

DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICO
MULTIPORTADORA FRENTE A LOS FENÓMENOS CAUSADOS POR EL
EFECTO KERR



Universidad
del Cauca

NAZLY ANDREA ACOSTA BUSTAMANTE
CARLOS MARIO MEDINA FERNANDEZ

Trabajo de Grado

Director:
GUSTAVO ADOLFO GÓMEZ AGREDO
MsC. en Electrónica y Telecomunicaciones

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

DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICO
MULTIPORTADORA FRENTE A LOS FENÓMENOS CAUSADOS POR EL
EFECTO KERR

NAZLY ANDREA ACOSTA BUSTAMANTE
CARLOS MARIO MEDINA FERNANDEZ

Documento final de Trabajo de Grado presentado a la Facultad de Ingeniería en
Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca para optar por el título
de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Director:
MsC. Gustavo Adolfo Gómez Agredo

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

*Dedico este logro a Dios por guiar cada paso que doy,
a Guillermo Acosta y Paola Bustamante, quienes han sido mi motor, mi ejemplo, mi
fortaleza y mi lugar seguro; hoy, con amor les ofrezco este título.
A Santiago Acosta B. y Juliana Acosta B. por ser mi energía y mi polo a tierra
Y a mi apreciada familia por su apoyo inquebrantable y cercano durante todo este
proceso. Con amor su ingeniera de confianza*

Nazly Andrea Acosta Bustamante

*Dedico este logro a Fernando Medina y Lily Fernández,
quienes siempre han sido la inspiración para alcanzar mis sueños;
a mi hermano Andrés Fernando, y mi sobrino Miguel Andrés,
quienes me llenan de energía. Gracias por ser la familia que siempre me ha apoyado.
A todas las personas que de alguna forma me acompañaron en esta etapa,
forjando en mi persona valores que me hacen un buen profesional y ser humano.*

Carlos Mario Medina Fernández

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al MsC. Gustavo Adolfo Gómez Agredo, director del trabajo de grado, por su valiosa orientación.

Al grupo de investigación de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT y al Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, por sus portes y contribuciones en el desarrollo de este trabajo de grado.

También expresan un agradecimiento muy especial a sus familiares y amigos por su acompañamiento y apoyo incondicional, y sin los cuales, no se habría podido culminar satisfactoriamente esta etapa de nuestras vidas.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABLAS	X
LISTA DE ACRÓNIMOS	XI
INTRODUCCIÓN	XIII
ABSTRACT	XVI
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. REDES ÓPTICAS PASIVAS CON CAPACIDAD DE GIGABIT	1
1.1.1. Grupo FSAN	2
1.1.2. Arquitectura de red	5
1.1.3. Configuración de referencia	7
1.2. REDES DE COMUNICACIÓN ÓPTICAS AVANZADAS	13
1.2.1. VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA ÚNICA (SLR) .	14
1.2.2. VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA MIXTA (MLR)	16
1.3. DEGRADACIONES ÓPTICAS DE ORDEN SUPERIOR CAUSADAS POR EL EFECTO KERR	20
1.3.1. SPM	22
1.3.2. XPM	24
1.3.3. FWM	26
1.4. INCIDENCIA DE LOS FENÓMENOS NO LINEALES BASADOS EN EL EFECTO KERR SOBRE LAS REDES ÓPTICAS AVANZADAS .	28
2. MARCO METODOLÓGICO	31
2.1. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN	31
2.1.1. OptSim	32
2.2. METODOLOGÍAS	34
2.2.1. METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DEL PROYECTO . .	35
2.2.2. METODOLOGÍA PARA LA INVESTIGACIÓN	36
2.2.3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN	40
2.3. MODELO DE SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES ÓPTICO MULTIPORTADORA DE TIPO MLR	43
2.3.1. Caracterización del modelo de simulación	43
2.3.2. Implementación del modelo general	46
2.4. CASOS DE ESTUDIO	68

3. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES ÓPTICO MULTIPORTADORA FRENTE A FENÓMENOS CAUSADOS POR EL EFECTO KERR	70
3.1. RED MLR CON MEDIO DE TRANSMISIÓN SOBRE FIBRA ÓPTICA LUCENT TRUE WAVE 1550	70
3.1.1. Análisis para 0 dBm de potencia.	71
3.1.2. Análisis para 2.5 dBm de potencia.	79
3.1.3. Análisis para 5 dBm de potencia.	86
3.1.4. Variación y Análisis para el caso con mejores resultados 5 dBm	94
3.2. RED MLR CON MEDIO DE TRANSMISIÓN SOBRE FIBRA ÓPTICA CORNING LEAF	96
3.2.1. Análisis para 0 dBm de potencia.	97
3.2.2. Análisis para 2.5 dBm de potencia.	102
3.2.3. Análisis para 5 dBm de potencia.	109
3.2.4. Variación y Análisis para el caso con mejores resultados 5 dBm	116
4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	119
4.1. CONCLUSIONES	119
4.1.1. Conclusiones sobre los resultados	119
4.1.2. Conclusiones sobre la investigación	121
4.2. RECOMENDACIONES	123
4.3. TRABAJOS FUTUROS	124
ANEXOS	126
.1. Anexo A: Datasheet de Fibra óptica Corning SMF-28e	126
.2. Anexo B: Datasheet de Fibra óptica Lucent TrueWave	130
.3. Anexo c: Datasheet de Fibra óptica Corning Leaf	134
REFERENCIAS	139

LISTA DE FIGURAS

1.1.	Hoja de ruta de la madurez tecnológica 1.0. Tomado de [6]	3
1.2.	G.984.1 Arquitectura de red	5
1.3.	G.984.1 – Configuración de referencia para GPON	7
1.4.	Hoja de ruta de estándares FSAN 2.0 (Standards Roadmap). Tomado de [6]	9
1.5.	Conceptos de distancias G.987. Tomado de [10]	10
1.6.	La BER de salida del receptor en función de la potencia óptica recibida y la definición del rango dinámico. Tomado de [11]	11
1.7.	Conceptos de distancias G.9807.1. Tomado de [11]	12
1.8.	Escenario de Protección dedicado. Tomado de [12]	15
1.9.	Simulación de esquema básico de una red SLR	16
1.10.	Esquema básico de una red MLR. Tomada de [14]	17
1.11.	Esquema básico de una red MLR. Tomada de [14]	18
1.12.	Simulación de esquema básico de una red MLR.	19
1.13.	Clasificación de los efectos no lineales. Tomada de [18]	20
1.14.	efecto de SPM sobre un pulso que se propaga tomado de	23
1.15.	efecto de SPM sobre una señal óptica. Tomado de	24
1.16.	efecto de XPM tomado de	24
1.17.	Simulación efecto de XPM tomado de	25
1.18.	efecto FWM tomado de [25]	26
1.19.	efecto de FWM sobre una señal óptica tomado de	27
1.20.	Efecto de los Fenómenos No Lineales vs Velocidad de Acceso tomado de	29
1.21.	Clasificación de los efectos no lineal intercanal tomado de	29
1.22.	Efectos Degradación Predominantes Según el Nivel de Acceso. Tomado de	30
2.1.	Entorno gráfico del software de simulación OptSim	33
2.2.	Grafo de actividades. De los Autores.	35
2.3.	Proceso cuantitativo Tomado de [27]	37
2.4.	Proceso cualitativo Tomado de [27]	38
2.5.	Clasificación de la metodología de la investigación	39
2.6.	Algoritmo de simulación para la herramienta OptSim. De los Autores. .	42
2.7.	Red MLR 10 Canales	49
2.8.	Configuración del Láser.	50
2.9.	Módulo del transmisor del canal a 40 Gbps.	51
2.10.	Espectro Óptico de los 10 canales, de los Autores.	51
2.11.	Características Generales Fibra Corning SMF 28e, tomada de [].	53
2.12.	Recepción para el canal 1 de 40 Gbps, de los Autores.	54
2.15.	Desempeño ideal de una red MLR en Back to Back.	56
2.16.	Ancho de banda útil de red MLR inicial, de los Autores.	58
2.17.	Espectro óptico de 10 canales a 0 dBm	59

2.20. Espectro optico para los canales de 2.5 Gbps, 10 Gbps y 40 Gbps	60
2.21. Espectro óptico de 10 canales a 2.5 dBm	61
2.22. Desempeño del canal para 2.5 Gbps	62
2.23. Desempeño del canal para 10 Gbps	63
2.24. Desempeño del canal para 40 Gbps	64
2.25. Espectro óptico de 10 canales a 5 dBm	65
2.29. Casos de estrudio.	68
3.1. Red MLR 10 Canales - Láser CW: 0 dBm - Índice Refracción: 1.470, de los autores.	72
3.2. Espaciamento de los canales recibidos.	73
3.3. Espectro óptico de 10 canales a 0 dBm	74
3.4. Desempeño de canales a 40 Gbps	75
3.5. Desempeño de canales a 2.5 Gbps	76
3.6. Desempeño de canales a 10 Gbps	77
3.7. Comparación Diagrama de ojo canal 2.5 Gbps Vs 40 Gbps	78
3.8. Red MLR 10 Canales - Láser CW a 2.5 dBm - Índice Refracción: 1.470, de los autores.	80
3.9. Espaciamento de los canales recibidos.	81
3.10. Espectro óptico de 10 canales a 2.5dBm.	82
3.11. Espectro óptico de 10 Gbps	83
3.12. Espectro óptico de 40Gbps	84
3.14. Comparación Diagrama de ojo canal 40 Gbps Vs 2.5 Gbps	85
3.15. Red MLR 10 Canales - Láser CW a 5 dBm - Índice Refracción: 1.470, de los autores.	87
3.16. Espaciamento de los canales recibidos.	88
3.17. Espectro óptico de 10 canales a 5 dBm	89
3.18. Desempeño de canales a 2.5 Gbps	91
3.19. Desempeño de canales a 10 Gbps	92
3.20. Desempeño de canales a 40 Gbps	92
3.21. Comparación Diagrama de ojo canal 40 Gbps Vs 2.5 Gbps	93
3.22. Comparación 10 Gbps para potencia de 2.5 dBm y 5 dBm	95
3.23. Canal 1 con velocidad de 40 Gbps	95
3.24. Espectro óptico de 10 canales a 0 dBm	97
3.25. Red MLR 10 Canales - Láser CW a 0 dBm - Índice Refracción: 1.493, de los autores.	98
3.26. Desempeño de canales a 10 Gbps	99
3.27. Desempeño de canales a 2.5 Gbps	100
3.28. Desempeño de canales a 40 Gbps	101
3.29. Red MLR 10 Canales - Láser CW a 2.5 dBm - Índice Refracción: 1.493, de los autores.	103
3.30. Espaciamento de los canales recibidos, de los autores.	104
3.31. Espectro óptico de 10 canales a 2.5 dBm	105
3.32. Desempeño de canales a 2.5 Gbps	107

3.33. Desempeño de canales a 10 Gbps	107
3.34. Desempeño de canales a 40 Gbps	108
3.35. Comparación Diagrama de ojo canal 40 Gbps Vs 2.5 Gbps	109
3.36. Red MLR 10 Canales - Láser CW a 5 dBm - Índice Refracción: 1.493, de los autores.	110
3.37. Espaciamiento de los canales recibidos.	111
3.38. Espectro óptico de 10 canales a 5 dBm	112
3.39. Desempeño de canales a 2.5 Gbps	114
3.40. Desempeño de canales a 10 Gbps	114
3.41. Desempeño de canales a 40 Gbps	115
3.42. Comparación Diagrama de ojo canal 40 Gbps vs 2.5 Gbps	116
3.43. Canal 1 con velocidad de 40 Gbps	117
1. datasheet Fibra óptica Corning smf-28e [41]	129
2. datasheet Fibra óptica Lucent TrueWave [32]	133
3. datasheet Fibra óptica Corning Leaf [33]	135

LISTA DE TABLAS

1.1.	Participantes FSAN. Tomado de [7]	4
1.2.	Comparación de Características de Redes PON. Adaptada de [7]	13
2.1.	Comparación de herramientas de simulación	32
2.2.	Formato de modulación, adaptada de [15]	45
2.3.	Características de simulación, adaptada de [15]	48
2.4.	Parámetros OPM para red MLR. De los autores	55
2.5.	Parámetros OPM para red MLR con 0 dBm. De los autores	59
2.6.	Parámetros OPM para red MLR con 2.5 dBm. De los autores	62
2.7.	Parámetros OPM para red MLR con 5 dBm. De los autores	65
3.1.	Parámetros OPM para red MLR con 0 dBm. De los autores	75
3.2.	Parámetros OPM para red MLR con 2.5 dBm. De los autores	82
3.3.	Parámetros OPM para red MLR con 5 dBm. De los autores	90
3.4.	Parámetros del canal 3 para 2.5 dBm y 5 dBm. De los autores	94
3.5.	Parámetros OPM para red MLR con 0 dBm. De los autores	99
3.6.	Parámetros OPM para red MLR con 2.5 dBm. De los autores	106
3.7.	Parámetros OPM para red MLR con 5 dBm. De los autores	113
3.8.	Parámetros del canal 3 para 2.5 dBm y 5 dBm. De los autores	116
4.1.	Características de los modelos de red. De los autores	121

LISTA DE ACRÓNIMOS

PERT	<i>Program Evaluation and Review Technique</i> , Técnica de Revisión y Evaluación de Programas
MLR	<i>Mixed Line Rate</i> , Tasa de Transmisión de Línea Mixta
SLR	<i>Single Line Rate</i> , Tasa de Transmisión de Línea Única
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i> , Gastos de Capital
MF	<i>Mixed Format</i> , Formato Mixto
NRZ	<i>Non Return To Zero</i> , No retorno a Cero
OOK	<i>On-Off Keying</i> , Modulación por Encendido y Apagado
DPSK	<i>Differential Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial
GNLSE	<i>General Schrodinger Nonlinear Equation</i> , Ecuación No Lineal de Schrödinger Generalizada
SPM	<i>Self Phase Modulation</i> , Auto Modulación de Fase
XPM	<i>Cross Phase Modulation</i> , Modulación de Fase Cruzada
FWM	<i>Four-wave Mixing</i> , Mezcla de Cuatro Ondas
QoT	<i>Quality of Transmission</i> , Calidad de Transmisión
PON	<i>Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Tiempo
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda
TWDM	<i>Time and Wavelength Division Multiplexed</i> , Multiplexada por División de Tiempo y Longitud de Onda
BER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit
AON	<i>Active Optical Network</i> , Red Óptica Activa
NF	<i>Noise Figure</i> , Figura de Ruido

NG-PON	<i>Next Generation Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva de Nueva Generación
NG-PON2	<i>Next Generation Passive Optical Network 2</i> ,
TWDM-PON	<i>,Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network</i> Red Óptica Pasiva Multiplexada por División de Tiempo y Longitud de Onda
GPON	<i>Gigabit Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva con Capacidad de Gigabit
SRS	<i>Scattering Raman Stimulated</i> , Esparcimiento Estimulado de Raman
SBS	<i>Scattering Brillouin Stimulated</i> , Esparcimiento Estimulado de Brillouin
ONU	<i>Optical Network Unit</i> , Unidad de red óptica
OLT	<i>Optical Line Terminal</i> , Terminal de Línea Óptica
ODN	<i>Optical Distribution Network</i> , Red de Distribución Óptica
MC	<i>Multi-Carrier Modulation</i> , Modulación Multiportadora
ICI	<i>Inter-Carrier Interference</i> , Interferencia Interportadora
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i> , Dispersión por Modo de Polarización
CD	<i>Chromatic Dispersion</i> , Dispersión Cromática
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa
OSNR	<i>Optical Signal To Noise Ratio</i> , Relación Señal Óptica a Ruido
XGS-PON	<i>10-Gigabit-Capable Symmetric Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva Simétrica con Capacidad de 10 Gbps
FTTX	<i>Fiber To The X</i> , Fibra Hasta el Lugar
FTTH	<i>Fiber To The Home</i> , Fibra Hasta el Hogar
FTTB	<i>Fiber To The Building</i> , Fibra Hasta el Edificio
APD	<i>Avalanche PhotoDiode</i> , Diodo Fotodetector de Avalancha
PIN	<i>PIN Photodiode</i> , Receptor Óptico Tipo PIN

INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de la información y las comunicaciones TIC's, son un instrumento que facilita el desarrollo de actividades económicas y sociales, siendo un gran impulsor de la productividad de los países. Las redes de Fibra Óptica Pasiva PON (*Passive Optical Network*), se han utilizado para otorgar un mejor servicio de comunicación y conectividad, brindando así un gran apoyo al desarrollo colectivo de las personas, países, y mundo en general. Sin embargo, las comunicaciones por fibra óptica han experimentado un enorme crecimiento en la última década, impulsadas principalmente por la demanda de alta capacidad debido al crecimiento del tráfico de Internet que genera una necesidad constante de implementar nuevas redes que faciliten la transmisión de datos y que hagan mejor uso del ancho de banda. De acuerdo a lo anterior, en telecomunicaciones, la tecnología Red Ópticas Pasiva con Capacidad de Gigabit GPON (*Gigabit Passive Optical Network*) permite un avance significativo en los servicios ofrecidos, llegando a los usuarios sin interferencias ni retrasos en comparación a tecnologías anteriores y mejorando la calidad de servicio y experiencia de los usuarios, como también ahorrando en costos de operación y mantenimiento (OPEX y CAPEX respectivamente) [1]. Pero estas redes, que convencionalmente son heredadas de velocidad de línea Única SLR (*Single Line Rate*), no garantizan una infraestructura eficiente capaz de admitir un número creciente y variable de tráfico de datos generado por la diversificación de aplicaciones que requieren mayor ancho de banda y velocidad de datos.

Debido a esta demanda surge la necesidad de crear sistemas cada vez más complejos como las redes “inteligentes”, con características enfocadas a una mayor robustez, reconfigurabilidad, flexibilidad y seguridad. Donde el objetivo principal es transportar un gran volumen de tráfico a altas velocidades nominales y aumentar la capacidad de los sistemas de comunicación óptica a través de técnicas de multiplexación como WDM, demostrando ser muy eficientes en la transmisión de grandes cantidades de información; [2] A pesar de ello, este propósito se ve afectado por degradaciones propias de los sistemas de comunicación, ya que al sobrepasar velocidades de transmisión de 10 Gbps y trabajar con altas potencias, el canal de comunicación ya no puede ser considerado un medio lineal, y es a partir de este momento donde se presentan los efectos no lineales como Auto Modulación de Fase SPM (*Self Phase Modulation*), Modulación de Fase Cruzada XPM (*Cross Phase Modulation*) y Mezcla de Cuatro Ondas FWM (*Four-wave Mixing*), que limitan el alcance de distancia requerida cuando se transmite a velocidades altas.

De acuerdo a lo anterior, se puede inferir que la velocidad de transmisión está limitada por la capacidad de ancho de banda del canal óptico. A medida que se aumenta la cantidad de datos que se transmiten a través del canal, la calidad de la señal puede

degradarse debido a los efectos mencionados previamente, lo que puede dar lugar a errores de transmisión y pérdida de datos. La velocidad de línea mixta MLR (*Mixed Line Rate*) permite superar estas limitaciones al utilizar múltiples canales ópticos para transmitir datos simultáneamente. En lugar de depender de un solo canal de alta velocidad, la red óptica utiliza varios canales de menor velocidad que se combinan para lograr una velocidad de transmisión total más alta.

Esta técnica se conoce como multiplexación de división de longitud de onda WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) y se ha convertido en la base de muchas redes ópticas modernas. Con WDM, cada canal óptico utiliza una longitud de onda diferente para transmitir datos, lo que permite que los datos se transmitan simultáneamente sin interferir entre sí.

En resumen, la velocidad de línea mixta en una red óptica que resuelve el problema de la limitación de la velocidad de transmisión de datos en una red de un solo canal y permite la transmisión simultánea de datos a través de múltiples canales ópticos.

Teniendo en cuenta la información recabada previamente, en el presente trabajo de investigación se realizó un análisis de desempeño de un sistema de comunicación óptico multiportadora frente a los fenómenos causados por el efecto Kerr implementando diferentes arquitecturas de red. A continuación, se describe el contenido de este trabajo de grado, el cual se distribuye en cuatro capítulos de acuerdo con la información obtenida en el desarrollo de la investigación.

Capítulo 1: Generalidades sobre Sistemas de Comunicaciones Ópticas con capacidad de gigabit GPON, Efectos no Lineales y Velocidad de Transmisión de Línea Mixta.

En este capítulo se detallan algunos aspectos generales sobre los sistemas de telecomunicaciones basados en fibra óptica. Se describen sistemas WDM haciendo énfasis en DWDM, se hace una caracterización de PON con enfoque en arquitecturas FTTx y luego se plantea la idea de red SLR, se define el concepto de red MLR y algunos de sus rasgos relevantes para el presente trabajo, finalmente se abarcan conceptos fundamentales sobre las degradaciones no lineales de tipo Kerr, y su relación con los sistemas ópticos avanzados.

Capítulo 2: Marco Metodológico sobre el Diseño de un sistema de comunicaciones ópticos Multiportadora

En este capítulo se definen la metodología y herramientas de simulación, mediante las cuales se hará el diseño y desarrollo de un modelo de red inicial y que posteriormente permitirán el planteamiento de los casos de estudio y escenarios de simulación para el presente trabajo.

Capítulo 3: Análisis del Desempeño Frente a fenómenos causados por el efecto Kerr

En este capítulo se realiza el análisis del desempeño de los modelos de red MLR que implementan arquitecturas FTTx obtenidos a partir del modelo inicial de red SLR y los casos de estudio y escenarios propuestos previamente, esto con el fin de identificar aquellas características y parámetros que intervienen para lograr que dichos modelos MLR trabajen en óptimas condiciones frente a la influencia de los fenómenos no lineales tipo Kerr.

Capítulo 4: Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros.

En el presente capítulo se exponen las conclusiones obtenidas, las recomendaciones y los trabajos futuros sugeridos en relación con los aspectos más destacados de la investigación realizada, la cual permitió el diseño, la configuración y la implementación de arquitecturas de red MLR, así como el cumplimiento de los objetivos establecidos.

Palabras clave:

Red Óptica Pasiva con Capacidad de Gigabit (GPON), Velocidad de transmisión de Línea Mixta (MLR), Auto Modulación de Fase (SPM), Modulación de Fase Cruzada (XPM), Mezcla de Cuatro Ondas (FWM).

ABSTRACT

Information and communication technologies (TIC'S) are an instrument that facilitates the development of economic and social activities, being a major driver of productivity in countries. In the last decade, PON Passive Optical Fiber networks (*Passive Optical Network*) have been used to provide a better communication and connectivity service, thus providing a great support to the collective development of people, countries and the world in general. However, fiber optic communications have experienced an enormous growth in the last decade, driven mainly by the demand for high capacity due to the growth of Internet traffic that generates a constant need to implement new networks that facilitate data transmission and make better use of bandwidth. Accordingly, in telecommunications, Passive Optical Network technology with Gigabit GPON (*Gigabit Passive Optical Network*) capacity allows a significant advance in the services offered, reaching users without interference or delays compared to previous technologies and improving the quality of service and user experience, as well as saving on operating and maintenance costs (OPEX and CAPEX respectively) [1]. But these networks, which are conventionally legacy Single Line Rate SLR (*Single Line Rate*), do not guarantee an efficient infrastructure capable of supporting a growing and variable number of data traffic generated by the diversification of applications that require higher bandwidth and data rate.

Due to this demand arises the need to create increasingly complex systems such as "intelligent" networks, with features focused on greater robustness, reconfigurability, flexibility and security. Where the main objective is to carry a large volume of traffic at high nominal speeds and increase the capacity of optical communication systems through multiplexing techniques such as WDM, proving to be very efficient in the transmission of large amounts of information; [2] Despite this, this purpose is affected by degradations inherent to the communication systems, since when exceeding transmission speeds of 10 Gbps and working with high powers, the communication channel can no longer be considered a linear medium, and it is at this point where non-linear effects such as Self Phase Modulation SPM (*Self Phase Modulation*), Cross Phase Modulation XPM (*Cross Phase Modulation*) and Four-Wave Mixing FWM (*Four-Wave Mixing*) occur, which limit the required distance range when transmitting at high speeds.

Based on the above, it can be inferred that the transmission rate is limited by the bandwidth capacity of the optical channel. As the amount of data transmitted through the channel increases, the signal quality may degrade due to the previously mentioned effects, which may result in transmission errors and data loss. MLR (*Mixed Line Rate*) overcomes these limitations by using multiple optical channels to transmit data simultaneously. Instead of relying on a single high-speed channel, the optical network uses

multiple lower-speed channels that are combined to achieve a higher overall transmission rate.

This technique is known as Wavelength Division Multiplexing (WDM) and has become the basis of many modern optical networks. With WDM, each optical channel uses a different wavelength to transmit data, allowing data to be transmitted simultaneously without interfering with each other.

In summary, mixed line rate in an optical network solves the problem of data rate limitation in a single channel network and allows simultaneous data transmission over multiple optical channels.

Taking into account the information previously collected, this research work will analyze the performance of a multicarrier optical communication system against the phenomena caused by the Kerr effect by implementing different network architectures. Next, the content of this degree work is described, which is distributed in four chapters according to the information obtained in the development of the research.

Chapter 1: Overview of GPON Gigabit Optical Communications Systems, Non-Linear Effects and Mixed Line Transmission Rate

Chapter 2: Methodological Framework on the Design of an Optical Multi-carrier Communications System

Chapter 3: Analysis of Performance in the face of phenomena caused by the Kerr effect

Chapter 4: Conclusions, Recommendations and Future Work.

This chapter presents the conclusions obtained, recommendations and suggested future work in relation to the most outstanding aspects of the research carried out, which allowed the design, configuration and implementation of MLR network architectures, as well as the fulfillment of the established objectives.

Key Words:

Gigabit Capable Passive Optical Network (GPON), Mixed Line Rate (MLR), Self Phase Modulation (SPM), Cross Phase Modulation (XPM), Four Wave Mixing (FWM).

graphicx float amssymb, amsmath [spanish,es-tabla]babel array

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

A lo largo del tiempo, las telecomunicaciones han experimentado una evolución significativa para satisfacer la creciente necesidad de conectividad y el crecimiento exponencial de las redes de comunicaciones, el grupo de empresas operadoras FSAN (*Full Service Access Network*) ha realizado sinnúmero de investigaciones que aportan en el avance de esta evolución, donde la inclusión de las redes ópticas y nuevas tecnologías, permiten soportar un mayor ancho de banda, disponibilidad y velocidad, lo que se traduce en una gran capacidad para transportar más tráfico de datos simultáneamente.

La investigación y la adopción de nuevas tecnologías en las telecomunicaciones son fundamentales para satisfacer las necesidades de conectividad y soportar el creciente volumen de datos en el mundo digital, Por ello, en este capítulo se abordan conceptos teóricos basados en redes de Fibra Óptica, los cuales enmarcan definiciones sobre redes GPON, que utilizan tecnologías como SLR o MLR, y degradaciones no lineales causadas por el efecto Kerr.

1.1. REDES ÓPTICAS PASIVAS CON CAPACIDAD DE GIGABIT

En la actualidad, el acceso a servicios de alta velocidad y gran ancho de banda, como la televisión de alta definición (HDTV) y el protocolo de voz por Internet (VOIP), son una necesidad cada vez más frecuente en los hogares. Esto ha llevado a que desde la asociación industrial mundial de empresas operadoras (FSAN) surjan propuestas como la red de acceso FTTH (fibra hasta el hogar), que permite ofrecer estos servicios a un costo razonable. Entre las diferentes tecnologías disponibles para implementar la FTTH, la tecnología GPON (Giga Passive Optical Network) se destaca por su eficiencia y flexibilidad para manejar tecnologías y servicios ampliados en el futuro. En este capítulo, se presentará una descripción detallada de la tecnología GPON y su aplicación en las redes de acceso FTTH, incluyendo sus características técnicas y beneficios para los operadores de telecomunicaciones y los usuarios finales [3].

Según la especificación G.984.6 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones - Telecomunicación (UIT-T), la mayoría de los operadores de telecomunicaciones utilizan actualmente redes FTTH basadas en GPON debido a su flexibilidad para manejar tecnologías y servicios. Con la tecnología GPON, es posible incluir hasta 128 usuarios en una red con un alcance máximo de 60 km y una distancia máxima entre terminales

de red óptica consecutivos de 20 km. La transmisión de datos en sentido descendente alcanza los 2,44 Gbps, mientras que en sentido ascendente se llega a 1,24 Gbps [4].

1.1.1. Grupo FSAN

el grupo FSAN (*Full Service Access Network*), es una asociación industrial mundial compuesta por empresas operadoras y proveedores de infraestructura de red que están interesados y comprometidos con el avance de las redes de acceso óptico y los servicios asociados. El objetivo principal de FSAN, es coordinar el desarrollo de estándares de consenso voluntario en el campo de las redes de acceso óptico para mejorar la tecnología, y distribución de servicios y productos de acceso óptico de banda ancha en beneficio de la industria en general, sus clientes y consumidores [5].

La asociación FSAN busca lograr este objetivo a través de la discusión abierta sobre la información histórica, técnica y científica disponible públicamente, así como mediante la participación activa de sus miembros en las organizaciones de desarrollo de estándares relevantes. De esta manera, FSAN fomenta la colaboración y el intercambio de conocimientos y experiencias entre sus miembros, con el fin de impulsar el avance y la adopción de tecnologías y servicios de acceso óptico de alta calidad y eficiencia.

Historia

Desde su creación en 1995 por siete operadores de telecomunicaciones, FSAN ha desempeñado un papel fundamental en la formulación de los requisitos mínimos para los transceptores ópticos en la aplicación de acceso. A lo largo de sus 25 años de historia, la asociación ha trazado la ruta y coordinado la normalización de cuatro generaciones consecutivas de sistemas de red óptica pasiva de la Unión Internacional de Telecomunicaciones - sector Telecomunicación (UIT-T) ¹, lo que ha permitido el desarrollo y la adopción de tecnologías de acceso óptico cada vez más eficientes y de alta calidad. [5]

Evolución

La creación de una hoja de ruta de normas representa una herramienta crucial para orientar el trabajo de la FSAN y la industria en su conjunto. Con la publicación de las normas XGS-PON y NG-PON2 por parte del UIT-T, la FSAN ha logrado alcanzar los objetivos planteados en su hoja de ruta anterior. Con el fin de seguir fomentando el desarrollo tecnológico y la normalización en la industria, en noviembre de 2016 la

¹La UIT es el organismo especializado de las Naciones Unidas en el campo de las telecomunicaciones. La UIT-T (Sector de Normalización de las Telecomunicaciones) es un órgano permanente de la UIT. Este órgano estudia los aspectos técnicos, de explotación y tarifarios y publica Recomendaciones sobre los mismos, con miras a la normalización de las telecomunicaciones en el plano mundial.

FSAN ha presentado una nueva hoja de ruta de normas. Esta hoja de ruta servirá como guía y estímulo para el sector en su conjunto.

Además, el grupo FSAN está trabajando en la maduración de las tecnologías PON existentes, y que así, que sean adecuadas en aplicaciones de despliegue más amplio. Para cumplir dicho objetivo, la FSAN publicó en julio de 2017 una hoja de ruta sobre la madurez de la tecnología de acceso por fibra como guía para esta labor.

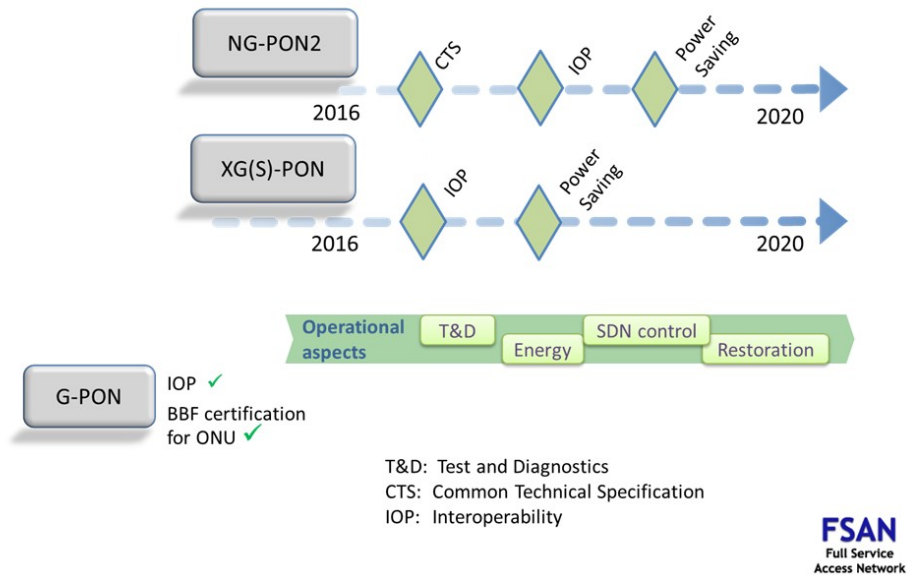


Figura 1.1: Hoja de ruta de la madurez tecnológica 1.0. Tomado de [6]

En 2022, los miembros operadores de FSAN acordaron renovar la Carta de la asociación para abordar el entorno tecnológico y regulatorio en evolución. Esta renovación refleja el compromiso continuo de FSAN con la mejora y el avance de las tecnologías y servicios de acceso óptico, así como con el fomento de la colaboración y el intercambio de conocimientos entre sus miembros y otras organizaciones relevantes. En resumen, FSAN ha sido un actor clave en la evolución de las redes de acceso óptico en las últimas décadas, y su renovación de la Carta demuestra su compromiso con el avance continuo de estas tecnologías en el futuro. [5]

Participantes

La participación en FSAN está abierta a todas las empresas interesadas en el avance de la tecnología, los servicios, los productos, los sistemas o los componentes de acceso óptico; siempre y cuando acepten los derechos y obligaciones establecidos en la Carta de FSAN. En este sentido, FSAN ofrece tres modalidades de participación que se ajustan a los requisitos y procedimientos establecidos en la Carta.

- **Miembro de FSAN:** abierto a empresas operadoras.

- **Consultor de FSAN:** abierto a representantes invitados de las comunidades de laboratorios de prueba de interoperabilidad, proveedores de componentes, investigación y sistemas.
- **FSAN Observer:** abierto a cualquier empresa.

La siguiente tabla muestra los participantes confirmados actuales de FSAN bajo la Carta de 2022, a la fecha 23 de febrero de 2023.

Rol	Organizaciones
Miembros	AT&T, Telecomunicaciones británicas, Telecomunicaciones de Chungghwa, Telecomunicación China, China Unicom, Deutsche Telekom, SK Telecom, Telekom Malasia, Verizon, etc.
Consultores	Infinera, Huawei, Nokia, Banda ancha Hisense, Mitsubishi, ZTE, Adtran Holdings, Redes alfa, Comunicaciones Bifrost, Broadcom, CableLabs, DZS, Laboratorios Altice, Ciena, Calix, etc.
Observadores	Industrias de Cambridge, EE. UU.

Tabla 1.1: Participantes FSAN. Tomado de [7]

Teniendo en cuenta que el objetivo principal del grupo FSAN es permitir que diferentes proveedores de servicios ofrezcan sus servicios a través de la misma red de acceso; y que a su vez estos brinden a los usuarios la capacidad de elegir entre una variedad de servicios, como Internet de alta velocidad, televisión por cable, telefonía, entre otros, en función de sus necesidades y preferencias. La corporación Infinera (consultor de FSAN), proporciona soluciones de conectividad de red para las redes más exigentes del mundo, en donde han logrado el desarrollo de motores y subsistemas ópticos coherentes, al igual que la fabricación avanzada de semiconductores ópticos.



En contexto, Infinera es un fabricante integrado verticalmente con sede en San José, California, y se especializa en la producción de equipos de transmisión óptica de paquetes basados en la tecnología de multiplexación por división de longitud de onda (WDM) [8] y tecnologías de transporte IP para el mercado de proveedores de servicios

de telecomunicaciones. Además, es reconocida como pionera en el diseño y fabricación a gran escala de circuitos integrados fotónicos (PIC).

La empresa ofrece una amplia gama de opciones de hardware y software de redes para operadores de nivel 1², proveedores de contenido de Internet, operadores de cable, gobiernos y redes empresariales. Estos productos y soluciones están diseñados para satisfacer las necesidades de conectividad y transmisión de datos de alta velocidad de sus clientes.

1.1.2. Arquitectura de red

La arquitectura de un sistema de red de acceso local se compone de una sección óptica que puede adoptar distintas configuraciones, como la arquitectura punto a punto o la arquitectura punto a multipunto, ya sea pasiva o activa. En la figura 1.2 se muestran algunas de las arquitecturas más comunes, que abarcan desde la fibra hasta la vivienda (FTTH, fiber to the home), la fibra hasta el edificio o la acometida (FTTB/C, fiber to the building/curb), hasta la fibra hasta el armario (FTTCab, fiber to the cabinet). Cabe destacar que todas estas arquitecturas comparten una red óptica de acceso (OAN), lo cual implica una gran ventaja en términos de economía,

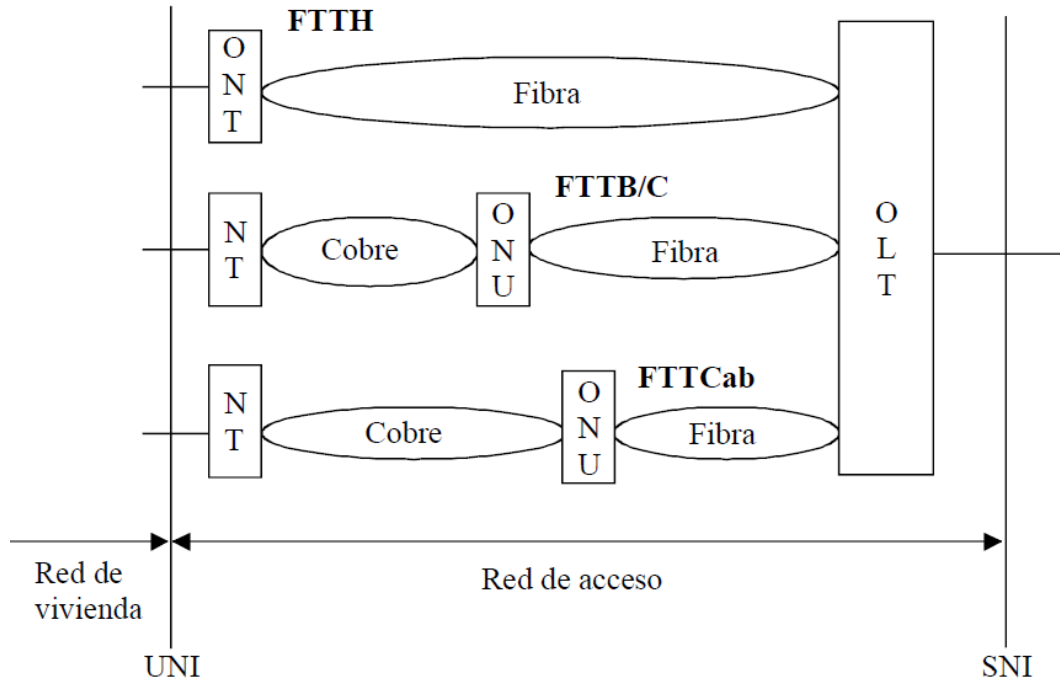


Figura 1.2: G.984.1 Arquitectura de red

²Un operador nivel 1, se refiere a proveedores que trabajan con redes de nivel 1, la cual es una red de protocolo de Internet (IP) que puede llegar a cualquier otra red en Internet únicamente a través de una interconexión sin liquidación

- ONU Unidad de red óptica (*Optical Network Unit*)
- ONT Terminación de red óptica (*Optical Network Termination*)
- OLT Terminación de línea óptica (*Optical Line Termination*)
- NT Terminación de red (*Network Termination*)

Para el escenario FTTCab/C/B se han considerado las siguientes categorías de servicio:

- Servicios de banda ancha asimétricos (por ejemplo, servicios de banda ancha digitales, VoD, Internet, aprendizaje a distancia, telemedicina, etc.).
- Servicios de banda ancha simétricos (por ejemplo, servicios de telecomunicación para pequeños clientes comerciales, teleconsulta, etc.).
- RTPC y RDSI. La red de acceso deberá poder proporcionar, de una manera flexible, los servicios telefónicos de banda estrecha con la temporización apropiada para la introducción.

Para el Escenario FTTH, las categorías de servicios consideradas para el escenario fibra a la vivienda (FTTH) son similares a las de los escenarios precedentes y se caracterizan por lo siguiente:

- Pueden considerarse ONU interiores, por lo que se obtienen condiciones ambientales más favorables.
- No es necesario modificar la ONU intermedia para perfeccionar las capacidades de la red de acceso con el fin de acomodar una futura evolución de servicios de banda ancha y medios.
- El mantenimiento es fácil, porque solo se requiere para sistemas de fibra, y se considera que todos los sistemas de fibra son más fiables de los sistemas mixtos de fibra y metal.
- FTTH es un método que promueve el desarrollo de tecnologías optoelectrónicas avanzadas. El mayor volumen de producción de los módulos ópticos repercutirá en una reducción del costo.

Cuando estos factores puedan explotarse plenamente, podrán contrapesar un costo por línea algo más elevado. En tal situación, el escenario FTTH puede considerarse como económicamente viable, incluso a corto plazo. Es por esta razón que en este escenario se incluyen las siguientes categorías de servicio:

- Servicios de banda asimétricos (por ejemplo, servicios de difusión digital, vídeo por demanda, telecarga de ficheros, etc.).

- Servicios de banda ancha simétricos (por ejemplo, difusión de contenidos, correo electrónico, intercambio de ficheros, cursos a distancia, telemedicina, juegos en línea, etc.).
- Servicio telefónico ordinario (POTS) y red digital de servicios integrados (RDSI). La red de acceso ha de ofrecer, de una manera flexible, servicios telefónicos de banda estrecha con la temporización adecuada para el acceso.

1.1.3. Configuración de referencia

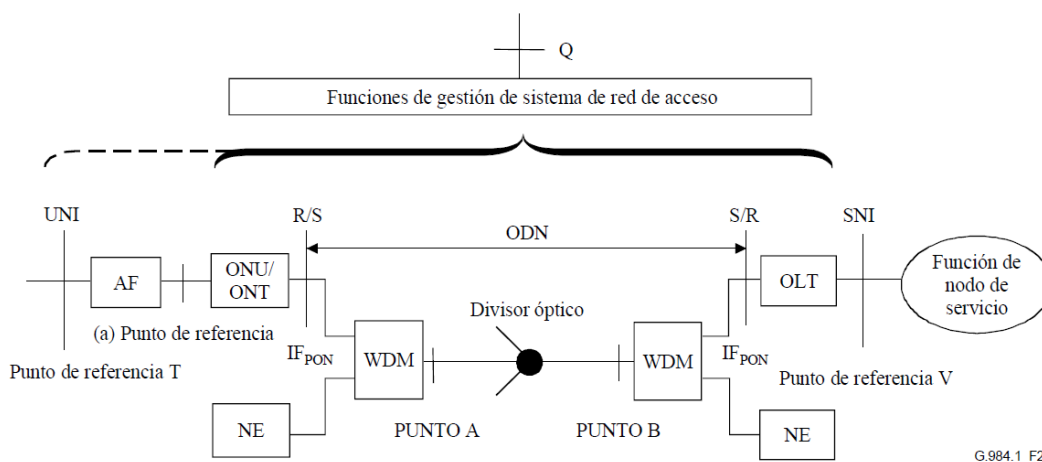


Figura 1.3: G.984.1 – Configuración de referencia para GPON

- **ONU** Unidad de red óptica
- **ONT** Terminación de red óptica
- **ODN** Red de distribución óptica
- **OLT** Terminación de línea óptica
- **WDM** Módulo de multiplexación por división de longitud de onda (esta función no es necesaria si no se emplea WDM)
- **NE** Elemento de red que utiliza las distintas longitudes de onda de la OLT y de la ONU
- **AF** Función de adaptación (algunas veces incluida en la ONU)
- **SNI** Interfaz de nodo de servicio
- **UNI** Interfaz usuario-red

- **S** Punto en la fibra óptica justo después del punto de conexión óptico OLT (sentido descendente)/ONU (sentido ascendente) (es decir, conector óptico o empalme óptico)
- **R** Punto en la fibra óptica justo antes del punto de conexión óptico ONU (sentido descendente)/OLT (sentido ascendente) (es decir, conector óptico o empalme óptico)
- **(a) Punto de referencia** Si la ONU incluye la AF, este punto no es necesario

De acuerdo a lo anterior, es necesario que la red GPON, dada su capacidad de banda ancha, soporte todos los servicios existentes y además los nuevos servicios en desarrollo para los abonados. Es de suma importancia entender y aplicar de manera correcta la configuración de dicha red nombrada para garantizar un buen servicio.

Básicamente, GPON está prevista para velocidades de transmisión mayores o iguales a 1,2 Gbit/s. Sin embargo, en el caso de FTTH o FTTC con línea de abonado digital (xDSL, digital subscriber line) asimétrica, es posible que no sea necesaria alta velocidad en sentido ascendente. Por consiguiente, la GPON identifica las 7 combinaciones de velocidades de transmisión siguientes, donde cada una representan una tecnología definida en la hoja de ruta de la FSAN:

- 622 Mbit/s sentido ascendente, 1,2 Gbit/s sentido descendente. (G-PON)
- 155 Mbit/s sentido ascendente, 2,4 Gbit/s sentido descendente. (G-PON)
- 1,2 Gbit/s sentido ascendente, 2,5 Gbit/s sentido descendente. (G-PON)
- 2,4 Gbit/s sentido ascendente, 10 Gbit/s sentido descendente. (XG-PON)
- 10 Gbit/s sentido ascendente, 10 Gbit/s sentido descendente. (XGS-PON)
- 40 Gbit/s sentido ascendente, 40 Gbit/s sentido descendente. (NG-PON2)

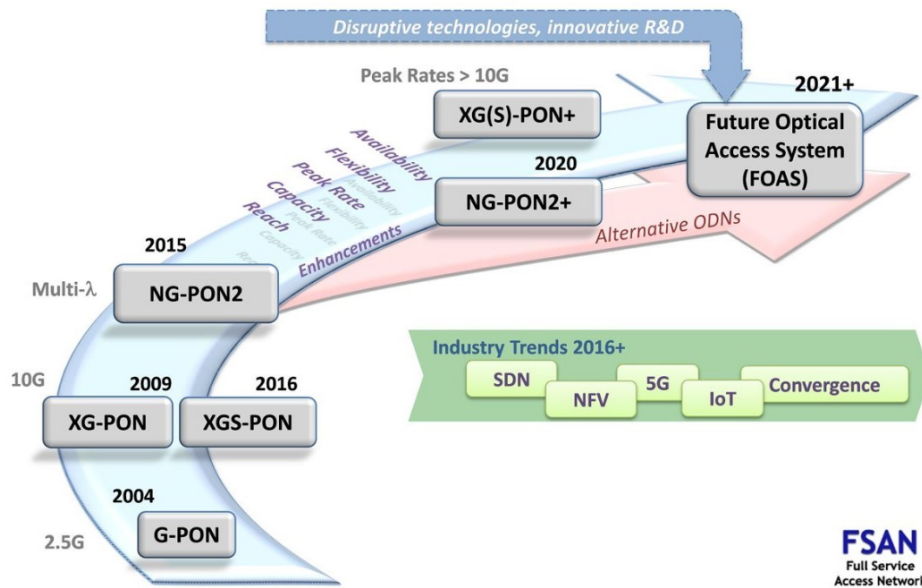


Figura 1.4: Hoja de ruta de estándares FSAN 2.0 (Standards Roadmap). Tomado de [6]

UIT-T G.984.1 - GPON

La tecnología GPON desempeña un papel fundamental al ofrecer capacidad de banda ancha necesaria para soportar tanto los servicios actuales como los nuevos servicios en desarrollo, tanto para abonados particulares como para empresas.

Si bien algunos operadores tienen una visión más clara que otros sobre los servicios específicos que deben proporcionar, esto está sujeto a las condiciones regulatorias particulares de cada mercado y a las oportunidades que ofrece su propio entorno empresarial. La entrega rentable de estos servicios depende de factores legales y de otros elementos, como la infraestructura de telecomunicaciones existente, la distribución de viviendas y la proporción de clientes particulares y empresariales.

En esta Recomendación se describe una red de acceso flexible de fibra óptica con capacidad para soportar las necesidades de ancho de banda de los servicios para empresas y particulares. Abarca sistemas con velocidades de línea nominales de 1,2 Gbit/s y 2,4 Gbit/s en sentido descendente, y de 155 Mbit/s, 622 Mbit/s; 1,2 Gbit/s y 2,4 Gbit/s en sentido ascendente. [9]

Es esencial garantizar que la tecnología GPON tenga la capacidad suficiente para satisfacer la creciente demanda de servicios y mantenerse al día con las necesidades cambiantes de los usuarios. Además, la adaptación de los servicios en función de las condiciones del mercado y de la infraestructura existente es clave para ofrecer soluciones rentables y eficientes.

En GPON, la máxima distancia de fibra es de 20 km. Esto afecta el tamaño de la ventana de determinación de distancia y es conforme con la Rec. UIT-T G.983.1.

UIT-T G.987.1 XG-PON

En esta Recomendación, se utiliza el término "Administración" de forma concisa para referirse tanto a una administración de telecomunicaciones como a una empresa de explotación reconocida.

El cumplimiento de esta Recomendación es voluntario. Sin embargo, es posible que contenga disposiciones obligatorias, como la garantía de interoperabilidad o aplicabilidad. El cumplimiento de la Recomendación se alcanza cuando se cumplen todas estas disposiciones obligatorias. Para expresar los requisitos, se utilizan palabras como "deberá", "debe", y sus equivalentes negativos, que tienen un carácter obligatorio. Sin embargo, el uso de estas palabras no implica que se exija a ninguna de las partes cumplir con la Recomendación. [10]

La serie de Recomendaciones UIT-T G.987.x aborda los parámetros de extensión lineal de XG-PON utilizando el concepto único de distancia de fibra. Una ONU se caracteriza por su distancia de fibra, y para cada par de ONU's en la misma interfaz OLT, la distancia de fibra diferencial es la diferencia entre las dos distancias de fibra individuales. Cada conjunto específico de parámetros de capa PMD contiene una disposición para soportar una distancia de fibra máxima específica. La especificación de la capa TC de XG-PON contiene una disposición para admitir rangos específicos de distancia de fibra máxima y distancia de fibra diferencial máxima. Estos rangos pueden configurarse para un sistema determinado.

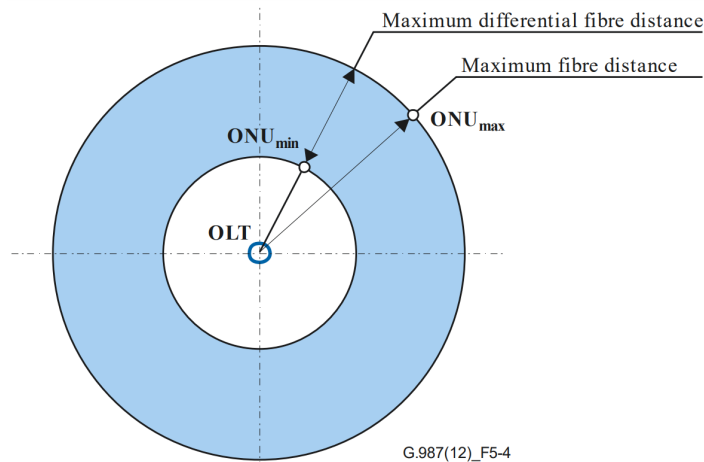


Figura 1.5: Conceptos de distancias G.987. Tomado de [10]

Cabe esperar que, para cada despliegue XG-PON, la distancia máxima de fibra con-

figurada en la capa TC debe coincidir con la distancia máxima de fibra admitida por el conjunto de parámetros de capa PMD seleccionado.

UIT-T G.9807.1 XGS-PON

La Recomendación UIT-T G.9807.1 describe un sistema de red óptica pasiva simétrica (XGS-PON) con capacidad de 10 Gigabits, en una red de acceso óptico para aplicaciones residenciales, empresariales, de backhaul móvil y otras. Este sistema funciona sobre una infraestructura de acceso óptico punto a multipunto a una velocidad de datos nominal de 10 Gbit/s tanto en sentido descendente como ascendente.

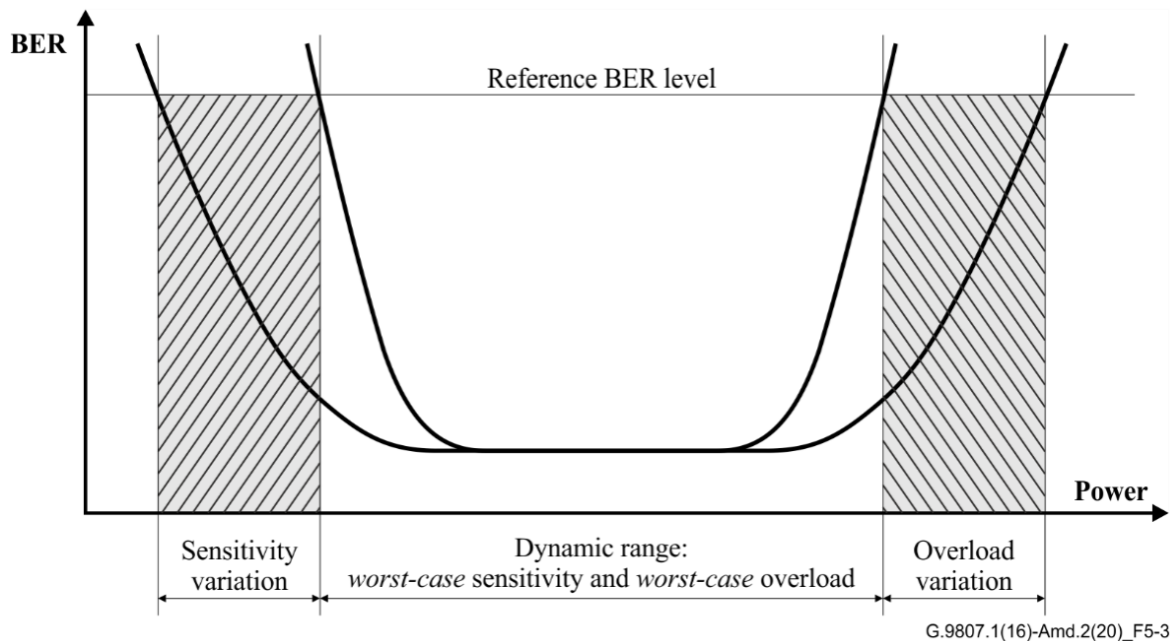


Figura 1.6: La BER de salida del receptor en función de la potencia óptica recibida y la definición del rango dinámico. Tomado de [11]

El concepto de la definición del rango dinámico se ilustra en la figura 1.6. La sensibilidad del receptor y la sobrecarga suelen entenderse, respectivamente, como la potencia óptica media recibida mínima y máxima a la que la relación de bits erróneos (BER) (a la salida del receptor) se mantiene en el nivel de referencia especificado.

