiempo; referente al tiempo en el que se produce la apertura del ojo y su posterior cierre.
  - *Jitter*; desviación de fase respecto de la posición ideal en el tiempo de una señal digital que es propagada por el canal de transmisión.
  - Periodo de *bit*; periodo que se tiene entre la apertura y el cierre del ojo. Se tiene a partir del cruce de amplitud y la posición del cierre.
- **Ruido de emisión espontánea amplificada (ASE):** el ruido de emisión espontánea amplificada (ASE, *Amplified Spontaneous Emission*) es un problema común que afecta a las comunicaciones ópticas de larga distancia que emplean a su vez una serie de amplificadores ópticos como un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA), los cuales utilizan un medio activo para amplificar una señal óptica. Una vez se aplica una señal de entrada al amplificador, el medio

activo libera fotones adicionales de manera espontánea, haciendo que dicha cadena de amplificadores ópticos amplifique tanto la señal deseada como el ruido de emisión espontánea. A medida que la señal amplificada pasa a través de cada amplificador sucesivo, el ruido de emisión espontánea también se amplifica. Esto significa que el nivel de ruido se incrementa gradualmente a lo largo de la cadena de amplificadores; haciendo que se afecte la señal-ruido (SNR) de la señal transmitida, lo que puede dificultar la detección y calidad de la señal recibida. Además, si el nivel de ruido alcanza un punto en el que satura la cadena de amplificadores, la señal amplificada puede distorsionarse al máximo y volver inutilizable la red [67].

- **Crosstalk:** el *Crosstalk* o diafonía, corresponde al término utilizado para determinar disturbios en la transmisión, causada por la interferencia que ocurre entre dos o más canales que comparten el mismo medio físico. Es decir, cada canal de transmisión óptica lleva información en forma de pulsos de luz, que se transmiten a través de fibras ópticas individuales, haciendo que en medio de la transmisión y la proximidad de los cables se produzca una interacción no deseada entre los canales.

Para mitigar el *Crosstalk* en una red de fibra óptica, se pueden emplear varias técnicas y medidas, por ejemplo, haciendo uso de fibras ópticas con un buen aislamiento óptico, técnicas de modulación y codificación que mejoren la protección contra el ruido y la interferencia, y el uso de componentes y dispositivos electrónicos con un buen aislamiento y apantallamiento magnético.

Un valor típico de *Crosstalk* es aproximadamente de  $-25\text{ dB}$  es decir, que la potencia que un canal aporta al canal adyacente es más o menos un 0,2% de su potencia [68].

*Nota de autor:*

En este capítulo se caracterizan algunos conceptos teóricos fundamentales para el desarrollo de la investigación del desempeño de formatos de modulación avanzados en presencia de los efectos Scattering SRS y SBS para una arquitectura MLR con acceso NG-PON2.

# 2 ELECCIÓN DE ENTORNO, METODOLOGÍA Y COMPROBACIÓN DEL MODELO BACK TO BACK.

## 2.1 HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN DE REDES ÓPTICAS

### 2.1.1 OptSim

OptSim es una herramienta de simulación de sistemas de comunicación óptica avanzada, entre estas aplicaciones se tienen las adaptaciones para redes WDM, DWDM, TDM, CATV, LAN óptica, y otras ópticas emergentes. Se pueden utilizar para diseñar sistemas de comunicaciones ópticas y realizar simulaciones para determinar su desempeño en función de diversos parámetros y componentes; dicha herramienta es soportada por plataformas Windows y UNIX.

OptSim también incluye modelos de componentes avanzados y algoritmos de simulación validados, que lo sitúan como una herramienta software muy robusta para investigaciones con resultados altamente precisos, muy cercanos a los resultados obtenidos en condiciones reales. Estas redes se despliegan a través de bloques de simulación, que a su vez pueden ser un componente o un subsistema; incluso con la capacidad de soportar simulaciones con módulos software cargados de programas externos como lo es Matlab. La señal que se pasa de un componente a otro como en la vida real y cada bloque es simulado de forma independiente, esta metodología se conoce como “*simulación orientada a bloques*”.

Características principales:

- Posee un alto rendimiento y soporte para optimización basada en análisis de múltiples parámetros de medición.
- Herramienta de diseño con múltiples motores que implementan simulaciones más precisas y eficientes para cualquier arquitectura de enlace óptico tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.
- Amplia biblioteca con componentes predefinidos por cada fabricante, haciendo que se obtenga facilidad en el modelado de dispositivos disponibles comercialmente.

Además, la herramienta de simulación OptSim posee un documento “*User Guide*”, el cual define dos modos de simulación en las cuales pueden ser utilizadas dependiendo del tipo de resultados que se deseen obtener [69].

**Simulaciones en modo bloque:** la señal de datos de entrada pasa entre los componentes y es evaluada y representa el tiempo total simulado por bloque de datos hasta el punto de salida.

**Simulaciones en modo muestra:** resulta ser más útil para escoger entre los diferentes tipos de variaciones en el diseño de un enlace de fibra óptica, este método se encarga de mostrar cada muestra tomada de forma independiente, mejorando los resultados en una memoria secuencial de cada punto de interés.

Además, el modo muestra presenta dos tipos de simulación:

- **Técnica de ancho de banda variable (VBS, *Variable Bandwidth Simulation*)** encargada de definir un entorno de simulación en donde las señales son propagadas como muestras en el dominio del tiempo sobre un ancho de banda variable proporcionado por el usuario y permite determinar el comportamiento de la señal en recepción. Esta técnica es utilizada para simular efectos lineales y no lineales para los componentes ópticos y eléctricos; haciendo uso de sus diferentes opciones de simulación como lo son “*VBS Loss Only Fiber*”, que solo tiene en cuenta la atenuación de la fibra, “*VBS Linear Fiber*”, que considera solamente los efectos lineales y “*Full VBS*”, que se caracteriza por considerar todos los efectos presentes en la interacción con la fibra.
- **Técnica de propagación espectral (STP, *Spectral Propagation Technique*)** es una simulación que se realiza en el dominio de la frecuencia, donde las señales ópticas son propagadas en la red como espectros de potencia, tomando en cuenta pérdidas y el ruido de cada uno de los componentes. El espectro y los niveles de potencia son evaluados en cualquier punto de la red, cada componente de esta red posee una función de transferencia que no tiene en cuenta las no linealidades de la fibra.

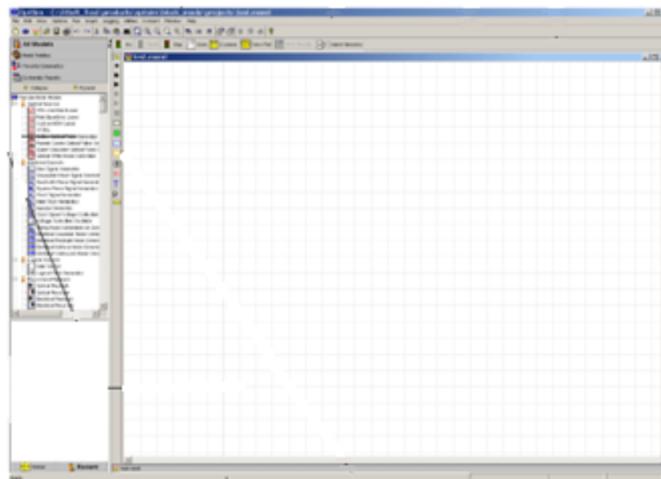


Figura 2.1: Entorno de simulación software OptiSim. Tomado de [69].

### 2.1.2 OptiSystem

Software de simulación, el cual permite diseñar enlaces en redes para fibra óptica de alta calidad, esta herramienta fue desarrollada por Optiwave; posee muchas características y librerías que facilitan al usuario la implementación de un diseño de red. Este software se puede encontrar en la página oficial de Optiwave, en conjunto con un manual para asegurar su correcta instalación y modos de uso. Provee además varios ejemplos con los cuales se pueden realizar diferentes pruebas según el escenario de

simulación y requerimientos propuestos. Se debe tener en cuenta que esta herramienta al momento de ser instalada y realizar un registro se podrá utilizar por un periodo de 30 días en su versión gratuita y con ello poder generar los diseños de redes LAN, SAN, MAN y ULH, desde capa de transmisión a nivel de componentes, hasta despliegues de sistemas complejos; además simular su desempeño en operación [63].

Características principales:

- Diseños de redes ópticas que incluyen OFDM, anillos SONET/SDH, CWDM, DWDM, PON, cable, OCDMA.
- Permite el diseño de amplificadores, receptores y transmisores.
- Posee herramientas de análisis como diagramas BER, Factor Q, medición de la frecuencia modulada pulsada, diagrama de ojo, potencia de señal / OSNR, efectos lineales y no lineales.
- Posee interfaces con otras herramientas como: Matlab, Simulink, LTspice y Agilent.
- Diversidad de formatos de modulación (RZ, NRZ, CSRZ, DB, DPSK, QPSK, DP-QPSK, PM-QPSK, QAM-16, QAM-64).

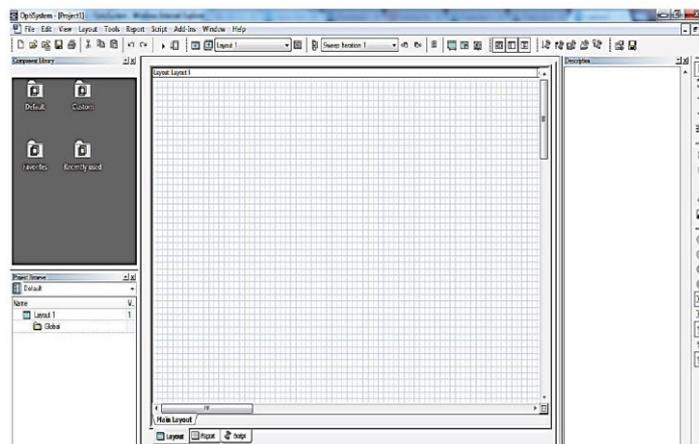


Figura 2.2: Entorno de simulación OptSystem. Tomada de [63].

### 2.1.3 OptiFiber 2.1

Es un software de la empresa Optiwave, el cual brinda la posibilidad de simular parámetros especiales de la fibra óptica en un sistema de comunicaciones, algunos de estos son:

- Dimensión de la sección transversal
- Material de composición
- Índice de refracción
- Pérdidas
- Dispersión
- No linealidades

Esta poderosa herramienta software es ampliamente utilizada como método de “*experimental testing*” para diferentes tipos de fibra, con el fin de predecir el comportamiento de cualquier fibra dada, brindando así la opción de ajustar y optimizar

su desempeño en una posterior etapa productiva para una meta propuesta. OptiFiber se basa en el uso de librerías que aportan diferentes funcionalidades a esquemas de red de diferentes niveles de complejidad.

A continuación, se presentan algunas las principales funcionalidades:

- Diseño de fibra multinivel, con base al uso de funciones o fórmulas especificadas por el usuario.
- Interoperabilidad con Matlab.
- Asignación de dispersión de material basado en el modelo de *Sellmeier*.
- Modelado de pérdidas de material basado en fórmulas experimentales comprobadas.
- Cálculo de características para fibras de cualquier modo, fundamental o de orden superior:
  - Índice de refracción efectivo y propagación constante.
  - Retardo de grupo.
  - Dispersión de velocidad de grupo (material, guía de onda, total).
  - Diámetro de modo de campo de en relación al modo de área efectiva de la fibra.
  - Macro flexiones, micro flexiones y pérdidas por empalmería.
- Geometría, perfil de patrón, composición de la fibra.
- Cálculo de efectos de la birrefringencia inducida dadas perturbaciones intrínsecas o extrínsecas.
- Cálculo de PMD en función de modelos estocásticos. Entre otros [70].

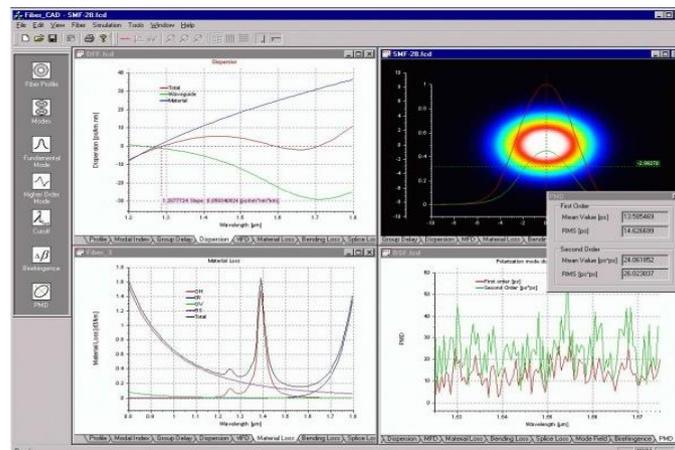


Figura 2.3: Entorno de simulación OptiFiber. Tomado de [70].

En cuanto a la elección del software de simulación se presenta una comparación entre los tres planteados, la cual se centra en factores como la integración e interoperabilidad con diferentes softwares, nivel de escalabilidad para despliegues orientados a operación de módulos e incluso redes completas, entorno de simulación y complejidad en su uso, funcionalidades prácticas enfocadas a los factores que son tenidos en cuenta durante la simulación, librería de componentes, requisitos de instalación y acceso a la herramienta.

CARACTERÍSTICAS	OptSim	OptiSystem	OptiFiber
Complejidad de uso	Medio	Medio	Medio
Librería de componentes	Alto	Alto	Medio
Parámetros de monitoreo óptico	Si	Si	Si
Requerimientos de instalación	Windows, Linux, Unix RAM 128 MB Disco Duro 400 MB	Window, Linux RAM 128 MB Disco Duro 400 MB	Windows RAM 32 MB Disco Duro 10 MB
Interoperabilidad con otras herramientas	Matlab, Simulink, Luna Optical Vector Analyzer	Matlab, Simulink, LTspice y Agilent	Matlab, Simulink
Licencia	Comercial	Comercial	Comercial

Tabla 2.1: Comparación de herramientas de simulación.

Para el desarrollo de las simulaciones del trabajo de grado se utilizará la herramienta *OptSim v.5.2 de Synopsys Inc.* en la cual se podrán realizar las diferentes configuraciones de cada escenario planteado, con el fin de analizar su desempeño respecto a los parámetros de monitoreo óptico expuestos en el capítulo 1.

## 2.2 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

“La descripción de las características de interés de un sistema se conoce como *modelo del sistema*, y el proceso de abstracción para obtener esta descripción se conoce como *modelado*” [71]. Es necesario comprender que la definición de un escenario está orientada hacia la caracterización de su finalidad específica, siendo una representación parcial de la realidad; por lo tanto, este debe representar de forma clara las características del sistema de interés y tener la suficiente sencillez como para facilitar el mantenimiento, adaptación y reutilización del mismo. El diseño y desarrollo de los escenarios presentes en el trabajo de grado, serán fundamentados en la metodología de simulación planteada en el libro: “*Modelado y simulación*” [71]; la cual, se busca de forma lógica y sencilla, ordenar una serie de etapas con el fin de aportar versatilidad y adaptabilidad al desarrollo de la metodología misma. Esta metodología puede ser aplicada a cualquier entorno de simulación mediante el desarrollo y cumplimiento de una serie de fases.

Cabe resaltar que, a pesar de mostrar cierta linealidad entre sí, las fases pueden ser modificadas durante cualquier etapa del desarrollo; es decir, pueden ser corregidas o ajustadas en función de los requerimientos funcionales del trabajo propuesto. A continuación, se presentan características relevantes de las etapas mencionadas anteriormente.

- **Formulación del problema:** la identificación de objetivos es la fase inicial del proyecto de simulación; se considera que los objetivos deben gozar de dos características fundamentales, las cuales son: alta especificidad y

mensurabilidad; esto con el fin de posibilitar una correcta caracterización y adecuado abordaje, respecto a la problemática planteada.

- **Diseño del modelo conceptual:** este diseño surge de la necesidad de establecer un escenario lógico no definitivo, independiente del software de simulación, que tenga en consideración las características estructurales más relevantes de la solución planteada, en función de su operatividad real, pudiendo así filtrar elementos que no contribuyan a completar los objetivos planteados para el trabajo de grado.
- **Definición, construcción y validación del modelo general de simulación:** la caracterización de los aspectos más relevantes de la solución es muy importante, esta afirmación debe ir de la mano con la comprensión del problema debido a que, juntos conducen al desarrollo de soluciones. Por lo tanto, es recomendable desarrollar varios escenarios compuestos por las características más trascendentales, que conduzcan nuevamente a alcanzar los objetivos planteados para el trabajo de grado.
- **Verificación y validación de los escenarios de simulación:** el objetivo principal de esta etapa es producir un modelo preciso y confiable con base al modelo conceptual, verificando su correcta implementación, coincidencia con especificaciones y supuestos planteados. Se puede considerar que todo modelo es incorrecto hasta que se demuestre lo contrario, además de que dentro de su aplicabilidad este posea un rango de precisión que permita su representación en un entorno real.
- **Recolección y tratamiento de datos:** este proceso se considera de vital importancia para el desarrollo de la metodología, puesto que, la veracidad, coherencia, suficiencia, fecha y método de recolección de un dato, entre otros; definen la validez del mismo. Por lo tanto, es necesario clarificar cada uno de los principios planteados anteriormente, previo a brindar conclusiones que puedan considerarse bien orientadas o declarar resultados como definitivos.
- **Análisis:** en esta etapa se busca medir el comportamiento del sistema simulado con el fin de caracterizar su utilidad; esto implica un análisis estadístico de los resultados obtenidos de cada simulación. Cabe resaltar que, a mayor cantidad de escenarios de simulación y profundidad del análisis, mayor será la capacidad de detectar problemas en los mismos, además de facilitar la generación de recomendaciones, mejoras y/o soluciones de interés.
- **Documentación:** una documentación actualizada, la cual permita conocer el estado del trabajo de grado y su evolución diaria, es de suma importancia para detallar aspectos técnicos, modo de configuración y operación del modelo de interés. Por lo tanto, un documento final que contenga toda la información del proyecto, introducción, objetivos, hipótesis, descripción del sistema, modelo y análisis de simulación es trascendental para demostraciones y aplicaciones futuras.

- Implementación:** esta etapa posibilita la puesta en práctica de las decisiones tomadas durante todo el estudio de simulación, se procede a realizar la implementación del trabajo de grado en función de todos sus antecedentes; dicha implementación es respaldada por las decisiones de los autores.

En función de la metodología de simulación anteriormente planteada, se define el siguiente diagrama de flujo para el desarrollo de las simulaciones del trabajo de grado.

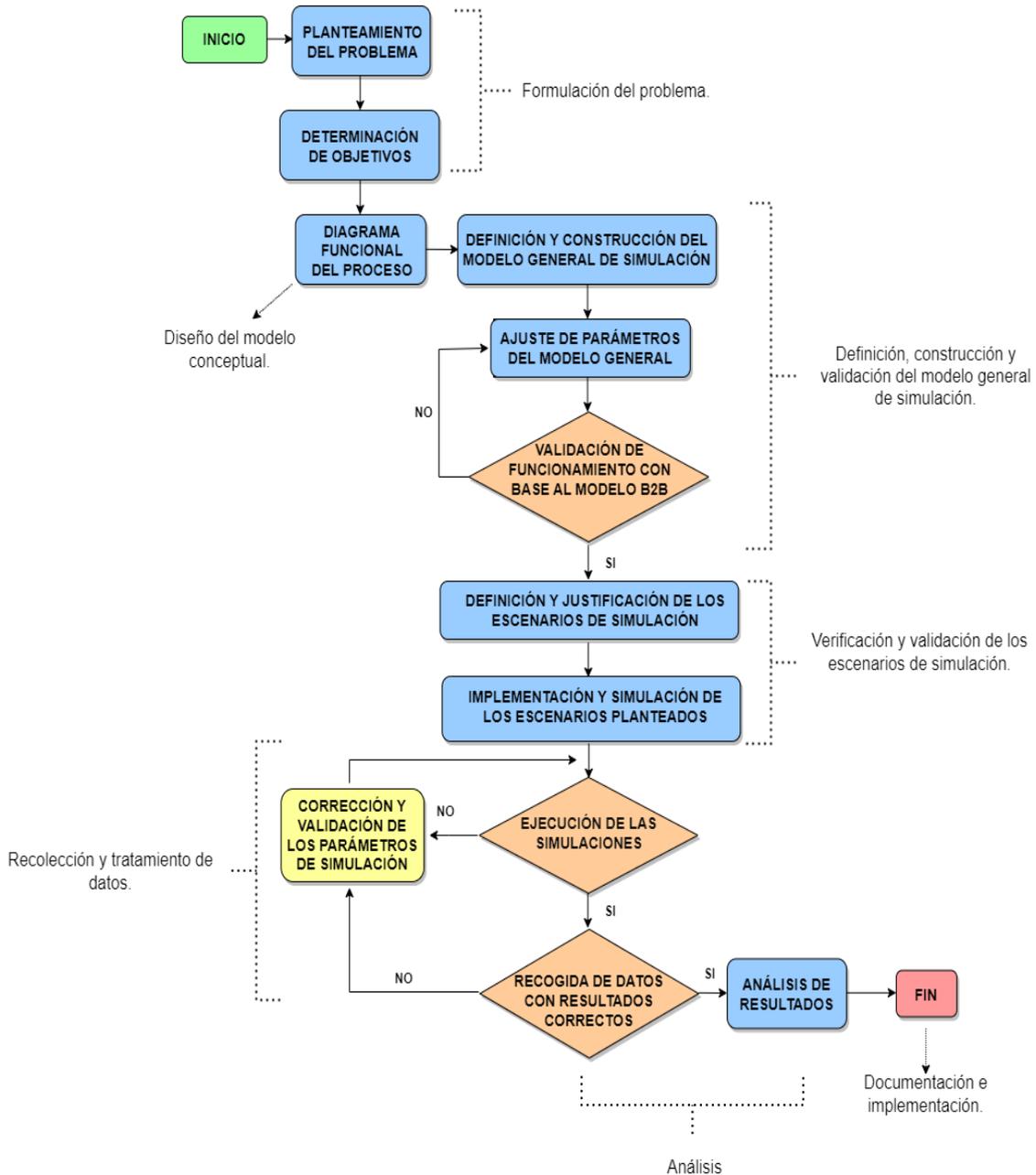


Figura 2.4: Diagrama de flujo del modelo de simulación.

## 2.2.1 Diseño del modelo conceptual

### ▪ Diagrama funcional del proceso

Se plantea un modelo general, el cual caracteriza de forma general, todas las virtudes de una red de tipo NG-PON2, en conjunto con sus componentes más generales; siendo totalmente independiente de un software de simulación específico. Es decir, este modelo puede ser implementado como base de un análisis para redes NG-PON 2 en cualquiera de los softwares de simulación de redes ópticas.

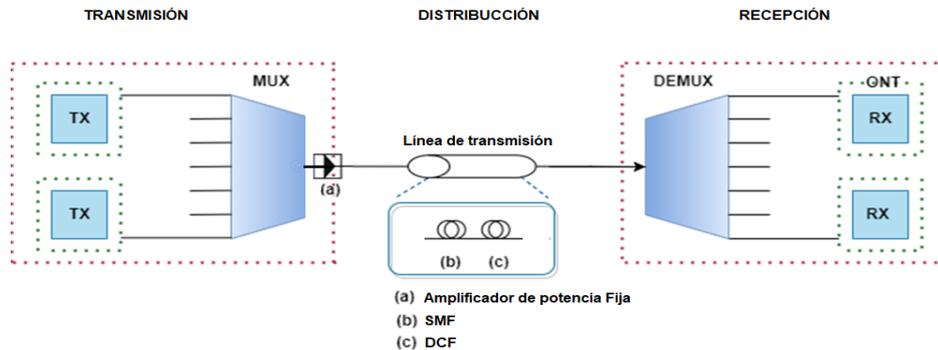


Figura 2.5: Diagrama funcional del proceso de una red de distribución en fibra óptica.

## 2.2.2 Definición, construcción y validación del modelo general de simulación

### ▪ Definición y construcción del modelo general de simulación

Se parte de la necesidad del uso de una red robusta capaz de soportar comunicaciones de altas tasas de información con ultra alta confiabilidad y disponibilidad, teniendo en cuenta la creciente demanda por parte de los usuarios de servicios de telecomunicaciones para múltiples usuarios a largas distancias.

Cabe resaltar que los parámetros que serán escogidos para la implementación en el entorno de simulación están determinados por la oferta del mismo Software OptSim y además por la recomendación ITU-T G.698.1 “*Características de los medios de transmisión y de los sistemas ópticos – Características de los sistemas ópticos*” [72]. Por lo tanto, en este trabajo de grado, se plantea el uso de una red híbrida DWDM MLR con acceso NG-PON2, la cual al usar un gran número de longitudes de onda y separaciones de canales que van desde 100 GHz hasta 25 GHz, posibilita el aumento del ancho de banda efectivo de la fibra y por consiguiente su tasa de transmisión, logrando, además, alcanzar grandes distancias de cobertura. Se destaca también la optimización del uso del espectro partiendo del aprovisionamiento adaptado a las necesidades del usuario, lo cual convierte a nuestra solución en un diseño flexible y transparente, evitando la implementación de complejos módulos en el sistema; llegando a reducir costos de implementación y mantenimiento. Finalmente, el acceso banda ancha de tipo NG-PON2, habilita la posibilidad de obtener velocidades de carga y descarga simétricas de servicios múltiples tales como internet, voz y video para usuarios residenciales y

empresariales; gracias a su compatibilidad con WDM. Todo sobre la misma línea de fibra óptica.

Cabe resaltar que tal como está definido en la recomendación ITU-T G.989.1, los desarrolladores, enfocaron sus esfuerzos en cubrir las necesidades existentes en diversos mercados utilizando los componentes de red existentes de forma eficiente y a un bajo costo, debido a su alta compatibilidad con estándares PON previos, tales como GPON y XGS-PON [73].

- **Ajustes de parámetros del modelo general**

### Características y parámetros técnicos

Se define al entorno de simulación como la distribución detallada de red, la cual determina todos los elementos, interconexiones entre componentes y características específicas de la misma. De la base teórica del capítulo 1, se busca definir diferentes características de la red, tales, topología, equipos y/o módulos comerciales, además de diversos parámetros que tienen gran influencia en el desempeño de la red y sobre los cuales se centra cada caso de estudio.

#### A. Transmisor de un sistema DWDM

- **Láser:** un láser de fibra óptica es un dispositivo en el que el medio activo utilizado para proporcionar ganancia se encuentra en una fibra óptica dopada con algún tipo de elemento, como el erbio, terbio o tulio. Estos elementos dopantes son capaces de absorber energía en una longitud de onda específica y emitirla en una longitud de onda diferente, lo que permite la amplificación de señales de luz en el rango espectral usado para las telecomunicaciones.

Existen diversas especificaciones que se utilizan para describir las características de los láseres. En la Tabla 2.2 se presentan algunas de las características más importantes y de mayor influencia en el comportamiento de un láser.

Tipo de dispositivo	Longitud de onda [nm]	Potencia de salida [mW]	Ancho de banda	Distancia	Tipo de fibra
Láser CW	1310 – 1565	1	> 10 GHz	Corta y Media (Requieren amplificación para distancias largas)	Monomodo
LED	850, 1300	0.001 – 0.1	< 250 MHz	Corta	Multimodo
Láser Fabry Perot	850, 1310 (1280-1330)	1 a 10	> 10 GHz	Larga	Multimodo Monomodo
VCSEL	850	0,1 a 1	> 10 GHz	Corta	Multimodo
Láser DFB	1550 (1480-1650)	1 a 20	> 10 GHz	Corta y Media (Requieren amplificación para distancias largas)	Monomodo
Láser DBR	850	5	> 1 MHz	Corta y Media	Monomodo

Tabla 2.2: Características de tecnologías de láser. Adaptado de [74].

Se considera el láser de onda continua (CW) como una opción adecuada en sistemas de tipo DWDM, debido a su capacidad para generar una señal óptica constante y continua. Por lo tanto, para el desarrollo de este trabajo de grado, se usarán láser de onda continua, dado su ancho de línea espectral estrecho, el cual permite generar una señal óptica con una longitud de onda muy precisa. La recomendación ITU-T G.691 aplicada a redes DWDM sugiere que esta debe estar en un rango de 0 a 6 dBm.

- **Tasa de transmisión de bit:** la tasa de transmisión de bit o velocidad de transmisión de bit se define como la cantidad de información que se transfiere a través de un medio durante un periodo de tiempo determinado. Esta se mide por la cantidad de bits transmitidos por segundo o lo que es lo mismo bps. Se ha escogido un sistema STM-256 el cual equivale a una tasa de transmisión nominal de 40 Gbps dados los requerimientos del trabajo de grado en general, puesto que es necesario operar en presencia de los efectos no lineales SRS y SBS, teniendo en cuenta que estos tienen mayor influencia en el sistema a tasas de transmisión superiores a 10 Gbps.
- **Interferómetro / Modulador externo:** para encontrar una técnica de modulación que tenga un desempeño costo-efectivo eficiente, es necesario tener en cuenta el formato de modulación y la tecnología del modulador. En la actualidad los componentes de modulación externa son altamente usados para sistemas de transporte a 40 Gbps; una de las tecnologías más usada es MZMs Figura 2.6. En sistemas con modulación externa, los problemas derivados de la modulación directa como el Chirp no están presentes, por lo tanto, la modulación externa provee una señal de mejor calidad. El modulador Mach-Zehnder es un tipo de modulador electroóptico el cual puede modular de forma independiente la fase e intensidad de la señal óptica, aportando bajas pérdidas de inserción al sistema. Es frecuentemente utilizado para modular la intensidad de la señal de luz que se transmite a través de una fibra óptica, siendo capaz de modular la señal de luz a altas velocidades con una alta eficiencia de modulación.

Al ingresar al modulador, la señal proveniente de una fuente láser es dividida en cantidades iguales, para escenarios ideales, cada una dirigida por los dos brazos del modulador. Posteriormente se le aplica una tensión con el fin de alterar la fase de la señal e iniciar el proceso de modulación en ambos brazos. Finalmente, en la salida del modulador se refleja la suma de las señales moduladas en fase de cada rama, siendo estas dependientes de la tensión aplicada, generando así una señal de interferencia destructiva si estas señales se encuentran en contrafase (OFF), o una señal de interferencia constructiva si las señales están en fase (ON).

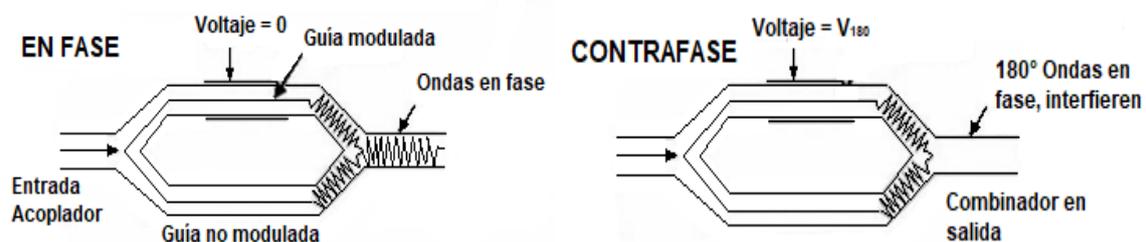


Figura 2.6: Estados de modulador Mach-Zehnder de dos brazos. Tomado de [75].

- **Filtro de Bessel:** los filtros de Bessel también conocidos como “*Filtro Thomson*”, son filtros de respuesta en frecuencia, compuestos de arreglos de resistencias, capacitores e inductores (circuitos RLC) dispuestos en una configuración específica, según el requerimiento.

Estos filtros son ampliamente utilizados para la atenuación de las frecuencias de una señal, con el fin de producir la mínima distorsión en el retardo y amplitud de la señal. Por lo tanto, las frecuencias dentro de la banda de paso se atenúan de manera uniforme; además, el filtro tiene una característica de retardo constante, lo que significa que las diferentes frecuencias de la señal se retrasan de manera uniforme mientras pasan a través del filtro, lo que se considera un factor importante para aplicaciones que tienen requisitos de sincronización precisos.

- **Formato de modulación:** “*El formato de modulación es uno de los factores más determinantes en el desempeño de un sistema basado en fibra óptica pues este determina entre otros factores, al nivel de potencia de transmisión del sistema, el cual influye directamente en la generación de los efectos de degradación óptica. Se tiene además que “el campo óptico tiene tres atributos físicos que pueden ser usados para transmitir información: Intensidad, fase (frecuencia) y Polarización [46]”.*

En este orden de ideas, se presenta la Tabla 2.3, con el fin de argumentar el uso de dichos formatos a lo largo del trabajo de grado, cabe resaltar que, con base a su uso, se dará origen a los escenarios.

FORMATO DE MODULACIÓN / VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN	JUSTIFICACIÓN
<b>NRZ-OOK / 2.5 Gbps</b>	Este formato de modulación está basado en la modulación de encendido y apagado, se considera uno de los formatos de modulación de intensidad más implementados a lo largo de la historia por los proveedores de telecomunicaciones para soporte de servicios de baja exigencia de ancho de banda dada la simplicidad de su implementación y configuración, presentando una respuesta adecuada frente a las diferentes degradaciones ópticas para bajas tasas de transmisión de bit.
<b>RZ-OOK / 10 Gbps</b>	Este formato de modulación está basado en la modulación de encendido y apagado, se caracteriza por permitir transmisión de datos de altas velocidades con base a sistemas de bajo costo de implementación el cual es capaz de proporcionar un ancho de banda más amplio que NRZ-OOK; se destaca su buen desempeño frente a efectos de degradación tanto lineales como no lineales además de tener un comportamiento adecuado frente a la interferencia intersimbólica, lo cual se traduce en una mejor calidad de la señal y una mayor confiabilidad en la transmisión de datos.
<b>RZ-DPSK / 40 Gbps</b>	Este formato de modulación está basado en la modulación por desplazamiento de fase diferencial, siendo usado principalmente en sistemas con alta presencia de ruido y perturbaciones dadas

	<p>las altas velocidades de transmisión, debido a que combina las bondades de RZ y DPSK, aportando alta inmunidad a efectos de degradación óptica como atenuación y dispersión cromática, utilizando una señal de retorno a cero la cual se interrumpe y restablece a entre cada símbolo transmitido, facilitando así la detección de cambios de símbolo en el receptor. Por lo tanto, solamente es necesario detectar la diferencia de fase entre símbolos adyacentes, en lugar de la fase absoluta de cada símbolo.</p>
<p><b>RZ-DQPSK / 40 Gbps</b></p>	<p>Este formato de modulación está basado en la modulación por desplazamiento de fase en cuadratura diferencial. Es comúnmente utilizado en redes de larga distancia y altas tasas de transmisión de bits, siendo altamente resistente a degradaciones de la señal y evitando el uso de costosos regeneradores de señales, todo gracias a su alta tolerancia a efectos de dispersión cromática y atenuación.</p> <p>Se tiene que la señal óptica se modula en cuatro estados diferentes, cada uno representando dos bits de información, en conjunto con la codificación diferencial tipo RZ, lo cual aporta gran robustez y alta densidad de bits por segundo a la señal de información.</p>

Tabla 2.3: Resumen de formatos de modulación usados en los escenarios de simulación.

## B. Medio de un sistema DWDM

- **Tecnología de red:** se plantea el uso de la tecnología DWDM de tipo unidireccional; algunas de las características que han llevado a seleccionar esta tecnología son su viabilidad en despliegues de larga distancia, teniendo en cuenta la recomendación ITU-T G.691, logrando alcances desde 60 *Km* hasta 120 *Km* para enlaces sin amplificación.
- **Banda de operación:** para la elección de la banda de operación, se realizó un análisis de separación espectral bajo el estándar ITU G.694.1, el cual define la separación espectral respecto a la frecuencia central nominal para espaciamentos fijos en rangos desde 12.5 *GHz* hasta 100 *GHz*, además de rangos flexibles; subdividiendo en un factor de "2" el espaciamiento desde los 100 *GHz*. Finalmente se determina que la banda C (1530 – 1560 *nm*) es la más apropiada para las condiciones del enlace, dadas condiciones como menor cantidad de pérdidas por absorción y *Scattering Rayleigh*, baja dispersión cromática y compatibilidad adecuada en operación conjunta con etapas de amplificación EDFA / Raman.
- **Tipo de fibra comercial:** para el presente trabajo de grado, se decide trabajar con un estándar de fibra SMF-28e *Corning* monomodo según recomendación ITU-T G.657, puesto que este es el tipo de fibra estándar más utilizado en las redes DWDM comerciales, el cual permite alcanzar largas distancias a altas tasas de transmisión; su coeficiente de dispersión es de entre 16 y 17 *ps/nm \* Km* y el valor de atenuación para redes alrededor de 1550 *nm* corresponde a 0.275 *dB/Km* [76]. Es igualmente relevante tomar en cuenta, la necesidad de usar módulos de compensación de dispersión cromática (DCF, *Dispersion*

*Compensating Fiber*), la cual presenta un coeficiente negativo significativo para contrarrestar los retardos en las distintas longitudes de onda de los pulsos de luz y disminuir la dispersión resultante. Es esencial tener presente que esta fibra tiene una pérdida relativamente elevada a una longitud de onda de 1550 nm (alrededor de 0.5 dB/km) [13].

Tipo de Fibra	Atenuación	Dispersión cromática		MFD	Polarización
	$\alpha_0$ [dB/Km]	D [ps/nm /Km]	D'slope [ps /nm <sup>2</sup> /km]	$A_{eff}$ [μm <sup>2</sup> ]	PMD [ps /√Km]
PirelliWIDELIGHT_1550	0.24	-6.85	0.157	51	≤ 0.1
PirelliWIDELIGHT_1625	0.25	-0.1	0.107	51	≤ 0.1
PirelliFREELIGHT_1550	0.23	4.3	0.114	72	≤ 0.1
PirelliFREELIGHT_1625	0.25	11.2	0.11	72	≤ 0.1
PirelliDEEPLIGHT_1550	0.23@1560 nm	-2.2@1560 nm	0.12	70	≤ 0.1
CorningSMF28_1310	0.34	0 @1313 nm	0.086	66.5	≤ 0.1
CorningSMF28_1550	0.19	16	0.086	85	≤ 0.1
CorningSMF28e_1310	0.34	0 @1313 nm	0.086	66.5	≤ 0.1
CorningSMF28e_1550	0.19	16		85	≤ 0.1
CorningLEAF	0.2@1550 nm	4@1550 nm	0.1@1550 nm	72	≤ 0.1
CorningLEAF_submarine	0.2@1550 nm	0@1580 nm	0.11@1580 nm	71	≤ 0.1
FurukawaSM332_1310	0.32	0	0.092	68	≤ 0.5
FurukawaSM332_1550	0.18	18	0.092	86.5	≤ 0.5
AlcatelSMF_1310	0.3	0	0.086	63.6	≤ 0.1
AlcatelSMF_1550	0.2	16		81.67	≤ 0.1
AlcatelTERALIGHT_1550	0.205	8	0.058	65	≤ 0.1
AlcatelTERALIGHT_1620	0.22	10.9@1600 nm	0.058	65	≤ 0.1
LucentTRUEWAVE_1600	0.2	4.5	0.045	55	≤ 0.1
LucentTRUEWAVE_1550	0.2	7	0.045	59	≤ 0.1
LucentALLWAVE_1310	0.3	0 @1312 nm	0.088	66	≤ 0.1
LucentALLWAVE_1550	0.2	0 @1312 nm	0.088	80	≤ 0.1
SumitomoZ_1550	0.17	18.5	0.056	80	
SumitomoZPLUSa_1550	0.168	20.5	0.059	110	

Tabla 2.4: Fibras ópticas comerciales disponibles en el software OptSim. Tomado de [77].

- **Número de canales / longitudes de onda:** es bien sabido que para los sistemas DWDM son comúnmente usadas distribuciones de múltiplos de  $2^n$  canales, dada su alta capacidad de multiplexar de forma eficiente diferentes longitudes de onda sobre el mismo hilo de fibra óptica; sin embargo, para lograr los objetivos del trabajo de grado se plantea usar 8 canales para su representación en cada escenario de simulación.
- **Separación entre longitudes de onda:** este parámetro tiene influencia directa con la interferencia de canal adyacente y el nivel de afectación de los efectos no lineales en el desempeño del sistema. Según la recomendación ITU G.694.1 se define que los canales autorizados vienen dados por los espaciamentos típicos

entre canales de  $0.2 \text{ nm}$  ( $25 \text{ GHz}$ ),  $0.4 \text{ nm}$  ( $50 \text{ GHz}$ ),  $0.8 \text{ nm}$  ( $100 \text{ GHz}$ ) hasta  $1.6 \text{ nm}$  ( $200 \text{ GHz}$ ); cabe resaltar que en este tipo de sistemas se busca tener la menor afección por interferencia de canal adyacente posible en conjunto con la mayor eficiencia espectral alcanzable, por lo tanto con base a otros trabajos de grado y documentación teórica consultada [11] [15] [32], se busca usar separaciones de  $100 \text{ GHz}$  y  $50 \text{ GHz}$  entre las longitudes de onda. Finalmente se obtiene una separación espectral definida por:

$$100 \text{ GHz} = 193.61449 + n \times 0.1 \text{ [THz]} \quad (2.1)$$

$$50 \text{ GHz} = 193.61449 + n \times 0.05 \text{ [THz]} \quad (2.2)$$

Dónde,  $193.61449 \text{ THz}$  es la frecuencia de referencia y  $n$ , un entero positivo o negativo correspondiente al canal de interés.

CANAL	SEPARACIÓN A 50 GHz [THz]	LONGITUD DE ONDA A 50 GHz [nm]	SEPARACIÓN A 100 GHz [THz]	LONGITUD DE ONDA A 100 GHz [nm]
4	193.41449	1549.99999	193.21449	1551.60443
3	193.46449	1549.59940	193.31449	1550.80179
2	193.51449	1549.19902	193.41449	1549.99999
1	193.56449	1548.79884	193.51449	1549.19902
0	193.61449	1548.39887	193.61449	1548.39887
1	193.66449	1547.99911	193.71449	1547.59955
2	193.71449	1547.59955	193.81449	1546.80106
3	193.76449	1547.20020	193.91449	1546.00338

Tabla 2.5: Plan de frecuencias para 8 canales, separación de 50 y 100 GHz.

- Módulos de amplificación:** los módulos o etapas de amplificación son necesarios en enlaces larga distancia ya que los niveles de potencia de la señal óptica pueden llegar a disminuir a tal punto de generar complicaciones en la captación e identificación de la señal a nivel de recepción; estas disminuciones en el nivel de la señal están asociadas a pérdidas introducidas por los distintos módulos que componen la red. Se tiene que cada receptor opera con un nivel de sensibilidad mínimo, es decir, si el nivel de amplitud de la señal captada está fuera de este rango, no será detectada y por ende la pérdida de información será inevitable.

Existen diferentes métodos de amplificación de la señal óptica según la ubicación del módulo de amplificación en la red; en este trabajo de grado se va a operar con amplificadores de fibra dopada con Erblio (EDFA) que son representativos dado que su ganancia típica se encuentra alrededor de los  $15 \text{ dB}$  en la región de  $1535 - 1560 \text{ nm}$ , además tienen la ventaja de ser configurados como módulos: Booster, pre-amplificación, post-amplificación o amplificación de línea.

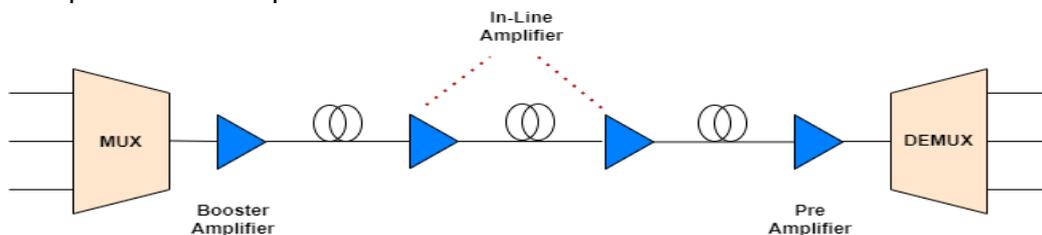


Figura 2.7: Configuraciones para distintas etapas de amplificación.

### C. Receptor de un sistema DWDM

- **Topología de red:** la recomendación ITU-T G.989 enfoca el análisis en la topología de red punto a multipunto (P2MP, *Point-to-MultiPoint*) para NG-PON2, lo que proporciona alta capacidad de ancho de banda y escalabilidad eficiente para soportar una gran cantidad de usuarios finales; cabe resaltar que esta tecnología será utilizada para la sección de simulación en el entorno OptSim. Por su parte, NG-PON2 propone arquitecturas de red completamente de nueva generación a 40 Gbps.
- **Módulo de filtrado – Filtro de Coseno Alzado:** este filtro se utiliza con frecuencia para dar forma a los pulsos en la modulación digital, ya que tiene la capacidad de reducir al mínimo la interferencia entre símbolos (ISI). La respuesta de frecuencia infinita del pulso rectangular lo hace inapropiado para los sistemas de transmisión modernos. Si el uso de un pulso rectangular no es óptimo para la transmisión de datos con ancho de banda limitado, entonces la forma del pulso se desvanecerá rápidamente y provocará cruces por cero en los momentos de muestreo del pulso [78].
- **Splitter:** estos dispositivos se basan en el principio de la división de potencia, donde la señal de entrada se distribuye de manera equitativa entre las salidas. Esto significa que cada salida recibirá una fracción de la potencia total de la señal de entrada original. Por ejemplo, si se utiliza un *Splitter* de 1x2 (1 entrada y 2 salidas), la señal de entrada se dividirá por igual entre las dos salidas, de modo que cada salida recibirá aproximadamente la mitad de la potencia original. Para este presente trabajo de grado se opta por tener *Splitters* ideales y sin pérdidas de 1:8.
- **Sensibilidad del Rx y tipo de fotoreceptor:** la sensibilidad define el mínimo nivel de potencia óptica que es requerida a la entrada del convertidor de tipo opto-eléctrico para alcanzar una  $BER \leq 10^{-15}$  [84,85], es decir, si el nivel captado es menor al umbral de detección, la señal no será adecuada para ser transmitida por el sistema, incumpliendo con los mínimos requerimientos para la QoS y QoE.

Para definir este parámetro, se sigue la recomendación de la ITU-T G.698.1. Por lo tanto, se escoge un receptor que es capaz de captar niveles de potencia que sea  $\geq -30 \text{ dBm}$ ; adicionalmente este valor de sensibilidad implica un *Factor Q*  $\geq 8$ .

- **Fotodetector tipo PIN:** es un dispositivo usado en receptores ópticos para convertir señales ópticas en señales eléctricas. Este dispositivo convierte la señal óptica al dominio eléctrico, recuperando los datos que son transmitidos a través del sistema, estos compuestos por tres regiones de material semiconductor: la región P (dopada positivamente), la región intrínseca o región I (sin dopar) y la región N (dopada negativamente) [79].

En la Tabla 2.6, se plantea de manera general, las etapas y módulos necesarios para conformar la base esquemática de la red de interés y en la Tabla 2.7 se detallan las características generales a considerar para el desarrollo de las simulaciones:

ETAPA	MÓDULOS
Transmisión	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Láser CW, FWHM ~ 100</li> <li>▪ Filtro Bessel</li> <li>▪ Filtro Gaussiano</li> <li>▪ Modulador óptico externo Mach-Zehnder</li> <li>▪ Banda de operación C (~ 1550 nm)</li> <li>▪ Formato de Modulación (esquema de modulación y codificación).</li> </ul>
Medio	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estándar ITU-T G. 657</li> <li>▪ Fibra óptica SMF-28e</li> <li>▪ Módulo de compensación de CD</li> </ul>
Recepción	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Acceso FTTB</li> <li>▪ Amplificador de ganancia</li> <li>▪ Sensibilidad -30 dBm</li> <li>▪ Fotodetector tipo PIN</li> <li>▪ Filtro óptico Coseno Alzado</li> <li>▪ Splitter óptico ideal</li> </ul>

Tabla 2.6: Etapas y módulos del escenario general.

CARACTERÍSTICAS GENERALES		
PARÁMETROS	VALORES	
Tecnología de Red	DWDM MAN unidireccional	
Topología de Red	Punto a multipunto	
Tipo de acceso	FTTB	
Acceso Nominal / Velocidad del Sistema	2.5 – 10 – 40 Gbps	
Banda de Operación	Banda C (1530 – 1560 nm)	
Ventana de Operación	Alrededor de 1550 nm	
Número de canales	8 canales	
Espaciamiento de los canales	50 y 100 GHz	
Distancia del enlace	40 Km + 1 Km última Milla.	
Equipos de amplificación	EDFA de ganancia fija y potencia variable	
Técnica de compensación	Módulo de Post Compensación ideal (DCF) al 90% dada para cada fabricante	
CARACTERÍSTICAS DE LA FIBRA ÓPTICA A 1550 nm		
Corning SMF-28 1550	Coeficiente de dispersión	16 ps/nm * Km
	Coeficiente de atenuación	0.235387891531 dB /Km
	Área efectiva	85 μm <sup>2</sup>
Furukawa SM332 1550	Coeficiente de dispersión	18 ps/nm * Km
	Coeficiente de atenuación	0.211201474071dB/Km
	Área efectiva	80 μm <sup>2</sup>
CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR		
Formatos de modulación	NRZ-OOK, RZ-OOK, RZ-DPSK, RZ-DQPSK	
Tipo de modulación externa	Módulos Mach-Zehnder	

<b>Potencia del Transmisor del Láser</b>	0 dBm
<b>Tipo de Láser</b>	CW
<b>Filtros en Transmisor</b>	Filtro eléctrico tipo Bessel (2.5 – 10 – 40 Gbps) Filtro Gaussiano (40 Gbps)
<b>CARACTERÍSTICAS DEL RECEPTOR</b>	
<b>Sensibilidad del Receptor</b>	-30 dBm
<b>BER</b>	$1e^{-15}$
<b>Factor Q</b>	$\geq 8$ o 18.061 dB
<b>Filtro en Recepción</b>	Filtro óptico Coseno Alzado Filtro eléctrico de Bessel

Tabla 2.7: Parámetros y características generales del escenario de simulación.

Con la información anterior, se plantea el siguiente modelo general de simulación:

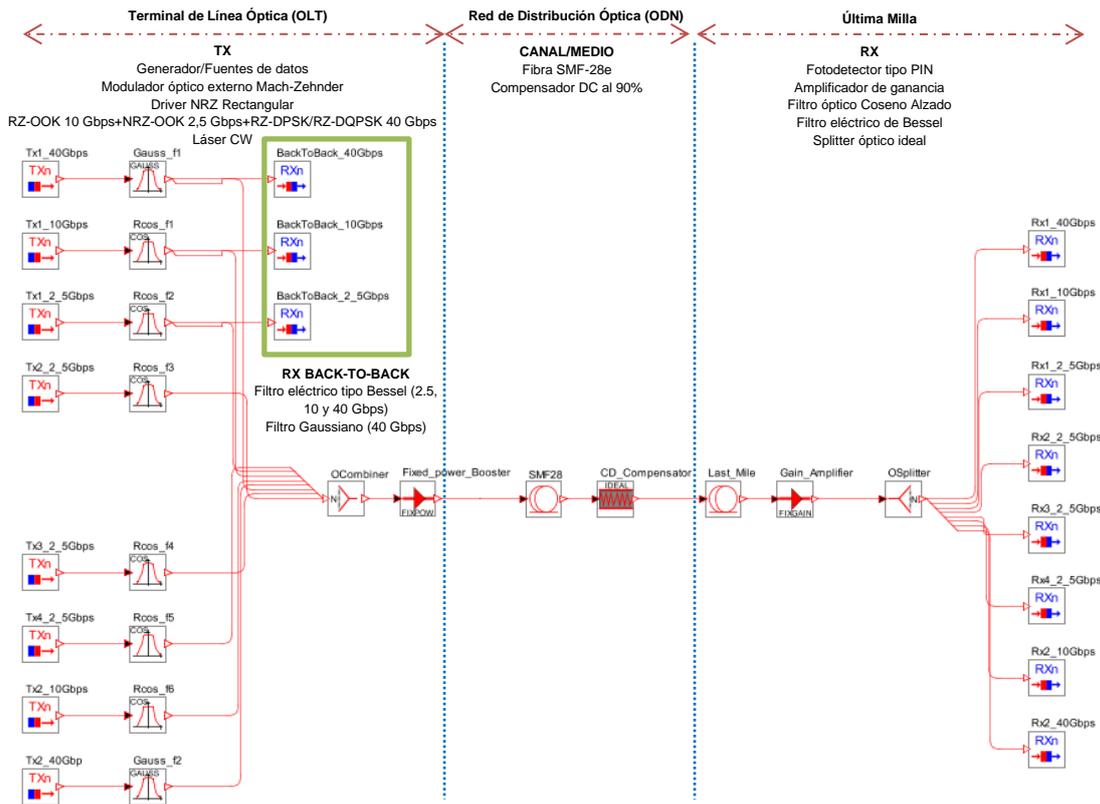


Figura 2.8: Modelo general de simulación.

**Transmisión:**

A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno de los elementos que componen a los bloques de transmisión, para los formatos de modulación empleados en el trabajo de grado.

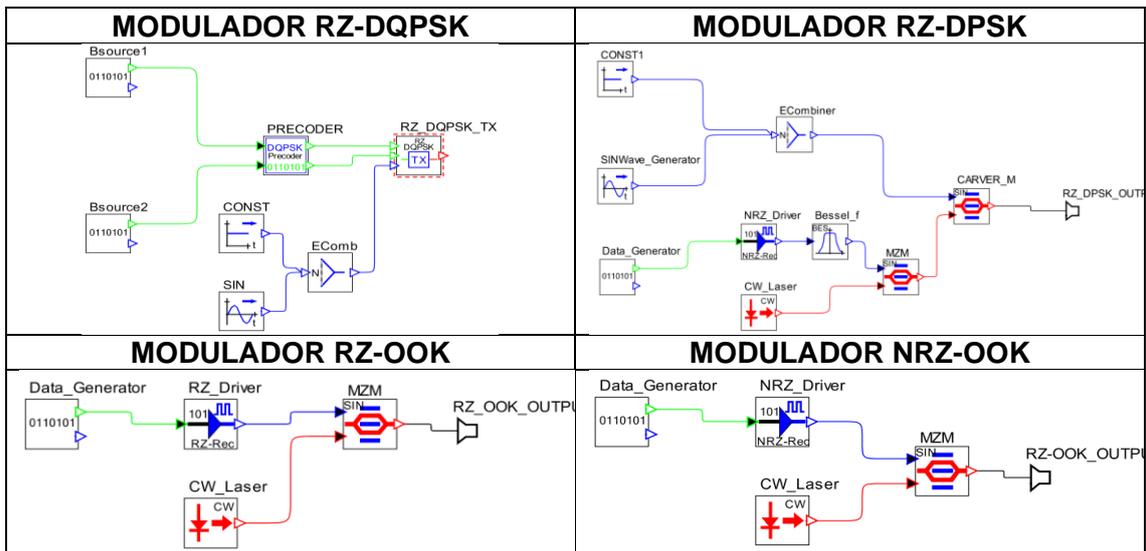


Tabla 2.8: Formatos de modulación que componen los bloques de transmisión.

### Módulos:

- **Generador de datos lógicos pseudoaleatorios**

A partir de este módulo, se generan pulsos de forma pseudoaleatoria, con base a una tasa de transmisión específica (2.5, 10 y 40 Gbps).

Parameter	Value	Units	Range
Bit rate	40	Gbit/s	( 0, Inf )
Corresponding Simulated Bit-Rate	= 39.9374	Gbit/s	
Baud rate	= 40.0	GBaud/s	
Samples per bit	= 65		
Sequence	"Random" ▾		
Custom Sequence Filename	--		
Pseudo Random Sequence Mode	"Automatic" ▾		
Pseudo-Random Sequence Degree	= 9		[ 5, 28 ]
Generating Polynomial Type	"Random" ▾		

Figura 2.9: Fuente de datos lógicos.

- **Driver NRZ**

La función principal del driver NRZ rectangular de tipo eléctrico es la de aportar una señal de salida que asume uno de dos posibles niveles eléctricos; esta salida depende del bit que es transmitido. Por ende, se tiene que cuando un "1" lógico es captado por el driver, la señal de salida se mostrará como "Low Level" durante el tiempo de duración de dicho bit; por el contrario, si un "0" lógico es captado, la señal de salida se mostrará como un "High Level" durante el mismo tiempo de duración del bit.

Parameter	Value	Units	Range
Low Level	5		
High Level	-5		
Time Slope	0.0		[ 0, 0.8 ]
Crossing Point	50.0	%	[ 0, 100 ]

Figura 2.10: Driver NRZ rectangular.

- **Driver RZ**

La función del driver RZ de tipo rectangular es aportar en su salida, una señal eléctrica que puede asumir dos posibles valores respecto al *bit* captado por dicho componente, por lo tanto, si se transmite un "1" lógico, la señal a la salida del driver será "High Level", y, por el contrario, si se transmite un "0" lógico, la señal a la salida del driver será "Low Level"; en ambos casos, para el tiempo de duración del bit.

Parameter	Value	Units	Range
Low Level	0.0		
High Level	5.0		
Duty Cycle	0.5		( 0, 1 )

Figura 2.11: Driver RZ rectangular.