Los valores observados de sensibilidad y sobrecarga del receptor pueden variar a medida que cambian: la temperatura de funcionamiento y la calidad de la señal. Las características de calidad de la señal que afectan a la sensibilidad del receptor y a la sobrecarga pueden incluir la llamada relación de extinción del transmisor, los parámetros del diagrama de ojo y la diafonía en banda.

Para el ejemplo, en la Recomendación actual, la sensibilidad del receptor y la sobrecarga del receptor se especifican formalmente mediante sus respectivos valores del caso más desfavorable, es decir, la sensibilidad máxima y la sobrecarga mínima en el intervalo de temperatura de funcionamiento y de parámetros de calidad de la señal, y en las condiciones de fin de vida útil.

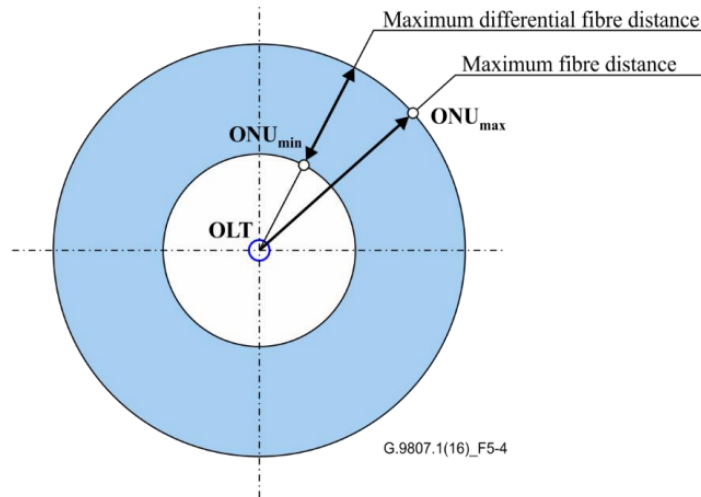


Figura 1.7: Conceptos de distancias G.9807.1. Tomado de [11]

Al igual que la serie de Recomendaciones UIT-T G.987, esta Recomendación aborda los parámetros de extensión lineal de XGS-PON utilizando el concepto único de distancia de fibra. Una unidad de red óptica (ONU) se caracteriza por su distancia de fibra, y para cada par de ONU en la misma interfaz PON de terminal de línea óptica (OLT), la distancia de fibra diferencial es la diferencia entre las dos distancias de fibra individuales. Cada conjunto específico de parámetros de la capa PMD contiene una disposición para soportar una distancia máxima de fibra específica. La especificación de la capa TC de XGS-PON contiene una disposición para admitir rangos específicos de distancia máxima de fibra y distancia máxima de fibra diferencial.

Estos rangos pueden configurarse para un sistema determinado. Se espera que, para cada despliegue XGS-PON, la distancia máxima de fibra configurada en la capa TC coincida con la distancia máxima de fibra admitida por el conjunto de parámetros de la capa PMD seleccionado. Los conceptos de distancia de fibra se ilustran en la Figura 1.7.

UIT-T G.989.1 NG-PON2

Los sistemas NG-PON2 son capaces de ofrecer una capacidad de bajada agregada de hasta 40 Gbit/s para una amplia variedad de aplicaciones residenciales, empresariales y de redes móviles de retorno, entre otras. También abarca las principales configuraciones de implementación, los escenarios de migración desde sistemas PON heredados,

así como los requisitos del sistema, incluyendo los requisitos operativos y de servicio, para garantizar una red de acceso óptico robusta y flexible que pueda soportar todas las aplicaciones de acceso.

De acuerdo con la recomendación UIT-T G.987.1, el sistema NG-PON2 tiene la capacidad de satisfacer las necesidades de diversas redes en diferentes mercados, y puede ser implementado eficientemente en numerosas aplicaciones. En la medida de lo posible, esta Recomendación mantiene las características de los sistemas PON anteriores, como las Recomendaciones de las series UIT-T G.982, UIT-T G.983, UIT-T G.984 y UIT-T G.987. Esto se hace con el objetivo de fomentar la compatibilidad hacia atrás con las redes de distribución óptica (ODN) existentes que cumplen con dichas Recomendaciones, y de reutilizar en la medida de lo posible las capacidades técnicas ya establecidas. Se espera que los sistemas NG-PON2 satisfagan el crecimiento de la demanda de ancho de banda y permitan generar nuevas fuentes de ingresos en las ODN heredadas, además de ofrecer soporte para aplicaciones nuevas en las nuevas ODN.

A continuación, en la tabla 1.2 se muestra una comparación detallada de las características de las redes PON. A medida que evolucionan, se observa un significativo avance en su capacidad para ofrecer velocidades cada vez más altas, con el fin de satisfacer las crecientes demandas de ancho de banda y brindar servicios de conectividad de calidad.

	GPON	XG-PON	XGS-PON	NG-PON2
Upstream (nm)	1260-1360	1260-1280	1260-1280	1524-1544
Downstream (nm)	1480-1500	1575-1580	1575-1580	1596-1603
Vídeo (nm)	1530-1565	1530-1565	-	-
Subida (Gbps)	1,2	2,5 / 10	10	40
Bajada (Gbps)	2,5	10	10	40

Tabla 1.2: Comparación de Características de Redes PON. Adaptada de [7]

1.2. REDES DE COMUNICACIÓN ÓPTICAS AVANZADAS

Las redes de comunicación óptica avanzadas se refieren a un conjunto de tecnologías y arquitecturas que han evolucionado para proporcionar mayores capacidades y velocidades de transmisión en las redes de comunicaciones ópticas. Estas redes utilizan tecnologías como la multiplexación por división de longitud de onda (WDM) y la transmisión óptica coherente para lograr velocidades muy altas y extender el alcance.

Además, las redes de comunicación óptica avanzadas suelen implementar técnicas de procesamiento digital de señales (DSP) para aumentar la eficiencia espectral y reducir

la tasa de errores en la transmisión de datos, también utilizan técnicas de modulación avanzada, como la modulación por amplitud en cuadratura (QAM), para aumentar la tasa de bits y mejorar la eficiencia espectral.

En resumen, las redes de comunicación óptica avanzadas han surgido como una solución para satisfacer las crecientes demandas de ancho de banda y velocidad de transmisión en las redes de comunicaciones. Gracias a sus características, se convierten en una tecnología crucial para la interconexión de redes a larga distancia y permitir la comunicación de alta velocidad.

A continuación se presentan dos tecnologías que representan un avance significativo para satisfacer las crecientes necesidades de transmisión de datos.

1.2.1. VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA ÚNICA (SLR)

Una red con Velocidad de Transmisión de Línea Única (SLR, *Single Line Rate*) es una red que utiliza la tasa máxima de transmisión de datos en una sola longitud de onda en una red de fibra óptica. En las redes de multiplexación por división de longitud de onda (WDM), donde se utilizan múltiples canales de longitud de onda para transmitir datos simultáneamente, la SLR de cada canal se transmite a una misma velocidad y es un factor crítico en la capacidad total de la red; a medida que la demanda de ancho de banda sigue creciendo, las velocidades de línea única son cada vez más altas. [12]

Las redes de velocidades de línea única han evolucionado a lo largo del tiempo, desde los 2,5 Gbps iniciales hasta los actuales 400 Gbps y 1 Tbps. Cada vez que se incrementa la velocidad de línea única, se requieren mejoras en la tecnología de transmisión, tales como la utilización de nuevos tipos de modulación o la incorporación de más canales de longitud de onda para lograr una tasa de transmisión de datos más alta.

En resumen, la velocidad de línea única es una medida importante de la capacidad de transmisión de una red de fibra óptica y ha evolucionado a lo largo del tiempo para satisfacer las demandas cada vez mayores de ancho de banda.

El concepto de SLR puede ser aplicado de manera más general en las redes ópticas, ya que muchos estándares adoptados por las entidades relacionadas y empleados por las empresas sugieren límites en las tasas de bits a utilizar en las redes. Por lo tanto, se define una capacidad específica que permita soportar el tráfico estimado para esas redes dentro de los valores ya establecidos. Esto se refleja en la evolución de las PON, cuyas características han sido promovidas y estandarizadas para el mercado por organismos como la ITU y el grupo FSAN.

En [12] se realiza un análisis para medir el rendimiento, al calcular la eficiencia del espectro para la protección en redes ópticas WDM que utilizan velocidades de línea única (SLR) como 100 Gb/s, 400 Gb/s y 1 Tb/s. El enfoque es garantizar la supervivencia de las topologías de red en malla; en estas topologías el trayecto a través del cual se realiza activamente la transmisión se denomina trayecto de trabajo o trayecto primario, mientras que el trayecto reservado para la recuperación se denomina trayecto de reserva o trayecto secundario.

La noción principal está en el número de trayectorias posibles para la transmisión de la señal y en la forma en la que se establecen los trayectos de reserva pre asignados en el momento de admitir una solicitud, que son enlaces disjuntos con sus correspondientes trayectos primarios. Este es uno de los métodos de protección tradicionales en el que los recursos se reservan de forma dedicada, como se muestra en la 1.8.

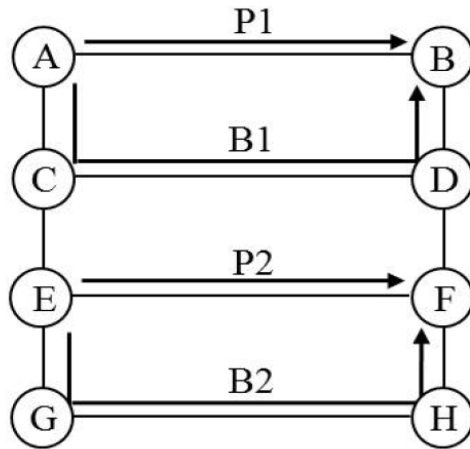


Figura 1.8: Escenario de Protección dedicado. Tomado de [12]

De la figura, las rutas pre configuradas (primaria (P) o de respaldo (B)) se indican con flechas sólidas, los caminos de respaldo B1 y B2 se configuran en el momento de establecer los caminos primarios P1 y P2 respectivamente (B1 y B2 están pre configurados). En caso de fallo de un enlace en un trayecto primario P1, el enfoque no requiere ninguna configuración adicional del conmutador para establecer el trayecto de reserva B1.

Por lo tanto, en este método el tráfico se redirige a través de B1 en un breve tiempo de recuperación. Sin embargo, los recursos de las rutas de backup B1 y B2 no pueden compartirse, como ocurre en la protección compartida tradicional, método que requiere más tiempo de recuperación para la configuración de los conmutadores si una ruta primaria se cae por un fallo.

Finalmente, la eficiencia del espectro se define como el uso optimizado del espectro

o ancho de banda para que pueda transmitirse la máxima cantidad de datos con el menor número de errores de transmisión. Esta eficiencia puede calcularse dividiendo la tasa total de bits de tráfico por el espectro total utilizado en la red en cuestión. A su vez, la velocidad binaria total del tráfico puede calcularse con el promedio de las velocidades de datos por canal (haces de luz), y el espectro total sería la multiplicación de la frecuencia utilizada para una sola longitud de onda y el número total de longitudes de onda (ranuras de ancho de banda) utilizadas en la red [13],

Por tanto, la eficiencia espectral para un número determinado de conexiones en una topología de red concreta depende de los caminos primarios y sus caminos de reserva desde cada origen a cada destino de las conexiones. Esto se debe a que el número de enlaces puede depender de la evaluación de la eficiencia del espectro.

Dentro de la Universidad del Cauca se han abordado trabajos de grado que han permitido desarrollar este tipo de redes SLR (*Single Line Rate*) como se muestra en la figura 1.9

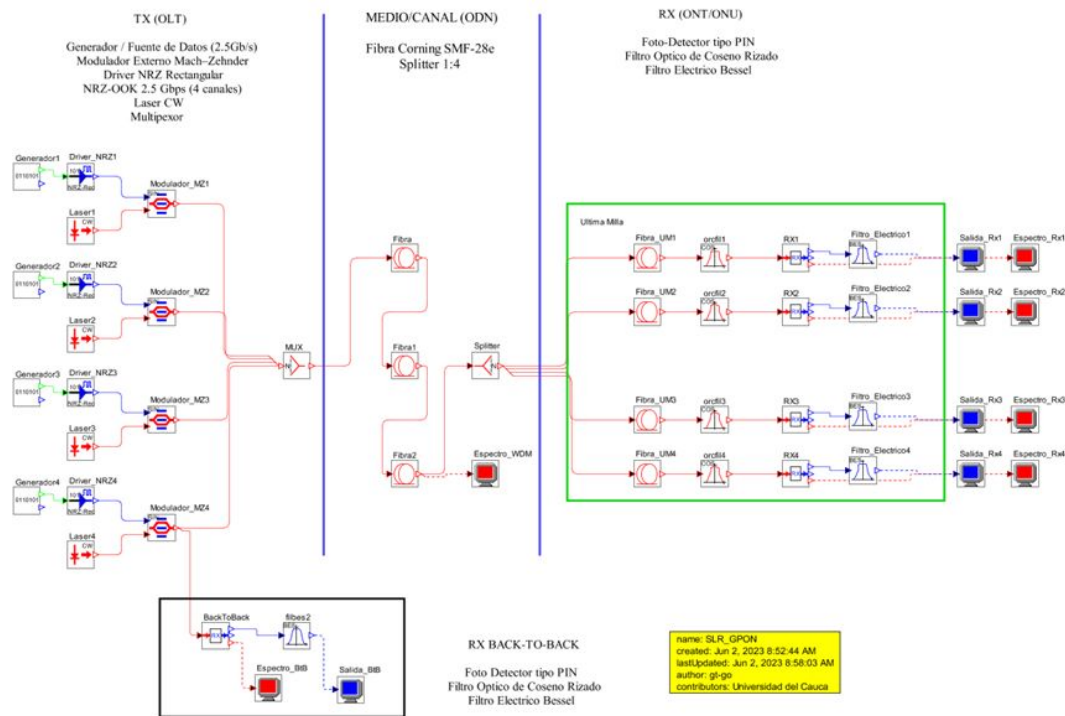


Figura 1.9: Simulación de esquema básico de una red SLR

1.2.2. VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE LÍNEA MIXTA (MLR)

La demanda de ancho de banda en las redes de comunicación ha crecido exponencialmente en las últimas décadas debido al surgimiento y desarrollo de aplicaciones con

un alto consumo de datos, como videos en línea, juegos en línea, transmisión de datos en la nube y muchas más. En respuesta a esta creciente demanda, las redes de fibra óptica han evolucionado y mejorado constantemente para ofrecer velocidades de transmisión más rápidas y capacidades de ancho de banda más grandes.

Una solución común para aumentar la capacidad de las redes de fibra óptica es utilizar técnicas de multiplexación de longitud de onda WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) para transmitir múltiples señales de datos en una sola fibra óptica. Sin embargo, a medida que la velocidad de transmisión de los datos ha aumentado, también lo ha hecho la complejidad y el costo de las tecnologías WDM de alta velocidad. Es aquí donde entra en juego la tecnología de línea mixta MLR (*Mixed Line Rate*), que permite una transición más suave y económica a velocidades de transmisión de datos más altas en redes de fibra óptica. En lugar de utilizar una única velocidad de transmisión para todos los datos, MLR permite que diferentes velocidades de datos coexistan en la misma fibra óptica, como se puede observar en la figura 1.10, maximizando así la capacidad de la red y reduciendo la complejidad y los costos en comparación con las tecnologías WDM de alta velocidad.

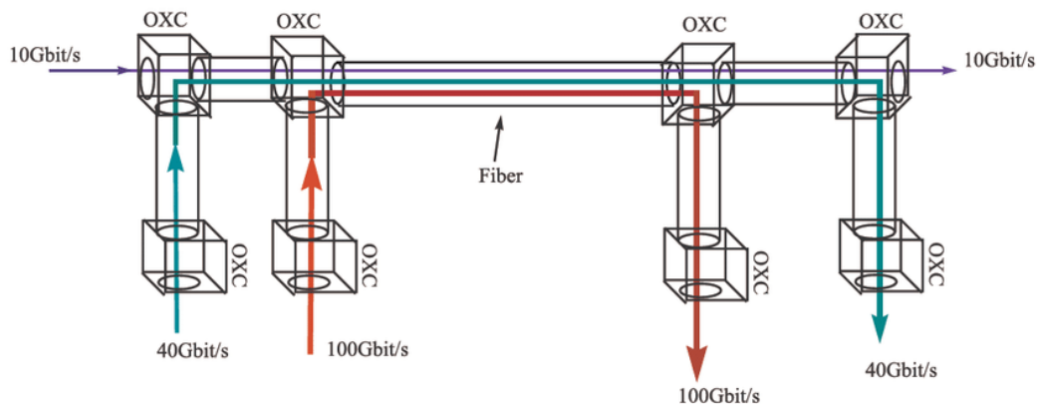


Figura 1.10: Esquema básico de una red MLR. Tomada de [14]

De acuerdo a la figura anterior, el conector Óptico Cruzado (OXC) es un dispositivo utilizado para conmutar señales ópticas de alta velocidad mediante demultiplexación y multiplexación de dichas señales, ya sea un proceso completamente óptico (OXC transparente) o requiera conversión Óptico-Eléctrico-Óptica (OXC opaco). Gracias a las ventajas de cada caso; los OXC ofrecen escalabilidad, alto rendimiento y capacidad de acceso múltiple en redes de enrutamiento de longitud de onda ópticas; esto teniendo en cuenta que también puede tener ciertas desventajas en cuanto a la limitación de ancho de banda del OXC opaco o a la dificultad para realizar el monitoreo de la calidad de señales completamente ópticas en el caso del OXC transparente. [15] Esto significa que los datos se pueden transmitir a velocidades de 10G, 40G y 100G en una misma red. Esta tecnología funciona mediante la división del ancho de banda de una fibra óptica en diferentes canales de transmisión que pueden ser utilizados por diferentes velocidades de

datos. Los canales de transmisión se dividen en diferentes categorías, como por ejemplo: baja velocidad, media velocidad y alta velocidad, y cada una de estas categorías puede soportar diferentes velocidades de datos. Por ejemplo, los canales de baja velocidad pueden soportar velocidades de datos de hasta 10G, mientras que los canales de alta velocidad pueden soportar velocidades de datos de hasta 100G.

Además de dividir el ancho de banda de la fibra óptica en diferentes canales de transmisión, la tecnología de línea mixta MLR también utiliza diferentes técnicas de modulación para transmitir datos a diferentes velocidades. Las técnicas de modulación utilizadas incluyen modulación de amplitud, modulación de fase y modulación de frecuencia, entre otras. Las redes MLR utilizan técnicas WDM para poder contar con distintos canales o longitudes de onda en un mismo hilo de fibra, donde cada canal deberá trabajar a velocidades de transmisión diferentes con el objetivo de darle una mayor flexibilidad a la red al momento de realizar la asignación de tráfico y tratar de obtener un modelo rentable de dicha red. [16]

Una de las ventajas clave de la tecnología de línea mixta MLR es que puede ayudar a reducir la complejidad y los costos de las redes de fibra óptica al permitir la coexistencia de diferentes velocidades de datos en la misma fibra óptica [17]. Esto significa que se pueden utilizar equipos más económicos y menos complejos para la transmisión de datos, lo que puede ayudar a reducir los costos operativos y de capital asociados con la actualización de las redes de fibra óptica para satisfacer la creciente demanda de ancho de banda.

En la figura 1.11 se tiene un ejemplo de un esquema general de red que representa el concepto de disponibilidad de las tasas de línea en función de la restricción de calidad de la señal. Así, en un problema de diseño (o actualización) de red, la mayoría de las rutas largas con tráfico intenso se verán obligadas a utilizar canales de baja velocidad binaria

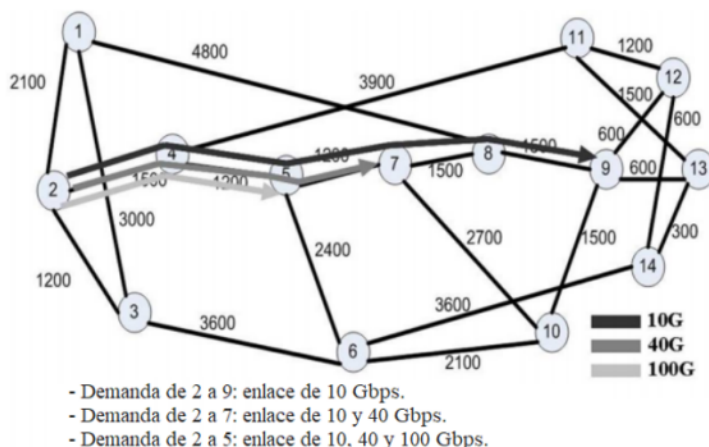


Figura 1.11: Esquema básico de una red MLR. Tomada de [14]

Al usar tasas de bit mayores suele ser necesario emplear formatos de modulación más avanzados, ya que estos ayudan a mejorar la eficiencia espectral y la tolerancia hacia las degradaciones ópticas. Debido a que las redes MLR implementan diferentes velocidades sobre un mismo hilo de fibra óptica mediante técnicas WDM, también es posible utilizar diferentes formatos de modulación sobre cada portadora de la señal según sea necesario, con lo que una portadora de 10 Gbps podría modularse mediante una técnica más sencilla como OOK (*On-Off Keying*) y una portadora de 40 o 100 Gbps podría utilizar técnicas más avanzadas como QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*) o DQPSK (*Differential Quadrature Phase-Shift Keying*) brindándole cierta versatilidad al sistema. Sin embargo, es posible recurrir al uso de una sola técnica de modulación sobre una red MLR, ya que en algunos estudios se ha podido comprobar que, a pesar de lo que ello implica, es posible obtener una red lo suficientemente flexible y rentable asignando debidamente cada canal o reduciendo la conmutación de canales ópticos mediante la agrupación de estos en una banda apropiada [15]

Dentro de la Universidad del Cauca se han abordado trabajos de grado que han permitido desarrollar este tipo de redes MLR (*Mixed Line Rate*) como se muestra en 1.12

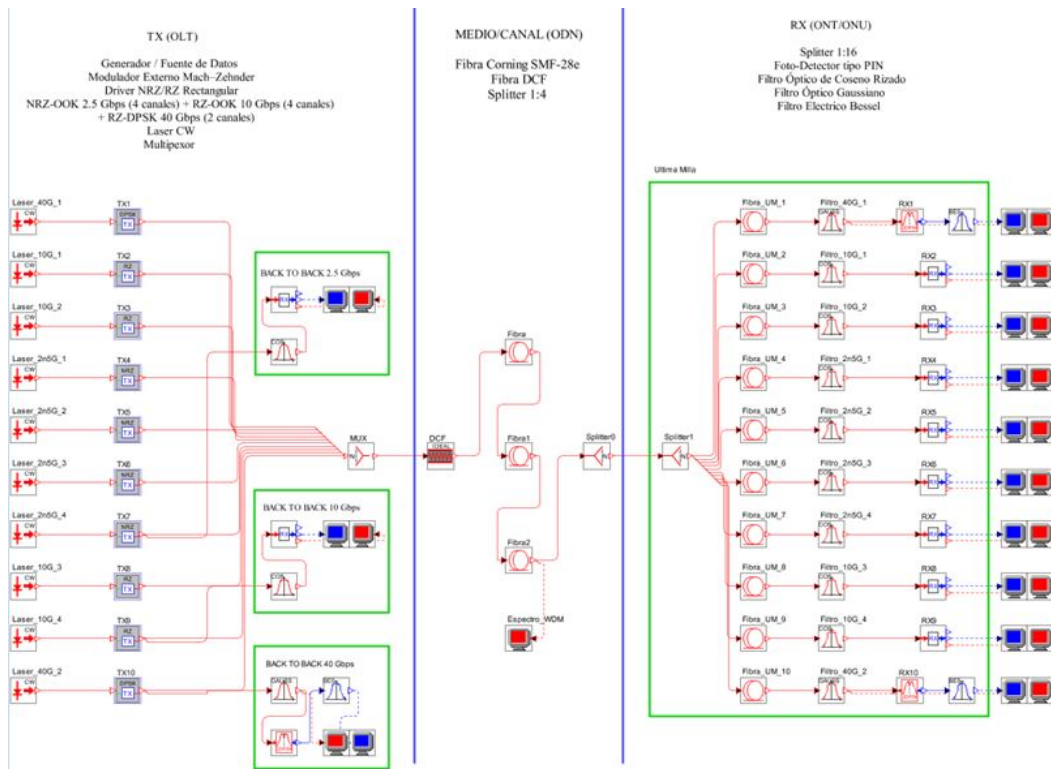


Figura 1.12: Simulación de esquema básico de una red MLR.

1.3. DEGRADACIONES ÓPTICAS DE ORDEN SUPERIOR CAUSADAS POR EL EFECTO KERR

La idea de que las señales que se transmiten a través de la fibra óptica se comportan linealmente es una aproximación razonable cuando se trabaja con niveles de potencia de pocos mW y velocidades de transmisión de hasta 2.5 Gbps. Sin embargo, a velocidades superiores como 10 Gbps o con niveles de potencia más altos, se producen ciertos fenómenos no lineales que alteran el comportamiento de la fibra óptica y los cuales se pueden clasificar en dos categorías:

1. Los que se producen por la interacción de la onda con los fonones (vibraciones moleculares) en el sílica: esparcimiento estimulado de Raman (SRS) *Scattering Raman Stimulated* y esparcimiento estimulado de Brillouin (SBS) *Scattering Brillouin Stimulated*

2. Los que se producen debido a la dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo eléctrico aplicado, que a su vez es proporcional al cuadrado de su amplitud: auto-modulación de fase (SPM) *Self Phase Modulation*, modulación de fase cruzada (XPM) *Cross Phase Modulation* y la mezcla de cuatro ondas (FWM) *Four-wave Mixing*.

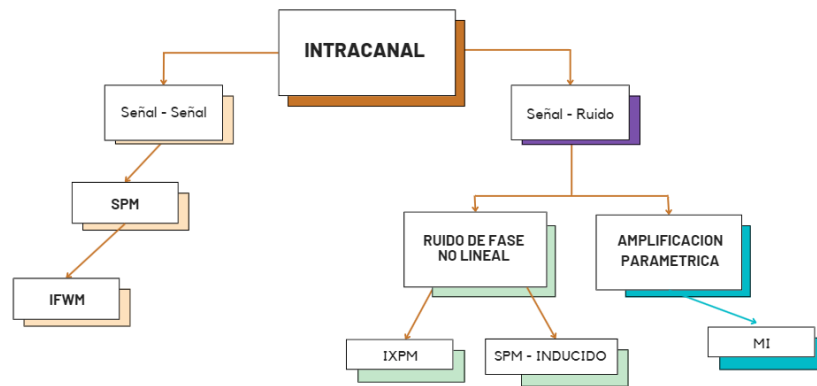


Figura 1.13: Clasificación de los efectos no lineales. Tomada de [18]

Estos fenómenos no lineales pueden tener un impacto significativo en la calidad y fiabilidad de la transmisión óptica de alta velocidad, limitando la capacidad de los sistemas y generando errores en la recepción de la información. Por lo tanto, es importante tener en cuenta el efecto Kerr y otros fenómenos no lineales en el diseño y la implementación de sistemas ópticos de alta velocidad y potencia, para garantizar una transmisión eficiente y confiable de datos y comunicaciones.

En este capítulo se hace especial énfasis en el estudio y análisis de los efectos no lineales causados por el efecto Kerr, uno de los más relevantes, descubierto por el físico escocés John Kerr en 1875 [19], y desde entonces objeto de estudio en el campo de

la óptica no lineal. Un ejemplo de cómo estos fenómenos no lineales pueden afectar la transmisión de señales sería cuando una señal óptica se transmite a través de la fibra óptica, su intensidad puede aumentar debido a la amplificación de la señal o a la combinación de varias señales en un multiplexor. En esta situación, el efecto Kerr puede generar distorsiones en la forma de las señales, ya que la intensidad de la onda incidente afecta el índice de refracción del medio de manera no lineal. Estas distorsiones pueden generar errores de bits, lo que afecta la calidad de la transmisión.

La ecuación de Schrödinger es útil para describir estos efectos no lineales en las redes ópticas, ya que puede modelar cómo cambia la función de onda de la luz a medida que se propaga a través de la red. En este caso, la ecuación de Schrödinger 1.1, se modifica para incluir los términos no lineales que describen los efectos de las fibras ópticas [19]. La Ecuación No Lineal de Schrödinger Generalizada GNLSE *General Schrodinger Non-linear Equation* modificada para una red óptica es:

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

Donde,

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

La ecuación 1.1 representa la propagación de un campo óptico $E(z,t)$, el cual muestra la presencia de diferentes campos DWDM, generadas durante el fenómeno de Kerr que hace referencia a la dependencia de la intensidad de la señal con el índice de refracción del medio en el cual no se genera transferencia de energía. El efecto Kerr, provoca la dependencia no lineal del índice de refracción respecto de la intensidad de la onda incidente, generando los efectos no lineales SPM, XPM y FWM. Por lo cual, el índice de refracción de la fibra óptica va a depender de la potencia de la señal transmitida y se expresa mediante la siguiente ecuación: [20]

$$n = n_o + n_2 \frac{P_i n}{A_e f f} \quad (1.2)$$

Donde,

- n_o Índice de refracción lineal.
- n_2 Índice de refracción no lineal.
- $\frac{P_i n}{A_e f f}$ Intensidad de la onda incidente.

La no linealidad del índice de refracción produce un cambio de fase en la señal propagada, como se muestra en la ecuación 1.3

$$\phi_{NoLineal} = \gamma L_{eff} \quad (1.3)$$

Se define el coeficiente no lineal en la ecuación 1.4

$$\gamma = \frac{2\pi f_p n_2}{CA_{eff}} \quad (1.4)$$

Donde,

C : Velocidad de la luz.

f_p : Frecuencia del pulso.

La longitud efectiva, referente a la distancia que debe transitar la luz para que sucedan los fenómenos no lineales, se calcula mediante la ecuación 1.5.

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (1.5)$$

Donde,

α : Atenuación de la fibra.

L : Longitud total del enlace.

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

$$\beta_n l = \beta + \gamma P \quad (1.6)$$

La ecuación 1.6 muestra el efecto Kerr que se está tratando, donde tener una onda a una alta intensidad produce un cambio en la fase. A continuación, se describen cada uno de los efectos no lineales mencionados (SPM, XPM, FWM).

1.3.1. SPM

La auto-modulación de fase SPM (*Self Phase Modulation*) es un fenómeno no lineal que se produce en los sistemas de fibra óptica cuando la luz interactúa con el material a alta intensidad.

El índice de refracción de la fibra tiene un componente no lineal que depende del cuadrado de la intensidad del campo eléctrico, lo que provoca un desplazamiento de fase proporcional a la intensidad del pulso. Como resultado, las diferentes componentes espectrales del pulso presentan diferentes desplazamientos de fase, lo que genera un chirp en el pulso y modifica los efectos de la dispersión sobre el mismo. Los efectos

del SPM son más notorios en sistemas con altas potencias de transmisión debido a las variaciones de intensidad de la luz que se producen al viajar a través de la fibra.

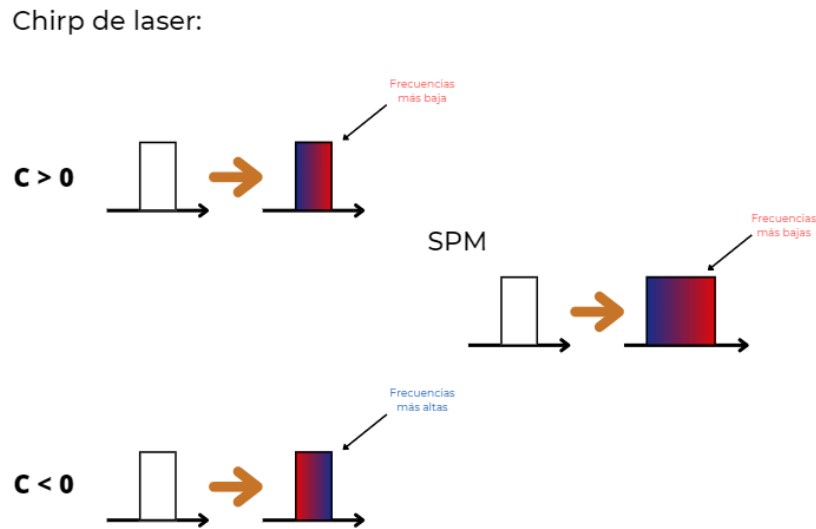


Figura 1.14: efecto de SPM sobre un pulso que se propaga tomado de [18]

Como se observa en la figura 1.14 el pulso transmitido sufre un chirp de frecuencia, pues el mismo se automodula en fase. El chirp es la agrupación de frecuencias más altas y más bajas, respectivamente, para las partes anterior y posterior del pulso óptico (factor de chirp negativo, $C < 0$), o viceversa (factor de chirp positivo, $C > 0$)

El ensanchamiento del pulso generado por SPM, como consecuencia del efecto Kerr, está determinado por diversos factores, como la longitud de la fibra, la potencia de la señal y la forma del pulso. [21] SPM modifica los efectos de la dispersión cromática, por lo tanto, es importante considerarlo para sistemas con alta tasa de transmisión de bits (sistemas operando a 10 Gb/s o más, o sistemas operando velocidades más bajas, pero con potencias de transmisión elevadas), ya que estos tienen unas limitaciones significativas debido a la dispersión cromática. [21]

Finalmente, un ejemplo de SPM se produce cuando un pulso láser intenso viaja a través de una fibra óptica, la interacción con el material de la fibra produce una variación en el índice de refracción del material, lo que a su vez produce una modulación de fase en la señal. Esta modulación de fase puede provocar una ampliación espectral de la señal, lo que puede limitar la capacidad de transmisión de datos a través de la fibra, como se observa en la figura 1.15

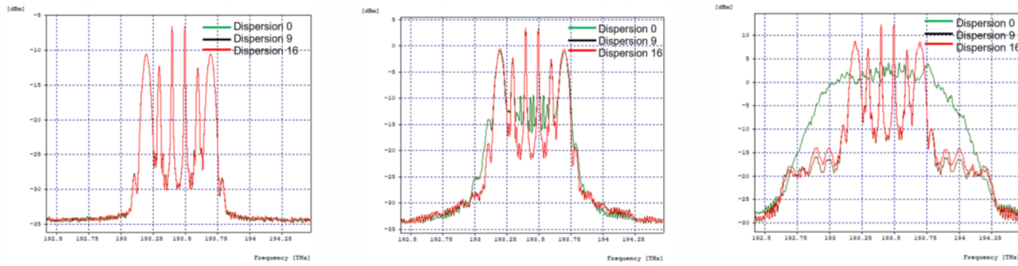


Figura 1.15: efecto de SPM sobre una señal óptica. Tomado de [18]

El índice de refracción dependiente de la intensidad provoca un cambio de fase dependiente de la intensidad en la fibra. Por lo tanto, para un pulso de luz que se propaga en la fibra, las no linealidades de Kerr dan como resultado una fase de transmisión diferente para el pico del pulso en comparación con los bordes de pulso anterior y posterior. Este efecto, que se conoce como modulación de fase propia (SPM), provoca modificaciones en el espectro del pulso. Como la frecuencia instantánea de una onda es el tiempo derivada de su fase, entonces una fase variable en el tiempo crea una frecuencia variable en el tiempo. De este modo, SPM puede alterar y ampliar el espectro de frecuencia del pulso. El ensanchamiento espectral causado por SPM produce efectos similares a la dispersión que pueden limitar las tasas de transmisión en algunos sistemas de comunicación óptica de larga distancia, según el tipo de fibra y su dispersión cromática. Para pulsos ultracortos (menos de 1 picosegundo) con picos muy alto de potencias, su efecto puede ser muy fuerte, generando un amplio continuo de longitudes de onda.

1.3.2. XPM

La modulación de fase cruzada XPM es un fenómeno no lineal en el que una señal óptica en una fibra óptica afecta la fase de otra señal que se propaga en la misma fibra. Este efecto provoca un cambio en el índice de refracción del material de la fibra en función de la intensidad de la luz. En este caso, cuando dos señales ópticas se propagan juntas en la misma fibra usando la técnica de WDM, la intensidad de una señal modula la fase de la otra señal debido al cambio en el índice de refracción del material de la fibra. [18]

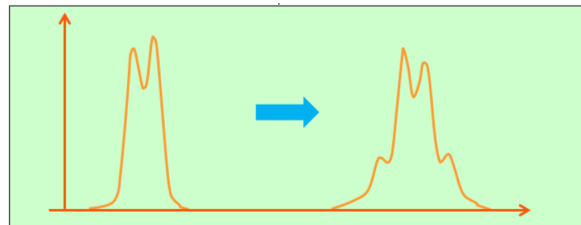


Figura 1.16: efecto de XPM tomado de [22]

XPM se exhibe como un mecanismo de diafonía entre canales cuando la modulación de intensidad se utiliza en la transmisión de fibra óptica dispersiva o, alternativamente, cuando se emplea la codificación de fase. Además, la fuerza de XPM aumenta con el número de canales y también se vuelve más fuerte a medida que se hace el espacio entre canales menores [23]. No hay transferencia de energía, sin embargo, entre los canales, lo que distingue al efecto de otros procesos de diafonía en los que el aumento de la potencia de la señal en un canal, tiene lugar solo por una reducción de poder en otro. Aunque la fuerza general de XPM es el doble que SPM porque la intensidad total es el cuadrado de la suma de dos amplitudes de campo eléctrico, el efecto se debilita, ya que los pulsos con diferentes longitudes de onda o polarizaciones generalmente no coinciden con la velocidad de grupo y, por lo tanto, no se mantiene la superposición.

La principal diferencia entre XPM y SPM es que XPM implica la interacción no lineal entre dos o más señales ópticas que se propagan juntas en la misma fibra, una señal puede influir en la fase de la otra señal, lo que provoca un cambio en la fase de la señal influenciada. Este cambio en la fase puede afectar la calidad de la señal, especialmente cuando las señales tienen diferentes longitudes de onda, como se puede observar en la imagen 1.17, mientras que la SPM es causada por la interacción no lineal entre una sola señal óptica y el material de la fibra.

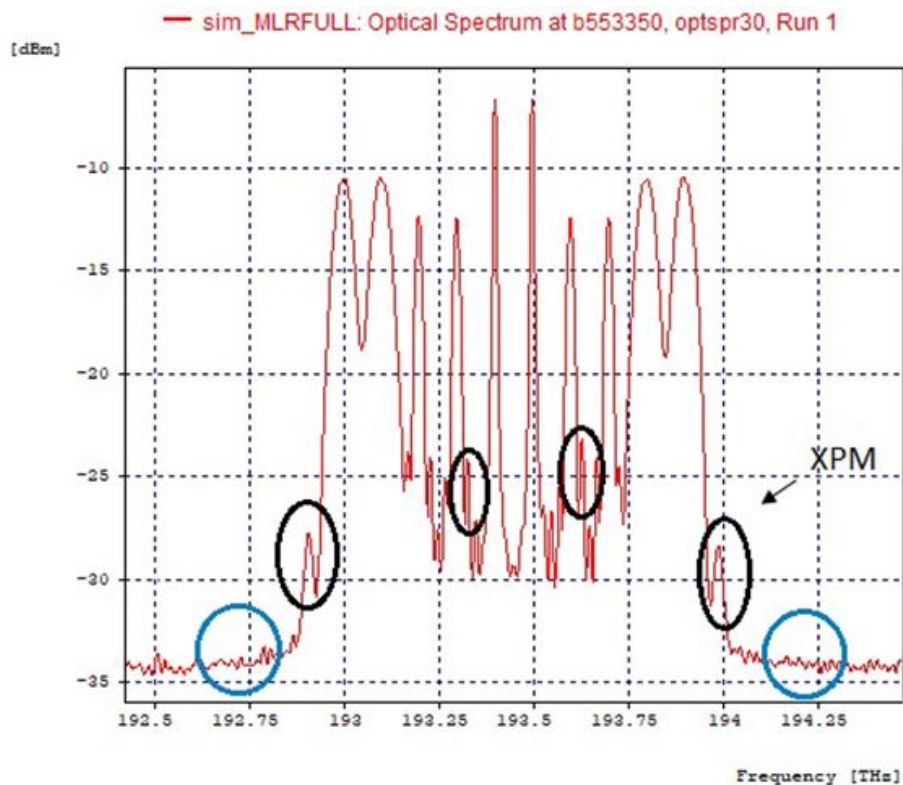


Figura 1.17: Simulación efecto de XPM tomado de [18]

1.3.3. FWM

El efecto FWM ocurre cuando varias señales ópticas, generalmente tres o más, interactúan dentro de la fibra óptica y generan una señal óptica adicional en una frecuencia diferente. Esto se debe a la no linealidad del índice de refracción del material de la fibra óptica, lo que significa que la refracción de la luz en la fibra no es proporcional a la intensidad de la señal, sino que puede variar de manera no lineal.

Como se observa en la figura 1.18 una red de fibra óptica que transporta múltiples canales ópticos, cada uno llevando diferentes señales de datos a diferentes frecuencias. Estas señales de datos son transmitidas a través de la fibra óptica con potencias adecuadas para asegurar una transmisión confiable. Sin embargo, debido a la naturaleza no lineal de las fibras ópticas, las señales ópticas pueden interactuar entre sí mientras viajan a través de la fibra. En particular, las señales pueden mezclarse y generar nuevas frecuencias a través del efecto FWM. las tres señales ópticas, cada una en la frecuencia f_1 , f_2 Y f_3 , se cruzan en una región de la fibra óptica donde la intensidad de ambas señales es lo suficientemente alta como para que ocurra el efecto FWM. Entonces, como resultado del efecto FWM, se generan nuevas frecuencias ópticas: la suma de las frecuencias originales ($f_1 + f_2 + f_3$). Estas nuevas frecuencias generadas pueden interferir con las señales originales y causar distorsiones en la transmisión de datos. [24]

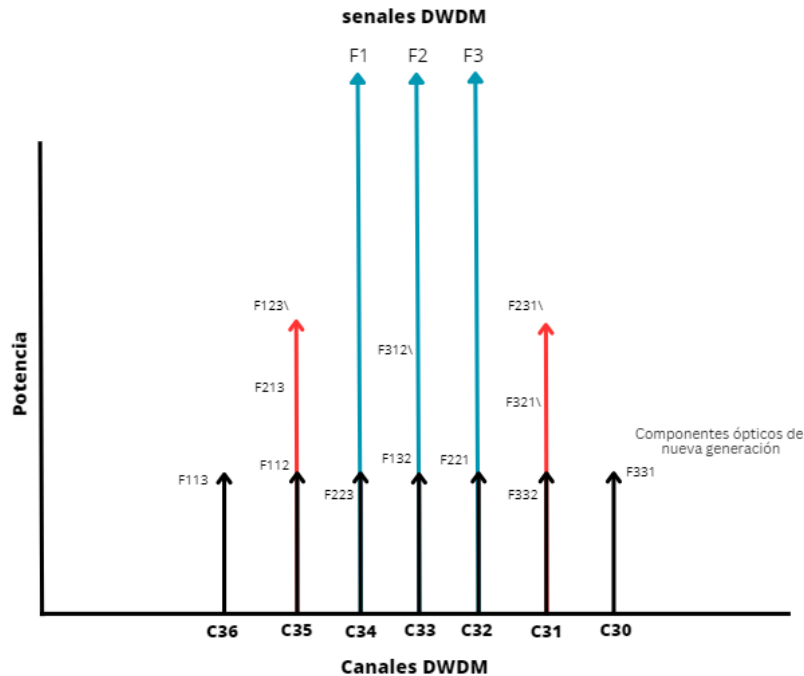


Figura 1.18: efecto FWM tomado de [25]

El resultado del efecto FWM es la generación de nuevas frecuencias ópticas que no estaban presentes originalmente en las señales de entrada. Estas nuevas frecuencias

pueden interferir con las señales originales y causar distorsiones en la transmisión de datos en la red óptica, como se observa en la figura 1.19 dando como resultado errores de bits, degradación del rendimiento y pérdida de calidad de la señal.

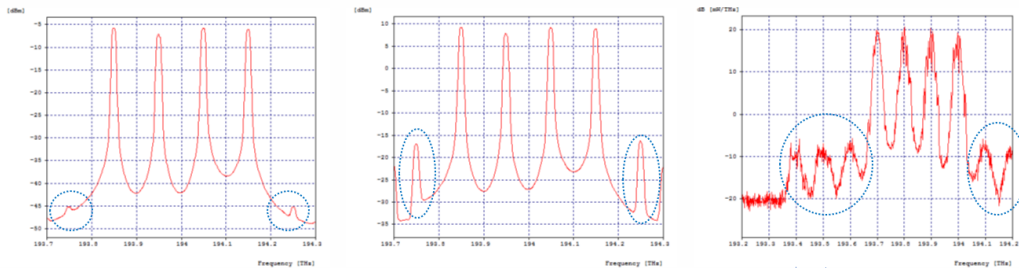


Figura 1.19: efecto de FWM sobre una señal óptica tomado de [18]

El efecto FWM puede tener varios comportamientos, dependiendo de las características de la red óptica y las señales de entrada, algunos de los comportamientos típicos del efecto FWM son:

- **Conversión de frecuencia:** Las señales originales se combinan para generar nuevas frecuencias ópticas, lo que puede causar la interferencia con otras señales en la red.
- **Amplificación y atenuación de señales:** Las señales originales pueden ser amplificadas o atenuadas debido a la generación de nuevas frecuencias ópticas, lo que puede afectar el equilibrio de potencia en la red.
- **Cambio de fase y modulación de amplitud:** El efecto FWM puede causar cambios en la fase y amplitud de las señales originales, lo que puede resultar en la distorsión de las señales y la degradación del rendimiento de la red.

Aunque FWM es un efecto débil, puede acumularse cuando las señales multicanal permanecen en fase entre sí a lo largo de largas distancias de transmisión, que suele ser cuando la dispersión cromática de la fibra es muy cercana a cero. Por lo tanto, los pulsos transmitidos a través de diferentes canales ópticos a diferentes longitudes de onda permanecen en las mismas posiciones relativas a lo largo de la fibra. En este caso el efecto de FWM se amplifica y se acumula una señal de ruido que interfiere con otros canales del sistema. Por lo tanto, un método para minimizar la diafonía resultante de FWM en la división de longitud de onda, son los sistemas multiplexados basados en fibra de baja dispersión. Donde su objetivo es emplear espaciado de canal desigual para que los componentes de ruido FWM no se generen a frecuencias que correspondan a las frecuencias del canal.

El efecto FWM es más pronunciado en sistemas de alta potencia y larga distancia, donde las señales ópticas tienen una mayor probabilidad de interactuar dentro de la

fibra. Además, la probabilidad de que ocurra el efecto FWM aumenta con la densidad espectral de potencia de las señales, es decir, cuando hay múltiples canales ópticos cercanos en frecuencia transmitiendo a través de la misma fibra. El impacto del efecto FWM en las redes ópticas puede ser significativo. Puede causar degradación del rendimiento de la red, limitaciones en la capacidad de transmisión y errores de bits, lo que puede afectar la calidad de la transmisión de datos y la confiabilidad de la red.

1.4. INCIDENCIA DE LOS FENÓMENOS NO LINEALES BASADOS EN EL EFECTO KERR SOBRE LAS REDES ÓPTICAS AVANZADAS

La capacidad de ofrecer diferentes velocidades de transmisión sobre una única fibra óptica mediante la técnica de velocidad de transmisión de línea mixta MLR en una red GPON-WDM es una característica muy importante en la actualidad. Esto se debe a que la demanda de ancho de banda para aplicaciones de alta velocidad como la transmisión de video en HD, la telemedicina, el e-learning y el trabajo remoto ha aumentado significativamente en los últimos años. En una red GPON-WDM, la técnica de velocidad de transmisión de línea mixta MLR permite que diferentes velocidades de datos coexistan en la misma fibra óptica. Esto significa que se pueden utilizar diferentes velocidades de transmisión para diferentes usuarios o para diferentes tipos de aplicaciones, lo que mejora la eficiencia de la red. Por ejemplo, se pueden asignar velocidades más altas de transmisión a los usuarios que requieren una mayor cantidad de ancho de banda, como empresas u hogares con muchos dispositivos conectados, mientras que se pueden asignar velocidades más bajas a usuarios con menor demanda de ancho de banda.

A pesar de que la técnica de velocidad de transmisión de línea mixta MLR en una red GPON-WDM tiene muchas ventajas, también se presenta degradaciones que pueden afectar el desempeño en la señal, como la disminución de potencia en recepción e interferencia entre canales, ya sea intracanal, debido a la interacción de los pulsos del mismo canal WDM y en algunos casos a la interacción del ruido ASE; e intercanal los cuales hacen referencia a la interacción entre dos o más canales propagados sobre el mismo sistema WDM. [18]

Es por eso que en la figura 1.20 se concluye que estas degradaciones se presentan según la velocidad de acceso, tomando como referencia una tasa de acceso de 10 Gbps se puede definir que para velocidades de configuración del sistema DWDM por debajo afectan predominantemente los fenómenos intercanal y para tasas superiores, afectan predominantemente los fenómenos de tipo intracanal.

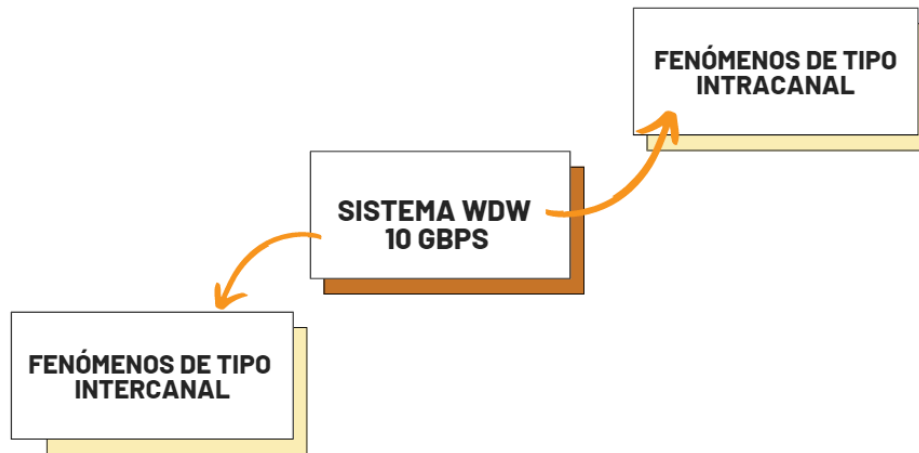


Figura 1.20: Efecto de los Fenómenos No Lineales vs Velocidad de Acceso tomado de [18]

Debido a la naturaleza de la red estudiada en este trabajo de investigación, se hará enfoque en las degradaciones inter-canal. Ya que a que se implementa una arquitectura de red del orden de los 2.5 Gbps

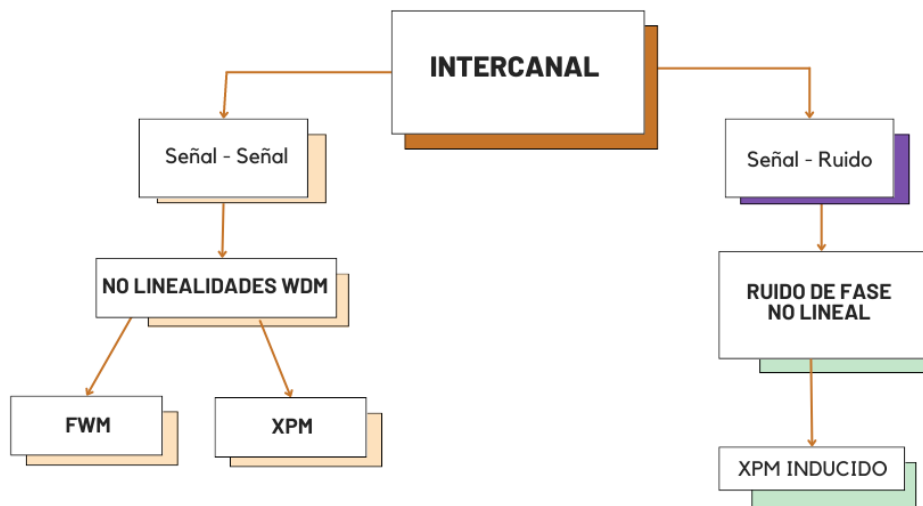


Figura 1.21: Clasificación de los efectos no lineal intercanal tomado de [18]

De acuerdo a la información presentada anteriormente, se puede concluir que el impacto de los efectos no lineales en un sistema WDM dependerá principalmente del formato de modulación implementado, de las características físicas del medio y de las configuraciones del sistema, entre otras.

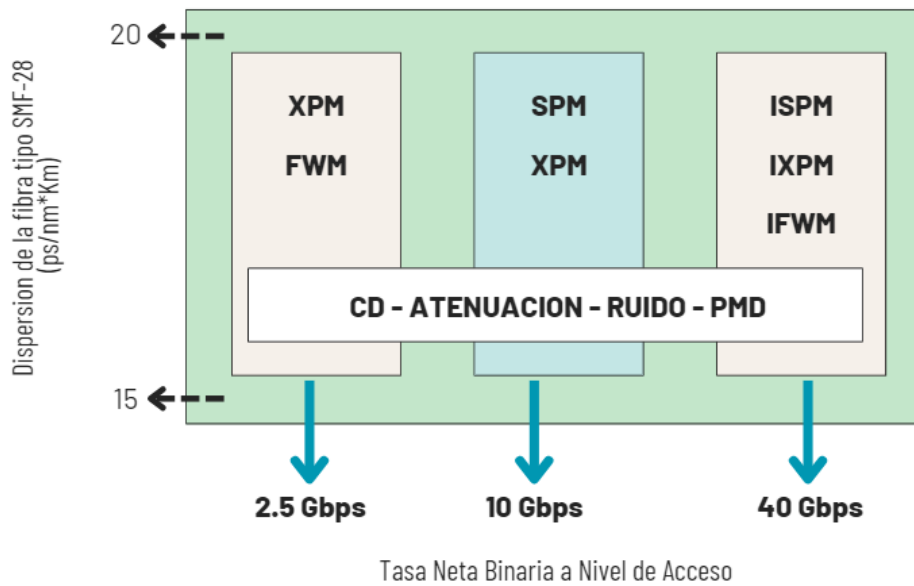


Figura 1.22: Efectos Degradación Predominantes Según el Nivel de Acceso. Tomado de [18]

Los fenómenos no lineales más comunes en intercanal son la interferencia por mezcla cruzada (XPM) y la interferencia por mezcla de cuatro ondas (FWM). Estos fenómenos no lineales pueden ser particularmente problemáticos en redes de alta velocidad y alta densidad de canales, ya que pueden afectar la calidad de la señal y limitar la capacidad de la red. Esto se debe a que XPM y FWM son fenómenos dependientes de la interacción entre dos o más canales, mientras que SPM es un fenómeno dependiente de un solo canal. Por lo tanto, es importante tener en cuenta estos fenómenos al diseñar y operar redes ópticas de alta velocidad. Entre XPM, SPM y FWM, el efecto no lineal más comúnmente presente en intracanal es el SPM, causando una variación en la frecuencia de la señal que conduce a la ampliación del ancho de banda espectral de la señal y la formación de una forma de onda no simétrica.

Nota de autor:

En este capítulo se definen los aspectos generales del grupo FSAN donde se resalta los aportes en la evolución de la arquitectura de red óptica, también se hace énfasis en la tecnología PON en el orden de los gigabits, donde se exponen y se comparan sus características generales como velocidades ascendentes y descendentes, y sus parámetros de desempeño. A partir de ello, se realiza una investigación sobre las redes de comunicación ópticas avanzadas que implementan Velocidad de línea única (SLR) y velocidad de línea mixta (MLR), cada una con sus propias características e implementaciones posibles. Todo esto, para luego ahondar sobre las degradaciones ópticas de orden superior causadas por el efecto Kerr (SPM, XPM y FWM), para, finalmente, discernir cuáles de ellos pueden incidir en estas arquitecturas de red mencionadas.

CAPÍTULO 2

MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se exponen los recursos y métodos empleados en la ejecución del proyecto de investigación. Eligiendo cuidadosamente la más idónea en función de sus atributos distintivos. Posteriormente, se expone la metodología seleccionada y se analiza su implementación en el contexto del estudio de grado.

2.1. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

Es de vital importancia realizar una simulación o un modelado de un sistema de comunicaciones antes de ser implementado realmente, por lo que se hace necesaria la elección de una herramienta o software de simulación para lograr el monitoreo y análisis del comportamiento de la señal a través del canal óptico deseado. Estas herramientas permiten y facilitan la recreación del funcionamiento de la red a trabajar dentro de un entorno lo más cercano posible a la realidad, donde se evalúa el desempeño de esta.

En la actualidad, las herramientas de simulación desempeñan un papel fundamental en el diseño, la implementación y el monitoreo de redes de telecomunicaciones. Su importancia radica en la capacidad de recrear escenarios reales y analizar el rendimiento de estas redes sin necesidad de implementar infraestructura física. Además, estas herramientas permiten evaluar parámetros de desempeño óptico como el retardo y el jitter en la red. Otro aspecto destacable es su capacidad para abordar múltiples variables de interés, lo que las convierte en una herramienta eficaz para la investigación.

La generación y presentación de resultados estadísticos en una herramienta de simulación desempeña un papel fundamental, ya que permite al investigador realizar contribuciones significativas a las comunidades académicas e investigativas. Es importante destacar que algunas herramientas ofrecen mejores especificaciones en este aspecto, lo que les permite generar este tipo de resultados sin necesidad de utilizar aplicaciones externas o llevar a cabo procesamientos exhaustivos para la presentación de los datos.

Con base en lo expuesto anteriormente y considerando la información proporcionada en 2.1 se llevó a cabo una comparación efectiva. Esta comparación ha permitido tomar la decisión de utilizar el software OptSim como la herramienta principal para el diseño, simulación y evaluación del rendimiento del sistema óptico. Dado que, la Universidad del Cauca cuenta con su licenciamiento y además, proporciona el diseño de los sistemas usando diagramas en bloque, lo cual facilita la buena elaboración de los diferentes esquemas de red a implementar.

	OptSim	OptiSystem	Matlab & Simu- link
Uso investigati- vo	Alto	Alto	Alto
Tipo de licencia	Comercial	Comercial	Comercial
Curva de apren- dizaje	Medio	Medio	Alto
Plataformas que soportan	Windows, Linux	Windows, Linux, Mac OS	Windows, Linux, Mac OS
Interfaz grafica	Alto	Medio	Medio
Graficación de resultados	Buena	Buena	Buena
Tecnologías N1 y N2 que soportan	Alto	Alto	Medio
Tráfico que per- mite modelar	Alto	Alto	Bajo

Tabla 2.1: Comparación de herramientas de simulación

2.1.1. OptSim

OptSim es una herramienta desarrollada por Synopsys que se basa en un entorno de simulación y modelado intuitivo. Su principal función es realizar el diseño y evaluación del rendimiento del nivel de transmisión en sistemas de comunicaciones ópticas. Lo destacado de esta herramienta es su amplia librería de componentes, que abarca los elementos más utilizados en sistemas de comunicaciones ópticas. Estos componentes se agrupan en categorías como transmisores, generadores de señal, fibras ópticas, multiplexores, demultiplexores y receptores, entre otros.

OptSim destaca por ofrecer un equilibrio óptimo entre exactitud y tiempo, lo que permite optimizar los diseños para mejorar el rendimiento y reducir los costos. Además, se caracteriza por su alta eficiencia y precisión. Su interfaz gráfica es intuitiva y fácil de manejar, lo que facilita su utilización. [26].

Esta herramienta se caracteriza porque permite el diseño y la simulación de sistemas de comunicación óptica monomodo a nivel de propagación de la señal, entre los cuales se encuentra FTTx/PON. Define los modos de simulación como modo Muestra y modo Bloque, que son utilizados dependiendo de los resultados requeridos.

La simulación modo Muestra simula un componente, pasando una muestra de datos a otro en cada paso de tiempo de la simulación, permitiendo que la señal de datos pase entre componentes y represente una muestra única en cada instante de tiempo, mientras que la simulación modo Bloque, la secuencia de entrada se analiza en bloque hasta la

salida.

Los usuarios pueden ajustar las características de los componentes, como las propiedades de las fibras ópticas, las longitudes de onda, los perfiles de potencia y las tasas de modulación, entre otros. Esto permite analizar y evaluar el rendimiento del sistema en diferentes condiciones y optimizar los diseños para maximizar la eficiencia, la capacidad de transmisión y la calidad de la señal.

Además, OptSim ofrece herramientas avanzadas para el análisis de resultados y la visualización de datos. Permite realizar mediciones y cálculos precisos de parámetros clave, como la atenuación, la dispersión, el retardo, el jitter y la relación señal-ruido. Los resultados se pueden presentar de diversas formas, como gráficos, tablas y reportes detallados, lo que facilita el análisis y la interpretación de los resultados de la simulación.

OptSim también es compatible con otras herramientas y estándares utilizados en el campo de las comunicaciones ópticas. Permite la importación y exportación de datos en formatos estándar, como el formato de archivo GDSII para el diseño de circuitos integrados y el formato VPI para la integración con otras herramientas de simulación y análisis.

Los resultados de la simulación que produce esta herramienta incluyen representaciones de forma de onda de señal y diagramas de ojo en cualquier punto dentro de los gráficos de sistemas de comunicación óptica y tasa de errores de bit (BER) frente a varios parámetros dentro del sistema, como la potencia óptica recibida. en la imagen 2.1 se puede apreciar el entorno de simulación de Optsim

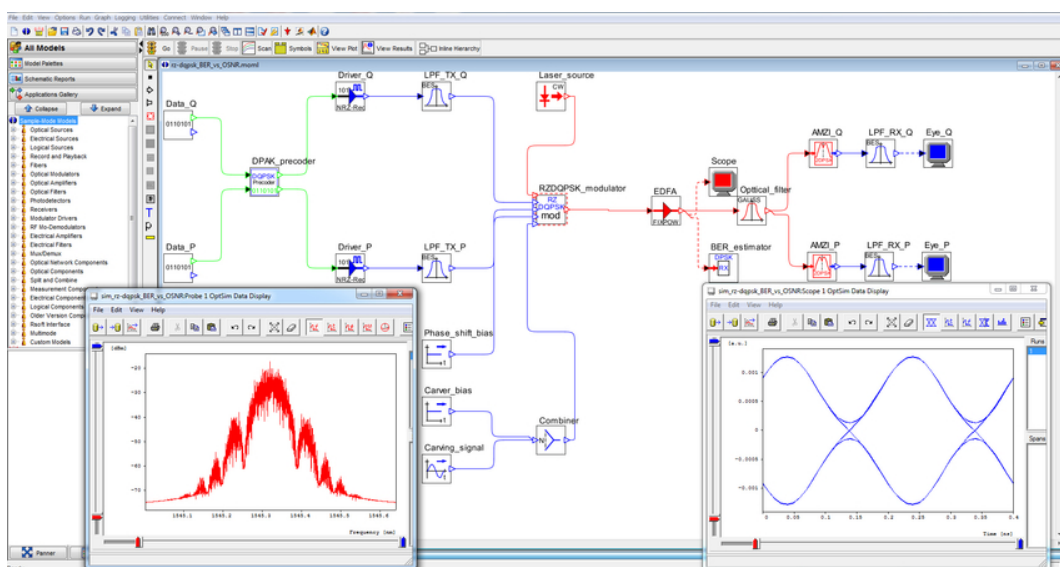


Figura 2.1: Entorno gráfico del software de simulación OptSim

OptSim es ideal para el diseño asistido de sistemas de comunicación óptica que incluyen, entre otros:

- Sistemas de comunicación óptica coherentes, como PM-QPSK, PM-BPSK, PM-QAM, OFDM
- Formatos de modulación avanzados, como D(Q) PSK, Duobinary, BPSK, m-PAM, m-QAM, etc.
- Sistema DWDM/CWDM con amplificación óptica, como EDFA, Raman, SOA, OPA
- Sistemas de comunicación PON/GPON

Dentro de las características más importantes de esta herramienta se puede destacar las siguientes:

- Soporte para optimización basada en análisis de múltiples parámetros.
- Única herramienta de diseño con múltiples motores que implementan tanto el Paso dividido en el dominio del tiempo como el Paso dividido en el dominio de la frecuencia para la simulación más precisa y eficiente de cualquier arquitectura de enlace óptico.
- se conecta con equipos de prueba de laboratorio como Agilent y Luna para fusionar la simulación con el experimento.
- La amplia biblioteca de componentes predefinidos del fabricante facilita el modelado de dispositivos disponibles comercialmente.
- La interfaz gráfica de medición intuitiva y flexible actúa como un instrumento de laboratorio virtual.

2.2. METODOLOGÍAS

Las metodologías dentro de un proyecto de investigación son importantes debido a varios aspectos fundamentales. En primer lugar, proporcionan una estructura y organización para llevar a cabo la investigación de manera sistemática y ordenada. Establecen los pasos y procedimientos a seguir, desde la formulación de preguntas de investigación hasta la recolección, simulación, análisis de datos y la interpretación de los resultados. Para el desarrollo de este proyecto de investigación se implementarán tres metodologías que son fundamentales para el cumplimiento de los objetivos propuestos.

La primera es la metodología para el control del proyecto, que contribuye a la eficiencia y eficacia en la investigación. Proporciona un enfoque sistemático que ayuda a

los investigadores a utilizar de manera eficiente los recursos disponibles, como el tiempo, costos y personal. Al seguir una metodología sólida, se evita la improvisación y se minimiza el riesgo de realizar actividades innecesarias o irrelevantes. Además, permite identificar posibles obstáculos y desafíos en etapas tempranas y encontrar soluciones adecuadas.

La segunda es la metodología para la investigación, la cual es importante en un proyecto de investigación porque proporciona estructura, rigor científico, replicabilidad, eficiencia, eficacia y orientación. Ayuda a garantizar que el proyecto se realice de manera sistemática y confiable, maximizando las posibilidades de obtener resultados válidos y significativos.

Por último, la metodología de simulación brinda orientación y dirección al investigador. Establece los pasos a seguir y los plazos a cumplir, lo que ayuda a mantener el enfoque y la disciplina durante todo el proceso de investigación. Al seguir esta metodología, se tiene claridad sobre qué hacer en cada etapa y cómo avanzar hacia sus objetivos.

2.2.1. METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DEL PROYECTO

La investigación es un conjunto de procesos sistemáticos, críticos, empíricos y científicos, que se aplican al estudio de un fenómeno; esto conlleva a definición de una metodología que mediante algunas técnicas permite recabar y analizar datos que se obtienen de la investigación. Es así como estos procesos brindan veracidad científica a los resultados que se analizan.

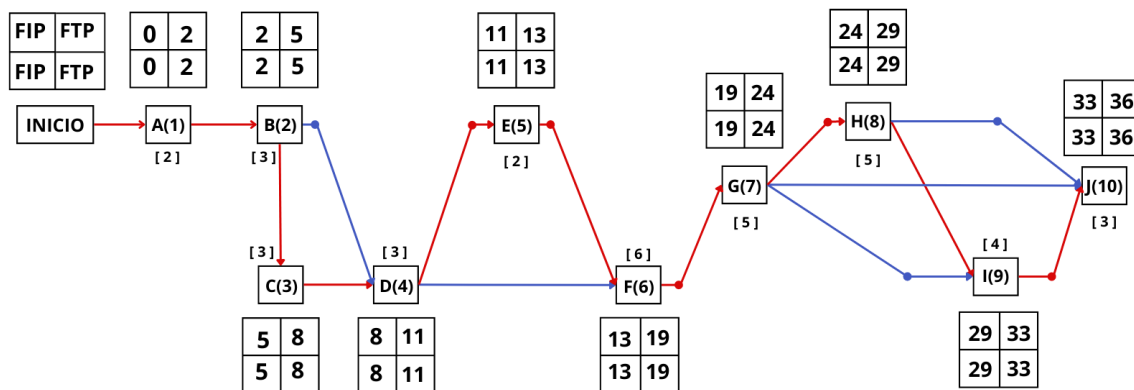


Figura 2.2: Grafo de actividades. De los Autores.

Donde:

FIP: Representa la fecha de inicio más próxima de una actividad.

FTP: Representa la fecha de terminación más próxima de una actividad.

FIL: Representa la fecha de inicio más lejana de una actividad.

FTL: Representa la fecha de terminación más lejana de una actividad.

Para desarrollar el presente proyecto de investigación, se eligió la técnica de evaluación y revisión de proyectos PERT (*Program Evaluation and Review Technique*), la cual define una técnica de seguimiento y gestión, aplicado al sector de las tecnologías donde deben ser consideradas operaciones interdependientes e interrelacionadas para planificar proyectos e identificar flujos de trabajo optimizados. PERT presenta ventajas significativas dadas las facilidades para su aprendizaje, planteamiento exacto de los procesos de realización del proyecto, facilidad de control, rapidez en la concepción e introducción de modificaciones y manejo total sobre el proyecto.

2.2.2. METODOLOGÍA PARA LA INVESTIGACIÓN

La metodología de la investigación se refiere al conjunto de procedimientos, técnicas y enfoques utilizados para llevar a cabo un estudio o investigación de manera sistemática y rigurosa. Estos métodos y técnicas se aplican con el fin de obtener conocimientos válidos y confiables, y para responder a preguntas de investigación específicas.

La metodología de la investigación abarca diferentes aspectos, incluyendo la selección y delimitación del tema de investigación, la formulación de preguntas de investigación o hipótesis, la recolección de datos, el análisis e interpretación de los resultados, y la presentación de las conclusiones.

existen diferentes premisas que sustentan una investigación, estas se polarizan en dos aproximaciones principales: el enfoque cuantitativo y el enfoque cualitativo. Ambos enfoques emplean procesos cuidadosos, metódicos y empíricos en su esfuerzo para generar conocimiento. Por lo que la definición previa de investigación se aplica a los dos por igual.

En términos generales, estos métodos utilizan cinco estrategias similares y relacionadas entre sí [27]:

1. Llevan a cabo la observación y evaluación de fenómenos.
2. Establecen suposiciones o ideas como consecuencia de la observación y evaluación realizadas.
3. Demostrar el grado en que las suposiciones o ideas tienen fundamento.
4. Revisan tales suposiciones o ideas sobre la base de las pruebas o del análisis.
5. Proponen nuevas observaciones y evaluaciones para esclarecer, modificar y fundamentar las suposiciones e ideas o incluso para generar otras.

Sin embargo, aunque las aproximaciones cuantitativas y cualitativas comparten esas estrategias generales, cada una tiene sus propias características.

Metodología de investigación Cuantitativa:

El enfoque cuantitativo se define como secuencial y probatorio. Cada etapa precede a la siguiente y no podemos “brincar” o eludir pasos. Parte de una idea delimitada, donde se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco o una perspectiva teórica. Se traza un plan para probarlas (diseño); se miden las variables en un determinado contexto; se analizan las mediciones obtenidas utilizando métodos estadísticos, y se extrae una serie de conclusiones

La investigación cuantitativa se utiliza cuando se pretende explicar fenómenos de causa y efecto. Este modelo requiere el empleo de un lenguaje unificado y la posibilidad de cuantificación de los fenómenos estudiados, o se expliquen. Así, en la figura 2.4 se puede mirar gráficamente el proceso que se debe seguir al implementar la metodología de la investigación cuantitativa

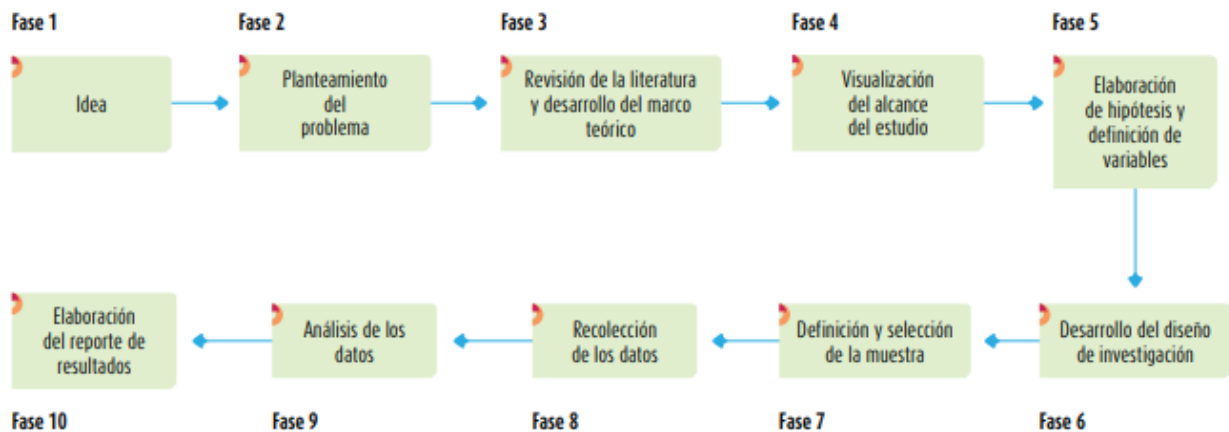


Figura 2.3: Proceso cuantitativo Tomado de [27]

El enfoque cuantitativo tiene las siguientes características:

1. Refleja la necesidad de medir y estimar magnitudes de los fenómenos o problemas de investigación: ¿cada cuánto ocurren y con qué magnitud?

2. El investigador plantea un problema de estudio delimitado y concreto sobre el fenómeno.

3. Una vez planteado el problema de estudio, el investigador considera la revisión de la literatura y construye un marco teórico, del cual deriva una o varias hipótesis y las somete a prueba mediante el empleo de los diseños de investigación apropiados.

4. Las hipótesis se generan antes de recolectar y analizar los datos.

5. La recolección de los datos se fundamenta en la medición los cuales se representan mediante números (cantidades) y se deben analizar con métodos estadísticos

Metodología de investigación Cualitativa:

El enfoque cualitativo también se guía por áreas o temas significativos de investigación. Sin embargo, en lugar de que la claridad sobre las preguntas de investigación e hipótesis preceda a la recolección y el análisis de los datos, los estudios cualitativos pueden desarrollar preguntas e hipótesis antes, durante o después de la recolección y el análisis de los datos. La investigación cualitativa se emplea principalmente en las etapas iniciales de un estudio para explorar y describir un fenómeno o problema en detalle. Proporciona una comprensión profunda y rica de los aspectos subjetivos y contextuales del tema en estudio.

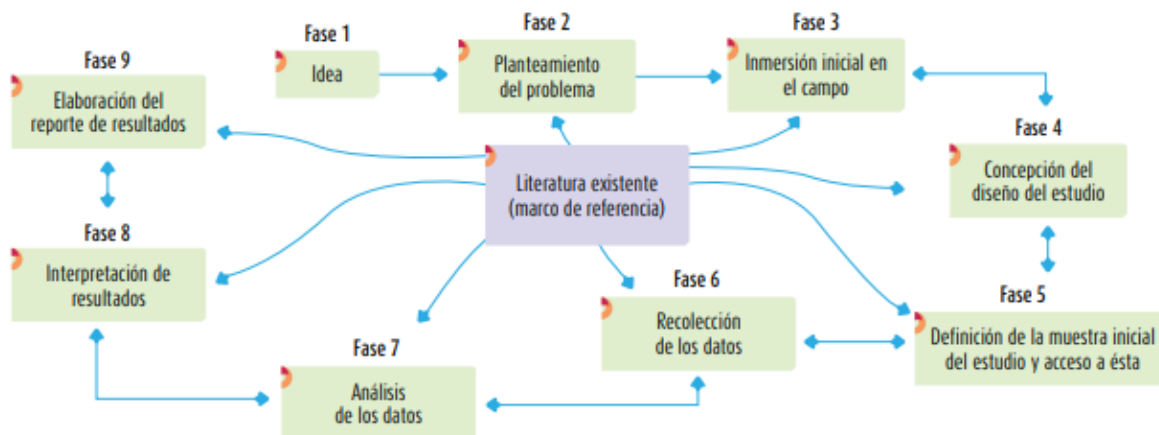


Figura 2.4: Proceso cualitativo Tomado de [27]

El enfoque o aproximación cualitativa posee las siguientes características:

1. El investigador plantea un problema.

2. En la mayoría de los estudios cualitativos no se prueban hipótesis, sino que se generan durante el proceso y se perfeccionan conforme se recaban más datos; son un resultado del estudio.

3. El investigador cualitativo utiliza técnicas para recolectar datos, como la observación no estructurada, entrevistas abiertas, revisión de documentos, evaluación de experiencias. Estas técnicas permiten obtener información rica y detallada directamente de los participantes o del contexto en el que se desarrolla el fenómeno.

4. La aproximación cualitativa evalúa el desarrollo natural de los sucesos. El enfoque puede concebirse como un conjunto de prácticas interpretativas en el que los investigadores examinan los datos para identificar patrones, temas y relaciones significativas. El análisis cualitativo suele ser inductivo, lo que significa que las teorías y conclusiones se derivan de los datos en lugar de probar hipótesis preestablecidas.

¿Cuáles son las diferencias entre el enfoque cuantitativo y cualitativo?

El enfoque cualitativo busca principalmente la expansión de los datos e información, mientras que el enfoque cuantitativo pretende “acotar” intencionalmente la información. Mientras que un estudio cuantitativo se basa en investigaciones previas, el estudio cualitativo se fundamenta primordialmente en sí mismo. El cuantitativo se utiliza para consolidar las creencias (formuladas de manera lógica en una teoría o un esquema teórico) y establecer con exactitud patrones de comportamiento de una población; el cualitativo, para que el investigador se forme creencias propias sobre el fenómeno estudiado, como lo sería un grupo de personas únicas o un proceso particular.

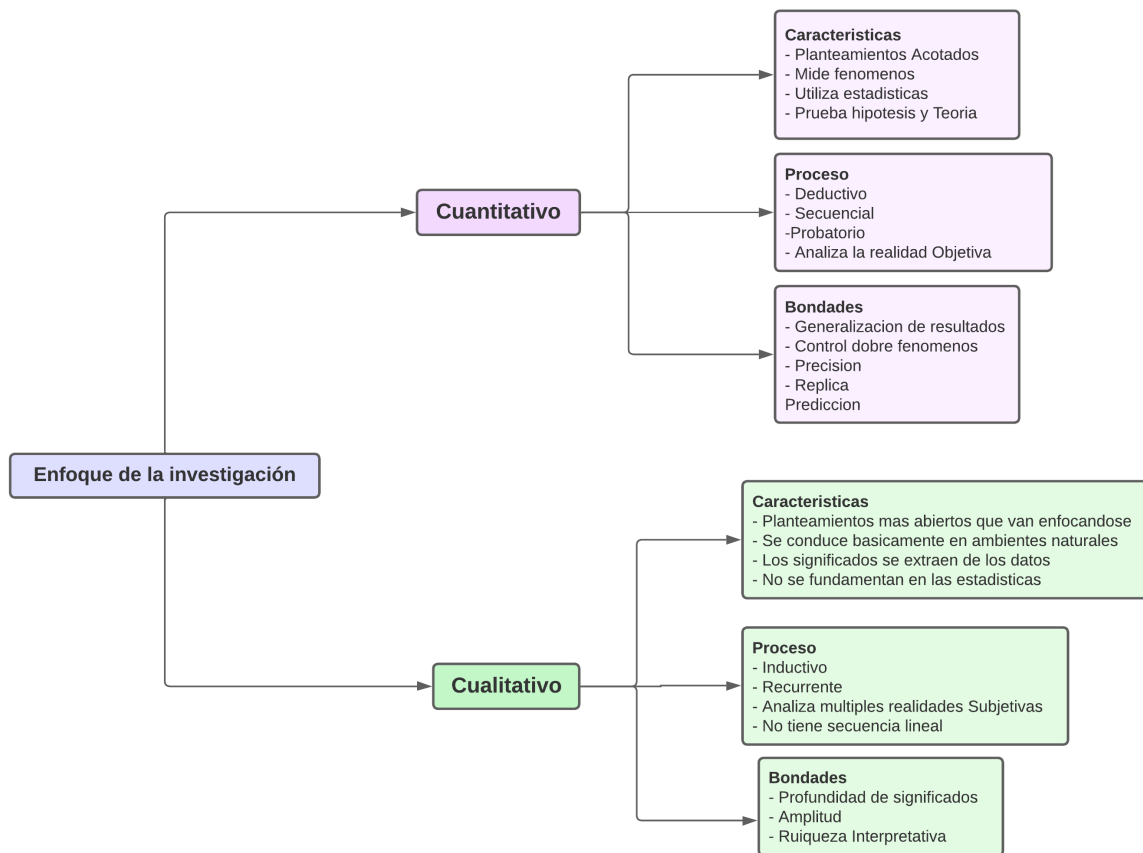


Figura 2.5: Clasificación de la metodología de la investigación adaptado de [27]

De acuerdo con lo planteado anteriormente y entendiendo como cada enfoque de la metodología de investigación brinda ciertos beneficios y características propias para emplear dentro de un proyecto. Se establece que el enfoque cuantitativo para el desarrollo de este trabajo de investigación es el más apropiado. Este enfoque presenta ventajas más significativas en comparación al enfoque cualitativo y facilita el planteamiento y desarrollo del proyecto de manera más acertada. la investigación cuantitativa proporciona profundidad a los datos, dispersión y riqueza interpretativa.

2.2.3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Para que un proyecto de simulación tenga éxito se debe establecer con claridad una metodología de simulación que permita tener buenos resultados. A continuación, se desglosa con detenimiento las bases teóricas de las etapas comprendidas para llevar a cabo la metodología de simulación planteada.

Cuando se hace referencia a la metodología de simulación, se tiene en cuenta que esta sirve de guía en la toma de decisiones al crear una representación de los escenarios propuestos, mediante el uso de las herramientas de software y desarrollo de las etapas de dicha metodología, se define las siguientes etapas.

Formulación del problema:

Esta es una de las etapas más determinantes a la hora de hacer la metodología de la simulación, ya que se hace necesario comprender el sistema a modelar. Esto incluye el estado actual del sistema (lo que está sucediendo) y el objetivo deseado.

En esta etapa se debe definir y dejar claro los objetivos propuestos para el proyecto y expresarlo formalmente, de tal manera que se tome el proceso más adecuado para el desarrollo de la simulación con respecto a los objetivos de estudio.

Desarrollo:

Para un desarrollo adecuado de la metodología se tiene en cuenta las siguientes subetapas:

- **Recolección de datos:** Reunir la mayor cantidad de información posible de diversas fuentes confiables, que permitan tener robustez a la hora de hacer uso de ellos y obtener un concepto más detallado y acertado en la investigación. Una vez la recolección de información este completa, se debe verificar la cantidad y calidad de los datos obtenidos.
- **Diseño de modelo conceptual:** Antes de ir directamente a codificar o simular se debe elaborar un diseño conceptual que le permita tener una visión más amplia haciendo uso de herramientas de modelado.

- **Construcción del modelo:** En esta etapa se define un modelo lógico, por ello es muy importante entender qué métricas se usarán. En este sentido, [28] contextualiza que “la construcción de un modelo de simulación es tanto un arte como una ciencia”. Con el propósito de pronosticar eventos, evaluar consecuencias y proponer alternativas que contribuyan a mejorar el comportamiento de este. Es aquí donde los términos información, análisis, crítica, diseño y creatividad se integran para dar forma a la estructura del modelo.

De acuerdo con los objetivos propuestos y a las necesidades establecidas dentro del sistema modelado, se define el lenguaje de programación o herramienta de simulación a utilizar.

- **Verificación:** La verificación implica asegurarse de que el modelo de simulación sigue las especificaciones del modelo conceptual. Es decir, ya que se tiene el modelo en un programa de computación, es necesario asegurar que el modelo conceptual refleje con precisión los parámetros, sucesos y lógica del sistema real. Aquí es donde se podrá verificar si el modelador alimentó al software de simulación con información correcta.
- **Validación:** La validación requiere comprobar que las hipótesis de trabajo sean correctas, es decir, el modelo debe basarse en el mundo real para que sus resultados sean válidos.

Validar un modelo es hacer un juicio relativo; su utilidad debe ser comparada con el sistema real mediante la realización de pruebas del modelo con respecto al sistema real, en condiciones normales de operación. El modelo es válido si representa adecuadamente al sistema que está siendo modelado. Aquí se pueden formular preguntas del siguiente tipo: ¿La secuencia de movimientos y operaciones son correctas?, ¿Son semejantes los datos estadísticos del modelo con los de la realidad? Si lo anterior es correcto, entonces podría decirse que el modelo sí representa al sistema real.

Diseño de experimentos:

Se plantea los experimentos correspondientes de acuerdo con el modelo de simulación establecido, teniendo en cuenta ciertos aspectos importantes que se deben definir como lo son las condiciones bajo las cuales se desea simular el tiempo y el número de iteraciones requeridas. Así, se logra identificar si la ejecución de la simulación cumple con lo requerido. [28]

Puesta en marcha:

En esencia, es proyectar distintos escenarios de simulación a diferentes espacios de tiempo; lo anterior permitirá tomar decisiones con mayor certidumbre fundamentadas bajo los resultados del análisis estadístico de un modelo de simulación.

Se verifica en esta etapa de ejecución si el modelo de simulación implementado cumple con lo establecido o de lo contrario se procede a corrección de los parámetros que requieran una modificación.

- **Análisis y Evaluación:** En esta etapa final se recopila los resultados obtenidos y se crea la documentación técnica correspondiente, en la cual estará descrito a detalle el resultado del procedimiento realizado.
- **Documentación:** Los resultados del trabajo deben ser redactados en forma clara y concisa en un reporte final. Esto tiene el propósito de describir todos los aspectos importantes del estudio. Por lo tanto, la documentación del proyecto tendrá que ser una tarea continua durante toda la construcción del modelo de simulación.

ALGORITMO DE SIMULACIÓN

En cada situación el proceso de simulación facilita los medios para analizar el sistema, a su vez permite un enfoque innovador para lograr mejorar soluciones, de esta manera y teniendo en cuenta las metodologías previamente establecidas por diferentes investigadores, se lleva a cabo el siguiente algoritmo de simulación. [29]

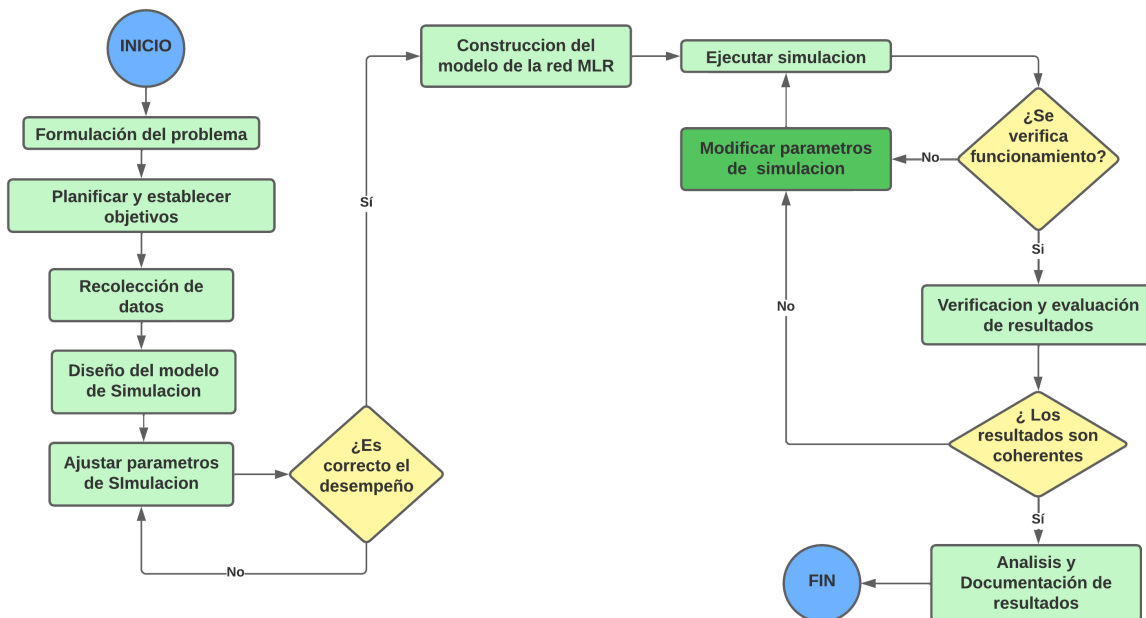


Figura 2.6: Algoritmo de simulación para la herramienta OptSim. De los Autores.

2.3. MODELO DE SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES ÓPTICO MULTI-PORTADORA DE TIPO MLR

Con base en la teoría expuesta en el primer capítulo y teniendo en cuenta el trabajo de investigación titulado "Análisis a nivel de simulación del desempeño en la migración de una red óptica SLR-DWDM a una red óptica MLR-DWDM implementando diferentes arquitecturas de red de banda ancha FTTx", se toma la decisión de adaptar la arquitectura de red implementada en el caso de estudio número tres [15]. Esta decisión tiene como objetivo utilizar la red propuesta como punto de partida y realizar modificaciones en los parámetros fundamentales, tales como la potencia del enlace y variables dentro del medio de transmisión. Lo anterior permitirá crear diversos escenarios para analizar la incidencia y el comportamiento de los efectos no lineales tipo Kerr presentes en los futuros casos de estudio dentro de este proyecto de investigación.

Para esta arquitectura red se plantean distintas características de acuerdo con los requisitos de red específicos, incluyendo dispositivos comerciales, recomendaciones de la ITU-T y parámetros de rendimiento para evaluar el desempeño de la red. Es importante señalar que el factor de costos de la red se considera en función de su complejidad, pero no se presentan cifras ni se realiza un análisis financiero completo, dado que el modelo de red se aborda únicamente a nivel de simulación y no se utilizan bases para realizar un análisis técnico-económico de una infraestructura existente.

2.3.1. Caracterización del modelo de simulación

Se adapta una arquitectura red multiportadora con velocidad de transmisión de línea mixta (MLR) partiendo de la tecnología DWDM punto a punto unidireccional, la cual se destaca por su facilidad de instalación y operación, así como por su capacidad para transmitir datos a altas velocidades a través de enlaces de larga distancia. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estas redes presentan limitaciones en términos de la transmisión bidireccional de información, ya que solo permiten el envío de datos en un solo sentido. Ante esta limitación, una solución comúnmente adoptada es la implementación de sistemas de doble fibra, que permiten lograr una comunicación completa y bidireccional.

La recomendación ITU-T G.694.1 establece claramente la preferencia de utilizar las bandas L y C para las redes DWDM. Específicamente, la banda C abarca el rango de longitud de onda de 1530 a 1560 nm. Siguiendo esta recomendación, se considera como punto inicial una red con una velocidad neta de 40 Gbps, enfocándose en el enlace de bajada por canal.

En la arquitectura de esta red, se han configurado un total de 10 canales, cada uno con características específicas. Estos canales se distribuyen de la siguiente manera: se asignan cuatro canales con una velocidad de 2.5 Gbps, otros cuatro canales con una velocidad de 10 Gbps, y finalmente, se incluyen dos canales de 40 Gbps. Estos canales utilizan las tecnologías XG-PON, XGS-PON y NG-PON2, respectivamente. La configuración permite aprovechar las ventajas de cada tecnología en función de los requisitos de velocidad y capacidad de cada canal. Los canales de menor velocidad, con 2.5 Gbps, pueden beneficiarse de la eficiencia y el despliegue masivo de la tecnología XG-PON. Los canales de 10 Gbps, a su vez, pueden aprovechar la mayor capacidad de transmisión de datos proporcionada por la tecnología XGS-PON. Por último, los canales de 40 Gbps, utilizando la tecnología NG-PON2, permiten una transmisión a alta velocidad y una mayor capacidad de ancho de banda.

A continuación, se realizará una descripción detallada de los elementos a utilizar en el sistema de red. Para una mejor comprensión, la red se dividirá en tres secciones: la sección de transmisión (sección TX), la sección del medio de transmisión (sección MTX) y la sección de recepción (sección RX).

En la sección TX, se encuentran los componentes encargados de enviar la señal. Esto incluye las fuentes de datos que son dispositivos emisores que generan la información a transmitir, dentro de estos dispositivos se destaca el láser óptico de onda continua (CW, *continuous wave*), que se utiliza actualmente en redes ópticas debido a que posibilita una alta velocidad de transmisión. También es importante aclarar que según la recomendación ITU-T G.691 se establece que, para una red MLR XG-PON con tecnología DWDM, la potencia media de transmisión debe estar configurada en un rango de 0 a 6 Dbm. De acuerdo a lo expuesto anteriormente, se elige el láser óptico de onda continua.

En el contexto de esta investigación, se emplean dispositivos de transmisión, como transmisores ópticos o dispositivos de modulación, que desempeñan un papel fundamental al convertir la señal en un formato adecuado para su transmisión a través del medio de comunicación. Es importante tener en cuenta que se implementan diversos tipos de modulación, dependiendo de la tecnología y la velocidad utilizada en cada canal.

En este sentido, a través de diversos estudios se plantea que la técnica de modulación OOK presenta un rendimiento óptimo a velocidades de hasta 10 Gbps. Sin embargo, a medida que las velocidades aumentan, como en casos de 20 Gbps, 40 Gbps o 100 Gbps, se ha observado que formatos como la Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase (DPSK, *Differential Phase Shift Keying*) o la Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura Diferencial (DQPSK, *Differential Quadrature Phase Shift Keying*) tienden a ser más eficientes. En este contexto, se realiza una cuidadosa evaluación de los formatos de modulación según la velocidad requerida en cada canal, como se observa en la tabla 2.2.

Velocidad del Canal	Tipo de modulación
2.5 Gbps	NRZ-OOK
10 Gbps	RZ-OOK
40 Gbps	RZ-DPSK

Tabla 2.2: Formato de modulación, adaptada de [15]

Se recomienda utilizar la codificación RZ (*Return to Zero*) debido a sus características que resultan beneficiosas en la transmisión de datos. Esta técnica de codificación se destaca por dividir cada bit en pulsos separados dentro de un intervalo de tiempo determinado, lo cual facilita la detección y recuperación de la señal.

La codificación RZ ofrece una mayor inmunidad a los efectos no lineales, lo que la convierte en una opción adecuada para garantizar una transmisión más confiable y estable, especialmente en velocidades altas como 10 Gbps o 40 Gbps. Al dividir los bits en pulsos separados, se logra una mejor discriminación entre los estados de señal, reduciendo así la posibilidad de errores de detección.

En el caso de velocidades de 2.5 Gbps, se implementa el formato NRZ (*Non-Return to Zero*). Aunque la codificación NRZ no divide los bits en pulsos separados, sigue siendo una opción válida para velocidades más bajas. La elección del formato de codificación se basa en consideraciones de rendimiento y eficiencia, teniendo en cuenta los requerimientos específicos de cada velocidad de transmisión.

La sección del medio de transmisión (sección MTX) comprende los elementos físicos utilizados para transmitir la señal desde la sección TX a la sección RX. En una red cableada, esto puede incluir cables de fibra óptica, cables de cobre u otros medios de transmisión utilizados para transportar la señal a través de distancias y ubicaciones específicas. Para este caso, se ha optado por utilizar una fibra monomodo (SMF) debido a su idoneidad para enlaces de redes que requieren un gran ancho de banda y que suelen estar distribuidos en áreas extensas. Entre las fibras del tipo SMF normalmente se utiliza la Corning SMF-28e según la recomendación ITU-T G.652, pues esta permite alcanzar largas distancias a altas tasas de transmisión, su coeficiente de dispersión está entre 16 y 17 ps/nm*Km, y el valor de atenuación para redes alrededor de 1550 nm (banda C) corresponde a 0.275 dB/Km. Según el datasheet [30] de la fibra Corning SMF-28e, el índice de refracción nominal es de aproximadamente 1.4682 a una longitud de onda de 1550 nm. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el índice de refracción puede variar ligeramente dependiendo de la temperatura y otros factores.

Finalmente, En la sección de recepción (sección RX), se encuentran los componentes encargados de recibir y procesar la señal transmitida. Estos componentes incluyen dispositivos receptores, como receptores ópticos, que captan la señal y dispositivos de demodulación, encargados de recuperar la información transmitida.

En este contexto, el coseno al cuadrado se utiliza como una función de filtrado en la sección de recepción. Esta función tiene como objetivo mejorar la calidad de la señal recibida y reducir el impacto de interferencias y ruido. El filtrado óptimo basado en el coseno al cuadrado minimiza la interferencia inter símbolo, que es la interferencia causada por la superposición de símbolos adyacentes en la señal transmitida. Gracias a las características espectrales del coseno al cuadrado, con un ancho de banda limitado, se logra disminuir la interferencia entre símbolos.

También resulta necesario considerar el último tramo de la red, donde se realiza la entrega de servicios a los usuarios. Según lo expuesto anteriormente en la sección TX, se hace referencia a diferentes opciones de arquitectura de redes de banda ancha que emplean fibra óptica para los últimos tramos de conectividad, conocidas como FTTx. La compatibilidad entre FTTx y PON permite abordar la parte correspondiente a la última milla en la red propuesta. Además de los dispositivos receptores y de demodulación, en la sección de recepción también se pueden utilizar equipos adicionales como conmutadores o enrutadores. Estos equipos tienen la función de direccionar y gestionar la señal recibida, asegurando que los datos sean enviados a los destinos adecuados.

2.3.2. Implementación del modelo general

A partir de la información expuesta anteriormente, se adopta el modelo de simulación de una red MLR bajo la recomendación del estándar ITU-T G.694.1, el cual establece que los sistemas DWDM se distinguen por operar en la banda C y tener un espaciamiento de canales de 100 GHz (equivalente a 0,8 nm) o menos. Esto define el ancho de banda total utilizado por un determinado número de canales. Gracias a esta separación, DWDM puede incluir ocho o más canales dentro del rango de 1550 nm. Por consiguiente, se elige trabajar con un total de 10 canales en la red

Además, basándonos en la previa caracterización de la red de transmisión MLR, los canales de 2.5 Gbps utilizarán la modulación NRZ-OOK, mientras que los canales de 10 Gbps emplearán la modulación RZ-OOK. Se adapta la red para trabajar sobre velocidades basadas en los estándares XGPON, XGS-PON y NG-PON2. Como ya se sabe, XGPON permite una velocidad de 2.5 Gbps, XGS-PON permite operar con velocidades simétricas de 10 Gbps y se implementa en conjunto con NG-PON2 para velocidades de 40 Gbps, el cual es un estándar de red de telecomunicaciones de 2015 desarrollado por la UIT para una red óptica pasiva, definida en sus recomendaciones ITU-T G.989.1 a ITU-T G.989. La tecnología NGP02, también conocida como Next Generation Passive Optical Network 2, es una tecnología de red de acceso óptico que se utiliza para proporcionar servicios de banda ancha de alta velocidad a los usuarios finales. NGP02 es una evolución de la tecnología anterior, conocida como GPON (Gigabit Passive Optical Network), y se ha desarrollado para mejorar la capacidad y la eficiencia de las redes de acceso óptico. Además, NGP02 utiliza técnicas de multiplexación por división de longitud de onda (WDM) para maximizar la capacidad de la red y optimizar el uso del

ancho de banda disponible. Esto significa que múltiples usuarios pueden compartir la misma fibra óptica sin degradar el rendimiento.

La utilización del esquema de modulación DPSK (Differential Phase Shift Keying) presenta mejoras significativas en las comunicaciones ópticas de larga distancia en comparación con los formatos OOK (On-Off Keying). Estas mejoras se reflejan en una mayor sensibilidad del receptor y una mayor tolerancia a los efectos no lineales. Además, tanto OOK como DPSK pueden implementarse con las técnicas de codificación NRZ (Non-Return to Zero) o RZ (Return to Zero) sin que esto afecte la amplitud de la señal. Por esta Razón se decide implementar dicha modulación para velocidades de 40 Gbps

Para optimizar el rendimiento y la complejidad de implementación de la red actual, se ha decidido ajustar el número de canales de acuerdo con la siguiente configuración:

- Los canales de 40 Gbps se ubicarán como el primer y último canal (canales 1 y 10).
- Los canales de 10 Gbps se distribuirán entre ellos, ocupando los canales 2, 3, 8 y 9.
- Los canales de 2.5 Gbps estarán presentes en CH 4, 5, 6 y 7

Estos Anteriores abarcando una distancia de 80 Km, considerando el tramo adicional de fibra de 900 m para la última milla.

La organización de canales planteada permite una asignación asimétrica, lo que optimiza el uso del ancho de banda y mejora la distancia entre canales (ISD) de manera anticipada. Con esta disposición, los canales de 2.5 Gbps pueden tener una separación de 25 GHz entre ellos, mientras que los canales de 10 Gbps necesitan al menos 50 GHz de separación entre sí. Por otro lado, los canales de 40 Gbps requieren una separación de al menos 100 GHz. Con esta configuración cuidadosamente planeada, se logra una distribución eficiente de los canales de diferentes velocidades, maximizando el rendimiento de la red y asegurando una óptima utilización del espectro disponible.

En la tabla 2.3 se resumen los parámetros iniciales implementados para la red actual, los cuales se obtienen en gran parte de la información presentada durante la caracterización del modelo adoptado.

Sección	Parámetros	Valor
	No. Canales	10
OLT	Potencia de transmisión a 2.5 Gbps	0 dBm
	Potencia de transmisión a 10 Gbps	5 Bm
	Potencia de transmisión a 40 Gbps	0 dBm
	Longitud de Onda	1530 - 1560 nm
	Tipo de Modulación Óptica a 2.5 Gbps	NRZ-OOK
	Tipo de Modulación Óptica a 10 Gbps	RZ-OOK
	Tipo de Modulación Óptica a 40 Gbps	RZ-DPSK
ODN	Fibra óptica	Corning SMF-28e
ONT	Sensibilidad del Receptor	-30 dBm
	Modulador óptico	Mach-Zehnder
	Tipo de filtro óptico	Coseno Rizado, Gaussiano
	Tipo de filtro Eléctrico	Bessel

Tabla 2.3: Características de simulación, adaptada de [15]

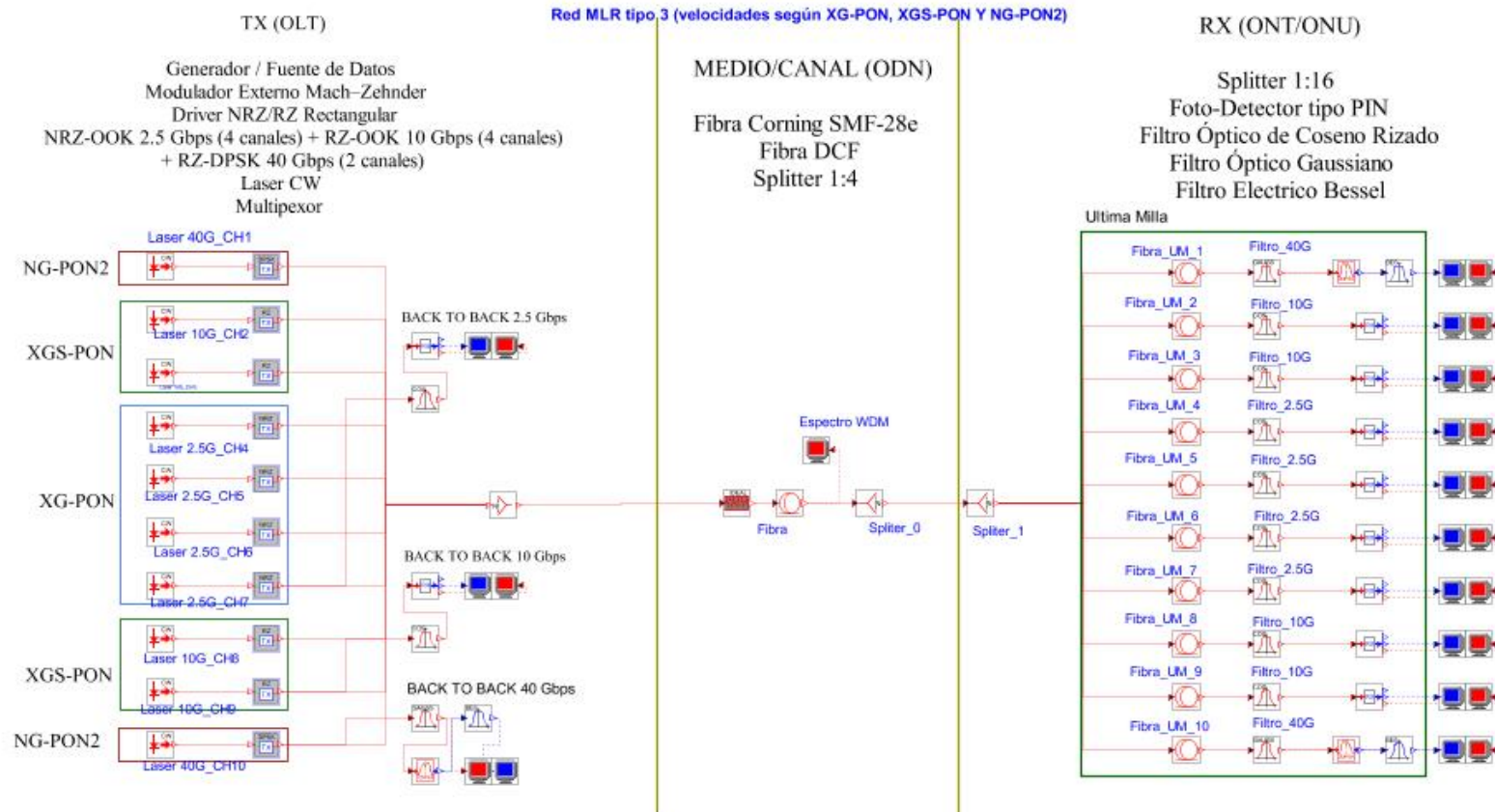


Figura 2.7: Red MLR 10 Canales

Sección de transmisión asociada a la OLT

En el lado del transmisor, se emplea un láser de onda continua con una característica de ancho a la mitad (FWHM, por sus siglas en inglés) de 1 MHz. Este láser proporciona una señal óptica estable y coherente, lo que es crucial para una transmisión confiable en sistemas de comunicaciones ópticas. La figura 2.8 muestra la configuración del láser en la herramienta OptSim, proporcionando información detallada sobre sus características espectrales, como la frecuencia central y la potencia óptica emitida. Esto es esencial para comprender el rendimiento del láser y asegurarse de que cumple con los requisitos del sistema.

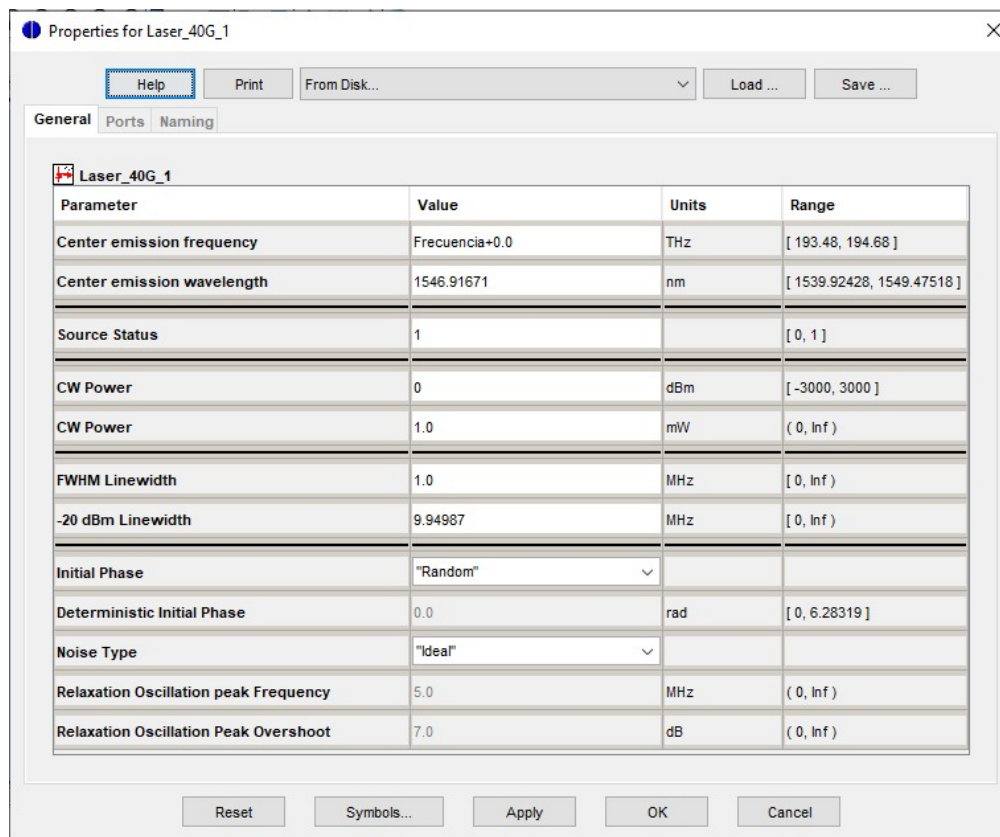


Figura 2.8: Configuración del Láser.

Como se observa en 2.9 Para la modulación de la señal óptica, se utilizan moduladores ópticos externos del tipo Mach-Zehnder. Estos dispositivos permiten variar las propiedades de la señal óptica en función de los datos que se desean transmitir. La modulación es un paso crítico en la transmisión de datos, ya que convierte la señal continua del láser en pulsos ópticos, representando la información que se transmitirá.