- **Láser CW**

Este módulo es un láser de tipo *Lorentziano* de onda continua. Dentro de sus parámetros de configuración se encuentran, la longitud de onda central y frecuencia central de emisión, la potencia de inyección del láser, y la anchura a media altura (FWHM, *Full Width Half Maximum*). Este parámetro, aportado por el fabricante, permite definir la resolución del láser y el ancho de haz del mismo.

Por lo tanto, cuanto más estrecho sea el FWHM (cercano a cero), mayor facilidad de detección entre dos energías próximas tendrá el foto-detector tipo PIN del receptor.

Parameter	Value	Units	Range
Center emission frequency	= 193.21449	THz	[ 188.0252, 199.0252 ]
Center emission wavelength	1551.60443	nm	[ 1490.12154, 1576.37...
Source Status	1		[ 0, 1 ]
CW Power	= 0.0	dBm	[ -3000, 3000 ]
CW Power	1.0	mW	( 0, Inf )
FWHM Linewidth	= 100.0	MHz	[ 0, Inf )
-20 dBm Linewidth	994.98744	MHz	[ 0, Inf )
Initial Phase	"Random"		

Figura 2.12: Láser CW tipo Lorentziano.

- **Modulador Mach-Zehnder**

Modulador de amplitud externo configurado por defecto.

Parameter	Value	Units	Range
Excess loss	0	dB	[ 0, Inf )
Maximum Transmissivity Offset voltage: V...	5.0	V	
Extinction Ratio Type	"Ideal"		
Extinction Ratio	1000	dB	[ 0, Inf )
Chirp Factor	0.0		
V pi	5.0	V	( 0, Inf )
Electrical Filtering with SIN(f/Bw)/pf Law	"No"		
-3 dB bandwidth	= 40.0	GHz	( 0, 1149.85836 )
First filter notch	= 90.30437	GHz	

Figura 2.13: Modulador Mach-Zehnder.

- **Modulador Carter**

Modulador de amplitud externo configurado por defecto.

Parameter	Value	Units	Range
Excess loss	0	dB	[ 0, Inf )
Maximum Transmissivity Offset voltage: V...	5.0	V	
Extinction Ratio Type	"Ideal"		
Extinction Ratio	1000	dB	[ 0, Inf )
Chirp Factor	0.0		
V pi	5.0	V	( 0, Inf )
Electrical Filtering with SIN(f/Bw)/pf Law	"No"		
-3 dB bandwidth	= 40.0	GHz	( 0, 1149.85836 )
First filter notch	= 90.30437	GHz	

Figura 2.14: Modulador de amplitud externo.

**ODN:**



Figura 2.15: Componentes de la ODN.

- **Módulo SMF-28e**

Para determinar los parámetros específicos de cada módulo de fibra óptica, es necesario tener en cuenta la Tabla 2.4, dado que el fabricante aporta cada uno de los parámetros que definen el comportamiento de la fibra, entre los que se identifican: factor de atenuación ( $\alpha$ ), factor de dispersión cromática ( $D$ ) y área efectiva de la fibra ( $A_{eff}$ ).

Parameter	Value	Units	Range
Length	40	Km	[ 0, Inf )
Length Statistical Variation %	0.0		[ 0, 100 ]

Figura 2.16: Módulo SMF-28e.

- **Compensador de CD al 90%**

Este módulo es utilizado para el proceso de compensación de dispersión cromática, este se relaciona de forma directa con el módulo de fibra óptica usado, gracias a la compensación de Dispersión cromática total, la cual se calcula con base a la dispersión por kilómetros de la fibra usada respecto al total de kilómetros del enlace. Cabe resaltar que los parámetros de valor de dispersión están dados para una frecuencia de referencia específica.

Parameter	Value	Units	Range
Reference Frequency	193.41449	THz	( 0, Inf )
Reference Wavelength	1549.99999	nm	( 0, Inf )
Total Compensating Dispersion D at the ref...	= -590.4	ps/nm	
Total Compensating Dispersion Beta2 at the...	756.2625	ps^2	
Total Compensating Dispersion D Slope at t...	-3.14148	ps/nm^2	
Total Compensating Dispersion Beta2 Slope...	-6.401781	ps^3	

Figura 2.17: Módulo compensador de dispersión cromática ideal.

- **Acceso de última milla**

Este módulo se usa como la representación de acceso de última milla, el cual fue definido para una distancia máxima de 1 Km. Tal como se indicó anteriormente, es necesario tener presentes parámetros como factor de atenuación ( $\alpha$ ), factor de dispersión cromática ( $D$ ) y área efectiva de la fibra ( $A_{eff}$ ) para cada fabricante.

Parameter	Value	Units	Range
Length	1	Km	[ 0, Inf )
Length Statistical Variation %	0.0		[ 0, 100 ]

Figura 2.18: Módulo para fibra de última milla.

**Recepción:**

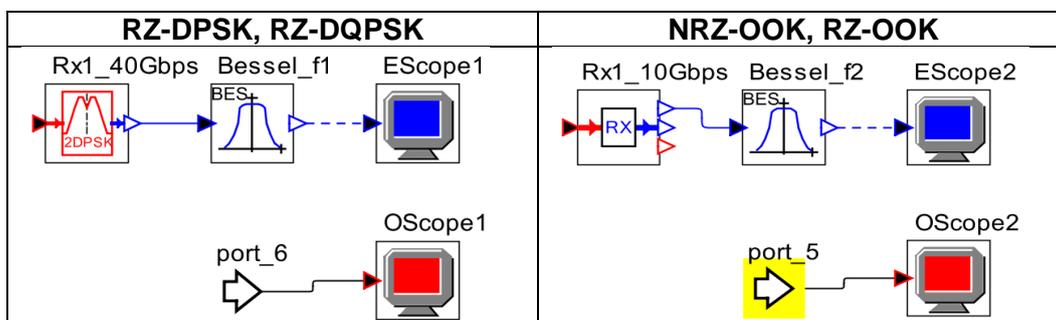


Tabla 2.9: Diagrama en bloques formato de modulación para recepción.

- **Validación de funcionamiento con base al modelo Back To Back (B2B)**

Se considera de gran importancia verificar que las señales inyectadas en el sistema sean comparables a una señal teórica de referencia, para el escenario general de simulación. Por lo tanto, es necesario incluir un modelo “*Back To Back*” para comprobar que la señal generada por el transmisor, sea equiparable con la señal teórica.

A continuación, se presenta el diagrama en bloques del modelo *Back To Back*:

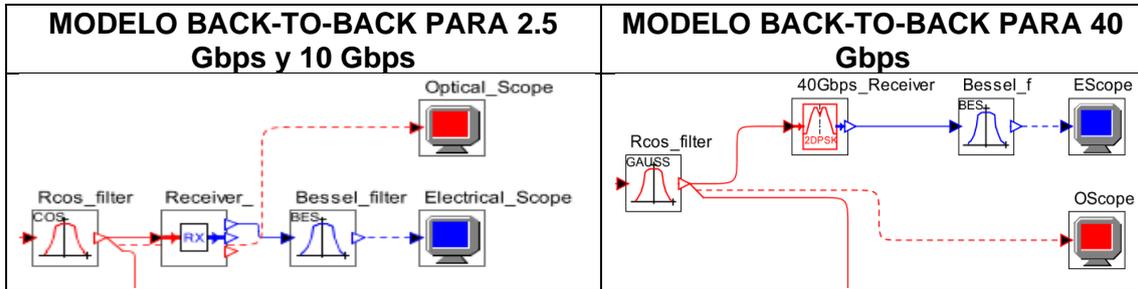
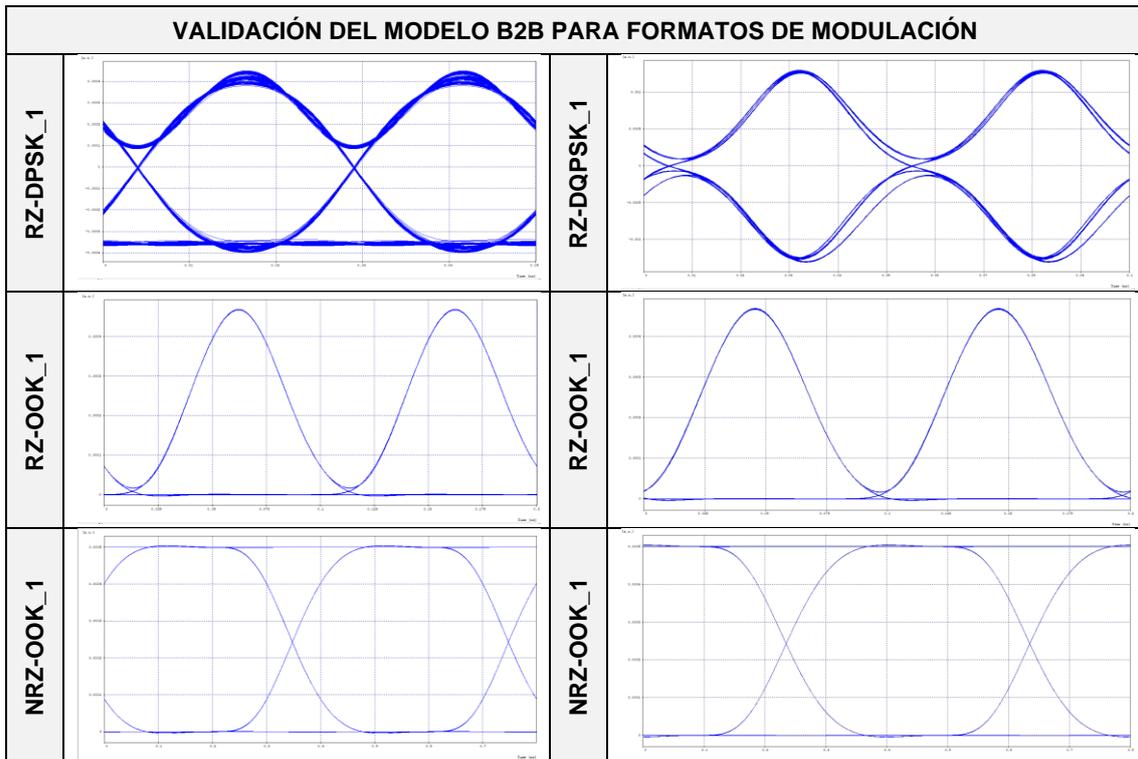


Tabla 2.10: Diagramas en bloques del modelo Back To Back para velocidades de 2.5, 10 y 40 Gbps.

La comparación de la BER en el modelo *Back To Back* a la entrada de cada canal se evidencia en la Tabla 2.11. Cabe resaltar que se ajustaron las características y parámetros nombrados en la Tabla 2.6 y Tabla 2.7 dentro del marco de la simulación para esta validación de funcionamiento; teniendo en cuenta que un transmisor debe que mantener las mismas cualidades para todos los casos de estudio y durante todo momento de operación en un despliegue real.



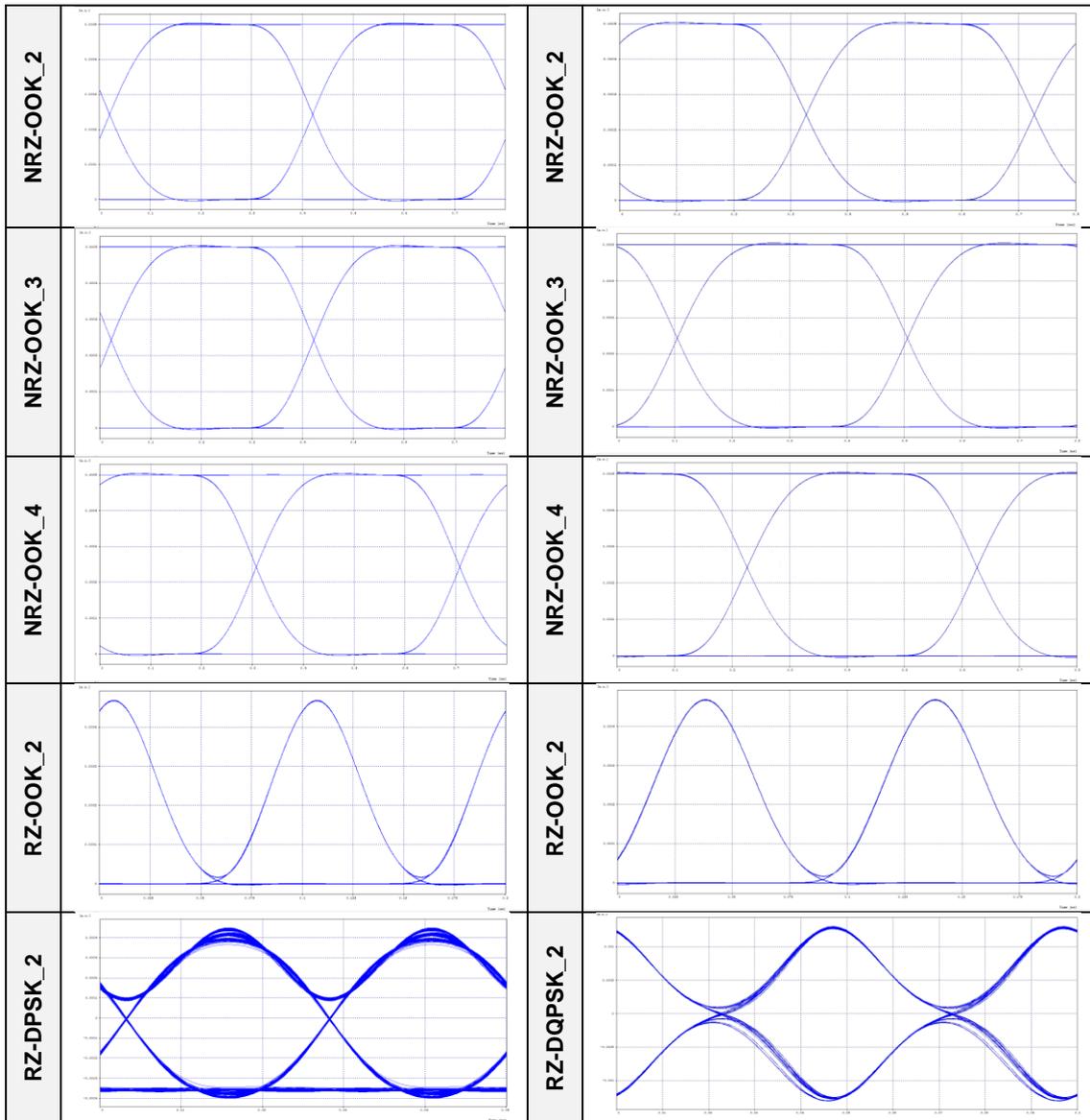


Tabla 2.11: Validación del modelo B2B para los formatos de modulación de los escenarios de simulación.

A continuación, se presentan los resultados de parámetros de monitoreo óptico que han sido considerados como más relevantes para el trabajo de grado. Cabe resaltar que es necesario realizar un paso adicional en el cálculo de la OSNR real, debido a que los valores de OSNR entregados por el software de simulación para cada uno de los canales no son del todo verídicos. Por lo tanto, es necesario ubicar el piso de ruido al mismo nivel de sensibilidad del receptor escogido, para nuestro caso  $-30 \text{ dBm}$ ; la diferencia entre el nivel de OSNR dado por el nivel máximo en OptSim y el piso de ruido, dará como resultado el valor de OSNR real del canal. A continuación, se presenta un ejemplo gráfico de la situación mencionada, donde se ubican los marcadores azul y rojo en los valores de piso de ruido y OSNR aportada por el sistema, respectivamente. Por lo tanto, el valor de OSNR real es de aproximadamente  $24,2 \text{ dBm}$ . Este proceso se realiza para cada uno de los canales en cada escenario mencionado anteriormente.

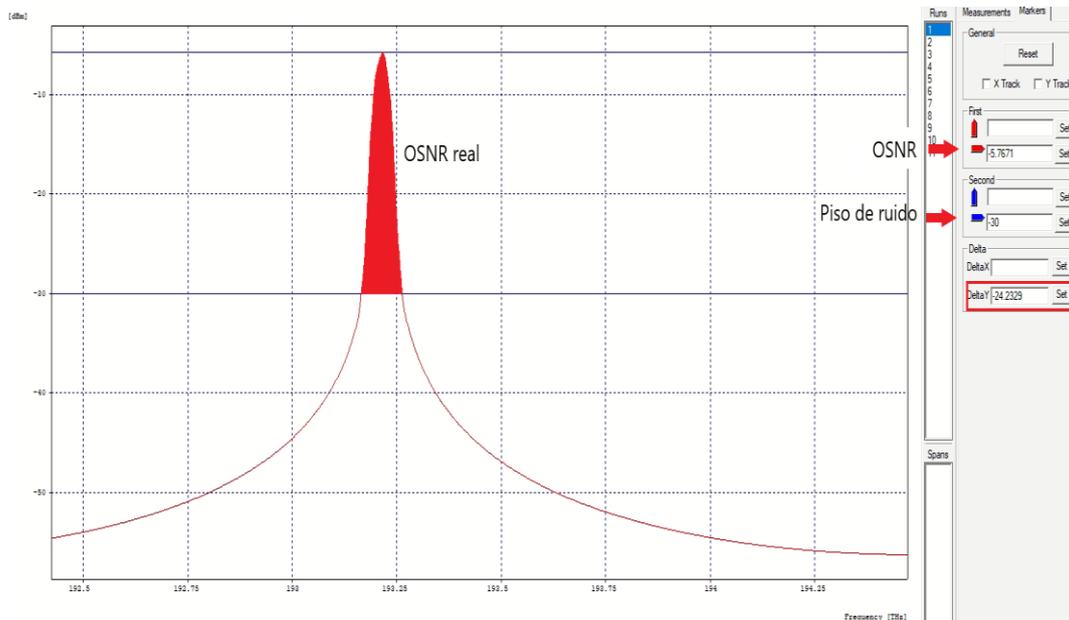


Figura 2.19: OSNR real para un canal.

FORMATO	BER B2B	FACTOR Q B2B [dB]	OSNR B2B	OSNR REAL	JITTER B2B [ns]
RZ-DPSK	1e-40	37,517257	50,435548	19,271	0,00585938
RZ-OOK	1e-40	40	53,002629	17,6187	0,0664063
NRZ-OOK	1e-40	40	59,215909	23,7167	0,0527133
NRZ-OOK	1e-40	40	54,729510	23,7404	0,0647463
NRZ-OOK	1e-40	40	59,622390	23,7664	0,043373
NRZ-OOK	1e-40	40	54,718054	23,77	0,0674554
RZ-OOK	1e-40	40	56,185190	17,7974	0,0285156
RZ-DPSK	1e-40	37,247278	50,344804	19,436	0,00148438

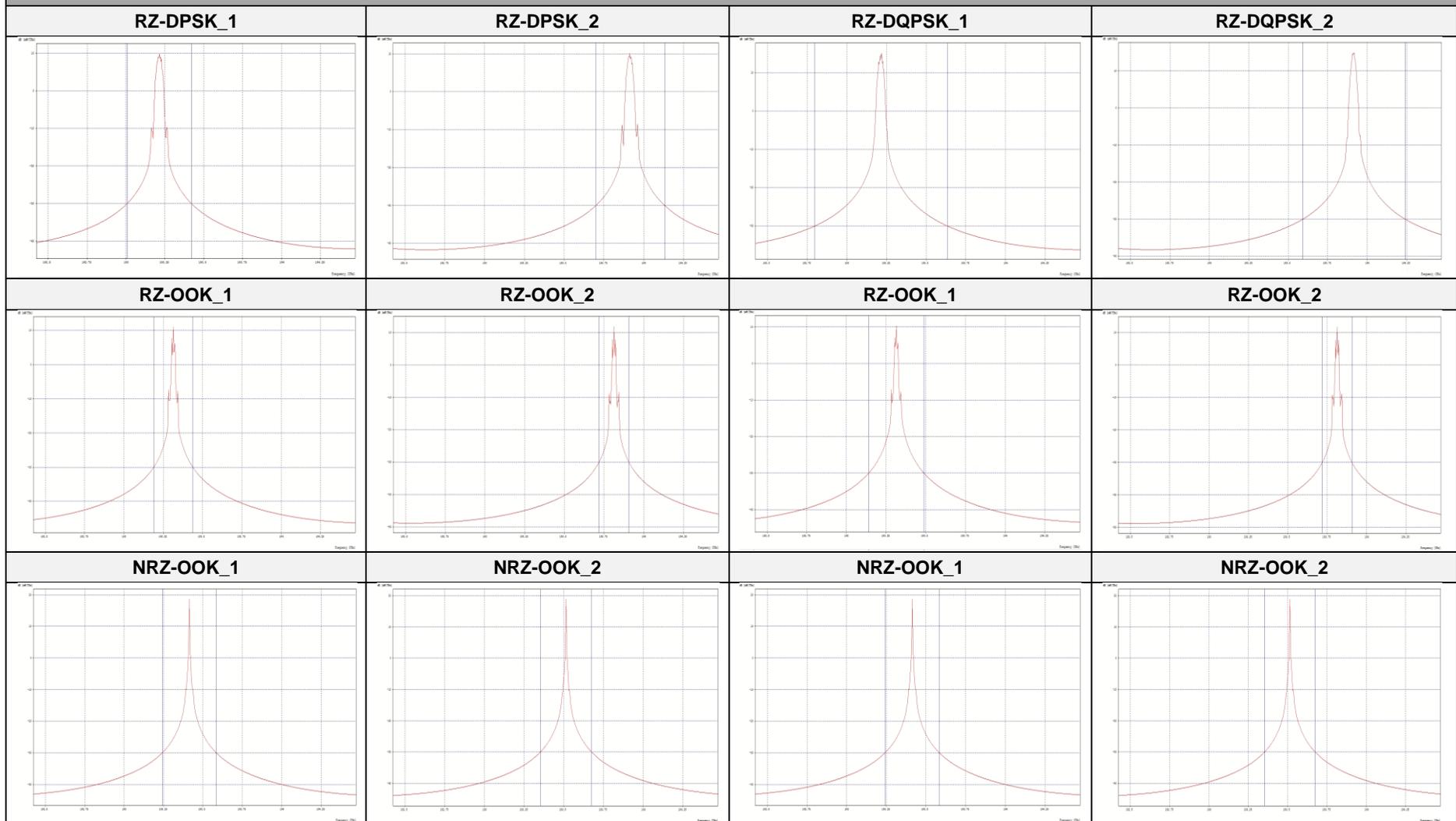
Tabla 2.12: Parámetros de monitoreo óptico del modelo B2B para escenario con formato de modulación avanzado RZ-DPSK.

FORMATO	BER B2B	FACTOR Q B2B [dB]	OSNR B2B	OSNR REAL	JITTER B2B [ns]
RZ-DQPSK	1e-40	40	49,596606	24,2324	0,00018979
RZ-OOK	1e-40	40	50,890305	17,4744	0,0539063
NRZ-OOK	1e-40	40	55,668418	23,6974	0,0726563
NRZ-OOK	1e-40	40	57,664727	23,6976	0,0571772
NRZ-OOK	1e-40	40	58,99581	23,8095	0,0345703
NRZ-OOK	1e-40	40	59,330315	23,8185	0,0621094
RZ-OOK	1e-40	40	55,939685	17,707	0,0449219
RZ-DQPSK	1e-40	38,886588	52,180082	24,7262	0.00031431

Tabla 2.13: Parámetros de monitoreo óptico del modelo B2B para escenario con formato de modulación avanzado RZ-DQPSK.

A continuación, se muestran los espectros ópticos de cada canal y el espectro óptico del sistema MLR.

**ESPECTROS ÓPTICOS POR CANAL PARA FORMATOS DE MODULACIÓN USADOS**



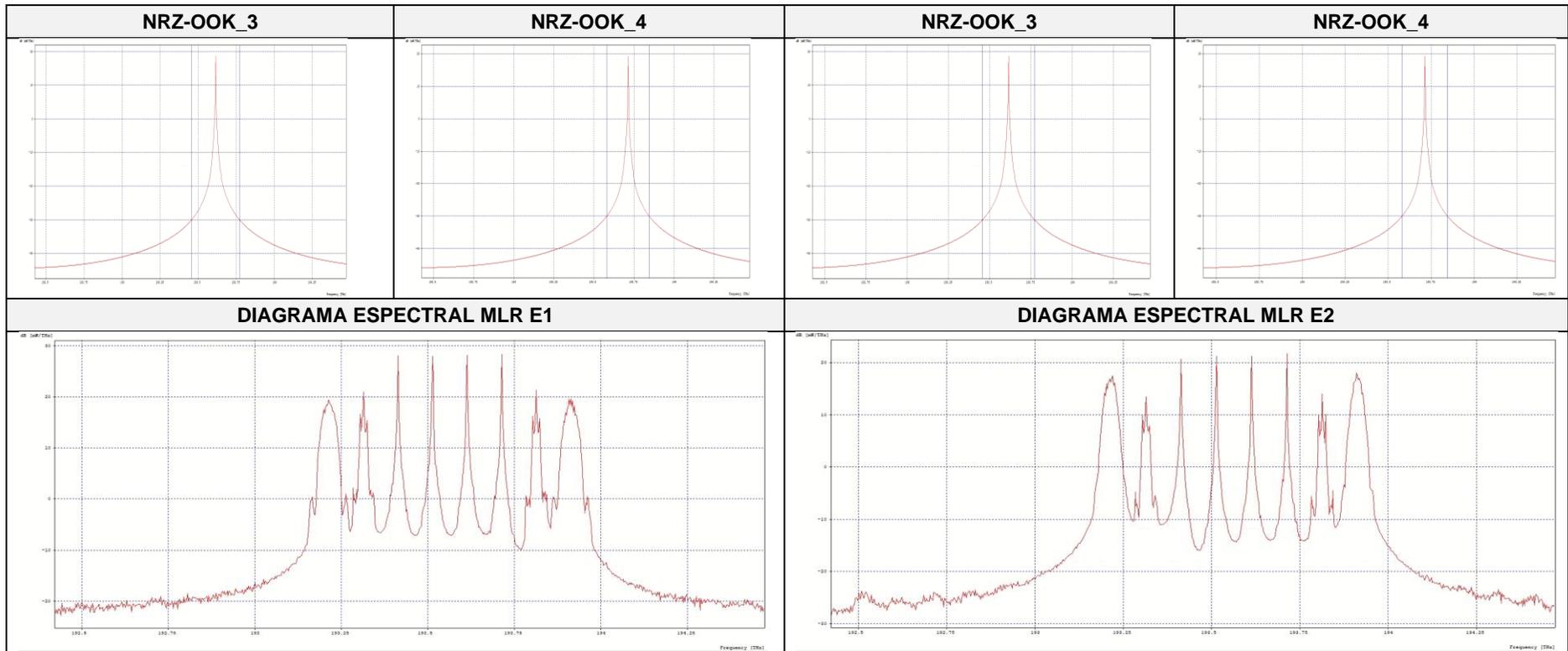


Tabla 2.14: Espectros ópticos por canal para formatos de modulación usados.

*Nota de autor:*

En este capítulo, se presentan los dos escenarios de simulación, sobre el cual se analizarán los diferentes casos de estudio planteados. Inicialmente, se busca caracterizar algunas herramientas de simulación para redes basadas en fibra óptica y los resultados obtenidos del modelo Back to Back.

# 3 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE CASOS DE ESTUDIO

## 3.1 DEFINICIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

En este capítulo se procede a realizar las simulaciones de una red MLR-DWDM con acceso NG-PON2, con el fin de llevar a cabo una comparación del desempeño de la misma, con base al uso de los formatos de modulación avanzados presentados en la teoría expuesta anteriormente. Este proceso se realiza en presencia de los efectos de degradación óptica no lineales de orden superior SRS y SBS en comparación con el desempeño de la red, suprimiendo la presencia de los mismos. Por esta razón, se ejecuta la selección precisa de frecuencias y la configuración individualizada para cada canal; estos pasos se alinean con las especificaciones técnicas que fueron detalladas en el capítulo 2.

Con base a la teoría expuesta en el capítulo 1, se busca comparar el desempeño de la red entre cada escenario de simulación, modificando los módulos, variables operativas y parámetros de desempeño, para cada caso de estudio de forma independiente.

- **Escenarios de simulación:** Se plantea el uso de 8 canales con separación entre canales de 50 GHz y 100 GHz, los cuales están caracterizados por el uso de velocidades de 2.5, 10 y 40 Gbps. A su vez, cada canal de transmisión será modulado de forma independiente, dando lugar a un total de dos escenarios de simulación mostrados en la Tabla 2.3.

En la *Tabla 3.1*, se evidencian los dos escenarios de simulación planteados para cada tasa de transmisión de bits y formato de modulación usado.

ESCENARIOS	2.5 Gbps	10 Gbps	40 Gbps
1	NRZ-OOK	RZ-OOK	RZ-DPSK
2	NRZ-OOK	RZ-OOK	RZ-DQPSK

Tabla 3.1: Escenarios de simulación planteados para SRS y SBS.

- **Casos de estudio:** En primer lugar, es necesario comprender que para la generación de SRS, debe existir la interacción de dos ondas ópticas, las cuales son los pulsos de láser. Uno, a una frecuencia fundamental y otro a la frecuencia Raman. Estos son inyectados de forma simultánea en el sistema, ambas frecuencias se encuentran separadas por la frecuencia de Stokes en un medio Raman activo.

Dentro de las redes DWDM en cuanto menor sea la separación entre canales, mayor interacción será evidenciada entre canales vecinos, lo cual origina *Crosstalk*, adición de ruido y, por consiguiente, degradación de la señal óptica. Este efecto se ve influenciado casi en su totalidad por variables de estimulación como, área efectiva de la fibra, longitud efectiva de la

fibra y penalidades de potencia del sistema. Para fibras con longitudes grandes o áreas efectivas pequeñas, el umbral de SRS será más bajo. Cuando la luz viaja a través de una fibra óptica, los fotones interactúan con las moléculas del material que forma la fibra. Estas moléculas están en constante vibración térmica a nivel molecular. La SRS ocurre cuando algunos fotones ceden parte de su energía a estas vibraciones moleculares. En consecuencia, la frecuencia de los fotones disminuye y se produce un desplazamiento hacia el extremo de longitud de onda más grande del espectro electromagnético, lo que se conoce como "*corrimiento hacia el rojo o Redshift*".

En cuanto a la generación de SBS, está originado por el efecto de la electrostricción, mediante el cual los materiales tienden a comprimirse en presencia de campos eléctricos aplicados. Según la teoría, el pico de ganancia de SBS es inversamente proporcional al ancho de línea del láser de bombeo y de la señal de bombeo; además el pico de ganancia de SBS es también inversamente proporcional al límite de aparición de SBS en un sistema. Por lo tanto, se puede relacionar el límite de aparición de SBS con el ancho de línea de la señal de bombeo. Finalmente se tiene que cuanto menor sea el ancho de línea de láser y de la señal de bombeo, menor será el límite para aparición de la SBS. El efecto SBS puede observarse en el espectro como un pico de dispersión de luz a una frecuencia diferente de la frecuencia de la luz incidente. Este pico se conoce como "*pico de Brillouin*" y aparece desplazado hacia el rojo o el azul en relación con la frecuencia original de la luz, dependiendo de las condiciones del sistema.

Cabe resaltar que este efecto se ve influenciado en gran magnitud por otros factores como la longitud de onda de trabajo, tamaño del núcleo de la fibra, separación entre canales y penalidades de potencia en el sistema. Las ondas acústicas generadas por un canal pueden generar dispersión de una porción de la potencia de otro canal en diferentes direcciones, originando así, *Crosstalk*, distorsión y, por consiguiente, disminución de la calidad de la señal óptica.

Por lo tanto, se sobreentiende que dado su origen los efectos de SRS y SBS, siempre están presentes en el sistema y limitan el máximo nivel de potencia que puede ser transmitido a través de la fibra óptica sin tener una degradación tan significativa en el desempeño del mismo. Es decir, que pueda degenerar una señal a tal punto de afectar su calidad. En el software de simulación OptSim, dentro de la configuración del módulo de fibra óptica, se tienen las secciones "*Raman\_Effects*" y "*SBS*", los cuales permiten controlar ciertas variables de estimulación para dichos efectos, además de ser tenidos en cuenta durante los procesos de simulación y condicionar el desempeño del mismo.

Parameter	Value	Units	Range
Raman Profile Type	"Lorentzian"		
Reference Frequency for Raman Profile	299.79246	THz	( 0, Inf )
Reference Wavelength for Raman Profile	1000	nm	( 0, Inf )
Raman Constant	0.18		[ 0, 1 ]
First Raman Time Constant	122	fs	[ 0, Inf )
Second Raman Time Constant	320	fs	[ 0, Inf )
Raman Profile Filename	--		
Custom Raman Profile Type	"gr"		

Figura 3.1: Variables de estimulación de SRS en OptSim.

Para tener una influencia de SRS completa en el desempeño del sistema, debe habilitarse una opción adicional, la cual se encuentra en el apartado de “*Advanced Control*” de la fibra óptica, tal como se indica a continuación.

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

Figura 3.2: Opciones de control avanzado.

Parameter	Value	Units	Range
Fiber SBS	"On"		
Brillouin Gain	3e-11	mW	( 0, 1 )
Brillouin Gain Linewidth	40	MHz	( 0, 1000 )
Brillouin Gain Reference Frequency	193	THz	( 0, 1000 )
Frequency Brillouin Gain Peak	11	GHz	( 0, 1000 )
Signal Linewidth	100	MHz	( 0, 1e+006 )
Signal and Stokes Wave Relative Polarization Factor	1.5		[ 1, 2 ]

Figura 3.3: Variables de estimulación de SBS en OptSim.

A continuación, se presenta la *Tabla 3.2*, para la caracterización de las variables de estimulación para los efectos de Scattering SRS y SBS, respecto del elemento físico modificado en la red:

Elemento modificado	Variables de estimulación de SRS y SBS
Estándar de fibra óptica por fabricante	Longitud efectiva de la fibra
	Área efectiva de la fibra
Amplificador de potencia fija	Penalizaciones de potencia

Tabla 3.2: Variables de estimulación para efectos de Scattering SRS y SBS, respecto al elemento variado.

## 3.2 IMPLEMENTACIÓN Y SIMULACIÓN DE LOS ESCENARIOS PLANTEADOS

### 3.2.1 Ejecución de las simulaciones

#### Configuración los parámetros generales del sistema

Uno de los factores más determinantes en la configuración esquemática de la red dentro del software de simulación es la configuración de los parámetros generales del sistema, los cuales son requeridos en el momento de la creación misma del trabajo de grado, puesto que

estos determinarán el comportamiento de los elementos del sistema en adelante. Se sintonizan parámetros como el rango de simulación en el dominio del tiempo y frecuencia, tasa de bit de referencia, número de muestras por símbolo, nivel de exactitud o rigurosidad de la simulación, nivel de supresión de productos de intermodulación como lo es FWM, entre otros.

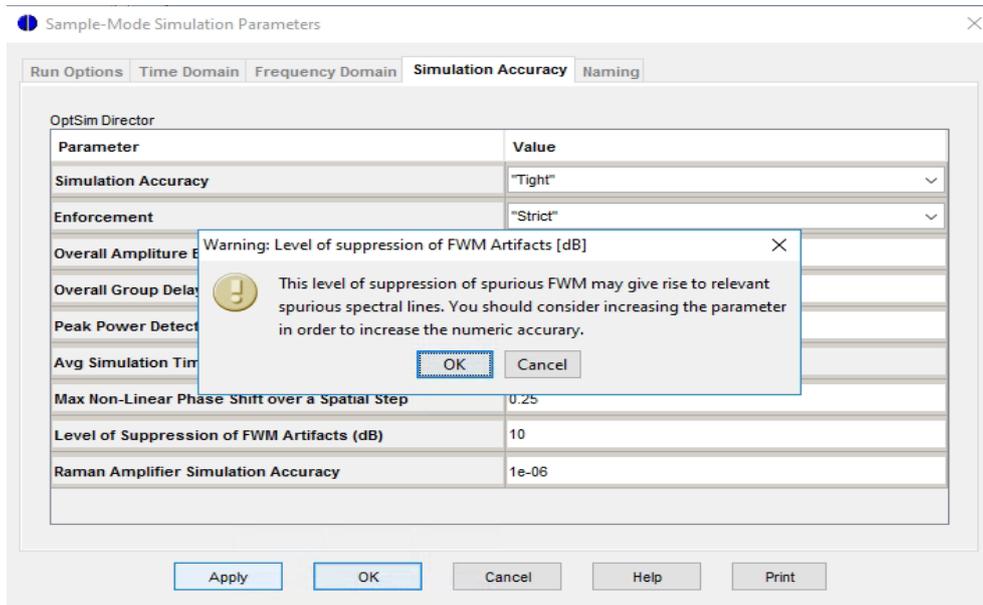


Figura 3.4: Nivel de supresión de FWM en dB.

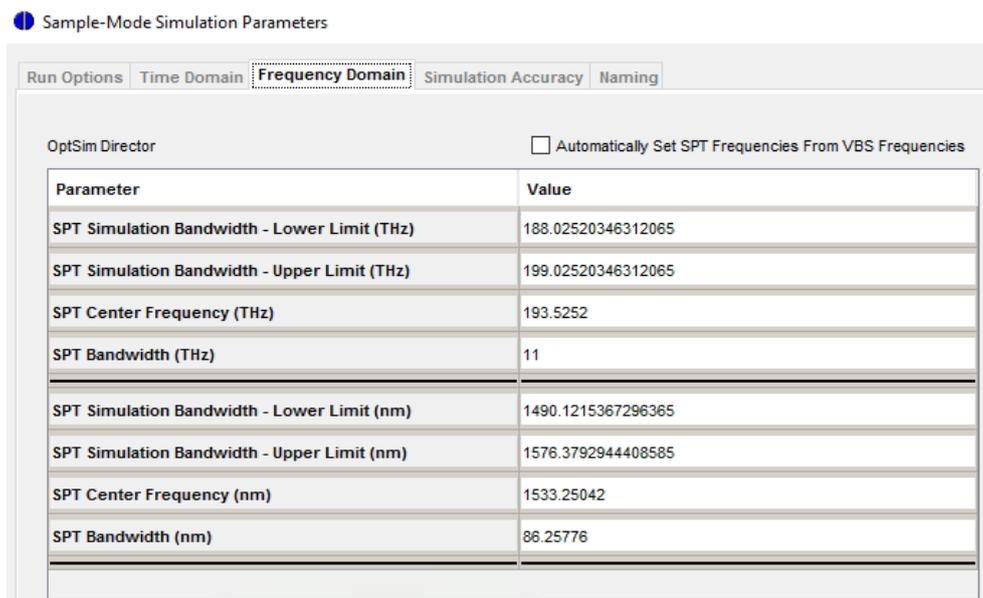


Figura 3.5: Frequency Domain para parámetros generales del sistema.

Sample-Mode Simulation Parameters

Run Options **Time Domain** Frequency Domain Simulation Accuracy Naming

OptSim Director Force Full BW Force Bitrate

Parameter	Value
VBS Simulation Bandwidth - Lower Limit (THz)	192.41
VBS Simulation Bandwidth - Upper Limit (THz)	194.48674459006983
VBS Center Frequency (Thz)	193.44837229503491
VBS Bandwidth (Thz)	2.0767445900698362
VBS Simulation Bandwidth - Lower Limit (nm)	1541.45445
VBS Simulation Bandwidth - Upper Limit (nm)	1558.09188
VBS Center Frequency (nm)	1549.7731635809187
VBS Bandwidth (nm)	16.637426281330818
Reference Bitrate (Gbit/s)	40

Figura 3.6: Time Domain para parámetros generales del sistema.

### 3.3 CASOS DE ESTUDIO

- **Distribución de casos de estudio para escenario 1 y 2**

#### Escenario 1:

Uso de formatos de modulación NRZ-OOK, RZ-OOK y RZ-DPSK.

Tal como se indicó anteriormente, se usarán un total de 8 canales con separación de 50 GHz – 100 GHz.

#### Escenario 2:

Uso de formatos de modulación NRZ-OOK, RZ-OOK y RZ-DQPSK.

Tal como se indicó anteriormente, se usarán un total de 8 canales con separación de 50 GHz – 100 GHz.

#### 3.3.1 Parámetros para análisis de SRS

**SRS OFF, Variación de penalidades de potencia; Fabricante: CORNING - FURUKAWA, Separación entre canales: 50 GHz – 100 GHz.**

Se ajustan las secciones “*Raman\_Effects*” y “*Advanced Control*” en “*Off*”, con el fin de prevenir que el sistema realice un análisis incluyendo al efecto SRS. La simulación se basa en la modificación de las penalidades de potencia, mediante la variación en *dBm* del amplificador de potencia fija desde 15 hasta 25 *dBm* con pasos de uno, sin tener en cuenta la SRS.

**SRS ON, Variación de penalidades de potencia; Fabricante: CORNING - FURUKAWA, Separación entre canales: 50 GHz – 100 GHz.**

Se ajustan las secciones “*Raman\_Effects*” y “*Advanced Control*” en “*Lorentzian*” y “*On*” respectivamente, tal como es indicado en la documentación del software de simulación. Se ajusta el factor Raman con la variable “*fr*” a un valor de 0.5 y los demás parámetros del efecto Raman por defecto. La simulación se basa en la modificación de las penalidades de potencia, mediante la variación en *dBm* del amplificador de potencia fija desde 15 hasta 25 *dBm* con pasos de uno, teniendo en cuenta la SRS.

ESCENARIO 1 ESCENARIO 2					
SEPARACIÓN ENTRE CANALES: 50 GHz			SEPARACIÓN ENTRE CANALES: 100 GHz		
FABRICANTE	SRS OFF	SRS ON	FABRICANTE	SRS OFF	SRS ON
CORNING	Caso 1	Caso 2	CORNING	Caso 7	Caso 8
FURUKAWA	Caso 3	Caso 4	FURUKAWA	Caso 9	Caso 10

Tabla 3.3: Casos para análisis con efecto SRS del Escenario 1 y 2 con separación: 50GHz y 100GHz.

### 3.3.2 Parámetros para análisis de SBS

**SBS OFF, Variación de penalidades de potencia; Fabricante: CORNING - FURUKAWA, Separación entre canales: 100 GHz**

Se ajusta la sección “*SBS*” en “*Off*”, con el fin de prevenir que el sistema realice un análisis incluyendo al efecto SBS. La simulación se basa en la modificación de las penalidades de potencia, mediante la variación en *dBm* del amplificador de potencia fija desde 15 hasta 37 *dBm* con pasos de dos, sin tener en cuenta la SBS, en conjunto con el ancho de línea de la señal.

**SBS ON, Variación de penalidades de potencia; Fabricante: CORNING - FURUKAWA, Separación entre canales: 100 GHz**

Se ajusta la sección “*SBS*” en “*On*”, tal como está indicado en la documentación del software de simulación. Se ajusta la variable “*Signal Linewidth*” a un valor específico de 100, 300 o 500 *MHz*, los otros parámetros dentro de la sección de “*SBS*” se mantienen por defecto. La simulación se basa en la modificación de las penalidades de potencia, mediante la variación en *dBm* del amplificador de potencia fija desde 15 hasta 37 *dBm* con pasos de dos, en función del valor de “*Signal Linewidth*” teniendo en cuenta al efecto SBS.

ESCENARIO 1 ESCENARIO 2				
SEPARACIÓN ENTRE CANALES: 100 GHz				
FABRICANTE	SBS OFF	SBS ON - 100 MHz	SBS ON - 300 MHz	SBS ON - 500 MHz
CORNING	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
FURUKAWA	CASO 5	CASO 6	CASO 7	CASO 8

Tabla 3.4: Casos para análisis con efecto SBS del Escenario 1 Y 2 con separación 100 GHz.

A continuación, se presenta un diagrama general como representación de los casos de estudio bajo cada escenario de simulación, en función de las especificaciones planteadas en los literales anteriores:

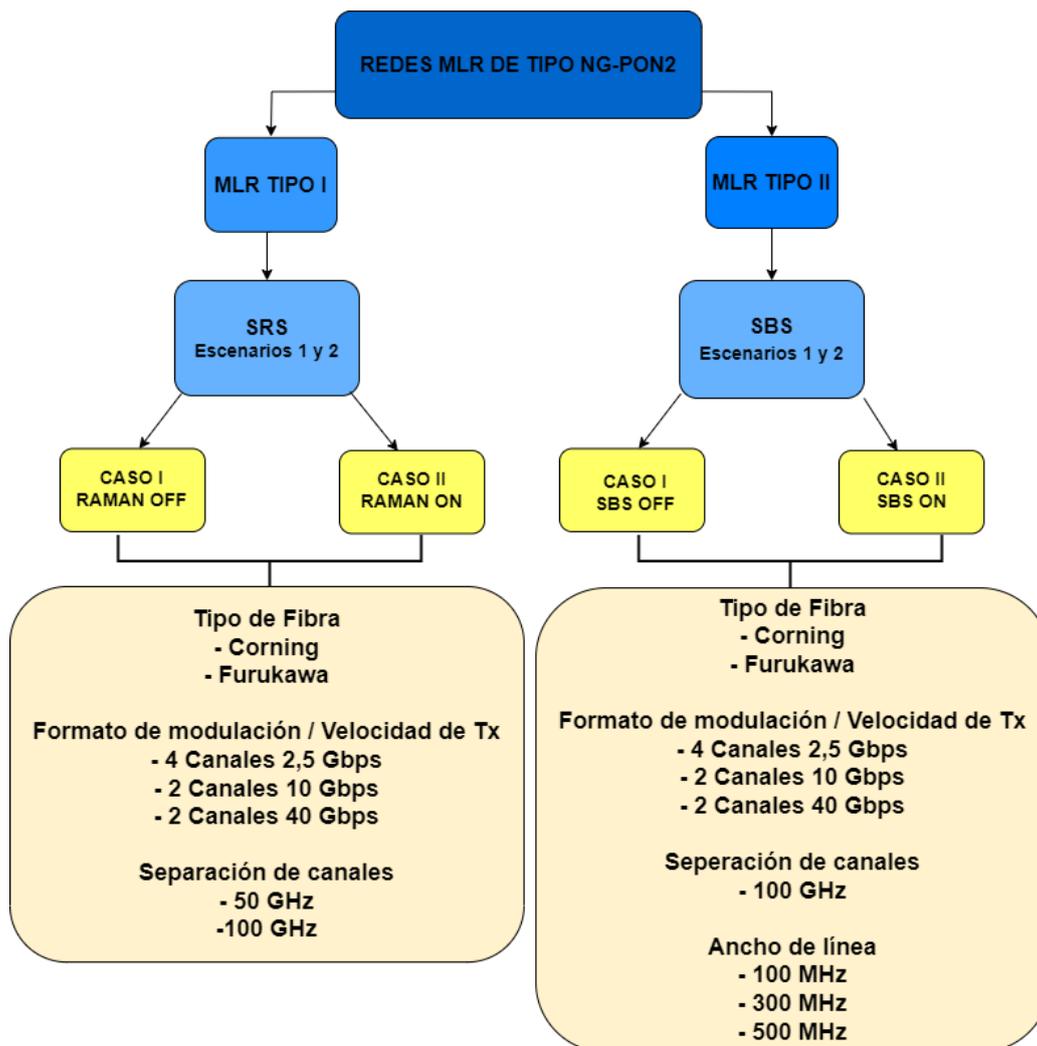


Figura 3.7: Diagrama general de escenarios de simulación y casos de estudio.

### 3.4 SIMULACIÓN, PROCESO Y RESULTADOS

Tal como se expuso en el capítulo anterior, un transmisor debe mantener las mismas características operacionales durante todo momento en un despliegue real. Por lo tanto, para exponer el proceso de simulación a profundidad, este literal se centrará en el análisis de las etapas de distribución y acceso del sistema, se usarán dos casos específicos para las simulaciones en presencia del efecto de SRS y otros dos casos para el efecto de SBS. A continuación, se presenta la distribución del análisis, para el cual se toma como referencia el diagrama general de simulación presentado en la Figura 2.8.

Dentro de las variables del sistema se considera de vital importancia confirmar el valor de compensación de dispersión cromática no ideal, el cual es ajustado en el módulo de compensación al 90%, dado que la dispersión cromática al causar un ensanchamiento de los pulsos de luz, a pesar de generar comportamientos indeseados, genera también control sobre los efectos no lineales, esto se debe a que una transmisión con dispersión cromática puede llevar a una ampliación temporal de los pulsos de luz, lo que puede reducir la intensidad de las interacciones no lineales.

Se procede a realizar las variaciones de penalidades de potencia, las cuales son posibles gracias al amplificador de potencia fija configurado para operar desde 15 hasta 25 dBm para el análisis de SRS y desde 15 hasta 37 dBm para el análisis de SBS. Estos rangos fueron escogidos dada la necesidad de estudiar la evolución del comportamiento y desempeño del sistema, tomando como punto de comparación a las penalidades de potencia; donde 15 dBm es considerado un valor ordinario, respecto de valores sobredimensionados de más de 20 dBm, en casos donde se presenta sobre amplificación y grandes afecciones de las penalidades de potencia dada la interacción con los elementos del sistema. Como primer diagrama, se presenta el espectro de los 8 canales a la salida del amplificador de potencia, operando a 15 dBm, con una separación entre canales de 100 GHz.

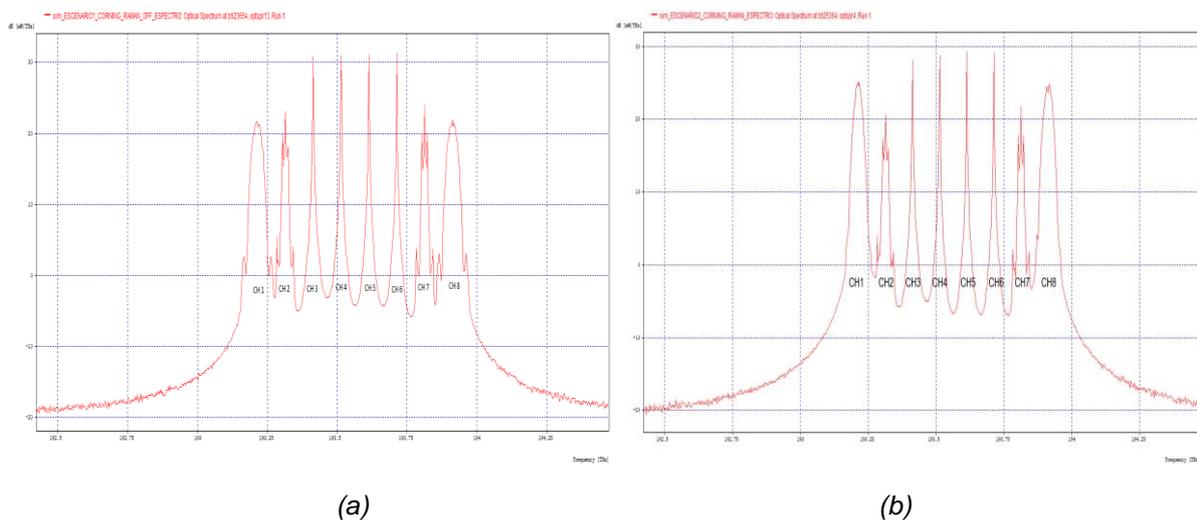


Figura 3.8: Diagrama espectral 8 canales, 15 dBm de penalidades de potencia. (a) Escenario 1 (b) Escenario 2.

### SRS

- Escenario 1, Caso 7 → SRS OFF, Fabricante Corning, Separación entre canales de 100 GHz.
- Escenario 1, Caso 8 → SRS ON, Fabricante Corning, Separación entre canales de 100 GHz.

### SBS

- Escenario 1, Caso 1 → SBS OFF, Fabricante Corning, separación entre canales de 100 GHz, Signal Linewidth de 100 MHz.
- Escenario 1, Caso 2 → SBS ON, Fabricante Corning, separación entre canales de 100 GHz, Signal Linewidth de 100 MHz.

## 3.5 RED MLR DE TIPO NG-PON2 BASADA EN FORMATOS DE MODULACION NRZ-OOK, RZ-OOK y RZ-DPSK, PARA ANÁLISIS SRS.

### 3.5.1 Caso de estudio 1: Escenario 1 – SRS OFF, Fabricante Corning, Separación entre canales de 100 GHz, 4 canales de 2.5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 2 canales de 40 Gbps.

Se procede a excluir del sistema, todo tipo de degradaciones generadas por el efecto de scattering estimulado Raman al configurar las secciones del módulo de fibra óptica “*Raman\_Effects*” y “*Advanced Control*” en “*Off*”. Se procede a iniciar el análisis en el que es considerado como el punto de comparación principal para cada caso, el espectro a la salida del amplificador de potencia.

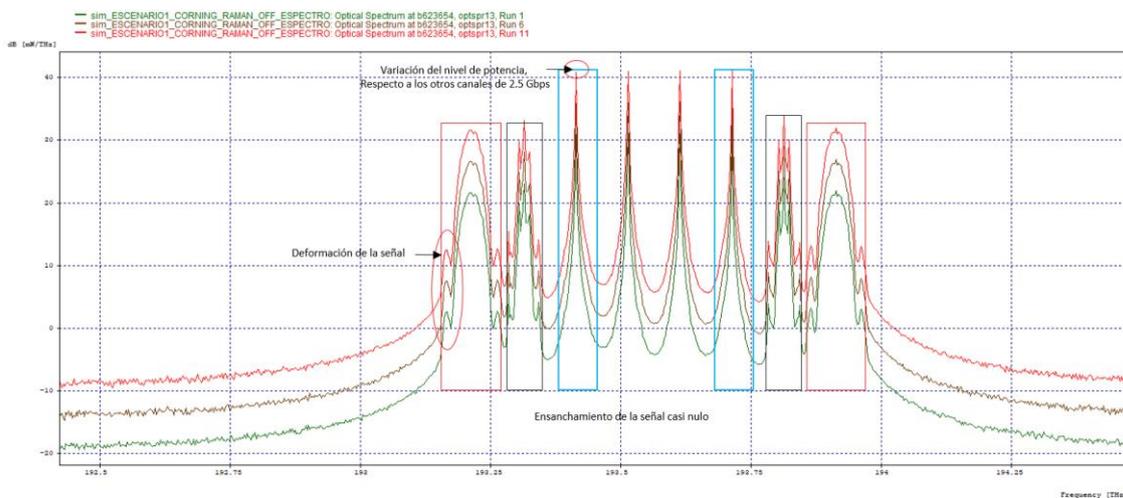


Figura 3.9: Diagrama espectral 8 canales SRS OFF, 15 dBm - 20 dBm - 25 dBm a la salida del amplificador de potencia.

Se evidencia un comportamiento esperado a la salida del amplificador de potencia, dado que hasta el momento la señal de información no ha entrado en contacto con el medio óptico. Este se considera como el mejor caso dentro de la comparación con las secciones de interés que serán analizadas posteriormente y servirá como una referencia para la identificación de las degradaciones en el espectro de las señales.

La siguiente sección de interés está ubicada a la salida del módulo de fibra óptica de la red de distribución con distancia de 40 Km; cabe resaltar que hasta el momento no se ha generado la compensación de dispersión cromática.

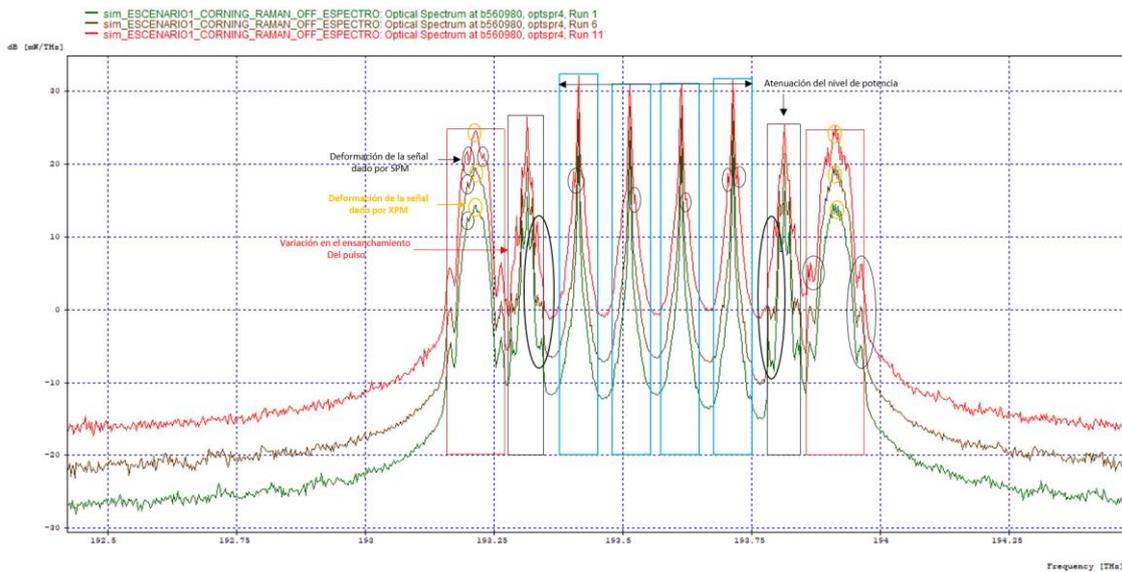


Figura 3.10: Diagrama espectral 8 canales SRS OFF, 15 dBm - 20 dBm - 25 dBm a la salida del módulo de fibra óptica de 40 km.

El análisis se basa en los resultados de la comparación de las muestras del espectro óptico para 15, 20 y 25 dBm correspondientes a los colores verde, marrón y rojo respectivamente. Los resultados obtenidos del diagrama espectral se consideran esperados de acuerdo a la teoría de comunicaciones por fibra óptica; esto se evidencia en las afecciones generadas por los distintos efectos de degradación óptica tanto de primer como de segundo orden. Donde podemos ver atenuación del nivel de los canales de baja capacidad (2.5 Gbps), deformaciones de la señal dados los efectos de SPM y XPM en todos los canales sin llegar al punto de ser considerados realmente críticos para el desempeño del sistema. En cuanto al ensanchamiento del pulso, se evidencian ligeras variaciones en los canales de mayor capacidad (40 Gbps), pero una mayor afección en los canales de 10 Gbps y específicamente en 2.5 Gbps, donde se encuentra el mayor ensanchamiento de todo el espectro.

El siguiente punto de interés es la salida del módulo compensador de dispersión cromática configurado al 90% para el fabricante Corning, los resultados se presentan a continuación:

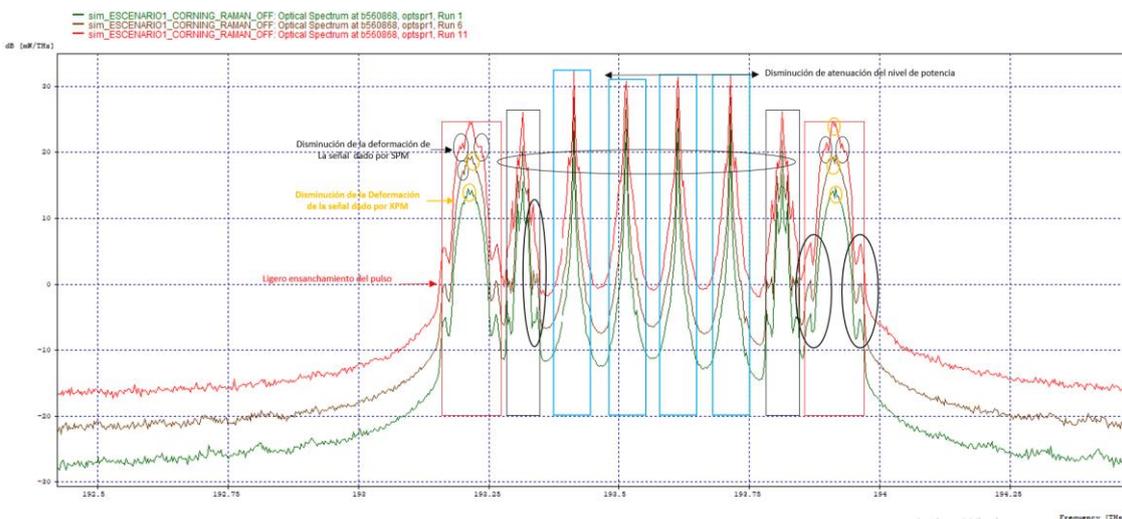
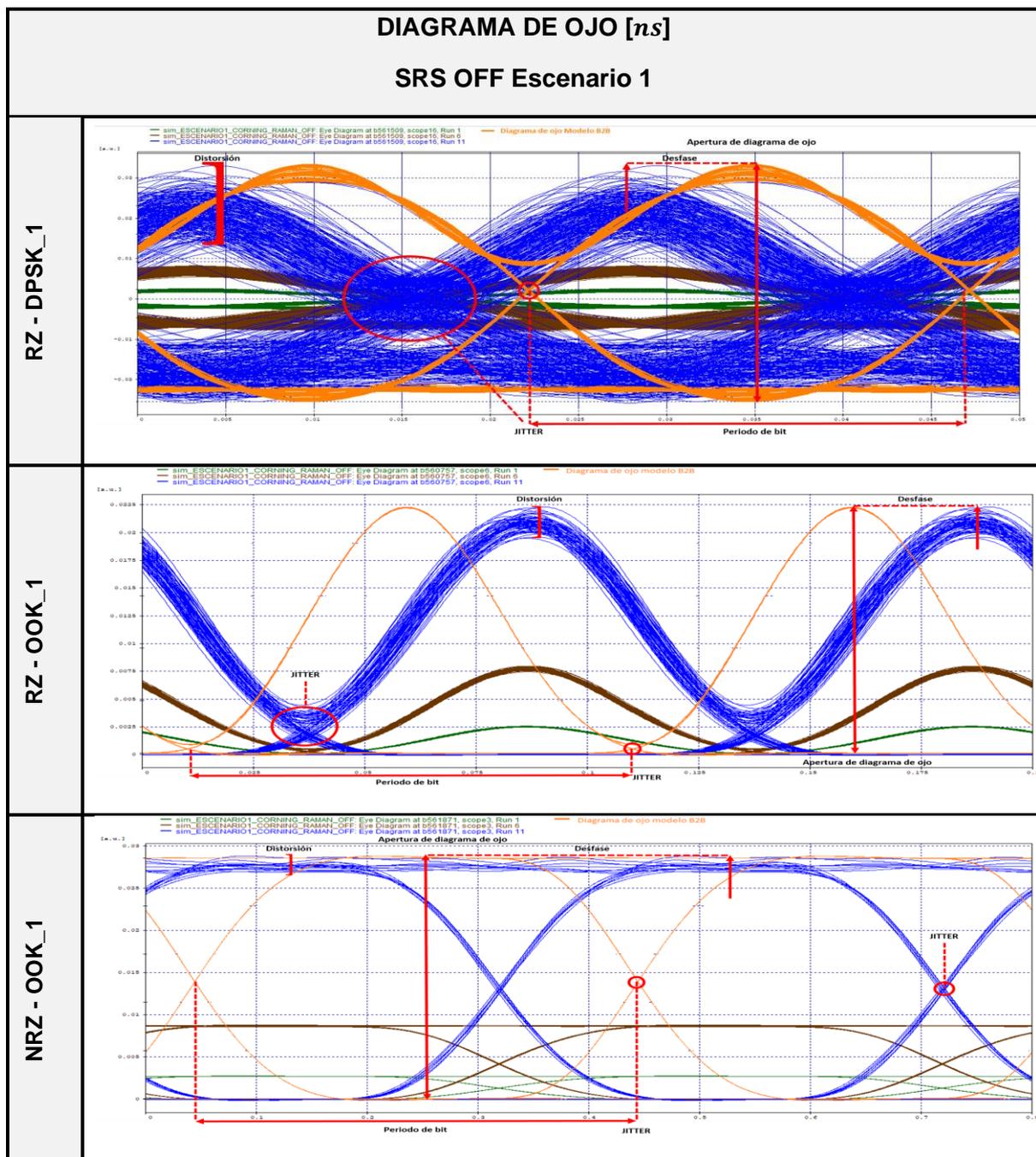


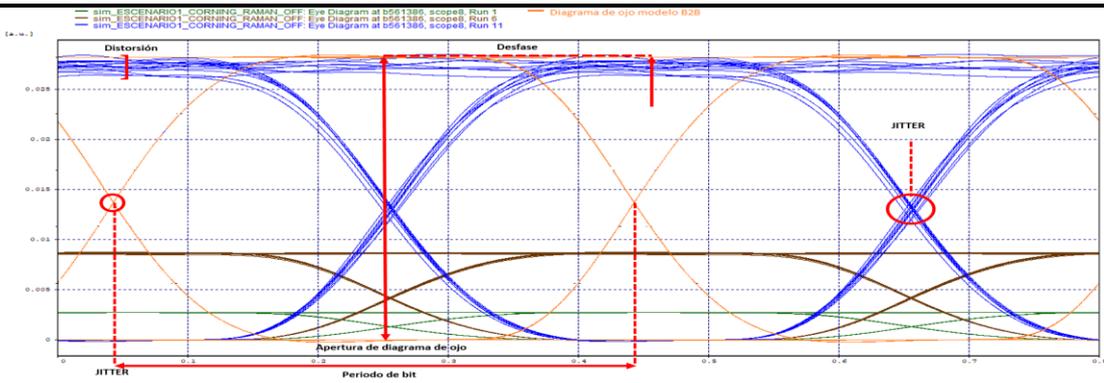
Figura 3.11: Diagrama espectral 8 canales SRS OFF, 15 dBm - 20 dBm - 25 dBm a la salida del módulo compensador de dispersión cromática.

Nuevamente se evidencia un comportamiento acorde a lo esperado según la teoría relacionada a la compensación de dispersión cromática, como se indicó anteriormente, este efecto de degradación aporta control de los efectos no lineales tanto de segundo orden como de orden superior, suavizando sus afecciones en el desempeño del sistema, a pesar de que no llegan a ser suprimidos del todo. Sin embargo, uno de los efectos que mayor prominencia tiene dentro de los resultados es el ensanchamiento del pulso, ligero para los canales de 40 Gbps, aunque más destacado para los canales de 10 y 2.5 Gbps.

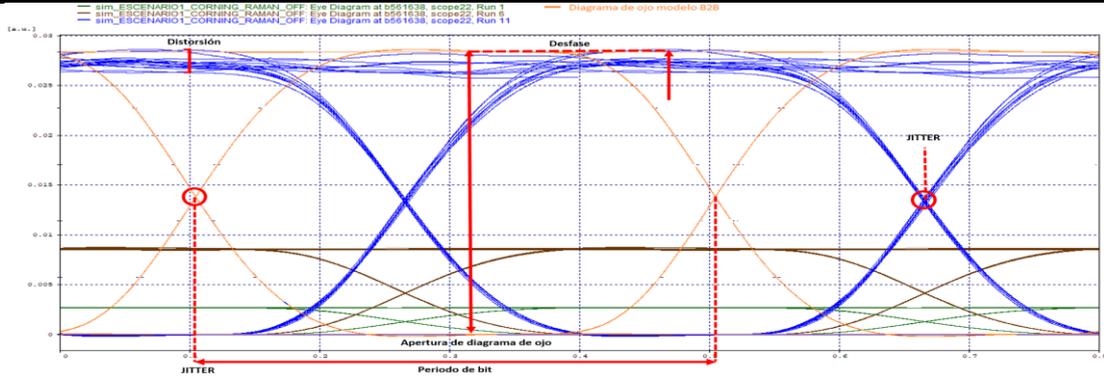
Finalmente es necesario analizar los parámetros OPM, con el fin de evidenciar la variación del comportamiento del sistema, tal como lo experimentaría el usuario durante todo el proceso de simulación.



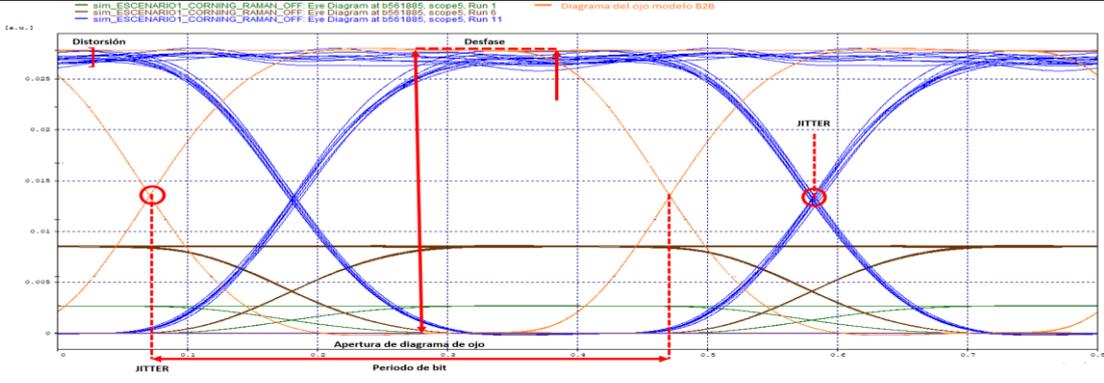
NRZ - OOK\_2



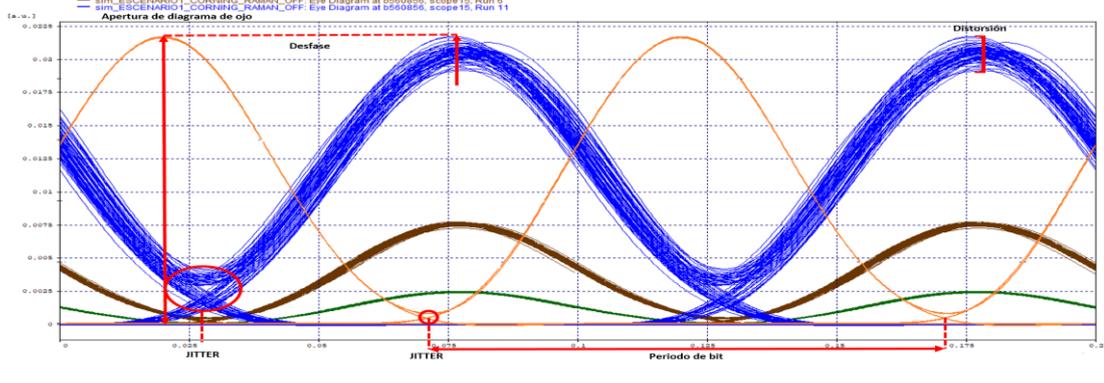
NRZ - OOK\_3



NRZ - OOK\_4



RZ - OOK\_2



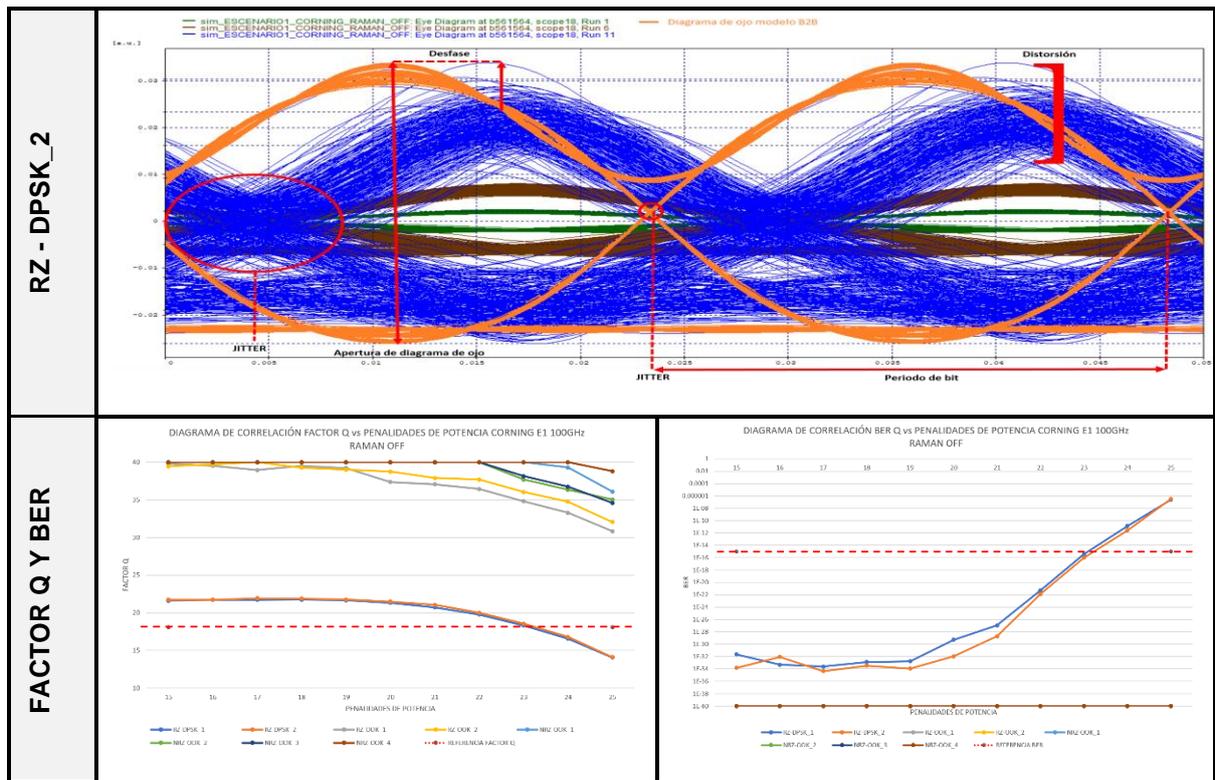


Tabla 3.5: Análisis de parámetros OPM para Caso de estudio 1: Escenario 1 – SRS OFF.

Se confirman las mayores afecciones en los canales de 10 y 40 Gbps, teniendo en cuenta que la única variación que se realizó fue el nivel de penalidad de potencia de la señal. Todos los canales tuvieron un desempeño adecuado, respecto al factor Q y BER objetivo planteados en el capítulo anterior.

Los canales 2 y 7 de 10 Gbps y 3, 4, 5, 6 de 2.5 Gbps, mostraron un desempeño ideal para todas las variaciones de potencia, con un factor Q que oscila entre 30 y 40. Este comportamiento va de la mano con los valores de BER obtenidos, los cuales se encuentran alrededor de  $10^{-40}$ , confirmando que los canales de estas capacidades no sufren afecciones considerables en función de la variación de niveles de potencia excesivos o sobre amplificación en el sistema.

Por otro lado, los canales 1 y 8 de 40 Gbps mantienen un desempeño muy bueno dentro del rango de penalidades de potencia entre 15 y 21 dBm, con un factor Q que se mantiene por encima de los 20 y una BER que se mantiene muy por debajo del valor objetivo mínimo de  $10^{-15}$ ; sin embargo para este caso, 23 dBm de penalidades de potencia se considera como el punto crítico, ya que con niveles de penalidades de potencia mayores a este, ambos canales tienen un aumento de BER muy considerable, llegando a tener un impacto crítico, a tal punto de dejarlos fuera de funcionamiento al incumplir el objetivo de Tasa de Error de Bit mínima.

### 3.5.2 Caso de estudio 2: Escenario 1 – SRS ON, Fabricante Corning, Separación entre canales de 100 GHz, 4 canales de 2.5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 2 canales de 40 Gbps.

Se procede a incluir en el sistema las degradaciones generadas por el efecto de scattering estimulado Raman al configurar las secciones del módulo de fibra óptica “*Raman\_Effects*” y “*Advanced Control*” en “*Lorentzian*” y “*On*” respectivamente.

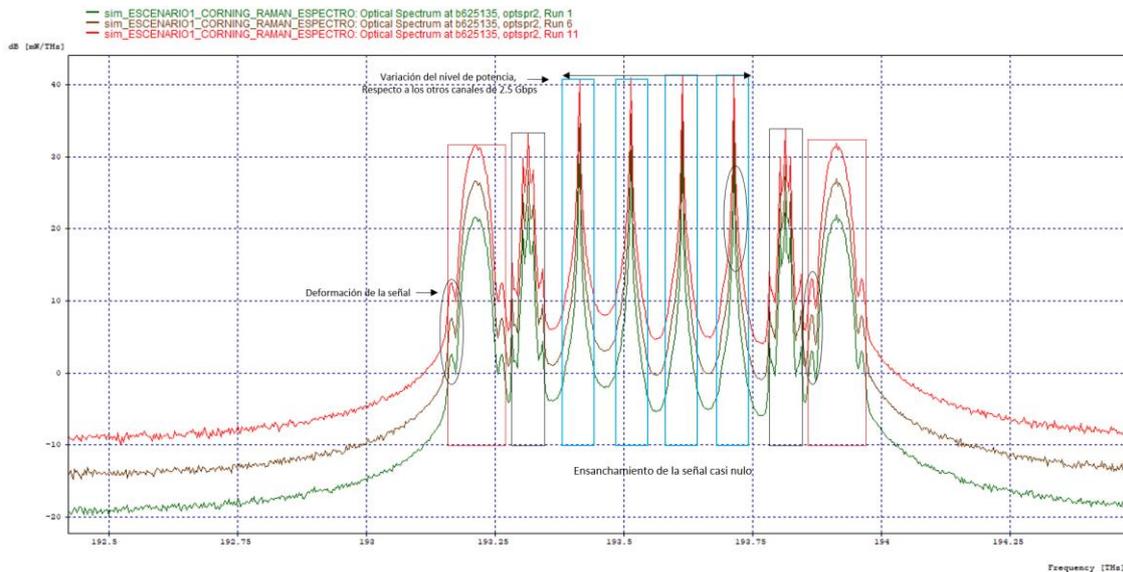


Figura 3.12: Diagrama espectral 8 canales SRS ON, 15 dBm - 20 dBm - 25 dBm a la salida del amplificador de potencia.

Nuevamente, el comportamiento del sistema en esta sección, se considera como el mejor caso dado que la señal no se ha desplazado por el medio óptico. Se procede a mostrar el comportamiento de los canales a la salida del módulo de fibra óptica:

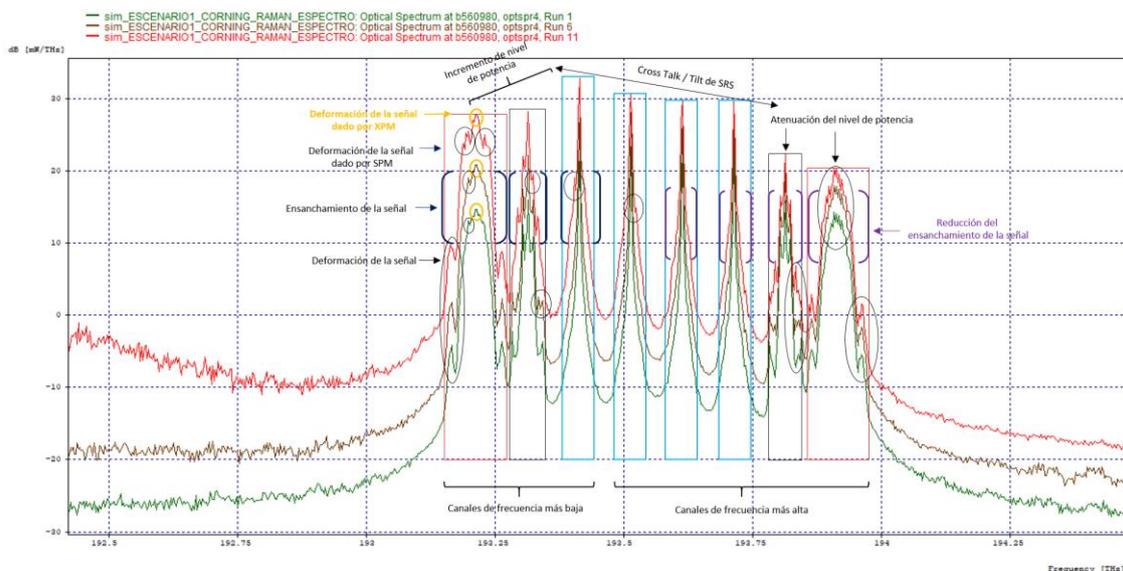


Figura 3.13: Diagrama espectral 8 canales SRS ON, 15 dBm - 20 dBm - 25 dBm a la salida del módulo de fibra óptica de 40 km.

Los resultados obtenidos del diagrama espectral se consideran esperados de acuerdo a la teoría de comunicaciones por fibra óptica; se evidencian grandes afecciones generadas tanto

por efectos de degradación de primer orden como atenuación y variación del ensanchamiento del pulso, los cuales son identificados en todos los canales sin distinción de capacidad. Adicionalmente, se identifican deformaciones de la señal como consecuencia de efectos de degradación óptica de segundo orden como SPM y XPM, estos tienen sus mayores afecciones en los canales de más alta capacidad, 10 y 40 Gbps. Nuevamente la FWM no representa un efecto de gran importancia al tener un alto nivel de supresión en la configuración del software.

Se identifican además las principales afecciones dadas por SRS, las cuales se traducen en la atenuación del nivel de potencia de los canales de mayor frecuencia y longitud de onda más corta. Además, el resultado del Crosstalk de SRS como un tipo de interferencia de canal adyacente, provoca que algunas señales se filtren en los canales contiguos debido a la proximidad física en el espectro electromagnético. Los canales de longitudes de onda más corta, ceden parte de su nivel de potencia a los canales de mayor longitud de onda y menor frecuencia; de aquí surge la inclinación conocida como Tilt de SRS al realizar la comparación de todos los canales en conjunto.

A continuación, se presenta el diagrama espectral a la salida del módulo de compensación de dispersión cromática:

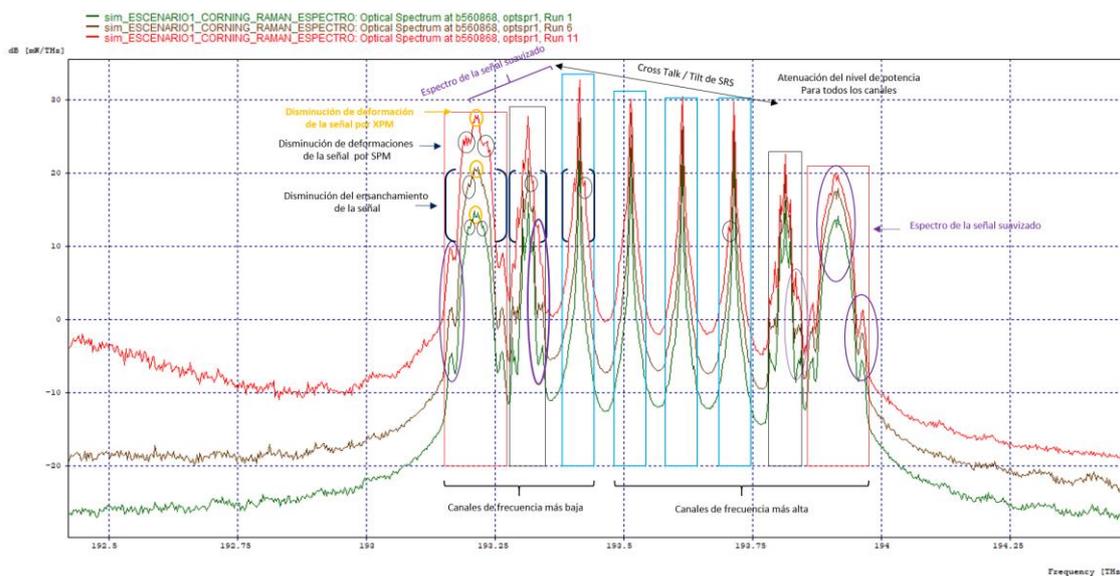


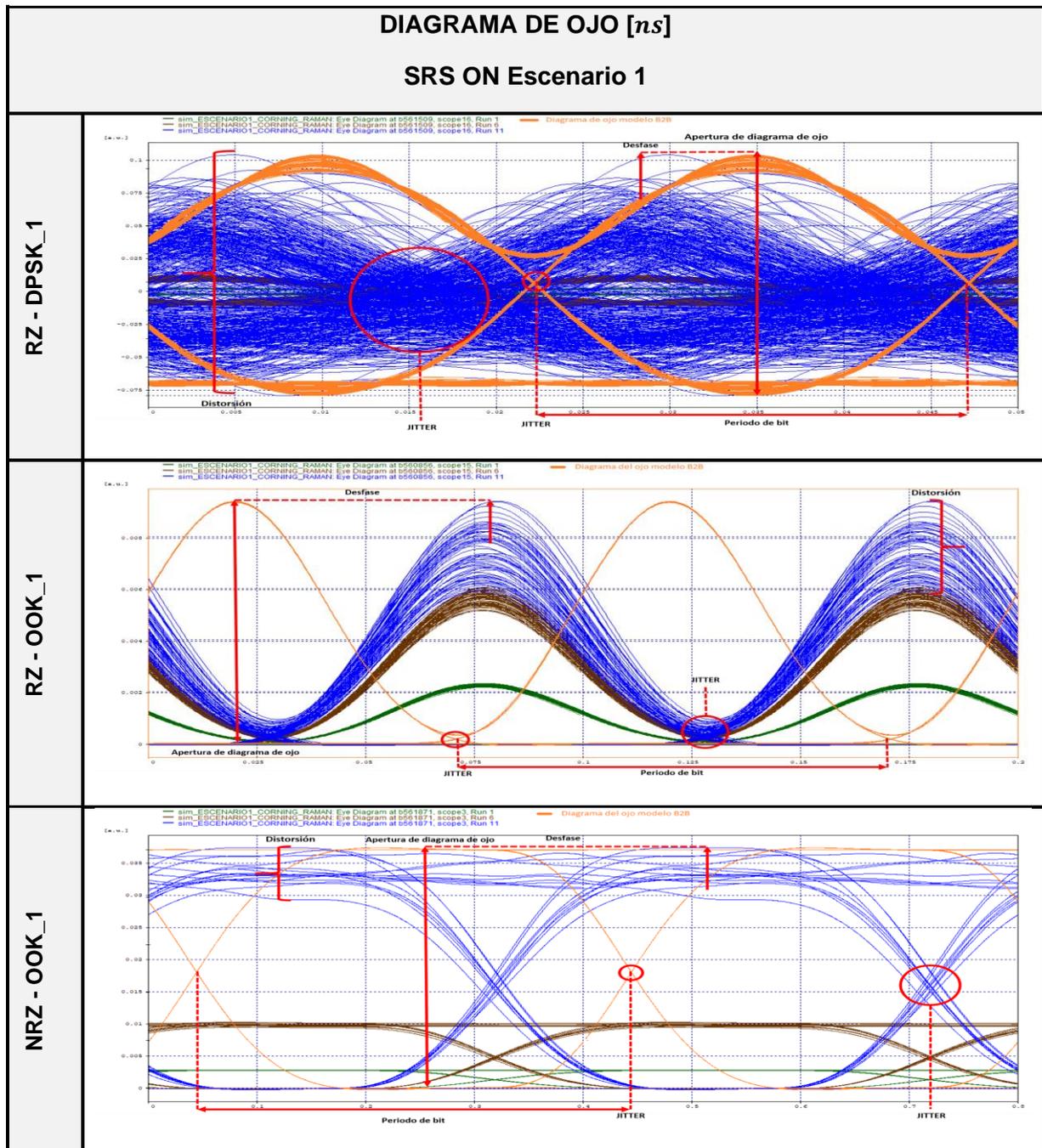
Figura 3.14: Diagrama espectral 8 canales SRS ON, 15 dBm - 20 dBm - 25 dBm a la salida del módulo compensador de dispersión cromática.

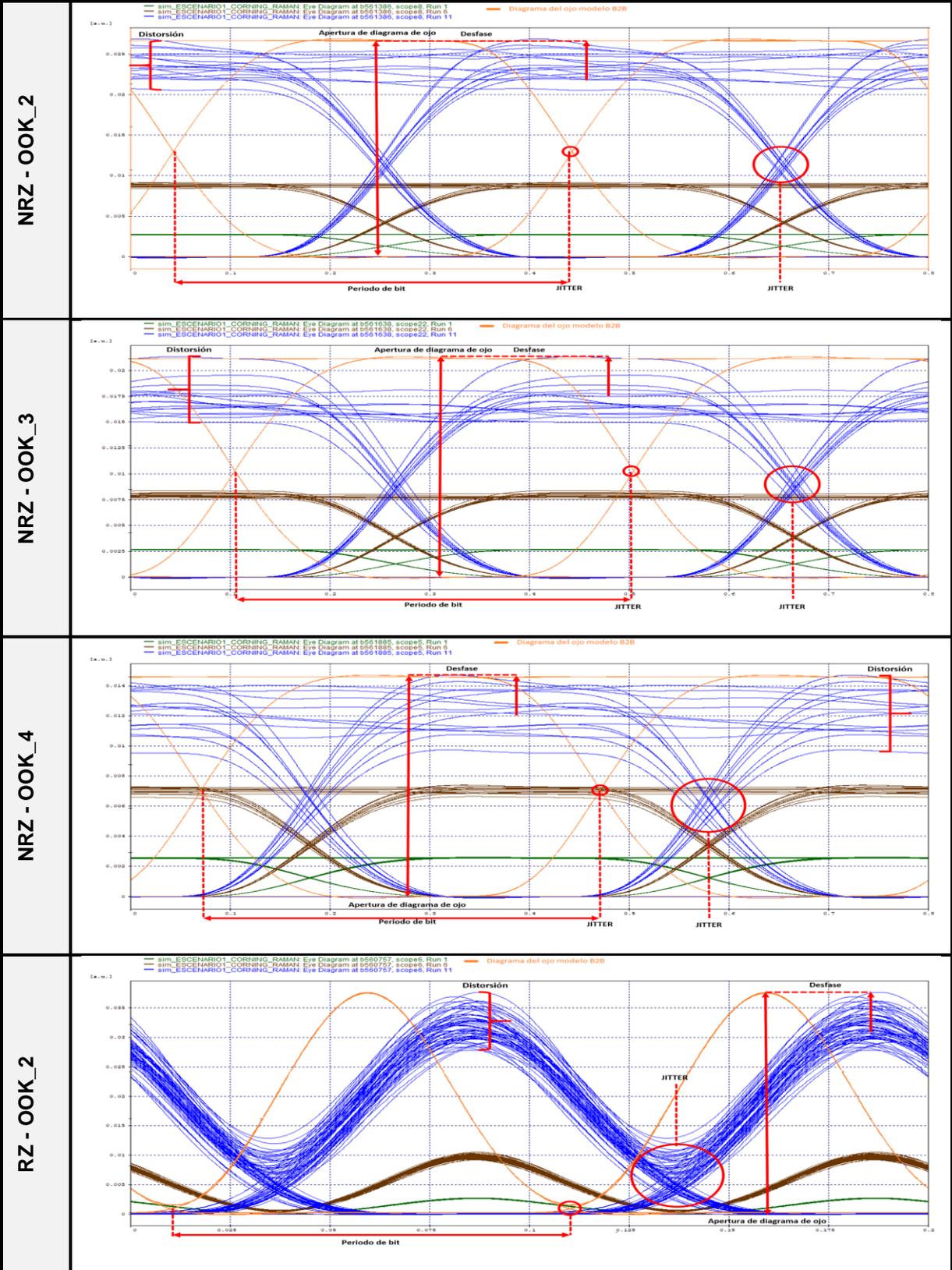
Nuevamente se obtiene un comportamiento acorde a lo esperado según la teoría relacionada a la compensación de dispersión cromática, aportando control sobre los efectos no lineales tanto de segundo orden como de orden superior, suavizando sus afecciones plenamente identificadas en las deformaciones de la señal en todos los canales del sistema. Cabe resaltar que estos efectos no llegan a ser suprimidos de raíz e incluso se identifica la aparición de nuevas deformaciones. El ensanchamiento de la señal es uno de los factores que tiene una compensación bastante leve, pero notoria.

En este caso uno de los efectos que mayor prominencia dentro de los resultados es la deformación de los espectros dado SPM; se confirma una disminución de estas deformaciones, lo que da como resultado señales claramente más suavizadas y acordes a

los resultados obtenidos del espectro a la salida del amplificador de potencia [amplificador de potencia]. En la *Figura 3.14*, se especifican las secciones del espectro donde más se controlan estas deformaciones, respecto al resultado del espectro a la salida del módulo de fibra óptica, sin embargo, se evidencia la aparición de algunos otros lóbulos indeseados en distintos puntos de los canales 2, 3 y 6, los cuales no existían en la *Figura 3.13*.

Procedemos a mostrar los resultados a en el receptor, a través de los parámetros OPM, con el fin de evidenciar la variación del comportamiento del sistema, tal como lo experimentaría el usuario durante todo el proceso de simulación.





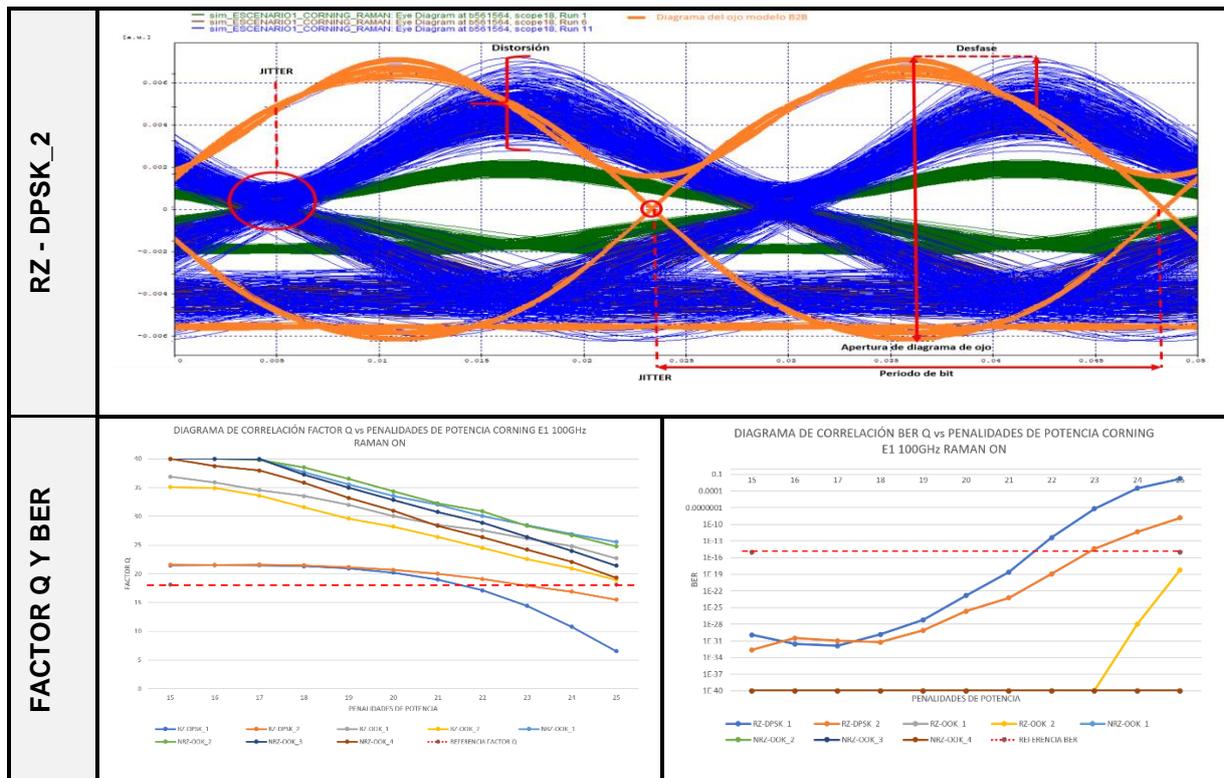


Tabla 3.6: Análisis de parámetros OPM Caso de estudio 2: Escenario 1 – SRS ON.

Se confirman afecciones en todos los canales del sistema, aunque mucho más crítica en los canales 1 y 8 de 40 Gbps . Los canales 2 y 7 de 10 Gbps muestran afección dado el aumento de nivel de penalidades de potencia en presencia de SRS, puesto que desde el inicio de las variaciones, el Factor Q empezó a disminuir de forma casi constante hasta la última variación, en función de la BER, se tiene un comportamiento adecuado en todo momento que a pesar de tener un gran aumento, nunca llega a rebasar el valor de referencia de BER, por lo tanto su comportamiento durante todo el proceso es adecuado y se puede asegurar su operatividad.

En cuanto los canales 3, 4, 5, 6 de 2.5 Gbps, se muestran una afección directa de SRS desde el inicio de la variación de penalidades de potencia a pesar de mostrar un valor de Factor Q casi ideal hasta llegar a valores cercanos a 17 dBm; nuevamente esta variación se muestra casi constante hasta los 25 dBm. En términos de BER, todos los canales de 2.5 Gbps se mantienen con una BER ideal de  $10^{-40}$ , confirmando su operatividad en todo momento.

Para los canales 2 y 7 de 10 Gbps en conjunto con 1 y 8 de 40 Gbps, se evidencia un comportamiento altamente influenciado por el efecto de SRS, la interferencia de canal adyacente, la cesión del nivel de potencia entre canales, confirmada por la teoría de SRS y, además, la distribución de los canales en la grilla espectral el cual se considera un factor muy importante.

En primer lugar, para los canales de 40 Gbps, se considera un rango de valores de penalidades de potencia en los cuales estos tienen un desempeño adecuado para el sistema, este rango está dado entre 15 y 21 dBm aproximadamente. El incremento de las penalidades de potencia después de los 21 dBm trae consigo el aumento de BER hasta el punto de poner al sistema fuera de operación.

Finalmente, para todas las referencias de penalidades de nivel de potencia del caso de estudio, se evidencia un comportamiento crítico muy notorio en los canales 1 y 2, esto se debe a que al adquirir parte del nivel de potencia de la señal del canal 7 y 8, estos sufren una ligera amplificación, lo cual se traduce en aumento de nivel de señal de información, ruido e interferencia, aumentando así las deformaciones de la señal y otras afecciones de los efectos lineales y no lineales del sistema. Cabe resaltar que, dada su ubicación en la grilla espectral, siendo frecuencias más bajas con longitudes de onda más largas, se ven mayormente afectadas frente a las variaciones de las penalidades de potencia, respecto a los canales con frecuencias más altas y longitudes de onda más cortas. Por lo tanto, SRS propicia que los canales de longitud de onda más larga sean más susceptibles a efectos de degradación óptica al generar interferencia de canal adyacente, además de la nombrada cesión del nivel de potencia. Este efecto en cadena, puede ser apreciado en el análisis individual de los diagramas de ojo de cada canal, donde los mayores niveles de distorsión y menor apertura del ojo se identifican en los canales 1 y 2, respecto de la distorsión y apertura del ojo de los canales 7 y 8, los cuales tienen un cierto nivel de compensación adicional sumado a la compensación de dispersión cromática; por lo tanto, es posible determinar la mayor o menor tolerancia de los canales a efectos no deseados, esto en función de unas señales limpias y más suavizadas a la salida del compensador de dispersión cromática.

### 3.6 RED MLR DE TIPO NG-PON2 BASADA EN FORMATOS DE MODULACION NRZ-OOK, RZ-OOK y RZ-DPSK PARA ANÁLISIS SBS.

#### 3.6.1 Caso de estudio 1: Escenario 1 – SBS OFF, Fabricante Corning, Separación entre canales de 100 GHz, 4 canales de 2.5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 2 canales de 40 Gbps, ancho de línea 100 MHz.

Se procede a incluir en el sistema las degradaciones generadas por el efecto de scattering estimulado de Brillouin al configurar las secciones del módulo de fibra óptica “SBS” en “Off”. Se inicia el análisis en el que es considerado como el punto de comparación principal para cada caso, el espectro a la salida del amplificador de potencia.

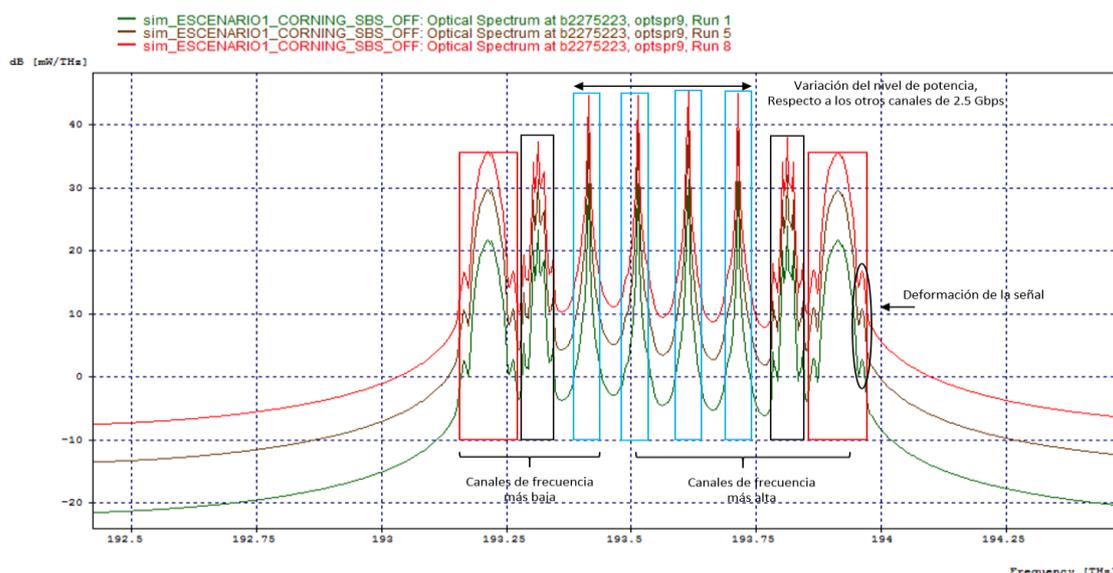


Figura 3.15: Diagrama espectral 8 canales SBS OFF, 15 dBm - 23 dBm - 29 dBm a la salida del amplificador de potencia.

A la salida del amplificador de potencia fija, se evidencia un comportamiento poco disruptivo, donde se identifican ligeras variaciones de niveles de potencia en los canales de 2.5 Gbps y algunas deformaciones de la señal en los lóbulos laterales de los canales de 40 y 10 Gbps. Nuevamente, este se considera como el mejor caso y servirá como una referencia para la identificación de las degradaciones en el espectro de las señales.

Se procede a realizar el análisis del espectro MLR a la salida del módulo de fibra óptica de 40 Km de la red de distribución.

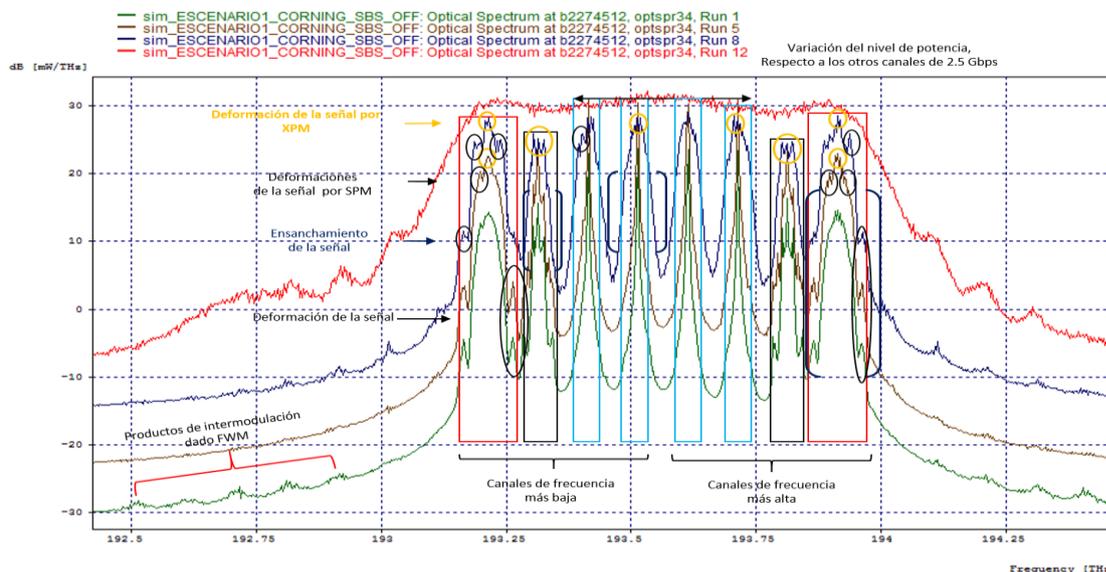


Figura 3.16: Diagrama espectral 8 canales SBS OFF, 15 dBm - 23 dBm - 29 dBm - 37dBm a la salida del módulo de fibra óptica de 40 km.

Se toman 4 muestras de la simulación, 15, 23, 29 y 37 dBm correspondientes a los colores verde, marrón, azul y rojo respectivamente. Se busca mostrar el comportamiento del espectro bajo afecciones generadas por penalidades de potencia totalmente sobre dimensionadas, las cuales llegan a ser incontrolables tal como se evidencia en los últimos ejemplos con 29 y 37, donde con 37 dBm no es posible identificar ninguna de las señales de información referente a los 8 canales del caso de estudio.

Nuevamente y partiendo de los efectos de degradación óptica lineales, se evidencian grandes variaciones del ensanchamiento de los canales de 10 y 40 Gbps, las cuales son más evidentes para los mayores niveles de penalidades de potencia, aclarando que para los canales de 2.5 Gbps también existe ensanchamiento de pulso. En cuanto a los efectos de degradación óptica no lineales de segundo orden con mayor prominencia en el sistema se tienen a SPM y XPM, los que dan origen a diversas deformaciones del espectro de la señal, las cuales son resaltadas en color negro y amarillo respectivamente; estos son identificados en todos los canales de la red MLR, solo que en mayor proporción para los lóbulos laterales y puntos específicos de los canales de 10 y 40 Gbps. El efecto FWM hace su primera aparición en el caso de estudio, la cual a pesar de ser sutil es evidente pero poco significativa.

A continuación, se presenta el diagrama espectral a la salida del módulo de compensación de dispersión cromática:

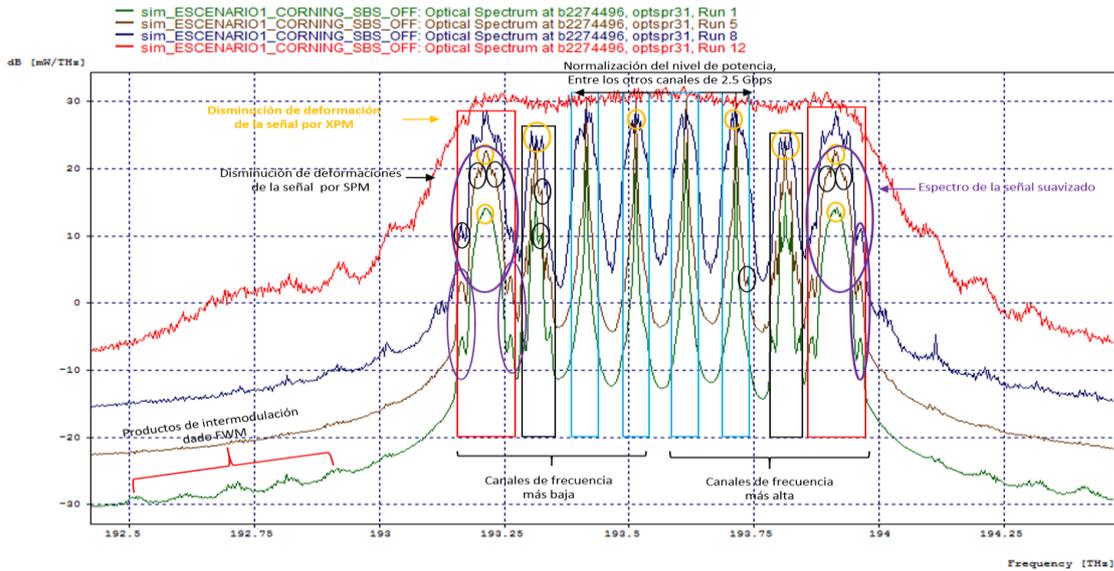
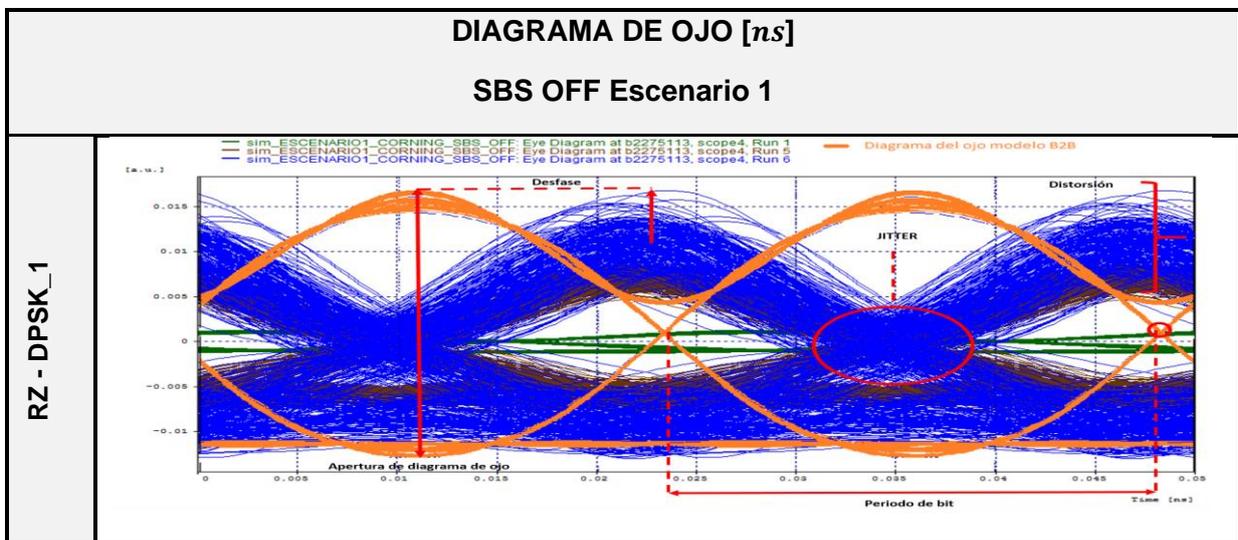
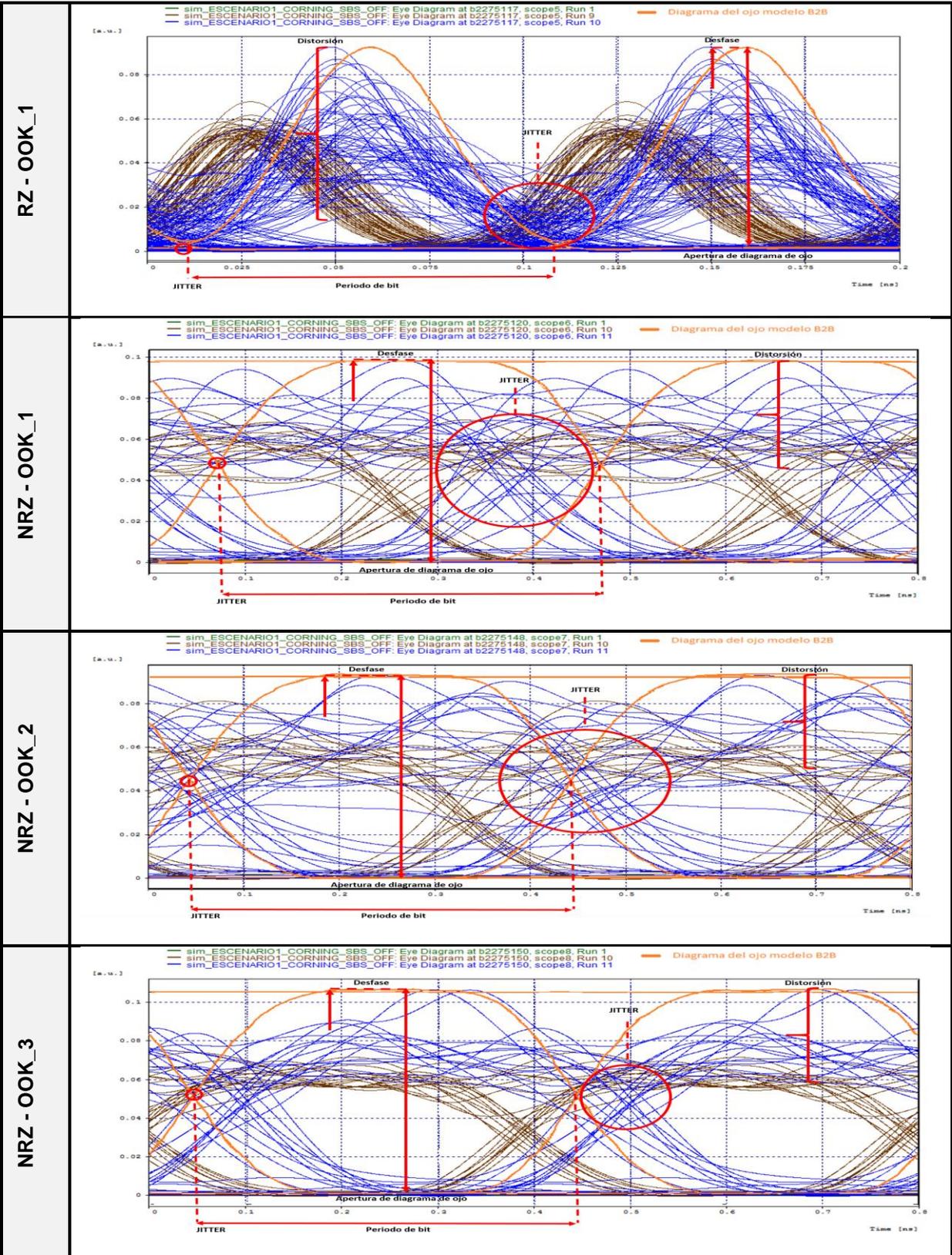


Figura 3.17: Diagrama espectral 8 canales SBS OFF, 15 dBm - 23 dBm - 29 dBm - 37dBm a la salida del módulo compensador de dispersión cromática.

Se obtiene un comportamiento acorde a la teoría relacionada a la compensación de dispersión cromática, la cual aporta cierto nivel de control sobre las deformaciones de los efectos lineales y no lineales. Se obtiene un espectro suavizado y mucho más evidente para las penalidades de potencia de 15 y 23 dBm, sin embargo, para 29 y 37 dBm la compensación no genera un control tan significativo e incluso se identifican nuevas deformaciones en el espectro. En este caso, las deformaciones por SPM y XPM son mayormente controladas en los canales de alta capacidad, esto se evidencia en la suavización de sus lóbulos laterales y la supresión de los picos de XPM. Dado el ensanchamiento de pulso, los canales de 10 y 40 Gbps generan mayor interferencia de canal adyacente sobre los canales de 2.5 y 10 Gbps, respectivamente.