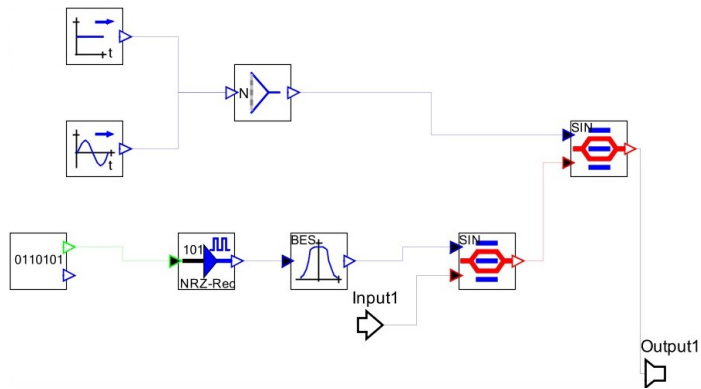


Figura 2.9: Módulo del transmisor del canal a 40 Gbps.

Además, se incorpora un generador de datos a 40 Gbps, que es la tasa de bits a la que los datos se transmiten a través del sistema. Esta velocidad de transmisión es significativa, ya que determina la capacidad de transferencia de información en el sistema.

Sección Medio de transmisión asociada a la ODN

Considerando los 10 canales del diseño del esquema de red y la utilización de la fibra tipo Corning SMF-28e, se muestra a continuación de forma gráfica el espectro óptico de estos canales en la fibra monomodo.

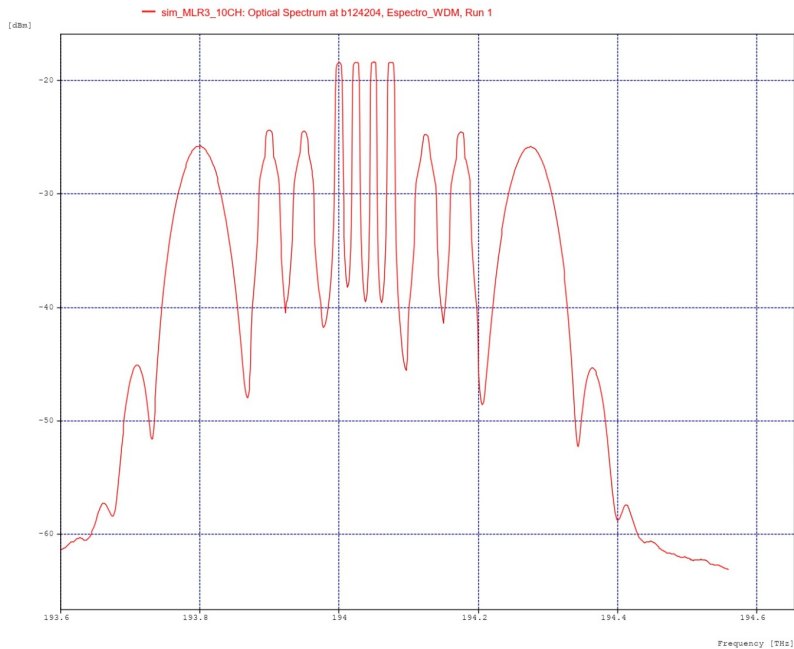


Figura 2.10: Espectro Óptico de los 10 canales, de los Autores.

Aquí, se representa el espectro óptico en un gráfico visual donde se muestran los 10 canales junto con sus respectivas longitudes de onda. Cada canal se representa como una línea con una longitud de onda específica, indicando la porción del espectro que ocupa.

La fibra de tipo Corning SMF-28e es conocida por su baja atenuación y su capacidad para transmitir señales ópticas de alta calidad a largas distancias. Por lo tanto, es una elección adecuada para el despliegue de redes de comunicaciones ópticas. Esta fibra se caracteriza por ser una fibra monomodo, lo que significa que solo admite la propagación de un solo modo de luz. Esto permite una transmisión de señales más confiable y libre de dispersión modal.



Una de las principales ventajas de la fibra óptica es su capacidad para ofrecer un ancho de banda amplio, lo que significa que puede transportar grandes cantidades de datos en un corto período de tiempo. Esto la convierte en una solución ideal para aplicaciones que requieren una transmisión rápida y eficiente. Además, la fibra óptica permite la transmisión de señales a velocidades extremadamente altas, como 40 Gbps, lo que la hace especialmente adecuada para redes que manejan un tráfico de datos intenso. Su capacidad para operar en diferentes longitudes de onda también es una ventaja significativa, ya que facilita su implementación en sistemas que utilizan múltiples longitudes de onda para aumentar la capacidad de transmisión y mejorar la flexibilidad de la red.

Un aspecto relevante de la fibra óptica es el índice de refracción, que determina la velocidad a la que la luz se propaga a través del material dieléctrico. Para la fibra óptica Corning SMF-28e, los índices de refracción proporcionados a 1310 nm (1.4674) y 1550 nm (1.4679), los cuales son valores típicos y comunes para fibras monomodo utilizadas en comunicaciones ópticas. La fibra monomodo es una variante de fibra óptica que permite un solo modo de propagación de luz, lo que minimiza la dispersión y las pérdidas de señal, haciéndola ideal para la transmisión de datos a largas distancias y en aplicaciones de alta capacidad.

En términos generales, un índice de refracción más bajo en la fibra óptica puede aumentar los efectos no lineales. Sin embargo, los valores de índice de refracción proporcionados (1.4674 y 1.4679) están dentro del rango típico para fibras monomodo y no deberían presentar problemas significativos en aplicaciones de comunicaciones estándar.

Optical Specifications

Fiber Attenuation

Maximum Attenuation

Wavelength (nm)	Maximum Value* (dB/km)
1310	0.33 – 0.35
1383**	0.31 – 0.35
1550	0.19 – 0.20
1625	0.20 – 0.23

*Maximum specified attenuation value available within the stated ranges.

**Attenuation values at this wavelength represent post-hydrogen aging performance.

Alternate attenuation offerings available upon request.

Attenuation vs. Wavelength

Range (nm)	Ref. λ (nm)	Max. α Difference (dB/km)
1285 – 1330	1310	0.03
1525 – 1575	1550	0.02

The attenuation in a given wavelength range does not exceed the attenuation of the reference wavelength (λ) by more than the value α .

Macrobend Loss

Mandrel Diameter (mm)	Number of Turns	Wavelength (nm)	Induced Attenuation* (dB)
32	1	1550	≤ 0.05
50	100	1310	≤ 0.05
50	100	1550	≤ 0.05
60	100	1625	≤ 0.05

*The induced attenuation due to fiber wrapped around a mandrel of a specified diameter.

Point Discontinuity

Wavelength (nm)	Point Discontinuity (dB)
1310	≤ 0.05
1550	≤ 0.05

Cable Cutoff Wavelength (λ_{ccf})

$\lambda_{ccf} \leq 1260$ nm

Mode-Field Diameter

Wavelength (nm)	MFD (μ m)
1310	9.2 ± 0.4
1550	10.4 ± 0.5

Dispersion

Wavelength (nm)	Dispersion Value [ps/(nm \cdot km)]
1550	≤ 18.0
1625	≤ 22.0

Zero Dispersion Wavelength (λ_0): 1302 nm $\leq \lambda_0 \leq 1322$ nm

Zero Dispersion Slope (S_0): ≤ 0.089 ps/(nm 2 \cdot km)

Polarization Mode Dispersion (PMD)

	Value (ps/ \sqrt km)
PMD Link Design Value	$\leq 0.06^*$
Maximum Individual Fiber	≤ 0.2

*Complies with IEC 60794-3: 2001, Section 5.5, Method 1, (m = 20, Q = 0.01%), September 2001.

The PMD link design value is a term used to describe the PMD of concatenated lengths of fiber (also known as PMD_Q). This value represents a statistical upper limit for total link PMD. Individual PMD values may change when fiber is cabled. Corning's fiber specification supports network design requirements for a 0.20 ps/ \sqrt km maximum PMD.

Dimensional Specifications

Glass Geometry

Fiber Curl	≥ 4.0 m radius of curvature
Cladding Diameter	125.0 ± 0.7 μ m
Core-Clad Concentricity	≤ 0.5 μ m
Cladding Non-Circularity	$\leq 0.7\%$

Coating Geometry

Coating Diameter	245 ± 5 μ m
Coating-Cladding Concentricity	< 12 μ m

Environmental Specifications

Environmental Test	Test Condition	Induced Attenuation 1310 nm, 1550 nm & 1625 nm (dB/km)
Temperature Dependence	-60°C to +85°C*	≤ 0.05
Temperature Humidity Cycling	-10°C to +85°C* up to 98% RH	≤ 0.05
Water Immersion	23 \pm 2°C	≤ 0.05
Heat Aging	85 \pm 2°C*	≤ 0.05
Damp Heat	85°C at 85% RH	≤ 0.05

*Reference temperature = +23°C

Operating Temperature Range: -60°C to +85°C

Figura 2.11: Características Generales Fibra Corning SMF 28e, tomada de [1].

Sección Recepción asociada a la ONU

Al recibir las señales provenientes de los 10 canales del sistema, es crucial definir los elementos que permitirán obtener una mejor visión de cada una de las señales. Esto se logra mediante el uso de filtros ópticos, los cuales permiten diferenciar cada onda en función de sus propiedades. Para esta tarea, Optsim ofrece tres tipos de receptores ópticos: Sensitivity Optical Receiver, Single Channel Optical Receiver y Compound Optical Receiver.

En el modelo actual, se selecciona el receptor Sensitivity Optical Receiver, ya que simula un receptor óptico completo, que incluye el fotodetector, el amplificador y el filtro post-detección.

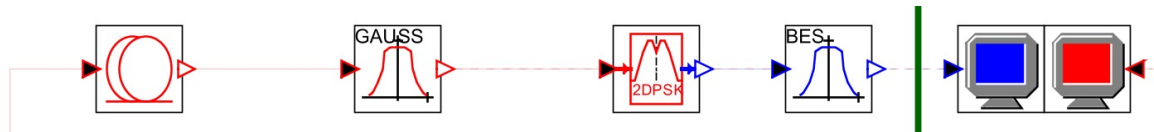


Figura 2.12: Recepción para el canal 1 de 40 Gbps, de los Autores.

La elección del receptor SOR (*Sensitivity Optical Receiver*) es especialmente relevante cuando se trabaja con señales ópticas de baja potencia o en entornos donde la atenuación es significativa. Al simular un receptor completo, se tienen en cuenta los componentes y las características necesarias para garantizar una recepción óptima de las señales en cada uno de los canales.

Mediante el uso del receptor SOR en el modelo actual, se puede obtener una evaluación precisa del rendimiento y la calidad de las señales ópticas recibidas en los 10 canales del sistema. Esto contribuye a una mejor comprensión de la respuesta de la red y permite tomar decisiones informadas para optimizar su funcionamiento.

El filtro eléctrico Bessel que desempeña un papel crucial en la recepción de sistemas de comunicación con velocidades de 40 Gbps. Sus características únicas ofrecen ventajas significativas en este entorno de alta velocidad. A medida que la velocidad de transmisión aumenta, la señal puede verse afectada por ruido e interferencias, lo que degrada la calidad de la recepción y dificulta la recuperación precisa de los datos. El filtro Bessel contribuye a suprimir el ruido y reducir la distorsión, mejorando así la integridad de la señal y la calidad del enlace de comunicación. En sistemas de alta velocidad, es crucial mantener la forma de onda original y la sincronización precisa de las señales. El filtro Bessel juega un papel fundamental en la preservación de la forma de onda y la sincronización entre las diferentes longitudes de onda utilizadas en sistemas WDM, lo que garantiza una recepción confiable y precisa.

Análisis inicial del modelo de referencia

Con base en las propiedades de la red mencionada, se llevará a cabo un análisis exhaustivo del rendimiento del enlace de descenso en la red de última milla FTTB. Como paso inicial en el proceso de análisis, se realizará una evaluación del espectro óptico de la señal multiplexada. En esta sección se presentarán los datos obtenidos del modelo inicial, que incluyen el diagrama del ojo y el espectro de la señal. Estos resultados serán una referencia fundamental para el desarrollo del trabajo de grado.

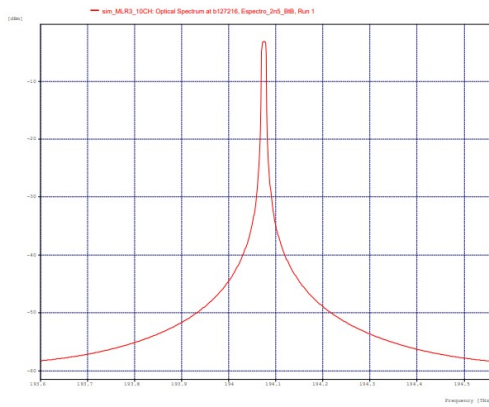
Canal	Velocidad de Tx [Gbps]	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q [dB]	OSNR [dB]	OSNR real [dB]	BW ocupado
1	40	-25.7304	$1e^{-40}$	36.50093	44.5601	4.09118	0.0508497
2	10	-24.3476	$1e^{-40}$	24.06792	49.1936	5.48919	0.0285917
3		-24.4251	$1e^{-40}$	30.25380	49.0162	5.34399	0.0288881
4	2.5	-18.3877	$1e^{-40}$	35.77747	51.6105	11.3772	0.0131955
5		-18.3563	$1e^{-40}$	36.28491	55.4139	11.4751	0.0120542
6		-18.3232	$1e^{-40}$	35.92146	60.1681	11.4607	0.0116033
7		-18.3417	$1e^{-40}$	35.84297	55.7015	11.4503	0.0120605
8	10	-24.6895	$1e^{-40}$	30.12416	50.3339	5.11872	0.02838
9		-24.5008	$4.83e^{-0,37}$	22.19041	51.5369	5.30382	0.0279846
10	40	-24.7942	$1e^{-0,40}$	32.15065	46.6739	3.99378	0.0463286

Tabla 2.4: Parámetros OPM para red MLR. De los autores

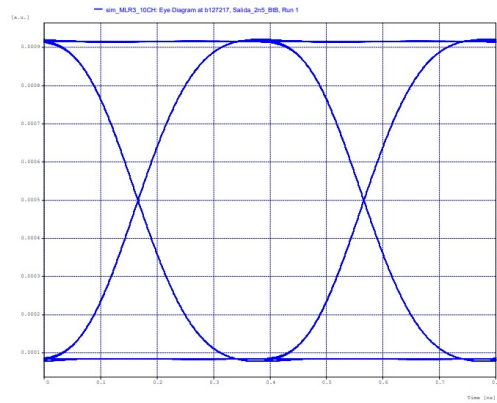
De los datos presentados previamente, se destaca que los canales de 2.5 Gbps muestran una baja variación entre sus valores de potencia y tasa de errores, lo que se traduce en factores Q similares para cada uno de ellos. En cuanto a los canales de 10 Gbps, el canal número 9 exhibe el valor más bajo del factor de calidad Q debido a su mayor tasa de errores en comparación con los demás canales, y eso, a pesar de tener la misma potencia. Para los dos canales con una velocidad de 40 Gbps, se observa que el canal 10 es el menos eficiente, ya que su factor de calidad Q disminuye más en comparación con el canal 1, a pesar de tener la misma potencia y tasa de errores.

Con base en la información expuesta, se selecciona un canal de cada velocidad para facilitar el análisis de la red. Por lo tanto, se enfoca el análisis en los canales 7, 9 y 10, con velocidades de 2.5 Gbps, 10 Gbps y 40 Gbps, respectivamente. A partir de esta selección, se obtiene el diagrama del ojo, que permitirá analizar la apertura y la calidad de la señal, revelando posibles distorsiones y degradaciones. Y el espectro en recepción de cada canal, que proporcionará información crucial sobre la calidad y la integridad de la señal multiplexada en el enlace descendente. Además, el espectro de la señal mostrará la distribución de potencia en las diferentes longitudes de onda utilizadas en el enlace. A continuación, en la figura 2.15 se pueden observar los resultados iniciales de

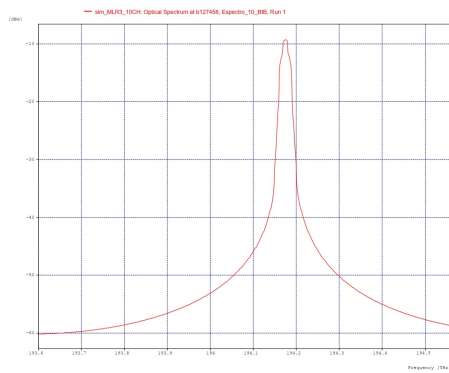
los parámetros anteriormente mencionados.



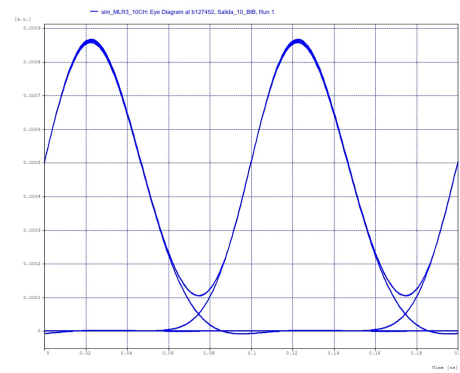
(a) Espectro del canal a 2.5 Gbps.



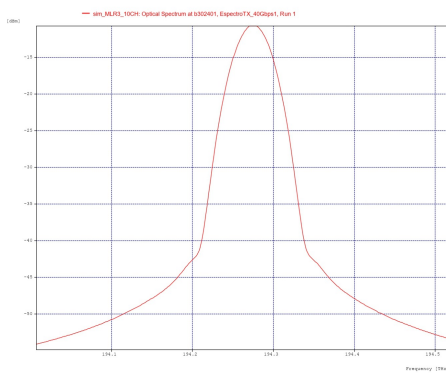
(b) Diagrama del ojo canal a 2.5 Gbps.



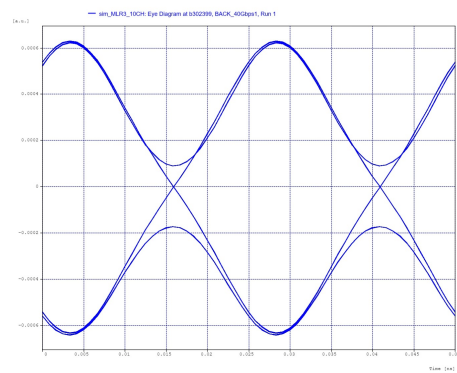
(a) Espectro del canal a 10 Gbps.



(b) Diagrama del ojo canal a 10 Gbps.



(a) Espectro del canal a 40 Gbps.



(b) Diagrama del ojo canal a 40 Gbps.

Figura 2.15: Desempeño ideal de una red MLR en Back to Back.

En las figuras 2.15, el análisis del espectro en frecuencia y el diagrama de ojo cumplen una función esencial al proporcionar una comprensión profunda y detallada de la integridad de las señales transmitidas a diversas velocidades, lo que permite realizar una evaluación en cuanto a la calidad y confiabilidad que caracterizan la comunicación. En un entorno caracterizado por la heterogeneidad de velocidades, estas herramientas no solo garantizan un rendimiento óptimo, sino que también posibilitan el análisis de efectos no lineales que podrían surgir debido a la interacción entre señales de distintas velocidades. Permitiendo así, un análisis eficiente de la transmisión de información de un sistema de comunicación, al mismo tiempo que se proporciona una visión profunda de los factores que podrían afectar la calidad de la señal en un entorno caracterizado por su diversidad y alta velocidad.

Para realizar un análisis comparativo entre las condiciones iniciales y los futuros casos de estudio, Siguiendo las recomendaciones de expertos en el campo, se ha establecido una distancia objetivo de 80 km para el enlace de comunicación. Sin embargo, como medida de precaución y con propósitos prácticos, se ha considerado también una extensión de 1 km en la última milla del enlace.

Es fundamental tener en cuenta que, al abordar este análisis, se ha tomado en consideración el canal de menor frecuencia del sistema, el cual corresponde a 193.8 THz. Además de la distancia objetivo y la frecuencia del canal, otros factores críticos que se han considerado incluyen las pérdidas por dispersión y atenuación en el enlace, así como las potenciales interferencias y ruido en el canal de transmisión. Estos aspectos son esenciales para comprender la viabilidad y eficiencia del sistema sin amplificación y para poder realizar una comparación significativa con otros sistemas que puedan requerir algún tipo de amplificación.

Así mismo, se han evaluado las características y especificaciones técnicas de los componentes utilizados en el sistema sin amplificación, como los transmisores y receptores ópticos, los moduladores y demoduladores, y los dispositivos de multiplexación y demultiplexación. Esto garantiza una comprensión exhaustiva de cómo cada elemento contribuye al rendimiento general del enlace y cómo se puede optimizar la configuración para maximizar la eficacia del sistema.

Al considerar las condiciones iniciales del sistema sin amplificación, se busca evaluar el rendimiento y las limitaciones del enlace en términos de distancia y la frecuencia más baja utilizada. Estos parámetros son fundamentales para comprender el comportamiento del sistema y determinar si se cumplen los requisitos establecidos. Por lo tanto, a continuación se presenta la eficiencia espectral del sistema que busca garantizar su rendimiento óptimo.

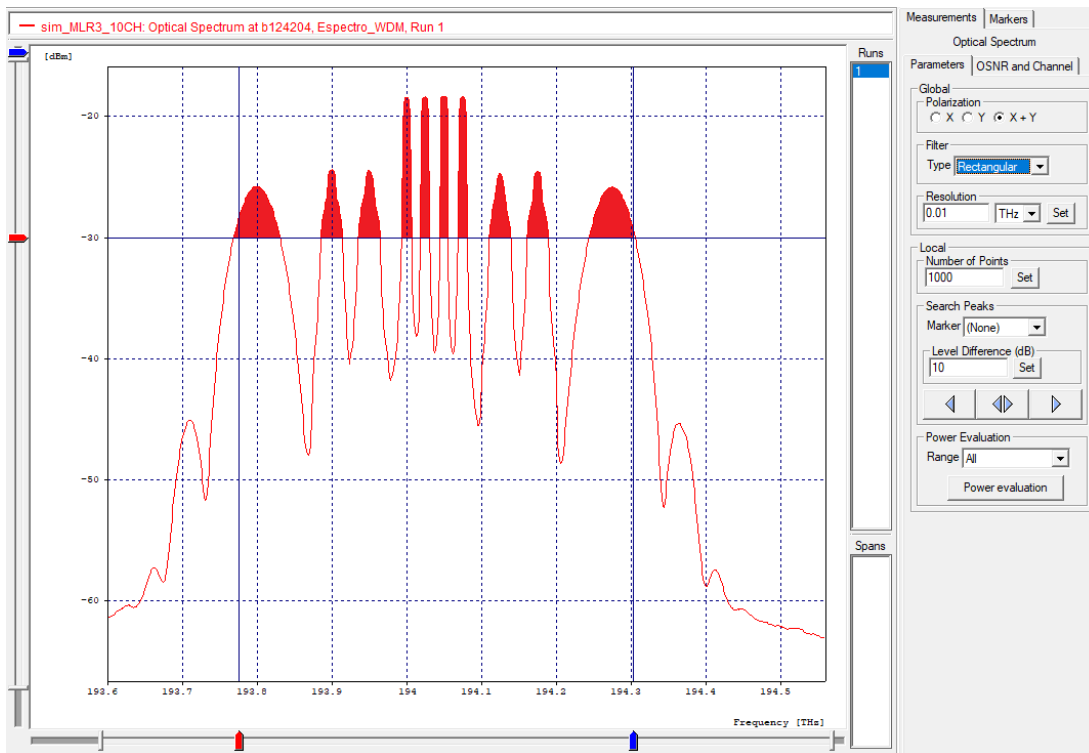


Figura 2.16: Ancho de banda útil de red MLR inicial, de los Autores.

En la figura 2.16 se presenta el espectro de los 10 canales con diferentes velocidades, donde gracias a esta representación gráfica es posible identificar los diferentes fenómenos no lineales causados por el efecto Kerr que se podrían presentar en la arquitectura actual. Por ejemplo, para los canales de 40 Gbps se pueden observar lóbulos adyacentes ubicados en 193.7 y 194.38 THz, que se interpreta como una incidencia del efecto XPM, por estar contiguo al canal de 10 Gbps. Generalmente, este fenómeno se presenta en sistemas de comunicación óptica de alta velocidad y es causado por la interacción entre dos o más señales ópticas que viajan por la misma fibra.

A continuación, se lleva a cabo una variación en el parámetro de potencia de transmisión en el láser, utilizando valores de 0, 2.5 y 5 dBm, manteniendo un índice de refracción de 1.4682. El objetivo es analizar, para cada caso, la intensidad de incidencia de los fenómenos no lineales al incrementar de manera progresiva la potencia de transmisión.

Mediante esta experimentación, se busca comprender cómo los cambios en la potencia de transmisión pueden afectar la aparición y magnitud de fenómenos no lineales en el sistema óptico. Esto permitirá obtener información relevante para el diseño y optimización de sistemas de comunicación y transmisión de datos, garantizando un rendimiento óptimo y una menor degradación de la señal en condiciones de mayor potencia de transmisión.

■ Potencia 0 dBm

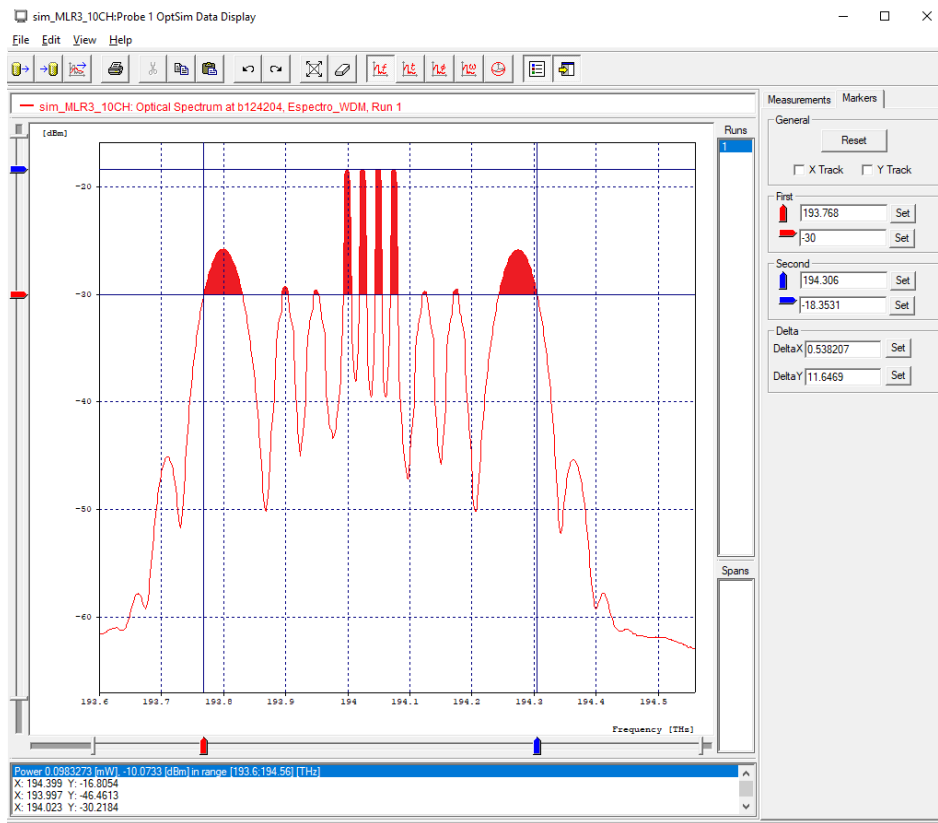
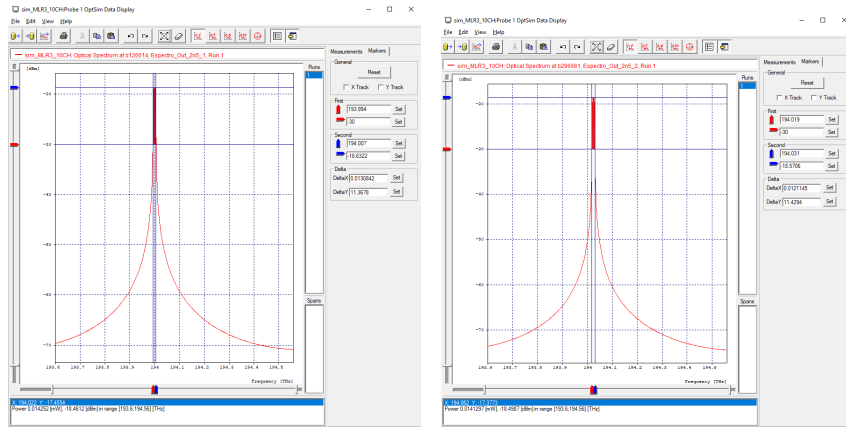


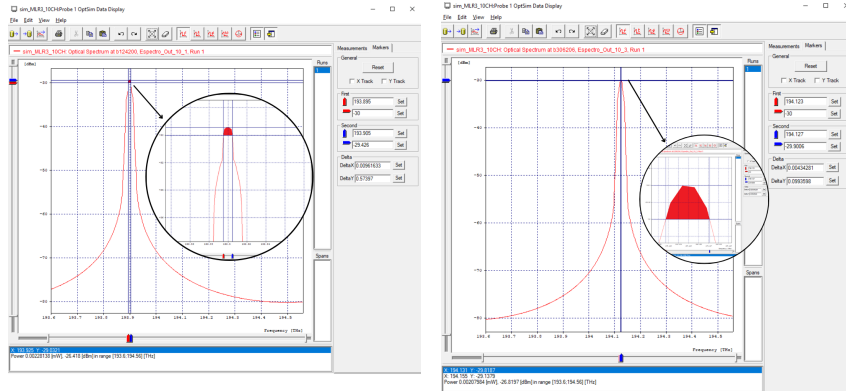
Figura 2.17: Espectro óptico de 10 canales a 0 dBm

Canal	Velocidad de Tx [Gbps]	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q [dB]	OSNR [dB]	OSNR real [dB]	BW ocupado
1	40	-12.6298	0.02275	6.0206	44.2427	4.03371	0.04647
2	10	-16.1265	0.02275	6.0206	50.0114	0.57397	0.009616
3		-16.3507	0.02275	6.0206	49.8906	0.2095	0.00645
4	2.5	-5.2693	$1e^{-40}$	40.0000	51.9043	11.3678	0.0130
5		-5.1964	$1e^{-40}$	38.6744	55.4795	11.4294	0.01211
6		-0.1662	$1e^{-40}$	40.0000	60.2033	11.4529	0.01161
7		-5.1893	$1e^{-40}$	40.0000	55.6917	11.4739	0.01219
8	10	-16.4742	0.02275	6.0206	50.4923	0.09935	0.004342
9		-16.3443	0.02275	6.0206	51.2825	0.320412	0.00811
10	40	-12.5834	0.02275	6.0206	47.1930	4.00455	0.04637

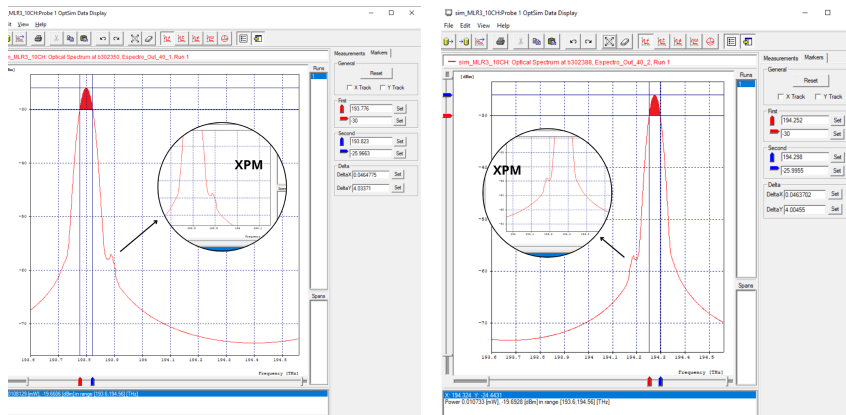
Tabla 2.5: Parámetros OPM para red MLR con 0 dBm. De los autores



(a) Espectro óptico Canal 4 de 2.5Gbps (b) Espectro óptico Canal 5 de 2.5Gbps



(a) Espectro óptico Canal 2 de 10Gbps (b) Espectro óptico Canal 8 de 10Gbps



(a) Espectro óptico Canal 1 de 40Gbps (b) Espectro óptico Canal 10 de 40Gbps

Figura 2.20: Espectro optico para los canales de 2.5 Gbps, 10 Gbps y 40 Gbps

Aunque la potencia de 0 dBm puede considerarse baja en comparación con niveles más altos, sigue siendo suficiente para inducir efectos no lineales en la fibra óptica, específicamente el efecto de modulación cruzada (XPM). Esto se debe a la interacción de intensidades ópticas y la respuesta no lineal del material de la fibra. A medida que las señales ópticas se propagan a través de la fibra, sus intensidades modulan la fase de otras señales cercanas en frecuencia, lo que resulta en cambios y distorsiones en las señales.

La presencia continua de efectos no lineales, como el XPM, incluso a niveles de potencia aparentemente bajos, es consecuencia de la naturaleza intrínseca de esa no linealidad óptica. Estos fenómenos no lineales son sensibles a cambios en la intensidad y frecuencia de las señales, y estos cambios pueden influir en la interacción entre las señales, independientemente del nivel absoluto de potencia. [31]

■ Potencia 2.5 dBm

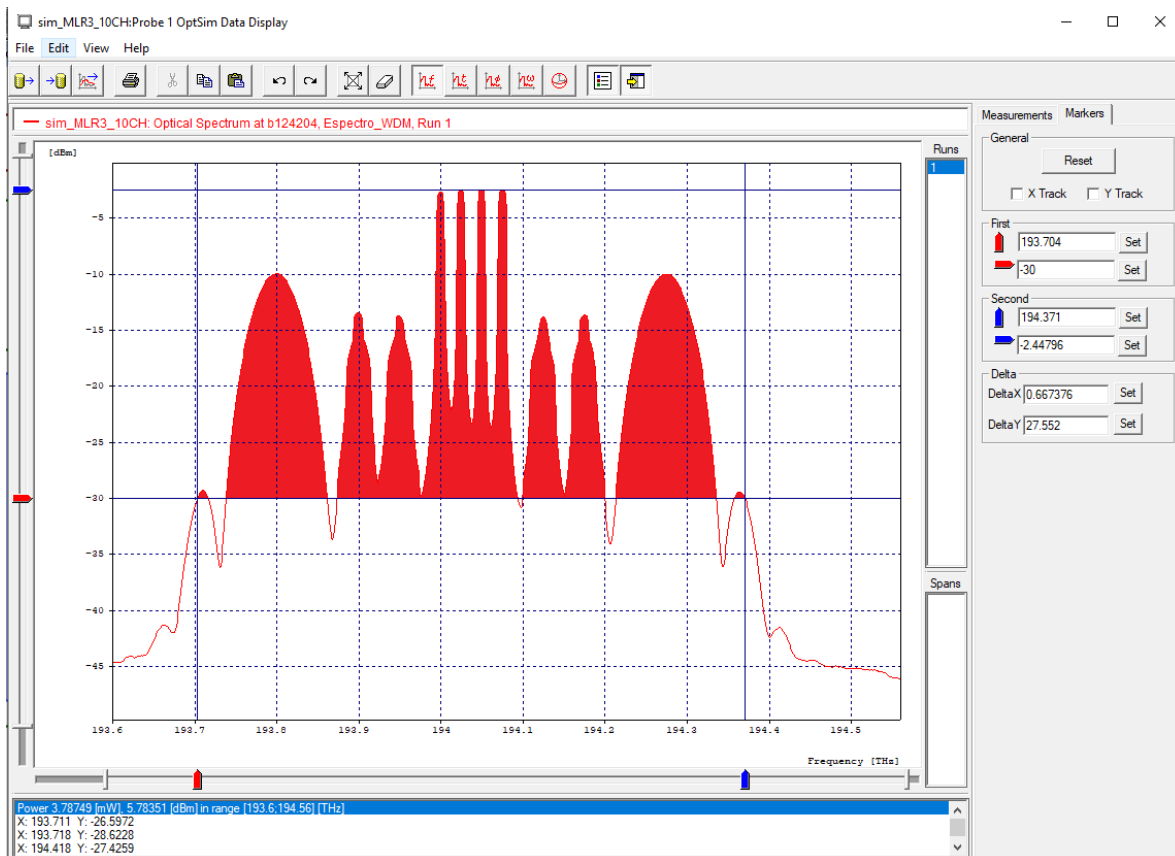
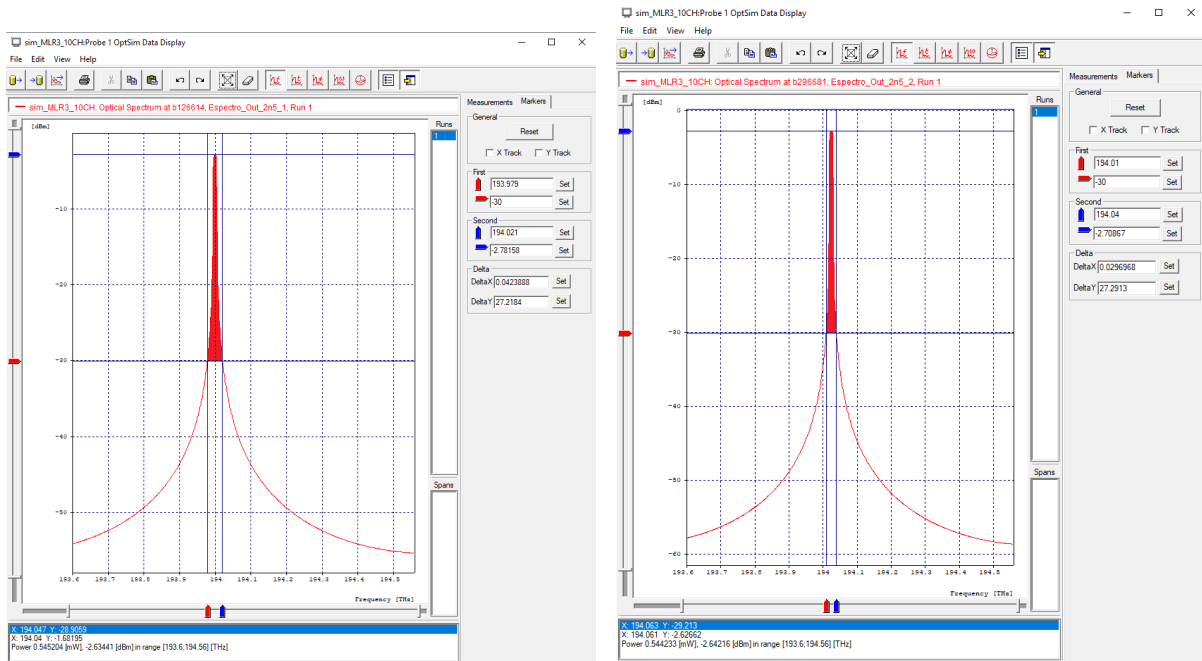


Figura 2.21: Espectro óptico de 10 canales a 2.5 dBm

Canal	Velocidad de Tx [Gbps]	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q [dB]	OSNR [dB]	OSNR real [dB]	BW ocupado
1	40	-10.1299	0.02275	6.0206	44.2098	19.8782	0.101203
2	10	-13.6120	0.0227	6.0206	50.0189	16.399	0.04067
3		-13.8708	0.02275	6.0206	49.8565	16.1927	0.04016
4	2.5	-2.7530	$1e^{-40}$	39.7446	51.9138	27.2184	0.04238
5		-2.7193	$1e^{-40}$	38.2401	55.4885	27.2913	0.02969
6		-0.1684	$1e^{-40}$	40.0000	60.1875	27.3477	0.02065
7		-2.7124	$1e^{-40}$	40.0000	55.7107	27.2943	0.03016
8	10	-13.9783	0.02275	6.0206	50.5022	16.0294	0.03908
9		-13.8203	0.02275	6.0206	51.3106	16.1996	0.03994
10	40	-10.0829	0.02275	6.0206	47.2048	19.9223	0.1015

Tabla 2.6: Parámetros OPM para red MLR con 2.5 dBm. De los autores



(a) Espectro óptico Canal 4 de 2.5Gbps

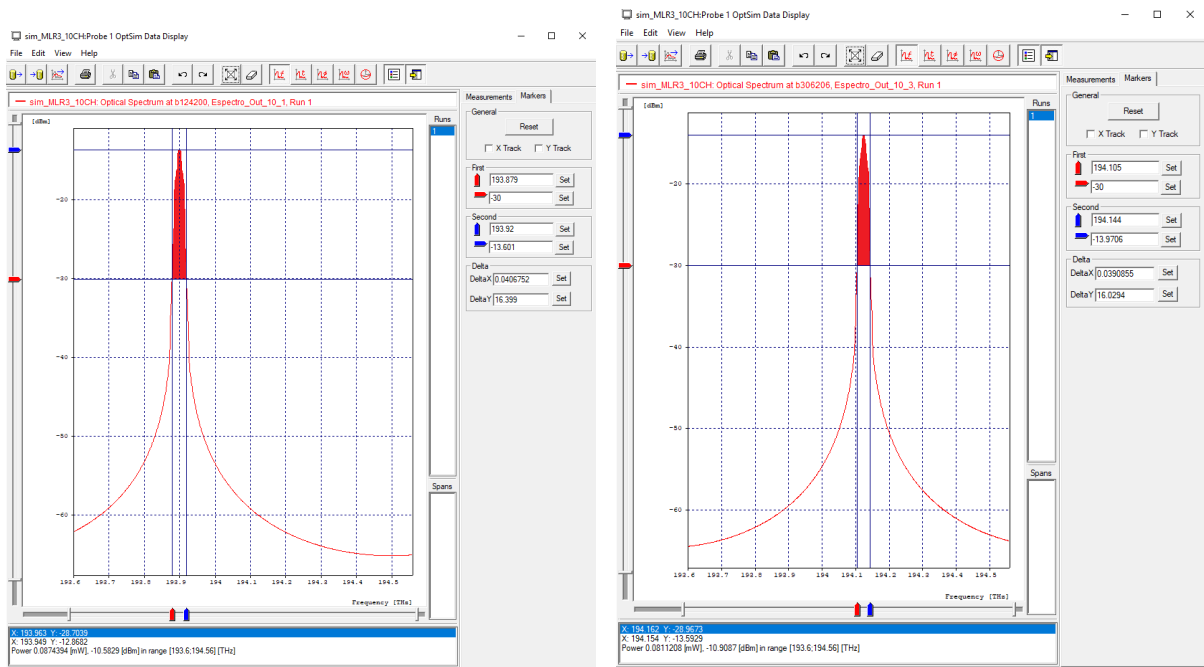
(b) Espectro óptico Canal 5 de 2.5Gbps

Figura 2.22: Desempeño del canal para 2.5 Gbps

El incremento en la potencia a 2.5 dBm, en comparación con la condición anterior de 0 dBm, evidencia una notoria amplificación del nivel de potencia, como se puede comparar en las figuras 2.25 y 2.21. Esta variación potencializa la manifestación de los efectos no lineales, como la Modulación de Fase Cruzada (XPM) y la Modulación de Fase por Auto-Modulación (SPM). Los efectos no lineales, al ser de naturaleza cuadráti-

ca, denotan una sensibilidad creciente y exponencial ante el aumento de la potencia.

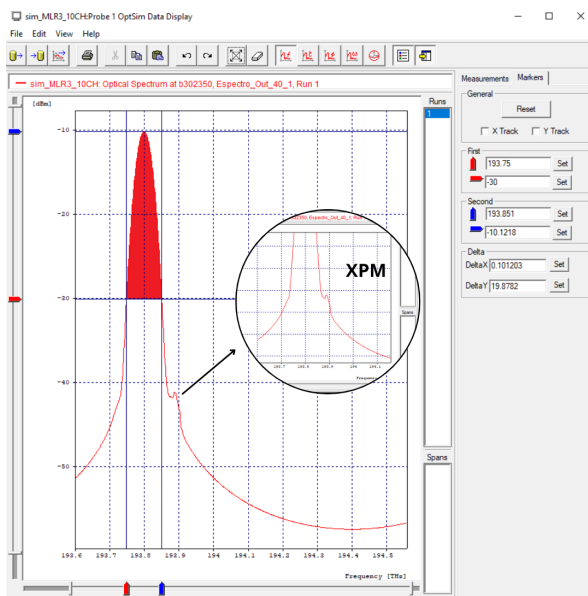
En el entorno del sistema de comunicación, donde coexisten señales de diferentes velocidades de transmisión en una misma fibra, se manifiesta una interacción intrínseca. Las señales de mayor velocidad, al compartir el mismo espacio que las de menor velocidad, pueden verse afectadas mutuamente debido a la no linealidad tipo Kerr.



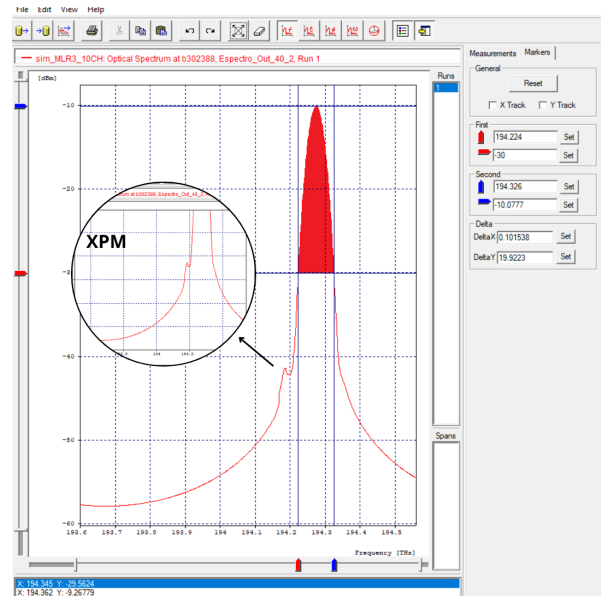
(a) Espectro óptico Canal 2 de 10Gbps

(b) Espectro óptico Canal 8 de 10Gbps

Figura 2.23: Desempeño del canal para 10 Gbps



(a) Espectro óptico Canal 1 de 40Gbps



(b) Espectro óptico Canal 10 de 40Gbps

Figura 2.24: Desempeño del canal para 40 Gbps

■ Potencia 5 dBm

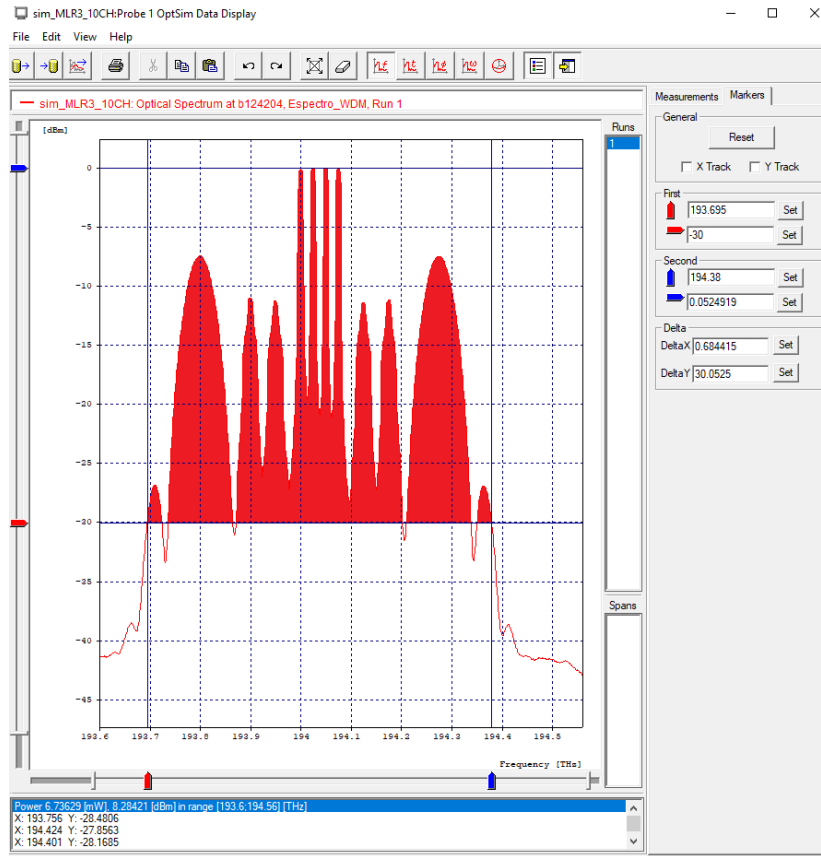
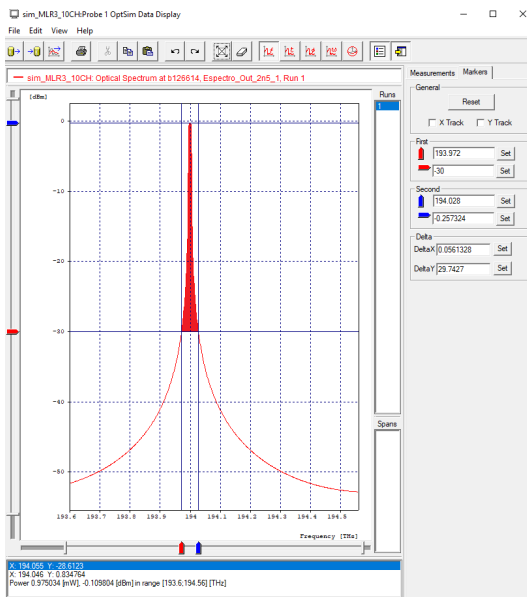


Figura 2.25: Espectro óptico de 10 canales a 5 dBm

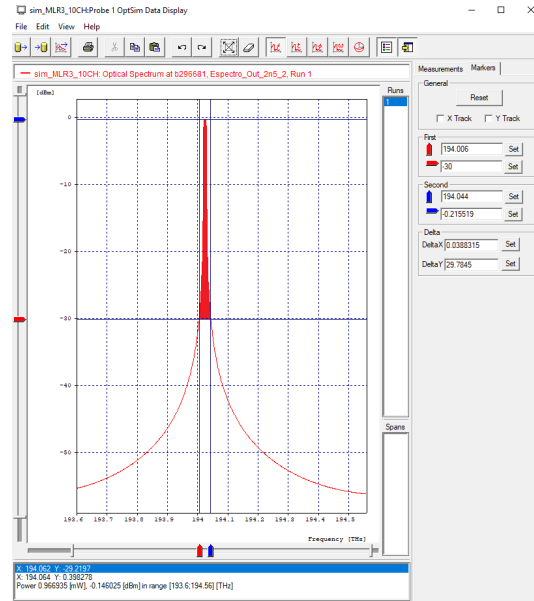
Canal	Velocidad de Tx [Gbps]	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q [dB]	OSNR [dB]	OSNR real [dB]	BW ocupado
1	40	-7.6426	0.0227	6.0206	44.2306	22.3613	0.107907
2	10	-11.1235	0.0227	49.9588	6.0206	18.8705	0.044996
3		-11.3225	0.0227	6.0206	49.8932	18.6777	0.044048
4	2.5	-0.2534	$1e^{-40}$	39.1160	51.9275	29.7427	0.0561328
5		-0.2121	$1e^{-40}$	36.8938	55.4986	28.7845	0.03883
6		-0.1558	$1e^{-40}$	37.3397	60.1530	29.8410	0.02503
7		-0.2187	$1e^{-40}$	38.8575	55.7373	29.7778	0.03890
8	10	-11.4873	0.02275	6.0206	50.4836	18.517	0.0428987
9		-11.3163	0.02275	6.0206	51.2794	18.6844	0.0438877
10	40	-7.5646	0.02275	6.0206	47.2021	22.4373	0.107479

Tabla 2.7: Parámetros OPM para red MLR con 5 dBm. De los autores

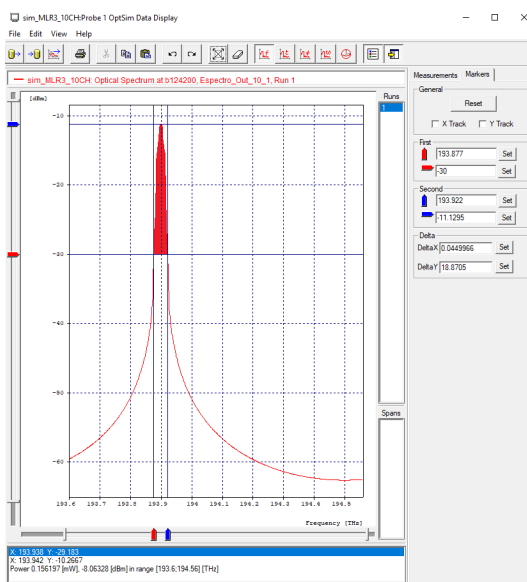
Como se puede observar en la figura 2.25 los canales de diferentes velocidades estarán en proximidad en el dominio de la frecuencia debido a la multiplexación por división de longitud de onda (WDM). Cuando una señal de alta velocidad como 40 Gbps experimenta cambios de intensidad debido a su modulación de datos, estos cambios de intensidad pueden inducir cambios en la fase de las señales de baja velocidad como 2.5 Gbps y 10 Gbps y causar efectos no lineales tipo Kerr como XPM más intensos en comparación a los anteriores casos.



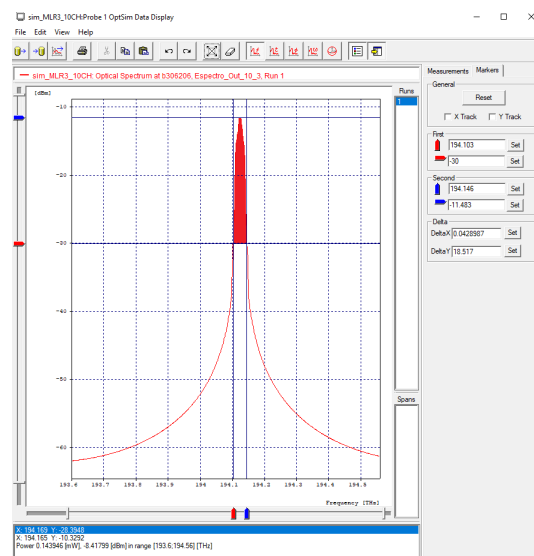
(a) Espectro óptico Canal 4 de 2.5Gbps



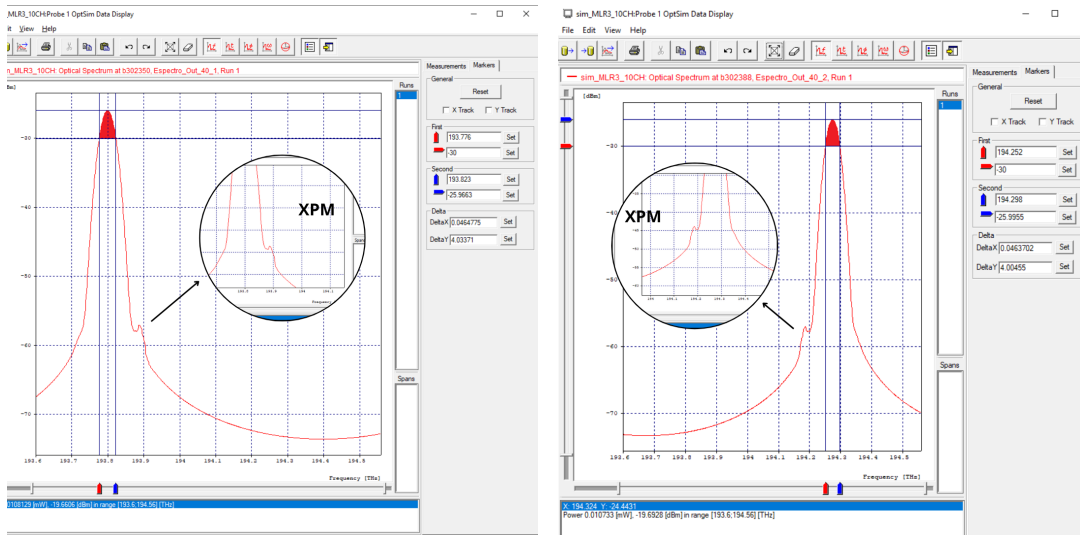
(b) Espectro óptico Canal 5 de 2.5Gbps



(a) Espectro óptico Canal 2 de 10Gbps



(b) Espectro óptico Canal 8 de 10Gbps



(a) Espectro óptico Canal 1 de 40Gbps (b) Espectro óptico Canal 10 de 40Gbps

El análisis realizado sobre los canales de 2.5 Gbps, 10 Gbps y 40 Gbps en función de la potencia de la señal utilizada revela importantes consideraciones sobre los efectos no lineales tipo Kerr en el sistema de comunicación.

Cuando se evaluó el sistema con una potencia de 0 dBm, se pudo apreciar la presencia de los efectos no lineales tipo Kerr en los tres canales. Esto indica que, incluso con potencias iniciales relativamente bajas, los efectos no lineales ya están presentes y deben ser considerados al diseñar el sistema de comunicación.

Sin embargo, el análisis se volvió más interesante cuando se aumentó la potencia de la señal a 2.5 dBm en todos los canales. En este caso, se observó un aumento significativo en los efectos no lineales tipo Kerr en comparación con el análisis anterior con potencia en 0 dBm. Esta observación sugiere que a medida que se incrementa la potencia de la señal, los efectos no lineales se intensifican, lo que puede impactar negativamente en la calidad de transmisión y el rendimiento del sistema.

Además, en el escenario donde todos los canales operan a una potencia de 5 dBm, se confirmó que la potencia de señal más alta resulta en un aumento considerable de los efectos no lineales tipo Kerr. Esto reafirma la importancia de considerar y mitigar estos efectos, especialmente en sistemas con altas velocidades de transmisión.

Es relevante destacar que, a medida que aumenta la potencia de la señal en los canales de 2.5 Gbps, 10 Gbps y 40 Gbps, los efectos no lineales tipo Kerr afectan a todas las velocidades por igual. No obstante, las velocidades más altas, como 10 Gbps y 40 Gbps, son más susceptibles a estos efectos debido a su mayor densidad de energía en el espectro y a la presencia de mayores intensidades ópticas en el medio de transmisión.

2.4. CASOS DE ESTUDIO

Una vez identificadas las características clave del modelo inicial, el siguiente paso implica crear situaciones de investigación que permitan observar la presencia de efectos no lineales en cada caso, al variar diferentes parámetros. La figura 2.29 ilustra un esquema general de dichas situaciones de investigación. Con esta metodología, se pretende visualizar en qué casos los efectos no lineales se manifiestan con mayor o menor intensidad.

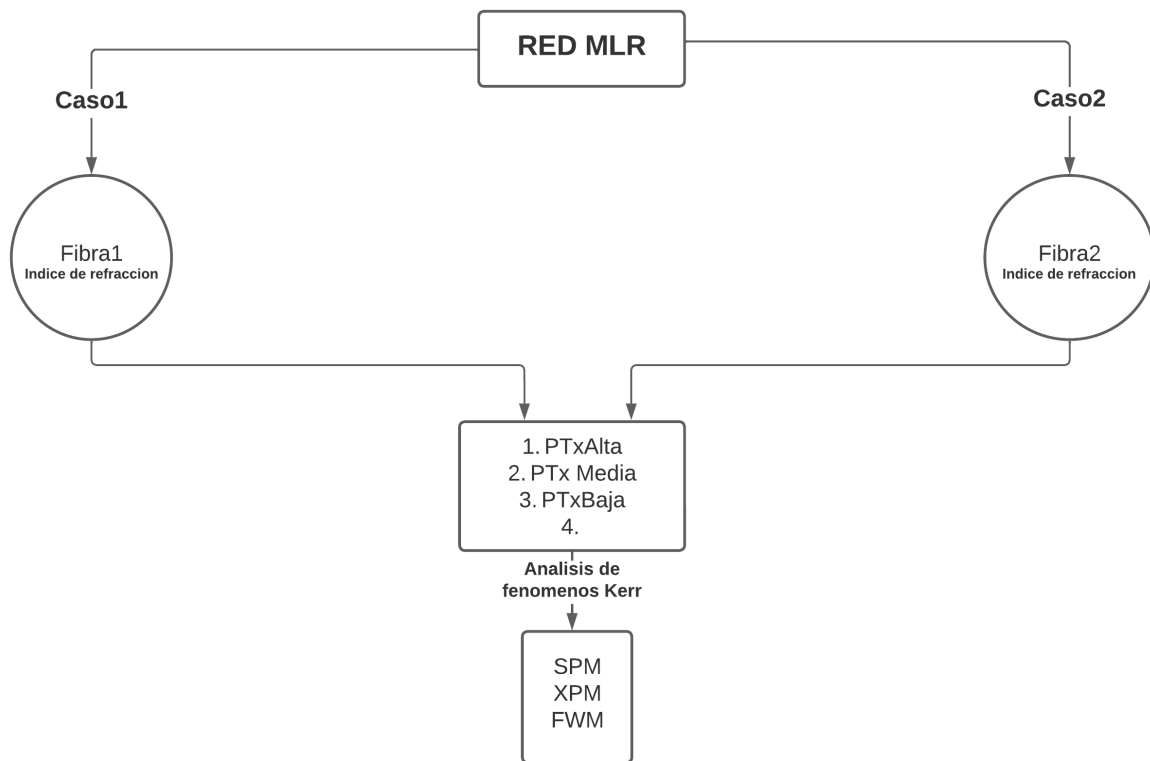


Figura 2.29: Casos de estudio.

En primera instancia, se parte del modelo inicial propuesto anteriormente, que presenta una red MLR basada en los estándares definidos por la ITU-T (tales como G.694.1, G.691, G.698.1, G.Sup39). Los casos de estudio se dividen principalmente en tres partes, centrándose en la variación de tres tipos de fibra óptica que se encuentran presentes dentro de la herramienta de simulación Optsim (LucentTrueWave 1550 [32], Corning LEAF [33], y Alcatel 6910 TeraLight [34]). De esta manera se obtiene tres índices de refracción distintos dados en la ficha técnica correspondiente a cada una, con el fin de analizar sus capacidades frente a la presencia de efectos no lineales tipo Kerr.

Para cada fibra, se tiene la expectativa de variar la potencia de transmisión en tres niveles: alta, media y baja, que corresponden a los valores de 0 dBm, 2.5 dBm y 5 dBm respectivamente. De esta manera, se plantea el primer caso de estudio, que incluye la

variación de la fibra óptica presente en el entorno de simulación, con sus tres potencias definidas, manteniendo las mismas variaciones de potencia. En el segundo caso, se utiliza una fibra óptica diferente para obtener un índice de refracción distinto. Es importante aclarar que se realiza el análisis de los efectos Kerr presentes para cada caso y Basándose en los resultados obtenidos, se selecciona el caso en el cual la potencia contribuye de manera más eficiente al rendimiento del sistema, para variar 2 veces el índice de refracción con un delta por encima como por debajo del valor base descrito en el datasheet.

El objetivo de cada caso de estudio es analizar el espectro óptico para determinar la presencia y la intensidad de los efectos no lineales tipo Kerr, como el cruce de fase (XPM), la modulación de fase (SPM) y el mezclado de cuatro ondas (FWM). De esta manera, se busca comprender cómo estos efectos se manifiestan en el sistema bajo diferentes configuraciones de fibra y potencia de transmisión.

Nota de autor:

En este capítulo, se han considerado las herramientas de simulación más apropiadas para el desarrollo del trabajo de grado. Se destaca especialmente OptSim, debido a su capacidad para el diseño y evaluación de redes ópticas. En primer lugar, se define la metodología de simulación, junto con el respectivo algoritmo o diagrama de flujo empleado para crear el modelo de simulación. Luego, se procede a adaptar un modelo de red tipo MLR para simularlo en OptSim, y así cumplir con el primer objetivo específico planteado para este proyecto. Finalmente, se definen los casos de estudio que serán abordados durante el trabajo de grado, estos casos de estudio tienen el propósito de cumplir con los demás objetivos planteados para la investigación en curso. Mediante estos casos de estudio, se analizará y evaluará el rendimiento de la red, obteniendo resultados relevantes y significativos para el proyecto.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES ÓPTICO MULTIPORTADORA FRENTE A FENÓMENOS CAUSADOS POR EL EFECTO KERR

En este capítulo, se aborda el proceso de análisis de requerimientos y desempeño de redes ópticas MLR-DWDM al modificar diversos parámetros clave en la red, como el índice de refracción y la intensidad de la onda incidente. Este enfoque se basa en la metodología y los casos de estudio definidos en el capítulo 2, del mismo modo se lleva a cabo una adaptación del modelo de red inicial MLR propuesto, considerando los diferentes tipos de fibras ópticas planteadas para variar el índice de refracción y la intensidad. Luego, se evalúa el desempeño de la red en función de la potencia de onda incidente, prestando especial atención a los fenómenos de efectos no lineales que sean relevantes para el presente trabajo.

En el contexto de este estudio, se procede a evaluar la red de enlace múltiple acorde a los estándares: XG-PON, XGS-PON y NG-PON2. Resulta fundamental destacar que las velocidades de transmisión difieren según el estándar en cuestión. Concretamente, en el caso del estándar XG-PON, las tasas de transferencia para el enlace de descarga (downlink) se establecen en 2.5 Gbps. No obstante, en la variante XGS-PON, esta velocidad experimenta un incremento significativo, alcanzando los 10 Gbps. Por último, en el marco del estándar NG-PON2, la velocidad de descarga llega a 40 Gbps. Estos valores representan umbrales de desempeño clave que serán objeto de análisis en el presente estudio. Cada simulación se realiza a partir de la adaptación del modelo de red inicial, utilizando los canales híbridos mencionados anteriormente, y con parámetros definidos en el capítulo anterior.

3.1. RED MLR CON MEDIO DE TRANSMISIÓN SOBRE FIBRA ÓPTICA LUCENT TRUE WAVE 1550

En este primer caso de estudio, se lleva a cabo la evaluación de la red adaptada MLR en el capítulo II. El enfoque se centra en la variación del índice de refracción, tal como se presenta en el caso principal ilustrado en la Figura 2.29. Para abordar este caso, se

opta por emplear la fibra Lucent TrueWave, manufacturada por Lucent Technologies. Según la información detallada en su ficha técnica [32], esta fibra en particular exhibe un índice de refracción nominal de 1.470; Es importante considerar que una vez establecido el índice de refracción, se inicia el proceso de variación controlada de la intensidad de potencia de transmisión. Dicha variación abarca tres niveles: baja (0 dBm), media (2.5 dBm) y alta (5 dBm) intensidad. Esta estrategia se ejecuta con el propósito de recopilar datos exhaustivos que permitan analizar detenidamente el comportamiento de los fenómenos no lineales de tipo Kerr, los cuales adquieren relevancia en este contexto, dado su impacto en la respuesta y el rendimiento de la red adaptada MLR. La exploración de las relaciones entre el índice de refracción y la potencia de transmisión constituye un pilar fundamental en la comprensión de la dinámica del sistema y en la toma de decisiones para su optimización.

En esta línea, se ha decidido configurar la red con un total de 10 canales. De estos, 4 operarán a una velocidad de transmisión de 2.5 Gbps, 4 a 10 Gbps, mientras que los 2 restantes funcionarán a una velocidad de transmisión de 40 Gbps, manteniendo inicialmente un espaciamiento de 100 GHz. Además, en concordancia con el análisis previo de la red MLR en el capítulo 2, se utilizará modulación NRZ-OOK para los canales de 2.5 Gbps, mientras que los canales de 10 Gbps adoptarán la modulación RZ-OOK y RZ-DPSk para 40 Gbps.

3.1.1. Análisis para 0 dBm de potencia.

Basándose en las recomendaciones iniciales para el caso actual, se procede a establecer una conexión de 80 Km, y una potencia de transmisión configurada en el láser CW a 0 dBm; esto también, considerando el segmento adicional conocido como "últimamilla", inherente a las aplicaciones FTTx.

Para una red FTTB, la infraestructura de fibra óptica no se extiende directamente hasta el usuario final. Por este motivo, se establece una longitud inicial de 900 metros de fibra óptica en el tramo final. Este enfoque persigue una aproximación más precisa a la dinámica real de FTTB, como se puede ver en la figura de red 3.1

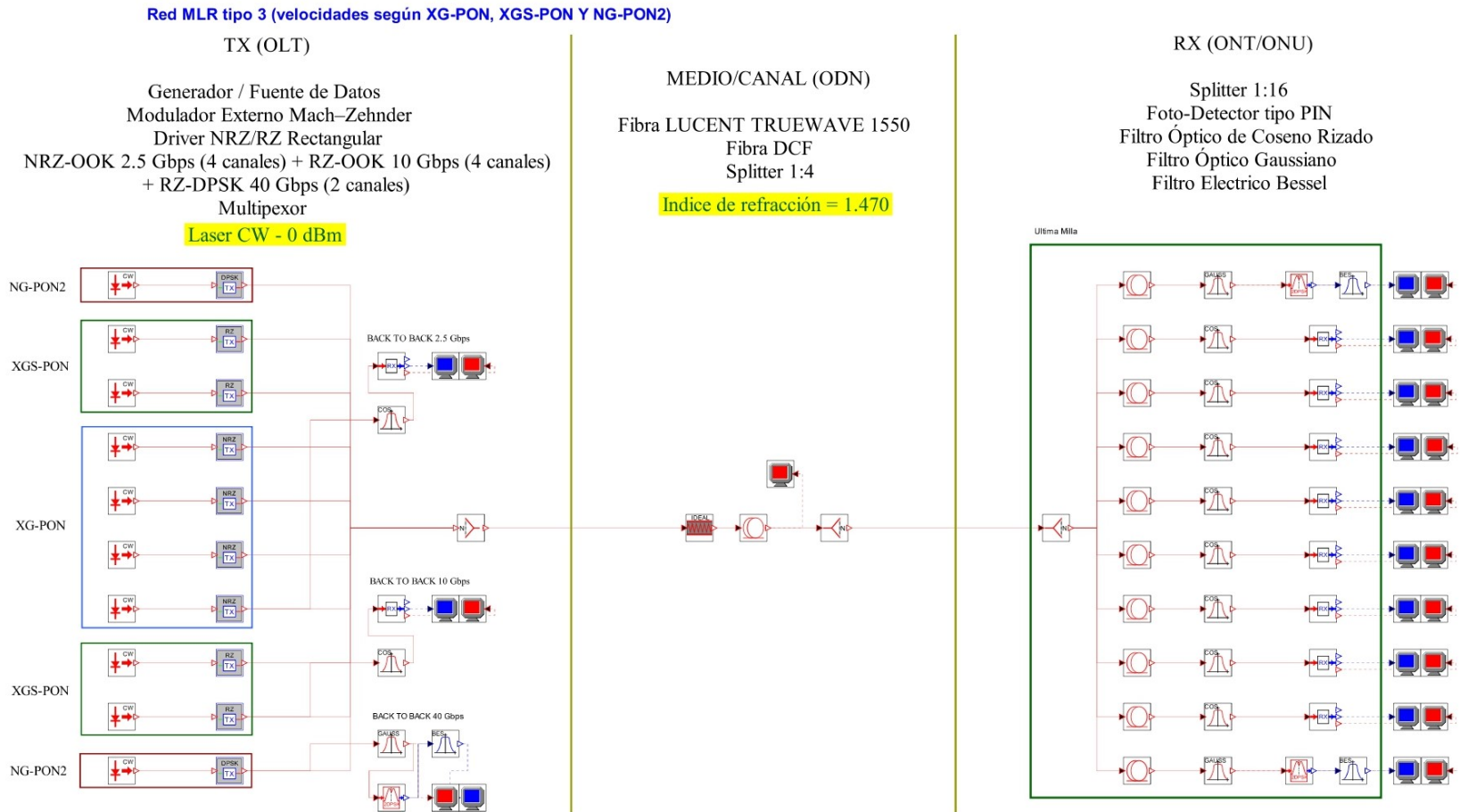


Figura 3.1: Red MLR 10 Canales - Láser CW: 0 dBm - Índice Refracción: 1.470, de los autores.

Conforme al estándar ITU-T G.694.1 [35], los sistemas DWDM se distinguen por su operatividad en la banda C y por mantener un espaciado entre canales de 100 GHz (equivalente a 0,8 nm) o, en algunos casos, incluso menor, lo que define el ancho de banda total ocupado por un número específico de canales. Esta característica permite a la tecnología DWDM incorporar ocho canales o más dentro del espectro de los 1550 nm.

En este caso particular, se ha elegido configurar el espaciado en la grilla de la siguiente manera: entre los canales 1 y 2, se establece un espaciado de 100 GHz; los canales 2, 3 y 4 tienen un espaciado de 50 GHz entre ellos; los canales 4, 5, 6, 7 y 8 están separados por 25 GHz entre sí, y, por último, los canales 9 y 10 tienen un espaciado de 100 GHz, a continuación se presentan los espectros captados en recepción y sus respectivos anchos de banda ocupado a partir del espaciado escogido.

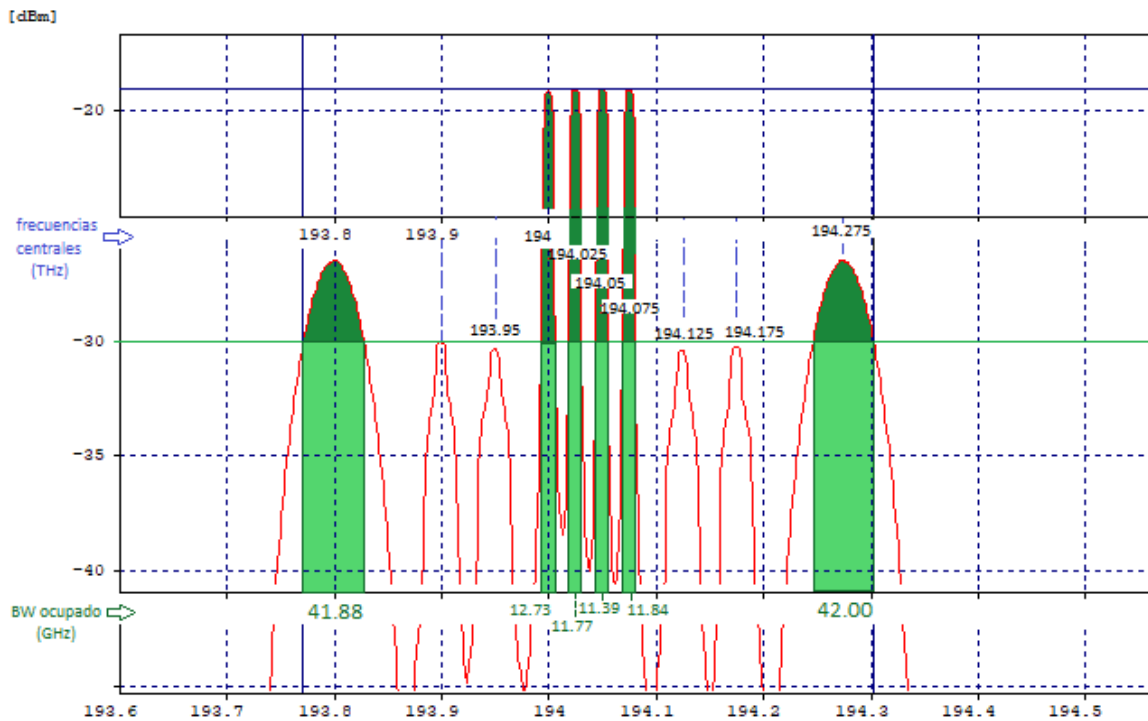


Figura 3.2: Espaciamento de los canales recibidos.

A continuación, se presenta un análisis basado en los resultados obtenidos a partir de la simulación de la arquitectura de red. En este análisis, se hace especial enfoque en el espectro óptico y el diagrama del ojo entregados por los medidores en recepción, prestando especial atención a los parámetros críticos que afectan el rendimiento de la red y a su vez evidencian la presencia de los efectos no lineales tipo Kerr. Estos parámetros incluyen la potencia de transmisión (P_{tx}), el espectro de frecuencia, el factor de calidad (Q), la tasa de error de bits (BER), la relación señal a ruido óptica (OSNR) y el ancho de banda ocupado (BW) por cada canal.

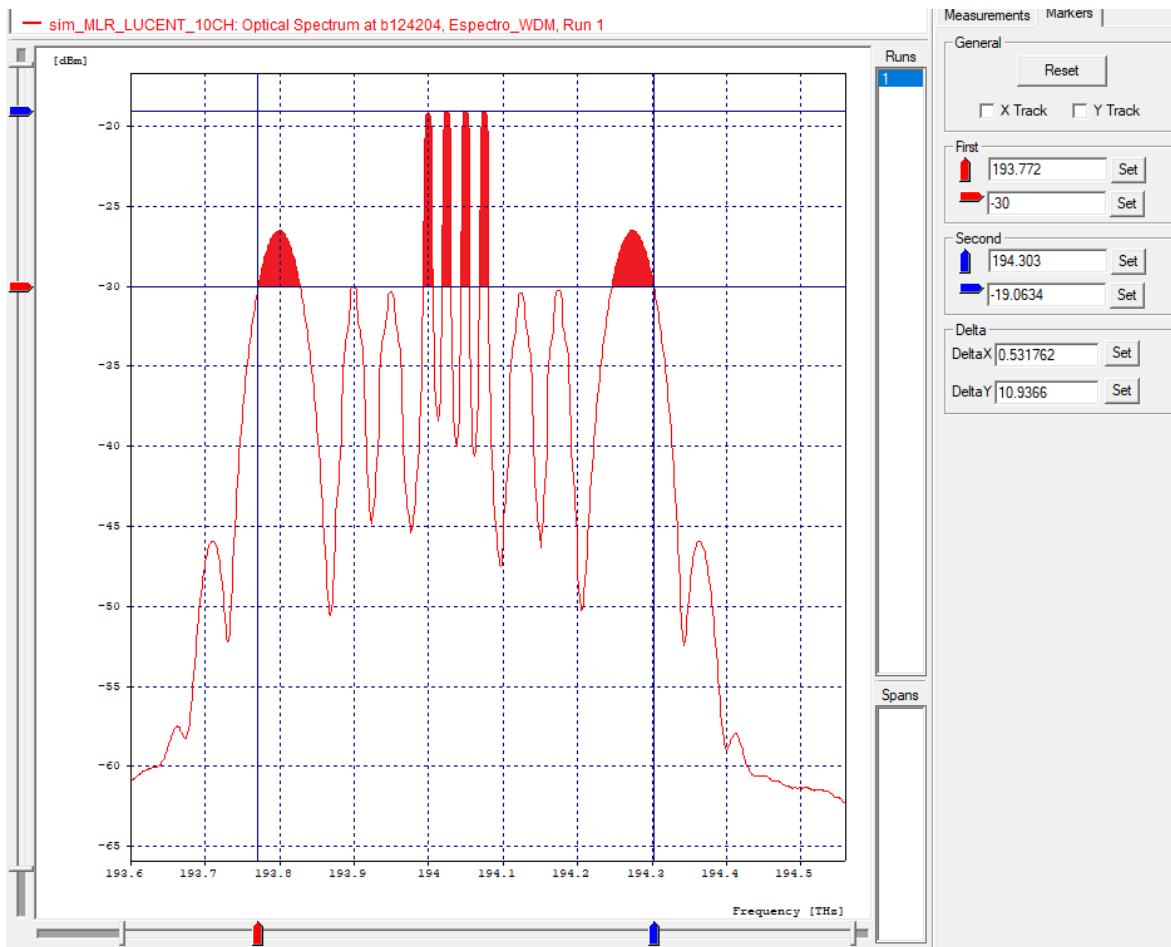
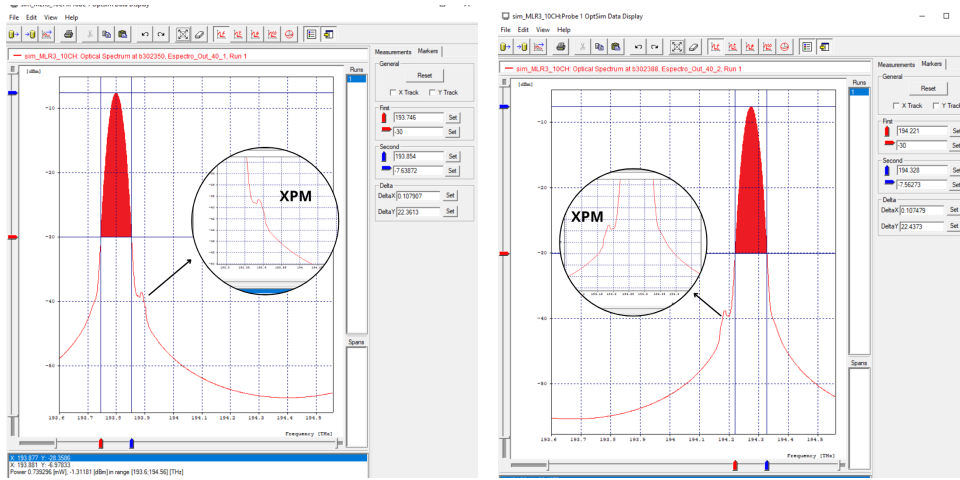


Figura 3.3: Espectro óptico de 10 canales a 0 dBm

La figura 3.3 ilustra el espectro óptico resultante después de haber atravesado una distancia de 80 kilómetros a través de una fibra óptica para los 10 canales en estudio. En este espectro, se observa una notoria disminución en los niveles de potencia de la señal, particularmente en los canales de 10 Gbps, lo cual se puede corroborar en la tabla 3.1, cuando la potencia de la señal disminuye a lo largo de la fibra óptica debido a la atenuación, la señal se debilita gradualmente. Esto puede causar que la señal sea más débil de lo necesario al llegar a su destino, lo que dificulta su detección y decodificación adecuada.

De acuerdo a este comportamiento también podemos observar la presencia de los efectos no lineales, especialmente XPM, el cual se encuentra contiguo al canal de 40 Gbps, ver figura 1.17.



(a) Espectro óptico Canal 1

(b) Espectro óptico Canal 10

Figura 3.4: Desempeño de canales a 40 Gbps

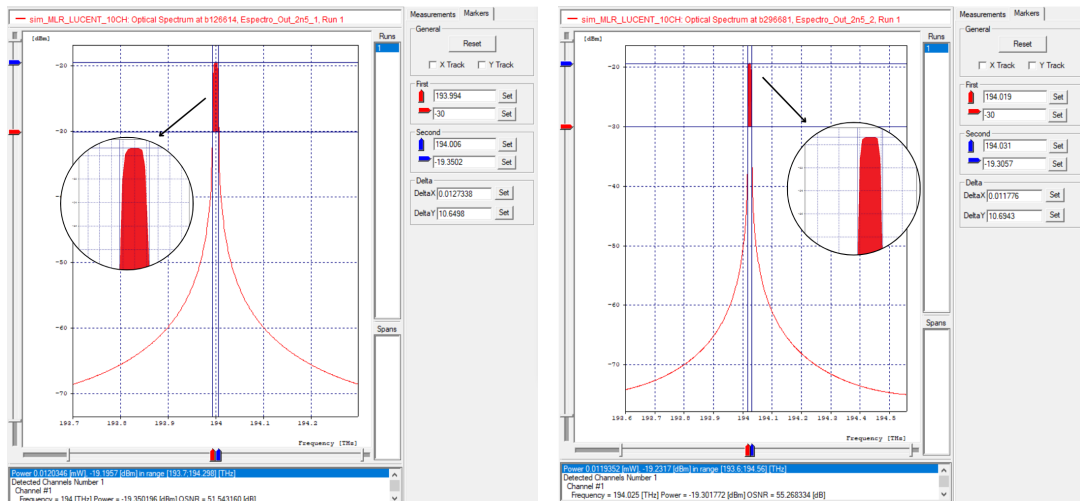
El efecto Kerr es una no linealidad óptica que puede inducir distorsiones en la señal durante su transmisión a través de una fibra óptica [36]. Como se ilustra en la figura 3.3 la aparición de este efecto está intrínsecamente relacionada con las condiciones en las que opera el sistema de comunicación. Para evaluar su impacto en los canales ópticos, se emplean mediciones de parámetros cruciales, como la Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR), que permiten identificar la presencia y la intensidad de los efectos no lineales en cada canal [37], como se refleja en la tabla 3.1. En este contexto, es esencial comprender que a medida que la OSNR aumenta, la relación señal a ruido se fortalece significativamente.

Canal	Velocidad de Tx [Gbps]	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q [dB]	OSNR [dB]	OSNR real [dB]	BW ocupado
1	40	-20.4122	0.02275	6.0206	44.5283	3.2827	0.0418858
2	10	-27.2073	0.0221443	6.0652	49.9562	0.23784	-
3		-27.3357	0.01450	6.9231	49.3570	0.5007	-
4		-19.1955	$1e^{-40}$	34.4147	51.5431	10.6498	0.012733
5	2.5	-19.2317	$1e^{-40}$	32.9978	55.2683	10.6943	0.01177
6		-19.2469	$1e^{-40}$	32.3861	60.3241	10.7281	0.011393
7		-19.2112	$1e^{-40}$	35.3010	55.8360	10.7244	0.01184
8	10	-27.54	0.01375	6.7924	50.7098	0.57792	-
9		-27.431	0.02275	6.0206	50.8056	0.40954	-
10	40	-20.4122	0.02275	6.0206	46.5633	3.31087	0.04178

Tabla 3.1: Parámetros OPM para red MLR con 0 dBm. De los autores

Cuando la OSNR alcanza valores elevados, la señal deseada emerge con una mayor amplitud en comparación con el ruido circundante. Este escenario propicia una detección más precisa de la señal y reduce su susceptibilidad, incluido los efectos no lineales de tipo Kerr. Por lo tanto, en condiciones de alta OSNR, las distorsiones causadas por el efecto Kerr tienden a ser menos pronunciadas.

Este análisis permite concluir que, en el contexto de los canales de comunicación óptica, aquellos que operan a velocidades de 2.5 Gbps, específicamente los canales (4, 5, 6, 7), presentan una Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR) más favorable en comparación con los canales de 40 Gbps. Esto se debe a que los canales de alta velocidad, como los de 40 Gbps, requieren un mayor ancho de banda, como se evidencia en la tabla, y lo que implica el uso de pulsos más cortos y frecuencias más altas para transmitir la señal. Por otro lado, los canales de 2.5 Gbps utilizan pulsos más largos y frecuencias más bajas, lo que resulta en una OSNR superior. Específicamente, los valores de OSNR para los canales de 40 Gbps se registran alrededor de 3.2827 y 3.31087 dB respectivamente, mientras que los canales de 2.5 Gbps ofrecen una mejor calidad de señal y una menor distorsión causada por efectos no lineales, como los efectos de tipo Kerr.



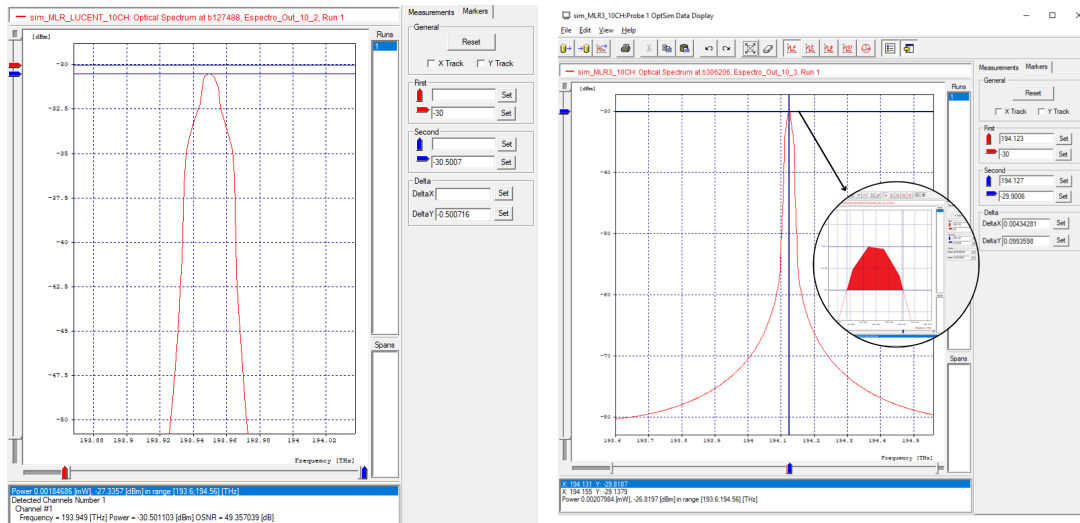
(a) Espectro óptico Canal 4

(b) Espectro óptico Canal 5

Figura 3.5: Desempeño de canales a 2.5 Gbps

Dentro del escenario de los canales de 10 Gbps, se presenta una situación particular en la que la señal no alcanza el umbral de sensibilidad mínimo establecido, fijado en -30 dB. Como resultado, durante la simulación, se registra una Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR) que se considera "inexistente" en el programa OptSim. Esta circunstancia lleva a que los valores de OSNR obtenidos en la simulación no reflejen la realidad y, de manera significativa, resulten en valores negativos al calcular la OSNR real. Este fenómeno subraya la importancia de garantizar que la señal alcance un nivel

de intensidad adecuado para una detección fiable, aspecto fundamental en la evaluación precisa de los sistemas de comunicación óptica. En la figura 3.6 se puede evidenciar que los canales 2 y 8 de 10 Gbps no alcanzan el umbral de los -30 dBm configurados en la sensibilidad del receptor, y por tal razón su espectro no es captado.



(a) Espectro óptico Canal 2

(b) Espectro óptico Canal 8

Figura 3.6: Desempeño de canales a 10 Gbps

Teniendo en cuenta que, la relación señal-ruido óptica (OSNR) influye tanto en el factor Q como en la BER. Una OSNR baja puede aumentar la BER y, en consecuencia, empeorar la calidad de la señal. Si la OSNR es insuficiente, puede ser necesario aumentar la potencia de la señal transmitida, lo que podría aumentar el riesgo de efectos no lineales.

Al comparar los valores de OSNR de los canales de 40 Gbps, que oscilan entre los 3.2 y 3.3 dB, contra los valores de OSNR de los canales de 2.5 Gbps, que llegan hasta los 10.72 dB; se puede deducir que los canales de 2.5 Gbps tendrán un mejor factor Q en comparación a la de los canales de 40 Gbps, ya que si se revisa la tabla 3.1 existe una gran diferencia entre ellos, esto se traduce en que la potencia de la señal es mucho mayor que la potencia del ruido, y por ende la calidad de la señal será mucho mejor en los canales de 2.5 Gbps. Para tener una visión más precisa, es posible obtener datos cuantitativos del parámetro de factor Q de la siguiente manera, y que se encuentran ya representados en la tabla 3.1.

$$Q = \frac{(S - R)}{2 * \sigma} \quad (3.1)$$

Donde,

S : Potencia de la señal recibida (en dB).
R: Potencia del ruido (en dB).
 σ es la desviación estándar del ruido (en dB).

De esta ecuación, se puede observar que a medida que el factor Q aumenta, la BER disminuye, lo que indica una mejor calidad de la comunicación. Estos parámetros guardan relación con la potencia de la señal transmitida. A medida que esta potencia aumenta (mayor S), se incrementa la probabilidad de experimentar efectos no lineales, los cuales se manifiestan de manera más pronunciada cuando las señales son intensas y no siguen un comportamiento lineal en función de la potencia. Los efectos no lineales tipo Kerr, en particular, pueden distorsionar la señal óptica, lo que resulta en errores de detección en el receptor y, en consecuencia, en un aumento de la BER debido a la interferencia y distorsión de la señal.

En los canales con velocidad de 40 Gbps, es importante destacar que la Intermodulación por Fase Cruzada (XPM) es particularmente pronunciada. Esto se debe a la alta velocidad y densidad de canales que caracterizan a estos sistemas. En consecuencia, es posible experimentar la presencia de este fenómeno no lineal, lo que puede contribuir a un aumento en la BER en comparación con otros canales de menor velocidad y densidad.

En el mismo sentido, se puede inferir que los canales de 2.5 Gbps al contar con una mejor BER en comparación a la de los canales de 40 Gbps, obtendrán una mejor calidad de la señal y la capacidad del sistema para transmitir información de manera confiable. Con esto, se concluye que los canales de 2.5 Gbps tienen una mejor representación del diagrama del ojo, como se puede ver en la figura 3.7.

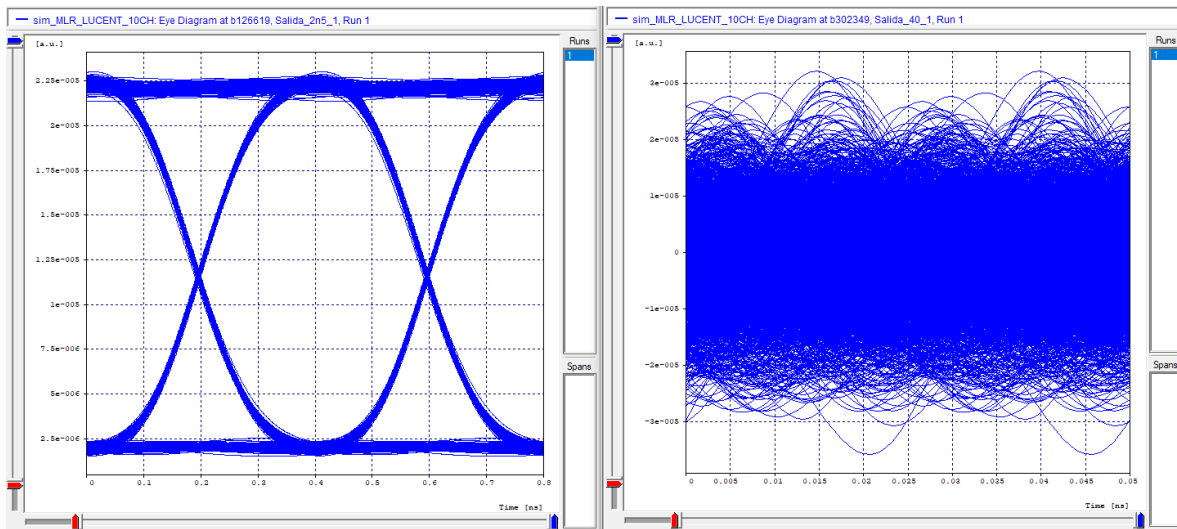


Figura 3.7: Comparación Diagrama de ojo canal 2.5 Gbps Vs 40 Gbps

3.1.2. Análisis para 2.5 dBm de potencia.

Una vez realizado el análisis del sistema de comunicación a una potencia de 0 dBm, se ha optado por realizar una variación en la potencia de transmisión, elevándola a 2.5 dBm, con el propósito de llevar a cabo una evaluación del comportamiento del sistema en esta nueva configuración que permita profundizar cómo dicho sistema reacciona ante esta variación.

Así, se pretende determinar si esta variación de potencia tiene un impacto positivo o negativo en el rendimiento del sistema de comunicación, y cómo esta modificación puede influir directamente en la aparición de efectos no lineales de tipo Kerr. Este análisis es crucial para anticipar cualquier problema potencial que pueda surgir al ajustar la potencia de transmisión y asegurar un funcionamiento óptimo del sistema de comunicación.

En la figura 3.8, se presenta una variante de la red MLR previamente mostrada en la figura 3.1, diferenciándose únicamente en términos de potencia de transmisión. Cabe destacar que la fibra óptica utilizada, junto con su índice de refracción correspondiente, permanece constante. El propósito subyacente de este análisis consiste en examinar cómo varían los resultados en función del comportamiento de la red cuando se emplea una potencia ligeramente superior en comparación con la configuración de 0 dBm.

Basándose en conocimientos previos, la potencia de transmisión desempeña un papel fundamental en la intensidad de la señal óptica enviada a través de la fibra óptica. Es esencial que esta potencia sea adecuada para garantizar que la señal conserve su fuerza durante la transmisión a distancias considerables sin sufrir degradación sustancial.

En este contexto, se espera que la siguiente configuración contribuya a mejorar el rendimiento de la red, influyendo positivamente en aspectos como la Relación Señal-Ruido Óptico (OSNR), la Tasa de Error de Bit (BER) y el factor Q. Al mismo tiempo, esta configuración permite analizar los efectos no lineales de tipo Kerr en esta situación específica, para determinar su presencia y nivel de influencia con respecto al primer caso.

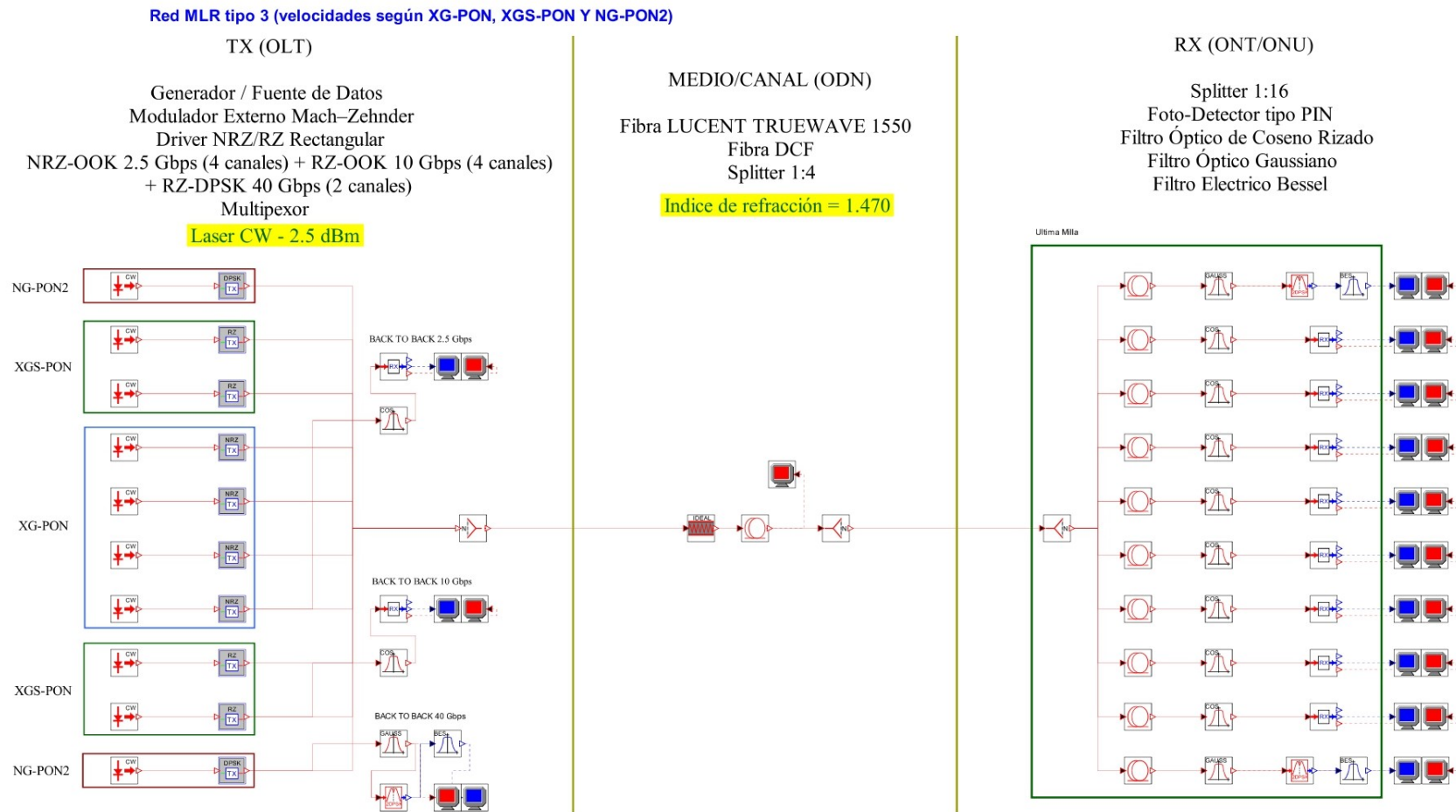


Figura 3.8: Red MLR 10 Canales - Láser CW a 2.5 dBm - Índice Refracción: 1.470, de los autores.

Para este caso, se ha elegido configurar el espaciado asimétrico en la grilla de igual manera que en el caso anterior, el cual establece un espaciado de 100 GHz, 50 GHz y 25 GHz, como se observa en la siguiente figura 3.9, donde se puede observar de manera detallada los espectros captados en recepción y sus respectivos anchos de banda ocupado a partir del espaciado escogido.

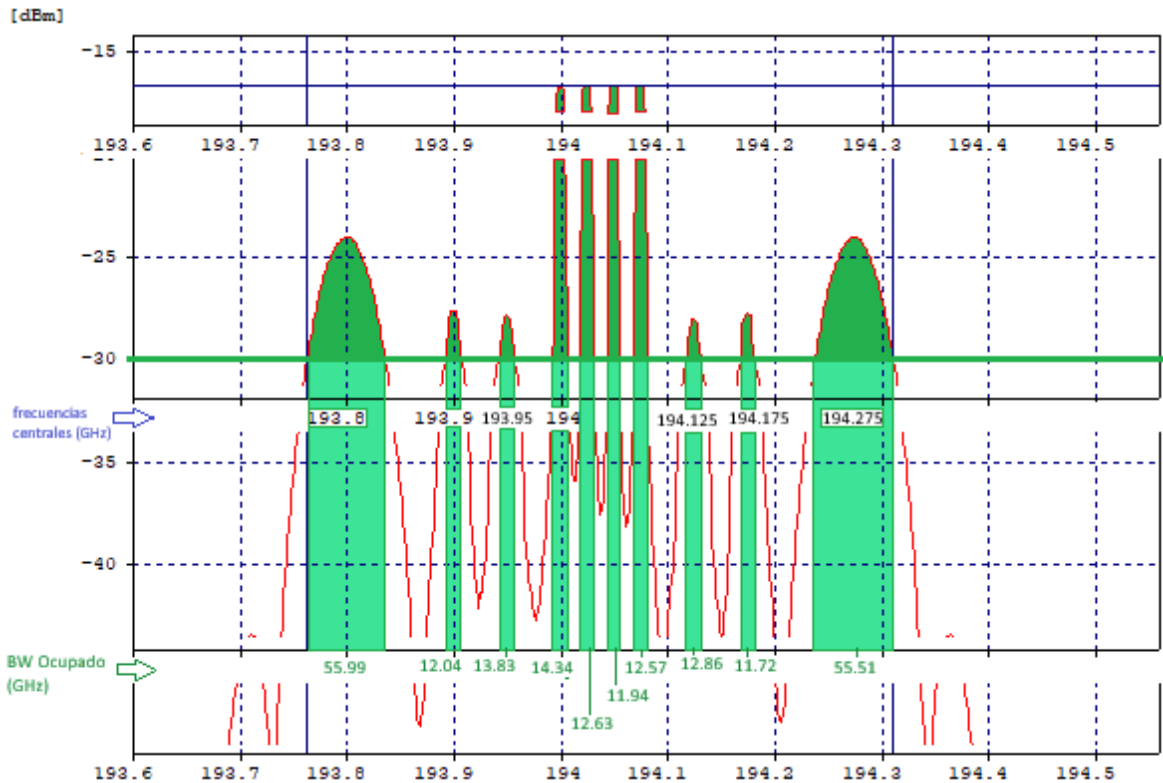


Figura 3.9: Espaciamento de los canales recibidos.

Por otro lado, en la figura 3.10, se representa el conjunto completo de señales ópticas después de haber viajado a lo largo de una fibra a una distancia de 80 kilómetros, donde este conjunto incluye las señales de los 10 canales.

Haciendo una comparación con el caso anterior, la figura 3.3, representa una notable reducción en los niveles de potencia de la señal en los canales de 10 Gbps, sin llegar al límite de sensibilidad de -30 dBm de acuerdo a los 0 dBm configurados previamente. Esto contrasta con lo que se aprecia en la figura 3.10, donde se muestra una mejora en estos mismos canales al aumentar la potencia del láser a 2.5 dBm, lo cual se respaldan con los datos presentados en la tabla 3.2. Debido al aumento de BER, OSNR Factor Q y Potencia en el receptor.

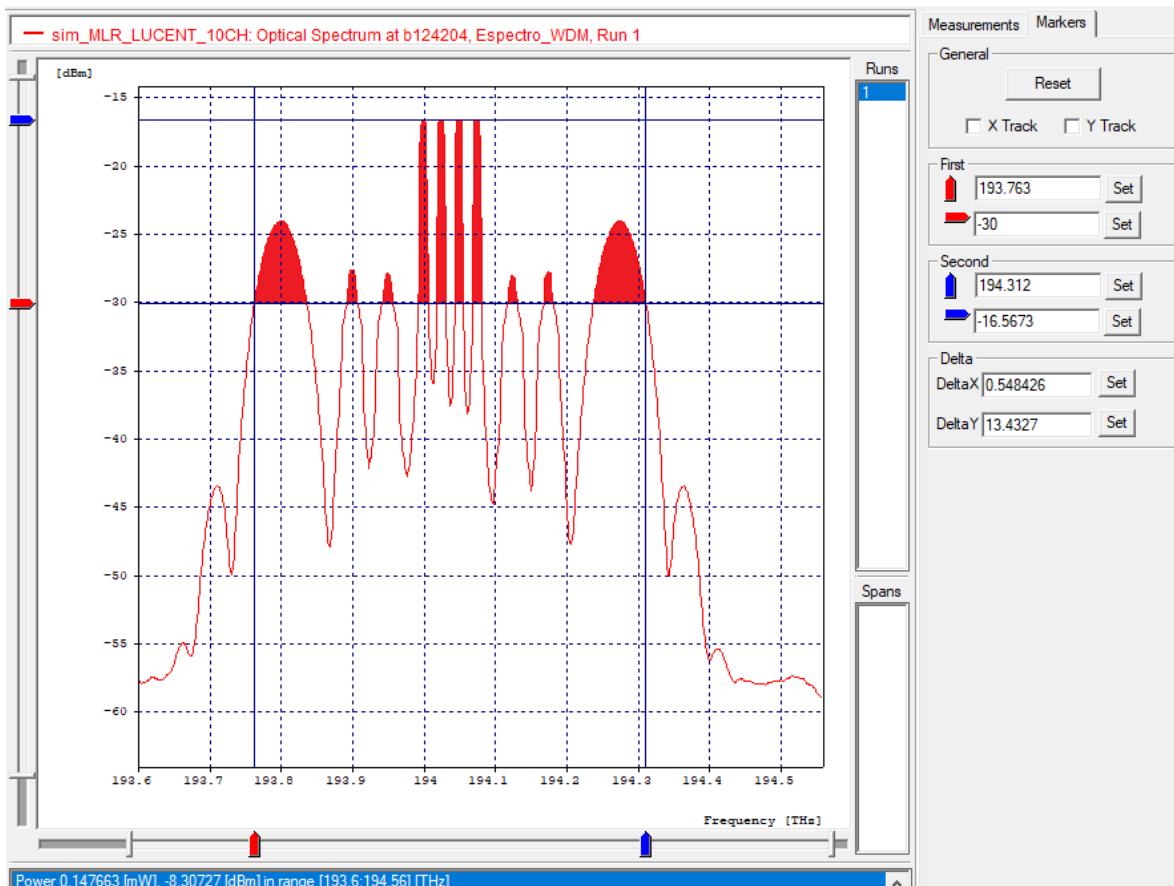
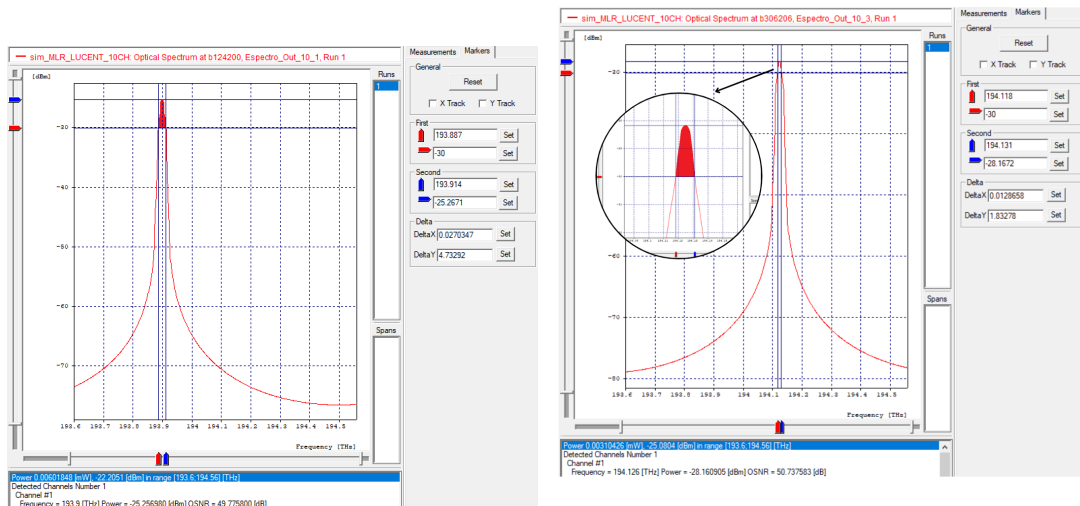


Figura 3.10: Espectro óptico de 10 canales a 2.5dBm.