Para los canales de menor capacidad, se evidencia una clara normalización del nivel de potencia y ligeras variaciones del ensanchamiento de cada pulso, estas afecciones no llegan a ser tan significativas como para ubicar a los canales fuera de operación.





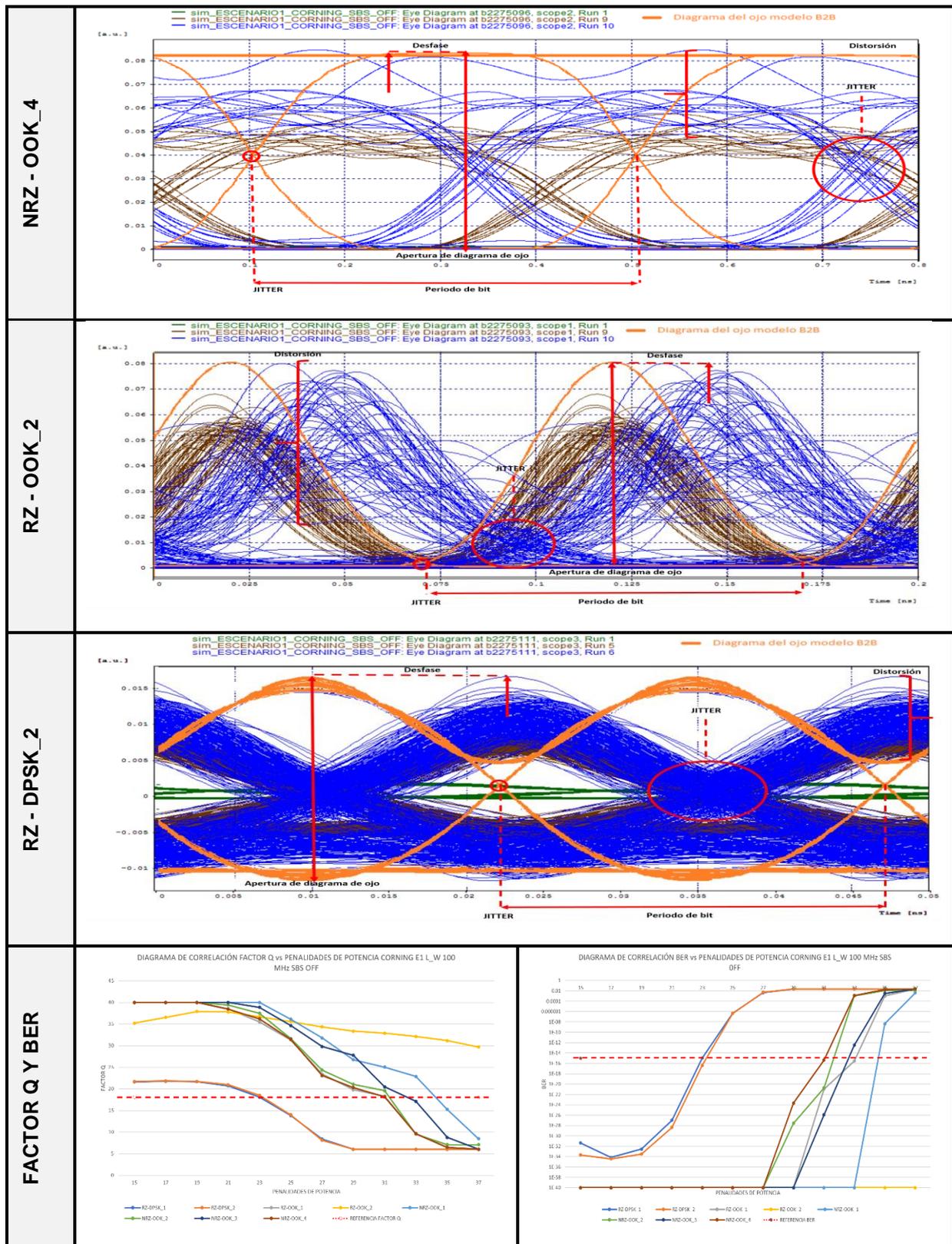


Tabla 3.7: Análisis de parámetros OPM Caso de estudio 1: Escenario 1 – SBS OFF.

Nuevamente, se confirman las mayores afecciones en recepción, para los canales de 10 y 40 Gbps donde para niveles de penalidades de potencia mayores a 23 y 31 dBm, respectivamente, no es posible cumplir el valor mínimo de BER de  $10^{-15}$ . Cabe resaltar que todos los canales muestran un aumento de BER constante, de la mano con la disminución del Factor Q a medida que el nivel de penalidad de potencia se extiende en

sobredimensionamiento iniciando desde 23 dBm, aproximadamente, hasta sobrepasar los 35 dBm, donde la operatividad del sistema se torna totalmente insostenible, este comportamiento se ve altamente influenciado por el ensanchamiento de los canales de 40 Gbps y la afección de sus interacciones con los canales de 10 Gbps dada la interferencia de canal adyacente.

Los canales 3, 4, 5 y 6 de 2.5 Gbps, mostraron un desempeño ideal y adecuado para variaciones de penalidad de potencia común desde los 15 dBm hasta 29 dBm, con un Factor Q que oscila entre 20 y 27. Este comportamiento va de la mano con los valores de BER obtenidos, los cuales se encuentran entre  $10^{-24}$  y  $10^{-40}$ , confirmando que los canales de estas capacidades no sufren afecciones considerables en función de la variación de niveles de potencia excesivos o sobre amplificación en el sistema dentro del caso de estudio.

### 3.6.2 Caso de estudio 2: Escenario 1 – SBS ON, Fabricante Corning, Separación entre canales de 100 GHz, 4 canales de 2.5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 2 canales de 40 Gbps, ancho de línea 100 MHz.

Se procede a incluir en el sistema las degradaciones generadas por el efecto de scattering estimulado de Brillouin al configurar las secciones del módulo de fibra óptica “SBS” en “On”. Se inicia el análisis en el que es considerado como el punto de comparación principal para cada caso, el espectro a la salida del amplificador de potencia.

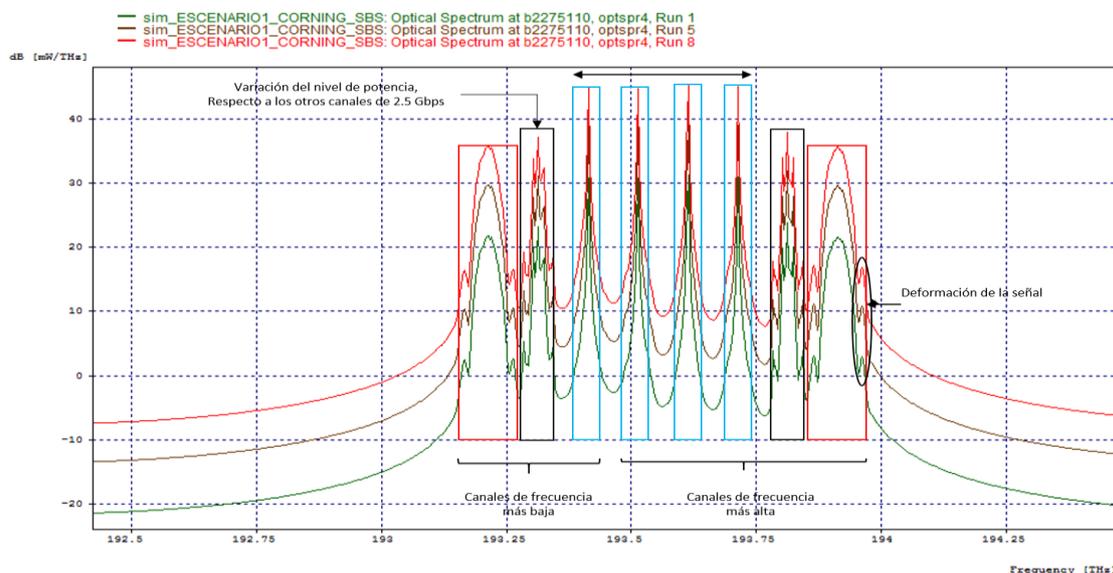


Figura 3.18: Diagrama espectral 8 canales SBS ON, 15 dBm - 23 dBm - 29 dBm a la salida del amplificador de potencia.

Tal como en el caso anterior, se identifican ligeras variaciones de niveles de potencia en los canales de 2.5 Gbps y algunas deformaciones de la señal en los lóbulos laterales de los canales más alta capacidad, 10 y 40 Gbps. Este se propone como el mejor caso y servirá como una referencia para la identificación de las degradaciones en el espectro de las señales.

Nuevamente, se procede a realizar el análisis del espectro MLR a la salida del módulo de fibra óptica de 40 Km de la red de distribución.

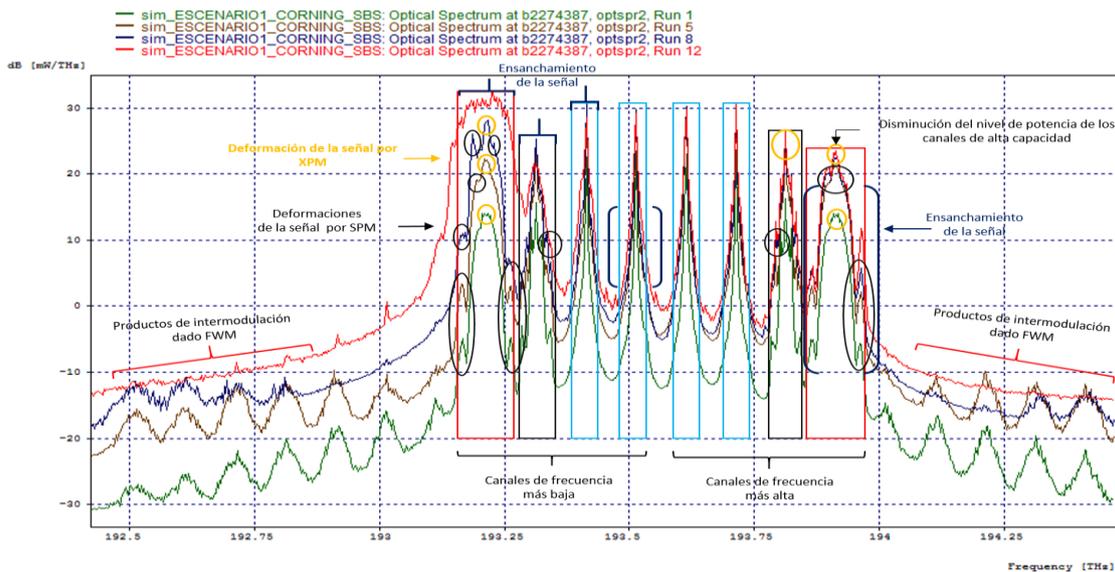


Figura 3.19: Diagrama espectral 8 canales SBS ON, 15 dBm - 23 dBm - 29 dBm - 37dBm a la salida del módulo de fibra óptica de 40 km.

Se evidencian grandes afecciones generadas tanto por efectos de degradación de primer orden como atenuación y variación del ensanchamiento del pulso, nuevamente este ensanchamiento es indiscriminado e independiente de la capacidad del canal. Como resultado de los efectos de SPM y XPM se identifican grandes deformaciones de la señal de forma más predominante para los canales de 10 y 40 Gbps; cabe resaltar que estas deformaciones pueden identificarse a lo largo de todo el espectro de la red MLR sin distinción de capacidad de canal. En este caso, se evidencia la aparición de productos de intermodulación bastante más pronunciados como consecuencia del efecto de FWM, incluso al haber sido configurado para tener un nivel de supresión de 25 dBm.

Dado el ensanchamiento de los canales, se evidencian mayores afecciones por interferencia de canal adyacente de los canales de 40 sobre los de 10 Gbps. Para los canales 1 y 2, se evidencia una afección muy notoria puesto que parte del espectro de 40 Gbps se ha sobrepuesto al espectro de la señal de 10 Gbps, lo cual genera alta distorsión y dificulta la distinción de la señal de información deseada, respecto de la señal de información interferente. El efecto de SBS es apreciable en los canales de menor frecuencia y mayor longitud de onda, donde se da el conocido corrimiento hacia el rojo o azul de Brillouin en entornos físicos, el cual se traduce en grandes no linealidades presentes en estos canales. Sumando a este comportamiento indeseado, la posición de los canales dentro de la grilla espectral, los hace más susceptibles a la interacción con variaciones de penalidades de potencia altas y sobredimensionadas como las presentes en este caso de estudio, llegando a dejar fuera de operación a diferentes canales de la red MLR y para algunos valores de penalidades de potencia en específico, a la red completa.

A continuación, se presenta el diagrama espectral a la salida del módulo de compensación de dispersión cromática:

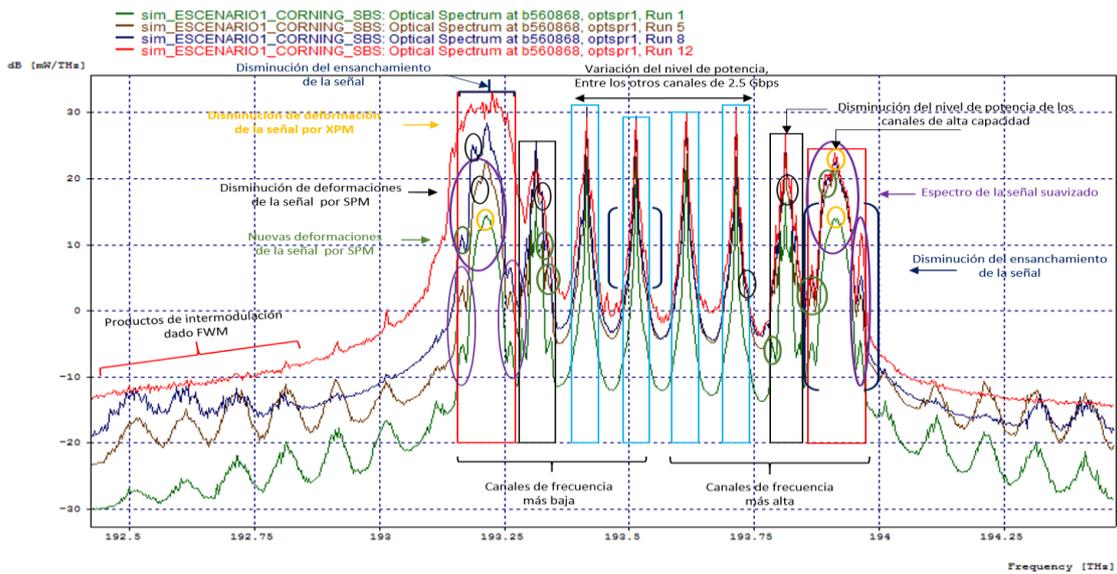
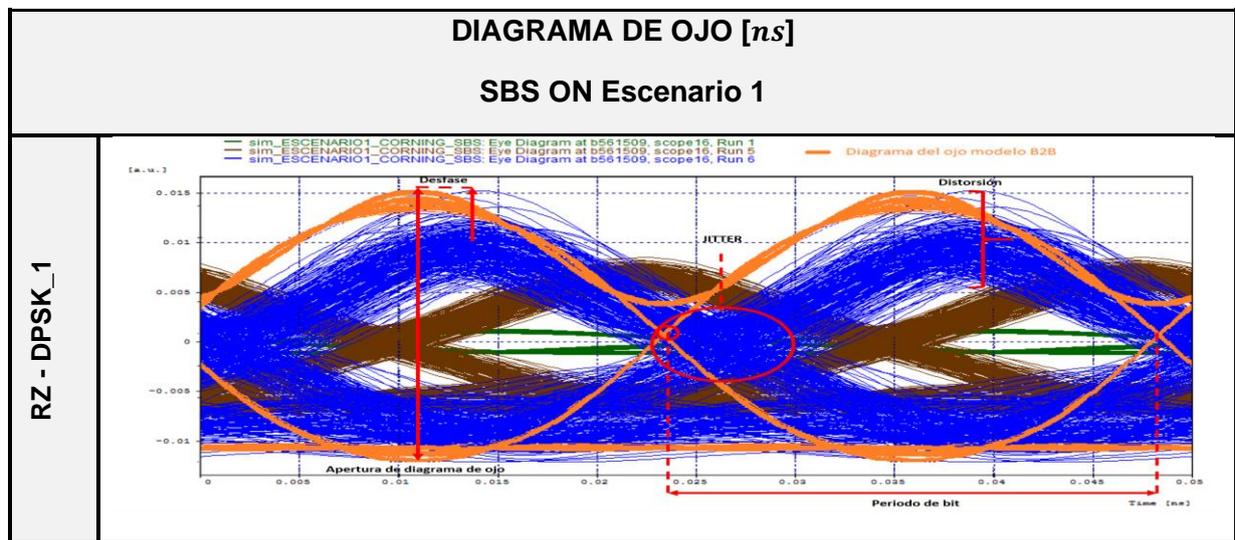
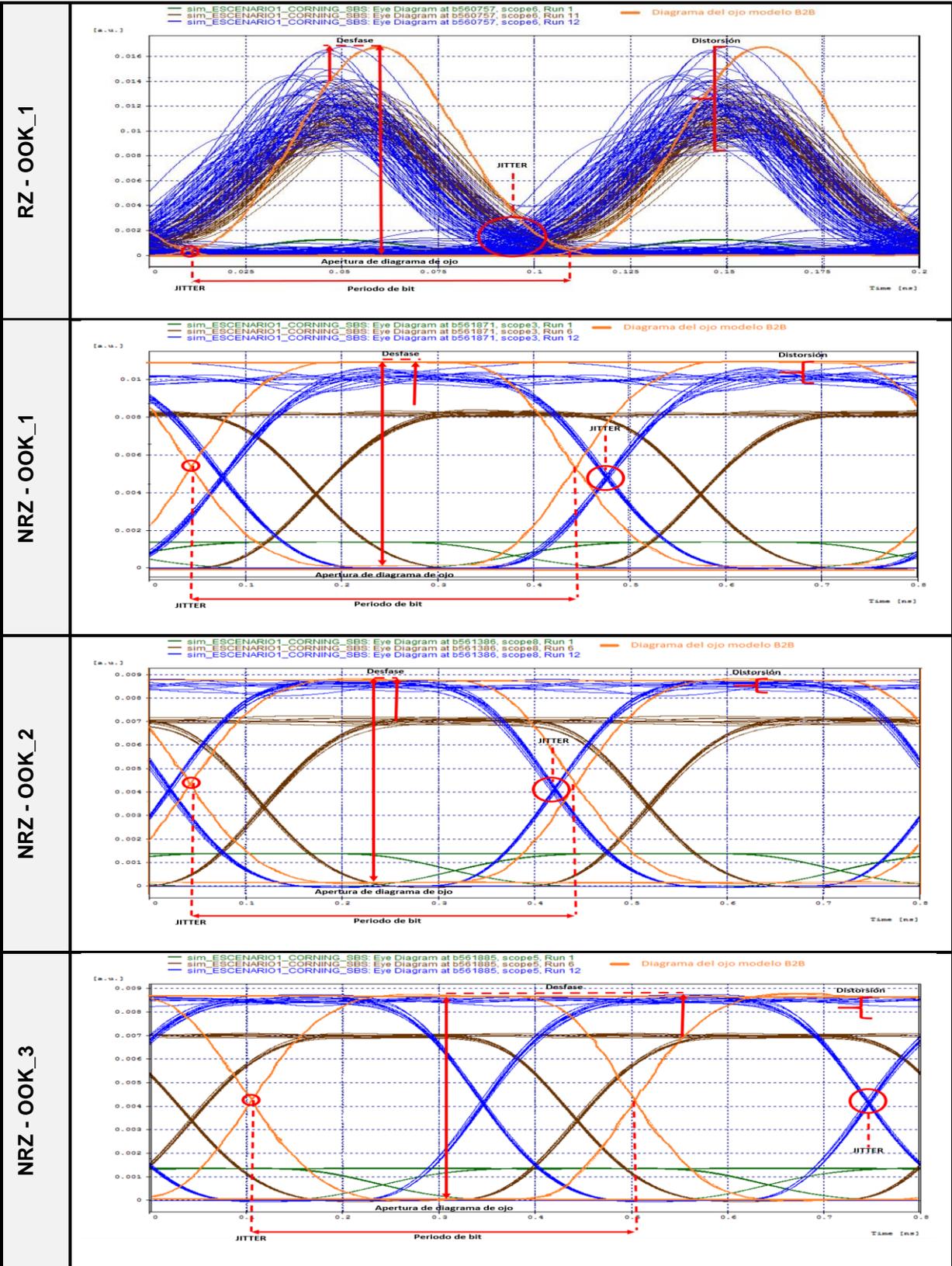


Figura 3.20: Diagrama espectral 8 canales SBS ON, 15 dBm - 23 dBm - 29 dBm - 37dBm a la salida del módulo compensador de dispersión cromática.

El efecto de compensación de dispersión cromática, tal como indica la teoría de comunicaciones ópticas, ha provisto a la red MLR de una compensación del ensanchamiento de las señales, de los efectos no lineales de segundo orden y orden superior. Se evidencia la disminución de las deformaciones en los lóbulos laterales de las señales de 10 y 40 Gbps, haciendo referencia a la disminución del nivel de distorsión; además de la disminución de los picos de las señales dados por XPM. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que así como se tiene un valor crítico de nivel de penalidad de potencia para el caso de estudio, se tiene además que la compensación de dispersión cromática tendrá efectos notorios para un cierto rango de variación de penalidades, y los valores que se encuentren por encima de este umbral, a pesar de existir compensación de dispersión cromática, no tendrán el control, disminución de deformaciones ni suavización de señal esperadas y/o identificadas en los casos anteriores.

Para los canales de 2.5 Gbps, se identifican variaciones en los niveles de las señales y se mantiene en cierta proporción, el ensanchamiento de las mismas, el cual también, se ve influenciado por el rango de valores de penalidades de potencia, en el cual el compensador tiene un efecto provechoso para la red MLR.





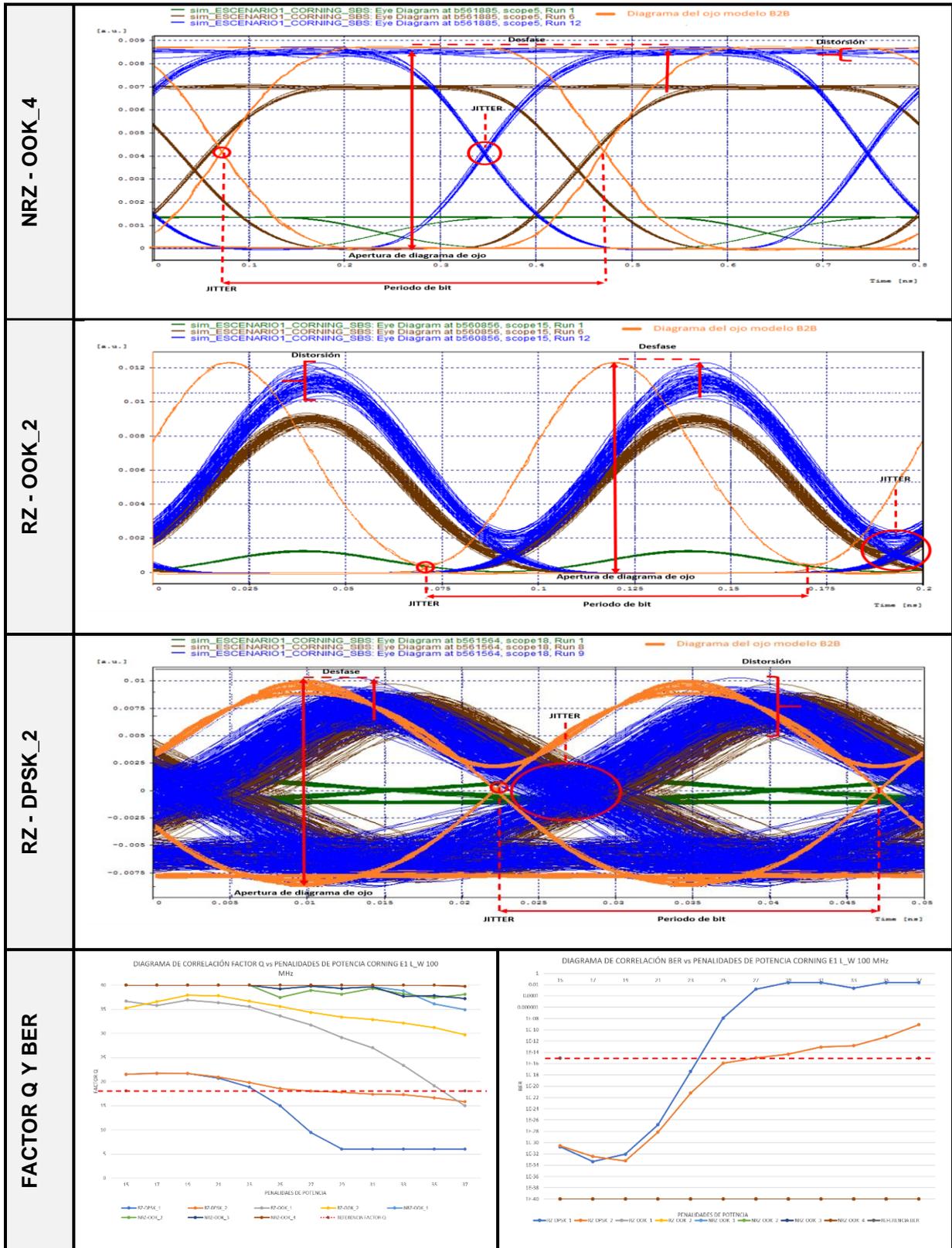


Tabla 3.8: Análisis de parámetros OPM Caso de estudio 2: Escenario 1 – SBS ON.

Se confirman las afecciones más notorias dado el aumento de nivel de penalidades de potencia en presencia de SBS, sobre los canales de mayor capacidad, es decir el canal 1 y 2 de 40 Gbps, para los cuales se identifica un comportamiento deseado, manteniendo un valor de BER entre  $10^{-33}$  y  $10^{-15}$ , de la mano con un Factor Q entre 18 y 22 para niveles de penalidades de potencia entre 15 y 24 dBm, aproximadamente, para valores por encima de

24 *dBm* no es posible garantizar la operatividad de dichos canales para una tasa de transmisión de 40 *Gbps*.

En cuanto los canales 2 y 6 de 10 *Gbps* y 3, 4 y 5 de 2.5 *Gbps*, se evidencia un comportamiento casi ideal donde mantienen valores de BER aproximados de  $10^{-40}$ , en conjunto factores Q que oscilan entre 30 y 40, para valores cualquier valor de penalidad de potencia en el sistema. Cabe resaltar que el canal 2, dada su alta interacción con el canal 1 y las afecciones sufridas por la interferencia de canal adyacente con el mismo, tiene una prominente caída de Factor Q la cual llega hasta un mínimo de 15 e inicia al superar el umbral de 23 *dBm* de penalidades de potencia del sistema en general, confirmando la interferencia de canal adyacente severa, generada por el canal 1 después de cruzar el umbral de penalidades de potencia. Cabe resaltar que, bajo las condiciones establecidas, ninguno de los canales de 2.5 ni 10 *Gbps* tuvieron un decremento de Factor Q o incremento de BER tan significativo como para ponerlos fuera de operación.

Finalmente, para referenciar las afecciones dada la distribución de canales dentro de la grilla espectral y la interferencia de canal adyacente, se pueden comparar los resultados de diagramas de ojo de los canales 1 y 2, en función de distorsión y apertura del ojo, respecto de los canales 7 y 8. Nuevamente, la ubicación en la grilla espectral provoca que las frecuencias más bajas con longitudes de onda más largas, se vean mayormente afectadas frente a las variaciones de las penalidades de potencia, respecto a los canales con frecuencias más altas y longitudes de onda más cortas.

*Nota de autor:*

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones de una red MLR-DWDM con acceso NG-PON2, en presencia de los efectos SRS y SBS; donde dichos efectos se estimulan de forma independiente por caso de estudio.

## **4 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LOS FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS EN PRESENCIA DE LOS EFECTOS DE SCATTERING SRS Y SBS.**

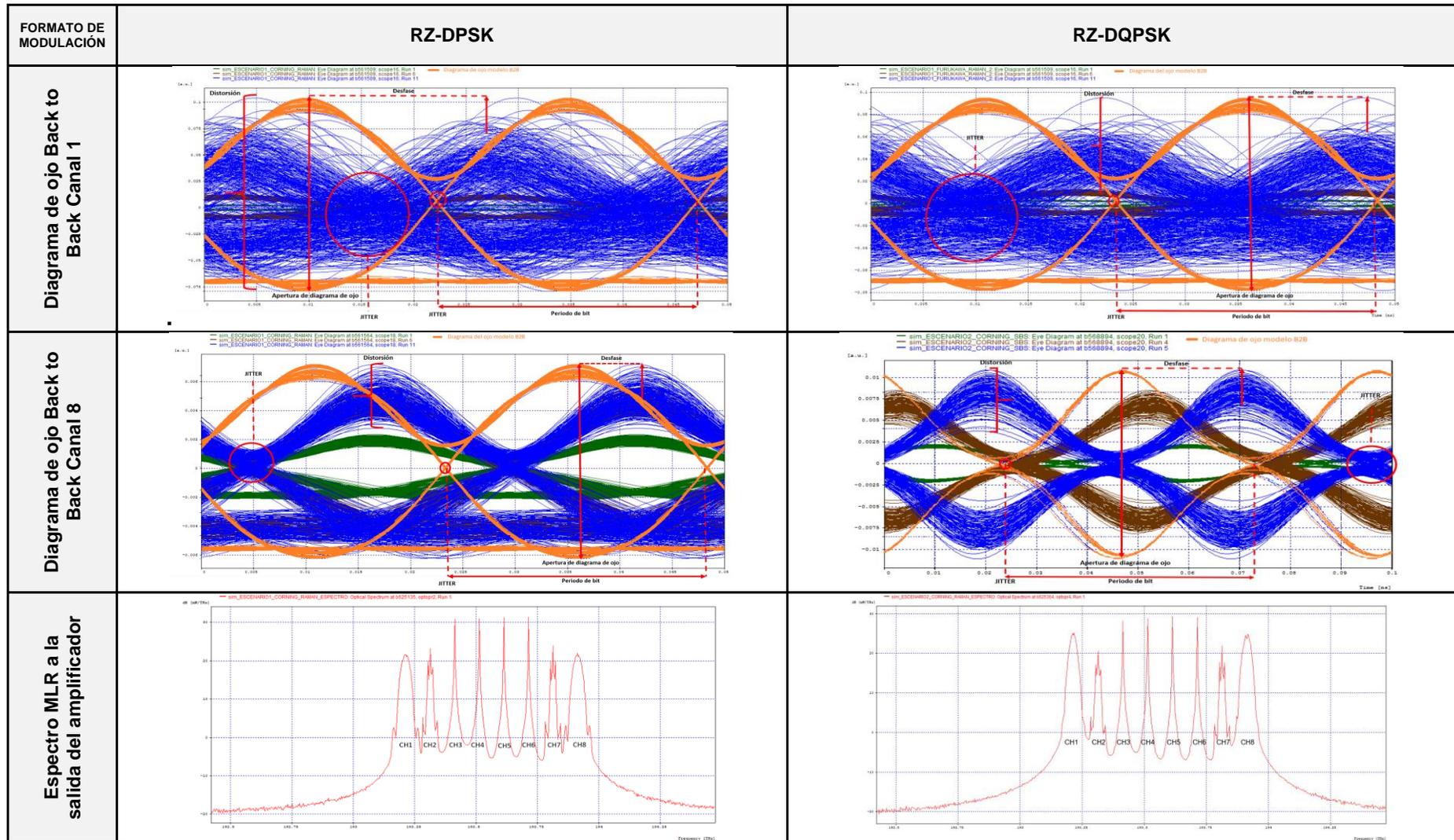
A continuación, se presenta el análisis comparativo del desempeño de los formatos de modulación avanzados RZ-DPSK y RZ-DQPSK los cuales operan a 40 *Gbps*; este proceso es esencial para evaluar la tolerancia de dichos formatos de modulación en presencia de los efectos no lineales SRS y SBS, para casos de estudio específicos; teniendo como variables principales la longitud efectiva de la fibra, el área efectiva de la fibra y las penalidades de potencia.

Se presentan una serie de tablas comparativas las cuales incluyen el análisis gráfico del diagrama espectral de MLR en las secciones más relevantes del sistema, además de parámetros OPM tales como BER y Factor Q. Este análisis comparativo ofrece datos útiles para elegir el formato de modulación avanzado más adecuado bajo las diferentes condiciones que afectan la red de comunicación por fibra óptica.

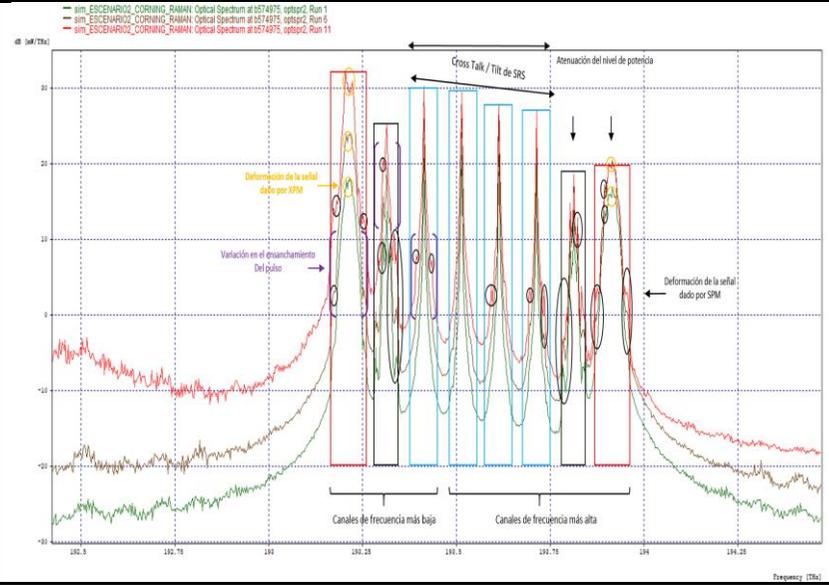
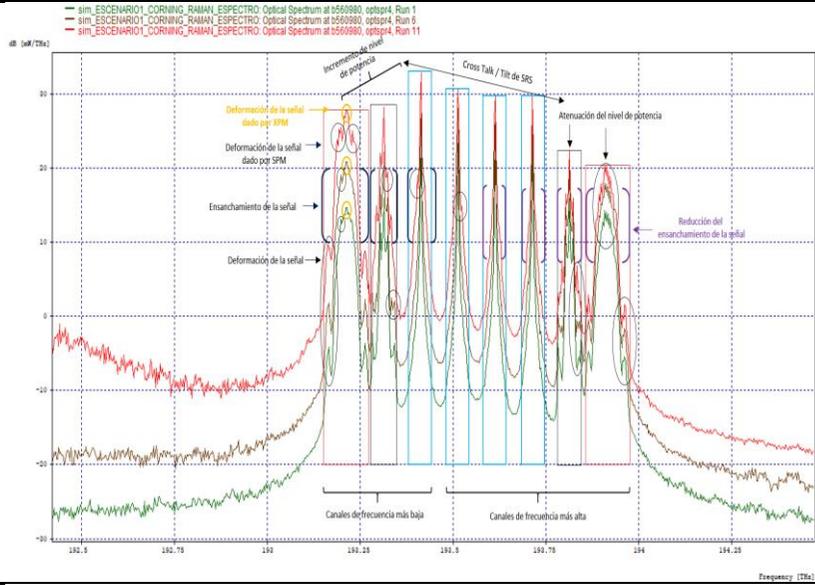
### **4.1 ANÁLISIS COMPARATIVO PARA SRS**

Para todos los casos de estudio, se evidencian grandes afecciones generadas por los efectos de degradación óptica lineales y no lineales, los cuales tienen alto impacto en los canales de mayor capacidad de 40 y 10 *Gbps* para cada escenario; sin embargo es importante resaltar las afecciones identificadas en los canales 1, 2 y 3, dada su ubicación en la grilla espectral para esta distribución de canales pares, y su rol como canales de frecuencias más bajas y longitudes de onda más largas, los cuales se presentan como los mayormente afectados frente a las variaciones de las penalidades de potencia.

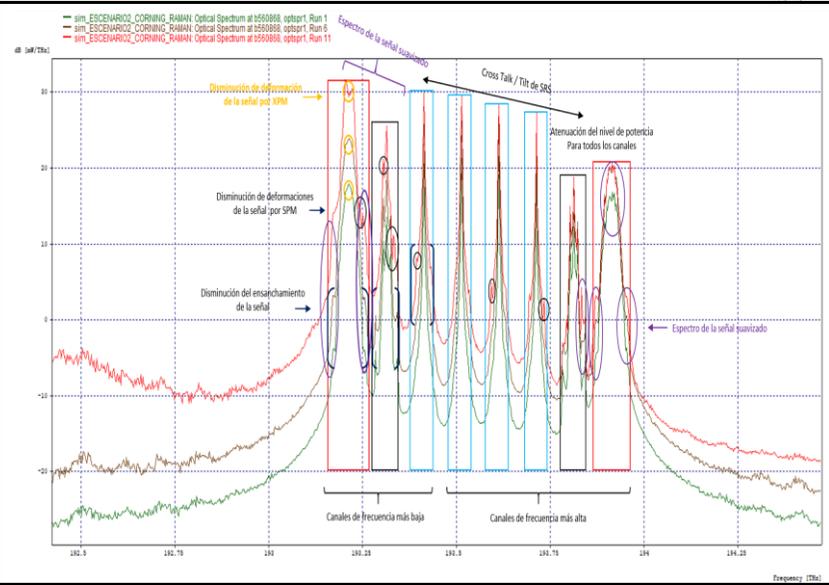
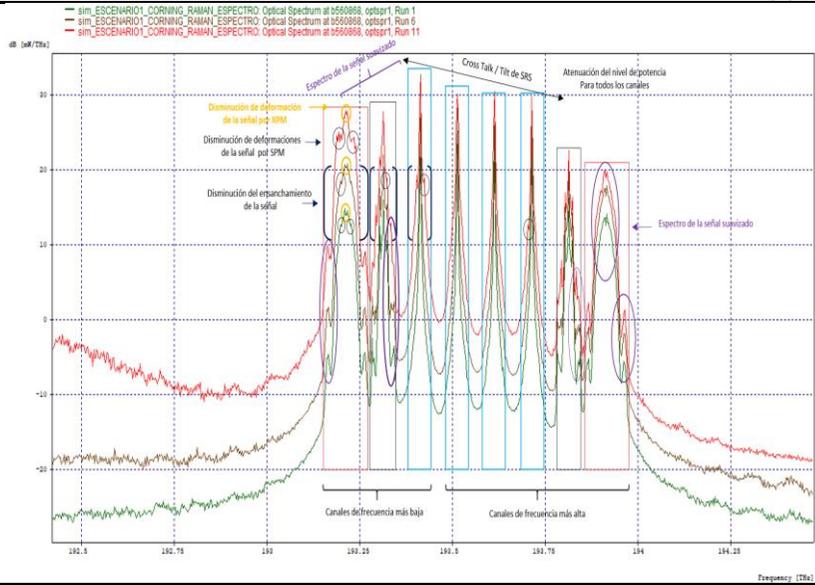
### 4.1.1 Comparación SRS ON Escenario 1 y Escenario 2 para una fibra óptica Corning con separación de canal de 100 GHz.



**Espectro MLR a la salida del módulo de fibra óptica**



**Espectro MLR a la salida del módulo compensador de CD**



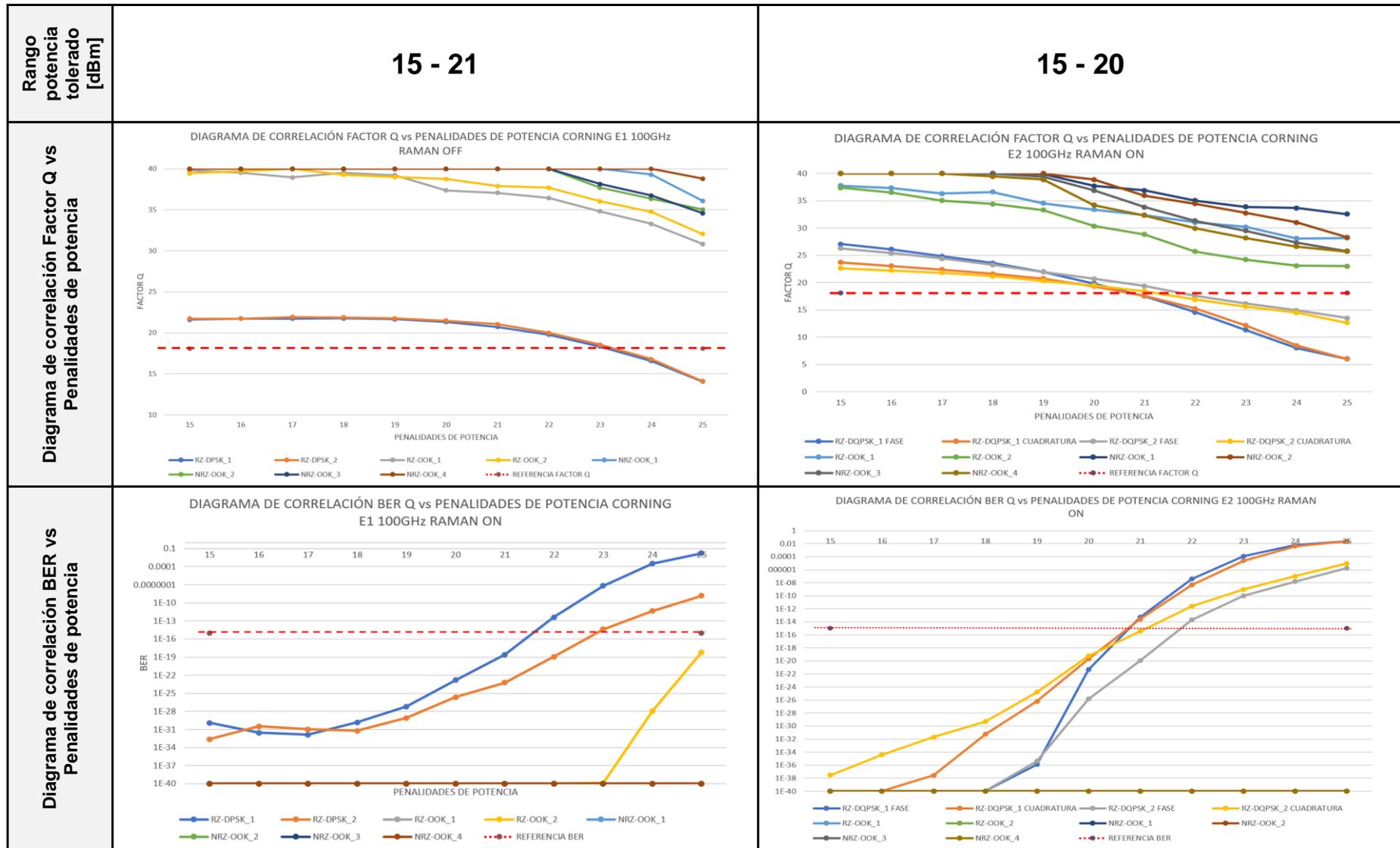


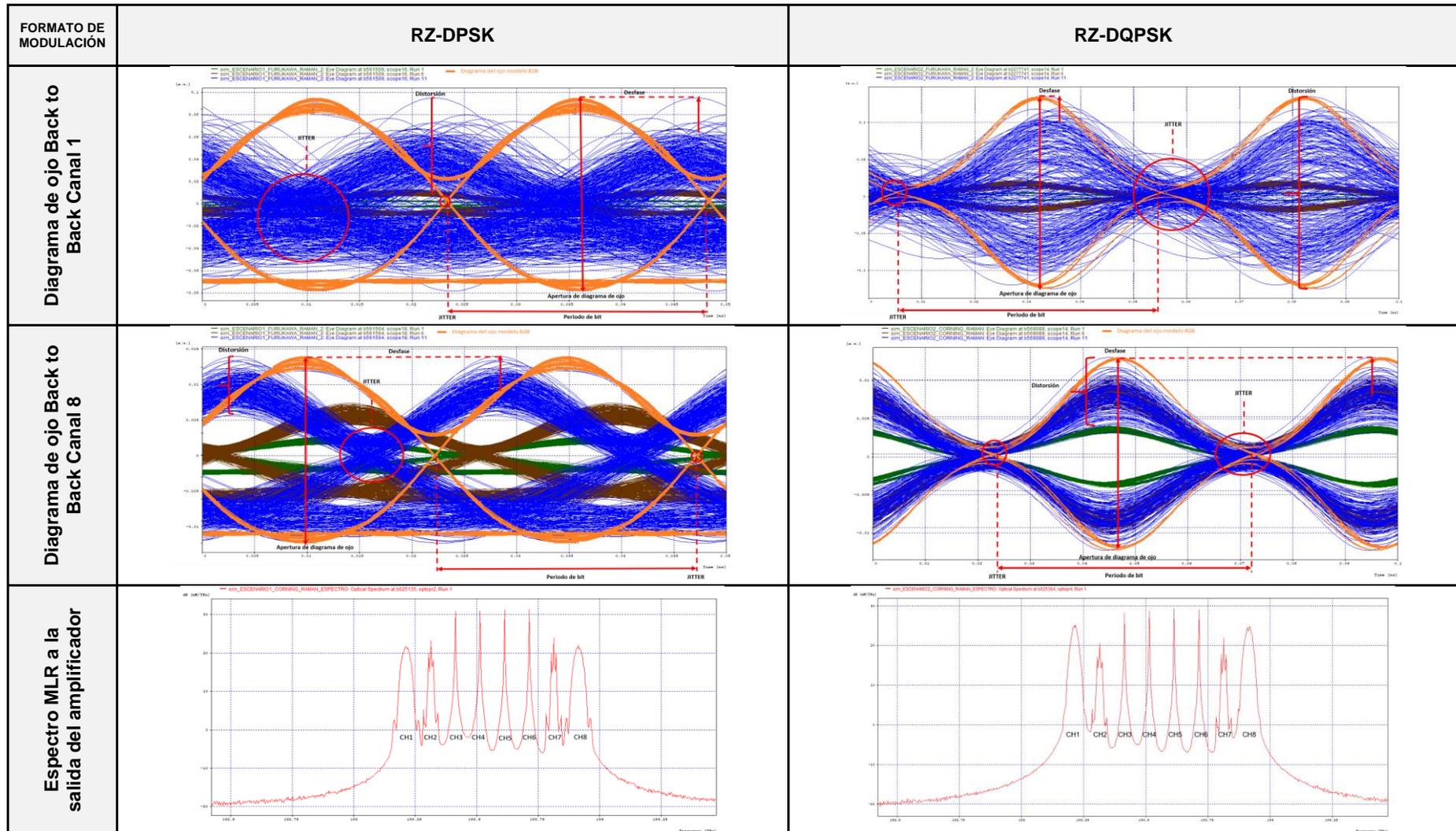
Tabla 4.1: Análisis comparativo del desempeño de formatos de modulación avanzados en presencia de SRS: Escenario 1 Caso 8 vs Escenario 2 Caso 8 separación entre canales 100 GHz presentado en la Tabla 3.3

Para el sistema analizado con un tipo de fibra Corning SMF-28e se identifica un comportamiento común entre los canales de 10 y 40 *Gbps*, los cuales, dado el ensanchamiento de pulso generado por la dispersión cromática, sobreponen su espectro sobre los canales adyacentes; en este caso los canales de 40 *Gbps*, se sobreponen con los canales de 10 *Gbps* y estos se interceptan a su vez sobre los canales de 2.5 *Gbps*, generando evidentes deformaciones en las señales de información, las cuales se ven influenciadas principalmente por la interferencia de canal adyacente, y a su vez se traducen en el aumento de la distorsión, interferencia y pérdida de la calidad de la señal.

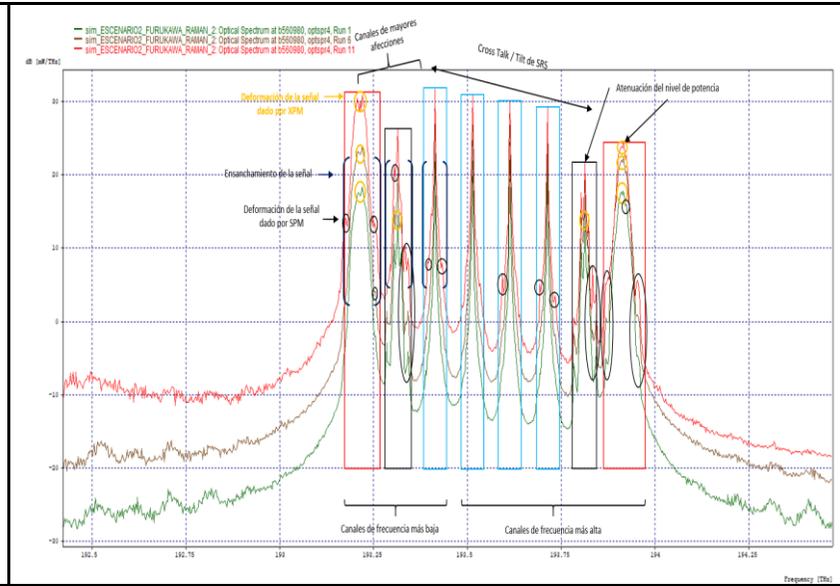
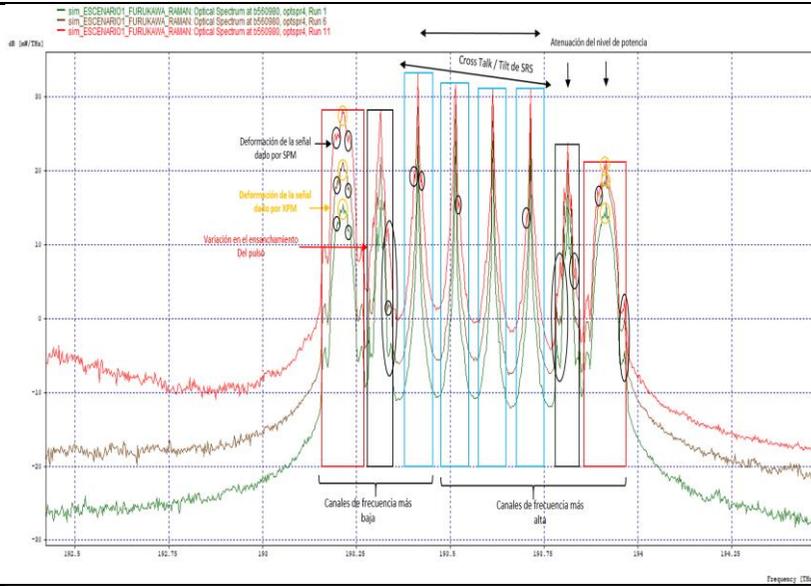
Es evidente que para ambos escenarios se tienen resultados muy similares, en función de las degradaciones identificadas y producidas por los efectos de atenuación, Dispersión Cromática, XPM, SPM, FWM y SRS, las cuales se traducen en atenuación de nivel de la señal, ensanchamiento de los pulsos, deformaciones en los picos de lóbulos principales, deformaciones laterales en los lóbulos principales, productos de intermodulación separados entre sí por la misma frecuencia de separación entre los canales de información, que en este trabajo de grado son 50 y 100 *GHz* (ver ANEXOS A para más detalles en la separación de 50 *GHz*), y Cross Talk respectivamente. Cabe resaltar que se consideran de vital importancia los resultados obtenidos del análisis de los diagramas de ojo en función del *Jitter*, apertura del ojo, distorsión y desfase en el tiempo; Por lo tanto, las principales diferencias entre ambos escenarios se identifican en los resultados obtenidos de los parámetros OPM relacionados al Factor Q y BER, donde se observa un comportamiento más estable para el Escenario 1 dentro del rango de penalidades de potencia aplicadas que van desde 15 *dBm* hasta aproximadamente 21 *dBm*, donde el aumento de BER es bastante ligero y tolerable, sin llegar a perjudicar el desempeño del sistema.

Para el Escenario 2 se evidencia un comportamiento disruptivo más severo, el cual desde el mismo inicio de las variaciones de penalidades de potencia, provoca la disminución del Factor Q y el aumento progresivo de la BER hasta alcanzar el valor mínimo de BER objetivo alrededor de los 20 *dBm* de penalidades de potencia; por lo tanto, para potencias superiores a 20 *dBm* y debido a las significativas degradaciones que el sistema ha experimentado, no es posible asegurar la disponibilidad de servicio para todos los canales de la red MLR.

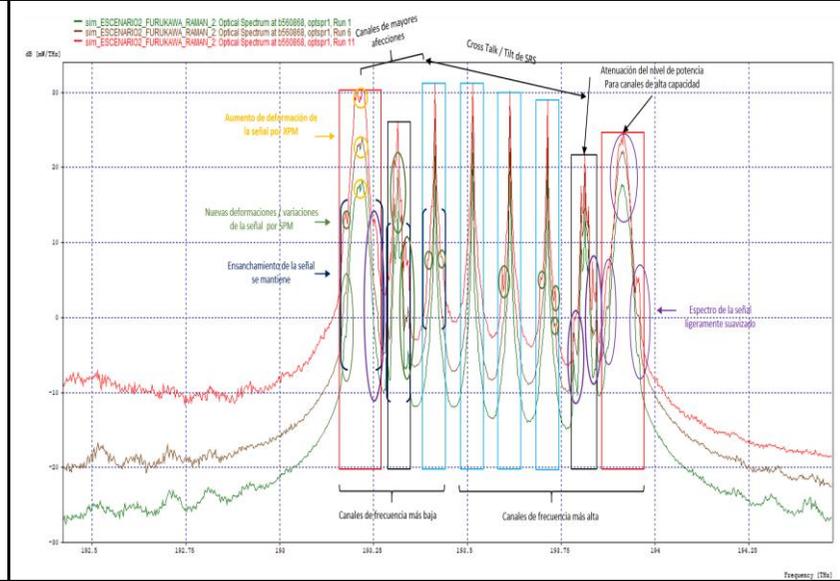
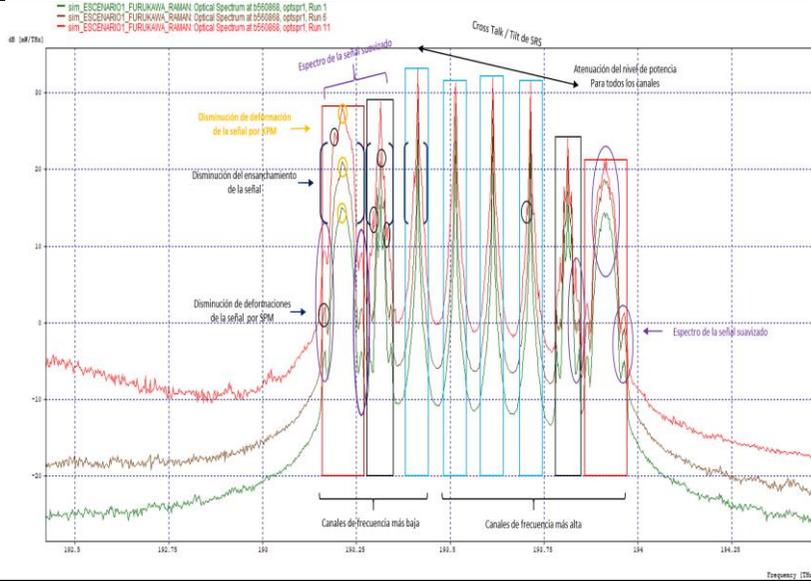
### 4.1.2 Comparación SRS ON Escenario 1 y Escenario 2 para una fibra óptica Furukawa con separación de canal de 100 GHz.