Canal	Velocidad de Tx [Gbps]	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q [dB]	OSNR [dB]	OSNR real [dB]	BW ocupado
1	40	-17.9099	0.02275	6.0206	44.5296	5.70883	0.0559932
2	10	-24.7217	0.01770	6.4325	49.9196	2.2233	0.01204
3		-24.8371	0.00915	7.9963	49.3892	2.0239	0.01383
4	2.5	-16.6902	$1e^{-40}$	34.3864	51.5822	13.1758	0.01434
5		-16.7512	$1e^{-40}$	31.4613	55.2674	13.1989	0.01263
6		-16.7740	$1e^{-40}$	30.5072	60.2677	13.1779	0.01194
7		-16.7032	$1e^{-40}$	34.4448	55.8748	13.2573	0.01257
8	10	-25.0804	0.01020	8.1814	50.7375	1.83278	0.01286
9		-24.9381	0.02127	6.1974	50.8162	2.08061	0.01172
10	40	-17.9108	0.02275	6.0206	46.5930	5.83135	0.05551

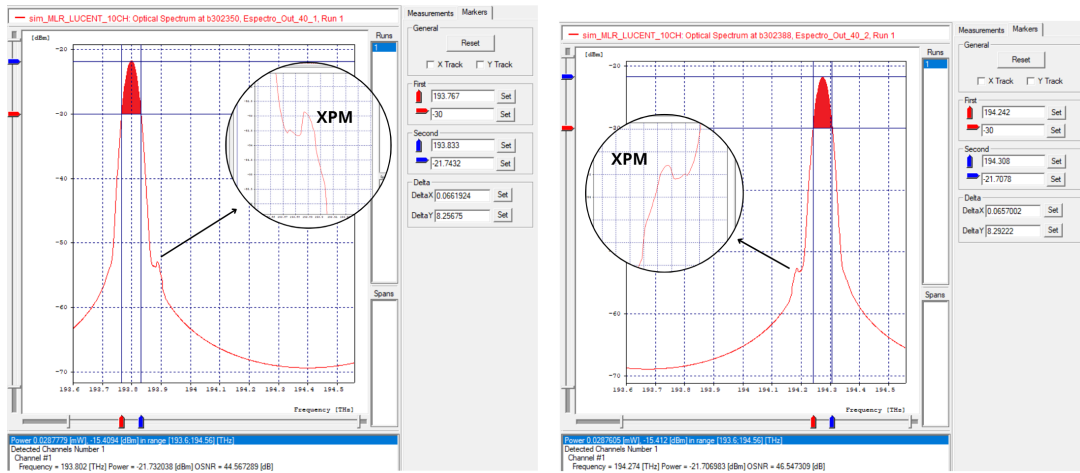
Tabla 3.2: Parámetros OPM para red MLR con 2.5 dBm. De los autores



(a) Espectro óptico Canal 2 de 10Gbps (b) Espectro óptico Canal 8 de 10Gbps

Figura 3.11: Espectro óptico de 10 Gbps

En vista de lo expuesto anteriormente, se deduce que el aumento de la potencia en el láser a 2.5 dBm supone una mejora apreciable en los canales de 10 Gbps. Sin embargo, esta mejora no se traduce en una reducción significativa de la incidencia del efecto de Modulación de Fase Cruzada (XPM). A pesar del aumento en la potencia, el XPM sigue siendo un desafío en las comunicaciones ópticas de alta velocidad, el cual permanece en el canal de 40 Gbps. Esto resalta la resistencia del XPM, que no desaparece por completo con un aumento relativamente pequeño en la potencia del láser, como se observa en la figura 3.12

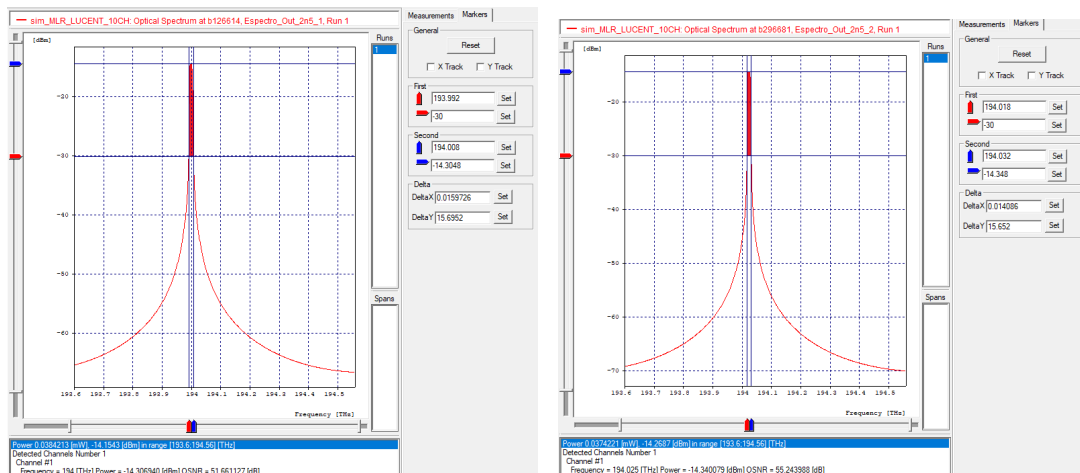


(a) Espectro óptico Canal 1 de 40Gbps (b) Espectro óptico Canal 10 de 40Gbps

Figura 3.12: Espectro óptico de 40Gbps

La persistencia del XPM se debe, en parte, a la alta velocidad de transmisión de datos en el canal de 40 Gbps, lo que provoca una mayor interacción entre las señales ópticas en la fibra. Además, la fibra óptica es especialmente susceptible a efectos no lineales a estas velocidades tan altas. En resumen, la rápida transmisión de datos y la reacción no lineal de la fibra a esta velocidad hacen que reducir el XPM sea un reto complicado, incluso al aumentar la potencia del láser.

Es relevante señalar que el efecto de Modulación de Fase Cruzada (XPM) es más pronunciado en una red con una potencia del láser de 0 dBm en comparación con una red con 2.5 dBm. En situaciones donde la potencia del láser es más baja (0 dBm), el XPM puede afectar de manera más significativa la calidad de la señal en los canales de transmisión, especialmente a velocidades elevadas como 40 Gbps. Aunque el aumento de la potencia a 2.5 dBm mejora los canales de 10 Gbps, el XPM sigue siendo un desafío en el canal de 40 Gbps debido a la complejidad de su naturaleza no lineal en entornos de alta velocidad.



(a) Espectro óptico Canal 4 de 2.5Gbps (b) Espectro óptico Canal 5 de 2.5Gbps

Para los canales de 2.5 Gbps se puede apreciar en el espectro óptico y en la tabla de comparación como es una de las señales con mejor rendimiento en el sistema debido a la velocidad en la que transmite y el aumento de potencia que se estableció para este caso. La OSNR real que presenta estos canales con esta velocidad oscila entre 51.5822 a 60.2677 3.2 que en comparación a los demás canales presenta un valor considerable, esto se refiere a una relación favorable entre la potencia de la señal óptica y el nivel de ruido en un sistema de comunicación óptica. En términos técnicos, esto significa que la intensidad de la señal óptica es significativamente mayor que las interferencias y ruidos presentes en la fibra óptica, lo cual finalmente se puede corroborar en el diagrama de ojo entre en canal de 40 Gbps y 2.5 Gbps

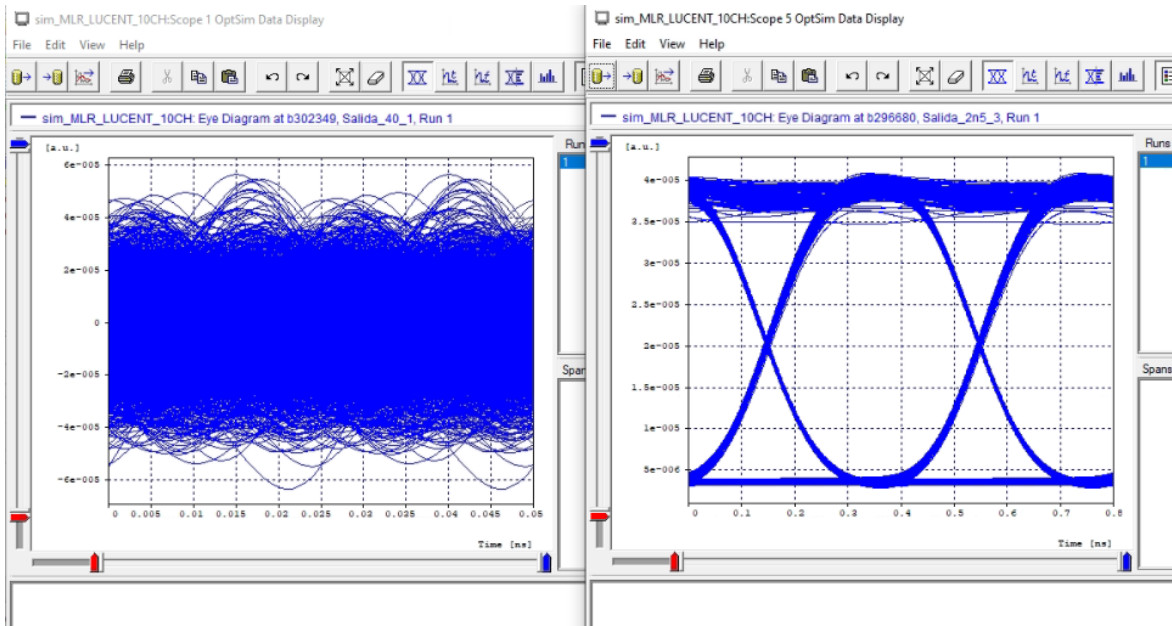


Figura 3.14: Comparación Diagrama de ojo canal 40 Gbps Vs 2.5 Gbps

3.1.3. Análisis para 5 dBm de potencia.

Después de llevar a cabo los análisis de la arquitectura de red utilizando potencias de 0 dBm y 2.5 dBm (consideradas bajas y medias, respectivamente), en este nuevo análisis hemos decidido introducir una variación en la potencia de transmisión, aumentándola a 5 dBm. Este cambio tiene como objetivo central el monitoreo y la comparación de los parámetros críticos del sistema, y cómo estos valores afectan la aparición de efectos no lineales de tipo Kerr en los canales.

Al igual que en los anteriores casos, se establecen los mismos parámetros en cuanto a distancia de propagación de 80 km, índice de refracción de la fibra óptica de 1.470 y alcance FTTB de 900 metros de longitud en el tramo final. La variación se centra solo en el aumento de la potencia de transmisión, como se puede ver en la figura de red 3.15.

Red MLR tipo 3 (velocidades según XG-PON, XGS-PON Y NG-PON2)

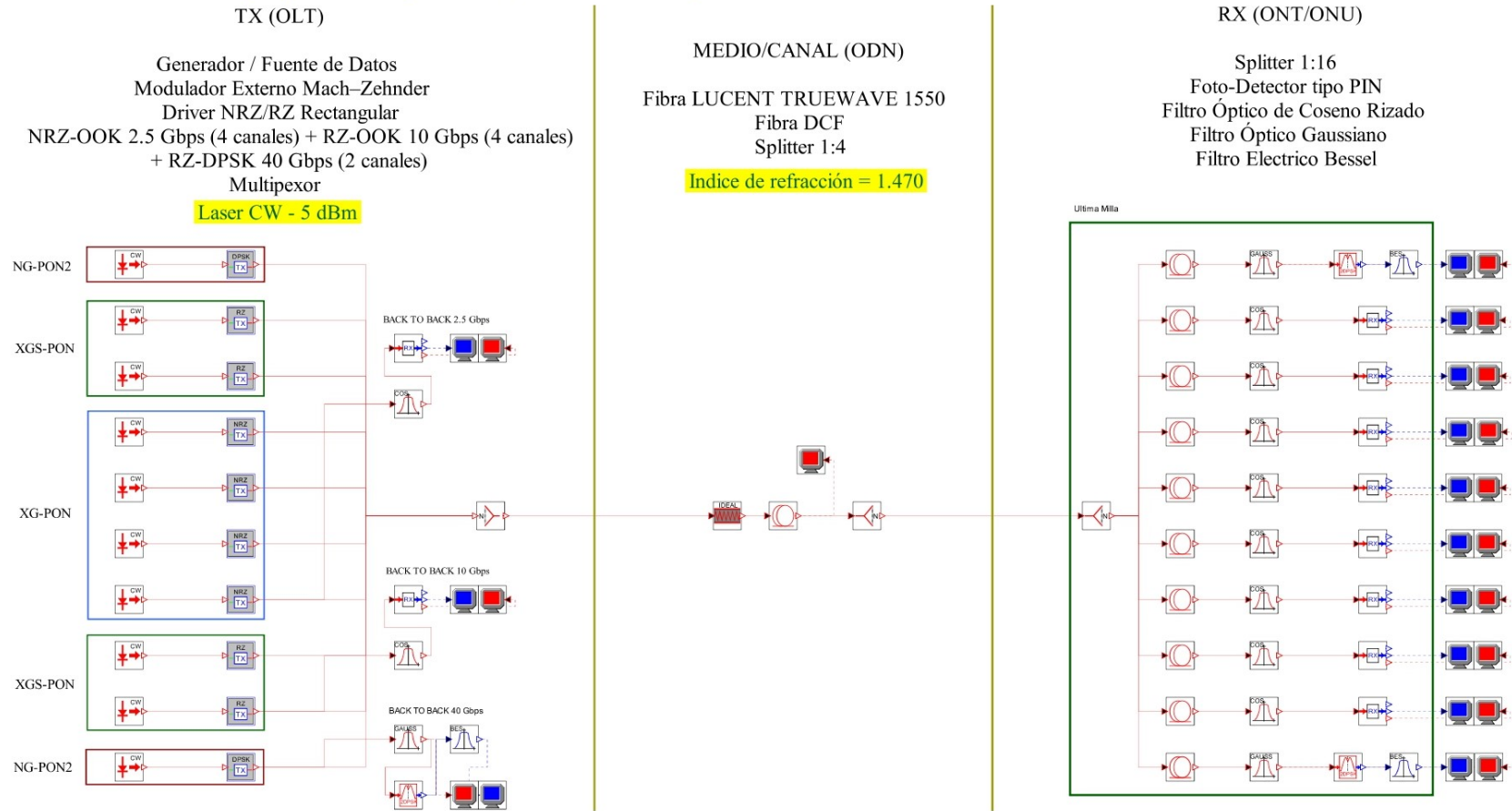


Figura 3.15: Red MLR 10 Canales - Láser CW a 5 dBm - Índice Refracción: 1.470, de los autores.

Conforme al estándar ITU-T G.694.1, los sistemas DWDM se distinguen por su operatividad en la banda C y por mantener un espaciamento entre canales de 100 GHz (equivalente a 0,8 nm) o, en algunos casos, incluso menor, lo que define el ancho de banda total ocupado por un número específico de canales. Esta característica permite a la tecnología DWDM incorporar ocho canales o más dentro del espectro de los 1550 nm.

En este caso particular, se ha elegido configurar el espaciamento en la grilla de igual manera que en los dos casos anteriores: entre los canales 1 y 2, se establece un espaciado de 100 GHz; los canales 2, 3 y 4 tienen un espaciado de 50 GHz entre ellos; los canales 4, 5, 6, 7 y 8 están separados por 25 GHz entre sí, y, por último, los canales 9 y 10 tienen un espaciado de 100 GHz, a continuación se presentan los espectros captados en recepción y sus respectivos anchos de banda ocupado a partir del espaciamento escogido.

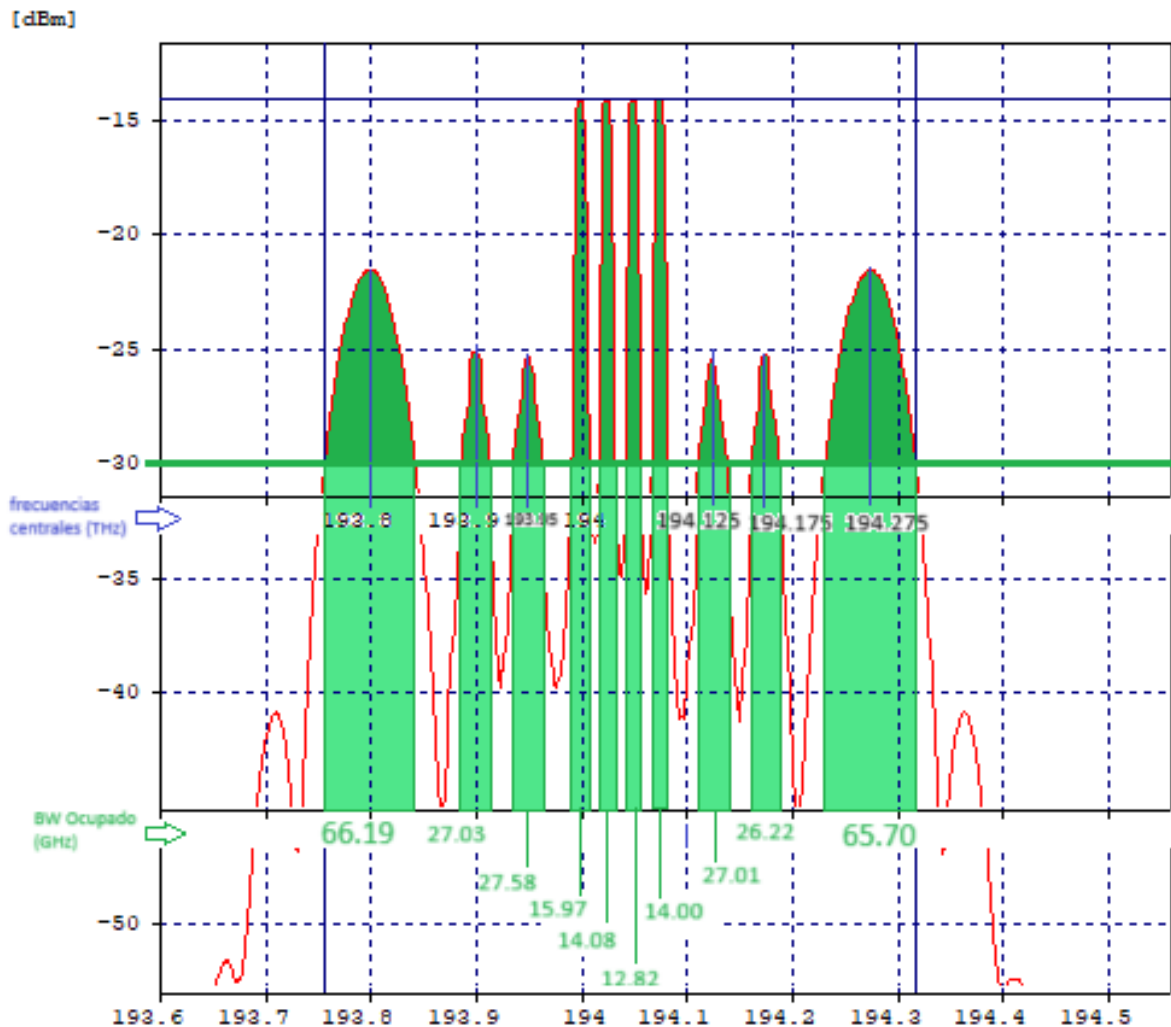


Figura 3.16: Espaciamento de los canales recibidos.

A continuación, se presenta un análisis basado en los resultados obtenidos a partir de la simulación de la arquitectura de red. En este análisis, nos enfocamos en el espectro óptico y el diagrama del ojo entregados por los medidores en recepción, prestando especial atención a los parámetros críticos que afectan el rendimiento de la red y a su vez evidencian la presencia de los efectos no lineales tipo Kerr. Estos parámetros incluyen la potencia de transmisión (P_{tx}), el espectro de frecuencia, el factor de calidad (Q), la tasa de error de bits (BER), la relación señal a ruido óptica (OSNR) y el ancho de banda ocupado (BW) por cada canal.

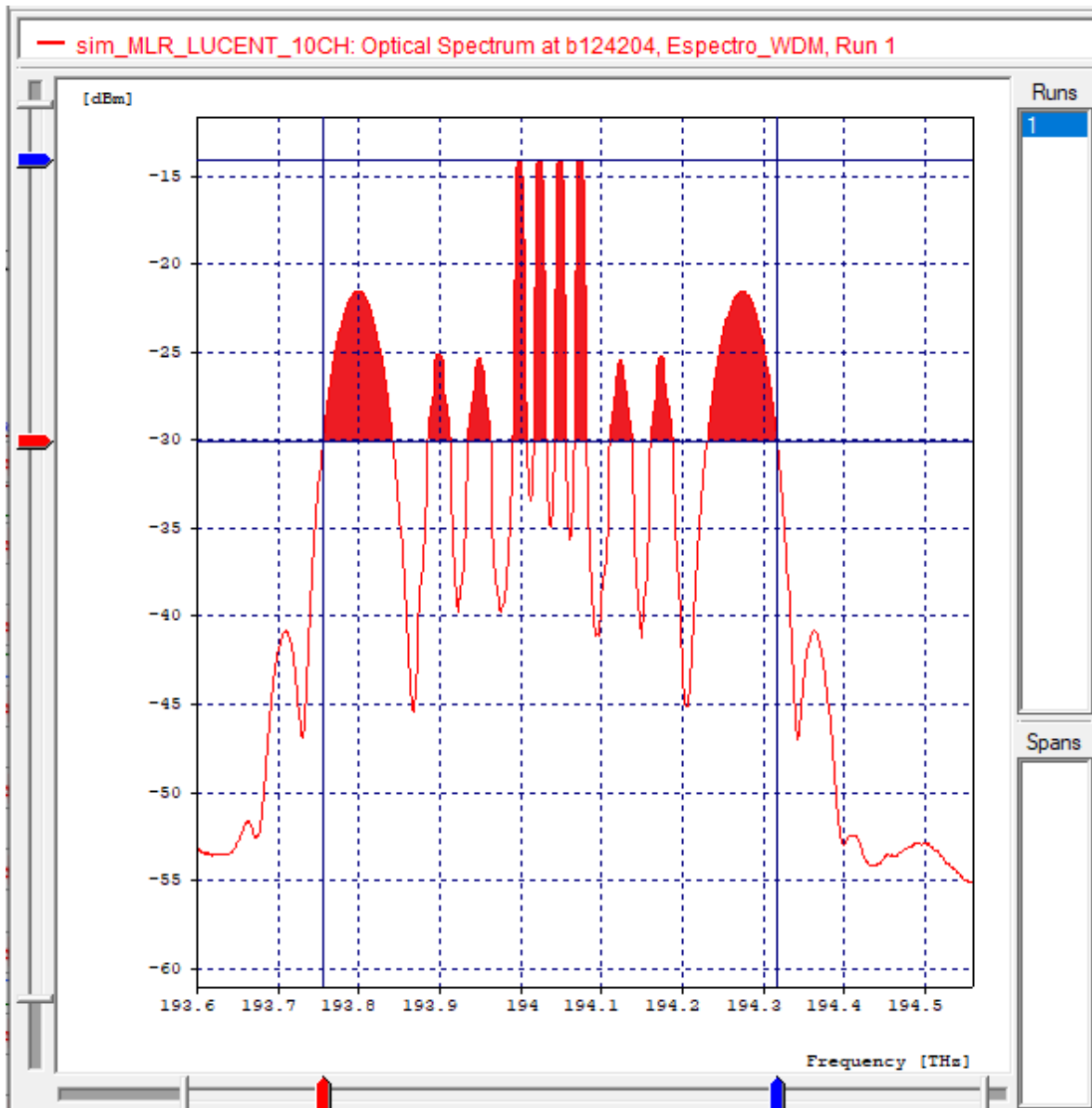


Figura 3.17: Espectro óptico de 10 canales a 5 dBm

La Figura 3.17 muestra el espectro óptico resultante tras recorrer una distancia de

80 kilómetros a través de una fibra óptica para los 10 canales bajo análisis. De este espectro, podemos inferir lo siguiente: i) En el caso de los canales de 40 Gbps, ocupan un ancho de banda mayor en comparación con los dos escenarios previos. No obstante, aún se mantienen dentro del espaciamiento de 100 GHz, ya que cada canal oscila entre los 66 GHz de ancho de banda ocupado. A pesar de esto, siguen siendo los canales con la calidad más baja de los tres casos, lo que se confirma al observar los valores de la tasa de errores en bits (BER) y el factor de calidad Q, que son del orden de 0.2275 y 6.0206, respectivamente. ii) Los canales de 10 Gbps continúan exhibiendo el menor valor de Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR) y el ancho de banda ocupado (BW) en recepción, en comparación con los canales adyacentes de 2.5 y 40 Gbps. Esto sugiere que la variación de potencia no beneficia particularmente a esta tasa de transmisión en particular. iii) En cuanto a los canales de 2.5 Gbps, son los que ocupan menos ancho de banda, pero mantienen los mejores parámetros de calidad. Los valores de la tasa de errores en bits (BER) son los más bajos en el sistema, y el valor promedio del factor de calidad Q es el más alto en el sistema, lo que se traduce en un mejor nivel de OSNR para estos canales. Ver tabla 3.3

Canal	Velocidad de Tx [Gbps]	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q [dB]	OSNR [dB]	OSNR real [dB]	BW ocupado
1	40	-15.4094	0.2275	6.0206	44.5672	8.25675	0.06619
2	10	-22.2051	0.01503	6.7281	49.7758	4.73292	0.02703
3		-22.3382	0.00528	8.6462	49.4814	4.52329	0.02758
4	2.5	-14.1543	$1e^{-40}$	31.2187	51.6611	15.6952	0.01597
5		-14.2687	$1e^{-40}$	26.4283	55.2439	15.6520	0.01408
6		-14.3124	$1e^{-40}$	26.3895	59.9766	15.6553	0.01282
7		-14.1715	$1e^{-40}$	30.4507	55.8946	15.7586	0.01400
8	10	-22.5567	0.00237	8.8866	50.7375	4.3737	0.02701
9		-22.4238	0.01668	6.5666	50.8428	4.5988	0.02622
10	40	-15.4120	0.02275	6.0206	46.5473	8.2922	0.06570

Tabla 3.3: Parámetros OPM para red MLR con 5 dBm. De los autores

Al igual que los anteriores casos, se ha mencionado que el efecto Kerr es una no linealidad óptica que puede inducir distorsiones en la señal durante su transmisión a través de una fibra óptica. Como se ilustra en la figura 3.41b, la aparición de este efecto está intrínsecamente relacionada con las condiciones en las que opera el sistema de comunicación.

Para evaluar su impacto en los canales ópticos, se emplean mediciones de parámetros cruciales, como la Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR), que permiten identificar la presencia y la intensidad de los efectos no lineales en cada canal, como se refleja en

la tabla 3.3. En este contexto, es esencial comprender que a medida que la OSNR aumenta, la relación señal a ruido se fortalece significativamente.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, se procede a realizar un análisis de los parámetros críticos al momento de identificar la presencia de efectos no lineales tipo Kerr dentro del sistema. Inicialmente, para los canales de 2.5 Gbps se puede ver en la figura 3.18, que no hay presencia de algún efecto no lineal, y esto se corrobora al denotar los parámetros para el canal 4, en donde el factor de calidad Q es 31.2187 dB, la tasa de error de bits es $1e^{-40}$; lo que lleva a obtener una muy buena relación señal a ruido óptica OSNR de 51.6611 dB.

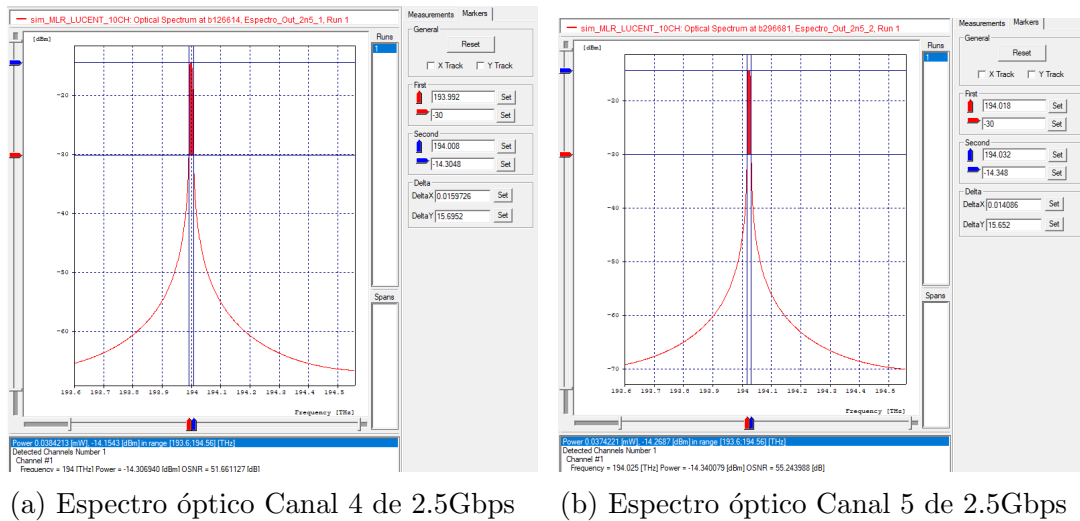
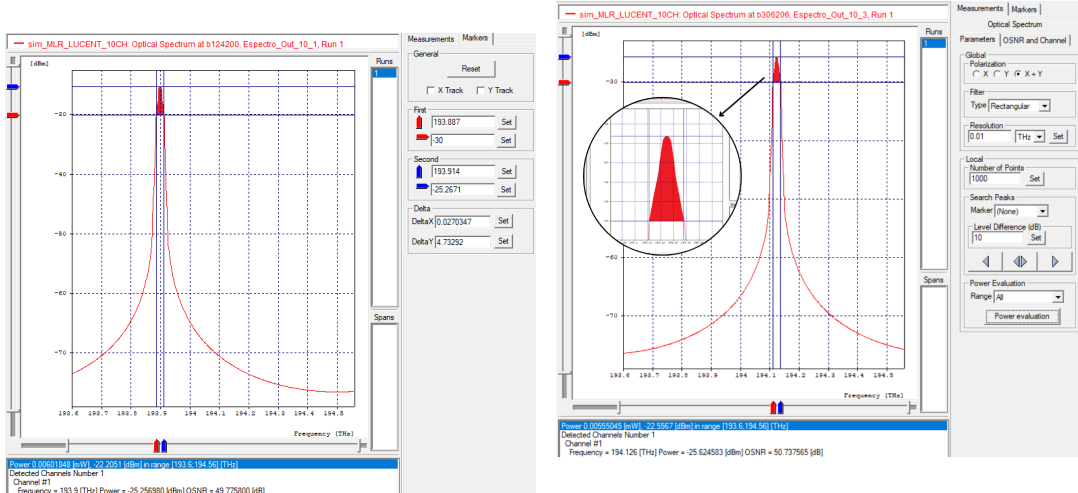


Figura 3.18: Desempeño de canales a 2.5 Gbps

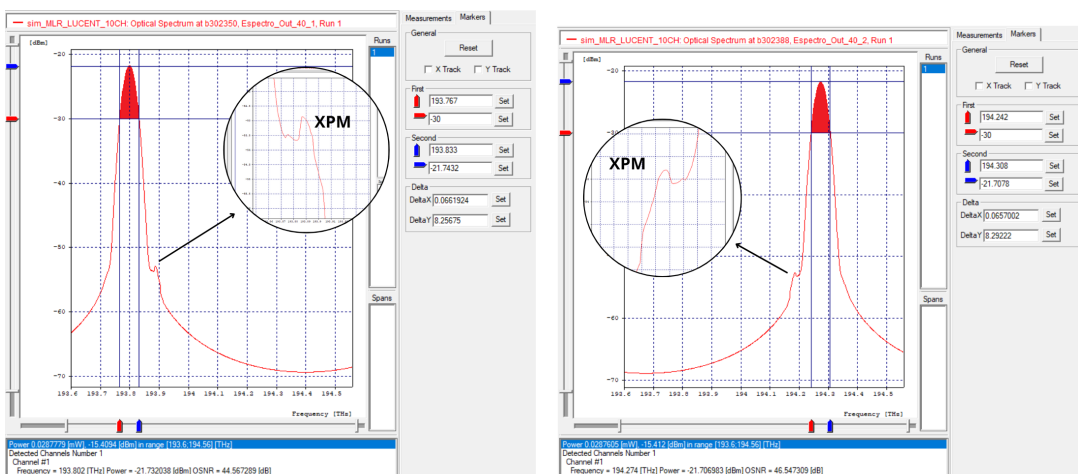
Al igual que para los canales de 2.5 Gbps, los canales de 10 Gbps tampoco presentan deformaciones en su espectro que indiquen presencia de efectos no lineales, al analizar los resultados de sus parámetros de calidad se encuentra que: para el canal 8 se tiene una BER de 0.00237, un factor Q de 8.8866 dB, y una OSNR de 4.3737 (la cual es la más baja del sistema). A nivel general, estos valores podrían indicar que es probable que haya distorsiones que introduzcan efectos no lineales; sin embargo, al realizar una inspección en la figura 3.19, no hay evidencia de la presencia de algún efecto relacionado.



(a) Espectro óptico Canal 2 de 10Gbps (b) Espectro óptico Canal 8 de 10Gbps

Figura 3.19: Desempeño de canales a 10 Gbps

Finalmente, para los canales de 40 Gbps, si es posible identificar la presencia de efectos no lineales tipo Kerr, específicamente el efecto XPM, el cual se encuentra contiguo al canal, en las frecuencias 193.65 y 194.45, ver figura 1.17. Esto se debe principalmente a los valores resultantes en recepción, los cuales son deficientes y degradan la calidad de la señal, un ejemplo claro es el canal 10 (figura 3.20), el cual a pesar de tener una mejor OSNR que los canales de 10 Gbps (8.2922 dB), es el canal que tiene los peores valores para las BER (0.02275) y factor Q (6.0206 dB).



(a) Espectro óptico Canal 1 de 40Gbps (b) Espectro óptico Canal 10 de 40Gbps

Figura 3.20: Desempeño de canales a 40 Gbps

Tras analizar todos los canales del sistema, se procede a comparar los diagramas del ojo correspondientes al mejor y peor caso en términos de calidad de la señal y presencia de efectos no lineales.

Sabiendo que los canales con velocidad de 40 Gbps, se presenta el efecto no lineal conocido como la Intermodulación por Fase Cruzada (XPM). Se puede deducir que esto ocurre gracias a la alta velocidad y densidad de canales que caracterizan a estos sistemas [37]. En consecuencia, es posible experimentar la presencia de este fenómeno no lineal, lo que puede contribuir a un aumento en la BER en como se demostró anteriormente.

En el mismo sentido, se puede inferir que los canales de 2.5 Gbps, al contar con una mejor BER en comparación a la de los canales de 40 Gbps, obtendrán una mejor calidad de la señal y la capacidad del sistema para transmitir información de manera confiable. Con esto, se concluye que los canales de 2.5 Gbps tienen una mejor representación del diagrama del ojo, como se puede ver en la figura 3.21.

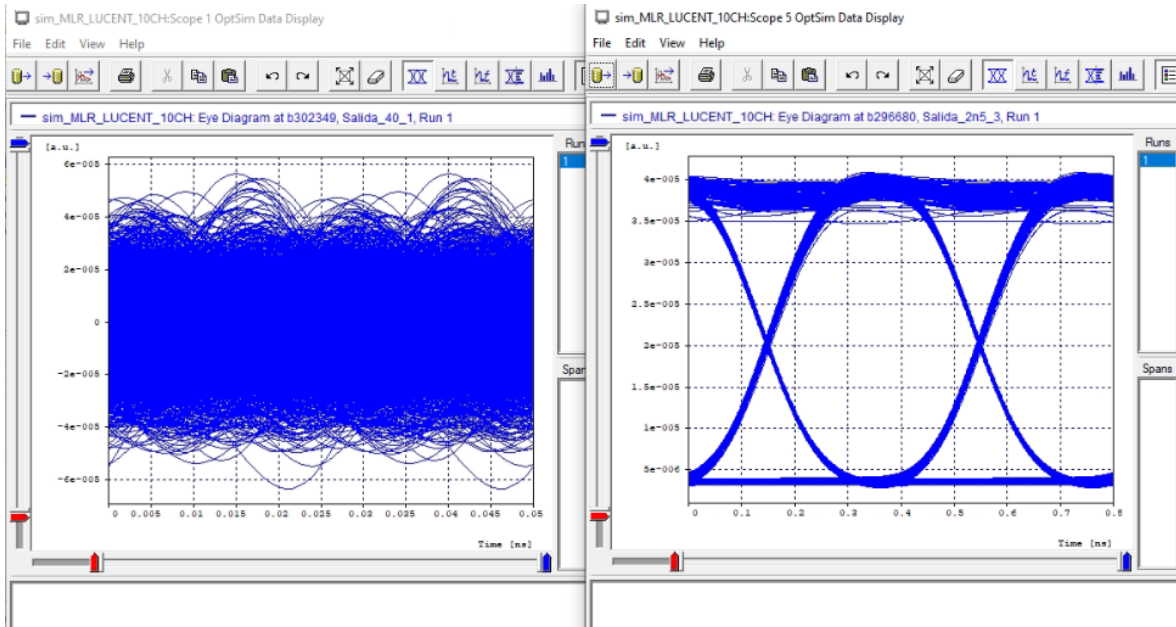


Figura 3.21: Comparación Diagrama de ojo canal 40 Gbps Vs 2.5 Gbps

3.1.4. Variación y Análisis para el caso con mejores resultados 5 dBm

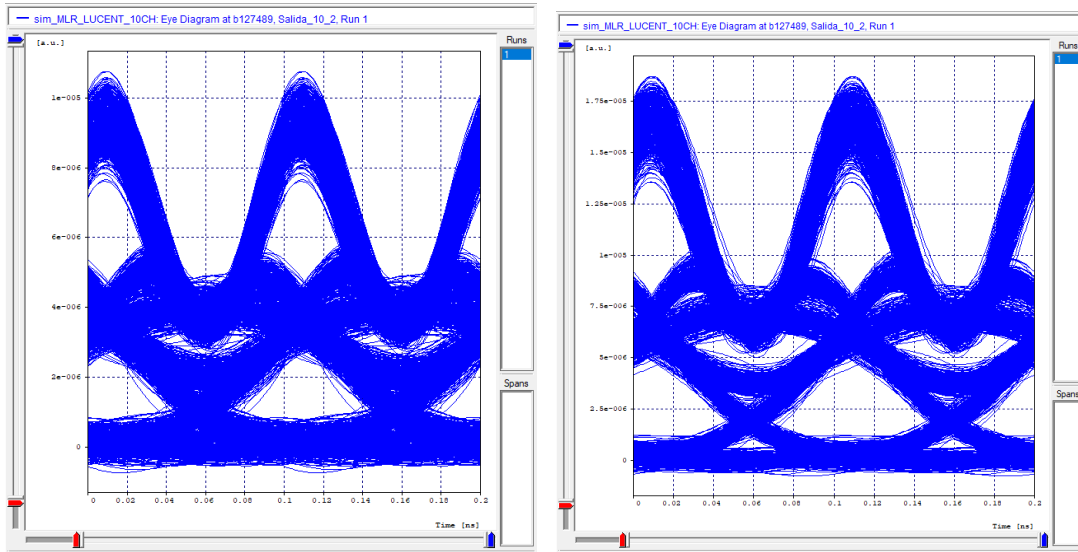
De acuerdo, las variaciones en la potencia en los casos anteriores, se opta por seleccionar el análisis que muestra un mejor rendimiento. Esto se hace con el propósito de modificar el índice de refracción en el interior de la fibra originalmente elegida, con el fin de obtener un análisis más preciso del comportamiento y desempeño del sistema de comunicación óptica al cambiar parámetros críticos del sistema. Además, esta elección se realiza con el fin de verificar si disminuye o aumenta la intensidad de la presencia de los efectos no lineales tipo KERR.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se determina que la configuración más favorable corresponde a la modificación de potencia de 5 dBm en el transmisor. Esta elección se fundamenta en los datos presentados en la tabla 3.4 donde se detallan parámetros como la Tasa de Error de Bit (BER) y la Relación Señal-Ruido Óptico (OSNR) real, que muestran una variación apreciable, aunque no lo suficientemente amplia, pero que resulta significativa para mejorar la calidad de la señal.

CASO	Canal	Velocidad de Tx	BER	Factor Q [dB]	OSNR real [dB]	BW ocupado
0 dBm	3	10 Gbps	0.01450	6.9231	-0.5007	-
2.5 dBm	3	10 Gbps	0.00915	7.9963	2.0239	0.01383
5 dBm	3	10 Gbps	0.00528	8.6462	4.52329	0.02758

Tabla 3.4: Parámetros del canal 3 para 2.5 dBm y 5 dBm. De los autores

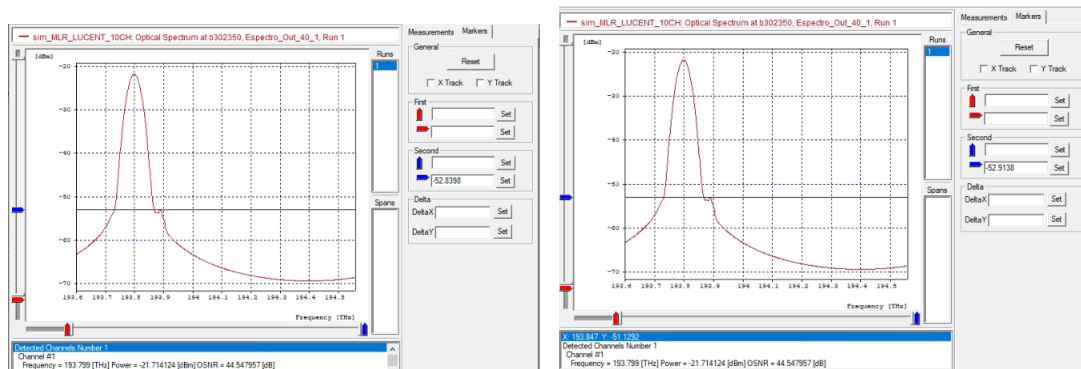
Además, para validar esta conclusión, se procede a realizar una comparación detallada entre el diagrama de ojo correspondiente a una potencia de 2.5 dBm y otro a 5 dBm, ambos con una velocidad de transmisión de 10 Mbps. Como se evidencia en la figura 3.22, el diagrama correspondiente a 5 dBm muestra una apertura más nítida y menos afectada por el ruido en comparación con el diagrama de 2.5 dBm.



(a) Diagrama de ojo 10 Gbps a 2.5dBm (b) Diagrama de ojo 10 Gbps a 5dBm

Figura 3.22: Comparación 10 Gbps para potencia de 2.5 dBm y 5 dBm

Por lo anterior, se decide realizar un último análisis con potencia de 5 dBm, la misma fibra óptica Lucent True Wave, pero variando su índice de refracción expuesto en la ficha técnica (1.470) por un valor de 3.0 y 1.0, debido a que si lo que se quiere es disminuir los efectos no lineales tipo Kerr, es mejor utilizar un índice de refracción bajo. Esto se debe a que los efectos no lineales tipo Kerr son más pronunciados en medios con un índice de refracción alto.



(a) Espectro con índice de refracción: 1 (b) Espectro con con índice de refracción: 3

Figura 3.23: Canal 1 con velocidad de 40 Gbps

Los efectos no lineales tipo Kerr son fenómenos que se producen cuando la luz interactúa con un material de forma no lineal. Estos efectos pueden causar una serie de problemas en los sistemas de comunicación óptica, como la distorsión de la señal y la pérdida de potencia [38]. Un índice de refracción bajo reduce los efectos no lineales tipo

Kerr porque reduce la intensidad del campo eléctrico de la luz en el medio. Esto se debe a que la intensidad del campo eléctrico es proporcional al índice de refracción. Sin embargo, como se puede observar en la figura 3.23, esta variación no genera un cambio significativo en el comportamiento de los efectos no lineales tipo Kerr aunque el valor del índice de refracción sean lo suficientemente bajo o se encuentre por encima del valor establecido en la ficha técnica.

3.2. RED MLR CON MEDIO DE TRANSMISIÓN SOBRE FIBRA ÓPTICA CORNING LEAF

En el contexto del segundo caso de estudio, se emplea la misma metodología que se desarrolló en el caso anterior. El objetivo principal es sustituir la fibra óptica actual en el entorno por la fibra óptica Corning Leaf. De acuerdo con su ficha técnica [33], esta fibra presenta un índice de refracción nominal de 1.4693. Al comparar este valor con el caso expuesto en la sección 3.1, se evidencia una variación en el índice de refracción que puede influir de manera positiva o negativa en el rendimiento de la red, lo cual será objeto de estudio en el análisis.

Siguiendo el establecimiento del índice de refracción, se inicia el proceso de variación controlada en la intensidad de la potencia de transmisión, tal como se planteó en el primer caso. El propósito es analizar los efectos no lineales de tipo Kerr que se presentan y comparar su intensidad con los resultados obtenidos en el caso inicial.

De esta forma, la investigación se centra en examinar los efectos de la variación en el índice de refracción y en explorar los fenómenos no lineales que surgen cuando se aplican diferentes niveles de potencia. Estos análisis contribuirán a una comprensión más completa de cómo las propiedades ópticas influyen en el comportamiento de la red.

3.2.1. Análisis para 0 dBm de potencia.

Teniendo en cuenta el nuevo índice de refracción, resultado del cambio en la fibra óptica establecida para este caso [33], se busca verificar el comportamiento y la intensidad de los efectos no lineales en el sistema de comunicaciones ópticas. Con esta variación y la potencia en 0 dBm se identifica en qué medida afecta al sistema de comunicación óptico.

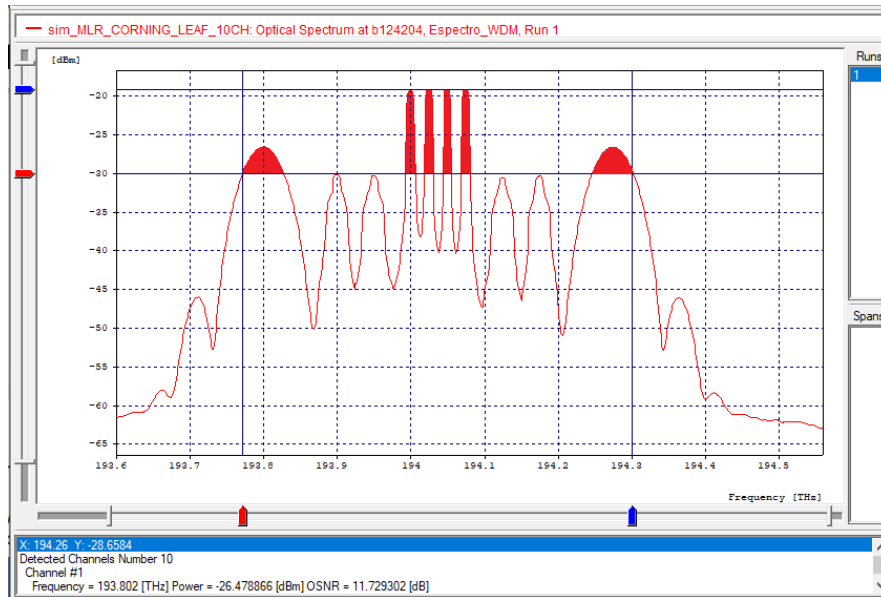


Figura 3.24: Espectro óptico de 10 canales a 0 dBm

De acuerdo a la figura 3.24, se puede apreciar que los canales de 10 Gbps se sitúan por debajo del umbral de -30 dBm, tal como se ha configurado en la sensibilidad del receptor. Este mismo escenario se repite en la página 75. A pesar de que se realice un cambio en el índice de refracción y la potencia de transmisión se mantenga constante en 0 dBm para ambos casos, estos canales que operan a una velocidad de 10 Gbps no logran alcanzar la sensibilidad del receptor establecida 3.26. Cabe resaltar que esta sensibilidad es el nivel mínimo de potencia de señal que el receptor puede detectar y decodificar de manera confiable y que por consiguiente influye directamente en el rendimiento general del sistema de comunicación óptica.

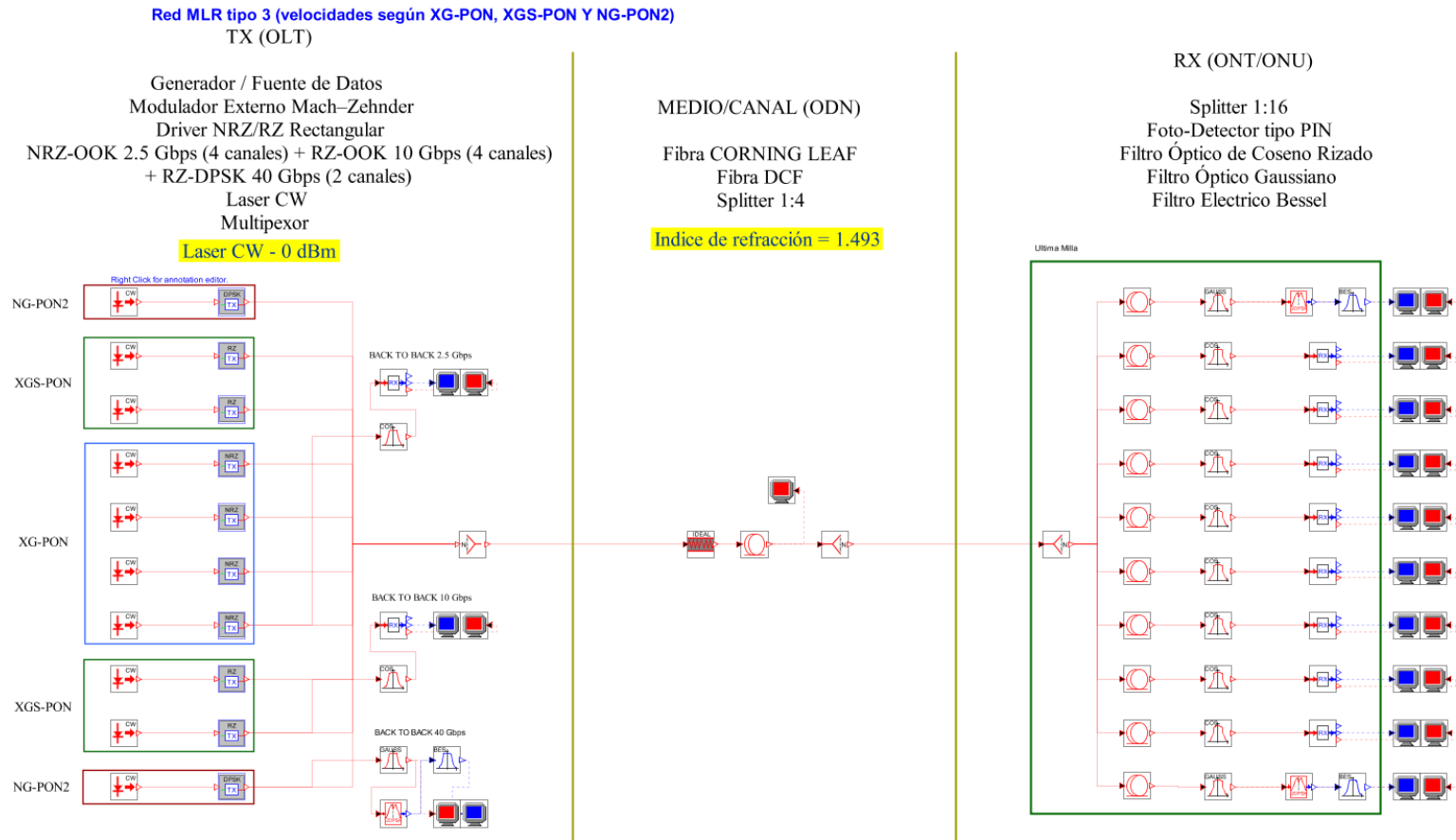
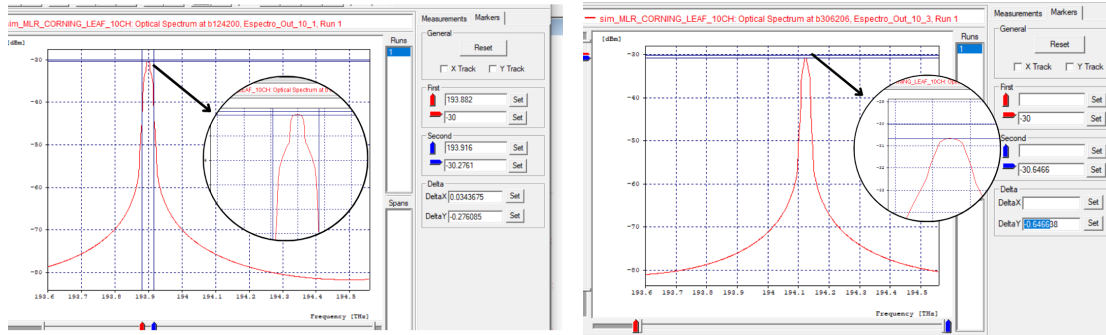


Figura 3.25: Red MLR 10 Canales - Láser CW a 0 dBm - Índice Refracción: 1.493, de los autores.



(a) Espectro óptico Canal 2 de 10Gbps (b) Espectro óptico Canal 8 de 10Gbps

Figura 3.26: Desempeño de canales a 10 Gbps

Es fundamental resaltar que la capacidad de un canal de comunicación óptica para alcanzar el umbral de sensibilidad del receptor configurado en -30 dBm depende de múltiples factores, incluyendo la velocidad de transmisión, la modulación, codificación utilizada y la potencia de transmisión previamente definida para el sistema de comunicación. Los sistemas de 2.5 Gbps y 40 Gbps utilizan técnicas de modulación y codificación que compensan las limitaciones de velocidad y ancho de banda (página 46). Estas técnicas pueden mejorar la eficiencia en la transmisión de datos y la capacidad de recuperación de la señal en comparación a los canales con velocidad de 10 Gbps

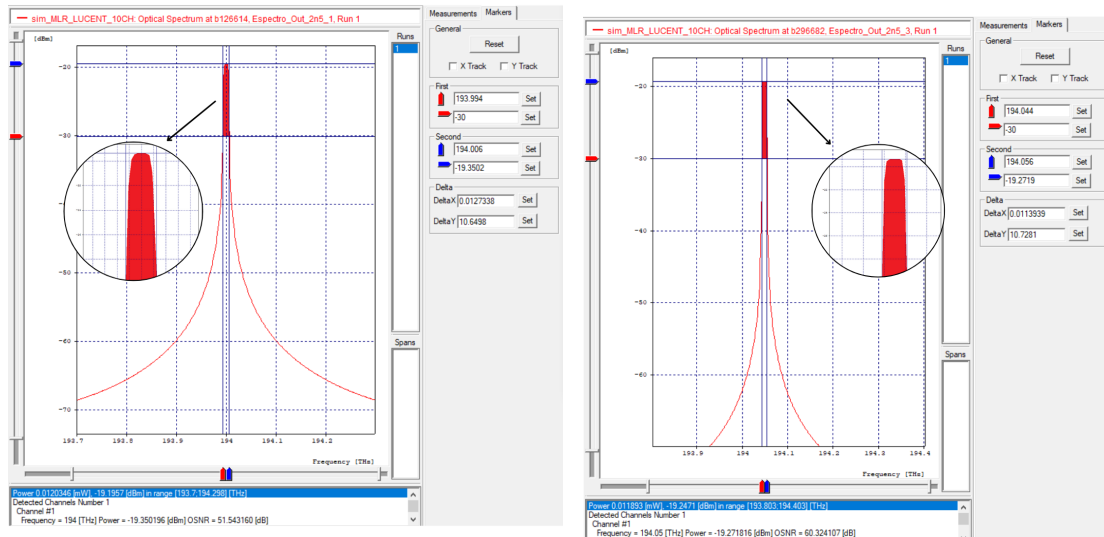
Canal	Velocidad de Tx [Gbps]	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q [dB]	OSNR [dB]	OSNR real [dB]	BW ocupado
1	40	-26.7167	0.02275	6.0206	44.6196	3.23887	0.0420406
2	10	-30.2389	0.02275	6.0206	49.988	-0.2760	-
3		-30.4285	0.02205	6.0206	49.4878	-0.4914	-
4	2.5	-19.3843	$1e^{-40}$	34.8766	51.3509	10.6636	0.01131
5		-19.2804	$1e^{-40}$	33.3745	55.4186	10.6319	0.01101
6		-19.2944	$1e^{-40}$	33.5378	59.9614	10.7611	0.01224
7		-19.2708	$1e^{-40}$	35.2185	55.6975	10.6004	0.01161
8	10	-30.7415	0.2275	6.0206	50.3378	-0.6466	-
9		-30.4274	0.2275	6.0206	50.9161	-0.4430	-
10	40	-26.7090	0.2275	6-0206	47.0807	3.2998	0.04051

Tabla 3.5: Parámetros OPM para red MLR con 0 dBm. De los autores

Según los valores presentados en la tabla 3.5, se puede observar que los resultados son notablemente similares a los del caso 1. Esto se debe a la consideración de que, en la práctica y en situaciones reales, los índices de refracción ya están predefinidos en las fichas técnicas correspondientes a cada fibra óptica, los cuales están diseñados para mantener un margen predeterminado que minimiza las variaciones. Esto significa que, en la práctica, los valores del índice de refracción están cuidadosamente controlados y conservados de acuerdo con las especificaciones del fabricante, de modo que las diferencias en este parámetro sean mínimas entre diferentes lotes de fibra óptica.