### Espectro MLR a la salida del módulo de fibra óptica



### Espectro MLR a la salida del módulo compensador de CD



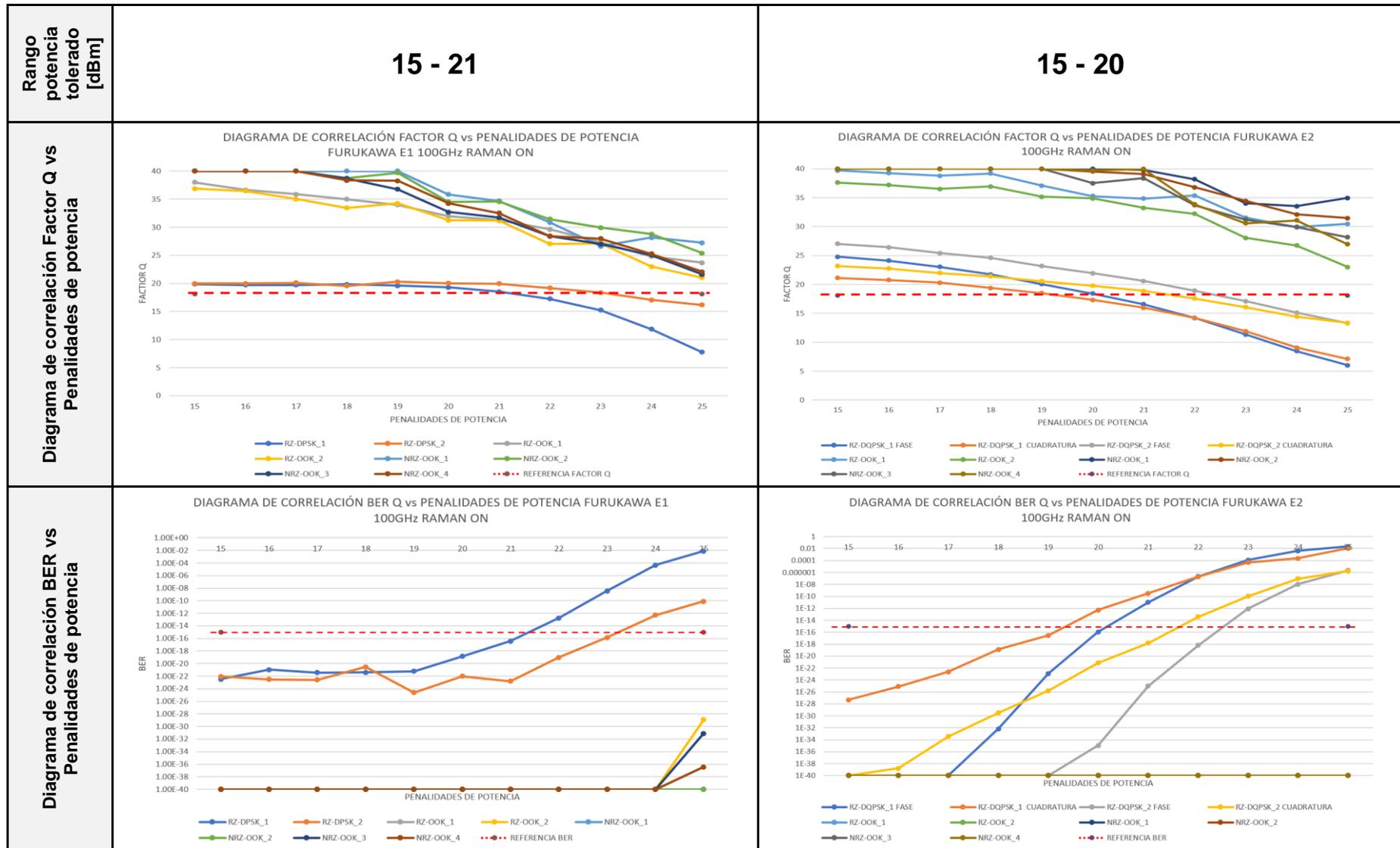


Tabla 4.2: Análisis comparativo del desempeño de formatos de modulación avanzados en presencia de SRS: Escenario 1 caso 10 vs Escenario 2 caso 10, separación entre canales 100 GHz, presentado en la Tabla 3.3.

Para el sistema analizado con un tipo de fibra Furukawa SM332, se confirma una gran influencia dada por los efectos del ensanchamiento del pulso provocado por la dispersión cromática, siendo más evidente para los canales de alta capacidad 1, 2, 7 y 8. Este efecto provoca el aumento de la interferencia de canal adyacente dado que ciertas secciones específicas del espectro de los canales ensanchados se superponen sobre el espectro de los canales contiguos.

Se tiene además que después de la etapa de compensación se manifiesta una ligera reducción del ensanchamiento de los pulsos y por ende de la interferencia de canal adyacente, generando de forma clara, suavización sobre las señales de información. Cabe resaltar que la dispersión cromática residual ha tenido un efecto compensador que, de forma general, logra la reducción y suavización de los picos de XPM y algunas deformaciones de los lóbulos laterales dados por SPM; sin embargo, esta compensación no es suficiente para dichos efectos y sus afecciones por completo, e incluso en ciertas secciones del espectro MLR es posible identificar nuevas deformaciones por SPM.

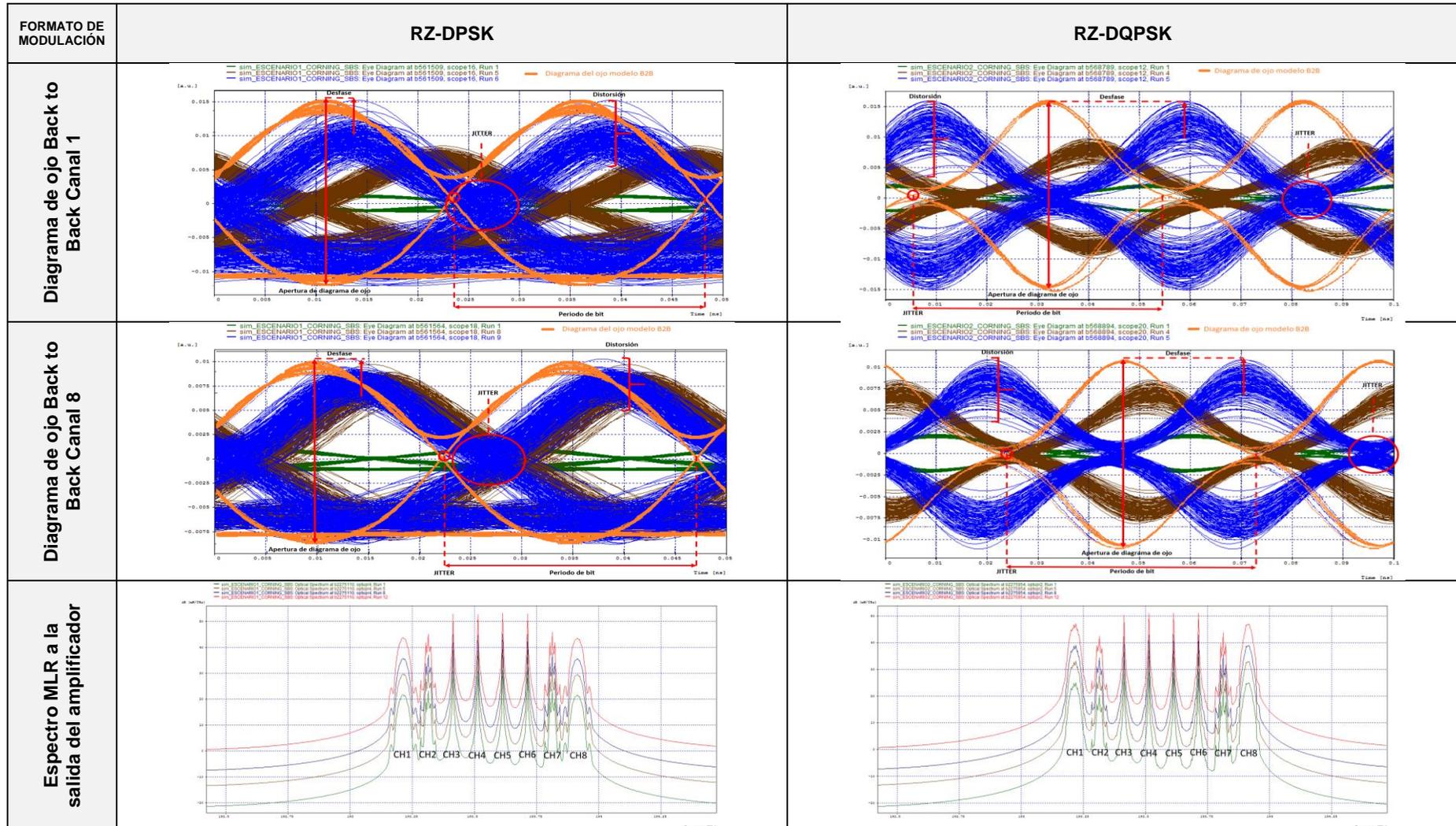
A pesar de que ambos escenarios hayan arrojado resultados bastante similares en función de las degradaciones mencionadas anteriormente y sus efectos en el espectro MLR, en función de los parámetros OPM relacionados al Factor Q y BER, es posible identificar un comportamiento estable y controlado para el Escenario 1 en el cual se tiene que, para un rango entre 15 *dBm* y aproximadamente 21 *dBm* el sistema no experimenta variaciones tan críticas que lo lleven estar fuera del requerimiento mencionado; una vez superado este umbral de nivel de penalidad, no puede ser asegurada la prestación del servicio. Para el Escenario 2, se observa un comportamiento un poco más crítico dada la forma y rapidez en la variación del Factor Q y BER de sus canales de mayor capacidad frente al aumento de las penalidades de potencia, que a pesar de estar cubiertos por el requerimiento planteado, se ven más altamente afectados a medida que se modifica el valor de potencia aportado por el amplificador y una vez superado el límite de penalidades de aproximadamente 20 *dBm*, este se ve afectado a tal nivel que no es posible asegurar la prestación del servicio. (ver ANEXOS A para más detalles en la separación de 50 *GHz*).

## 4.2 ANÁLISIS COMPARATIVO PARA SBS

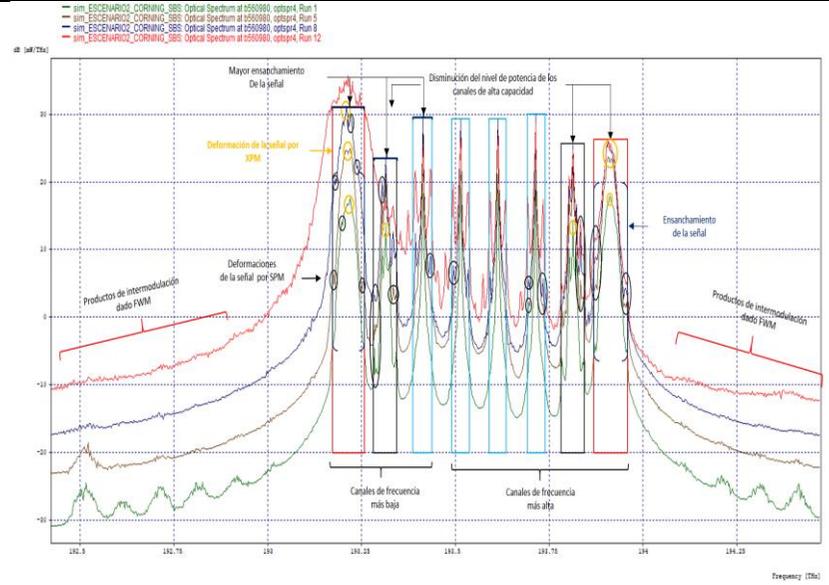
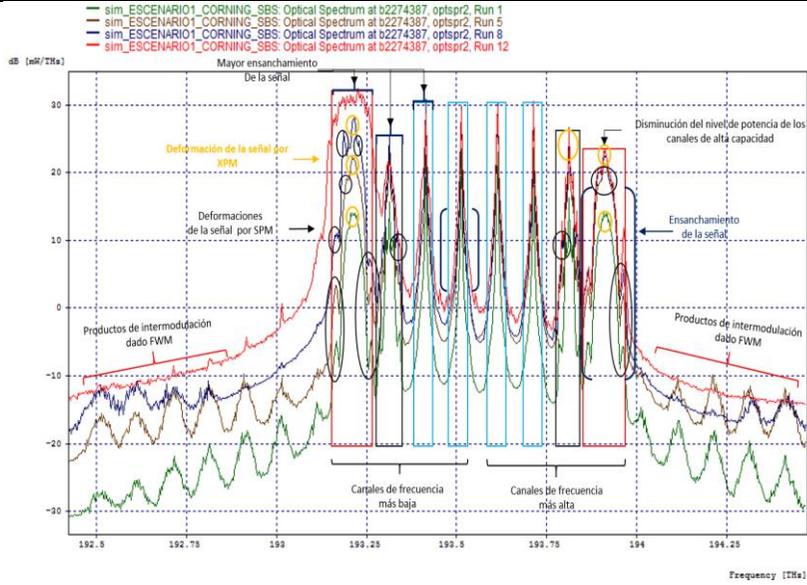
Para ambos escenarios analizados, se evidencian grandes variaciones en el ensanchamiento del pulso debido a la dispersión cromática para todos los canales de alta capacidad operando tanto a 10 *Gbps* como a 40 *Gbps*. Tal como se indicó en el capítulo 3, dada su ubicación en la grilla espectral, se tiene que los canales 1, 2 y 3 con las frecuencias más bajas y longitudes de onda más largas, se ven mayormente afectados frente a las variaciones de las penalidades de potencia, respecto a los canales con frecuencias más altas y longitudes de onda más cortas. Este ensanchamiento tan severo identificado en los canales de alta capacidad, provoca además afecciones bastante críticas en el desempeño del sistema, las cuales se deben principalmente a la interferencia de canal adyacente, la cual es más crítica para los canales 2, 3, 6 y 7, donde parte del espectro de los canales 1 y 8 llega a superponerse sobre los canales 2 y 7 respectivamente, generando alta distorsión y ruido; a su vez, este suceso se repite por parte de los canales 2 y 7 sobre los canales 3 y 6.

Finalmente, en el receptor, con ayuda de los parámetros OPM se confirma este comportamiento al evidenciar mayor distorsión y *Jitter*, además de menor apertura del ojo para los canales 1, 2, 3 y 4. En el caso de los canales 6, 7 y 8, a pesar de estar cubiertos por la declaración anterior, estos sufren menos degradaciones dada su ubicación en la grilla espectral y mayor tolerancia a dichas variaciones de nivel de penalidades de potencia.

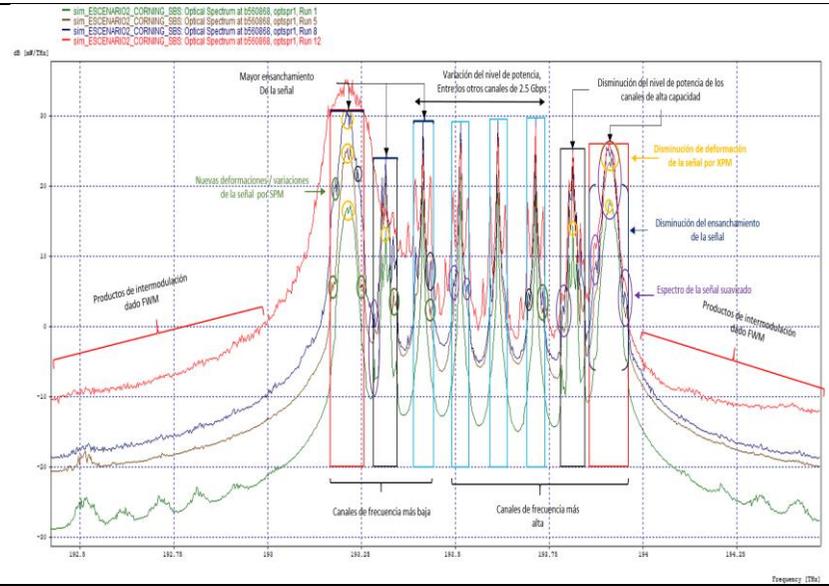
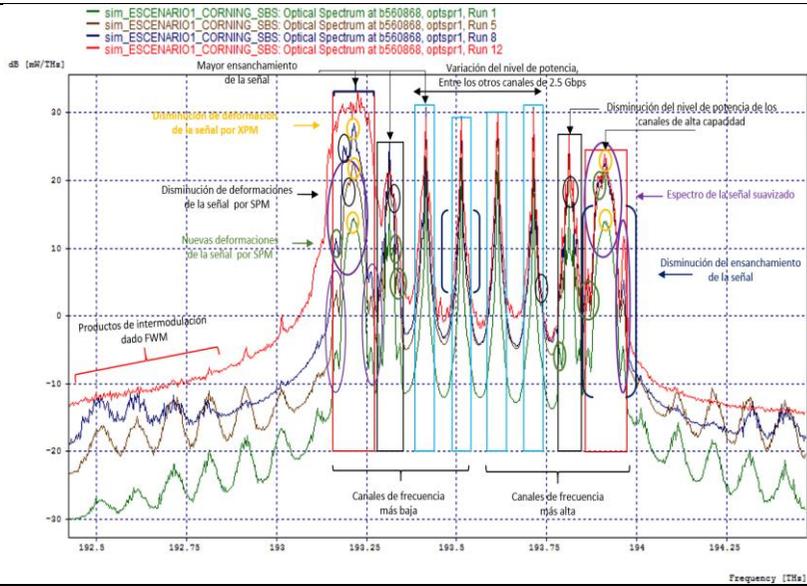
### 4.2.1 Comparación SBS ON Escenario 1 y Escenario 2 para una fibra óptica Corning con separación de canal de 100 GHz y Ancho de línea 100 MHz.



**Espectro MLR a la salida del módulo de fibra óptica**



**Espectro MLR a la salida del módulo compensador de CD**



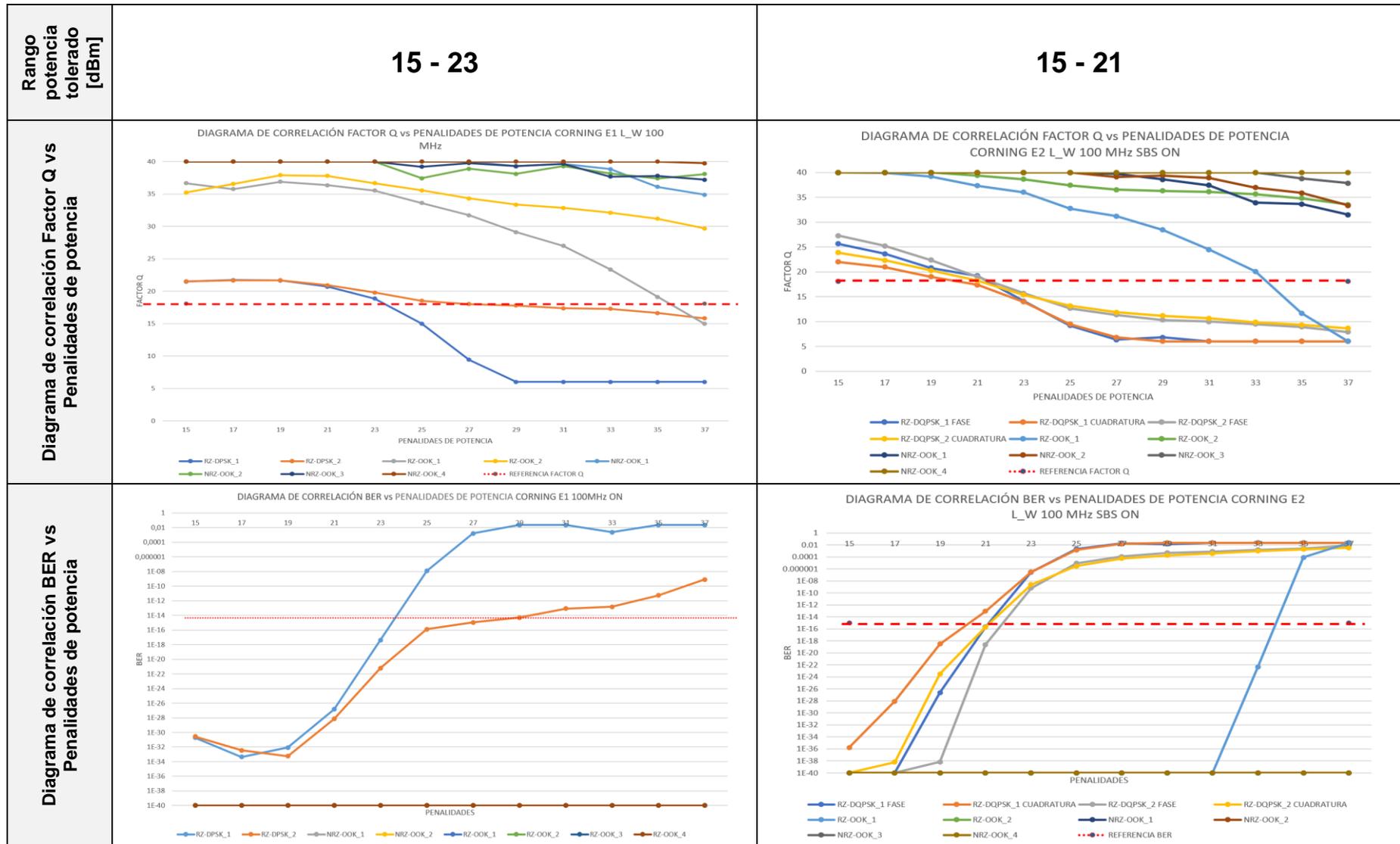
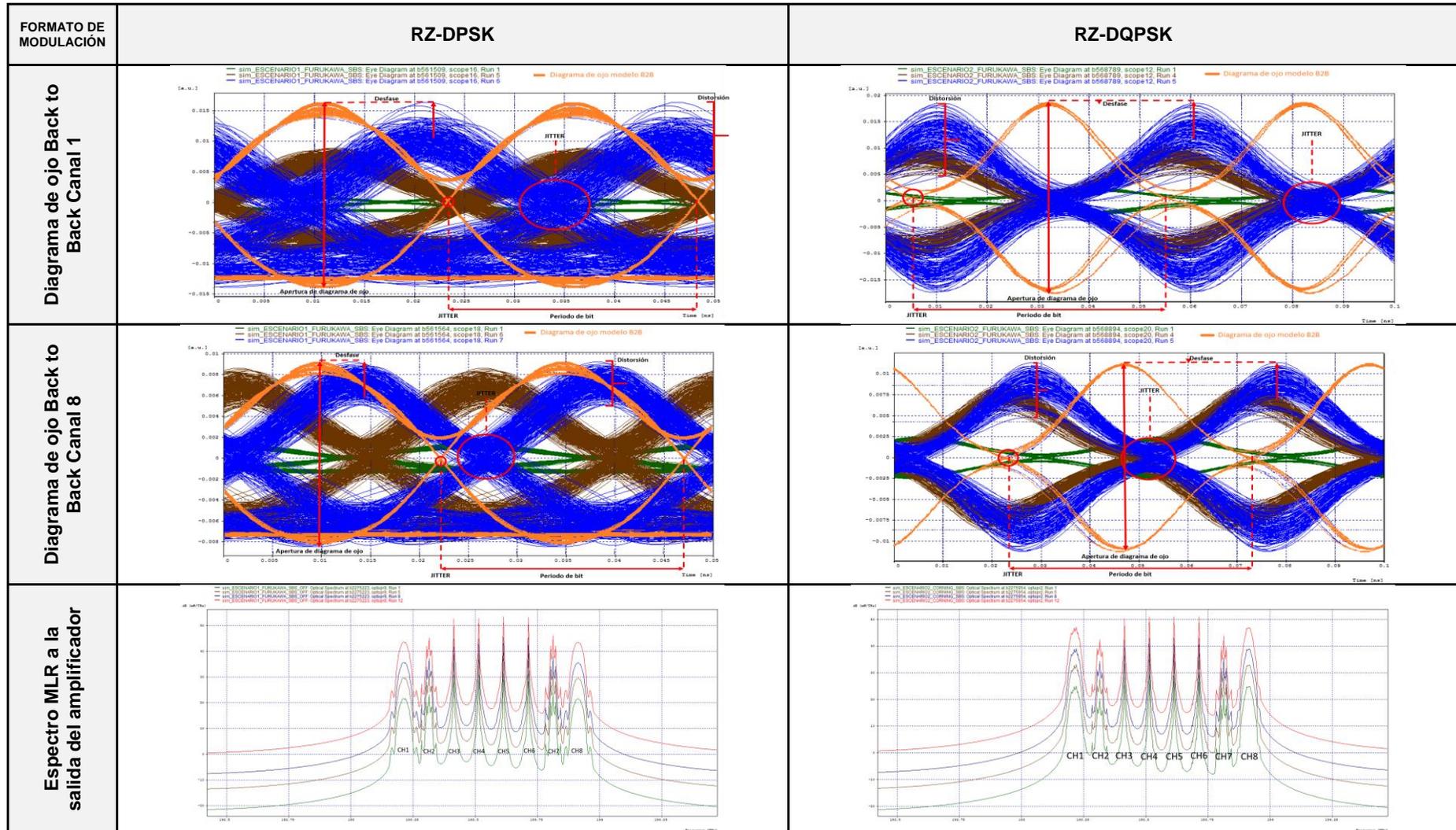


Tabla 4.3: Análisis comparativo del desempeño de formatos de modulación avanzados en presencia de SBS: Escenario 1 caso 2 vs Escenario 2 caso 2, ancho de línea de la señal 100 MHz; tomado de la Tabla 3.4.;

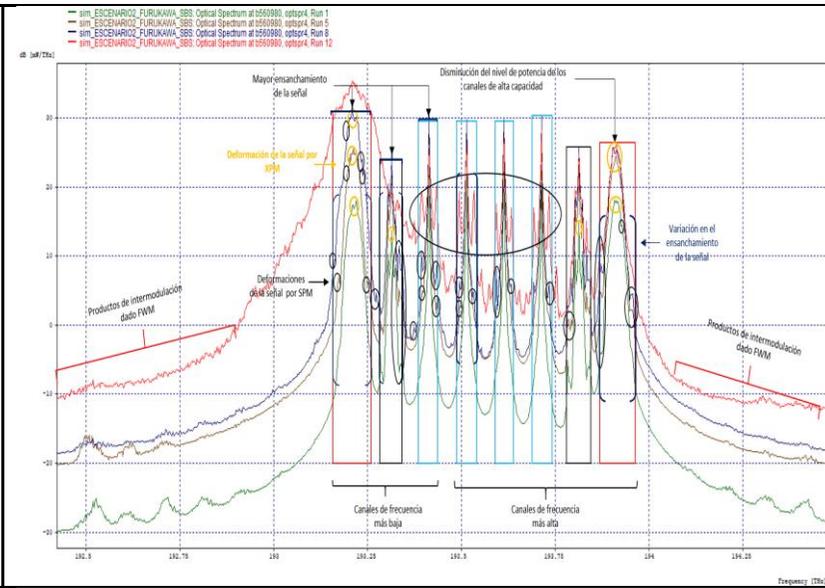
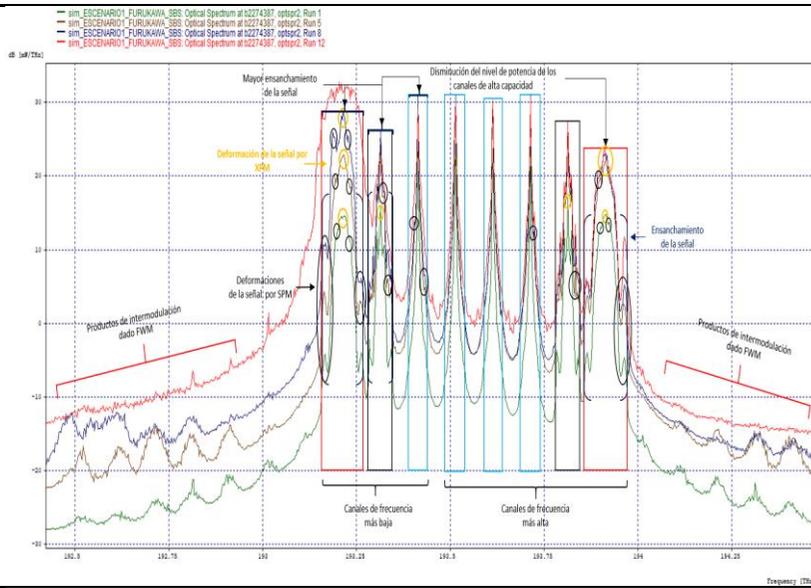
Para el sistema analizado con un tipo de fibra Corning SMF-28e, en el Escenario 1, se identifican grandes afecciones generadas principalmente por los efectos de SBS y gran ensanchamiento dada la dispersión cromática, mostrada en forma de alta interferencia de canal adyacente, en mayor proporción para los canales 1,2,3,4,5 y 6; cabe resaltar que las deformaciones de las señales de información dados los efectos de XPM y SPM continúan apareciendo a medida que se aumenta el nivel de penalidad aplicado. Para el canal 1 del Escenario 1, se confirma que el sistema ha sido capaz de operar de forma adecuada y bajo los requerimientos de Factor Q y BER hasta un nivel de penalidad de potencia máximo de aproximadamente  $23\text{ dBm}$ ; para el siguiente nivel de penalidad de  $25\text{ dBm}$ , este canal ya no es capaz de cumplir con los requerimientos planteados anteriormente. Además, para el canal 8 de  $40\text{ Gbps}$ , al alcanzar un nivel de señal que oscila entre  $15$  y  $27\text{ dBm}$ , el nivel de potencia de la señal a la entrada del receptor queda limitado incluso si se incrementa el nivel de penalidad aplicado en el amplificador, al rozar este umbral de potencia, empezarán su proceso de degradación y pérdida de calidad, llegando afectar a los canales 6 y 7 en gran magnitud. Este comportamiento se evidencia en los parámetros OPM para cada escenario de simulación; donde se identifica un comportamiento más tolerante por parte de este canal frente a las afecciones tanto de efectos de degradación óptica lineales, como los no lineales, ya que ha sido capaz de operar de forma adecuada para un nivel de penalidad de potencia mayor que el canal 1.

Para el Escenario 2, es también notorio el gran ensanchamiento de los pulsos para todos los canales de la red MLR, siendo los canales 1,2 y 3 los principales afectados, entre otros factores, por su ubicación en el espectro y la naturaleza homogénea del medio óptico. Este gran ensanchamiento del pulso ha generado aún más interferencia de canal adyacente entre los canales evidenciada entre los canales 1, 2, 3, 4, 5 y 6 los cuales tienen el peor desempeño de toda la configuración. Nuevamente, las deformaciones de las señales de información dados por XPM y SPM son muy notorios en casi todas las secciones del espectro MLR. Al realizar el análisis de los parámetros OPM sobre los canales 1 y 8, se confirma que el canal 1 ha sido el más afectado y fue capaz de operar de forma adecuada hasta un nivel de penalidad de potencia máximo de aproximadamente  $21\text{ dBm}$  y para el siguiente nivel aplicado de  $23\text{ dBm}$ , no es capaz de cumplir con los requerimientos de Factor Q y BER planteados. Para el canal 8, se confirma un comportamiento más tolerante frente a estos efectos y ha sido capaz de mantenerse hasta un nivel de penalidades máximo de  $21\text{ dBm}$ . Se confirma entonces que el comportamiento más disruptivo, más costoso y menos adecuado para esta red de tipo MRL se obtuvo con el uso del formato de modulación RZ-DQPSK configurado para el Escenario 2 con una fibra óptica Corning SMF-28e, por lo tanto, el formato de modulación RZ-DPSK es una buena alternativa para la implementación de canales de  $40\text{ Gbps}$  en una red MLR, bajo las condiciones planteadas anteriormente. (ver ANEXOS B para más detalles en la separación de  $50\text{ GHz}$ ).

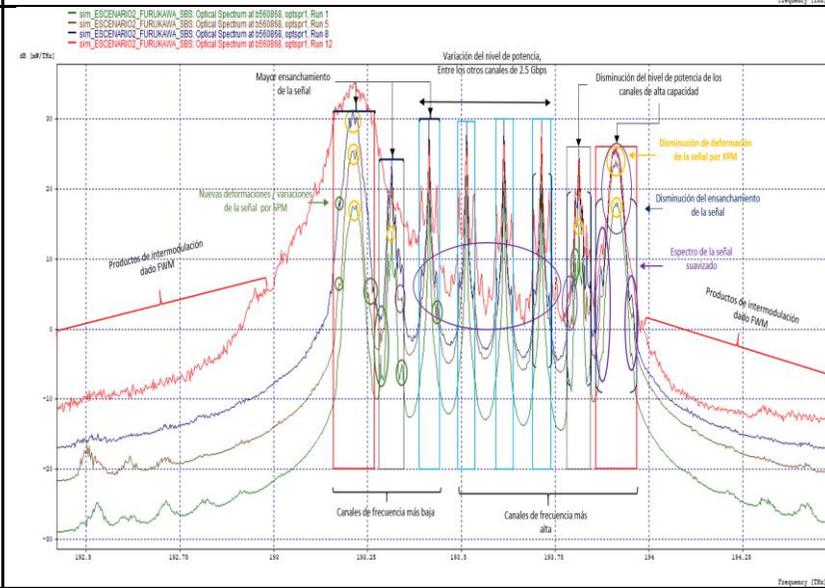
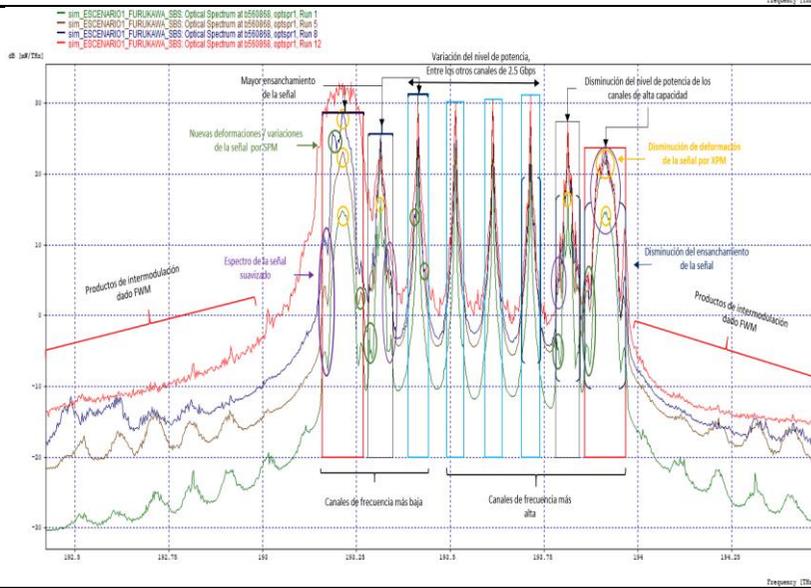
## 4.2.2 Comparación SBS ON Escenario 1 y Escenario 2 para una fibra óptica Furukawa con separación de canal de 100 GHz y Ancho de línea de 100 MHz.



### Espectro MLR a la salida del módulo de fibra óptica



### Espectro MLR a la salida del módulo compensador de CD



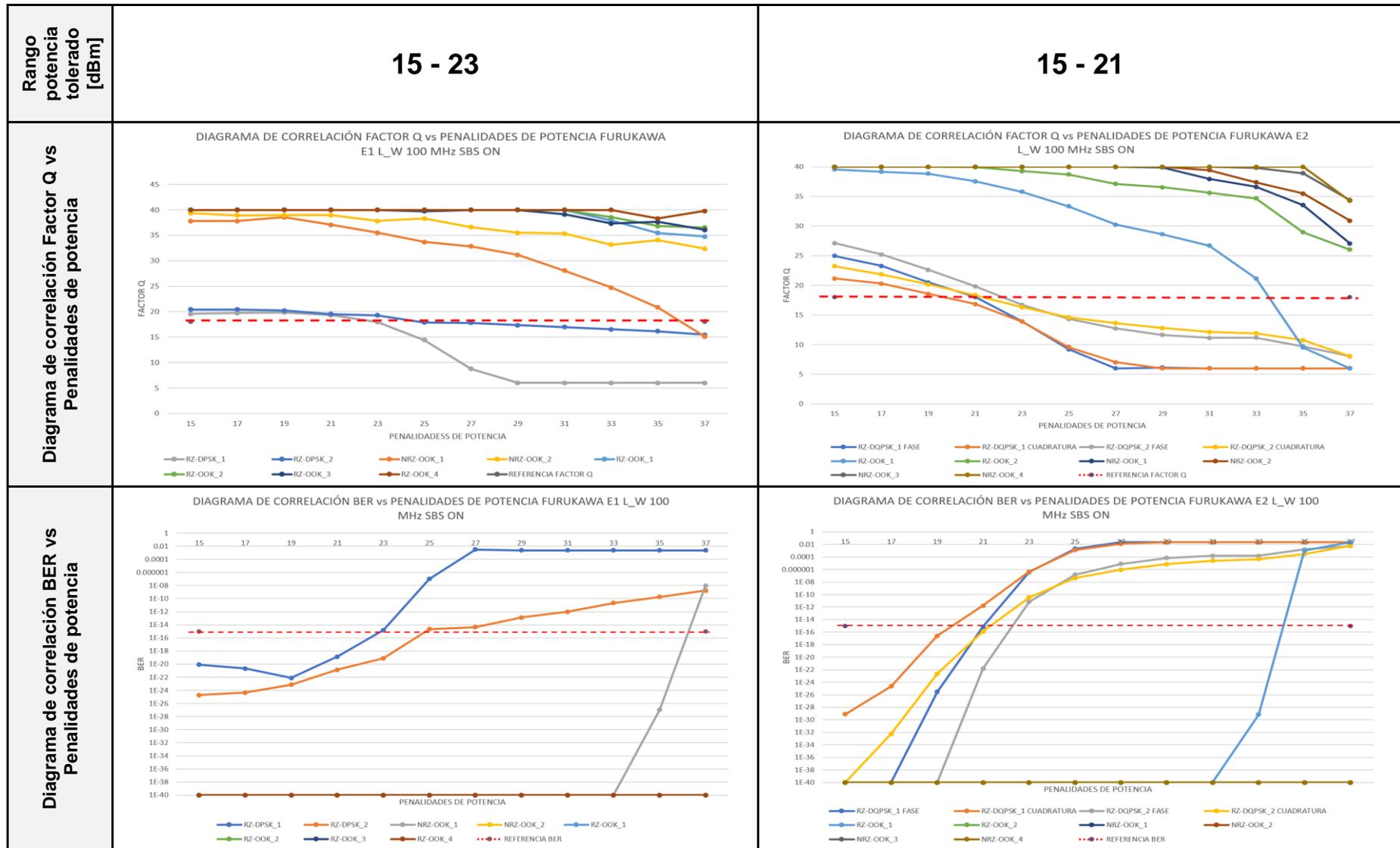


Tabla 4.4: Análisis comparativo del desempeño de formatos de modulación avanzados en presencia de SBS: Escenario 1 caso 6 vs Escenario 2 caso 6 Tabla 3.4; ancho de línea de la señal 100 MHz.

Para el sistema analizado con un tipo de fibra Furukawa SM332, para ambos escenarios es posible identificar afecciones bastante severas, generadas principalmente por los efectos de SBS y gran ensanchamiento dada la dispersión cromática, lo cual se traduce en alta interferencia de canal adyacente, la cual se identifica en mayor proporción para los canales 1, 2, 3, 4, 5 y 6; nuevamente, las deformaciones de las señales de información dados los efectos de XPM y SPM continúan apareciendo a medida que se aumenta el nivel de penalidad aplicado desde el mismo inicio de las variaciones.

Para el canal 1 del Escenario 1, se confirma que el sistema ha sido capaz de operar de forma adecuada y bajo los requerimientos de Factor Q y BER hasta un nivel de penalidad de potencia máximo de aproximadamente  $23\text{ dBm}$ ; para el siguiente nivel de penalidad de  $25\text{ dBm}$ , este canal ya no es capaz de cumplir con los requerimientos planteados anteriormente. Para el canal 8, se identifica una mayor tolerancia frente a las grandes afecciones tanto de efectos de degradación óptica lineales, como los no lineales, ya que ha sido capaz de operar de forma adecuada, nuevamente, hasta un nivel de penalidad de potencia máximo de aproximadamente  $27\text{ dBm}$ ; este comportamiento está muy estrechamente relacionado a su ubicación más al extremo de los canales de alta frecuencia de la grilla espectral.

Para el Escenario 2, el ensanchamiento de los canales es aún más evidente y está dado para todos los canales de la red MLR, sin embargo, los canales 1, 2, 3, 4, 5 y 6 tienen el peor desempeño de toda la configuración dada su ubicación en el espectro y la gran interferencia de canal adyacente generadas por los canales contiguos. Nuevamente, se utilizan el análisis de los parámetros OPM obtenidos para confirmar que, en ambos escenarios, el canal 1 ha sido el más afectado y fue capaz de operar de forma adecuada hasta un nivel de penalidad de potencia máximo de aproximadamente  $23\text{ dBm}$  y  $21\text{ dBm}$  para los Escenarios 1 y 2 respectivamente. Se confirma entonces que el mejor comportamiento está dado para el Escenario 1 en todos los aspectos relacionados a su tolerancia frente a los efectos de degradación óptica para los canales de mayor capacidad de  $40\text{ Gbps}$  en una red MLR, bajo las condiciones planteadas anteriormente.

#### **4.2.3 Comparación del comportamiento de la red MLR con la variación del ancho de línea de la señal de 100, 300 y 500 MHz**

Adicionalmente, para el análisis del efecto de degradación óptica SBS fue posible demostrar que cuanto menor es el ancho de línea de la señal, el límite de aparición de SBS y, por lo tanto, de sus afecciones, se verán reflejadas en el sistema de una forma más temprana; por ende, este parámetro está estrechamente relacionado con el umbral de aparición de SBS. A continuación, se muestran las gráficas que soportan esta declaración, donde se relacionan el nivel de potencia obtenido a la entrada del receptor de cada canal, respecto al nivel de penalidad potencia aplicado y controlado desde el amplificador, respecto del ancho de línea de la señal seleccionado de 100, 300 o 500 MHz, para cada tipo de fibra óptica simulada. (ver ANEXOS B para más detalles con ancho de línea de 300 y 500 MHz).

- Comparación SBS ON Escenario 1 y Escenario 2 para una fibra óptica Corning con separación de canal de 100 GHz.

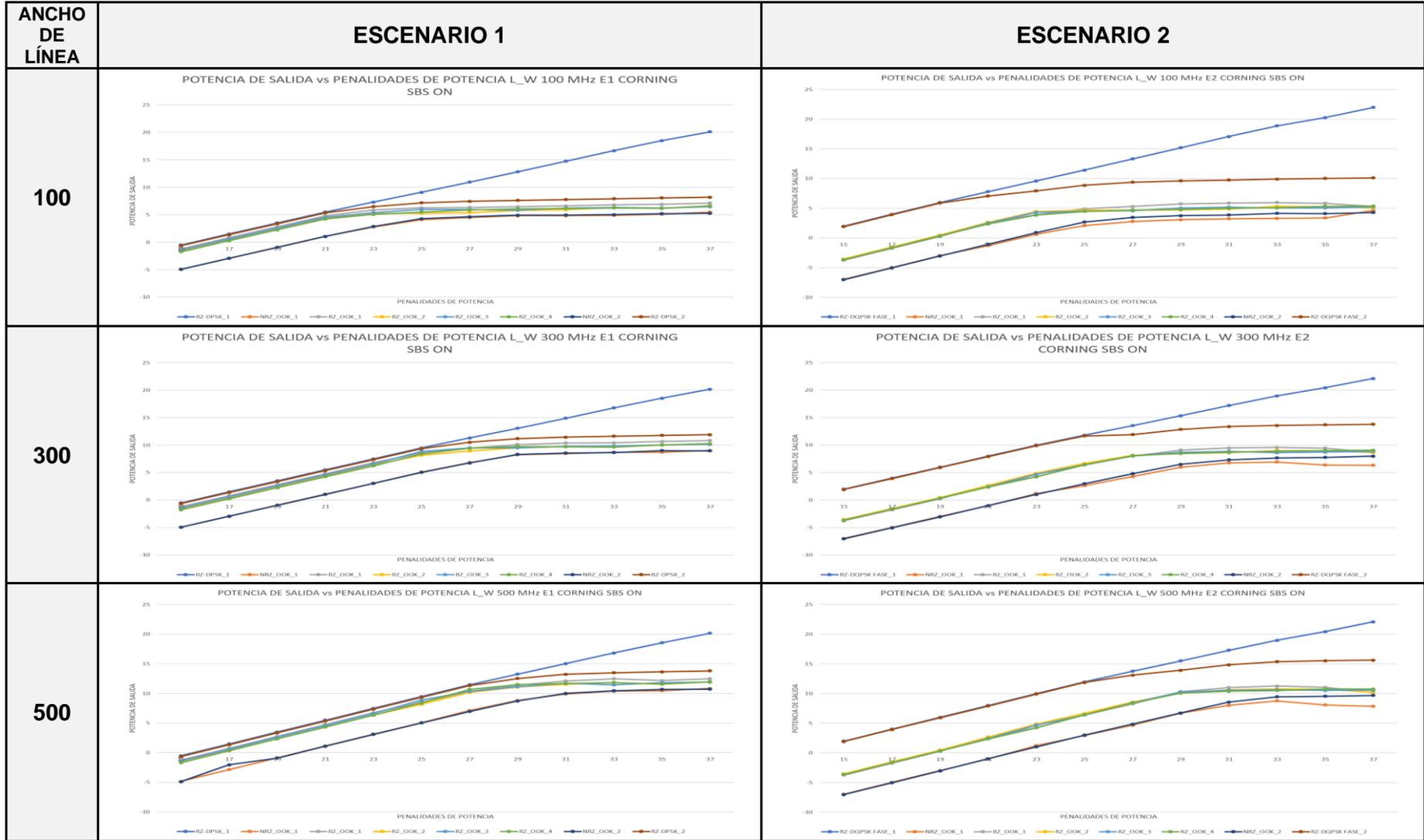


Tabla 4.5: Comparación del compartimento de la red MLR con la variación del ancho de línea de la señal para SBS, fibra Corning.

- Comparación SBS ON Escenario 1 y Escenario 2 para una fibra óptica Furukawa con separación de canal de 100 GHz.

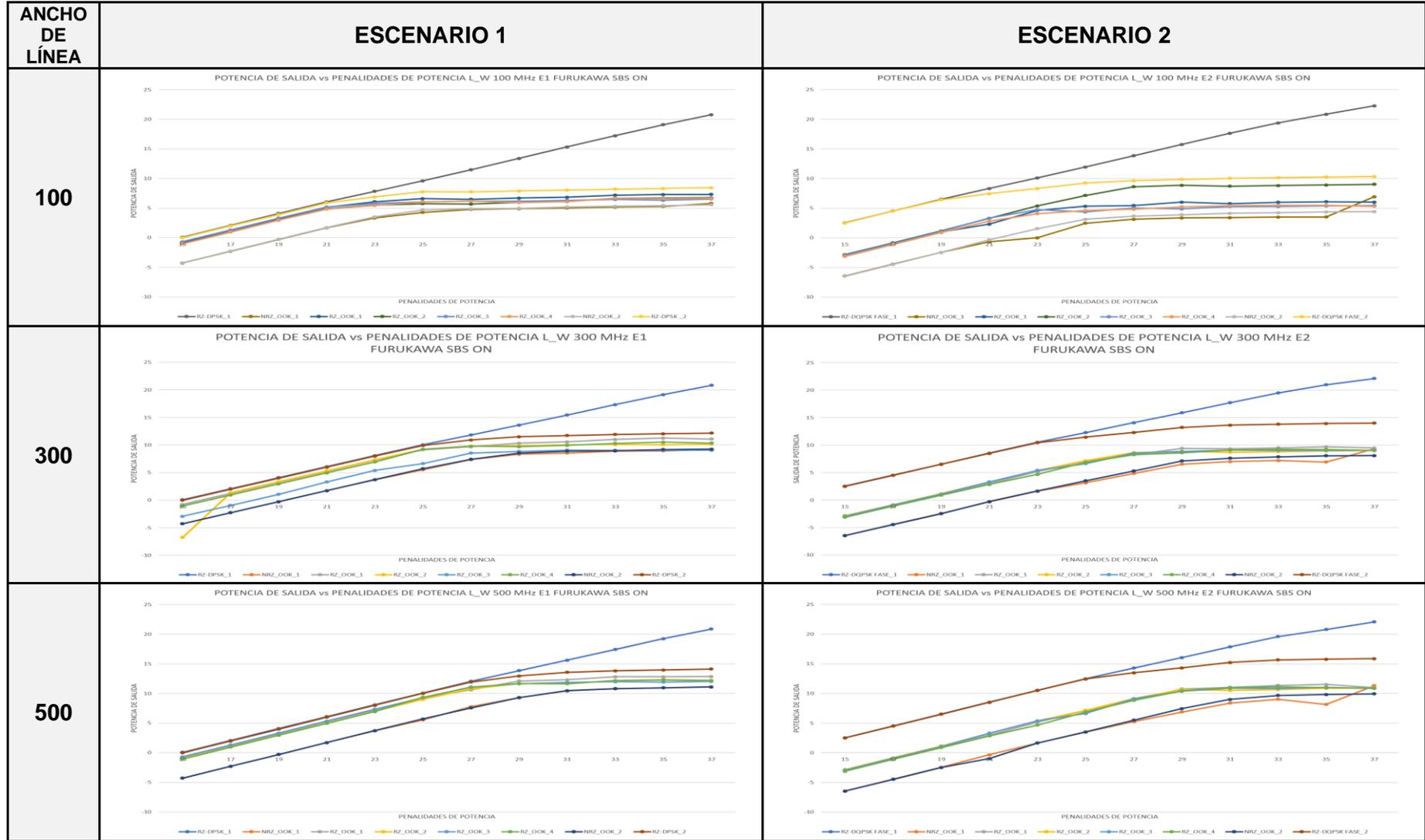


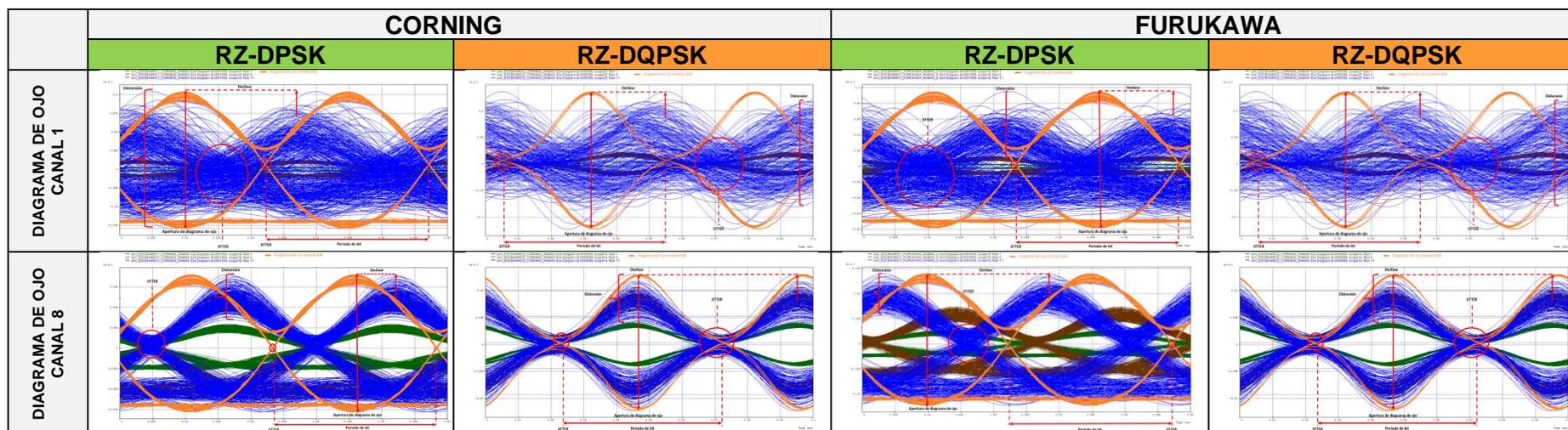
Tabla 4.6: Comparación del compartimento de la red MLR con la variación del ancho de línea de la señal para SBS, fibra Furukawa.

#### 4.2.4 Análisis comparativo de los formatos de modulación RZ-DPSK vs RZ-DQPSK a 40 Gbps en presencia de los efectos no lineales SRS y SBS identificados en las fibras Corning y Furukawa.

A continuación, se presentan una serie de tablas comparativas, sobre las cuales se pretende definir el nivel de tolerancia de los formatos de modulación avanzados RZ-DPSK y RZ-DQPSK frente a su desempeño para una red de línea mixta en presencia de los efectos de degradación óptica lineales y no lineales tal que así:

- **Alto:** para niveles de tolerancia donde las degradaciones se consideran mínimas para el formato de modulación
- **Medio:** para niveles de tolerancia donde las degradaciones son evidentes, pero tienen pocas repercusiones en el desempeño del formato de modulación
- **Bajo:** para niveles de tolerancia donde las degradaciones son críticas y llegan a afectar en gran proporción el desempeño del formato de modulación

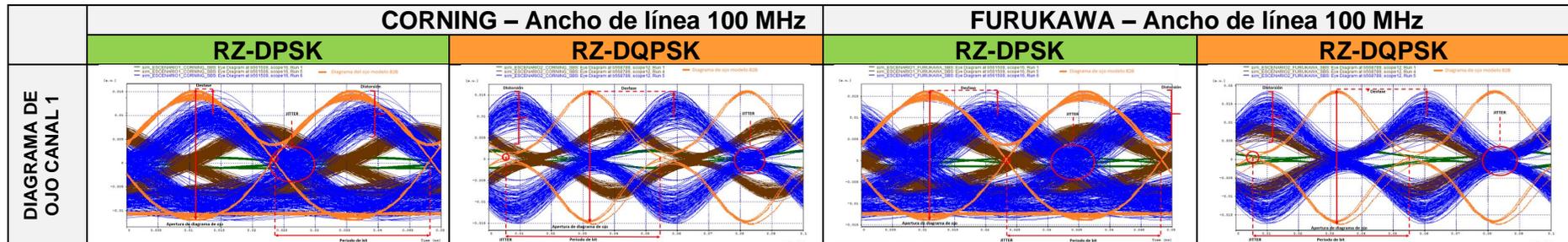
- SRS



ESPECTRO OPTICO DEL CANAL 1				
TOLERANCIA AL RUIDO Y ATENUACION	Medio	Medio	Medio	Medio
TOLERANCIA A LA CD	Alto	Medio	Alto	Medio
TOLERANCIA A LA SRS	Alto	Medio	Alto	Medio

Tabla 4.7: Análisis comparativo del desempeño de los formatos de modulación RZ-DPSK y RZ-DQPSK en una red MLR a 40 Gbps, en presencia de los efectos no lineales SRS identificados en las fibras Corning y Furukawa.

- SBS



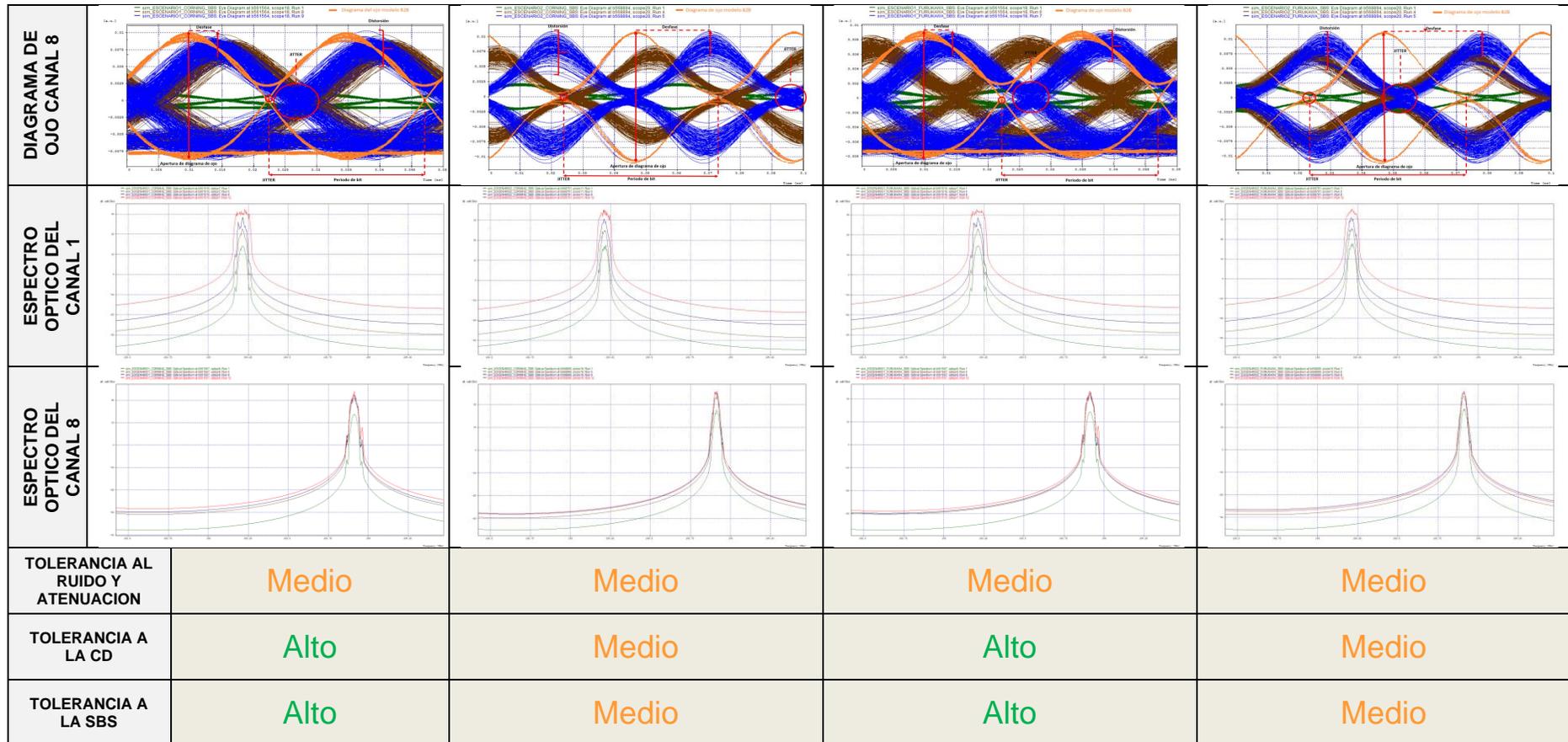


Tabla 4.8: Análisis comparativo del desempeño de los formatos de modulación RZ-DPSK y RZ-DQPSK en una red MLR a 40 Gbps, en presencia de los efectos no lineales SBS identificados en las fibras Corning y Furukawa.

*Nota de autor:*

En este capítulo se presenta el análisis comparativo del desempeño entre los formatos de modulación avanzados RZ-DPSK y RZ-DQPSK; evaluando su tolerancia respecto a los efectos SRS y SBS frente al ruido, atenuación, dispersión cromática y demás degradaciones espectrales generadas por otros efectos no lineales de segundo orden, en función de la variación del nivel de penalidad de potencia.

# 5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

## 5.1 CONCLUSIONES

- Se concluye que con base a la caracterización teórica de los formatos de modulación avanzados RZ-DPSK y RZ-DQPSK, en conjunto con los procesos de simulación de cada caso de estudio, fue posible confirmar que el desempeño de RZ-DPSK es mayor para sistemas con separación entre canales donde los canales estén lo suficientemente alejados para que la interferencia de canal adyacente no tenga afecciones tan disruptivas en el desempeño del mismo. Por lo tanto, a pesar de que RZ-DPSK genera una mayor ocupación de ancho de banda espectral para los canales 1 y 8; este tuvo mejor desempeño que el RZ-DQPSK para 100 GHz de separación.
- Se confirma que el formato de modulación avanzado RZ-DPSK tuvo un desempeño superior frente al formato de modulación avanzado RZ-DQPSK durante la variación progresiva del nivel de penalidades de potencia, para los casos de estudio analizados en presencia del efecto de Scattering SRS en cuanto a estabilidad, tolerancia y menor grado de afecciones generadas por la interferencia de canal adyacente, como consecuencia de la separación entre canales fija de 100 GHz, ya que se identifica una menor interacción entre canales contiguos por su separación espectral; lo cual junto a la etapa de compensación propuesta, facilitó la mitigación de deformaciones indeseadas y la suavización de los espectros de los canales de información del 1 hasta el 8, incluso en presencia de los efectos de degradación óptica lineales y no lineales de primer, segundo y orden superior en coexistencia dentro del sistema.
- Se demuestra que la separación entre canales dentro del análisis del espectro MLR, desempeña un papel fundamental en la regulación de las interacciones entre los canales adyacentes, ejerciendo una influencia directa en el desempeño y tolerancia de los formatos de modulación utilizados en la configuración de la red. Para los casos de estudio con una separación espectral de 50 GHz y en presencia del efecto Scattering SRS, se ha observado que el formato de modulación avanzado RZ-DQPSK destaca por su mejor rendimiento y mayor tolerancia. Esto se debe, en parte, a su eficiencia espectral y a un menor consumo de ancho de banda tanto para el canal 1 como para el canal 8 en todos los casos de estudio que operan bajo esta separación espectral.
- Se confirma que el umbral de ocurrencia de SBS está estrechamente relacionado con el ancho de línea de la señal de información e influye en el instante de aparición y limitación del nivel de potencia obtenida a la entrada del receptor, respecto de la variación del nivel de penalidad de potencias; provocando que la limitación del nivel de señal para los canales, se identifique de forma más temprana para los sistemas donde el ancho de línea de la señal de información es de 100 MHz, tal como se comprueba en los resultados obtenidos de la Tabla 4.6.

- Se evidencia que las degradaciones generadas por los efectos de Scattering SRS y SBS presentan una naturaleza notoriamente sutil dentro del sistema, en comparación con otras degradaciones identificadas en ambos escenarios de simulación y en todos los casos de estudio analizados. Por lo tanto, fue necesario generar una variación en el nivel de penalidades de potencia, intencionalmente sobredimensionado y fuera de los parámetros de las redes de comunicaciones por fibra óptica convencionales; con el fin de estimular los efectos de degradaciones ópticas de orden superior, demostrar su incidencia en el desempeño de la red y determinar un umbral aproximado de nivel de penalizaciones de potencia, que al ser superado, se tiende a limitar el buen desempeño del sistema afectando la prestación del servicio. Este nivel se identifica alrededor de los 20 *dBm*.
- Se ratifica la necesidad de abordar de manera no ideal la compensación de la Dispersión Cromática acumulada, esto se debe a la presencia de una dispersión residual que se mantiene en el sistema después de la etapa de compensación, lo que promueve la mitigación y control de efectos no lineales de segundo orden, como el SPM, XPM y FWM. La razón radica en que esta dispersión adicional en los pulsos de luz puede reducir la intensidad de estas interacciones no lineales y, por lo tanto, minimizar las deformaciones en las señales de información. Este comportamiento se evidencia en el espectro óptico MLR a la salida del módulo de compensación de la Dispersión Cromática, que suaviza los espectros de las señales de información en todos los canales de la configuración de la grilla espectral.
- A nivel práctico, se considera viable la implementación de redes de tipo MLR con acceso NG-PON2 para velocidades de 40 *Gbps* tanto para separaciones entre canales de 50 como de 100 *GHz*; dada su alta interoperabilidad con estándares de acceso PON anteriores, lo que promueve el reúso de infraestructura y aumento de la escalabilidad de las redes existentes. Para los prestadores de servicios de telecomunicaciones basados en redes de acceso óptico, es imprescindible tener en cuenta la relación existente entre la capacidad de la red, el número de usuarios y el nivel de potencia aplicada en transmisión para mejoramientos o nuevos despliegues; gracias a los rangos de nivel de potencia encontrados, es posible garantizar la coexistencia del sistema con los efectos SRS y SBS intrínsecos y siempre existentes en la fibra óptica a pesar de estar definida como un medio homogéneo y casi ideal.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- La correcta organización de la metodología de investigación garantiza el desarrollo eficiente del proyecto e incluso promueve el uso eficiente de recursos literarios, computacionales, temporales, entre otros.
- La toma de múltiples muestras del mismo resultado obtenido a través de las simulaciones en la herramienta OptSim se considera esencial para controlar la variabilidad intrínseca. Este enfoque fomenta la obtención de resultados más precisos, minimizando la influencia de errores aleatorios y contribuyendo a la obtención de valores más precisos. Además, ayuda a reducir los posibles sesgos que puedan surgir como resultado de basarse en una única medición.

- Para adquirir un conocimiento más profundo y aprovechar al máximo las capacidades de la herramienta de simulación OptSim, se recomienda emplear diversos recursos, tales como guías, documentos, tutoriales y ejemplos predefinidos que detallan los componentes y características de la herramienta; la documentación aportada por *Synopsis* fue la mayormente utilizada a lo largo del desarrollo del trabajo de grado.
- Es importante tener recomendaciones expertas de otras personas, como por ejemplo la del representante de *Synopsis* para la Universidad del Cauca, *Jigesh Patel*, fue posible realizar la implementación de los módulos requeridos para las simulaciones en presencia del efecto SBS, donde se realizaron diversas variaciones a los archivos de configuración. *Jigesh Patel* confirma además que “si los escaneos no funcionan, el problema puede estar relacionado con el antivirus/firewall bloqueando alguno de los puertos UPD que el Modo Muestras de OptSim”. Ver ANEXOS C para más detalles.

### 5.3 TRABAJOS FUTUROS

Durante la elaboración de este trabajo de grado, se han descubierto nuevas áreas de investigación, que incluyen:

- Analizar el desempeño de formatos de modulación avanzados en presencia de los efectos de Scattering SRS y SBS, en una arquitectura de red MLR de tipo NG-PON2 para una capacidad total de canal de 500 Gbps.
- Análisis del desempeño de formatos de modulación avanzados en amplitud, en presencia del efecto Scattering SBS, para una red MLR de tipo NG-PON2 con compensación de dispersión cromática por módulo de fibra DCF.
- Análisis del desempeño a nivel de simulación de una amplificación óptica híbrida para una arquitectura de red de línea mixta

# REFERENCIAS

- [1] A. Cabezas R. Pinto, "*Sistemas de comunicaciones ópticas*", First edition ed., ISBN en trámite, Ed. Bogotá D.C, Colombia: Universidad Militar Nueva Granada, 2014.
- [2] G. Oscar, P. Fernando R. Laura. (2021, Noviembre) Comisión de Regulación de Comunicaciones - CRC, "Data Flash 2021-031 - Internet Fijo". [Online]. <https://www.postdata.gov.co/dataflash/data-flash-2021-031-internet-fijo>
- [3] J. Tábor, "*IP Sobre DWDM*" *Tesis de pregrado*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, febrero 2007.
- [4] A. Carballar, "Introducción a la Fotónica de Comunicaciones," *notas de clases para Comunicaciones Ópticas*, Universidad de Sevilla Grupo de Investigación Fotónica de Comunicaciones.
- [5] Inc Cisco Systems, "Introduction to DWDM Technology," *170 West Tasman Drive*, vol. OL-0884-01, no. June 4, 2001, p. Text Part Number, CA 95134-1706 USA San Jose.
- [6] R. Millán, "CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)," *Revista Bit*, vol. ISSN 0210-3923, p. 60.62, N°. 158 2006.
- [7] S. Castilla, *Planificación y diseño de redes ópticas WDM*, *Tesis de pregrado*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid, 2017.
- [8] J. Santamaría, "*Sistemas de Multiplexación CWDM: actualidad, ventajas y desventajas frente a otros sistemas de multiplexación y tendencias*", *Tesis de pregrado*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2004.
- [9] G. Gómez, *Improved spectral efficiency in 40 Gbps DWDM networks through advanced DPSK and DQPSK modulation formats*, *M.S thesis*. Popayán Cauca, Colombia: Universidad del Cauca, 2019.
- [10] Recommendation ITU-T G.694.2, Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid.
- [11] Recommendation ITU-T 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.
- [12] M. Carranza, *Integración de IP sobre canales WDM*, *Tesis de pregrado*. Cuba: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas Santa Clara, 2014.
- [13] R. Millán, "DWDM corrige las limitaciones de la fibra," *BPS, Redes & Telecom*, p. N° 201 VNU VP, España 2006.
- [14] M. Vasilyev, "Transparent ultra-long-haul DWDM network with "Broadcast-and-select" OADM/OXC architecture," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, no. doi: 10.1109/JTL.2003.819557, pp. 2661-1672, Noviembre 2003.
- [15] F. Sanchez, *Análisis de las técnicas de Multiplexación por división de longitud de onda (WDM) y su simulación mediante el software OptiSystem*, *Tesis de maestría*. Guayaquil, Ecuador: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2020.
- [16] Recommendation ITU-T G.695, Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications.
- [17] C. San Román E. San Román Zubizarreta, "Redes de acceso y transmisión de fibra óptica: alternativas de políticas y regulaciones," *RDA*, vol. N°. 12, pp. 39-48, dic 2012.

- [18] Y. Marchukov, *Desarrollo de una aplicación gráfica para el diseño de infraestructuras FTTH*, Tesis de pregrado. Gandia, España: Universidad Politécnica de Valencia - Escuela superior de Gandia, 2011.
- [19] O. Rod. (2016, Noviembre) Fiber to the X (FTTx). [Online]. <https://www.alliedtelesis.com/en/solutions/fttx>
- [20] F. Oviedo, *Red de acceso con fibra óptica mediante tecnología FTTx para optimizar espacios y servicios en la corporación nacional de telecomunicaciones E.P (Empresa Pública)*, Tesis de pregrado. Ambato, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato, 2011.
- [21] Commscope. (2018) FTTx Fibra a la X, principios básicos. [Online]. <https://onx.la/c9e5b>
- [22] D. Tinoco, *Estudio y diseño de una red de fibra óptica FTTH para brindar servicios de voz, video y datos para la urbanización los Olivos ubicada en el sector Toctesol en la parroquia Borrero de la ciudad de Azogues*, Tesis de pregrado. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana, 2011.
- [23] Recommendation ITU-T G.983.1, Sistemas de acceso óptico de banda ancha basados en redes ópticas pasivas.
- [24] C. Guzmán, *Diseño de una red de acceso en un sector residencial para proveer servicios triple play, utilizando tecnología de red GEAPON (GIGABIT Ethernet Passive Optical Network) para la empresa TELCONET S.A*, Tesis de pregrado. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, 2018.
- [25] Recommendation ITU-T G.984.1, Gigabit-capable passive optical networks (GPON): general characteristics.
- [26] Recommendation ITU-T G.9807.1, 10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON).
- [27] Recommendation UIT-T G.989.1, 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements".
- [28] Recommendation UIT-T. G 989.2, 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification.
- [29] Recommendation UIT-T. G 989.3, 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2):Transmission convergence layer specification.
- [30] Broadband forum. (2017) NG-PON2, The first PON standard optimized for service convergence. [Online]. <https://www.broadband-forum.org/wp-content/uploads/2019/05/NG-PON2-wallchart-2017.pdf>
- [31] Broadband forum. The Future of Passive Optical Networking is Here (MU-437) NG-PON2. [Online]. <https://www.broadband-forum.org/marketing/download/MU-437.pdf>
- [32] G. López, *Diseño de métodos Cross Layer Cognitivos para redes de comunicación óptica de Ráfagas (OBS)*, Tesis de doctorado. Popayán Cauca, Colombia: Universidad del Cauca, 2014.
- [33] D. Samarakkody, S. Perera S. Satkunarajah, "Comparision of single line rate for dedicated protection on WDM optical network topologies," *IEEE International Conference on Information and Automation for Sustainability (ICIAfS)*, no. doi:10.1109/ICIAFS.2016.7946546, pp. 1-6, 2016.
- [34] M. Tornatore, A. Nag, E. IP, T. Wang and B. Mukherjee P. Chowdhury, "On the Design of Energy-Efficient Mixed-Line-Rate (MLR) Optical Networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. doi: 10.1109/JLT.2011.2177441, pp. 130-139, Jan 1 2012.

- [35] S. Sahu and S. K. Das V. Kumar, "Performance Analysis for Mixed Line Rates (MLR) WDM/DWDM Networks Under Various Modulation Techniques," *International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, no. doi: 10.1109/WiSPNET.2018.8538684, pp. 1-5, 2018.
- [36] V. Bobrovs and G. Ivanovs A. Udalcovs, "Comparison between power efficiencies of mixed-line rate over Single-Line Rate in spectral efficient WDM networks with signal quality guarantee," *IEEE Latin-America Conference on Communications*, no. doi: 10.1109/LatinCom.2013.6759811, pp. 1-6, 2013.
- [37] A. Nag and A. Reaz S. Ferdousi, "Mixed-line-rate (MLR) optical network desing with Wavebanding," *IEEE 4th International Symposium in Advancend Networks and Telecommunication Systems*, pp. 46-48, 2010.
- [38] A. Nag. M. Tomatore and B. Mukherjee, "Optical Network Design With Mixed Line Rates and Multiple Modulation Formats," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, pp. 466-475, 2010.
- [39] S. Sengar and S. P. Singh R. Bajpai, "Comparison of performance of a mixed line rate optical WDM network using different modulations at 40 Gbps," *International Conference on Advances in Computing, Communication & Automation (ICACCA) (Spring)*, no. doi: 10.1109/ICACCA.2016.7578869, pp. 1-3, 2016.
- [40] E. Palkopoulou, "Cognitive Heterogeneous Reconfigurable Optical Network: A techno-economic evaluation," *Future Network & Mobile Summit* , pp. 1-10, 2013.
- [41] S. Lyer and S.P. Singh, "Physical layer impairment-aware Routing and Wavelegth Assignment (PLI-RWA) strategy for mixed line rate (MLR) wavelength division multiplexed (WDM) optical networks," *Twelfth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*, no. doi: 10.1109/WOCN.2015.8064489, pp. 1-5, 2015.
- [42] S. Zhang, *Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System, Tesis de maestría*. Kansas, Estados Unidos: University of Kansas, Departament of Electrical Engineering and Computer Science, 2004.
- [43] S. Zhang, Sherong, B. Zhu, R. Huang, C. Allen, D. Demarest S. Hui, *Advanced Optical Modulation Formats and Their Comparison in Fiber-Optic Systems*, , 20041566601st ed. Kansas, Estados Unidos: University of Kansas, 2004.
- [44] F. Chicharro, *Técnicas ópticas de transmisión avanzadas para redes OOFDM-WDM, Tesis de doctorado*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia, 2018.
- [45] R. K. Bahl, A. Banik A. Jain, "Demonstration of RZ-OOK modulation scheme for high speed optical data transmission," *Eleventh International Conference on Wireless and Optical Communications Network (WOCN)*, no. doi: 10.1109/WOCN.2014.6923082, pp. 1-5, 2014.
- [46] D. Alzate A. Cárdenas, "Retos en la transmisión de 40/100Gb/s sobre fibra óptica," *Revista en Telecomunicaciones e Informática*, vol. 1, no. ISSN 0120-131X, pp. 23-60, Julio-Octubre 2011.
- [47] P. J. Winzer, C. Dorrer, S. Chandrasekhar A. H. Gnauck, "Linear and nonlinear performance of 42.-Gb/s single-polarization RZ-DQPSK format," *Photonics Technology Letters*, no. IEEE. 18.883-885.10.1109/LPT.2006.872320, 2006.
- [48] J. Toledo, A. Toledo J. Herrera, "Comparative performance analysis of the modulation formats RZ-DQPSK and RZ-PDPSK facing Optical Compensation Techniques of the

- Chromatic Dispersion on 10 Gbps DWDM Networks," *Revista Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 12, no. ISSN 2539-4169, pp. 9-15, Primer semestre 2018.
- [49] G. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 5th ed., Academic Press, Ed.: ISBN: 9780123970237, 2012.
- [50] A. Toledo, H. Ordoñez, J. Agredo G. López, "Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM," *Revista Facultad de Ingeniería*, no. <https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/1420>, pp. 23-35, 2012.
- [51] C. Chan, *Optical Performance Monitoring - Advanced Techniques for Next-Generation Photonic Networks*. San Diego California, Estados Unidos: Academic Press is an imprint of Elsevier, 2010.
- [52] Recommendation ITU-T G.697, Supervisión óptica para sistemas de multiplexación por división en longitud de onda densa.
- [53] T. Li, A. Willner I. Kaminow, *Optical Fiber Telecommunications VB Systems and Networks*, 5th ed.: Academic Press, 2008.
- [54] M. Ramos, *Diseño y simulación de una red WDM inducida al efecto no lineal de la fibra denominado Stimulated Raman Scattering (SRS) que permite determinar el rendimiento de un sistema de comunicaciones óptico*, Tesis de pregrado. Riobamba, Ecuador: Universidad Nacional de Chimborazo, 2018.
- [55] F. Saliou, P. Chanclou, B. Le Guyader, L. Guillo G. Simon, "Stimulated Raman Scattering Impairments Induced by NGPON2 Introduction in Co-existing PONs," *Optical Fiber Communication Conference, OSA Technica Digest*, no. Paper Th2A.52, 2015.
- [56] P. Molina, M. Jiménez H. Guano, "Estudio y simulación de los efectos no lineales Scattering Estimulado de Brillouin (SBS) y Scattering Estimulado Raman (SRS) en una Fibra Óptica Monomodo," *Revista EPN*, vol. 33, no. Quito Ecuador, enero 2014.
- [57] N. Luzod, *Stimulated Brillouin Scattering: Mitigation Techniques and Applications*, Tesis de maestría. Tucson Arizona, Estados Unidos: University of Arizona, 2016.
- [58] V. Supradeepa, "Stimulated Brillouin Scattering thresholds in optical fibers for lasers linewidth broadened with noise," *Optical Society of America*, vol. Opt Express 21, pp. 4677-4687, 2013.
- [59] M. Islam, Md. Tawhidul F. Hossain, "Overview of Simulated Brillouin Scattering Effect and Various Types of Method to Eliminate this Effect," *International Journal of Computer Applications*, vol. 92, pp. 0975-8887, April 2014.
- [60] Dirk van den Borne, *Robust Optical Transmission Systems*, Tesis de doctorado. Netherlands: Universiteit Eindhoven, 2008.
- [61] Recommendation UIT-T O.201, Equipo de prueba del factor Q para evaluar la calidad de transmisión de los canales ópticos.
- [62] F. Moliner, *"Análisis del OSNR de configuraciones de enlaces de Fibra Óptica"*, Tesis de pregrado. Madrid, España: Universidad Autónoma de Madrid, 2009.
- [63] Optiwave Systems Inc. OptiSystem Overview. [Online]. <https://optiwave.com/optisystem-overview/>
- [64] Cisco Systems. (2007) WDM Network Design: OSNR and Dispersion-Based Design. [Online]. <https://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=30886&seqNum=8>
- [65] Recommendation ITU-T G.697, Supervisión óptica para sistemas de multiplexación por división en longitud de onda densa.

- [66] Rohde-Schwarz. La forma más inteligente de medir señales de transmisión BLE. [Online]. <https://onx.la/d03ae>
- [67] E. Vanegas L. Hernandez, "Evaluación del fragmentado espectral como técnica de generación de portadoras ópticas", *Tesis de pregrado*. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017.
- [68] A. Chowdhury, M. Hussain F. Islam, *Performance Analysis Of A DWDM Optical Transport Network With Crosstalk*, *Tesis de pregrado*. Dacca, Bangladesh: Universidad BRAC, 2010.
- [69] RSoft Design Group, *Optsim User Guide*, <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/optsim/single-mode-network.html>, Ed. New York: Physical Layer Division 400 Executive Boulevard, 2010.
- [70] Optiwave Photonic Software. OptiFiber 2.1. [Online]. <https://optiwave.com/optifiber-manuals/optical-fiber-introduction/>
- [71] M. Piera, *Modelado y simulación. Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios*, <https://n9.cl/reihv>, Ed. España: Universidad Politécnica de Catalunya, 2003.
- [72] Recommendation ITU-T G. 698.1, Características de los medios de transmisión y de los sistemas ópticos – Características de los sistemas ópticos.
- [73] Recommendation ITU-T G.989.1, Redes ópticas pasivas con capacidad de 40 Gigabits (NG-PON2): Requisitos generales.
- [74] Inc. The Fiber Optic Association. Sistemas de transmisión por fibra óptica y sus componentes. [Online]. <https://www.thefoa.org/ESP/Sistemas.htm>
- [75] A. Ortiz. (2012, Mayo) Estudio y Caracterización de un modulador Electroóptico Mach-Zehnder. [Online]. <https://oa.upm.es/32771/1/Mach-Zehnder.pdf>
- [76] Recommendation ITU-T G. 652, Características de las fibras y cables ópticos monomodo.
- [77] Inc. Synopsys,. Mountain View California, New York, 2010, vol. I Sample Mode, p. 107.
- [78] D.K Chy Khalluzaman. (2015, Octubre) Comparative Performance of BER in the Simulation of Digital Communication Systems using Raised Cosine Filter. [Online]. <https://onx.la/68d7c>
- [79] S. León D. Bolaños, *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*, *Tesis de pregrado*. Popayán, Colombia: Universidad del Cauca, 2017.
- [80] A. Cardenas D. Alzate, "Retos en la transmisión de 40/100Gb/s sobre fibra óptica," *Revista en telecomunicaciones e informática, Universidad Pontificia Bolivariana*, vol. 1, no. <https://onx.la/f69a5>, p. 17, 2011.

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS EN  
PRESENCIA DE LOS EFECTOS DE SCATTERING SRS Y SBS, EN UNA  
ARQUITECTURA DE RED MLR DE TIPO NG-PON2.**

**ANEXOS**



**DAVID ANDRÉS GÜENDICA QUINTERO**

**LESLY TATIANA GÓMEZ INSUASTI**

**Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT)  
Popayán, octubre 2023**

## ANEXO A. RESULTADOS ANÁLISIS SRS PARA UNA RED MLR DE TIPO NG-PON2 BASADA EN FORMATOS DE MODULACION AVANZADOS RZ-DPSK Y RZ-DQPSK A 40 Gbps - PARA UNA SEPARACIÓN ENTRE CANALES DE 50 GHz

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis para los casos de estudio expuestos en la Tabla 3.3 en presencia del efecto de degradación óptica no lineal SRS, con una separación entre canales de 50 GHz. Cabe resaltar que estos datos fueron utilizados para la elaboración de los gráficos de Factor Q vs Penalidades de potencia y BER vs Penalidades de potencia para todo el trabajo de grado, recopilados en las Tablas A.1 a A.8 siendo estas usadas para demostrar los comportamientos expuestos y determinar los rangos de operación de los sistemas.

	PENALIDAD	RZ-DPSK 1			RZ-OOK 1			NRZ-OOK 1			NRZ-OOK 2		
		FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]
CORNING E1 RAMAN OFF SEPARACION DE CANAL 50 GHz	15	11.372111	0.0001186	0.0019619	19.142885	5.86E-19	0.00230664	40	1E-40	0.0637516	39.804068	1E-40	0.066977
	16	11.38649	0.00010888	0.00198024	19.017305	8.97E-19	0.00239313	40	1E-40	0.0636707	38.284893	1E-40	0.0672076
	17	11.43804	0.00010003	0.00201658	19.120113	7.73E-19	0.00247149	40	1E-40	0.0783121	36.141928	1E-40	0.0702541
	18	11.449223	9.625E-05	0.00205148	19.000235	1.44E-18	0.00262431	38.415735	1E-40	0.0691882	33.838301	1E-40	0.0698973
	19	11.435718	9.509E-05	0.00207145	18.821302	7.33E-18	0.00277075	36.957613	1E-40	0.0795095	31.731345	1E-40	0.0744638
	20	11.297534	0.00012014	0.00217052	18.648879	2.87E-17	0.00301963	35.448606	1E-40	0.0801102	29.865048	1E-40	0.0741977
	21	11.075025	0.00017311	0.00229862	18.551963	2.59E-17	0.00330104	33.185469	1E-40	0.0776013	27.415807	1E-40	0.074458
	22	10.665137	0.00036264	0.00248034	18.127997	5.07E-16	0.00378323	32.152737	1E-40	0.0876625	25.472964	1E-40	0.0762301
	23	9.947949	0.00098352	0.00278292	17.677958	9.49E-15	0.00440205	30.525632	1E-40	0.0898105	23.40531	1E-40	0.0724075
	24	8.944142	0.00261738	0.00313749	16.902688	1.62E-12	0.00517808	29.47322	1E-40	0.0892305	21.927948	2.6139E-35	0.0721366
25	7.577934	0.00852005	0.00350984	15.91005	2.95E-10	0.00624131	29.316323	1E-40	0.0852924	20.472698	2.96E-26	0.0770081	

	PENALIDAD	RZ-DPSK 2			RZ-OOK 2			NRZ-OOK 3			NRZ-OOK 4		
		FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]
CORNING E1 RAMAN OFF SEPARACION DE CANAL 50 GHz	15	10.886418	0.00026805	0.00220725	19.660556	5.2401E-22	0.00227559	40	1E-40	0.083109	40	1E-40	0.044965
	16	10.897048	0.00027108	0.00220448	19.596841	1.0524E-21	0.00238109	38.617413	1E-40	0.0814335	40	1E-40	0.0401383
	17	10.901062	0.00026845	0.00223606	19.476177	4.1989E-21	0.00249752	37.008011	1E-40	0.088062	40	1E-40	0.0444259
	18	10.902618	0.00030878	0.00224765	19.414312	5.9854E-21	0.00264594	35.163231	1E-40	0.0913689	40	1E-40	0.0429008
	19	10.873585	0.00354008	0.00227455	19.122377	8.8478E-20	0.00287607	33.500279	1E-40	0.0919056	39.936634	1E-40	0.0495434
	20	10.775842	0.00035807	0.00234342	18.990359	2.4168E-19	0.00314437	31.630209	1E-40	0.0941137	37.425791	1E-40	0.0674872
	21	10.566137	0.00038395	0.00236785	18.613322	7.7875E-18	0.00352814	29.029313	1E-40	0.0950519	35.51847	1E-40	0.0554582
	22	10.210799	0.00066875	0.00250938	18.11577	5.8444E-16	0.00403231	27.018158	1E-40	0.0943095	33.779219	1E-40	0.0707024
	23	9.60303	0.00170814	0.00279211	17.496014	7.4765E-14	0.00479309	25.214749	1E-40	0.0950285	31.496778	1E-40	0.0739583
	24	8.675135	0.00347675	0.00303617	16.623531	7.346E-12	0.00591365	23.096701	1E-40	0.0952757	29.156511	1E-40	0.0852521
25	7.425983	0.00928547	0.00335218	15.213997	3.6735E-09	0.00729637	21.126518	1.48E-26	0.0947037	27.083314	1E-40	0.0886904	

Tabla A.1: Parámetros de monitoreo óptico, Fibra Corning Escenario 1 - SRS OFF.

	PENALIDAD	RZ-DQPSK 1 FASE			RZ-DQPSK 2 FASE			RZ-OOK 1			NRZ-OOK 1			NRZ-OOK 2		
		FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]
CORNING E2 RAMAN OFF SEPARACION DE CANAL 50 GHz	15	21.39918	3.593E-31	0.0007741	22.913298	1E-40	0.000619	20.220762	8.257E-25	0.0031851	40	1E-40	0.055797	40	1E-40	0.0564558
	16	20.83245	7.973E-27	0.0008	21.979514	8.739E-35	0.0006177	20.173521	2.227E-24	0.0031554	40	1E-40	0.0697204	40	1E-40	0.0564468
	17	20.029979	1.063E-22	0.0007842	20.904685	3.849E-28	0.00062	20.155459	1.448E-23	0.0031485	40	1E-40	0.0688029	40	1E-40	0.0703573
	18	19.120297	5.043E-19	0.0008628	19.641992	1.66E-21	0.0006866	20.075058	4.143E-24	0.0031397	40	1E-40	0.0608227	40	1E-40	0.0573578
	19	<b>17.875904</b>	<b>2.977E-15</b>	0.0009343	18.011989	1.44E-15	0.0008007	19.934467	1.968E-23	0.003144	40	1E-40	0.0788763	40	1E-40	0.0655944
	20	16.89414	2.29E-11	0.0010747	16.256891	6.102E-11	0.009108	19.592321	7.425E-21	0.0031364	40	1E-40	0.071066	40	1E-40	0.0665825
	21	14.622285	4.727E-08	0.0013045	14.396751	8.315E-08	0.0011268	19.05443	3.89E-19	0.0031315	38.145245	1E-40	0.0749414	40	1E-40	0.0679192
	22	12.582576	1.378E-05	0.0017609	12.213307	2.25E-05	0.0014736	18.326105	9.305E-17	0.0031183	35.143398	1E-40	0.0724438	37.490419	1E-40	0.0699577
	23	10.469278	0.0042349	0.0025223	10.071013	0.0007137	0.0019269	17.418216	7.234E-14	0.0032358	34.000618	1E-40	0.0749814	35.755441	1E-40	0.0706931
	24	8.89012	0.0028648	0.0036442	7.695446	0.0076609	0.0026289	16.279392	7.373E-11	0.0033384	31.798157	1E-40	0.0764601	34.139305	1E-40	0.0800579
25	7.334746	0.0034875	0.0034875	6.096959	0.0214063	0.0031709	14.724193	1.947E-08	0.0035628	29.583032	1E-40	0.071614	31.620695	1E-40	0.0706074	

	PENALIDAD	RZ-DQPSK 1 CUADRATURA			RZ-DQPSK 2 CUADRATURA			RZ-OOK 2			NRZ-OOK 3			NRZ-OOK 4		
		FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]
CORNING E2 RAMAN OFF SEPARACION DE CANAL 50 GHz	15	19.554336	2.17E-20	0.0015736	21.32469	4.018E-30	0.0014172	19.006084	2.268E-19	0.0026288	40	1E-40	0.0839878	40	1E-40	0.0710009
	16	19.047282	3.149E-18	0.0012535	20.760139	1.094E-26	0.0014204	19.01049	2.11E-19	0.0026308	40	1E-40	0.0838819	40	1E-40	0.0775601
	17	18.413974	5.101E-16	0.0015438	19.94739	7.368E-23	0.0014348	19.115919	8.574E-20	0.0026007	40	1E-40	0.0795518	40	1E-40	0.0757721
	18	<b>17.753282</b>	<b>6.164E-15</b>	0.001525	18.923608	5.353E-19	0.0014338	19.072236	3.205E-19	0.0025421	38.91231	1E-40	0.0858883	40	1E-40	0.0743333
	19	16.965421	1.104E-12	0.0015201	17.600282	3.512E-14	0.0014887	18.936303	3.772E-19	0.0025553	37.643684	1E-40	0.0882216	40	1E-40	0.0743876
	20	15.937407	2.302E-10	0.001522	15.971721	3.976E-10	0.0015923	18.641989	4.804E-18	0.0025267	35.558033	1E-40	0.0904373	40	1E-40	0.0770172
	21	14.631103	6.398E-08	0.0015296	14.185601	1.978E-07	0.0017636	18.403596	3.68E-17	0.0025046	34.061362	1E-40	0.0838478	40	1E-40	0.0734989
	22	12.954702	4.422E-06	0.0016185	12.012613	3.358E-05	0.0021412	17.836728	8.411E-15	0.0025649	31.814886	1E-40	0.0848893	38.602793	1E-40	0.0707169
	23	10.921559	0.000251	0.0020836	9.968508	0.0008231	0.0029167	17.026278	1.292E-12	0.0027152	30.113202	1E-40	0.0842391	37.117268	1E-40	0.0786449
	24	9.900849	0.0023623	0.0028113	8.411721	0.0042323	0.003415	15.982964	1.767E-10	0.0030114	27.97686	1E-40	0.0951191	35.880969	1E-40	0.083521
25	7.639615	0.0083951	0.0039338	7.24282	0.0106194	0.0035548	14.835124	1.714E-08	0.003483	26.648846	1E-40	0.0949302	34.484936	1E-40	0.0831896	

Tabla A.2: Parámetros de monitoreo óptico, Fibra Corning Escenario 2 - SRS OFF.

CORNING E1 RAMAN ON SEPARACION DE CANAL 50 GHz	PENALIDAD	RZ-DPSK_1		RZ-OOK_1		NRZ-OOK_1		NRZ-OOK_2				
		FACTOR Q [dB]	JITTER [ns]									
		BER	[ns]	BER	[ns]	BER	[ns]	BER	[ns]			
15	11.39478	0.00010447	0.0019561	19.012464	1.1534E-18	0.00231193	40	1E-40	0.0642391	40	1E-40	0.0642391
16	11.43301	9.8131E-05	0.00196283	18.869736	1.6666E-18	0.00241094	40	1E-40	0.0671815	40	1E-40	0.0671815
17	11.494554	0.00008845	0.00197326	18.8819942	4.8965E-18	0.00244079	38.466091	1E-40	0.0682582	38.466091	1E-40	0.0682582
18	11.511583	8.3602E-05	0.00201625	18.728241	2.1328E-17	0.00259752	36.428809	1E-40	0.0826975	36.428809	1E-40	0.0826975
19	11.51844	8.6563E-05	0.00202901	18.443946	1.701E-16	0.00277352	35.576367	1E-40	0.0738481	35.576367	1E-40	0.0738481
20	11.399712	0.00011612	0.00211872	18.080274	1.7586E-15	0.00303918	32.881696	1E-40	0.0853271	32.881696	1E-40	0.0853271
21	11.133011	0.00020411	0.00222618	17.796574	1.5608E-14	0.00355531	31.101131	1E-40	0.0850266	31.101131	1E-40	0.0850266
22	10.704659	0.0003103	0.00239728	17.101126	1.3783E-12	0.00388466	29.456455	1E-40	0.0917453	29.456455	1E-40	0.0917453
23	9.84432	0.0009742	0.00275425	16.482693	3.5362E-11	0.00465893	27.039905	1E-40	0.0837183	27.039905	1E-40	0.0837183
24	8.49926	0.00389223	0.00318256	15.484164	2.8741E-09	0.00574929	25.277657	1E-40	0.0923426	25.277657	1E-40	0.0923426
25	6.59807	0.0166597	0.00367351	14.083853	3.3641E-07	0.00724417	24.190513	1E-40	0.087429	24.190513	1E-40	0.087429

CORNING E1 RAMAN ON SEPARACION DE CANAL 50 GHz	PENALIDAD	RZ-DPSK_2		RZ-OOK_2		NRZ-OOK_3		NRZ-OOK_4				
		FACTOR Q [dB]	JITTER [ns]									
		BER	[ns]	BER	[ns]	BER	[ns]	BER	[ns]			
15	10.89709	0.00027187	0.00218777	19.731805	4.3871E-22	0.00225665	40	1E-40	0.0843256	40	1E-40	0.0649945
16	10.892175	0.00027598	0.00221053	19.743694	3.5589E-22	0.00228917	37.989932	1E-40	0.0966153	40	1E-40	0.0600111
17	10.887345	0.00027407	0.00222752	19.607258	2.3244E-21	0.00241347	36.257207	1E-40	0.0817075	40	1E-40	0.0505789
18	10.879328	0.00031197	0.00223558	19.523336	6.5293E-21	0.00254407	34.139599	1E-40	0.0919078	38.573	1E-40	0.0703889
19	10.849722	0.00032073	0.00227746	19.20532	2.572E-19	0.00274405	32.296061	1E-40	0.0809465	36.388798	1E-40	0.0702172
20	10.742622	0.00030056	0.00230232	18.988112	2.6134E-18	0.00295137	30.081777	1E-40	0.0945501	34.021323	1E-40	0.0620483
21	10.551184	0.00444413	0.00237154	18.573456	4.5408E-17	0.0031815	28.000603	1E-40	0.103214	31.926672	1E-40	0.0646779
22	10.2622747	0.0006771	0.00245581	18.02626	6.8918E-16	0.00357912	25.797657	1E-40	0.103097	29.949161	1E-40	0.070707
23	9.7851	0.00110911	0.00261455	17.194865	2.9258E-13	0.0040245	23.445563	1E-40	0.104386	27.471594	1E-40	0.0845308
24	9.020496	0.00257952	0.00291996	16.175081	9.1324E-11	0.00468833	21.604562	6.2937E-32	0.1002553	25.373851	1E-40	0.0897791
25	8.102609	0.0056722	0.00312047	15.069552	7.1489E-09	0.00548178	19.445212	2.6364E-20	0.100414	23.283531	1E-40	0.0887483

Tabla A.3: Parámetros de monitoreo óptico, Fibra Corning Escenario 1 - SRS ON.

CORNING E2 RAMAN ON SEPARACION DE CANAL 50 GHz	PENALIDAD	RZ-DQPSK_1 FASE		RZ-DQPSK_2 FASE		RZ-OOK_1		NRZ-OOK_1		NRZ-OOK_2					
		FACTOR Q [dB]	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	JITTER [ns]				
		BER	[ns]	BER	[ns]	BER	[ns]	BER	[ns]	BER	[ns]				
15	23.772065	1E-40	0.00092068	24.215462	1E-40	0.00066525	21.605195	4.1694E-32	0.0023564	40	1E-40	0.0496514	40	1E-40	0.0613895
16	23.01627	1E-40	0.0009062	23.281961	1E-40	0.00065572	21.603495	4.2385E-32	0.0023738	40	1E-40	0.0729601	40	1E-40	0.059915
17	22.16152	7.0082E-36	0.00088667	22.085928	2.7379E-37	0.0066791	21.706525	2.9912E-33	0.00235134	40	1E-40	0.0610366	40	1E-40	0.0619339
18	20.916009	1.0097E-27	0.00089432	20.695099	1.898E-26	0.0068203	21.502558	5.7463E-31	0.0023005	40	1E-40	0.059482	40	1E-40	0.0563389
19	19.486159	2.7076E-20	0.00091144	19.198578	7.3301E-19	0.0074574	21.447422	1.5832E-28	0.00234457	39.784736	1E-40	0.0687486	39.93636	1E-40	0.0623701
20	17.655321	2.7551E-14	0.00101828	17.433812	9.8578E-14	0.0080435	21.139733	2.5563E-30	0.0023355	37.756905	1E-40	0.067922	38.494984	1E-40	0.0600529
21	15.717854	5.4165E-10	0.00119061	15.734931	7.1656E-10	0.0080851	20.600745	5.2528E-27	0.00232303	36.063431	1E-40	0.0758519	35.622745	1E-40	0.0600142
22	13.479938	1.6719E-06	0.00151799	13.841512	8.5026E-07	0.0103189	19.83306	9.9884E-23	0.00235731	33.673435	1E-40	0.0658669	33.938046	1E-40	0.0630969
23	10.896332	0.00023538	0.00226094	11.930218	4.0711E-05	0.0013195	18.614024	4.5863E-17	0.00242127	31.897018	1E-40	0.0779074	31.893767	1E-40	0.0633999
24	8.236472	0.00492757	0.00334414	10.060291	0.00073307	0.00285563	17.26727	1.7752E-13	0.00249011	29.970741	1E-40	0.0700214	29.540046	1E-40	0.065964
25	6.206957	0.0198875	0.00397051	8.301524	0.00496756	0.00409941	14.959916	8.981E-09	0.00269097	28.155813	1E-40	0.0754209	26.961184	1E-40	0.0769298

CORNING E2 RAMAN ON SEPARACION DE CANAL 50 GHz	PENALIDAD	RZ-DQPSK_1 CUADRATURA		RZ-DQPSK_2 CUADRATURA		RZ-OOK_2		NRZ-OOK_3		NRZ-OOK_4					
		FACTOR Q [dB]	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	JITTER [ns]	FACTOR Q [dB]	JITTER [ns]				
		BER	[ns]	BER	[ns]	BER	[ns]	BER	[ns]	BER	[ns]				
15	21.081833	5.0289E-30	0.00166936	21.636903	1.9506E-32	0.00146157	19.657082	9.1478E-22	0.00240599	40	1E-40	0.0678212	40	1E-40	0.0860071
16	20.842627	9.9145E-28	0.00168323	21.004368	2.6273E-29	0.0014277	19.678269	1.9367E-22	0.00234464	40	1E-40	0.0801477	40	1E-40	0.0698028
17	20.507314	9.1605E-26	0.00167874	20.274641	7.7221E-25	0.00141989	19.682501	1.235E-21	0.00236776	40	1E-40	0.0726355	40	1E-40	0.0778042
18	19.883022	2.6366E-22	0.00168642	19.214873	3.5171E-20	0.00137701	19.663806	1.5135E-21	0.00231921	38.947662	1E-40	0.0837023	40	1E-40	0.087921
19	19.054621	9.8516E-19	0.00174471	18.051099	2.661E-15	0.00135788	19.703272	1.7819E-21	0.00232969	37.435371	1E-40	0.0685658	39.183327	1E-40	0.0745223
20	17.782612	4.7291E-15	0.00176236	16.647347	2.6064E-11	0.0013402	19.550341	9.9734E-21	0.00233961	36.54061	1E-40	0.0888578	36.896426	1E-40	0.0940924
21	16.194868	7.4458E-11	0.00189388	15.093799	1.7361E-08	0.00140349	19.332236	1.3559E-20	0.00234731	33.77649	1E-40	0.0817909	35.415762	1E-40	0.0998289
22	14.181461	2.3313E-07	0.0020876	13.330601	2.6814E-06	0.00143051	18.885454	1.1882E-18	0.00235203	31.319014	1E-40	0.0839908	33.837866	1E-40	0.10972
23	11.708863	7.248E-05	0.00249485	11.494729	9.0187E-05	0.00161274	18.214436	9.5043E-16	0.00244433	29.315261	1E-40	0.0806743	31.482699	1E-40	0.0754515
24	8.933168	0.00268659	0.00301844	9.656899	0.00129351	0.00170418	17.361862	6.6499E-14	0.0026828	27.391222	1E-40	0.0723418	28.931388	1E-40	0.0791312
25	6.221441	0.0206227	0.0061425	7.995493	0.00612763	0.00194791	16.396408	2.4974E-11	0.00295204	24.897676	1E-40	0.0847043	27.133668	1E-40	0.108793

Tabla A.4: Parámetros de monitoreo óptico, Fibra Corning Escenario 2- SRS ON.

FURUKAWA E1 RAMAN OFF SEPARACION DE CANAL 50 GHz	PENALIDAD	RZ-DPSK_1		RZ-OOK_1		NRZ-OOK_1		NRZ-OOK_2				
		FACTOR Q [dB]	JITTER [ns]									
		BER	[ns]	BER	[ns]	BER	[ns]	BER	[ns]			
15	11.41775	9.8743E-05	0.00212797	19.0611661	8.9539E-19	0.00225605	40	1E-40	0.0620547	40	1E-40	0.0693001
16	11.098896	0.00016844	0.00220504	18.879177	2.3809E-18	0.00238994	40	1E-40	0.0671661	39.543581	1E-40	0.0513367
17	11.17842	0.00014975	0.00220574	18.926645	3.9518E-19	0.00245557	40	1E-40	0.0755417	37.655265	1E-40	0.0639995
18	11.105237	0.00016806	0.00224373	18.743918	1.7768E-17	0.00262415	40	1E-40	0.060401	34.785519	1E-40	0.081957
19	11.224486	0.00013646	0.00225571	18.627825	4.0767E-17	0.00274722	37.160825	1E-40	0.0661287	32.485568	1E-40	0.0729938
20	11.019244	0.00188271	0.00233223	18.428152	1.1383E-16	0.00295441	36.078177	1E-40	0.081719	30.648023	1E-40	0.0731802
21	10.90576	0.00025328	0.00246137	18.342581	2.7483E-16	0.0032495	33.880804	1E-40	0.0760805	28.479503	1E-40	0.0927564
22	10.625044	0.00036301	0.00263875	17.953445	3.154E-15	0.00367371	32.819956	1E-40	0.0877139	26.972834	1E-40	0.0764045
23	10.037853	0.00074539	0.00289528	17.563855	2.8238E-14	0.00418484	30.933516	1E-40	0.0808735	25.499704	1E-40	0.0714656
24	8.804446	0.00302609	0.00334443	16.891125	1.6617E-11	0.0049864	29.532809	1E-40	0.0860649	23.486781	1E-40	0.0710239
25	7.715132	0.00783327	0.00378663	16.422331	1.6635E-12	0.00582519	29.551401	1E-40	0.0846243	21.808646	1E-40	0.0708128

FURUKAWA E1 RAMAN OFF SEPARACION DE CANAL 50 GHz	PENALIDAD	RZ-DPSK_2		RZ-OOK_2		NRZ-OOK_3		NRZ-OOK_4	
		FACTOR Q [dB]	JITTER [ns]						
		BER	[ns]	BER	[ns]	BER	[ns]	BER	[ns]

PENALIDAD	RZ-DPSK_1 FASE				RZ-DPSK_2 FASE				RZ-OOK_1				NRZ-OOK_1				NRZ-OOK_2			
	FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]	
15	23.86377	1E-40	0.00097024	23.88942	1E-40	0.00072414	21.96617	3.0006E-31	0.00023369	40	1E-40	0.05952556	40	1E-40	0.0648231					
16	22.83891	1E-40	0.00099728	22.703269	1.4663E-40	0.00748863	21.195656	4.8142E-30	0.0002377	40	1E-40	0.0691592	40	1E-40	0.0542417					
17	22.074854	1.0189E-36	0.00098703	21.552797	1.8993E-32	0.00767922	21.332837	1.9419E-31	0.00234381	40	1E-40	0.0626107	40	1E-40	0.0729112					
18	21.117538	3.409E-30	0.00096767	20.313038	1.9168E-25	0.007969	21.398713	7.026E-32	0.00228708	40	1E-40	0.0676297	40	1E-40	0.0670278					
19	19.787011	9.0155E-23	0.00097438	19.772742	1.4346E-17	0.0008685	21.414965	6.6892E-32	0.00229531	40	1E-40	0.0722514	40	1E-40	0.0650171					
20	17.955366	2.568E-15	0.00107813	17.130314	1.4242E-12	0.00092741	21.162403	5.1548E-30	0.00224489	39.210819	1E-40	0.0621233	40	1E-40	0.0631314					
21	15.982783	2.1876E-10	0.00122046	15.3303898	5.1174E-09	0.00103414	20.857143	4.022E-28	0.00230677	37.88827	1E-40	0.068886	38.239047	1E-40	0.0644676					
22	14.062842	2.4012E-07	0.0014565	13.064194	4.4021E-06	0.00133277	20.430238	2.0036E-25	0.00229011	36.320702	1E-40	0.0652907	36.321079	1E-40	0.0647653					
23	11.877581	4.5516E-05	0.00194603	11.069099	0.0001774	0.00169092	19.632811	5.6919E-21	0.00231766	35.15941	1E-40	0.0773073	35.41913	1E-40	0.0591946					
24	9.522689	0.0012803	0.00256892	8.665765	0.00339434	0.00349588	18.238029	6.2095E-16	0.00243118	34.543066	1E-40	0.0792821	35.046704	1E-40	0.0626225					
25	7.651989	0.00790238	0.00351798	7.114103	0.0117192	0.00349266	16.0126	2.9581E-10	0.00253336	32.77856	1E-40	0.0794228	33.392934	1E-40	0.0686107					

Tabla A.6: Parámetros de monitoreo óptico, Fibra Furukawa Escenario 2 - SRS OFF.

PENALIDAD	RZ-DPSK_1 CUADRATURA				RZ-DPSK_2 CUADRATURA				RZ-OOK_2				NRZ-OOK_3				NRZ-OOK_4			
	FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]	
15	20.615517	5.0594E-27	0.00184235	21.071001	6.9336E-29	0.00157011	19.509912	1.8032E-21	0.0023778	40	1E-40	0.0666276	40	1E-40	0.0847046					
16	20.21571	8.7066E-24	0.00185538	20.223949	4.4124E-24	0.00158028	19.535344	1.0988E-21	0.00238459	40	1E-40	0.0721912	40	1E-40	0.0793353					
17	19.939215	2.129E-23	0.00183508	19.670582	4.1068E-22	0.0015077	19.561101	9.8556E-22	0.00239208	40	1E-40	0.0831618	40	1E-40	0.0754875					
18	19.486501	2.4769E-20	0.00185281	18.597476	6.8391E-18	0.00152353	19.532722	2.4808E-21	0.00231926	39.584633	1E-40	0.0858391	40	1E-40	0.0816768					
19	18.846203	4.7743E-18	0.00183779	17.52437	1.1049E-13	0.0014624	19.466604	2.5702E-21	0.00239208	38.725823	1E-40	0.0786944	40	1E-40	0.0873491					
20	17.616706	1.5361E-14	0.00192984	16.249578	1.0158E-10	0.00146656	19.398189	6.2884E-21	0.00235589	37.18936	1E-40	0.0799102	40	1E-40	0.0823121					
21	16.252677	4.1376E-11	0.00195739	14.765135	2.8263E-08	0.00147007	19.182719	6.1525E-20	0.00241242	35.391843	1E-40	0.0781505	40	1E-40	0.08999					
22	14.601261	4.0218E-08	0.00209106	12.702148	7.8803E-06	0.00154585	18.814406	1.3463E-18	0.00252302	33.340466	1E-40	0.0927489	39.596816	1E-40	0.0842142					
23	12.672206	8.577E-06	0.00239472	10.800463	0.00026168	0.00183353	18.140594	6.8393E-16	0.00278046	31.871257	1E-40	0.0867703	39.301358	1E-40	0.0872213					
24	10.4968	0.00044208	0.00277542	8.475459	0.0041348	0.00215509	17.423577	4.4892E-14	0.00307476	29.359829	1E-40	0.0823274	37.167047	1E-40	0.0755572					
25	8.126299	0.00537494	0.00341838	7.381754	0.00963039	0.00313824	16.302328	6.5647E-11	0.00351172	28.649487	1E-40	0.0928801	34.554351	1E-40	0.0820764					

Tabla A.7: Parámetros de monitoreo óptico, Fibra Furukawa Escenario 1 - SRS ON.

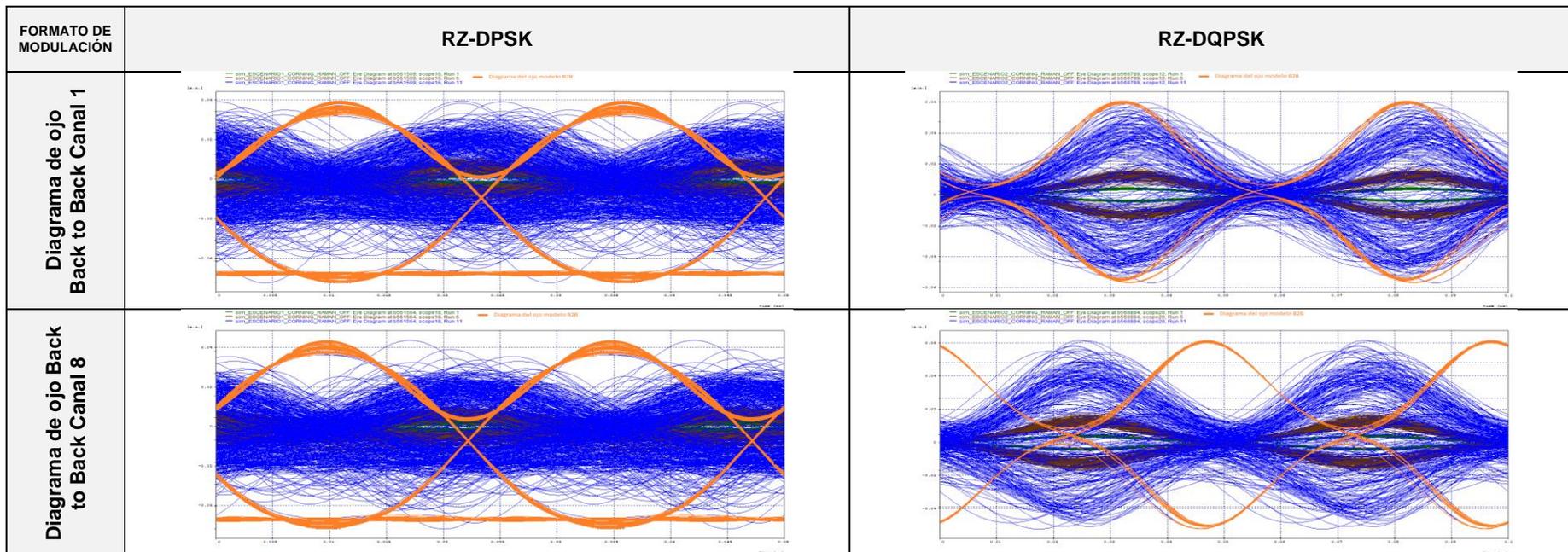
PENALIDAD	RZ-DPSK_1 FASE				RZ-DPSK_2 FASE				RZ-OOK_1				NRZ-OOK_1				NRZ-OOK_2			
	FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [dB]	BER	JITTER [ns]	
15	23.930807	1E-40	0.0009753	24.087456	1E-40	0.0007258	21.196669	2.64E-29	0.0023257	40	1E-40	0.0533228	40	1E-40	0.0563514					
16	23.034007	1E-40	0.0009934	23.19474	1E-40	0.0007486	21.260531	3.26E-30	0.0023717	40	1E-40	0.0463866	40	1E-40	0.0691078					
17	22.24838	1.24E-37	0.000975	22.043273	2.37E-35	0.0007767	21.25318	9.10E-31	0.0023638	40	1E-40	0.0447198	40	1E-40	0.0865147					
18	21.351162	3.146E-31	0.0009738	20.913472	6.93E-28	0.0008098	21.334462	2.33E-31	0.002315	40	1E-40	0.0572821	40	1E-40	0.0672927					
19	20.114628	3.845E-24	0.0009704	19.390358	1.983E-20	0.0008371	21.20051	3.12E-30	0.0023211	39.629579	1E-40	0.0641929	39.787182	1E-40	0.062804					
20	18.110049	4.895E-16	0.0010608	17.866178	1.522E-14	0.000778	21.003105	1.43E-29	0.0023642	36.522221	1E-40	0.0664765	37.234672	1E-40	0.0689485					
21	16.171562	6.237E-11	0.0012105	16.207333	9.101E-11	0.0009436	20.614494	8.48E-27	0.0023784	34.101778	1E-40	0.0765853	35.309018	1E-40	0.069404					
22	13.987488	3.399E-07	0.0014899	14.376187	1.199E-07	0.0011469	20.144392	3.22E-24	0.0024303	32.850305	1E-40	0.0788741	32.614214	1E-40	0.0809673					
23	11.558015	8.502E-05	0.0020433	12.453828	1.529E-05	0.0013915	19.313428	2.16E-20	0.002516	31.3201	1E-40	0.0831731	30.751696	1E-40	0.0708778					
24	8.673113	0.0034027	0.0035121	10.405632	0.0004821	0.0018851	17.92231	1.53E-15	0.0027746	28.336448	1E-40	0.0841237	28.806863	1E-40	0.0868543					
25	7.03777	0.0122204	0.003539	7.953086	0.0062082	0.0044952	16.666027	4.91E-12	0.0030591	27.206186	1E-40	0.0731824	29.935691	1E-40	0.0693945					

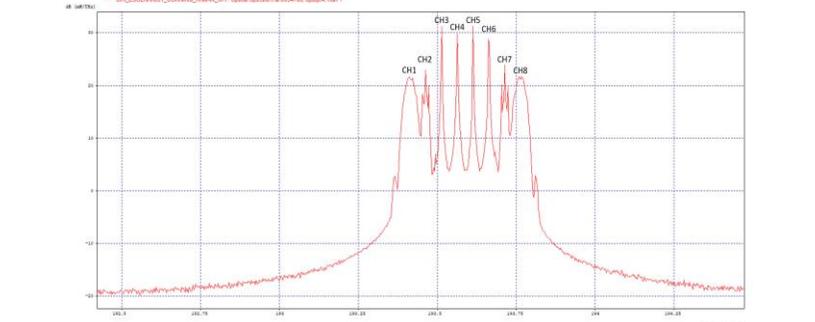
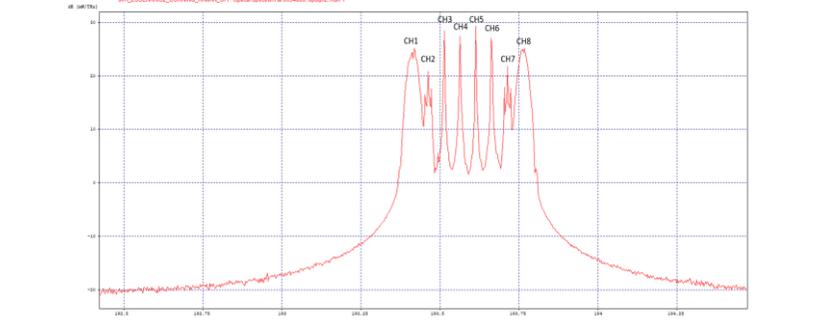
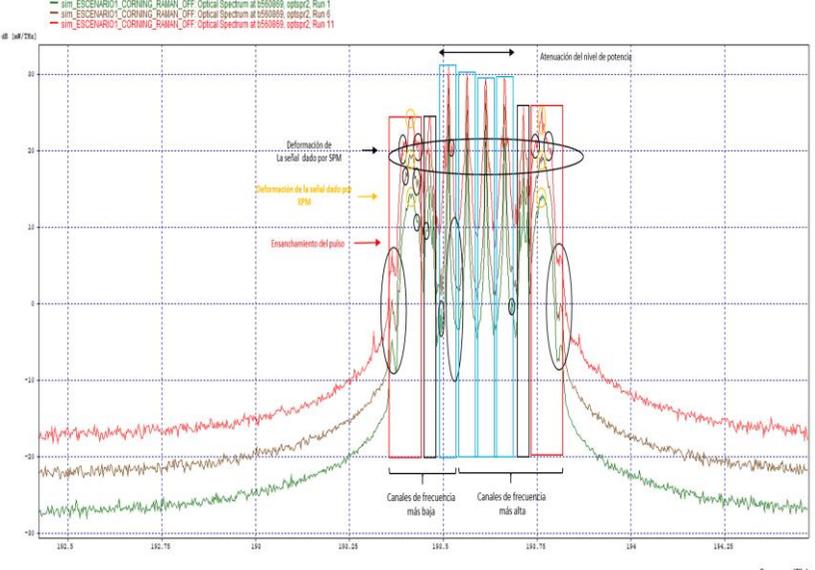
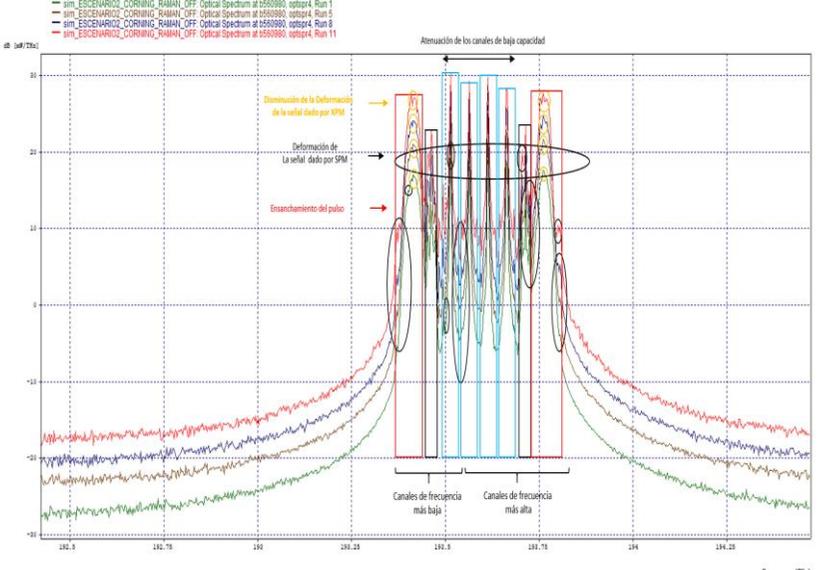
Tabla A.8: Parámetros de monitoreo óptico, Fibra Furukawa Escenario 2 - SRS ON.

Para los casos de estudio que utilizan al formato de modulación RZ-DPSK para modular los canales de 40 Gbps, se evidencia que para ninguno de estos, el sistema es capaz de cumplir los requerimientos de Factor Q y BER planteados; esto se atribuye al ancho de banda ocupado por la señal de 40 Gbps modulada en cada canal, dado que al haber configurado al sistema para operar con una separación entre canales de 50 GHz, los canales 1 y 8 tendrán mayor superposición de sus señales sobre los canales contiguos, generando así una mayor interferencia de canal adyacente; sumado al ensanchamiento todos los canales en general, dado por el efecto de la dispersión cromática, provocando que no pueda asegurarse la prestación del servicio para ningún canal de 40 Gbps cuando la señal es modulada con RZ-DPSK.

Para los casos de estudio que utilizan el formato de modulación RZ-DQPSK para modular los canales de 40 Gbps, es notoria su alta tolerancia a los efectos de degradación óptica, traducidos en ensanchamiento de los pulsos, deformación de las señales de información y atenuación del nivel de la señal. Esto se atribuye a que los canales 1 y 8 modulados con RZ-DQPSK, ocupan un menor ancho de banda debido al comportamiento mismo del formato de modulación, generando menor interferencia de canal adyacente sobre los canales contiguos; para separaciones entre canales de 50 GHz.

- **Caso de estudio 1: Escenario 1 y 2 – SRS OFF, Fabricante Corning, Separación entre canales de 50 GHz.**



<p><b>Espectro MLR a la salida del amplificador</b></p>		
<p><b>Espectro MLR a la salida del módulo de fibra óptica</b></p>		
<p><b>Rango potencia tolerado [dBm]</b></p>	<p><b>N.A</b></p>	<p><b>15 – 19</b></p>

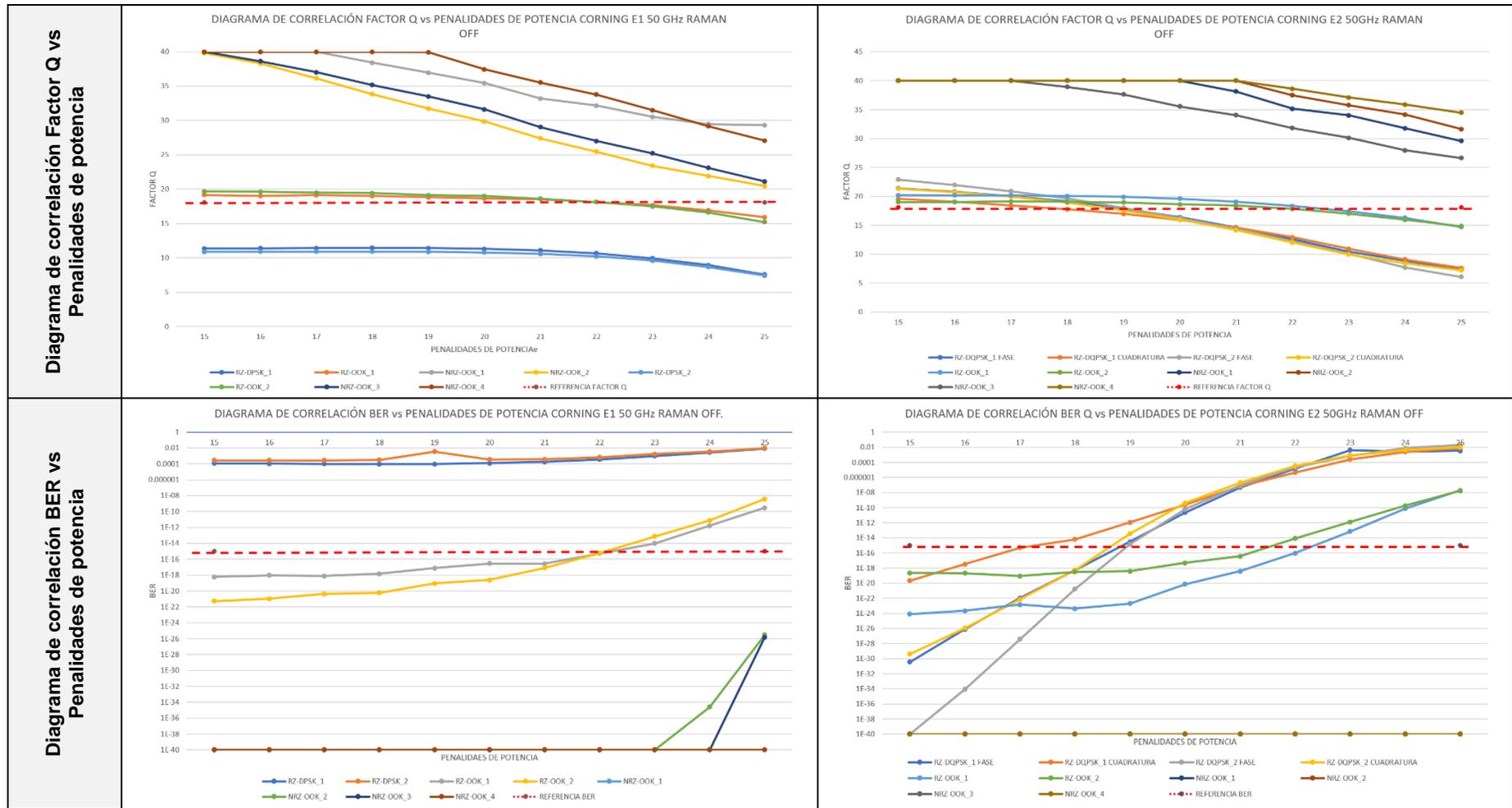
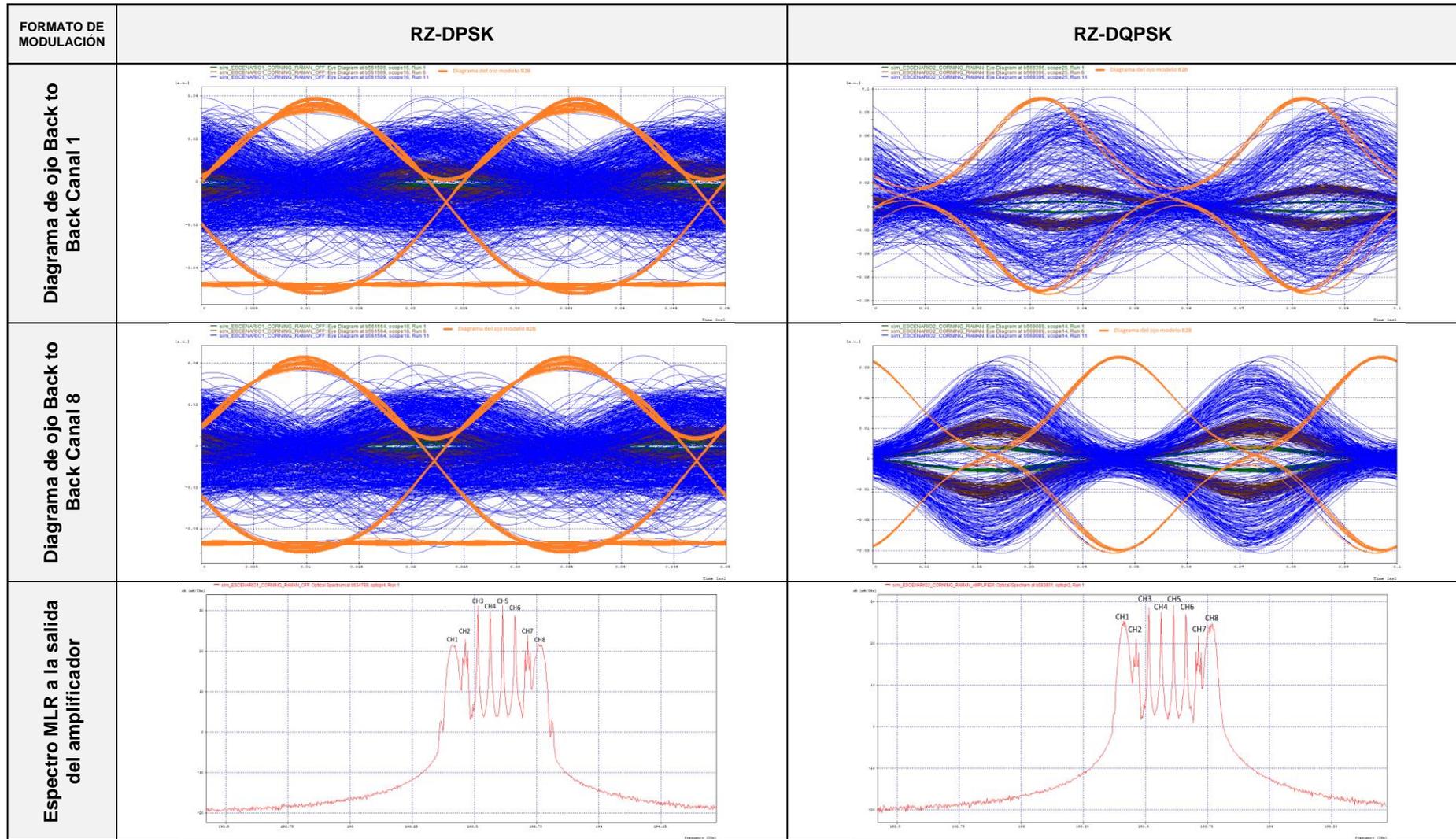
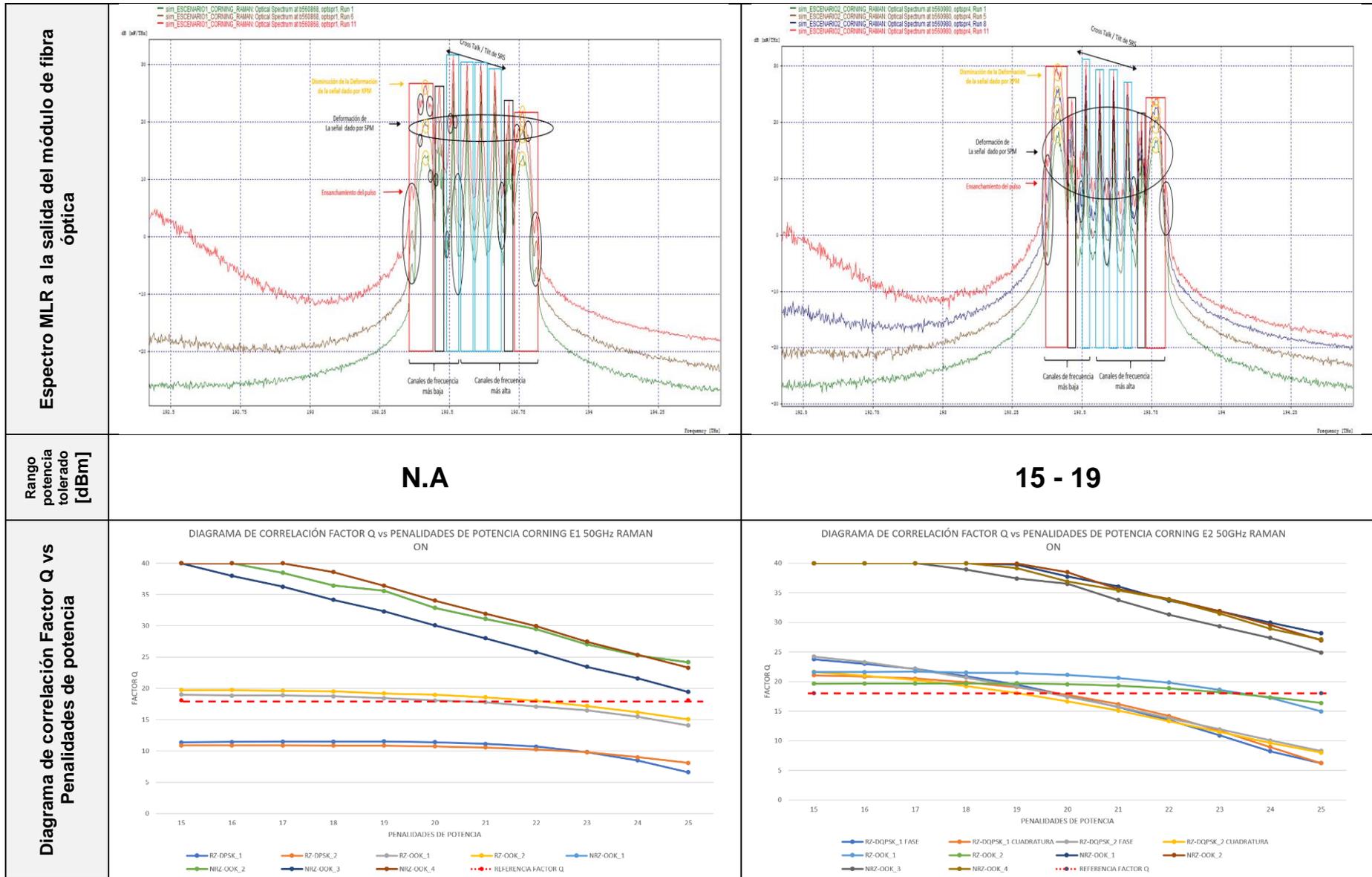
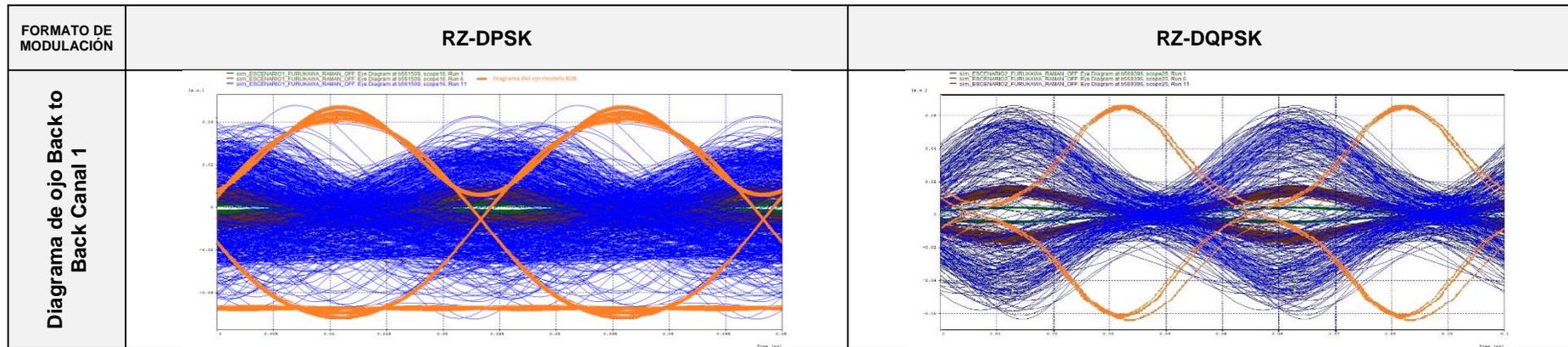
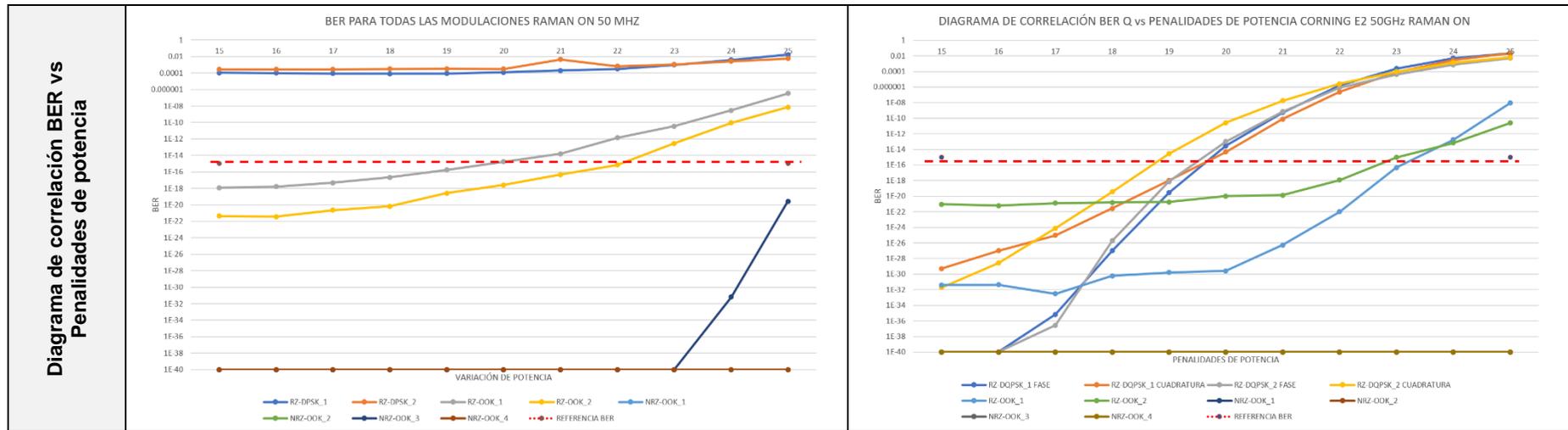


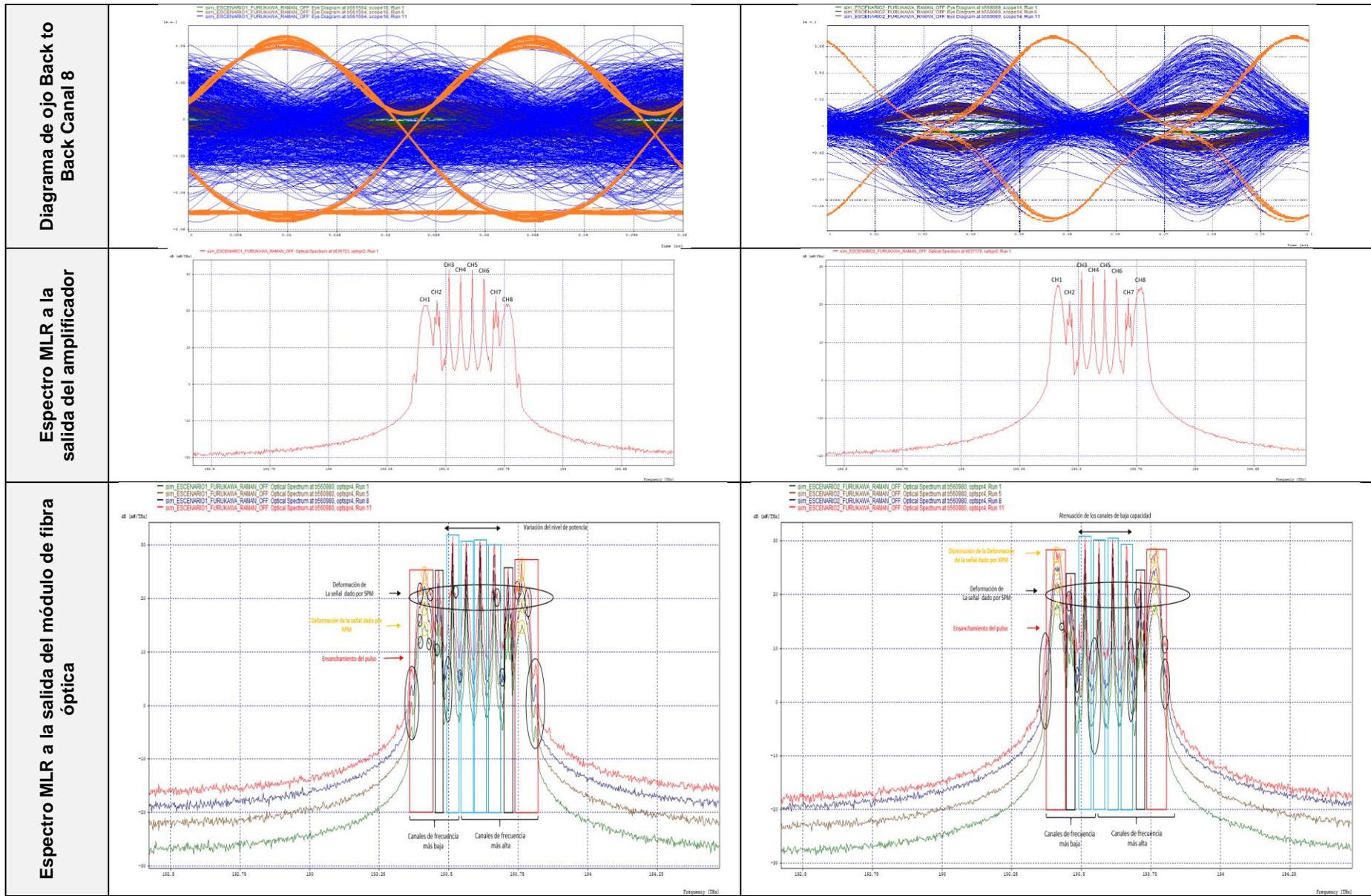
Tabla A.9: Caso de estudio 1: Escenario 1 y 2 – SRS OFF, Fabricante Corning, Separación entre canales de 50 GHz.

- Caso de estudio 2: Escenario 1 y 2 – SRS ON, Fabricante Corning, Separación entre canales de 50 GHz.









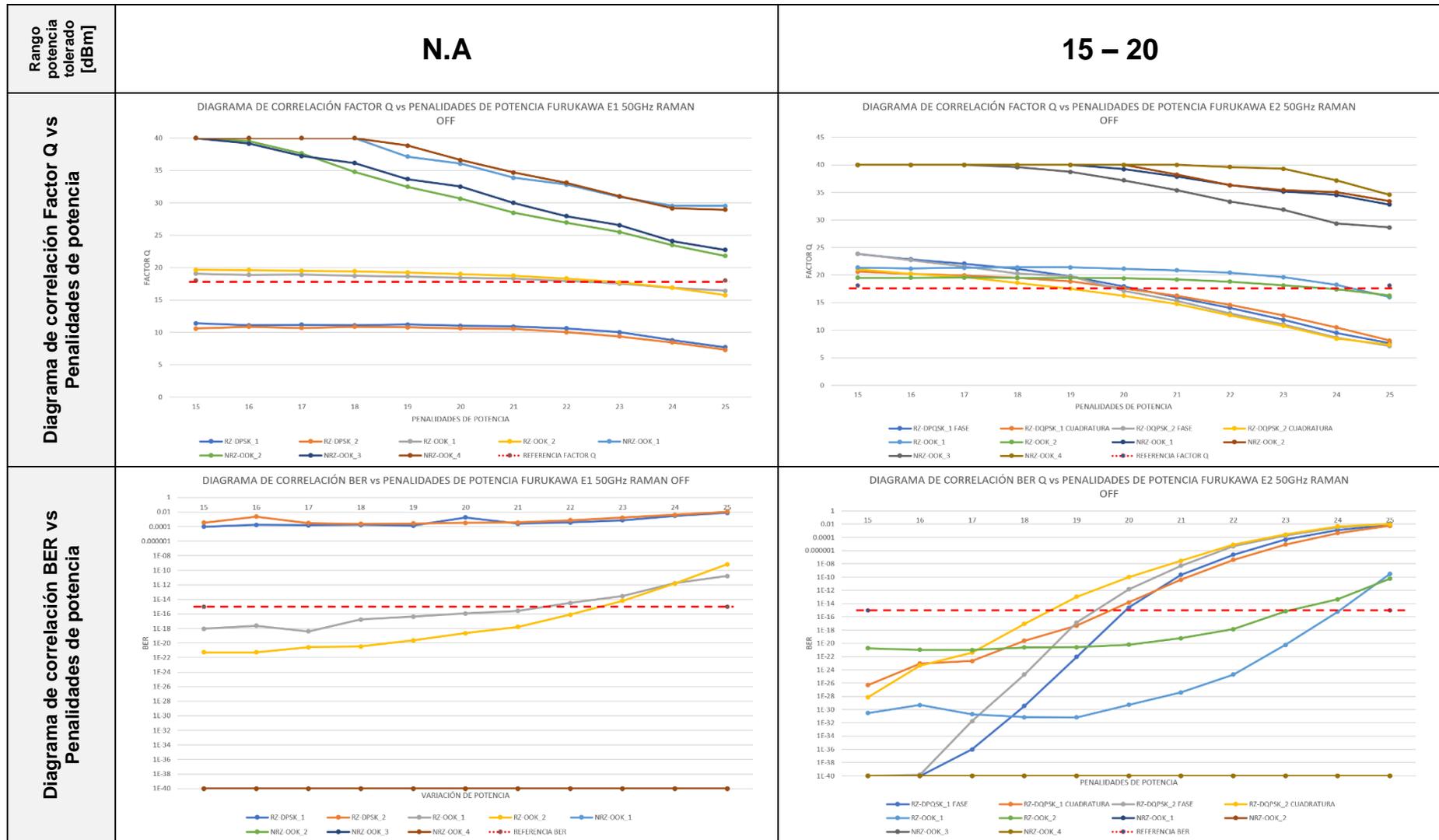
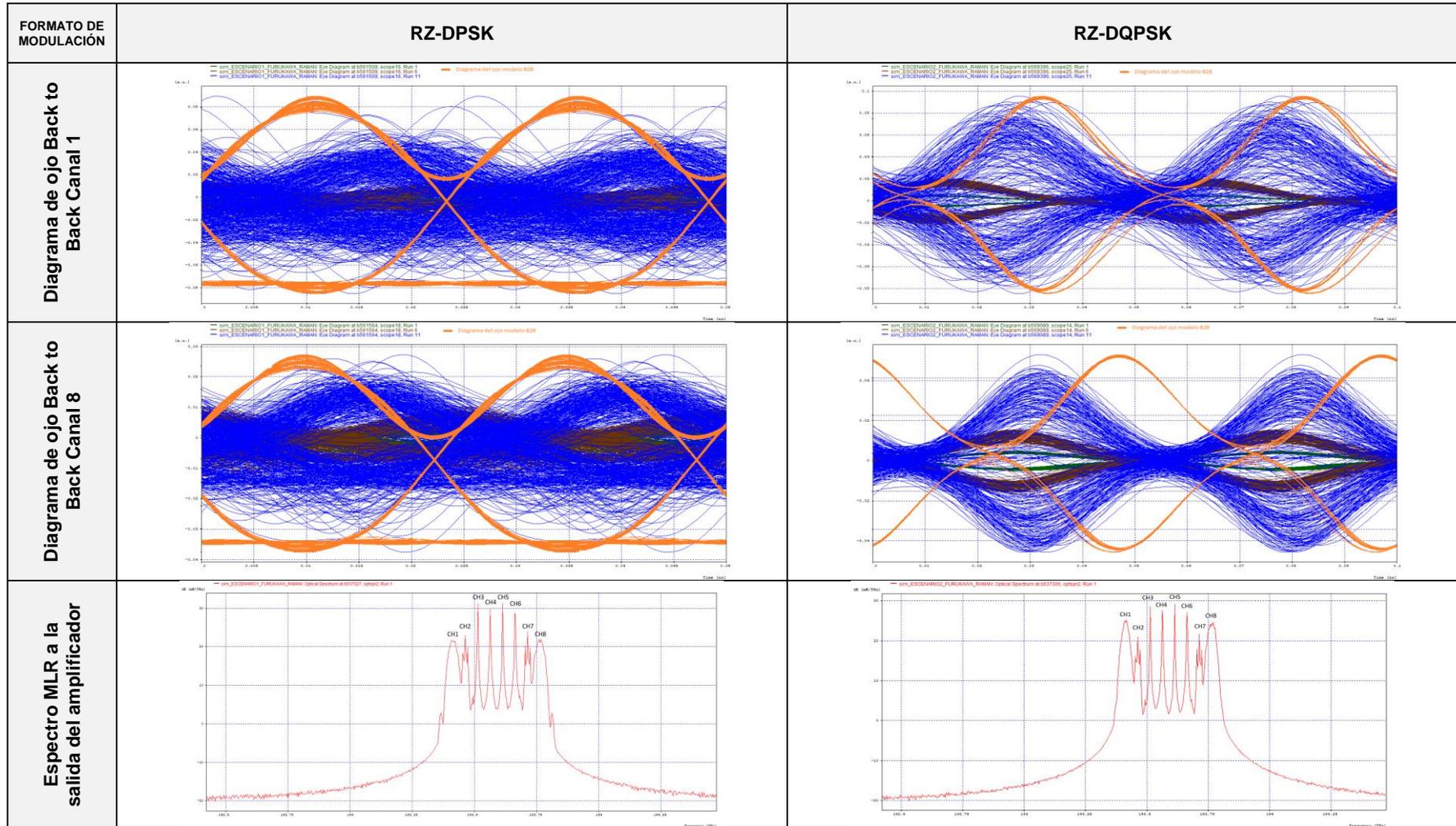
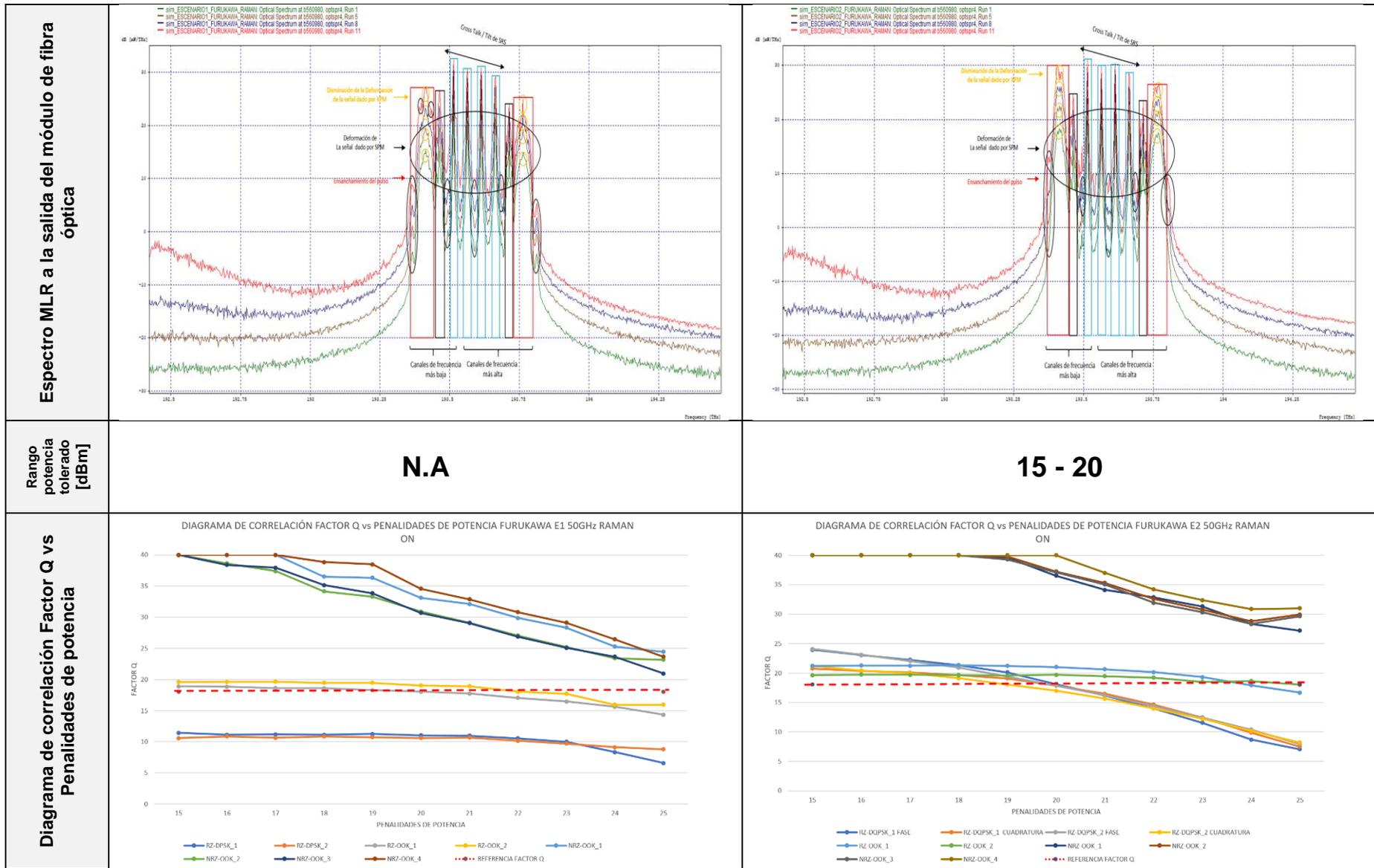


Tabla A.11: Caso de estudio 3: Escenario 1 y 2 – SRS OFF, Fabricante Furukawa, Separación entre canales de 50 GHz.

- Caso de estudio 4: Escenario 1 y 2 – SRS ON, Fabricante Furukawa, Separación entre canales de 50 GHz.





**Diagrama de correlación BER vs Penalidades de potencia**

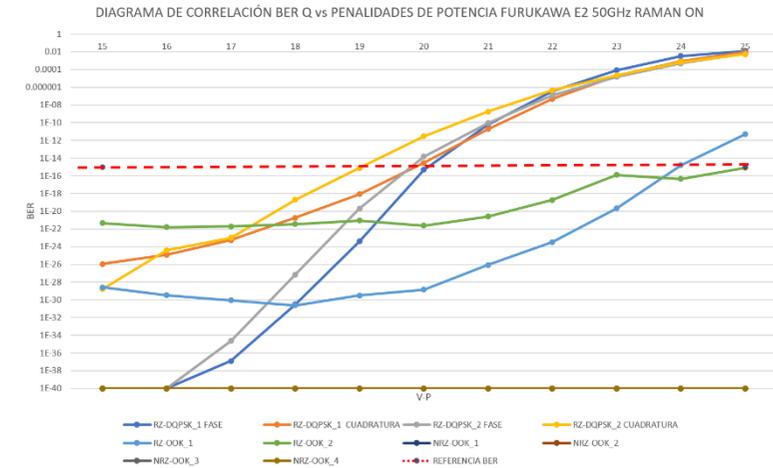
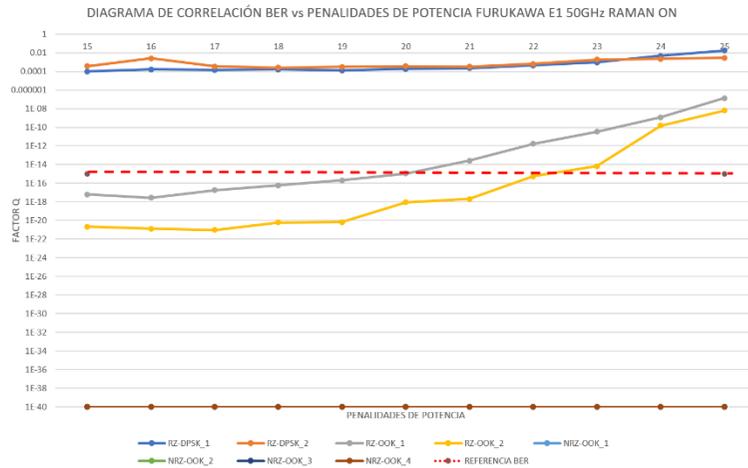


Tabla A.12: Caso de estudio 4: Escenario 1 y 2 – SRS ON, Fabricante Furukawa, Separación entre canales de 50 GHz.

**ANEXO B. RESULTADOS ANÁLISIS SBS PARA UNA RED MLR DE TIPO NG-PON2  
BASADA EN FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS RZ-DPSK Y RZ-DQPSK A 40  
Gbps - PARA UNA SEPARACIÓN ENTRE CANALES DE 50 GHz.**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis para los casos de estudio expuestos en la Tabla 3.4, en presencia del efecto de degradación óptica no lineal SBS, con una separación entre canales de 100 GHz, para anchos de línea de la señal de 300 y 500 MHz. Cabe resaltar que estos datos fueron utilizados para la elaboración de los gráficos de Factor Q vs Penalidades de potencia y BER vs Penalidades de potencia para todo el trabajo de grado, recopilados en las Tablas B.1 a B.8 siendo estas usadas para demostrar los comportamientos expuestos y determinar los rangos de operación de los sistemas.

PENALIDAD	RZ-DPSK_1			RZ-OOK_1			NRZ-OOK_1			NRZ-OOK_2		
	FACTOR Q [d BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d BER	JITTER [ns]	
15	21.488068	1.853E-31	0.0005054	36.665658	1E-40	0.0005095	40	1E-40	0.0718119	40	1E-40	0.0857064
17	21.702491	4.331E-34	0.0004736	35.760391	1E-40	0.0005195	40	1E-40	0.0532516	40	1E-40	0.0703429
19	21.655756	8.652E-33	0.0004734	36.895085	1E-40	0.0005925	40	1E-40	0.050783	40	1E-40	0.0670432
21	20.660648	2.125E-27	0.0006482	36.296727	1E-40	0.0007481	40	1E-40	0.0701391	40	1E-40	0.0762167
23	<b>18.271165</b>	<b>5.469E-16</b>	0.0001085	34.43316	1E-40	0.0011394	40	1E-40	0.0796442	38.389621	1E-40	0.0839276
25	14.321532	1.113E-07	0.0017597	30.651678	1E-40	0.0017796	35.769199	1E-40	0.08631	33.675259	1E-40	0.0735039
27	8.896031	0.0028315	0.0028333	24.879044	1E-40	0.0020771	32.328783	1E-40	0.0821305	31.837713	1E-40	0.0714667
29	6.0206	0.0227501	0.004716	21.428085	2.054E-32	0.0020973	30.055143	1E-40	0.0797618	31.090046	1E-40	0.0619902
31	6.0206	0.0227501	0.0057907	19.452455	2.041E-20	0.0024968	32.501159	1E-40	0.066232	31.362576	1E-40	0.0509533
33	6.0206	0.0227501	0.0047764	16.828394	6.153E-12	0.0029645	31.297982	1E-40	0.0820098	30.593616	1E-40	0.0538283
35	6.0206	0.0227501	0.0227501	14.26031	2.083E-07	0.00615	29.298808	1E-40	0.0853342	29.87389	1E-40	0.0750544
37	6.0206	0.0227501	0.0056141	11.180811	0.0002833	0.0089333	27.133156	1E-40	0.0693869	28.505453	1E-40	0.081843

PENALIDAD	RZ-DPSK_2			RZ-OOK_2			NRZ-OOK_3			NRZ-OOK_4		
	FACTOR Q [d BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d BER	JITTER [ns]	
15	21.529442	2.787E-31	0.0004984	35.20765	1E-40	0.0005038	40	1E-40	0.0768885	40	1E-40	0.0700081
17	21.653272	3.493E-33	0.0004664	36.551935	1E-40	0.000537	40	1E-40	0.100725	40	1E-40	0.0812026
19	21.680477	5.818E-34	0.0004943	37.892373	1E-40	0.000629	40	1E-40	0.0609661	40	1E-40	0.0666094
21	20.901866	7.937E-29	0.0067387	37.768533	1E-40	0.0007652	40	1E-40	0.0786093	40	1E-40	0.0783107
23	18.628968	3.337E-17	0.0010947	36.53915	1E-40	0.0011744	39.612475	1E-40	0.0862799	40	1E-40	0.0849052
25	14.113865	2.777E-07	0.0018085	32.182006	1E-40	0.0020788	33.57782	1E-40	0.0825445	37.85305	1E-40	0.0753463
27	10.64098	0.000332	0.0023526	25.58298	1E-40	0.002107	33.215181	1E-40	0.0843782	35.233248	1E-40	0.0735899
29	8.128324	0.0597848	0.0027648	22.784194	1E-40	0.0019222	33.500784	1E-40	0.0786529	34.612131	1E-40	0.0753478
31	7.506659	0.0088655	0.0026254	23.521528	1E-40	0.0022049	32.12125	1E-40	0.0692855	32.139889	1E-40	0.0707246
33	6.792102	0.0148818	0.0029622	24.499959	1E-40	0.0021709	31.384757	1E-40	0.0655817	32.531919	1E-40	0.0609177
35	6.384878	0.0187237	0.0030955	24.316141	1E-40	0.0022386	29.665008	1E-40	0.0765653	32.138856	1E-40	0.0611467
37	6.163669	0.0210998	0.0032008	24.436026	1E-40	0.0022567	28.731971	1E-40	0.0698831	32.967451	1E-40	0.0729049

Tabla B.1: Parámetros de monitoreo óptico, Fibra Corning Escenario 1 – SBS ON Ancho 300 MHz.

PENALIDAD	RZ-DQPSK_1 FASE			RZ-DQPSK_2 FASE			RZ-OOK_1			NRZ-OOK_1			NRZ-OOK_2		
	FACTOR Q [d BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d BER	JITTER [ns]	
15	25.639156	1E-40	0.0004907	27.274321	1E-40	0.0004158	40	1E-40	0.000378	40	1E-40	0.0578471	40	1E-40	0.0639966
17	23.620872	1E-40	0.0005203	25.235393	1E-40	0.0004447	39.930041	1E-40	0.0004042	40	1E-40	0.0548228	40	1E-40	0.0583182
19	20.772438	3.166E-27	0.0006655	22.346925	1.008E-38	0.0005448	39.204158	1E-40	0.0004753	40	1E-40	0.0561495	40	1E-40	0.0615509
21	<b>18.085278</b>	<b>1.742E-15</b>	0.0008429	18.440932	1.763E-16	0.0008156	37.463469	1E-40	0.0005325	40	1E-40	0.0543997	40	1E-40	0.0934346
23	13.446342	1.835E-06	0.0001486	13.831761	5.558E-07	0.001277	35.40578	1E-40	0.0007747	40	1E-40	0.0804344	40	1E-40	0.0938151
25	8.953975	0.0026143	0.0027353	9.633523	0.0013404	0.0020734	31.555029	1E-40	0.000107	38.436204	1E-40	0.089375	37.298912	1E-40	0.102762
27	6.207236	0.0198828	0.0005823	7.307122	0.0105369	0.0030544	27.846643	1E-40	0.0015567	35.999366	1E-40	0.0833279	35.330016	1E-40	0.088727
29	6.278853	0.0212684	0.0056165	6.802942	0.0141529	0.0060328	24.166477	1E-40	0.0017414	34.166292	1E-40	0.0814232	33.748605	1E-40	0.0760825
31	6.0206	0.0227501	0.0067916	6.533578	0.0175196	0.0080568	21.178677	1.626E-29	0.0019346	32.204642	1E-40	0.0916792	32.533109	1E-40	0.0857255
33	6.0206	0.0227501	0.0107788	6.17914	0.0207718	0.0060859	18.459409	5.529E-17	0.0022725	31.676339	1E-40	0.0785473	33.062756	1E-40	0.0904566
35	6.0206	0.0227501	0.0090715	6.0206	0.0227501	0.0062716	13.579088	1.517E-06	0.0025568	30.960334	1E-40	0.0828138	31.307743	1E-40	0.0979644
37	6.0206	0.0227501	0.0111605	6.449088	0.0175473	0.0041697	6.086398	0.0231334	0.001492	25.254642	1E-40	0.0779912	30.921685	1E-40	0.0914212

PENALIDAD	RZ-DQPSK_1 CUADRATURA			RZ-DQPSK_2 CUADRATURA			RZ-OOK_2			NRZ-OOK_3			NRZ-OOK_4		
	FACTOR Q [d BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d BER	JITTER [ns]	
15	22.018564	1.681E-36	0.0014127	23.865785	1E-40	0.001322	40	1E-40	0.0004469	40	1E-40	0.071417	40	1E-40	0.0612242
17	20.966208	8.816E-29	0.0013948	22.333208	6.299E-39	0.0013547	40	1E-40	0.000467	40	1E-40	0.0749468	40	1E-40	0.0621338
19	18.994202	3.974E-19	0.0013949	20.253986	2.73E-24	0.0014351	40	1E-40	0.0004901	40	1E-40	0.0840814	40	1E-40	0.0797223
21	17.110924	7.54E-13	0.0013771	17.731163	8.43E-15	0.0015808	39.42217	1E-40	0.0006756	40	1E-40	0.08628	40	1E-40	0.0617359
23	13.242717	3.188E-06	0.0015204	13.691842	7.672E-07	0.0021881	37.309895	1E-40	0.0008848	40	1E-40	0.0906147	40	1E-40	0.0857406
25	9.095941	0.0028092	0.0032567	10.363095	0.000519	0.0028704	34.758375	1E-40	0.0014399	37.387305	1E-40	0.089546	40	1E-40	0.087716
27	6.568539	0.0163567	0.005817	8.094661	0.0063739	0.0032711	31.049062	1E-40	0.0018213	36.222179	1E-40	0.0863504	40	1E-40	0.0834226
29	6.0206	0.0227501	0.006694	6.725328	0.015431	0.0040379	27.562131	1E-40	0.0019149	35.344746	1E-40	0.0771375	39.870403	1E-40	0.083645
31	6.0206	0.0227501	0.0126039	6.210026	0.0205394	0.0037523	25.065735	1E-40	0.0019341	33.772621	1E-40	0.0823724	37.895711	1E-40	0.0829285
33	6.0206	0.0227501	0.0136357	6.2544	0.0201482	0.0029956	24.606572	1E-40	0.0020556	33.198332	1E-40	0.0830398	35.408096	1E-40	0.0860069
35	6.0206	0.0227501	0.0109377	6.6168	0.0158609	0.0040028	23.098636	1E-40	0.0021649	30.272275	1E-40	0.0767818	33.809094	1E-40	0.0749233
37	6.0206	0.0227501	0.0103107	6.0206	0.0227501	0.003845	22.721684	3.233E-40	0.0025097	30.383386	1E-40	0.078829	33.709094	1E-40	0.0849344

Tabla B.2: Parámetros de monitoreo óptico, Fibra Corning Escenario 2 – SBS ON Ancho 300 MHz.

	RUN	RZ-DPSK_1		RZ-OOK_1		NRZ-OOK_1		NRZ-OOK_2					
		FACTOR Q [d BER]	JITTER [ns]										
CORNING EL SBS ON - ANCHO DE LINEA 500 MHz	15	21.595158	3.429E-32	0.0004998	35.065558	1E-40	0.0004914	40	1E-40	0.0744438	40	1E-40	0.0705641
	17	21.698502	2.552E-34	0.0004771	37.1539	1E-40	0.0005195	40	1E-40	0.0622716	40	1E-40	0.0555846
	19	21.551443	5.641E-32	0.0004808	36.726175	1E-40	0.0006068	40	1E-40	0.0561358	40	1E-40	0.0844748
	21	20.696413	1.178E-27	0.0006433	36.068647	1E-40	0.0007546	40	1E-40	0.0684837	40	1E-40	0.0808398
	23	18.308076	2.846E-16	0.0010747	34.394741	1E-40	0.0011123	40	1E-40	0.0867634	38.022707	1E-40	0.0680211
	25	14.221077	1.446E-07	0.0017787	30.592869	1E-40	0.001799	35.905828	1E-40	0.0809231	33.24827	1E-40	0.0621774
	27	8.744106	0.003117	0.0028364	23.628993	1E-40	0.0023691	29.209581	1E-40	0.0721447	30.177742	1E-40	0.0698306
	29	6.0206	0.0227501	0.0047726	21.003952	4.533E-28	0.0028485	28.798093	1E-40	0.0718302	28.189076	1E-40	0.0637526
	31	6.0206	0.0227501	0.0057362	24.328271	1E-40	0.0031933	29.675122	1E-40	0.0618658	27.613911	1E-40	0.0673106
	33	6.0206	0.0227501	0.0056911	22.375861	3.136E-38	0.0036862	27.958095	1E-40	0.0647946	26.609577	1E-40	0.0575972
	35	6.0206	0.0227501	0.0054964	19.350846	4.643E-20	0.0042046	25.985312	1E-40	0.0505943	27.712945	1E-40	0.0881294
	37	6.0206	0.0227501	0.0057283	10.511862	0.0002529	0.009749	25.757571	1E-40	0.0727547	25.529557	1E-40	0.0849817

Tabla B.3: Parámetros de monitoreo óptico, Fibra Corning Escenario 1 – SBS ON Ancho 500 MHz.

	PENALIDAD	RZ-DQPSK_1 FASE		RZ-DQPSK_2 FASE		RZ-OOK_1		NRZ-OOK_1		NRZ-OOK_2			
		FACTOR Q [d BER]	JITTER [ns]										
CORNING EL SBS ON - ANCHO DE LINEA 500 MHz	15	25.639156	1E-40	0.0004907	27.274321	1E-40	0.0004158	40	1E-40	0.000378	40	1E-40	0.0639966
	17	23.620872	1E-40	0.0005203	25.235393	1E-40	0.0004447	39.930041	1E-40	0.0004042	40	1E-40	0.0583182
	19	20.772438	3.166E-27	0.0006655	22.346924	1.008E-38	0.0005448	39.204162	1E-40	0.0004753	40	1E-40	0.0615735
	21	18.099686	1.653E-15	0.0008295	18.439566	1.94E-16	0.0008094	37.338334	1E-40	0.0005068	40	1E-40	0.0817914
	23	13.451284	1.831E-06	0.0014854	13.838513	5.342E-07	0.001291	35.654571	1E-40	0.0076574	40	1E-40	0.0967722
	25	8.64469	0.003427	0.0030213	8.472647	0.0039611	0.0028619	31.508881	1E-40	0.0010529	38.192655	1E-40	0.0956922
	27	6.228168	0.019929	0.0050431	6.809122	0.0142542	0.0043218	27.434288	1E-40	0.0015955	34.546834	1E-40	0.0705063
	29	6.0206	0.0227501	0.0054796	6.224702	0.0203332	0.0037979	22.371761	3.138E-38	0.002198	30.445017	1E-40	0.0647124
	31	6.0206	0.0227501	0.0137758	6.0206	0.0227501	0.0149574	19.446413	1.179E-20	0.0025957	28.549584	1E-40	0.0801078
	33	6.0206	0.0227501	0.0110585	6.0206	0.0227501	0.011708	19.782783	6.362E-22	0.0028754	30.076007	1E-40	0.0822862
	35	6.0206	0.0227501	0.0095132	6.0206	0.0227501	0.0089803	11.933983	3.992E-05	0.078834	27.457337	1E-40	0.090889
	37	6.0206	0.0227501	0.0105331	6.0206	0.0227501	0.0069141	6.896559	0.0166355	0.0130362	21.808966	5.196E-35	0.100221

Tabla B.4: Parámetros de monitoreo óptico, Fibra Corning Escenario 2 – SBS ON Ancho 500 MHz.

	PENALIDAD	RZ-DPSK_1		RZ-OOK_1		NRZ-OOK_1		NRZ-OOK_2					
		FACTOR Q [d BER]	JITTER [ns]										
FURUKAWA EL SBS ON - ANCHO DE LINEA 300 MHz	15	19.546873	8.016E-21	0.0005491	37.824357	1E-40	0.0004958	40	1E-40	0.0618513	40	1E-40	0.0438275
	17	19.723262	2.082E-21	0.0005241	37.811067	1E-40	0.0005777	40	1E-40	0.0707876	40	1E-40	0.0797662
	19	19.86816	7.845E-23	0.0005341	38.539443	1E-40	0.0006022	40	1E-40	0.0668335	40	1E-40	0.0815834
	21	19.277948	1.792E-19	0.0007459	36.97379	1E-40	0.0007291	40	1E-40	0.0570818	40	1E-40	0.0658486
	23	17.277844	4.725E-13	0.0117487	34.377974	1E-40	0.010404	38.486875	1E-40	0.0805849	38.948988	1E-40	0.0606571
	25	13.334054	2.152E-06	0.002081	31.519285	1E-40	0.0017898	33.643582	1E-40	0.086423	35.459881	1E-40	0.0727221
	27	8.717128	0.0032009	0.0029126	26.234269	1E-40	0.0019089	33.146483	1E-40	0.0774102	32.537286	1E-40	0.0695493
	29	6.0206	0.0227501	0.0053292	22.360245	1.566E-37	0.0021886	33.030749	1E-40	0.0698679	32.224778	1E-40	0.0649484
	31	6.0206	0.0227501	0.0053752	19.832814	7.846E-22	0.0024299	31.48207	1E-40	0.0498703	30.604809	1E-40	0.0635745
	33	6.0206	0.0227501	0.005283	17.405355	2.17E-13	0.0027558	29.996927	1E-40	0.0635879	31.579523	1E-40	0.0819537
	35	6.0206	0.0227501	0.0057612	16.123847	1.868E-10	0.0045418	29.006796	1E-40	0.0816454	29.952534	1E-40	0.0681205
	37	6.0206	0.0227501	0.0053759	13.339598	1.975E-06	0.0091547	27.276709	1E-40	0.0790063	30.492327	1E-40	0.079307

Tabla B.5: Parámetros de monitoreo óptico, Fibra Furukawa Escenario 1 – SBS ON Ancho 300 MHz.