Sin embargo, es evidente que en este caso y en todos los anteriores, el canal de 2.5 Gbps presenta un rendimiento óptimo según los parámetros OPM. Los valores de potencia en recepción se mantienen constantemente en torno a -19.2 dB, el factor Q supera los 34 dB, la relación señal-ruido óptica (OSNR) real se sitúa por encima de 10 dB y la tasa de error de bits (BER) siempre se mantiene en $1e^{-40}$. Este hecho resalta la eficiencia con la que los canales de 2.5 Gbps están funcionando, el cual se puede apreciar en la tabla 3.5 y en la figura 3.31.

Es importante destacar que, a pesar de la presencia de problemas en los canales adyacentes de 10 Gbps, los canales de 2.5 Gbps siguen operando eficientemente. Hasta el momento, no se ha observado interferencia significativa entre estos canales. Este resultado es prometedor y sugiere una buena separación y aislamiento entre los canales, lo que es esencial para garantizar un rendimiento óptimo en una red de telecomunicaciones.



(a) Espectro óptico Canal 4 de 2.5 Gbps (b) Espectro óptico Canal 6 de 2.5 Gbps

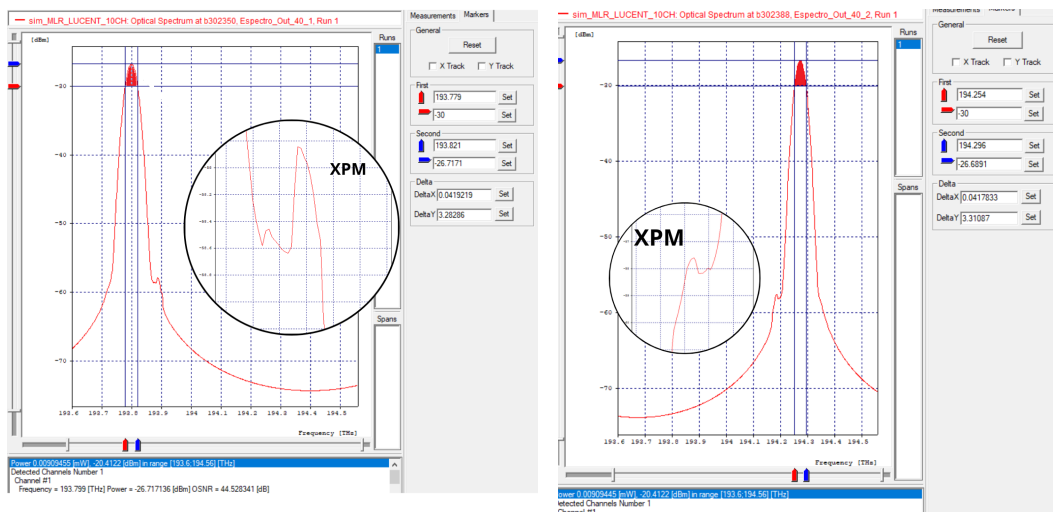
Figura 3.27: Desempeño de canales a 2.5 Gbps

Los efectos no lineales tipo Kerr, como el efecto de Modulación Cruzada de Fase (XPM), se manifiestan con mayor intensidad en canales de alta velocidad, como 40 Gbps, en comparación con canales de menor velocidad, como 10 Gbps o 2.5 Gbps, en sistemas de comunicación óptica debido a su relación intrínseca con la velocidad de

modulación.

La XPM, que es un efecto no lineal, ocurre cuando dos o más señales interactúan en una fibra óptica y modulan la fase de cada una debido a la intensidad de las otras señales. Esta interacción puede provocar desplazamientos en la frecuencia de las señales, lo que, a su vez, conlleva distorsiones en la señal y un incremento en la tasa de error de bits. En canales de alta velocidad, donde la información se comprime en intervalos más breves (bits), la potencia óptica por bit es sustancialmente mayor en comparación con canales de menor velocidad. Este aumento en la potencia por bit amplifica la susceptibilidad de la XPM, dado que esta depende directamente de la potencia óptica. [39]

Además, es común que los sistemas de alta velocidad, como los de 40 Gbps, empleen un ancho de banda espectral más amplio para transmitir datos a velocidades más elevadas. En consecuencia, se generan más longitudes de onda dentro del espectro de la señal, lo que incrementa la probabilidad de que se produzcan interacciones no lineales, en particular, la XPM. En resumen, la velocidad de modulación y la mayor potencia óptica por bit en canales de alta velocidad hacen que la XPM sea más significativa y, por lo tanto, afecte de manera más notoria la calidad de la señal en sistemas de comunicación óptica de alta velocidad, como los de 40 Gbps.



(a) Espectro óptico Canal 1 de 40Gbps (b) Espectro óptico Canal 1 de 40Gbps

Figura 3.28: Desempeño de canales a 40 Gbps

3.2.2. Análisis para 2.5 dBm de potencia.

En la búsqueda de una comprensión más profunda del sistema de comunicación, se decide elevar la potencia de transmisión de 0 dBm a 2.5 dBm, marcando un cambio significativo en nuestra evaluación. Este ajuste tiene como objetivo clave explorar cómo el sistema responde a esta variación y determinar si este cambio energético impacta positiva o negativamente su rendimiento.

Se realiza especial enfoque en cómo esta modificación podría influir en la aparición de efectos no lineales, particularmente del tipo Kerr. Este análisis reviste una importancia crucial, ya que permite anticipar posibles desafíos asociados con el ajuste del índice de refracción que se ha realizado a lo largo del estudio de los casos anteriores, se espera poder obtener resultados que indiquen si la variación, tanto de la potencia de transmisión, como del índice de refracción escogido para este caso (*Corning Leaf*), incidan sobre la aparición de los efectos tipo Kerr.

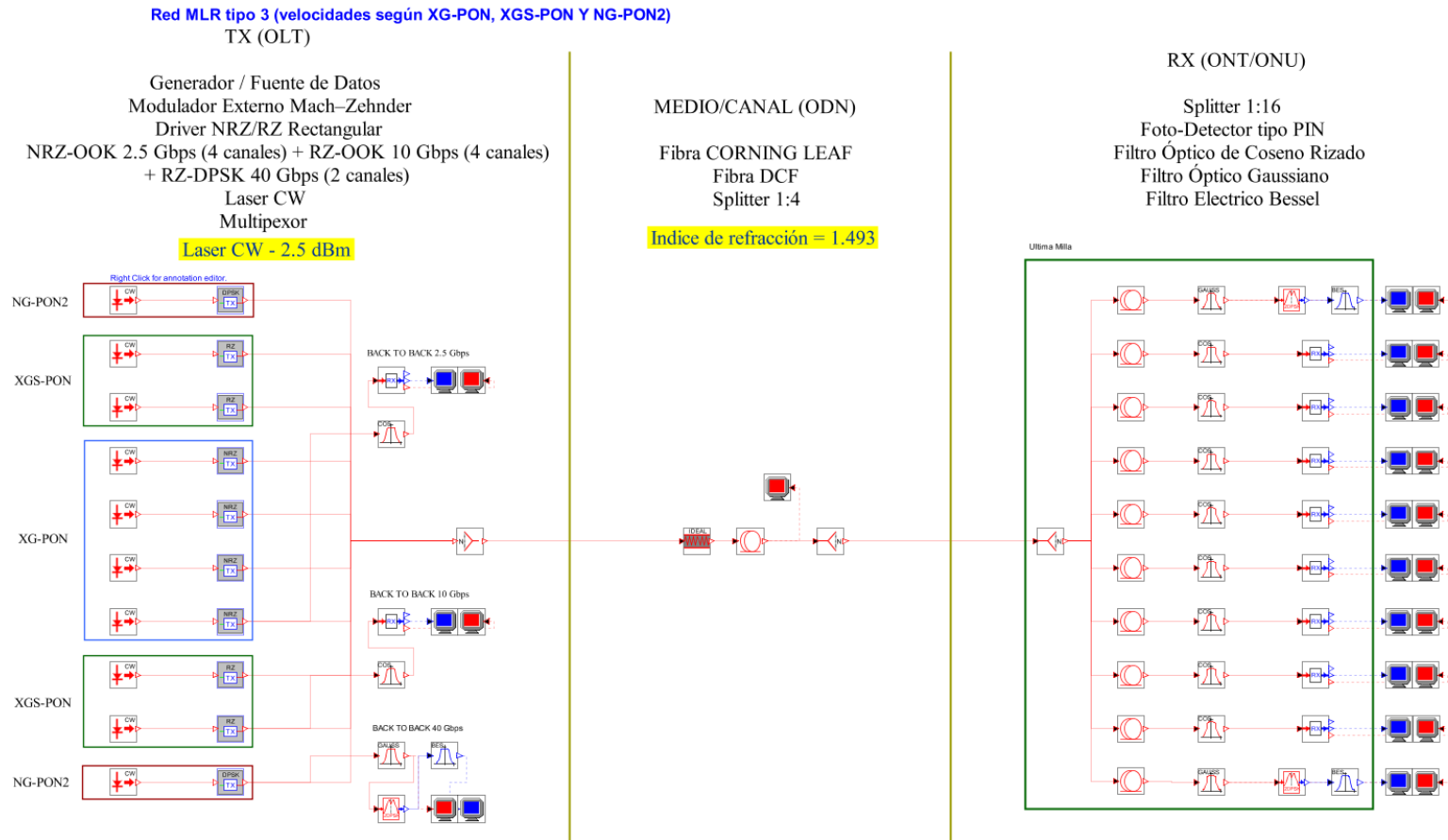


Figura 3.29: Red MLR 10 Canales - Láser CW a 2.5 dBm - Índice Refracción: 1.493, de los autores.

En la Figura 3.29 se muestra una variante de la red MLR previamente presentada en la figura [número de la figura anterior de la red completa], distinguiéndose solo por la potencia de transmisión. Es importante señalar que la fibra óptica utilizada y su índice de refracción se mantienen constantes en esta nueva configuración. El objetivo fundamental de este análisis reside en examinar cómo varían los resultados en función de la modificación en la potencia de transmisión. Esta vez, se emplea una potencia ligeramente superior en comparación con la configuración anterior de 0 dBm, tal como se hizo en casos anteriores.

Se sabe que la potencia de transmisión juega un papel crucial en la intensidad de la señal óptica enviada a través de la fibra; y es esencial que esta potencia sea adecuada para asegurar que la señal conserve su fuerza durante la transmisión a largas distancias sin experimentar degradación significativa. Como se observó en configuraciones anteriores con una potencia de transmisión de 0 dBm, los canales de 10 Gbps no recibieron suficiente potencia, lo que resultó en valores indeseados para la Relación Señal-Ruido Óptico (OSNR) y una alta Tasa de Error de Bit (BER), permitiendo así la presencia de efectos no lineales tipo Kerr.

En este contexto, se espera que la nueva configuración contribuya a mejorar el rendimiento de la red, afectando positivamente aspectos como la OSNR, la BER y el factor Q. Al mismo tiempo, esta configuración permitirá analizar si aumenta o disminuye la presencia de los efectos no lineales de tipo Kerr.

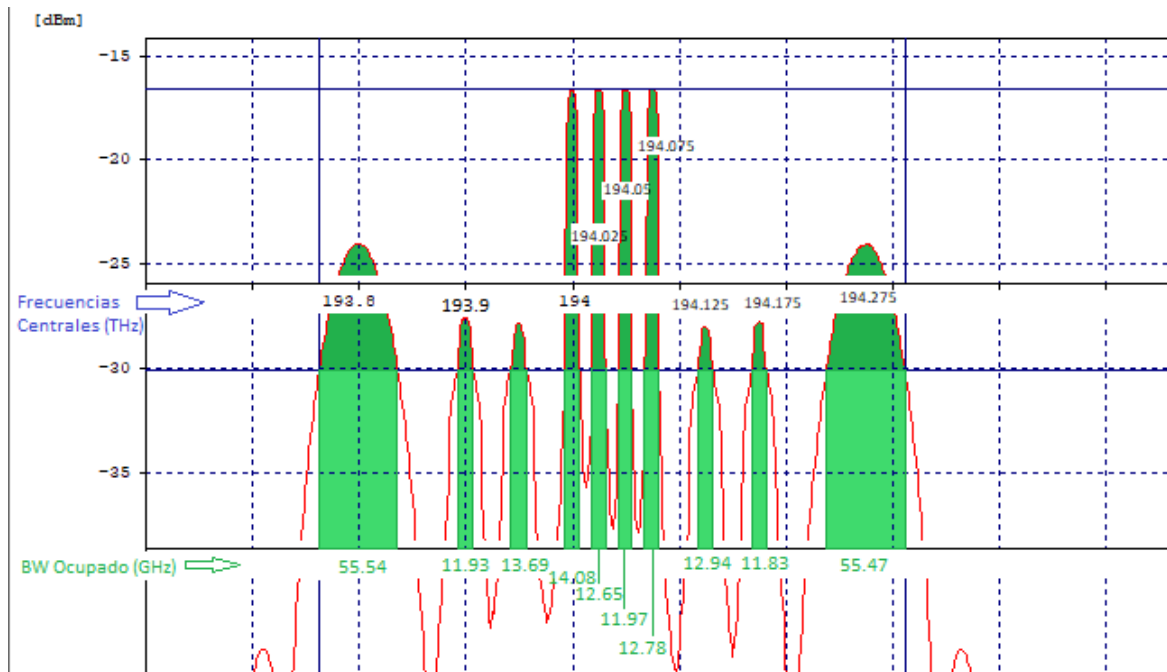


Figura 3.30: Espaciamento de los canales recibidos, de los autores.

Para este caso, se ha elegido configurar el espaciamiento asimétrico en la grilla de igual manera que en los casos anteriores, el cual establece un espaciado de 100 GHz, 50 GHz y 25 GHz, como se observa en la siguiente figura 3.30, donde se puede observar de manera detallada los espectros captados en recepción y sus respectivos anchos de banda ocupado a partir del espaciamiento escogido.

Por otro lado, en la figura 3.31, se representa el conjunto completo de señales ópticas después de haber viajado a lo largo de una fibra a una distancia de 80 kilómetros, donde este conjunto incluye las señales de los 10 canales.

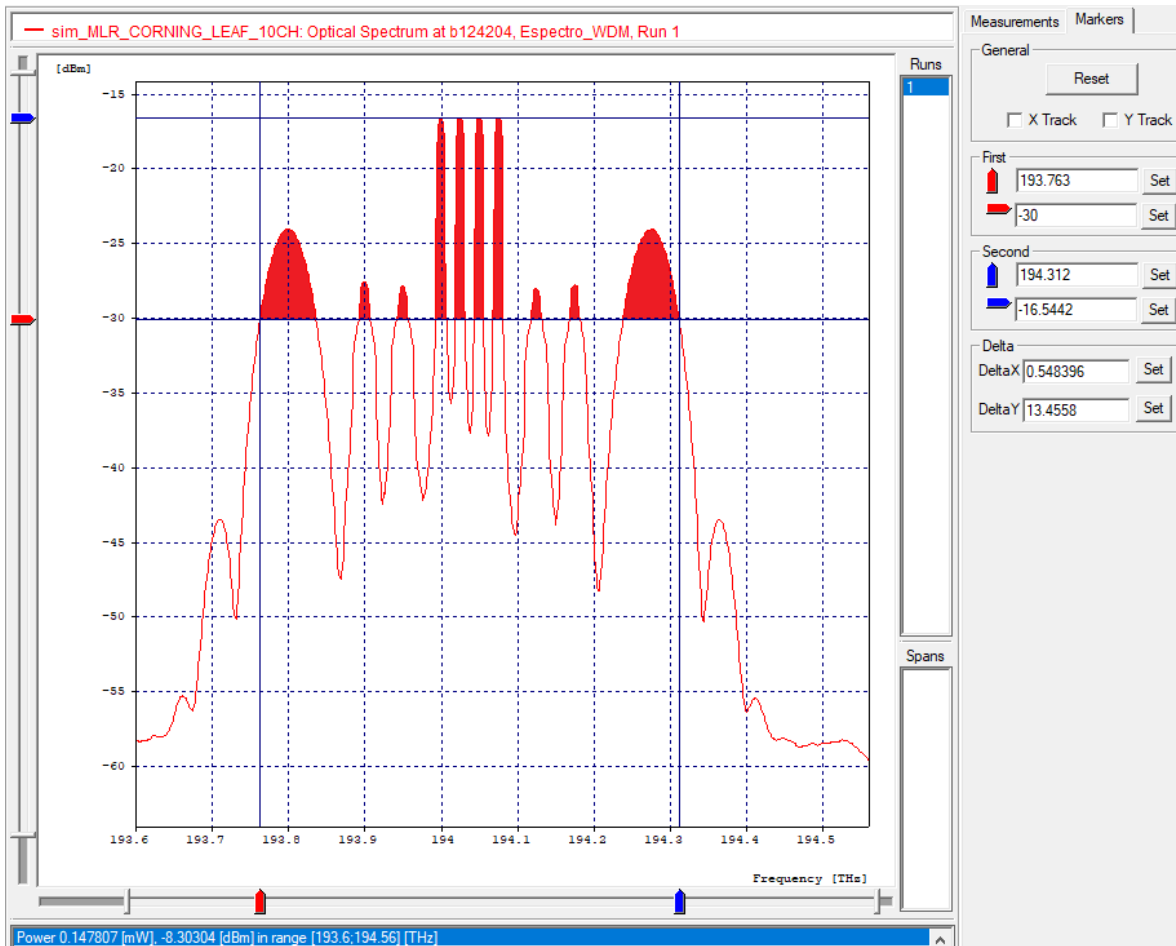


Figura 3.31: Espectro óptico de 10 canales a 2.5 dBm

Haciendo una comparación con el caso anterior, la figura 3.24, representa una notable reducción en los niveles de potencia de la señal en los canales de 10 Gbps, en donde NO se alcanza el límite de sensibilidad de -30 dBm de acuerdo a los 0 dBm configurados. Esto contrasta con lo que se aprecia en la figura 3.31, donde se muestra una pequeña mejora en estos mismos canales de 10 Gbps al aumentar la potencia del láser a 2.5 dBm, lo cual se respaldan con los datos presentados en la tabla 3.6. Debido

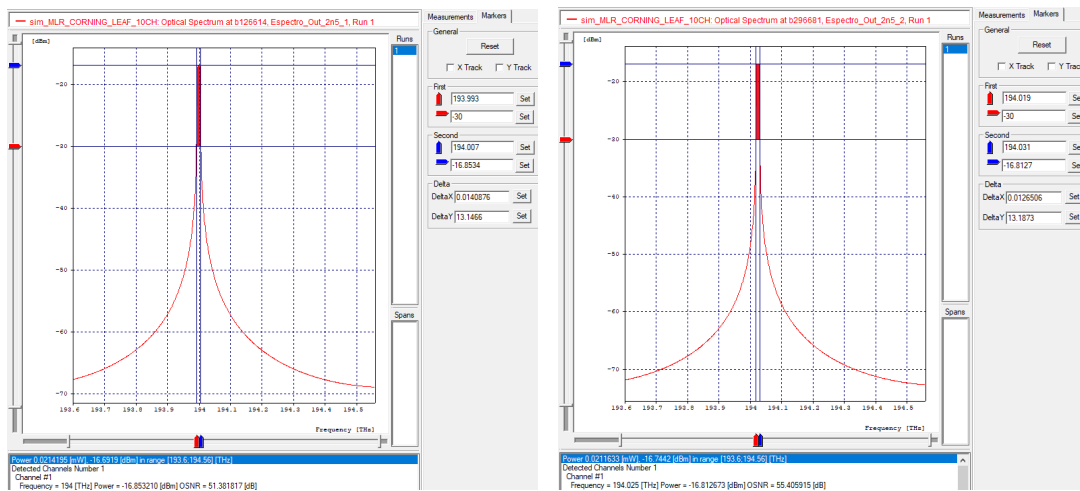
al aumento de BER, OSNR Factor Q y Potencia en el receptor.

Canal	Velocidad de Tx [Gbps]	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q [dB]	OSNR [dB]	OSNR real [dB]	BW ocupado
1	40	-17.9096	0.02275	6.0206	44.6334	5.81381	0.05554
2	10	-24.6938	0.02275	6.0206	49.9166	2.27768	0.01193
3		-24.8531	0.01908	6.4178	49.4554	1.97753	0.01369
4	2.5	-16.6919	$1e^{-40}$	34.3971	51.3818	13.14660	0.01408
5		-16.7442	$1e^{-40}$	31.5450	55.4059	13.1873	0.01265
6		-16.7796	$1e^{-40}$	31.5351	59.9550	13.19200	0.01197
7		-16.6811	$1e^{-40}$	35.4856	55.7088	13.25020	0.01278
8	10	-25.0402	0.01591	6.5314	50.3868	1.86580	0.01294
9		-24.9219	0.02275	6.0206	50.9401	2.08570	0.01183
10	40	-17.9106	0.02275	6.0206	47.0903	5.80185	0.05547

Tabla 3.6: Parámetros OPM para red MLR con 2.5 dBm. De los autores

Para evaluar el impacto de los efectos no lineales tipo Kerr, se emplean mediciones de parámetros cruciales, como la Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR), que permiten identificar la presencia y la intensidad de estos efectos en cada canal, como se refleja en la tabla 3.6. En este contexto, es esencial comprender que a medida que la OSNR aumenta, la relación señal a ruido se fortalece significativamente, esto lleva a que la tasa de error de bits BER sea baja; lo que permite concluir que habrá una baja probabilidad de que se presenten estos fenómenos no lineales.

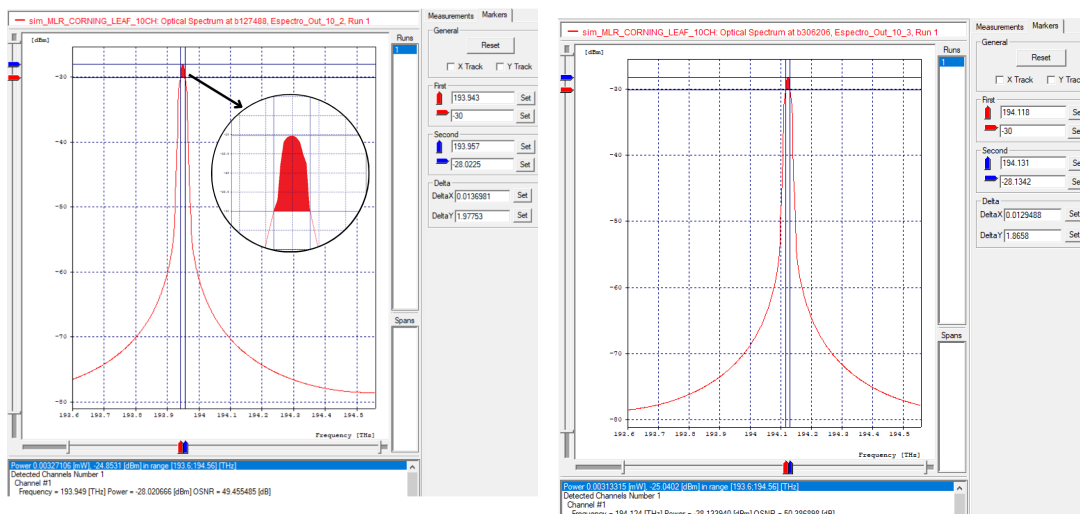
De acuerdo a lo anteriormente expuesto, se procede a realizar un análisis de los parámetros críticos al momento de identificar la presencia de efectos no lineales tipo Kerr dentro del sistema. Inicialmente, para los canales de 2.5 Gbps se puede ver en la figura 3.39, que no hay presencia de algún efecto no lineal, y esto se corrobora al denotar los parámetros para el canal 4, en donde el factor de calidad Q es 34.3971 dB, la tasa de error de bits es $1e^{-40}$; lo que lleva a obtener una muy buena relación señal a ruido óptica OSNR real de 13.1466 dB.



(a) Espectro óptico Canal 4 de 2.5Gbps (b) Espectro óptico Canal 5 de 2.5Gbps

Figura 3.32: Desempeño de canales a 2.5 Gbps

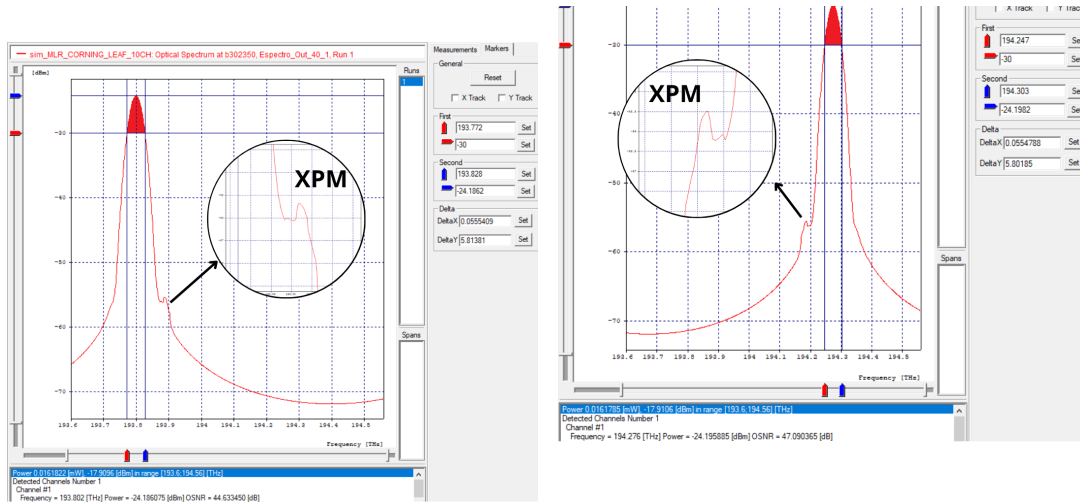
Al igual que para los canales de 2.5 Gbps, se encuentra que para los canales de 10 Gbps, aunque tampoco se presentan deformaciones en su espectro que indiquen presencia de efectos no lineales, al analizar los resultados de sus parámetros de calidad no son del todo concluyentes, ya que para el canal 8 se tiene una BER de 0.01591, un factor Q de 6.5314 dB, que lleva a obtener una OSNR de 4.3737 dB. A nivel general, estos valores podrían indicar que es probable que haya distorsiones que introduzcan efectos no lineales; sin embargo, al realizar una inspección en la figura 3.33, no hay evidencia de la presencia de algún efecto relacionado.



(a) Espectro óptico Canal 2 de 10Gbps (b) Espectro óptico Canal 8 de 10Gbps

Figura 3.33: Desempeño de canales a 10 Gbps

Finalmente, para los canales de 40 Gbps, si es posible identificar la presencia de efectos no lineales tipo Kerr, específicamente el efecto XPM, el cual se encuentra contiguo al canal, en las frecuencias 193.65 y 194.45. Esto se debe principalmente a los valores resultantes en recepción, los cuales son deficientes y degradan la calidad de la señal, un ejemplo claro es el canal 10 (figura 3.34), el cual a pesar de tener una mejor OSNR que los canales de 10 Gbps (8.2922 dB), es el canal que tiene los peores valores para las BER (0.02275) y factor Q (6.0206 dB).



(a) Espectro óptico Canal 1 de 40Gbps (b) Espectro óptico Canal 10 de 40Gbps

Figura 3.34: Desempeño de canales a 40 Gbps

Luego de analizar todos los canales del sistema, se procede a comparar los diagramas del ojo de los casos, en términos de calidad de la señal y la presencia de efectos no lineales.

En el caso de los canales con una velocidad de 40 Gbps, se observa la aparición del efecto no lineal conocido como Intermodulación por Fase Cruzada (XPM). Este fenómeno se atribuye a la alta velocidad y densidad de canales que caracterizan estos sistemas. En consecuencia, es posible que se experimente la presencia de este fenómeno no lineal, lo que puede contribuir al aumento de la Tasa de Error de Bit (BER), como se demostró previamente.

En el mismo sentido, se puede inferir que los canales de 2.5 Gbps, al contar con una mejor BER en comparación a la de los canales de 40 Gbps, obtendrán una mejor calidad de la señal y la capacidad del sistema para transmitir información de manera confiable. Con esto, se concluye que los canales de 2.5 Gbps tienen una mejor representación del diagrama del ojo, como se puede ver en la figura 3.35.

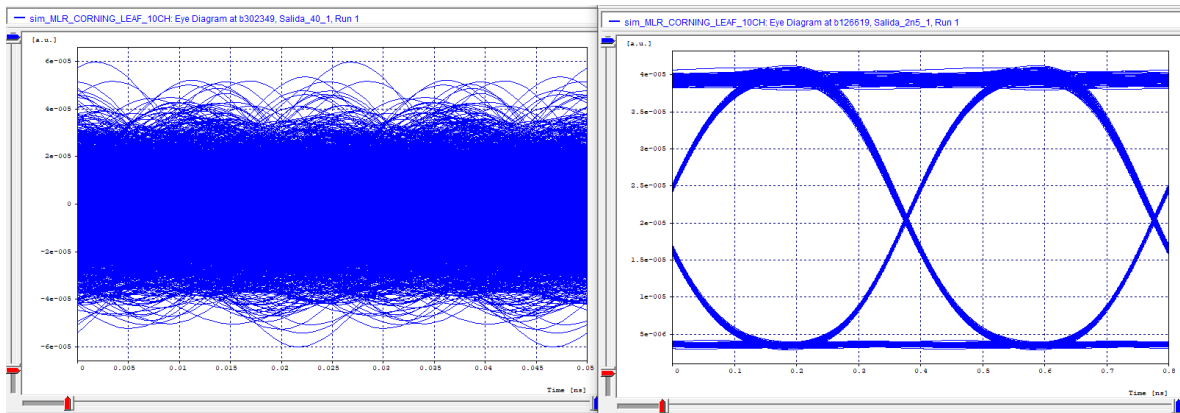


Figura 3.35: Comparación Diagrama de ojo canal 40 Gbps Vs 2.5 Gbps

3.2.3. Análisis para 5 dBm de potencia.

Como se ha observado en situaciones anteriores, se procede a modificar el índice de refracción, seguido de una variación en las potencias de transmisión, especificadas en niveles bajos, medios y altos, como es el caso presente con 5 dBm. La intención de este análisis es esclarecer el comportamiento del sistema, evaluar la intensidad de la Intermodulación de Fase Cruzada (XPM) y determinar si esta variación de parámetros es un factor significativo que influye en la presencia de estos efectos no lineales.

Conforme al estándar ITU-T G.694.1, los sistemas DWDM se distinguen por su operatividad en la banda C y por mantener un espaciamiento entre canales de 100 GHz (equivalente a 0,8 nm) o, en algunos casos, incluso menor, lo que define el ancho de banda total ocupado por un número específico de canales. Esta característica permite a la tecnología DWDM incorporar ocho canales o más dentro del espectro de los 1550 nm.

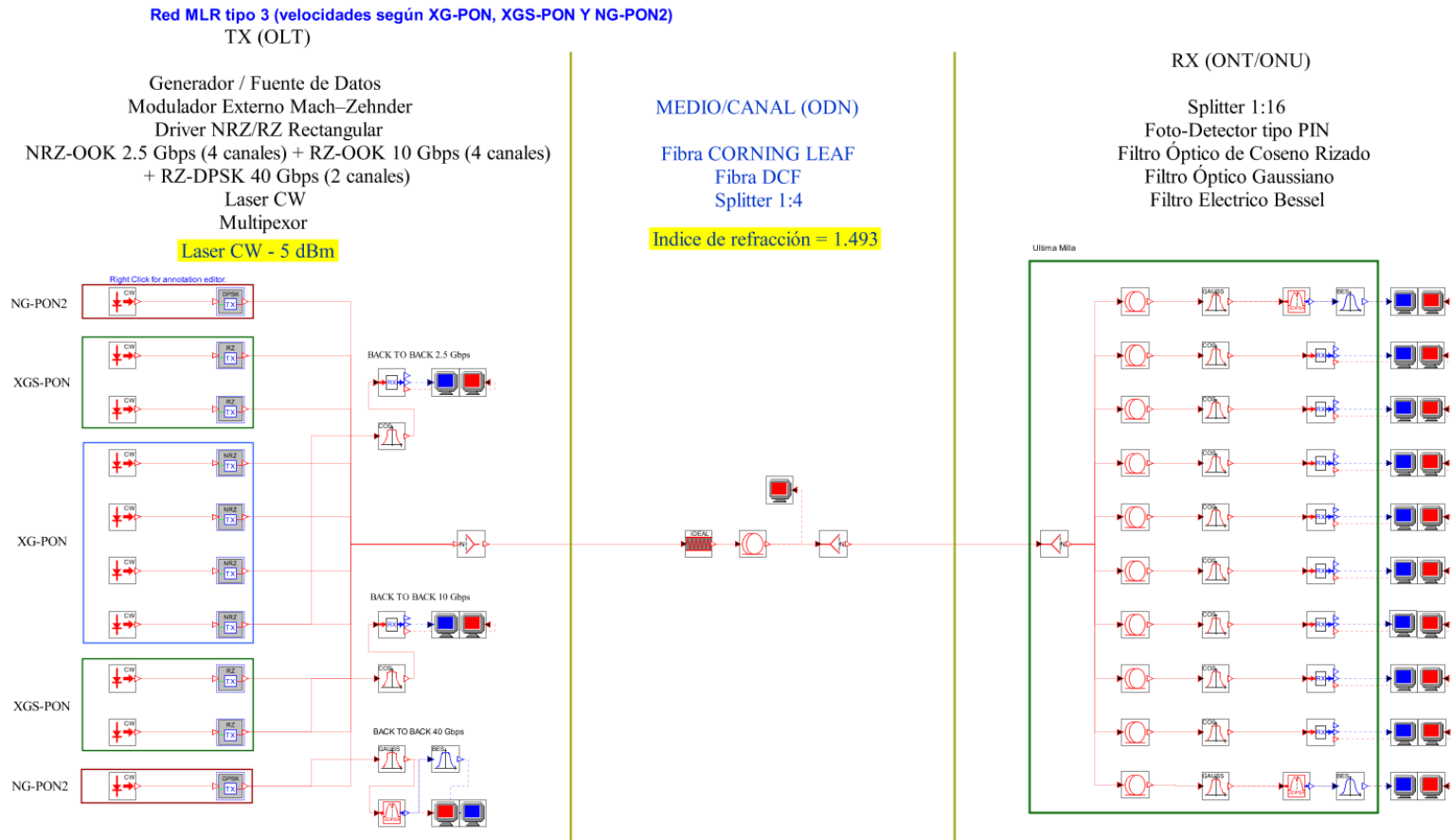


Figura 3.36: Red MLR 10 Canales - Láser CW a 5 dBm - Índice Refracción: 1.493, de los autores.

En este caso particular, se ha elegido configurar el espaciado en la grilla de igual manera que en los dos casos anteriores: entre los canales 1 y 2, se establece un espaciado de 100 GHz; los canales 2, 3 y 4 tienen un espaciado de 50 GHz entre ellos; los canales 4, 5, 6, 7 y 8 están separados por 25 GHz entre sí, y, por último, los canales 9 y 10 tienen un espaciado de 100 GHz, a continuación se presentan los espectros captados en recepción y sus respectivos anchos de banda ocupado a partir del espaciado escogido.

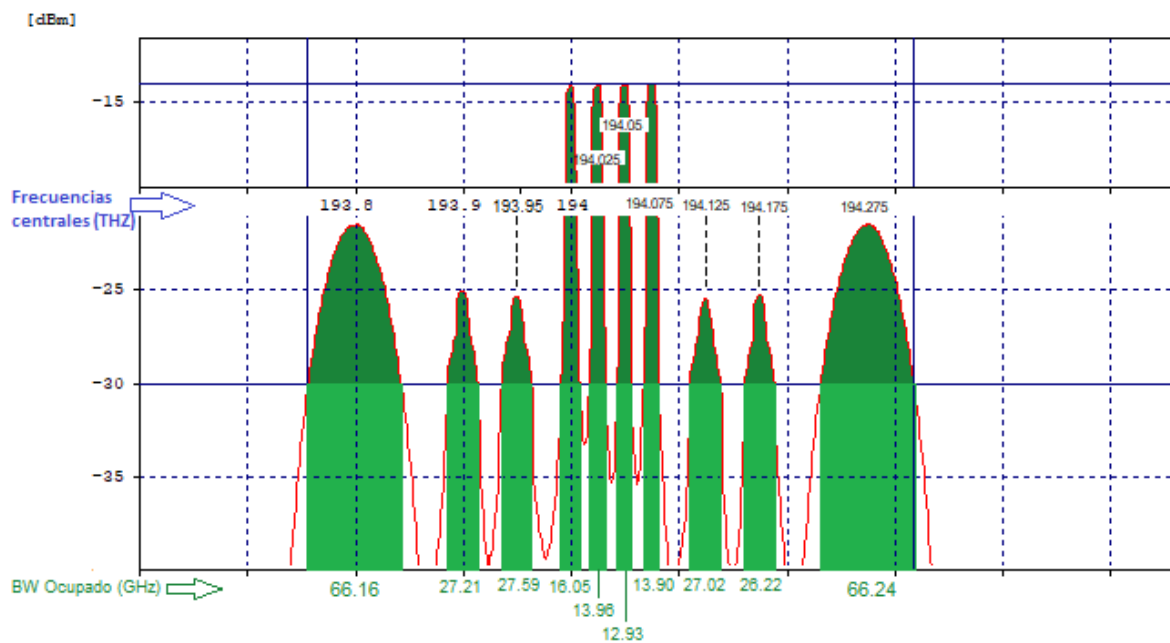


Figura 3.37: Espaciamento de los canales recibidos.

En la imagen 3.38 y en la tabla 3.7 los resultados se mantienen relativamente constantes debido a que el índice de refracción establecido es similar al empleado en el caso anterior. No obstante, al introducir variaciones en el índice de refracción con valores aleatorios tanto por debajo como por encima del valor determinado por el datasheet de esta fibra, se observa que los resultados siguen manteniéndose. Esto sugiere que el índice de refracción no tiene un impacto significativo en los resultados. En contraste, al variar la potencia de transmisión, se aprecian diferencias más notables en los resultados. Esto indica que la potencia de transmisión desempeña un papel crítico en el comportamiento del sistema.

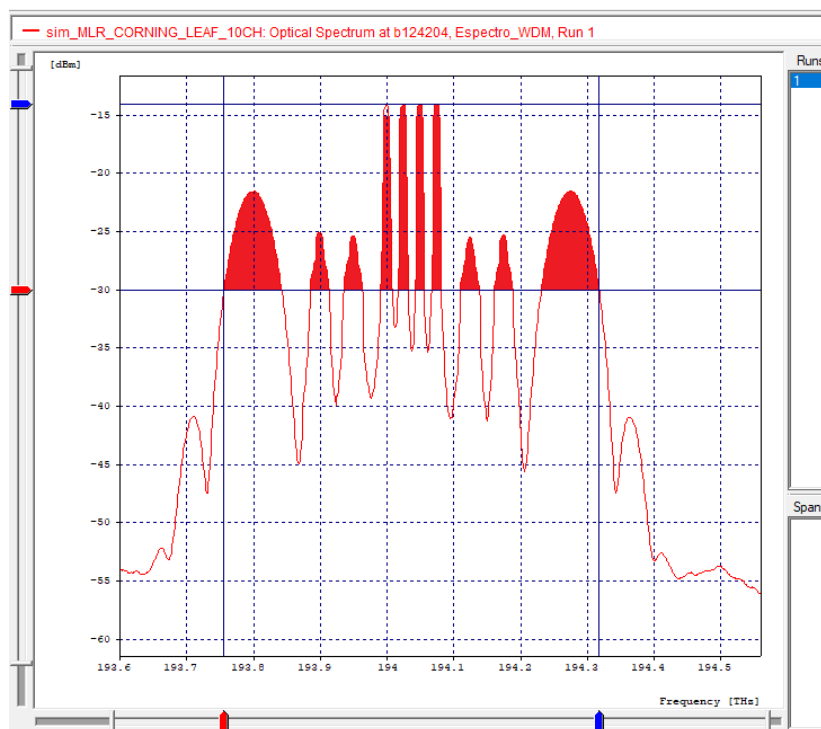


Figura 3.38: Espectro óptico de 10 canales a 5 dBm

La Figura 3.38 muestra el espectro óptico resultante tras recorrer una distancia de 80 kilómetros a través de una fibra óptica para los 10 canales bajo análisis. De este espectro, podemos inferir lo siguiente:

i) En el caso de los canales de 40 Gbps, ocupan un ancho de banda mayor en comparación con los dos escenarios previos. No obstante, aún se mantienen dentro del espaciamiento de 100 GHz, ya que cada canal oscila entre los 66 GHz de ancho de banda ocupado, lo cual es muy parecido a lo experimentado en el caso 1. A pesar de esto, siguen siendo los canales con la calidad más baja de los tres casos, lo que se confirma al observar los valores de la tasa de errores en bits (BER) y el factor de calidad Q, que son del orden de 0.2275 y 6.0206, respectivamente.

ii) Los canales de 10 Gbps continúan exhibiendo el menor valor de Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR) y el ancho de banda ocupado (BW) en recepción, en comparación con los canales adyacentes de 2.5 y 40 Gbps. Esto sugiere que la variación de potencia no beneficia particularmente a esta tasa de transmisión en particular.

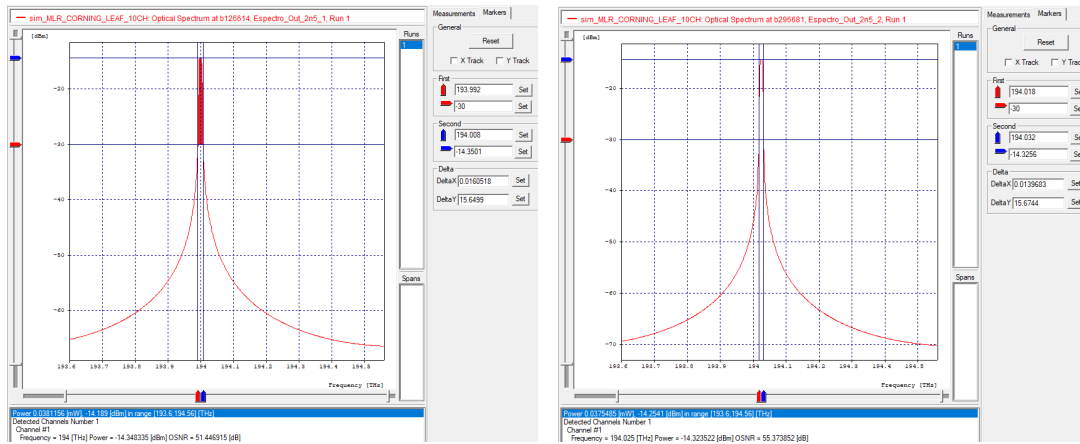
iii) En cuanto a los canales de 2.5 Gbps, son los que ocupan menos ancho de banda, pero mantienen los mejores parámetros de calidad. Los valores de la tasa de errores en bits (BER) son los más bajos en el sistema, y el valor promedio del factor de calidad Q es el más alto en el sistema, lo que se traduce en un mejor nivel de OSNR para estos canales. Ver tabla 3.7

Canal	Velocidad de Tx [Gbps]	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q [dB]	OSNR [dB]	OSNR real [dB]	BW ocupado
1	40	-15.4107	0.02275	6.0206	44.5990	8.2775	0.06616
2	10	-22.1925	0.02275	6.0206	49.8618	4.7688	0.02721
3		-22.3783	0.01967	6.7702	49.4976	4.47086	0.02759
4	2.5	-14.1890	$1e^{-40}$	31.6255	51.4469	15.6499	0.01605
5		-14.2541	$1e^{-40}$	27.3133	55.3738	15.6744	0.01396
6		-14.3161	$1e^{-40}$	27.3178	59.8830	15.6559	0.01293
7		-14.1564	$1e^{-40}$	31.2860	55.7228	15.7559	0.01390
8	10	-22.5309	0.01779	7.0582	50.3767	4.3582	0.02702
9		-22.4625	0.02275	6.0206	50.9360	4.5495	0.02622
10	40	-15.4085	0.02275	6.0206	47.1237	8.3092	0.06624

Tabla 3.7: Parámetros OPM para red MLR con 5 dBm. De los autores

Para evaluar el impacto de los efectos no lineales tipo Kerr en los canales ópticos, se emplean mediciones de parámetros cruciales, como la Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR), que permiten identificar la presencia y la intensidad de los efectos no lineales en cada canal, como se refleja en la tabla 3.7. En este contexto, es esencial comprender que a medida que la OSNR aumenta, la relación señal a ruido se fortalece significativamente.

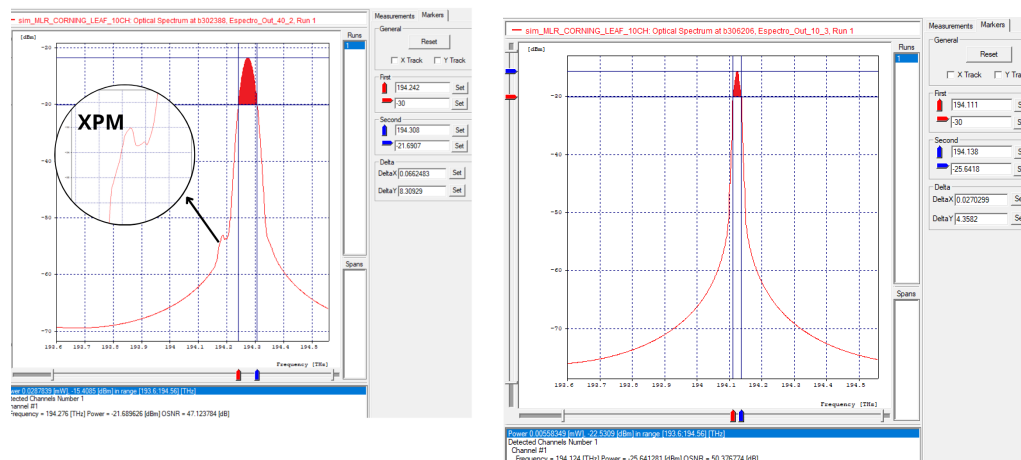
De acuerdo a lo anteriormente expuesto, se procede a realizar un análisis de los parámetros críticos al momento de identificar la presencia de efectos no lineales tipo Kerr dentro del sistema. Inicialmente, para los canales de 2.5 Gbps se puede ver en la figura 3.39, que no hay presencia de algún efecto no lineal, y esto se corrobora al denotar los parámetros para el canal 4, en donde el factor de calidad Q es 31.6255 dB, la tasa de error de bits es $1e^{-40}$; lo que lleva a obtener una muy buena relación señal a ruido óptica OSNR real de 15.64 dB.



(a) Espectro óptico Canal 4 de 2.5Gbps (b) Espectro óptico Canal 5 de 2.5Gbps

Figura 3.39: Desempeño de canales a 2.5 Gbps

Tanto para los canales de 2.5 Gbps como para los de 10 Gbps, no se detectan deformaciones en sus espectros que sugieran la presencia de efectos no lineales. Al examinar los parámetros de calidad de estos canales, se observa que, para el canal 8 de 10 Gbps, la Tasa de Error de Bit (BER) es de 0.01779, el factor Q es de 7.0582 dB y la Relación Señal a Ruido Óptico real (OSNR) es de 4.3582 (la más baja del sistema). Aunque estos valores podrían indicar posibles distorsiones que generen efectos no lineales, una revisión detallada en la Figura 3.40 no revela evidencia de la presencia de algún efecto relacionado.

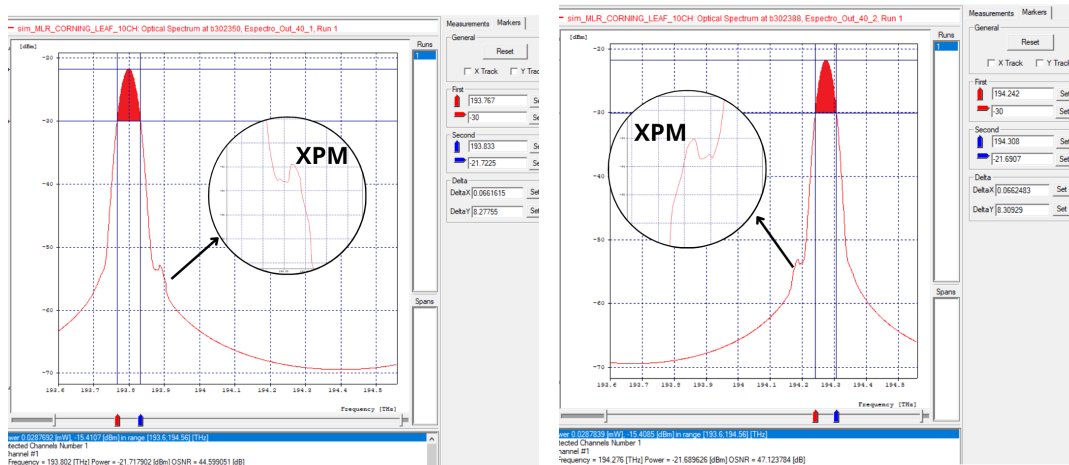


(a) Espectro óptico Canal 2 de 10Gbps (b) Espectro óptico Canal 8 de 10Gbps

Figura 3.40: Desempeño de canales a 10 Gbps

Finalmente, en el caso de los canales de 40 Gbps, se puede identificar la presencia de efectos no lineales del tipo Kerr, específicamente el efecto XPM, que aparece adyacente al canal en las frecuencias 193.65 y 194.45, como se muestra en la Figura 1.17. Esto se

debe principalmente a los valores deficientes que se obtienen en recepción, los cuales degradan la calidad de la señal. Un ejemplo claro de esto es el canal 10 (ver Figura 3.41), que, a pesar de tener una mejor Relación Señal a Ruido Óptico (OSNR) que los canales de 10 Gbps (8.3092 dB), presenta las peores tasas de Error de Bit (BER) (0.02275) y el factor Q más bajo (6.0206 dB). Este fenómeno es similar al observado en el primer caso mencionado anteriormente.



(a) Espectro óptico Canal 1 de 40Gbps (b) Espectro óptico Canal 10 de 40Gbps

Figura 3.41: Desempeño de canales a 40 Gbps

Después de evaluar todos los canales del sistema, se procede a comparar los diagramas del ojo correspondientes a los casos de mejor y peor calidad de señal, considerando también la presencia de efectos no lineales.

En el caso de los canales con una velocidad de 40 Gbps, surge el fenómeno no lineal conocido como Intermodulación por Fase Cruzada (XPM), atribuido a la alta velocidad y densidad de canales que caracterizan este tipo de sistemas. Esto indica la posibilidad de experimentar este fenómeno no lineal, lo cual puede contribuir al aumento de la Tasa de Error de Bit (BER), tal como se demostró previamente.

En el mismo sentido, se puede inferir que los canales de 2.5 Gbps, al contar con una mejor BER en comparación a la de los canales de 40 Gbps, obtendrán una mejor calidad de la señal y la capacidad del sistema para transmitir información de manera confiable. Con esto, se concluye que los canales de 2.5 Gbps tienen una mejor representación del diagrama del ojo, como se puede ver en la figura 3.42.

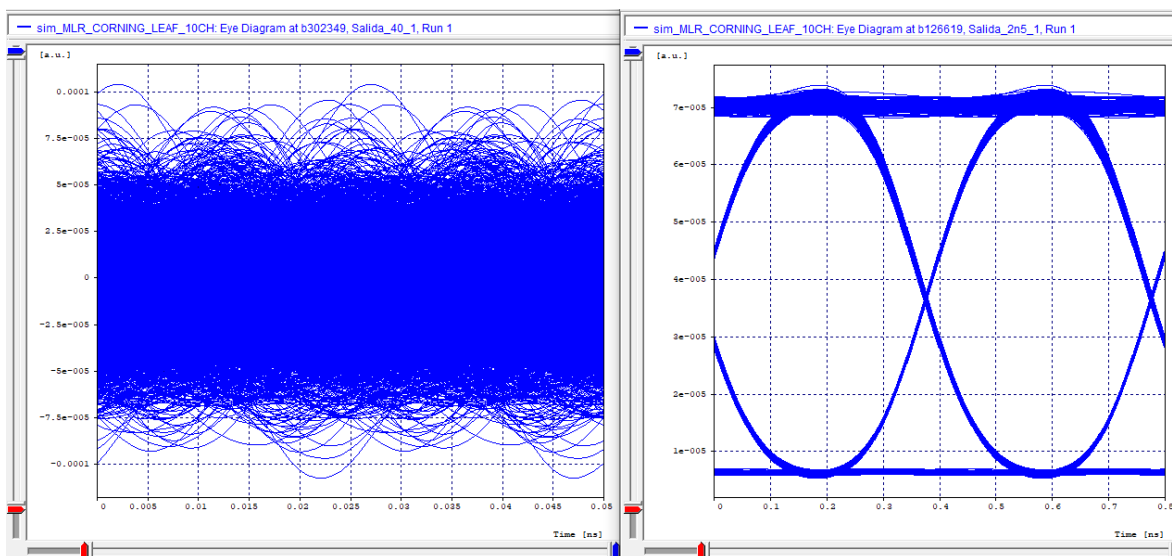


Figura 3.42: Comparación Diagrama de ojo canal 40 Gbps vs 2.5 Gbps

3.2.4. Variación y Análisis para el caso con mejores resultados 5 dBm

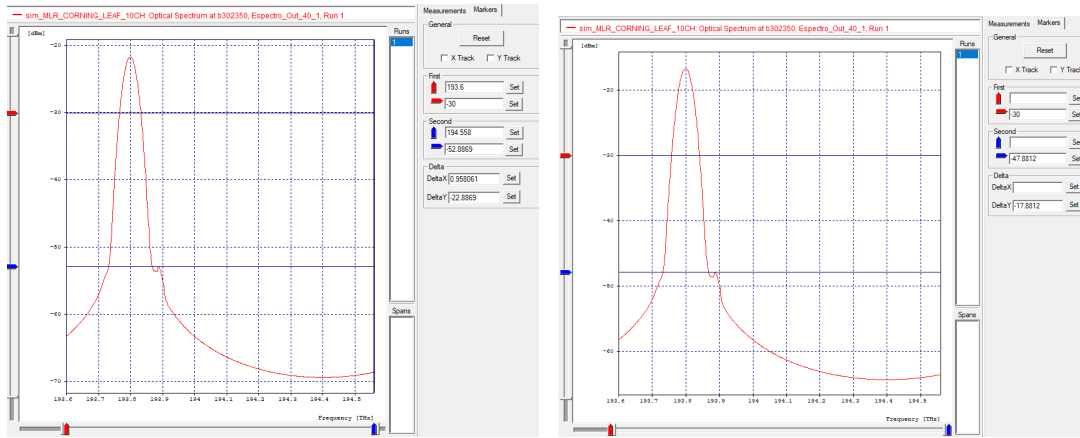
En esta situación, la decisión de reemplazar la fibra óptica en el sistema de comunicación con una fibra Corning Leaf, que tiene un índice de refracción más bajo en comparación con la fibra óptica Lucent TrueWave, ha resultado en mejoras en los parámetros ópticos clave, como la Tasa de Error de Bits (BER), el Factor Q y la Relación Señal-Ruido Óptica (OSNR). Estas mejoras son especialmente notables cuando se considera una potencia de 5 dBm, como se muestra en la siguiente figura.