	RUN	RZ-DQPSK_1 FASE			RZ-DQPSK_2 FASE			RZ-OOK_1			NRZ-OOK_1			NRZ-OOK_2			
		FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]		
FURUKAWA E2 SBS ON - ANCHO DE LINEA 300 MHZ	15	24.983132	1E-40	0.0006122	27.138612	1E-40	0.00050138	39.550841	1E-40	0.000425	40	1E-40	0.0628613	40	1E-40	0.0585955	
	17	23.27598	1E-40	0.0006625	25.211765	1E-40	0.0005507	39.171205	1E-40	0.0004083	40	1E-40	0.0611564	40	1E-40	0.0762267	
	19	20.461705	5.357E-26	0.000795	22.558148	1.325E-40	0.0006488	38.812742	1E-40	0.0004648	40	1E-40	0.0537345	40	1E-40	0.0574319	
	21	17.675685	3.784E-14	0.0009643	18.942066	1.355E-18	0.0008843	37.446306	1E-40	0.0006015	40	1E-40	0.0482879	40	1E-40	0.0796646	
	23	13.668193	9.827E-07	0.0016055	14.510842	6.783E-08	0.0013443	35.342731	1E-40	0.000702	40	1E-40	0.0612142	40	1E-40	0.0813522	
	25	9.119824	0.0021618	0.0030716	10.995088	0.0002057	0.0018755	31.712203	1E-40	0.0010102	39.815588	1E-40	0.0737989	40	1E-40	0.0905047	
	27	6.0206	0.002275	0.0067952	8.309493	0.0052172	0.0025992	28.08773	1E-40	0.0013704	37.699674	1E-40	0.0831893	35.944518	1E-40	0.0727009	
	29	6.0206	0.002275	0.0070831	6.80116	0.0150083	0.0060061	25.170567	1E-40	0.0016913	34.217063	1E-40	0.0726234	34.545416	1E-40	0.0942141	
	31	6.0206	0.002275	0.012433	6.067583	0.0224766	0.0059397	22.779901	1E-40	0.0020155	32.887989	1E-40	0.0717428	31.635606	1E-40	0.0987316	
	33	6.0206	0.002275	0.0106522	6.0206	0.002275	0.0147314	19.941218	2.129E-23	0.0020572	31.756319	1E-40	0.0737172	30.279924	1E-40	0.102654	
	35	6.0206	0.002275	0.0111381	6.0206	0.002275	0.0046878	9.795798	0.0008341	0.0065887	29.444859	1E-40	0.0734228	30.694752	1E-40	0.0762506	
	37	6.0206	0.002275	0.0106693	6.0206	0.002275	0.0063654	6.0206	0.0227501	0.0219341	24.492087	1E-40	0.0849592	28.982364	1E-40	0.0836313	
	FURUKAWA E2 SBS ON - ANCHO DE LINEA 500 MHZ																
		PENALIDAD	FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [d] BER
15		21.154267	7.812E-30	0.0016111	23.246063	1.00E-40	0.0014525	40	1E-40	0.0004596	40	1E-40	0.0745298	40	1E-40	0.0717166	
17		20.299408	2.23E-25	0.001577	21.849655	5.767E-33	0.0015343	39.999289	1E-40	0.0005068	40	1E-40	0.0943245	40	1E-40	0.0593988	
19		18.553691	2.20E-17	0.0015608	20.142519	6.558E-24	0.0015933	40	1E-40	0.0005382	40	1E-40	0.0823433	40	1E-40	0.0717773	
21		16.565825	8.909E-12	0.0015945	17.784372	5.645E-15	0.0016816	40	1E-40	0.0006059	40	1E-40	0.0926041	40	1E-40	0.0766881	
23		13.547744	1.38E-06	0.001637	14.43062	7.014E-08	0.0020895	38.427874	1E-40	0.00075	40	1E-40	0.0968711	40	1E-40	0.0679967	
25		9.414282	0.0015752	0.0029186	11.745972	6.921E-05	0.002679	35.880801	1E-40	0.0012323	40	1E-40	0.0728364	40	1E-40	0.0647748	
27		7.036877	0.0144747	0.0047816	9.191909	0.0019965	0.0031547	31.121619	1E-40	0.0015064	37.43928	1E-40	0.073475	40	1E-40	0.0959265	
29		6.0206	0.002275	0.0070742	6.946728	0.0132085	0.0040411	26.7263	1E-40	0.0018443	35.380895	1E-40	0.0647066	39.018074	1E-40	0.0805609	
31		6.0206	0.002275	0.0100129	6.744493	0.0152629	0.0040824	25.558389	1E-40	0.0017835	36.762962	1E-40	0.0789249	38.960419	1E-40	0.086349	
33		6.0206	0.002275	0.0097471	6.692783	0.0153712	0.0417872	24.256006	1E-40	0.0019161	34.765017	1E-40	0.10469	34.594246	1E-40	0.0936034	
35		6.0206	0.0227501	0.0111291	6.136497	0.0212532	0.003366	22.355644	1.024E-39	0.0028049	32.724117	1E-40	0.090761	33.116813	1E-40	0.0642243	
37		6.0206	0.0227501	0.0100675	6.207157	0.0205167	0.0037197	18.852355	1.958E-18	0.0052455	29.143027	1E-40	0.0896988	29.485265	1E-40	0.0868079	

Tabla B.6: Parámetros de monitoreo óptico, Fibra Furukawa Escenario 2 – SBS ON Ancho 300 MHz.

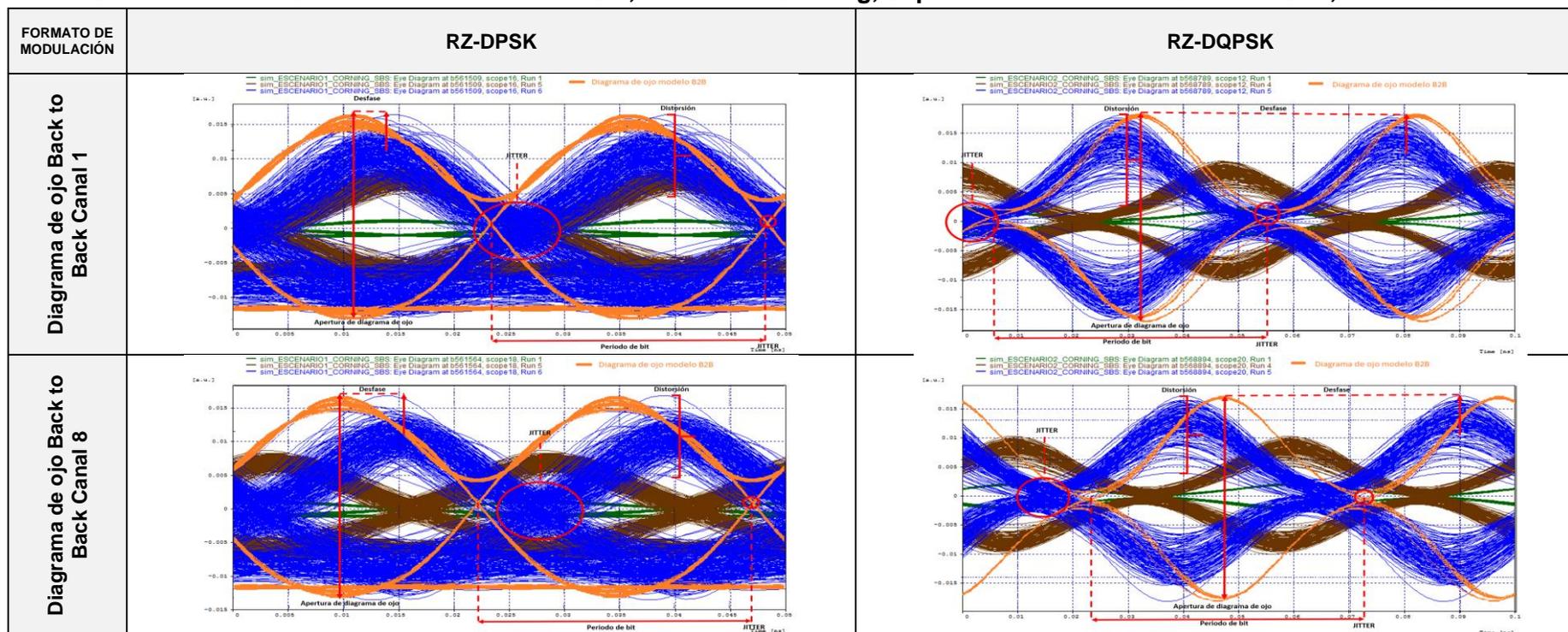
	PENALIDAD	RZ-DPSK_1			RZ-OOK_1			NRZ-OOK_1			NRZ-OOK_2						
		FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]					
FURUKAWA E1 SBS ON - ANCHO DE LINEA 500 MHZ	15	19.546873	8.016E-21	0.0005491	37.824357	1E-40	0.0004958	40	1E-40	0.0618513	40	1E-40	0.0438275				
	17	19.723262	2.082E-21	5.241E-05	37.811067	1E-40	0.0005777	40	1E-40	0.0707876	40	1E-40	0.0797662				
	19	19.868159	7.845E-23	0.0005341	38.539444	1E-40	0.0006022	40	1E-40	0.0668467	40	1E-40	0.0815834				
	21	19.277947	1.738E-19	0.0007459	36.973784	1E-40	0.0007291	40	1E-40	0.0570818	40	1E-40	0.0658037				
	23	17.27777	4.726E-13	0.0011749	34.377854	1E-40	0.0010404	38.486562	1E-40	0.0806052	38.948654	1E-40	0.0606571				
	25	13.514733	1.281E-06	0.001909	31.213683	1E-40	0.0018789	34.239828	1E-40	0.0761985	33.691969	1E-40	0.069683				
	27	8.210589	0.0051123	0.0002955	24.25097	1E-40	0.0024214	28.753792	1E-40	0.0635998	29.337847	1E-40	0.0557214				
	29	6.0206	0.0227501	0.0054294	22.534449	1E-40	0.0029951	27.858613	1E-40	0.0579212	28.03676	1E-40	0.0601323				
	31	6.0206	0.0227501	0.0057737	24.224163	1E-40	0.003915	28.244061	1E-40	0.0864144	29.838211	1E-40	0.0752448				
	33	6.0206	0.0227501	0.0051485	23.341038	1E-40	0.0036621	26.312976	1E-40	0.0694499	29.699409	1E-40	0.0666911				
	35	6.0206	0.0227501	0.0054805	18.818352	2.345E-18	0.0043767	24.527937	1E-40	0.0790667	28.812956	1E-40	0.073688				
	37	6.0206	0.0227501	0.0053509	17.264434	1.429E-05	0.0082253	23.918529	1E-40	0.0818609	27.167183	1.00E-40	0.0655999				
	FURUKAWA E1 SBS ON - ANCHO DE LINEA 500 MHZ																
		PENALIDAD	FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]	FACTOR Q [d] BER
15		20.409482	1.857E-25	0.0005366	39.357967	1E-40	0.0052197	40	1E-40	0.0599753	40	1E-40	0.0649681				
17		20.434365	4.304E-25	0.0005194	38.903335	1E-40	0.0005951	40	1E-40	0.0649912	40	1E-40	0.0764664				
19		20.228082	7.394E-24	0.0005573	38.962364	1E-40	0.0006275	40	1E-40	0.0412732	40	1E-40	0.063337				
21		19.477654	3.429E-21	0.0008058	37.722112	1E-40	0.0006739	40	1E-40	0.0475248	40	1E-40	0.0498586				
23		17.890409	2.239E-15	0.0013061	36.833296	1E-40	0.0009072	38.201788	1E-40	0.0740171	40	1E-40	0.0738222				
25		13.303643	2.322E-06	0.002078	32.358583	1E-40	0.0018642	34.295977	1E-40	0.0884239	37.688382	1E-40	0.0683273				
27		7.763874	0.007265	0.0028348	24.095477	1E-40	0.0026703	30.265741	1E-40	0.0668503	31.226349	1E-40	0.0967807				
29		6.0206	0.0227501	0.0074366	23.1496	1E-40	0.0025472	27.743152	1E-40	0.0748819	29.349815	1E-40	0.0846615				
31		6.0206	0.0227501	0.0069403	26.608371	1E-40	0.0031788	26.240987	1E-40	0.0691145	28.158832	1E-40	0.0491616				
33		6.0206	0.0227501	0.0046554	27.261153	1E-40	0.0034153	25.169721	1E-40	0.0853676	28.595843	1E-40	0.0810945				
35		6.0206	0.0227501	0.0062105	26.5957	1E-40	0.0040269	27.661357	1E-40	0.0905057	28.10553	1E-40	0.0732228				
37		6.0206	0.0227501	0.0067076	26.242228	1E-40	0.0041016	28.026721	1E-40	0.0797487	28.877135	1E-40	0.0781058				

Tabla B.7: Parámetros de monitoreo óptico, Fibra Furukawa Escenario 1 – SBS ON Ancho 500 MHz.

	PENALIDAD	RZ-DQPSK_1 FASE			RZ-DQPSK_2 FASE			RZ-OOK_1			NRZ-OOK_1			NRZ-OOK_2		
		FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]		FACTOR Q [d] BER	JITTER [ns]	
FURUKAWA E2 SBS ON - ANCHO DE LINEA 500 MHZ	15	24.983132	1E-40	0.0006122	27.138612	1E-40	0.00050138	39.550841	1E-40	0.000425	40	1E-40	0.0628613	40	1E-40	0.0585955
	17	23.27598	1E-40	0.0006625	25.211765	1E-40	0.00055266	39.171204	1E-40	0.0004083	40	1E-40	0.0611564	40	1E-40	0.0762012
	19	20.461704	5.36E-26	0.000795	22.558146	1.325E-40	0.0006488	38.812744	1E-40	0.0004648	40	1E-40	0.0537345	40	1E-40	0.0574319
	21	17.648839	2.99E-14	0.0009751	19.023073	1.20E-18	0.0008897	37.494027	1E-40	0.0005325	40	1E-40	0.0588078	40	1E-40	0.0776676
	23	13.631582	1.085E-06	0.0016481	14.418099	8.157E-08	0.0013503	35.478881	1E-40	0.0007519	40	1E-40	0.071324	40	1E-40	0.0824873
	25	9.051434	0.0022902	0.0029819	9.416759	0.0016405	0.0024876	31.58259	1E-40	0.0010438	38.30575	1E-40	0.0660503	38.848959	1E-40	0.103929
	27	6.0206	0.0227501	0.0068095	6.930096	0.0143144	0.0036505	28.055044	1E-40	0.0016291	34.767125	1E-40	0.0606342	34.375553	1E-40	0.0874879
	29	6.0206	0.0227501	0.0109523	6.260757	0.0175083	0.0049769	22.376274	7.081E-38	0.002156	30.14023	1E-40	0.0706755	30.694322	1E-40	0.078937
	31	6.0206	0.0227501	0.006879	6.0206	0.0227501	0.0052203	20.24003	4.523E-24	0.0025671	29.249713	1E-40	0.0848342	30.616283	1E-40	0.0740599
	33	6.0206	0.0227501	0.0117073	6.0206	0.0227501	0.0112334	18.996816	8.861E-19	0.003471	28.476934	1E-40	0.0628949	26.989357	1E-40	0.0884479
	35	6.0206	0.0227501	0.010796												

Tal como se indicó en el capítulo 4, el umbral de aparición de SBS es menor en cuanto menor es el ancho de línea de la señal. Para todos los casos de estudio en los cuales se usan tanto RZ-DPSK como RZ-DQPSK para modular las señales de 40 Gbps, se evidencia gran impacto generado por el ensanchamiento de las señales, diversas deformaciones generadas por SPM y atenuación de los canales de mayor capacidad. Sin embargo las afecciones identificadas en los casos que usan RZ-DQPSK son bastante más notorias y gracias a los resultados del análisis de valores obtenidos de Factor Q y BER respecto a la variación de las penalidades de potencia, es posible concluir que el mejor desempeño para todos estos casos se tiene para los casos de Escenario 1 que usaron el formato de modulación avanzado RZ-DPSK en su configuración, dado que este se mantiene más tolerante frente a las variaciones de penalidades de potencia aun en presencia de SBS, Dispersión Cromática, deformaciones dados SPM y XPM y atenuación de la señal por la distancia cubierta por el medio óptico durante los 41 Km de distancia.

- **Caso de estudio 3: Escenario 1 Y 2 – SBS ON, Fabricante Corning, Separación entre canales de 100 GHz, Ancho 300 MHz.**



<p><b>Espectro MLR a la salida del amplificador</b></p>		
<p><b>Espectro MLR a la salida del módulo de fibra óptica</b></p>		
<p><b>Rango potencia tolerado [dBm]</b></p>	<p><b>15 - 23</b></p>	<p><b>15 - 21</b></p>

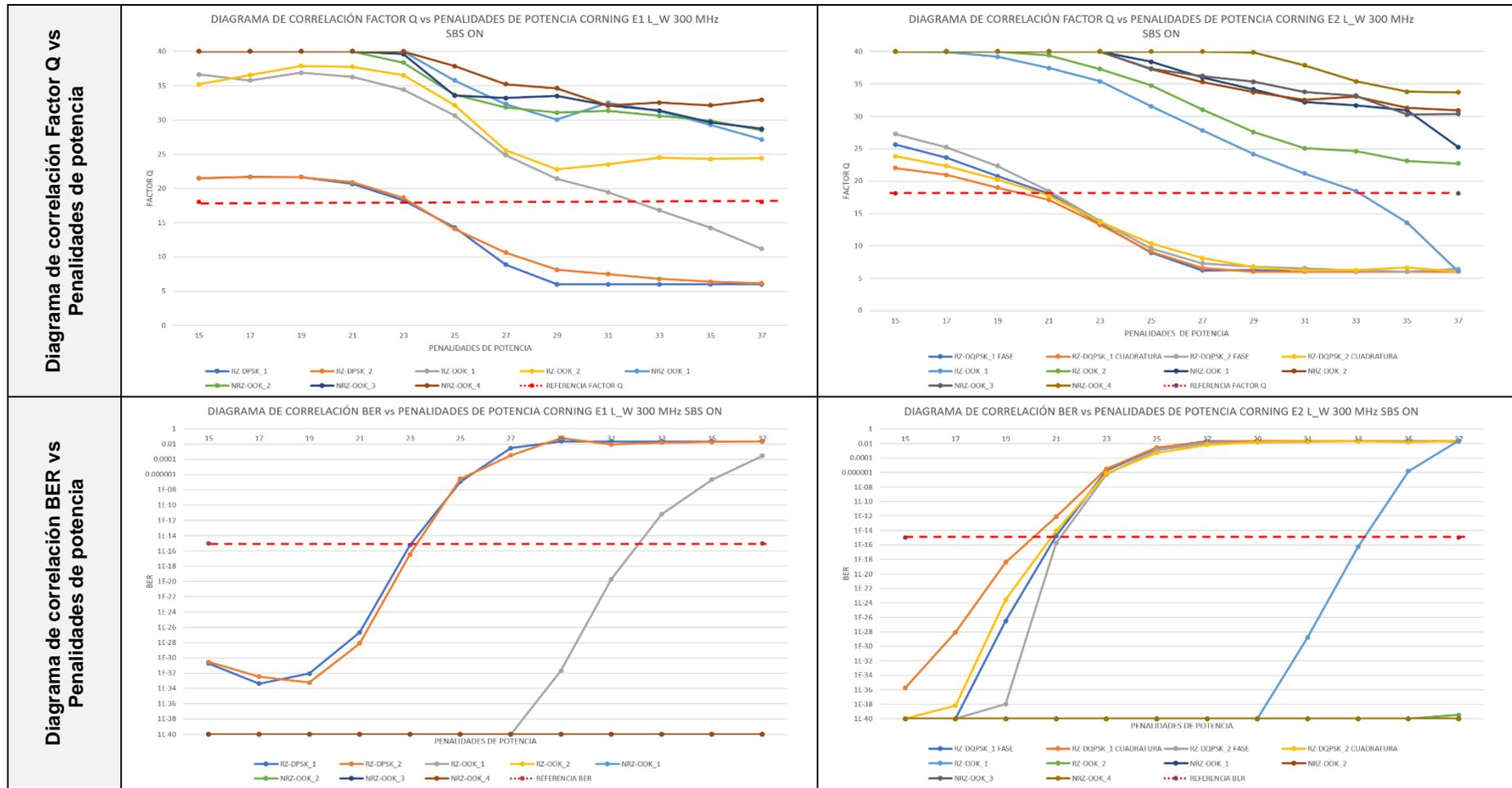
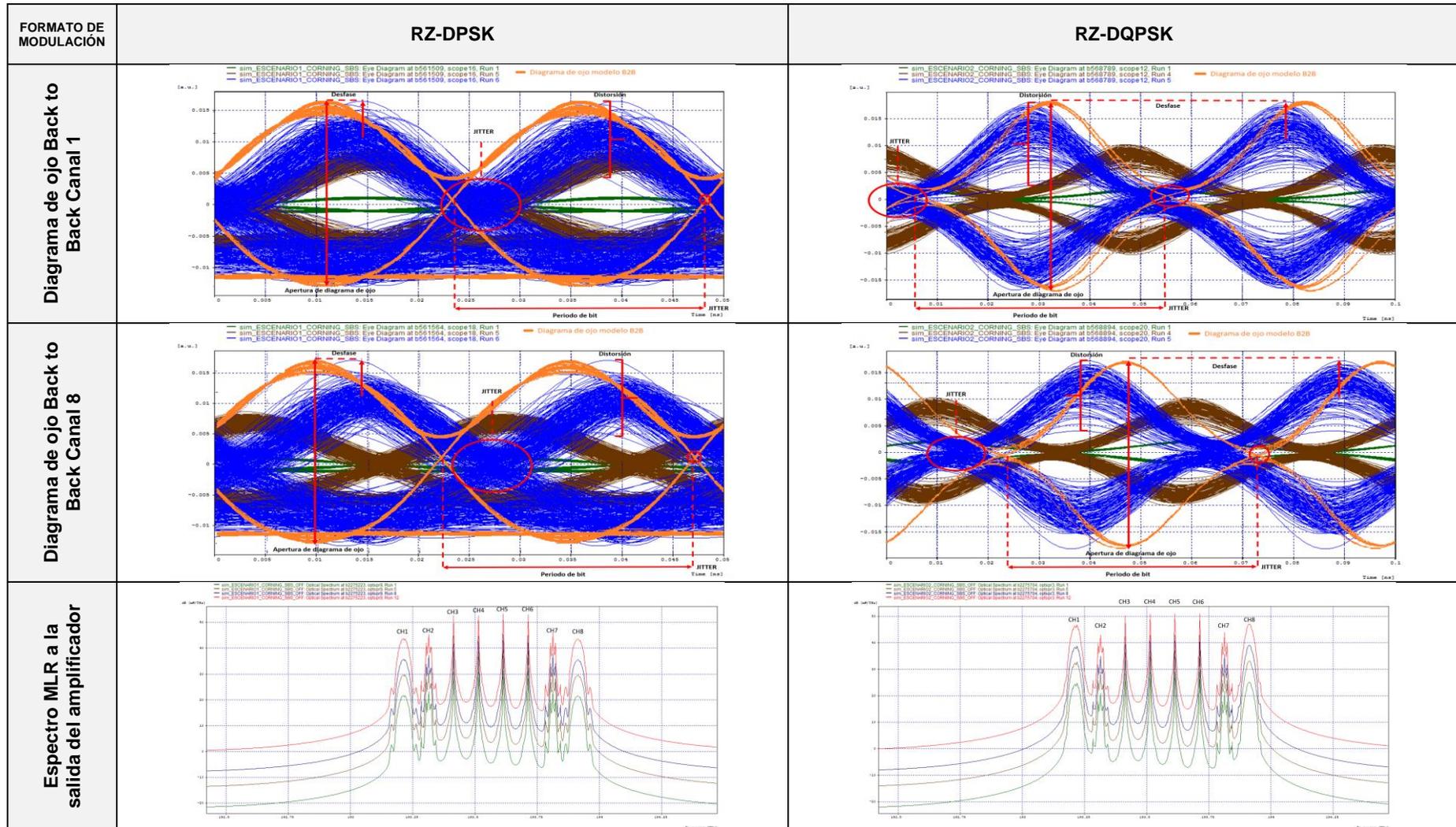
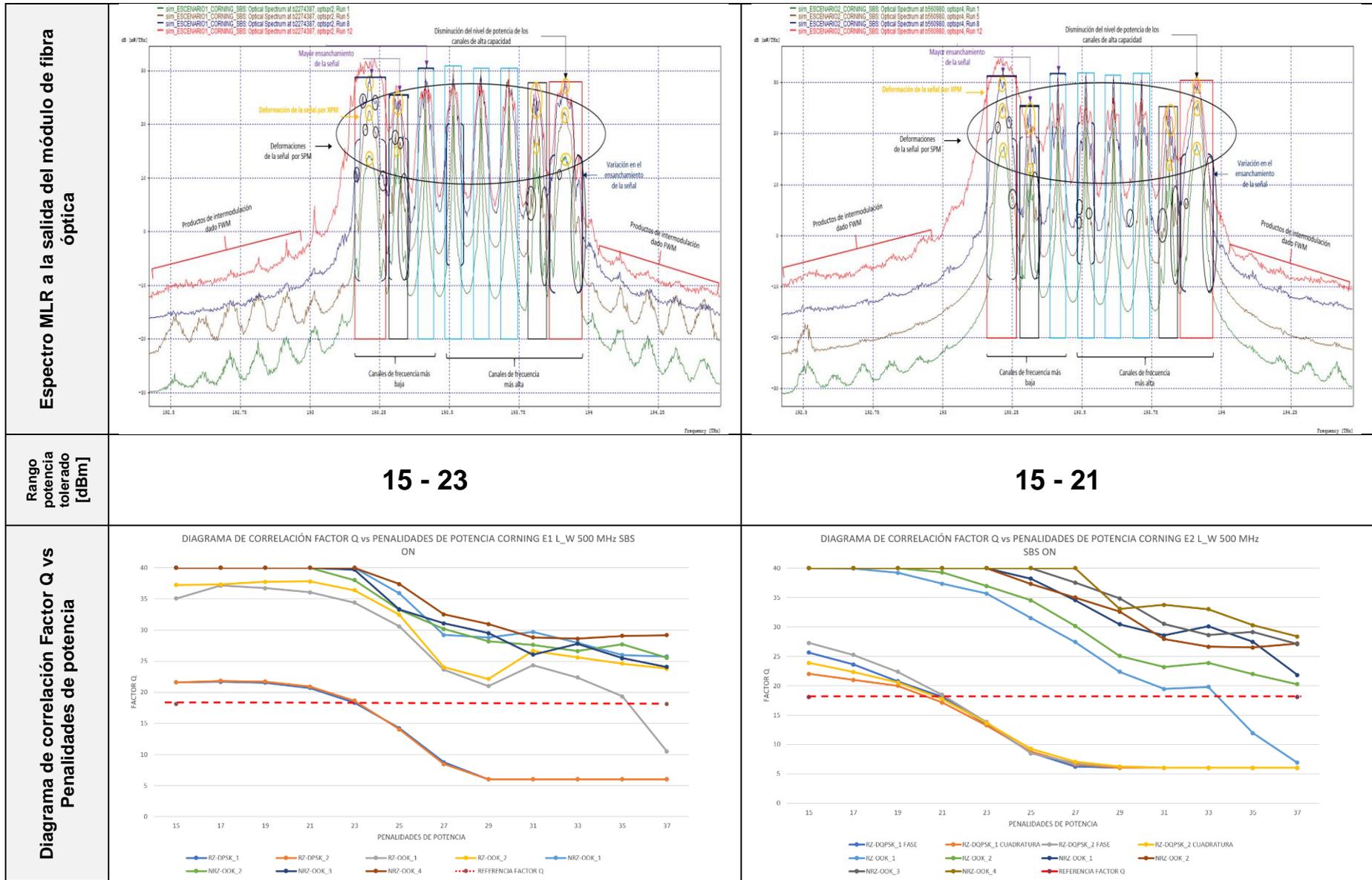
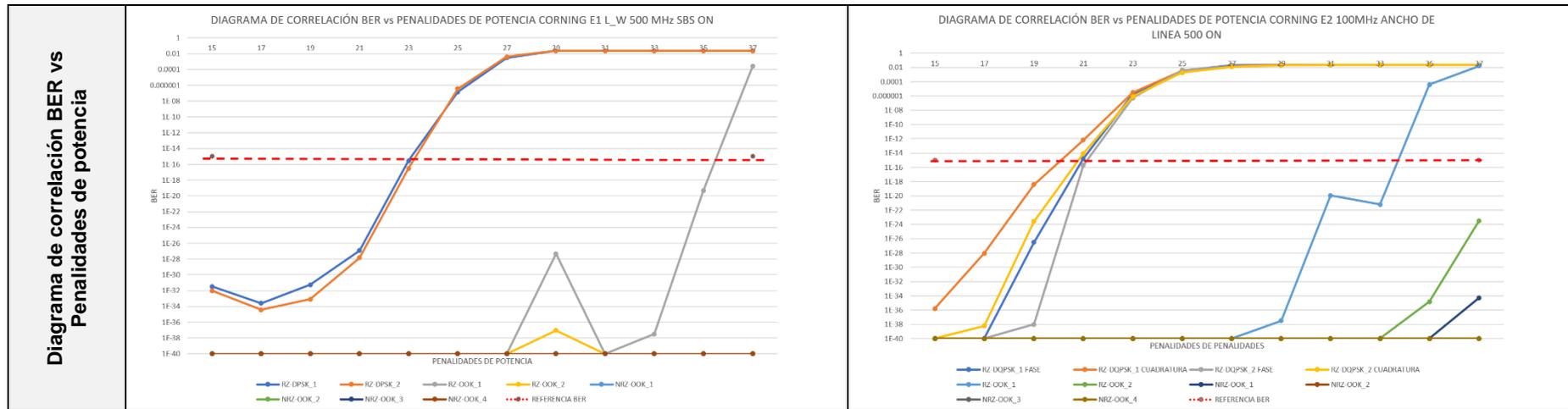


Tabla B.9: Caso de estudio 3: Escenario 1 Y 2 – SBS ON, Fabricante Corning, Separación entre canales de 100 GHz, Ancho 300 MHz.

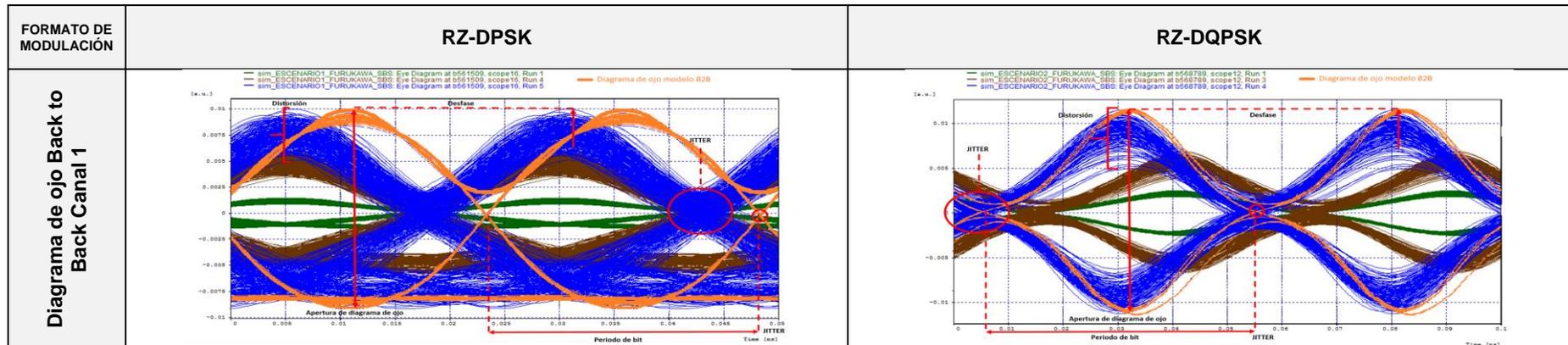
- Caso de estudio 4: Escenario 1 Y 2 – SBS ON, Fabricante Corning, Separación entre canales de 100 GHz, Ancho 500 MHz.

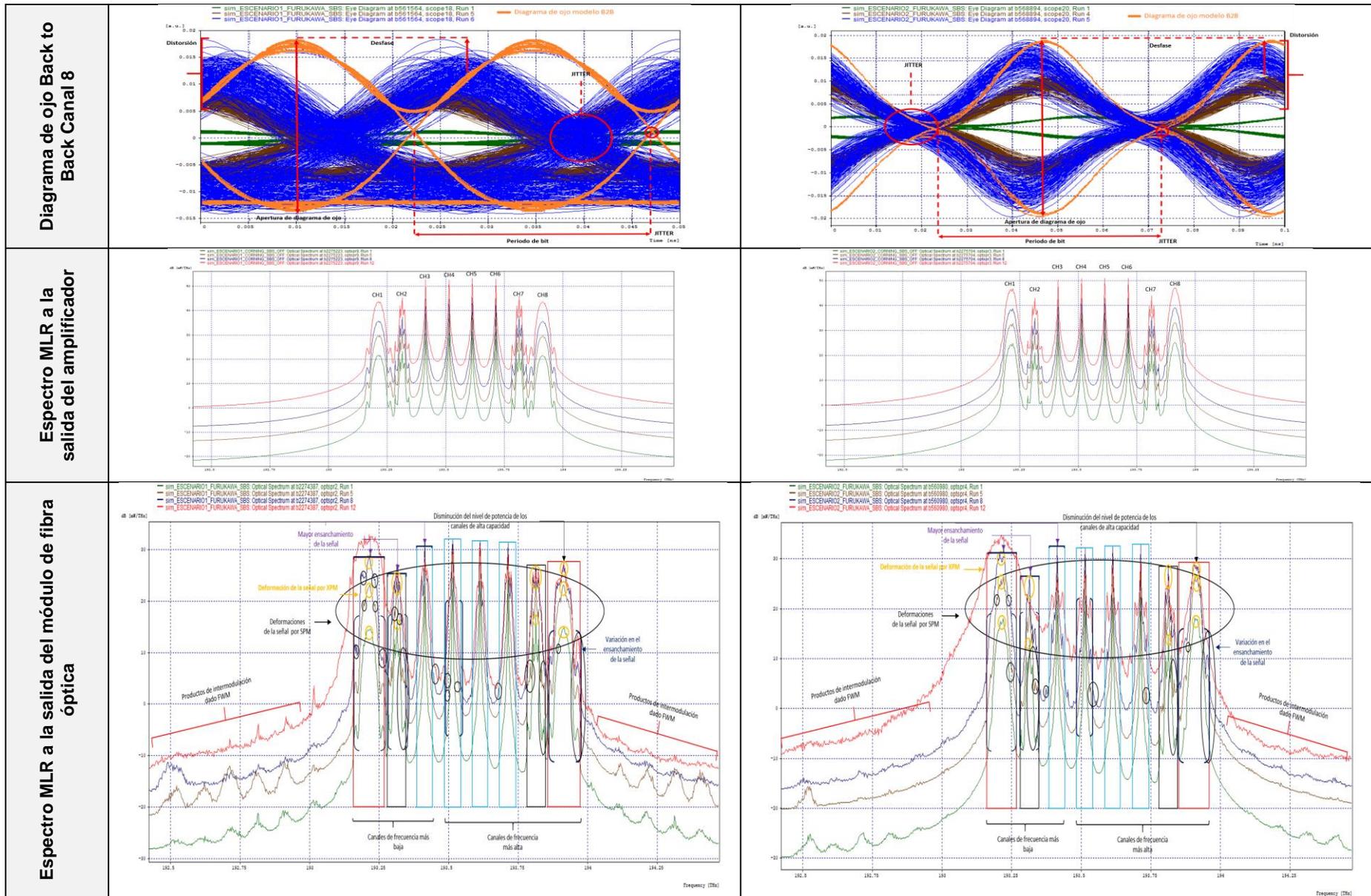






- Caso de estudio 7: Escenario 1 Y 2 – SBS ON, Fabricante Furukawa, Separación entre canales de 100 GHz, Ancho 300 MHz





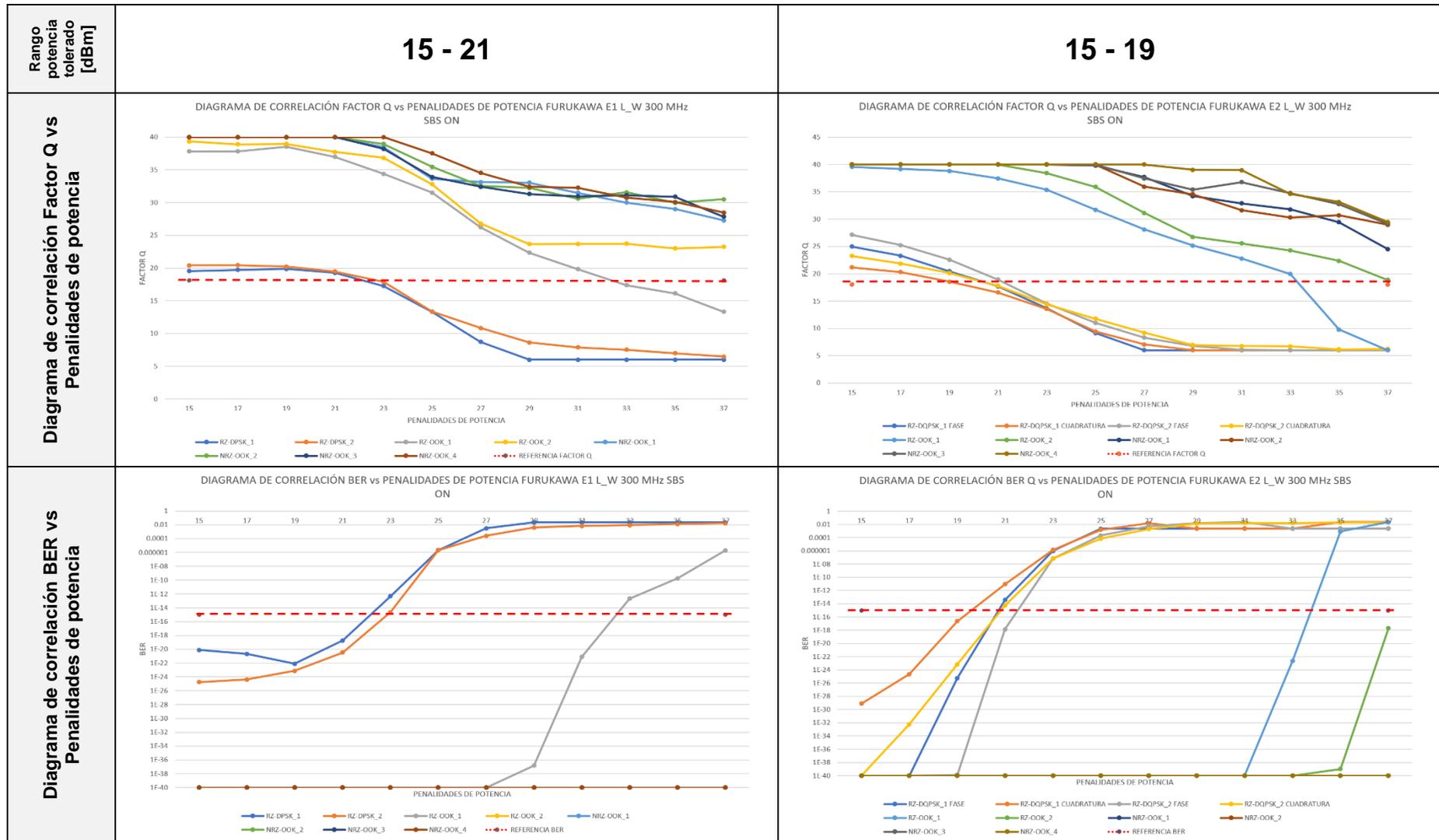
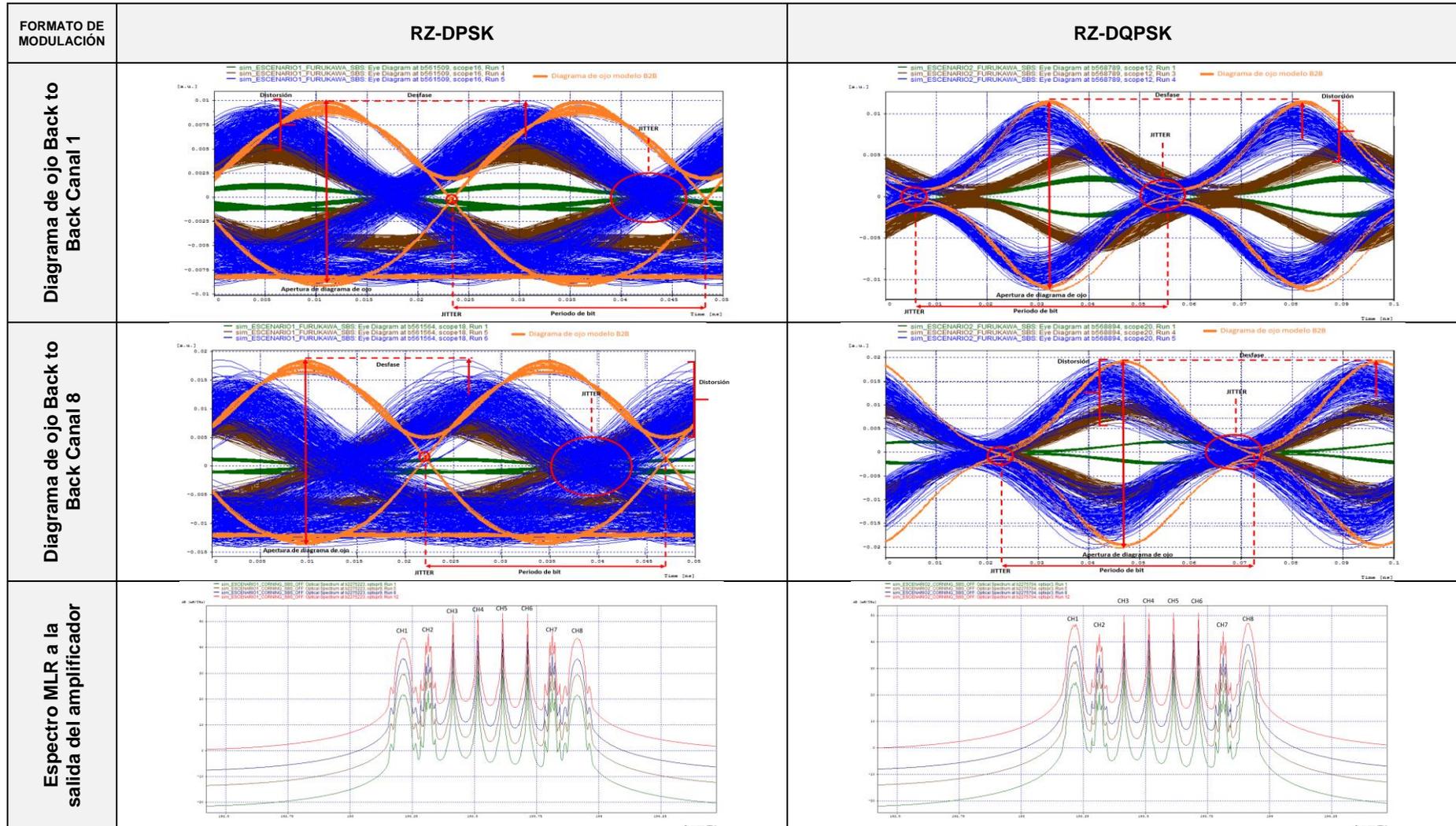


Tabla B.11: Caso de estudio 7: Escenario 1 Y 2 – SBS ON, Fabricante Furukawa, Separación entre canales de 100 GHz, Ancho 300 MHz.

- Caso de estudio 8: Escenario 1 Y 2 – SBS ON, Fabricante Furukawa, Separación entre canales de 100 GHz, Ancho de 500 MHz



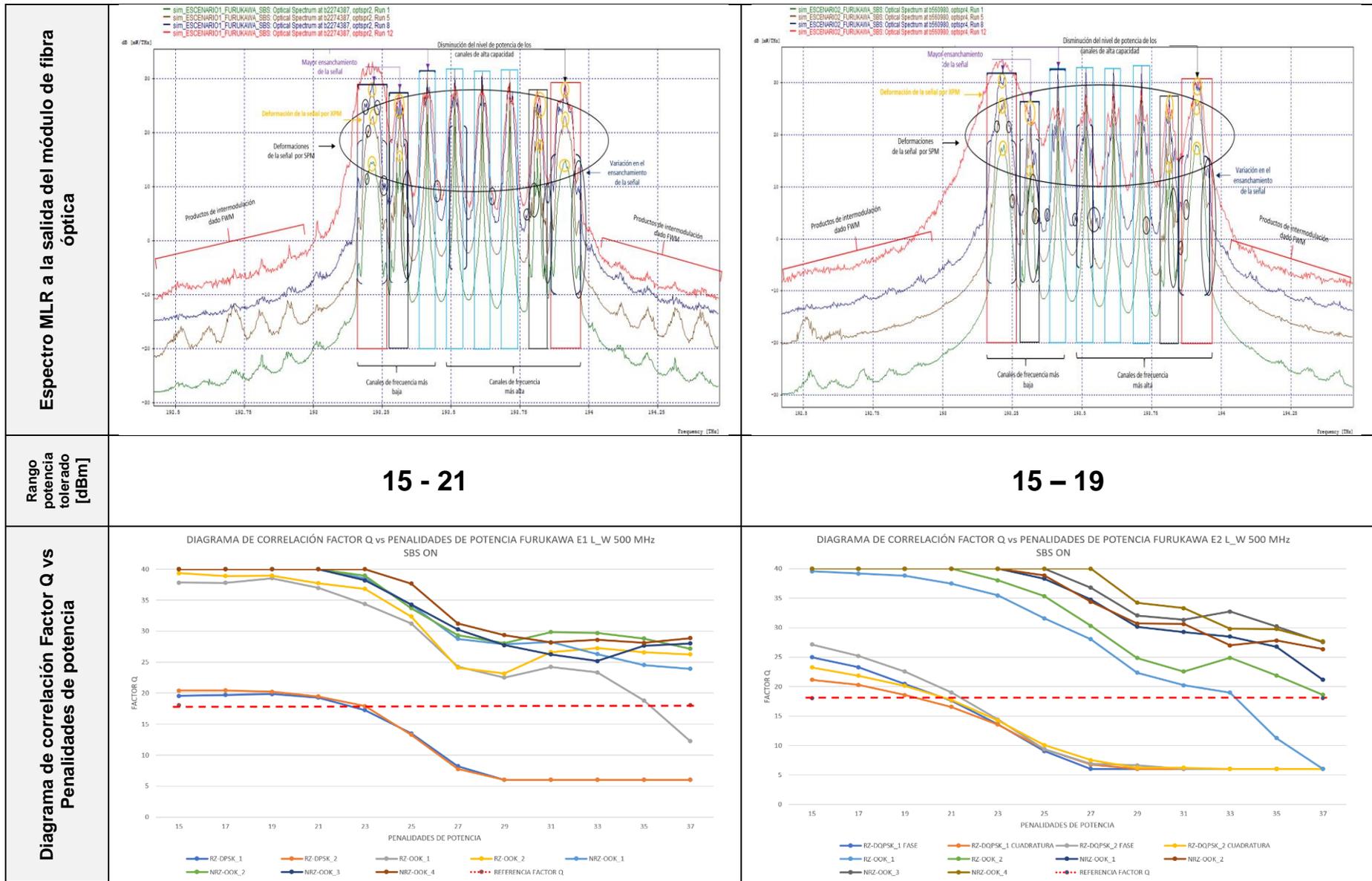


Diagrama de correlación BER vs Penalidades de potencia

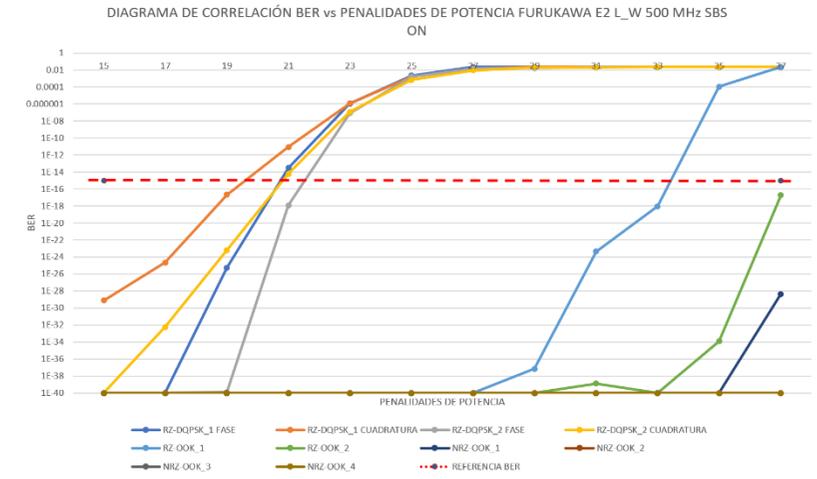
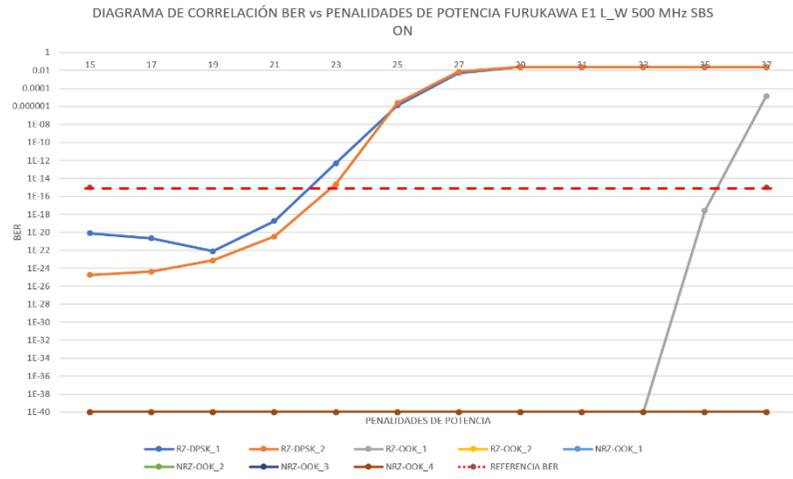


Tabla B.12: Caso de estudio 8: Escenario 1 Y 2 – SBS ON, Fabricante Furukawa, Separación entre canales de 100 GHz, Ancho de 500 MHz

## ANEXO C. ESQUEMA GENERAL USADO PARA EL ANÁLISIS DE SBS.

Esquema general aportado por *Jigesh Patel*, representante de Synopsis para la Universidad del Cauca, el cual se tomó como referencia directa del desarrollador para plantear todos los escenarios de simulación y casos de estudio en presencia del efecto de Scattering no lineal SBS.

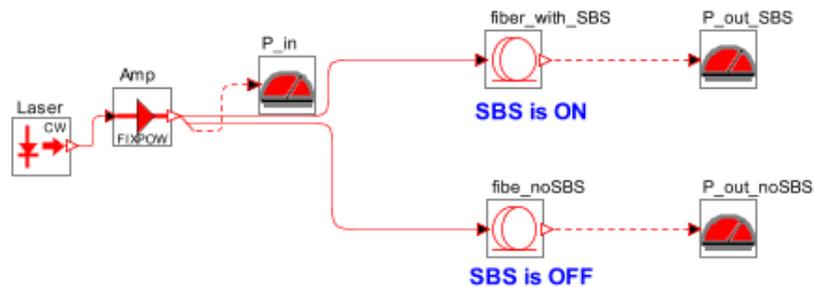


Figura C.1: Esquema general para análisis SBS.

Properties for fiber\_with\_SBS

Help Print From Disk... Load ... Save ...

Basic\_Attributes Loss Dispersion Statistical\_Dispersion Advanced\_Effects Raman\_Effects Raman\_Amplifier **SBS** Advanced\_Control Ports Naming

**fiber\_with\_SBS**

Parameter	Value	Units	Range
Fiber SBS	"On"		
Brillouin Gain	3.0E-11	mW	( 0, 1 )
Brillouin Gain Linewidth	40.0	MHz	( 0, 1000 )
Brillouin Gain Reference Frequency	193.0	THz	( 0, 1000 )
Frequency Brillouin Gain Peak	11.0	GHz	( 0, 1000 )
Signal Linewidth	= 100.0	MHz	( 0, 1e+006 )
Signal and Stokes Wave Relative Polarization Factor	1.5		[ 1, 2 ]

Figura C.2: Configuración de módulo de fibra óptica con efecto SBS activado.

Properties for fibe\_noSBS

Help Print From Disk... Load ... Save ...

Basic\_Attributes Loss Dispersion Statistical\_Dispersion Advanced\_Effects Raman\_Effects Raman\_Amplifier **SBS** Advanced\_Control Ports Naming

**fibe\_noSBS**

Parameter	Value	Units	Range
Fiber SBS	"Off"		
Brillouin Gain	3.0E-11	mW	( 0, 1 )
Brillouin Gain Linewidth	40.0	MHz	( 0, 1000 )
Brillouin Gain Reference Frequency	193.0	THz	( 0, 1000 )
Frequency Brillouin Gain Peak	11.0	GHz	( 0, 1000 )
Signal Linewidth	= 100.0	MHz	( 0, 1e+006 )
Signal and Stokes Wave Relative Polarization Factor	1.5		[ 1, 2 ]

Figura C.3: Configuración de módulo de fibra óptica con efecto SBS desactivado

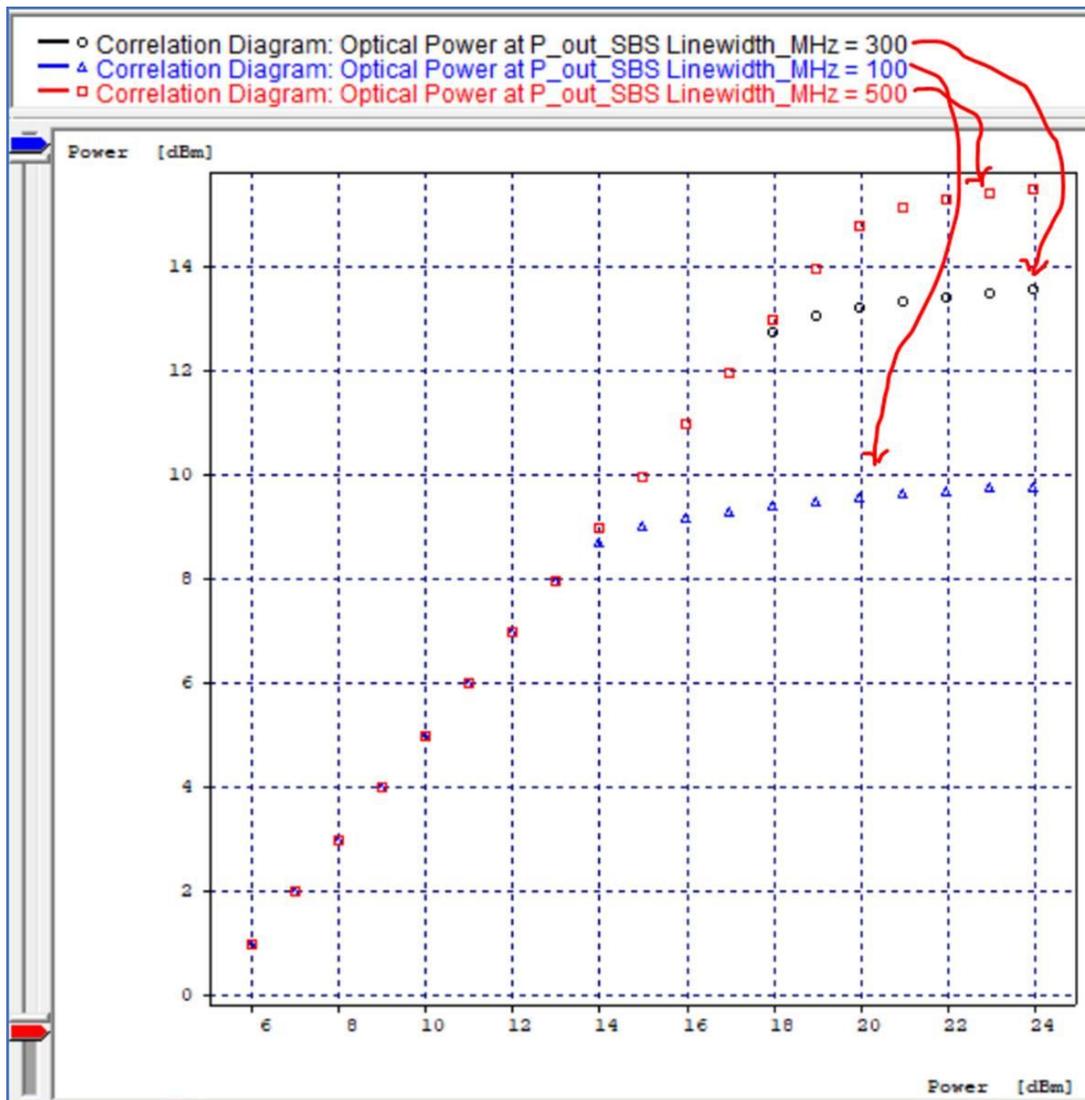


Figura C.4: Diagrama de correlación tipo family Plot de Potencia a la salida de la fibra óptica vs Potencia a la entrada, en función del ancho de línea de la señal, Fuente: Jigesh Patel.

- Jigesh Patel confirma además que “si los escaneos no funcionan, el problema puede estar relacionado con el antivirus/firewall bloqueando alguno de los puertos UPD que el Modo Muestras de Opstsim utiliza, Por favor, habiliten esos puertos en la configuración de su antivirus/firewall:
  - 27020 (used by license manager)
  - 50187 (used by JetOptSim)
  - 50189 (used by optgoi)
  - 50191 (used by virlab)
  - 50196 (used by oplaser)
  - 50197