CASO	Canal	Velocidad de Tx	BER	Factor Q [dB]	OSNR real [dB]	BW ocupado
0 dBm	3	10 Gbps	0.02205	6.0206	-0.4914	-
2.5 dBm	3	10 Gbps	0.01908	6.4178	1.97753	0.01369
5 dBm	3	10 Gbps	0.01967	6.7702	4.47086	0.02759

Tabla 3.8: Parámetros del canal 3 para 2.5 dBm y 5 dBm. De los autores

Al analizar el espectro óptico de los 10 canales a 5 dBm, se puede notar una similitud en el comportamiento y la intensidad de la modulación por fase cruzada continua (XPM) con respecto al caso 1. A pesar de que el índice de refracción desempeña un papel importante en la detección de este fenómeno, no es el factor determinante en el sistema de comunicación. El índice de refracción de la fibra óptica es importante en términos de cómo la luz se propaga a través de la fibra, pero su influencia en la XPM es relativamente menor en comparación con la que tiene la potencia de transmisión

y la velocidad del Canal. La XPM ocurre debido a la interacción no lineal entre las señales ópticas en la fibra, y esta interacción es más pronunciada cuando las señales son más intensas. La idea de asumir que las señales que se propagan por la fibra óptica se comportan linealmente, es una aproximación adecuada cuando se opera a niveles de potencia de unos pocos mW y a velocidades de transmisión que no superen los 2.5 Gbps. Sin embargo, a velocidades superiores como 10 Gbps o potencias más altas, se generan en las señales fenómenos que hacen que la fibra óptica se comporte no linealmente [40]



(a) Espectro con potencia Tx 5 dBm (b) Espectro con potencia Tx 10 dBm

Figura 3.43: Canal 1 con velocidad de 40 Gbps

En la figura 3.43, se puede evidenciar la intensidad del efecto no lineal correspondiente a la variación en potencia de transmisión. Si se observa el espectro para el canal 1 con 5 dBm de potencia (figura 3.43a), se obtiene un valor de -22.8869 dBm de diferencia con respecto a la sensibilidad del receptor (-30 dBm), mientras que, para el mismo canal 1, pero con 10 dBm de potencia (figura 3.43b), se obtiene un valor mayor de -47.8812 dBm de diferencia con respecto a la sensibilidad del receptor. Estos resultados respaldan la premisa previa de que la potencia tiene mayor influencia en la presencia del efecto XPM en comparación con la variación del índice de refracción observado en la figura 3.23. Finalmente, se puede concluir que, si se desea disminuir estos efectos, en primera instancia es fundamental gestionar adecuadamente el parámetro de potencia de transmisión, al igual que el índice de refracción y la velocidad de cada canal.

Nota de autor:

En este capítulo, se desarrolló los dos casos de estudio previamente mencionados en el capítulo 2, donde se establece el modelo de red óptica MLR-DWDM, que incorpora velocidades de transmisión de 2.5, 10 y 40 Gbps, junto con sus respectivos formatos de modulación. Este enfoque está en línea con el cumplimiento del segundo objetivo específico, que se centra en la caracterización de diversas variantes de la arquitectura de red MLR-GPON, relacionadas con la intensidad de la onda incidente y el índice

de refracción del medio, que permite llevar a cabo una evaluación detallada del rendimiento de este modelo de red en relación con diferentes valores de los parámetros mencionados. En última instancia, se realiza un análisis a nivel espectral del sistema de comunicación óptica para determinar la presencia y la intensidad de los efectos no lineales de tipo Kerr en el modelo de red MLR implementado . Esto se logra a través de la evaluación y comparación de los parámetros críticos del sistema en distintos casos de estudio. Cumpliendo con el tercer objetivo específico que se ha definido para el presente trabajo de grado.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo de investigación, se llevó a cabo un análisis del rendimiento de un sistema de comunicaciones ópticas múltiporadora (MLR-DWDM) frente a los efectos no lineales de tipo Kerr. Para este propósito, se implementaron múltiples velocidades de transmisión como 2.5, 10 y 40 Gbps, a lo largo de 10 canales, dentro de una arquitectura de última milla FTTx.

En este trabajo de investigación, se llevaron a cabo diversas modificaciones en los parámetros de potencia de transmisión e índice de refracción en la fibra óptica. Estas variaciones se dividieron en dos casos de estudio claramente definidos en el Capítulo II, lo que permitió un análisis detallado de la intensidad de los efectos no lineales de tipo Kerr y su relación con parámetros clave de rendimiento, como la Tasa de Error de Bits (BER), el Factor Q y la Relación Señal-Ruido Óptica (OSNR). Esto se logró a través de la evaluación del comportamiento del espectro óptico en cada canal.

En este capítulo, se presentan conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros relacionados, con respecto a los aspectos más importantes que aportaron en la realización de los objetivos propuestos.

4.1. CONCLUSIONES

Con el modelo de red óptica tipo MLR definido y realizado su respectivo análisis, se resume que:

4.1.1. Conclusiones sobre los resultados

- En los canales de 10 Gbps, en ambos casos, cuando se establece una potencia de transmisión de 0 dBm, no se detecta el espectro óptico en recepción. Esto lleva a la conclusión de que el sistema no es factible para el intercambio de datos con una potencia de transmisión de 0 dBm, a diferencia de los casos en los que el sistema tiene una potencia de 2.5 y 5 dBm, donde la transferencia de datos es viable.
- Para todos los casos de estudio, los canales de 40 Gbps fueron los que tuvieron menor nivel de desempeño en sus parámetros ópticos, como por ejemplo la OSNR real, que oscila entre los 47.08 y 47.1237 dB respectivamente, en comparación

con el mejor canal de 2.5 Gbps, que presentó una OSNR real entre los 59.8830 y 59.9614 dB.

- En el sistema de comunicación óptica con 10 canales, donde cada canal opera a velocidades de datos diversas (2.5 Gbps, 10 Gbps y 40 Gbps) y con una potencia de 5 dBm, la observación del fenómeno no lineal XPM en el canal de 40 Gbps tiende a presentarse con mayor intensidad en comparación con los demás canales con velocidades de 10 y 2.5 Gbps.
- La influencia del índice de refracción del material de la fibra óptica en los efectos no lineales tipo Kerr es generalmente menos significativa en comparación con otros factores clave como la potencia de transmisión y la velocidad del canal.
- Los efectos no lineales tipo Kerr se intensifican principalmente debido a la variación en la potencia incidente, ya que a medida que esta aumenta, los efectos no lineales se vuelven más notorios. Si la intensidad alcanza niveles críticos, incluso en medios con un índice de refracción constante, los efectos no lineales tipo Kerr pueden ser significativos debido a la dependencia del índice de refracción con la intensidad de la luz.
- El sistema exhibe un mejor rendimiento cuando la potencia es más alta, sin incurrir en penalizaciones de potencia, lo que resulta en una apertura más definida de los diagramas del ojo.
- A pesar de que los canales de 40 Gbps experimentan efectos no lineales, como la modulación por fase cruzada (XPM), con mayor intensidad, las velocidades más altas permiten una utilización más eficiente del espectro disponible, lo que resulta fundamental para aplicaciones que demandan un alto ancho de banda, ya que facilita la transmisión de una mayor cantidad de datos en un período de tiempo dado.

Una vez expuestas las conclusiones de esta investigación, que permitieron analizar la influencia de los efectos no lineales tipo Kerr en una red óptica MLR-DWDM dentro de una arquitectura de banda ancha FTTx, se presenta la tabla 4.1. En ella se detallan los esquemas de simulación propuestos, incluyendo parámetros como el número de canales y usuarios, el índice de refracción, la potencia de transmisión, la velocidad de transmisión por canal, la distancia del enlace y la compensación. Estos hallazgos han resultado cruciales para comprender y analizar el rendimiento de la red en cuestión.

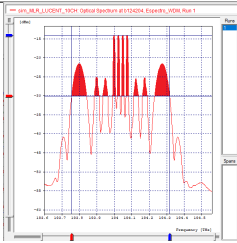
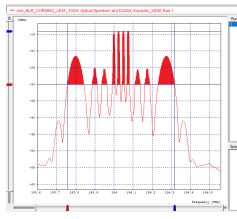
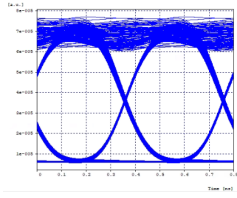
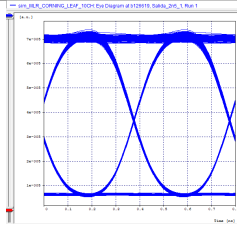
Características	Red MLR - Lucent True Wave	Red MLR - Corning Leaf
Número de canales	10	10
Velocidad de transmisión	2.5/10/40 Gbps	2.5/10/40 Gbps
Potencia de transmisión	0/2.5/5 dBm	0/2.5/5 dBm
Índice de refracción	1.470	1.4692
Distancia de transmisión	80 Km	80 Km
Máxima distancia alcanzada	90 Km	90 Km
Compensación de dispersión	100 %	100 %
Nivel de complejidad	alta	alta
Espectro de señal		
Diagrama del ojo		

Tabla 4.1: Características de los modelos de red. De los autores

4.1.2. Conclusiones sobre la investigación

- La observación continua del fenómeno no lineal XPM en el canal de 40 Gbps puede explicarse por la interacción no lineal entre canales adyacentes: esto se debe en gran medida a la alta potencia y ocupación espectral de los canales de 40 Gbps
- La XPM se manifiesta cuando las señales próximas en longitud de onda interactúan no linealmente debido a las variaciones en la intensidad de cada señal: en este contexto, es más probable que se observe XPM entre canales que se superponen parcialmente en el espectro, como los canales de 10 Gbps y 40 Gbps, debido a

su proximidad en longitud de onda, lo que facilita la interacción no lineal. Mientras tanto, el canal a 2.5 Gbps, al utilizar una longitud de onda diferente y operar a una velocidad más baja, no experimenta un efecto de XPM.

- La interacción no lineal en sistemas de comunicación multiportadora es un aspecto crítico al implementar una arquitectura de red óptica MLR: Esto lleva a la tarea de definir cuidadosamente las características y parámetros del sistema, incluyendo el número de canales y la configuración de velocidades de operación, entre otros aspectos. Este proceso tiene como objetivo minimizar los efectos no deseados en canales de alta velocidad.
- La intensidad de luz incidente, se considera un parámetro crucial que afecta directamente al sistema, ya que si no se controla cuidadosamente puede propiciar la presencia los efectos no deseados de la no linealidad tipo Kerr: Especialmente en aplicaciones de alta potencia y comunicaciones ópticas de alta velocidad, donde el diseño y la gestión minuciosa de la intensidad de la potencia son fundamentales para garantizar el rendimiento óptimo del sistema.
- Los efectos no lineales tipo Kerr son más sensibles a la potencia de luz incidente, esto se debe a que la intensidad de luz tiene un impacto cuadrático en estos fenómenos: Lo que significa que, pequeños cambios en la potencia de transmisión pueden generar efectos más notorios.
- En la práctica, se utilizan materiales y fibras ópticas diseñados para minimizar la variación del índice de refracción con la intensidad, y se aplican técnicas de mitigación. La gestión adecuada de la potencia de la luz y la velocidad del canal es fundamental, ya que ambas están directamente relacionadas con la intensidad de la señal óptica, y a medida que aumentan, los efectos no lineales tipo Kerr se hacen más evidentes, lo que hace que el control de estos factores sea esencial para garantizar un rendimiento óptimo en sistemas de comunicación óptica.
- Las variaciones del índice de refracción entre las fibras del mercado son mínimas y controladas por los fabricantes: Esto se hace con el propósito de asegurar la conformidad con los estándares de la ITU-T y reducir la incertidumbre relacionada con la influencia de este parámetro en los efectos no lineales de tipo Kerr.
- El fenómeno de automodulación de fase (SPM) no se observa en ninguno de los casos analizados: Esto se atribuye a la implementación de medidas destinadas a mitigar este tipo de efectos en la red, tales como la gestión cuidadosa de la potencia de la señal y el uso de técnicas avanzadas de modulación en todos los casos de estudio. Estas estrategias contribuyeron a reducir la no linealidad en el medio, evitando así que la fase de la onda óptica sea modulada por la propia señal óptica.
- El fenómeno de Mezcla de Cuatro Ondas (FWM) no se observa en ninguno de los casos analizados: Esto se debe a que para la red implementada se utilizó una grilla

suficientemente espaciada en frecuencia, lo cual contribuyó a que cada uno de los canales tuviera menos probabilidad de que sus señales ópticas interactúen entre sí mientras viajan a través de la fibra evitando que puedan mezclarse y generar nuevas frecuencias.

Por lo anterior, y respondiendo a la pregunta de investigación ¿Cómo se desempeña un Sistema de Comunicaciones Óptico Multiportadora de tipo MLR-GPON frente a fenómenos causados por el efecto Kerr? Se concluye que, el buen desempeño de un sistema de comunicaciones Óptico Multiportadora de tipo MLR-GPON frente a fenómenos causados por el efecto Kerr, depende directamente de características fundamentales como: la potencia de transmisión idónea, dado que si se infringen las penalidades de potencia se incurre en el error de amplificar también fenómenos no lineales no deseados. Los esquemas de modulación acertados, ya que por medio de su uso se puede optimizar la eficiencia espectral, lo que permite transmitir más información en el mismo ancho de banda. Esto reduce la necesidad de operar a altas velocidades y, por lo tanto, minimiza la probabilidad de efectos no lineales. El adecuado espaciamiento de frecuencia en la grilla, porque se minimiza la probabilidad de interferencia entre las señales vecinas, lo que permite distribuir las longitudes de onda y controlar la dispersión cromática, la cual es un factor que contribuye a los efectos no lineales. Y la correcta elección de las velocidades para cada canal, esto se debe a que permite optimizar la eficiencia espectral, lo que posibilita transmitir más información en el mismo ancho de banda.

4.2. RECOMENDACIONES

Para el análisis del desempeño de un sistema de comunicaciones óptico multiportadora frente a los fenómenos causados por el efecto Kerr, es fundamental tener en cuenta ciertas recomendaciones que faciliten la obtención y comprensión de los resultados. A continuación, se presentan algunas de estas recomendaciones:

- Realizar una recopilación sólida de fundamentos teóricos es crucial para comprender las causas e influencias de los efectos no lineales tipo Kerr en sistemas ópticos MLR. Esto permitirá categorizar los parámetros de la red que podrían tanto contribuir como mitigar la presencia de estos efectos.
- La elección y definición de elementos cruciales, como la cantidad de canales, potencia, tipo de modulación y velocidad del canal, entre otras características fundamentales, son esenciales para la configuración integral de una red de comunicación óptica. Estos aspectos no solo son relevantes para establecer un sistema, sino que también desempeñan un papel fundamental en el análisis del rendimiento a lo largo de la simulación. La cuidadosa determinación de estos parámetros influye directamente en el comportamiento de la red y presencia de efectos no lineales tipo Kerr
- Es crucial definir tanto el entorno de simulación como el alcance de la investigación. Esta medida es esencial para establecer con precisión los casos de estu-

dio, permitiendo realizar variaciones controladas y coherentes en los parámetros predefinidos. Dado que este enfoque estratégico se vuelve fundamental, ya que proporciona la base necesaria para obtener valores significativos al analizar el desempeño de la red.

- Bajo fundamentos teórico-técnicos y considerando las limitaciones en el entorno de simulación, se debe definir las variaciones para los parámetros establecidos en cada caso de estudio. Este enfoque se lleva a cabo con precisión, asegurando coherencia y control en las modificaciones, a pesar de las restricciones del entorno simulado, especialmente en relación con la fibra óptica disponible dentro del software seleccionado. Este proceso estratégico, respaldado por la teoría y la técnica, permite abordar de manera efectiva las limitaciones y obtener resultados significativos en cada análisis de desempeño de la red.
- Asegurar la organización de los datos recolectados durante cada simulación es fundamental para simplificar la comparación de cada caso de estudio. Esto proporciona una visión más clara de los resultados obtenidos y, en este contexto, permite realizar un análisis completo del rendimiento del sistema frente a los efectos Kerr.
- Llevar a cabo un análisis del rendimiento espectral de cada caso de estudio es importante para comparar los diagramas de ojo y los espectros ópticos que definen el rendimiento de la red frente a cada variación de los parámetros críticos. Esto permite llegar a conclusiones más sólidas sobre cómo los efectos Kerr impactan en la señal óptica y, por ende, en el desempeño general del sistema.

4.3. TRABAJOS FUTUROS

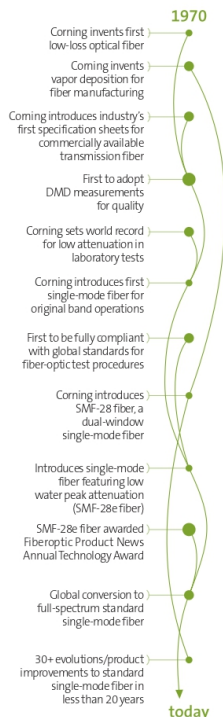
A través de cada una de las etapas de desarrollo del presente trabajo de grado, fue posible identificar nuevas investigaciones frente al desempeño de un sistema de comunicación óptico multiportadora frente a los fenómenos causados por el efecto Kerr, tales como:

- Analizar la presencia e intensidad de los efectos no lineales tipo Kerr haciendo uso de amplificadores sobre una red óptica MLR
- Analizar el desempeño de una red óptica MLR frente a fenómenos Kerr, cuando se varía la distancia del enlace en condiciones extremas.
- Analizar el impacto de los efectos Kerr ante el uso de diferentes formatos de modulación en una red óptica MLR-DWDM.
- Estudio de factibilidad Técnico-Económica para la implementación de una red MLR-DWDM con diferentes configuraciones de potencia de transmisión e índice de refracción, con el objetivo obtener una red que mitigue los efectos tipo Kerr.

ANEXOS

.1. Anexo A: Datasheet de Fibra óptica Corning SMF-28e

Corning® SMF-28e® Optical Fiber Product Information



Evolving Networks Now

At Corning Optical Fiber, we are continually pushing single-mode fiber to new performance levels. Building on our leadership position in the optical fiber industry, Corning is evolving our already formidable products to meet customer requirements like never before. As the first manufacturer to upgrade standard single-mode fiber worldwide, we're providing our customers with greater value today and in the future. Corning® SMF-28e® optical fiber is:

- * Corning's standard single-mode fiber offering, delivering optimized capability, network design flexibility and confidence in long-term performance
- * The world's most widely demanded full-spectrum fiber
- * In compliance with or exceeding the industry's most stringent requirements, including:
 - ITU-T G.652 (Categories A, B, C & D)
 - IEC Specifications 60793-2-50 Type B1.3
 - TIA/EIA 492-CAAB
 - Telcordia's GR-20
 - ISO 11801 OS2
- * The industry leader in comprehensive standard single-mode fiber specifications

As Corning's premier standard single-mode fiber, SMF-28e fiber is one in a long line of optical innovations. Corning SMF-28e, an ITU-T G.652.D-compliant optical fiber, is expanding the capability of the world's most dynamic metropolitan and access networks.

PI1344

ISSUED: DECEMBER 2007
SUPERSEDES: MAY 2007

ISO 9001 REGISTERED



Building on a Solid Foundation

Corning SMF-28e fiber has the same reliability, splicing performance and easily strippable coating that customers have trusted in Corning® SMF-28® fiber, the long-standing industry benchmark for quality and performance. SMF-28e fiber offers enhanced capabilities and specifications, while providing full compatibility and interoperability with legacy standard single-mode networks.

Our 30 years of experience are reflected in this evolution of standard single-mode fiber, which not only meets and exceeds the highest industry standards, but also provides an excellent combination of optical, environmental, dimensional and mechanical specifications.

Confidence for Today and the Future

SMF-28e fiber is optimized for metropolitan and access networks that support all broadband applications. SMF-28e fiber has been a qualified product offering since 2001 and has been successfully deployed in communications networks worldwide, proving its performance capabilities in diverse applications.

As the ideal fiber choice for rapidly growing and dynamically changing metropolitan and access networks, SMF-28e fiber provides immediate value to the customer. It is one of the easiest fibers to handle and install because of its world-class geometry, CPC® coating technology and bending specifications. Additionally, its full-spectrum capability enables flexible network designs, increases fiber capacity and prepares network infrastructures for emerging technologies and architectures.

Corning® Optical Fiber – The Measure of Trust

Corning's Service Advantage

Corning Optical Fiber delivers the world's most comprehensive package of innovative products and services, including:

- * Worldwide sales support and door-to-door customer service
- * Full range of fibers and special order capabilities
- * Specialized support from technical experts
- * Extensive fiber delivery capabilities with proven success rates
- * Real-time, Web-based customer information
- * Dedicated account support for our long-term supply customers
- * Fiber support services and technical information for end-customers

At Corning Optical Fiber, we strive to provide the best possible customer service and technical support – before, during and after the sale. As a customer, you'll benefit from our established and extensive support infrastructure that's ready to meet your specific needs.

Corning's Product Advantage

Our enhanced, dual acrylate CPC® coatings provide excellent protection. Designed to be mechanically stripped, with an outside diameter of 245 µm, they are optimized for many single- and multi-fiber cable designs, including loose tube, ribbon, slotted core and tight buffer cables.

Corning is committed to product excellence and meeting the evolving needs of our customers. As updates to fiber characteristics or performance specifications become available, they will be posted on the Corning Optical Fiber website at www.corning.com/opticalfiber

Optical Specifications

Fiber Attenuation

Maximum Attenuation

Wavelength (nm)	Maximum Value* (dB/km)
1310	0.33 – 0.35
1383**	0.31 – 0.35
1550	0.19 – 0.20
1625	0.20 – 0.23

*Maximum specified attenuation value available within the stated ranges.

**Attenuation values at this wavelength represent post-hydrogen aging performance.

Alternate attenuation offerings available upon request.

Attenuation vs. Wavelength

Range (nm)	Ref. λ (nm)	Max. α Difference (dB/km)
1285 – 1330	1310	0.03
1525 – 1575	1550	0.02

The attenuation in a given wavelength range does not exceed the attenuation of the reference wavelength (λ) by more than the value α .

Macrobend Loss

Mandrel Diameter (mm)	Number of Turns	Wavelength (nm)	Induced Attenuation* (dB)
32	1	1550	≤ 0.05
50	100	1310	≤ 0.05
50	100	1550	≤ 0.05
60	100	1625	≤ 0.05

*The induced attenuation due to fiber wrapped around a mandrel of a specified diameter.

Point Discontinuity

Wavelength (nm)	Point Discontinuity (dB)
1310	≤ 0.05
1550	≤ 0.05

Cable Cutoff Wavelength (λ_{ccf})

$\lambda_{ccf} \leq 1260$ nm

Mode-Field Diameter

Wavelength (nm)	MFD (μm)
1310	9.2 ± 0.4
1550	10.4 ± 0.5

Dispersion

Wavelength (nm)	Dispersion Value [ps/(nm \cdot km)]
1550	≤ 18.0
1625	≤ 22.0

Zero Dispersion Wavelength (λ_0): $1302 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1322 \text{ nm}$

Zero Dispersion Slope (S_0): $\leq 0.089 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$

Polarization Mode Dispersion (PMD)

	Value (ps/ $\sqrt{\text{km}}$)
PMD Link Design Value	$\leq 0.06^*$
Maximum Individual Fiber	≤ 0.2

*Complies with IEC 60794-3: 2001, Section 5.5, Method 1, (m = 20, Q = 0.01%), September 2001.

The PMD link design value is a term used to describe the PMD of concatenated lengths of fiber (also known as PMD_Q). This value represents a statistical upper limit for total link PMD. Individual PMD values may change when fiber is cabled. Corning's fiber specification supports network design requirements for a 0.20 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ maximum PMD.

Dimensional Specifications

Glass Geometry

Fiber Curl	≥ 4.0 m radius of curvature
Cladding Diameter	$125.0 \pm 0.7 \mu\text{m}$
Core-Clad Concentricity	$\leq 0.5 \mu\text{m}$
Cladding Non-Circularity	$\leq 0.7\%$

Coating Geometry

Coating Diameter	$245 \pm 5 \mu\text{m}$
Coating-Cladding Concentricity	$< 12 \mu\text{m}$

Environmental Specifications

Environmental Test	Test Condition	Induced Attenuation 1310 nm, 1550 nm & 1625 nm (dB/km)
Temperature Dependence	-60°C to +85°C*	≤ 0.05
Temperature Humidity Cycling	-10°C to +85°C* up to 98% RH	≤ 0.05
Water Immersion	$23 \pm 2^\circ\text{C}$	≤ 0.05
Heat Aging	$85 \pm 2^\circ\text{C}^*$	≤ 0.05
Damp Heat	85°C at 85% RH	≤ 0.05

*Reference temperature = +23°C

Operating Temperature Range: -60°C to +85°C

How to Order

Contact your sales representative,
or call the Optical Fiber Customer
Service Department:
Ph: 607-248-2000 (U.S. and Canada)
+44-1244-287-437 (Europe)
Email: opticalfibers@corning.com
Please specify the fiber type, attenuation
and quantity when ordering.

Mechanical Specifications

Proof Test

The entire fiber length is subjected to a tensile stress ≥ 100 kpsi (0.7 GPa)*.

*Higher proof test levels available.

Length

Fiber lengths available up to 50.4* km/spool.

*Longer spliced lengths available.

Performance Characterizations

Characterized parameters are typical values.

Core Diameter	8.2 μm
Numerical Aperture	0.14 <i>NA is measured at the one percent power level of a one-dimensional far-field scan at 1310 nm.</i>
Zero Dispersion Wavelength (λ_0)	1313 nm
Zero Dispersion Slope (S_0)	0.086 ps/(nm ² •km)
Refractive Index Difference	0.36%
Effective Group Index of Refraction (N_{eff})	1310 nm: 1.4677 1550 nm: 1.4682
Fatigue Resistance Parameter (N_f)	20
Coating Strip Force	Dry: 0.6 lbs. (3N) Wet, 14-day room temperature: 0.6 lbs. (3N)
Rayleigh Backscatter Coefficient (for 1 ns Pulse Width)	1310 nm: -77 dB 1550 nm: -82 dB
Individual Fiber Polarization Mode Dispersion	0.02 ps/ $\sqrt{\text{km}}$

Formulas

Dispersion

$$\text{Dispersion} = D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] \text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}),$$

for 1200 nm \leq λ \leq 1625 nm

λ = Operating Wavelength

Cladding Non-Circularity

$$\text{Non-Circularity} = \left[1 - \frac{\text{Min. Cladding Diameter}}{\text{Max. Cladding Diameter}} \right] \times 100$$

Corning Incorporated
www.corning.com/opticalfiber

One Riverfront Plaza
Corning, NY 14831
U.S.A.

Ph: 607-248-2000

Email: cofic@corning.com

Corning, SMF-28, SMF-28e and CPC are registered trademarks of Corning Incorporated, Corning, N.Y.

Any warranty of any nature relating to any Corning optical fiber is only contained in the written agreement between Corning Incorporated and the direct purchaser of such fiber.

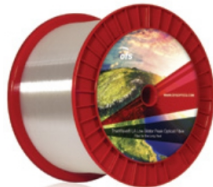
©2007, Corning Incorporated

Figura 1: datasheet Fibra óptica Corning smf-28e [41]

.2. Anexo B: Datasheet de Fibra óptica Lucent TrueWave



TrueWave® REACH Optical Fiber Optimized for 40+ Gb/s Transmission



Features and Benefits

- Low and stable full spectrum performance to maximize transmission distance and minimize transmitter power
- Ultra-low and stable PMD to support the highest data rates with lower electronics costs
- Low dispersion slope to provide more DWDM channels and lower residual dispersion as well as less temperature variation
- Optimized for both EDFA and Raman amplification to maximize system design options

Overview

TrueWave REACH Optical Fiber provides maximum performance for optically amplified systems over longer distances with higher capacity. TrueWave REACH Fiber meets and exceeds both the ITU-T G.655 C and E and G.656 standards. Optimized for Raman amplification, the fiber minimizes the need for complex dispersion and dispersion slope compensators and additional amplification. With fully matched dispersion compensation modules available in the C-, L-, and S-bands, TrueWave REACH Fiber enables the highest performance and minimal system cost for 10 and 40 Gb/s transmission and beyond.

Product Description

TrueWave REACH Optical Fiber allows Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) transmission channels to be used over the full S, C, and L-bands (1460 to 1625 nm). Not only is the fiber fully compatible with erbium doped fiber amplifiers (EDFAs), it is also optimized for the fast emerging distributed Raman amplification technology.

Transmission examples using TrueWave REACH Fiber with 100 km spans, consistent with many terrestrial deployments:

- 3200 km transmission of 80 wavelength channels operating in the C-band alone, at 10 Gb/s each
- Greater than 3 Tb/s per second transmission over 1200 km of TrueWave REACH Fiber, with 77 wavelength channels operating in both the C- and L-bands, each at 40 Gb/s
- S-band transmission of 40 wave-length channels at 10 Gb/s each, over 1200 km, with a Raman amplified system.
- 2000 km transmission of 80 wave-length channels, each at 40 Gb/s, with wideband Raman amplification and RightWave® DCMs that simultaneously compensate both the C- and L-bands

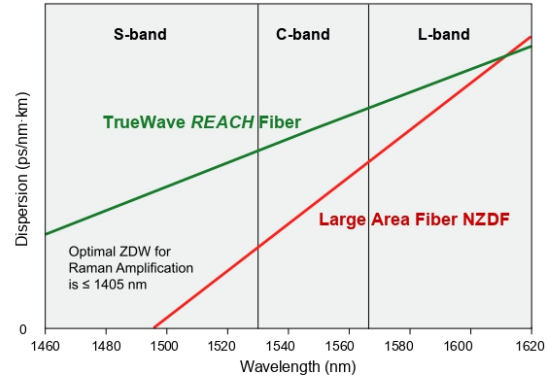
www.ofsoptics.com

TrueWave® REACH Optical Fiber

Wide Operating Band

Ideally, the chromatic dispersion of an optical fiber should have a constant, moderate value over the entire operating wavelength region. However, the dispersion of all fibers changes with wavelength, as determined by the dispersion slope. The smaller the slope, the less the dispersion changes with wavelength. For optimum performance over the C-, L-, and S-bands, dispersion slope should be minimized. TrueWave REACH Fiber fulfills the G.656 requirement based on its low dispersion slope.

The small dispersion slope of TrueWave REACH Fiber allows its minimum dispersion to be increased to better suppress the four wave mixing (FWM) nonlinearity. At the same time, this keeps the fiber's maximum dispersion small enough for signals to travel over long distances with minimum need for dispersion and dispersion slope compensation over the C-, L-, and S-bands. Finally, TrueWave REACH Fiber keeps the ZDW ≤ 1405 nm in order to avoid FWM between Raman pump source and transmission signal for optimum distributed Raman amplification.

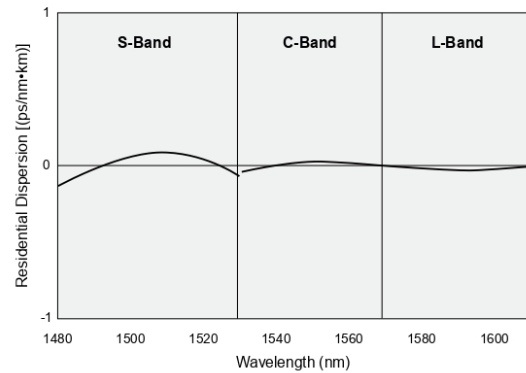


TrueWave REACH Has Optimal Dispersion Across All Three Bands

Precise Dispersion Compensation

The highest capacity systems today use the wide spectral bands available in optical fibers. To achieve long distance transmission for 10 Gb/s systems, and especially for 40 Gb/s systems, precise dispersion compensation over the full extent of these bands is required.

TrueWave REACH Fiber is optimized to achieve precise wideband dispersion over the C-, L-, and S-bands. TrueWave REACH Fiber's dispersion properties result in a low relative dispersion slope across all three bands. This makes it easier to create the precise wideband compensating modules needed for high capacity systems. Coupled with OFS' RightWave Dispersion Compensating Modules (DCM), TrueWave REACH Fiber provides unsurpassed system performance compared with other NZDF products.

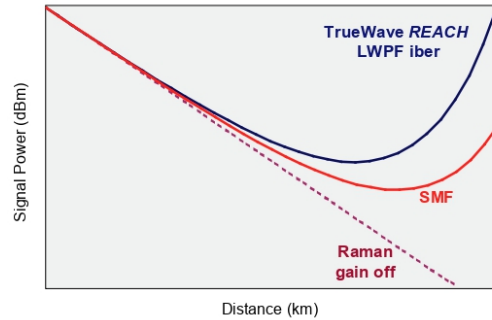


RightWave® DCM with TrueWave REACH LWP Delivers Unsurpassed Residual Dispersion

Flexible Amplification

TrueWave REACH Fiber allows DWDM transmission channels to be used over the full S, C and L-bands (1460 to 1625 nm). Amplifier technologies used may be both EDFAs and the fast emerging distributed Raman amplification technology.

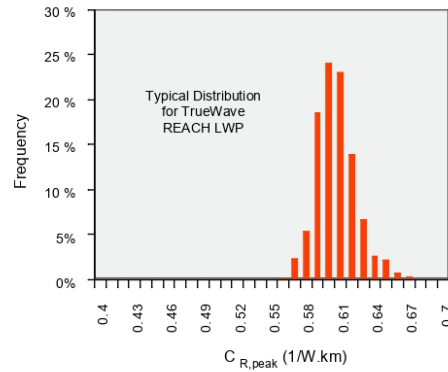
Distributed Raman amplification technology shows advantages in reducing system noise and enabling wideband amplification as compared to today's EDFAs. How well the transmission fiber can utilize this new amplifier technology is defined by the Raman Gain Efficiency.



Raman Amplification Performance

Optimal Raman Gain Efficiency

TrueWave REACH Fiber has been optimized to have one of the best Raman gain efficiencies compared to other transmission fibers due to the optimized effective area of the fiber. A typical value for TrueWave REACH Fiber is 0.60 W-1 km-1 compared to 0.40 – 0.45 for Standard Single-Mode Fiber and Large Effective Area NZDF respectively.



Raman Gain Efficiency (C_{R,Peak})

For additional information please contact your sales representative.

You can also visit our website at www.ofsoptics.com or call **1-888-fiberhelp** (1-888-342-3743) USA or **1-770-798-5555** outside the USA.

North America

Telephone: 508-347-8590
Toll Free: 800-799-7732
Fax: 508-347-1211
E-mail: fibersalesnar@ofsoptics.com

Asia Pacific

Telephone: +852 2506 5054
Fax: +852 2506 0166
E-mail: fibersalesap@ofsoptics.com

Caribbean, Latin America

Telephone: +1-508-347-8590
Fax: +1-508-347-1211
E-mail: fibersalescala@ofsoptics.com

Japan

Telephone: +81-3-3286-3424
Fax: +81-3-3286-3708 or 3190
E-mail: fibersalesjapan@ofsoptics.com

Europe, Middle East, Africa

Telephone: +45-43 48 3736
Fax: +45 4348 3444
E-mail: ofssalesdk@ofsoptics.com

China

Telephone: +86 10 6505 3660
Fax: +86 10 65059515
E-mail: fibersaleschina@ofsoptics.com



Copyright © 2017 OFS Fitel, LLC.
All rights reserved, printed in USA.

OFS Marketing Communications
Doc ID: fiber-124
Date: 0917

RightWave and TrueWave are registered trademarks of OFS Fitel, LLC.

OFS reserves the right to make changes to the prices and product(s) described in this document at any time without notice. This document is for informational purposes only and is not intended to modify or supplement any OFS warranties or specifications relating to any of its products or services.

TrueWave® REACH Optical Fiber

Product Specifications	TrueWave REACH Optical Fiber	
Physical Characteristics		
Clad Diameter	125.0 ± 0.7 μm	
Clad Non-Circularity	≤ 0.7 %	
Core/Clad Concentricity Error (Offset)	≤ 0.5 μm, < 0.2 μm typically	
Coating Diameter (Uncolored)	237 - 247 μm	
Coating-Clad Concentricity Error (Offset)	≤ 12 μm	
Tensile Proof Test	100 kpsi (0.69 GPa)	
Coating Strip Force	Range: 1.0 N ≤ CSF ≤ 8.9 N	
Fiber Curl Radius	≥ 4 m	
Dynamic Fatigue Parameter (N ₂)	≥ 20	
Reel Lengths	Standard as well as customer specific lengths are available up to 50.4 km	
Optical Characteristics (after hydrogen aging)		
<i>Attenuation</i>	<i>Maximum</i>	<i>Typical</i>
at 1310 nm	≤ 0.4 dB/km	≤ 0.35 dB/km
at 1383 nm	≤ 0.4 dB/km	≤ 0.35 dB/km
at 1450 nm	≤ 0.26 dB/km	≤ 0.25 dB/km
at 1550 nm	≤ 0.22 dB/km	≤ 0.20 dB/km
at 1625 nm	≤ 0.24 dB/km	≤ 0.21 dB/km
Attenuation Uniformity / Point Discontinuities at 1550 nm	≤ 0.05 dB	
Macrobending Attenuation: <i>The maximum attenuation with bending does not exceed the specified values under the following deployment conditions:</i>		
Deployment Condition	Wavelength	Induced Attenuation
1 turn, 32 mm (1.2 inch) diameter	1550 nm	≤ 0.5 dB
	1625 nm	≤ 0.5 dB
100 turns, 60 mm (2.4 inch) diameter	1550 nm	≤ 0.05 dB
	1625 nm	≤ 0.05 dB
Chromatic Dispersion		
C-Band 1530-1565 nm	5.5 – 8.9 ps/nm-km	
L-Band 1565-1625 nm	6.9 – 11.4 ps/nm-km	
Dispersion Slope at 1550 nm	≤ 0.045 ps/nm ² -km	
S - L bands 1460 - 1625 nm	2.0 – 11.4 ps/nm-km	
Zero Dispersion Wavelength	≤ 1405 nm	
Chromatic Dispersion at 1310 nm	-5 ps/nm-km (typical)	
Group Refractive Index		
at 1310 nm	1.471	
at 1550 nm	1.470	
at 1625 nm	1.470	
Mode Field Diameter		
Effective Area	8.6 ± 0.4 μm @ 1550 nm 55 μm ² (typical) @ 1550 nm	
Cable Cut-off Wavelength (λ _{cc})	≤ 1310 nm	
Polarization Mode Dispersion (PMD) ¹		
Fiber PMD Link Design Value (LDV) ²	≤ 0.04 ps/√km	
Maximum Individual Fiber	≤ 0.1 ps/√km	
Typical Fiber LMC PMD	≤ 0.02 ps/√km	
¹ As measured with low mode coupling (LMC) technique in fiber form, value may change when cabled. Check with your cable manufacturer for specific PMD limits in cable form.		
² The PMD Link Design Value complies with IEC 60794-3, September 2001 (N = 20, Q = 0.01%). Details are described in IEC 61282-3 TR Ed 2, October 2006.		
Typical Raman Gain Efficiency	≥ 0.6 (1/W/km) using 1450 nm pump source	
Environmental Characteristics (at 1310, 1550 & 1625 nm)		
Temperature Cycling (-60° to +85 °C)	≤ 0.05 dB/km	
High Temperature Aging (85 °C)	≤ 0.05 dB/km	
Damp Heat Aging (85 °C and 85% RH)	≤ 0.05 dB/km	
Water Immersion (23 °C)	≤ 0.05 dB/km	

Figura 2: datasheet Fibra óptica Lucent TrueWave [32]

.3. Anexo c: Datasheet de Fibra óptica Corning Leaf

Corning® LEAF® Optical Fiber Product Information



In the race to satisfy the global demand for bandwidth, Corning® LEAF® optical fiber is the clear winner as the world's most widely deployed non-zero dispersion-shifted fiber (NZDSF). Optimized for long-haul and metro networks, LEAF fiber is a technically advanced product that provides high capacity, broad system flexibility, and superior performance. Additionally LEAF fiber is the industry leader in polarization mode dispersion (PMD) specifications and has the lowest attenuation of any NZDSF on the market today, enabling networks to evolve from the current 10G and 40G and 100G systems of the future.

Optical Specifications

Maximum Attenuation

Wavelength (nm)	Maximum Value (dB/km)
1383	≤ 0.4
1410	≤ 0.32
1450	≤ 0.26
1550	≤ 0.19
1625	≤ 0.21

Attenuation vs. Wavelength

Range (nm)	Ref. λ (nm)	Max. α Difference (dB/km)
1525 – 1575	1550	0.02
1550 – 1625	1550	0.03

The attenuation in a given wavelength range does not exceed the attenuation of the reference wavelength (λ) by more than the value α.

Macrobend Loss

Mandrel Diameter (mm)	Number of Turns	Wavelength (nm)	Induced Attenuation* (dB)
32	1	1550 & 1625	≤ 0.50
60	100	1550 & 1625	≤ 0.05

*The induced attenuation due to fiber wrapped around a mandrel of a specified diameter.

Point Discontinuity

Wavelength (nm)	Point Discontinuity (dB)
1550	≤ 0.05

Mode-Field Diameter

Wavelength (nm)	MFD (μm)
1550	9.6 ± 0.4

Dispersion

Wavelength (nm)	Dispersion Value [ps/(nm·km)]
1530	2.0–5.5
1565	4.5–6.0
1625	5.8–11.2

Polarization Mode Dispersion (PMD)

	Value (ps/√km)
PMD Link Design Value	≤ 0.04*
Maximum Individual Fiber PMD	≤ 0.1

*Complies with IEC 60794-3: 2001, Section 5.5, Method 1, (m = 20, Q = 0.01%), September 2001.

The PMD link design value is a term used to describe the PMD of concatenated lengths of fiber (also known as PMD_L). This value represents a statistical upper limit for total link PMD. Individual PMD values may change when fiber is cabled.

Standards Compliance

- ITU-T G.655 (Tables A, B, C, D)
- IEC Specifications 60793-2-50 Type B4
- TIA/EIA 492-EA00
- Telcordia's GR-20

How to Order

Contact your sales representative, or call the Optical Fiber Customer Service Department:
Ph: 1-607-248-2000 (U.S. and Canada)
+44-1244-525-320 (Europe)
Email: cofic@corning.com
Please specify the fiber type, attenuation, and quantity when ordering.



Dimensional Specifications

Glass Geometry

Fiber Curl	≥ 4.0 m radius of curvature
Cladding Diameter	125.0 ± 0.7 μm
Core-Clad Concentricity	≤ 0.5 μm
Cladding Non-Circularity	≤ 0.7%

Coating Geometry

Coating Diameter	242 ± 5 μm
Coating-Cladding Concentricity	< 12 μm

Environmental Specifications

Environmental Test	Test Condition	Induced Attenuation 1550 nm and 1625 nm (dB/km)
Temperature Dependence	-60°C to +85°C*	≤ 0.05
Temperature Humidity Cycling	-10°C to +85°C up to 98% RH	≤ 0.05
Water Immersion	23°C ± 2°C	≤ 0.05
Heat Aging	85°C ± 2°C	≤ 0.05
Damp Heat	85°C at 85% RH	≤ 0.05

*Reference temperature = +23°C

Operating Temperature Range: -60°C to +85°C

Mechanical Specifications

Proof Test

The entire fiber length is subjected to a tensile stress ≥ 100 kpsi (0.69 GPa).*

*Higher proof test levels available

Length

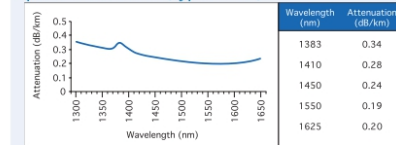
Fiber lengths available up to 25.2 km/spool.

Performance Characterizations

Characterized parameters are typical values.

Numerical Aperture	0.14 NA is measured at the one percent power level of a one-dimensional far-field scan at 1550 nm.
Effective Area (A _{eff})	1550 nm: 72 μm ²
Effective Group Index of Refraction (N _{eff})	1550 nm: 1.4693
Fatigue Resistance Parameter (N _d)	20
Coating Strip Force	Dry: 0.6 lbs. (3N) Wet, 14-day room temperature: 0.6 lbs. (3N)
Rayleigh Backscatter Coefficient (for 1 ns Pulse Width)	1550 nm: -81 dB 1625 nm: -82 dB
Chromatic Dispersion	1550 nm at 4 ps/(nm•km) 1625 nm at 10 ps/(nm•km)

Spectral Attenuation (Typical Fiber)



Formulas

Dispersion

$$\text{Dispersion} = D(\lambda) = \left(\frac{D(1565 \text{ nm}) - D(1530 \text{ nm})}{35} \right) \cdot (\lambda - 1565) + D(1565 \text{ nm})$$

λ = Operating Wavelength up to 1565 nm

$$\text{Dispersion} = D(\lambda) = \left(\frac{D(1625 \text{ nm}) - D(1565 \text{ nm})}{60} \right) \cdot (\lambda - 1625) + D(1625 \text{ nm})$$

λ = Operating Wavelength from 1565 nm – 1625 nm

Cladding Non-Circularity

$$\text{Cladding Non-Circularity} = \left[1 - \frac{\text{Min. Cladding Diameter}}{\text{Max. Cladding Diameter}} \right] \times 100$$

CORNING

Corning Incorporated
One Riverfront Plaza
Corning, NY 14831 U.S.A.
Ph: 607-248-2000 (U.S. and Canada)
+44-1244-525-320 (Europe)
Email: cofic@corning.com
www.corning.com/opticalfiber

Corning and LEAF are registered trademarks of Corning Incorporated, Corning, NY.

© 2014 Corning Incorporated. All Rights Reserved.

Figura 3: datasheet Fibra óptica Corning Leaf [33]

REFERENCIAS

- [1] Álvaro Osorio G., “Redes gpon-ftth, evolución y puntos críticos para su despliegue en argentina,” 3 2016.
- [2] J. P. Agredo, J. G. López Perafán, H. Ordoñez, and A. Toledo Tovar, “Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red wdm.,” vol. 20, pp. 23,35, 2015.
- [3] R. N. Da Silva, M. S. B. Cunha, I. F. da Costa, and S. A. Cerqueira, “Gpon-based front-end architecture for 5g networks,” in *2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, pp. 1–5, 2017.
- [4] I. T. U. T, “Redes ópticas pasivas con capacidad de gigabit (gpon): Extensión del alcance,” 2 2020.
- [5] F. S. A. Network, “About fsan,” 3 2023.
- [6] F. S. A. Network, “About fsan,” 3 2016.
- [7] FSAN, “About FSAN.” Available on: <https://www.fsan.org>, 2019.
- [8] I. Corporation, “About fsan,” 5 2023.
- [9] I. T. U. T, “Redes ópticas pasivas con capacidad de gigabits: Características generales,” 2 2020.
- [10] I. T. U. T, “Redes ópticas pasivas con capacidad de 10 gigabit (xg-pon): Requisitos generales,” 5 2020.
- [11] I. T. U. T, “10-gigabit-capable symmetric passive optical network (xgs-pon),” 4 2023.
- [12] S. Satkunarajah, D. Samarakkody, and W. A. S. C. Perera, “Comparison of single-line rate for dedicated protection on wdm optical network topologies,” in *2016 IEEE International Conference on Information and Automation for Sustainability (ICIAfS)*, pp. 1–6, 2016.
- [13] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, and S. Matsuoka, “Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 11, pp. 66–73, 2009.
- [14] I. M. T. M. I. Avishek Nag, Member and I. Biswanath Mukherjee, Fellow, “Optical network design with mixed line rates and multiple modulation formats,” in *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, vol. 8, pp. 466–472, 2010.

- [15] G. A. G. P. H. A. L. MAZORRA, “Análisis a nivel de simulación del desempeño en la migración de una red Óptica slr-dwdm a una red Óptica mlr-dwdm implementando diferentes arquitecturas de red de banda ancha ftx,” pp. —6,18, 2022.
- [16] S. S. Vikram Kumar and S. K. Das, “Performance analysis for mixed line rates (mlr) wdm/dwdm networks under various modulation techniques,” *Artículo de investigación*, pp. 3,5, 2018.
- [17] A. N. E. I. T. W. P. Chowdhury, M. Tornatore and B. Mukherjee, “On the Design of Energy-Efficient Mixed-Line-Rate (MLR) Optical Networks, journal=Journal of Lightwave Technology, vol. 30, no. 1, pages=1,6, year=2012 doi=10.1109/JLT.2011.2177441,”
- [18] G. A. G. AGREDO, “Mejora de la Eficiencia Espectral en redes DWDM a 40Gbps a través de los Formatos de Modulación Avanzados DPSK y DQPSK,” *Universidad del Cauca Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones*, pp. 33, 41, 2019.
- [19] “MODELAMIENTO DE UN ALGORITMO PARA LA ASIGNACIÓN DE LONGITUDES DE ONDA EN UN MULTIPLEXOR DWDM MINIMIZANDO EL PROCESO DE MEZCLADO DE LA CUARTA ONDA FWM (FOUR WAVE MIXING), author=Jorge Arturo Mojica Cáceres, journal=Artículo de investigación, pages=23,35, year=2013,”
- [20] “ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS EN PRESENCIA DEL EFECTO FWM EN UNA ARQUITECTURA DE RED MLR DE TIPO NG-PON2, author=Juan Ángel Gutiérrez Chito, Anyi Tatiana Gómez Córdoba, journal=Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en: Electrónica y Telecomunicaciones., pages=17,23, year=2023,”
- [21] H. O. J. P. A. José Giovanni López Perafán, Alejandro Toledo Tovar, “Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM,” *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC*, pp. 23,35, 2011.
- [22] Huawei, “¿Qué es el efecto no lineal? .” Available on: <https://forum.huawei.com/enterprise/es/>, year=2022, month = 10, language = es.
- [23] I. Chatti, F. Baklouti, F. Chekir, and R. Attia, “Including nonlinear spm and xpm effects on the optical mimo systems,” in *2019 International Conference on Smart Applications, Communications and Networking (SmartNets)*, pp. 1–6, 2019.
- [24] G. P. A. PAUL L. KELLEY, IVAN P. KAMINOW, “Applications of Nonlinear Fiber Optics,” *Academic press*, vol. 20, no. 11, pp. 137,144, 2001.
- [25] A. J. O. MENDIETA, ““DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE FWM EN UNA RED UDWDM PON”,” *FACULTAD DE INGENIERÍA*, 2015.

- [26] “OptSim - Photonic System Tools — Synopsys Photonic Solutions.” Available on: <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/rsoft-system-design-tools/system-network-optsim.html>.
- [27] “Metodología de la investigación, author= Carlos Fernández Collado, Dra. María del Pilar Baptista Lucio, journal=McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V, pages=40-78, year=2014,”
- [28] “Etapas de un modelos de simulación y la modelación con FlexSim, author=Isaías Simón Marmolejo, Rafael Granillo Macías, Francisca Santana Robles, journal=Artículo de investigación, pages=4-8, year=2013,”
- [29] E. U. G. Carmen Fullana Belda, “Los modelos de simulación: Una herramienta multidisciplinar de investigación,” *Artículo de investigación*, pp. 2–5, 2009.
- [30] corning discovering beyond imagination, “corning smf-28e fiber datasheet,” *Datasheet*, pp. 1–4, 2014.
- [31] A. S. Nieves, “Análisis y aplicación de los efectos kerr en sistemas dwdm de última generación,” pp. 38–55, 2017.
- [32] L. Technologies, “Datasheet lucent true wave 1550,” 3 2020.
- [33] C. Incorporated, “Datasheet corning leaf 1550,” 3 2014.
- [34] A. A. O. A. I. WORLD, “Datashet alcatel 6910 teralight,” 3 2001.
- [35] I. telecommunication union, “Series g: Transmission systems and media, digital systems and networks,” *TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU*, pp. 3–6, 2020.
- [36] C. torres torres, “Efectos de acoplamiento vectorial de ondas en medios con no linealidad óptica de tercer orden,” pp. 9–10, 2006.
- [37] D. E. S. Andrea E. Puerres, “Estudio y simulación de los efectos no lineales modulación cruzada de fase (xpm) y mezcla de cuatro ondas (fwm) en una fibra Óptica monomodo,” pp. 271–280, 2016.
- [38] F. A. F. Arturo Peralta Sevilla, Milton Tipan Simbaña, “Análisis de los efectos dispersivos y no lineales en un canal óptico empleando métodos numéricos,” pp. 5–14, 2014.
- [39] F. A. F. Arturo Peralta Sevilla, Milton Tipan Simbaña, “Analizar y simular los efectos no lineales causados por el fenómeno de Índice de refracción en la capa física en una red pon de nueva generación,” pp. 5–14, 2014.

- [40] I. A. G. O. D. G. Fabian Gomez, Karla Cecilia Puerto Lopez, “Modelado de los fenómenos no lineales generados por el efecto electro-Óptico kerr en una transmisión por fibra Óptica,” *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, pp. 82–86, 2017.
- [41] C. incorporated, *Corning SMF-28e Optical Fiber*. Corning incorporated, 2007.

LICENCIA



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.



Universidad
del Cauca

Esta obra está publicada bajo una Licencia
Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional.