

**MEDIDA DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL DE  
UNA ARQUITECTURA DE RED HETEROGÉNEA  
DE TIPO NG-PON PARA UN RÉGIMEN DE  
PROPAGACIÓN CUASILINEAL**



**ELIANA MARCELA RIVERA CASTAÑO  
ANYI NIYIRETH GIRÓN ZÚÑIGA**

**Director  
MsC. GUSTAVO ADOLFO GÓMEZ AGREDO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
GRUPO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES -  
GNTT  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
POPAYÁN  
2022**

**MEDIDA DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL DE  
UNA ARQUITECTURA DE RED HETEROGÉNEA  
DE TIPO NG-PON PARA UN RÉGIMEN DE  
PROPAGACIÓN CUASILINEAL**

**ELIANA MARCELA RIVERA CASTAÑO  
ANYI NIYIRETH GIRÓN ZÚÑIGA**

Trabajo de grado presentado a la Facultad de Ingeniería Electrónica y  
Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca como requisito para obtener el título  
de: Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Director  
**MsC. GUSTAVO ADOLFO GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
GRUPO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES -  
GNTT  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
POPAYÁN  
2022**

*A mi padre, mi amado ángel y gran amor,  
por cuidarme desde el cielo y guiarme en cada paso,  
A mi madre, por ser mi apoyo incondicional,  
mi consejera día y noche, mi polo a tierra,  
agradezco por cada una de sus oraciones,  
A Dios por darme la vida y permitirme realizar este proyecto.*

*Eliana Marcela Rivera Castaño*

*A mi madre, por su apoyo incondicional y por confiar  
en mí, incluso más que yo.  
A mis compañeros, que con su amistad y apoyo aportaron  
a la culminación de esta etapa de mi vida.*

*Anyi Niyireth Girón Zúñiga*

# AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al MSc. Gustavo Adolfo Gómez Ágredo, Director del Proyecto, por sus valiosas orientaciones.

Al comité de programa de pregrado en Electrónica y Telecomunicaciones por sus aportes y recomendaciones, al grupo de investigación de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT, por su colaboración y consejos en el desarrollo del presente trabajo y a todos los ingenieros y profesores que hicieron parte de este camino universitario y que serán recordados con alegría.

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

# TABLA DE CONTENIDO

	Página
<b>LISTA DE TABLAS</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>VIII</b>
<b>1 ARQUITECTURAS DE RED DE ACCESO AL SERVICIO COMPLETO, RÉGIMEN DE PROPAGACIÓN Y EFICIENCIA ESPECTRAL</b>	<b>5</b>
1.1 ARQUITECTURAS DE RED DE ACCESO AL SERVICIO COMPLETO - FSAN . . . . .	5
1.1.1 Next Generation Passive Optical Network - NG-PON . . . . .	6
1.1.2 Arquitecturas de Redes Ópticas Heterogéneas . . . . .	12
1.2 RÉGIMEN DE PROPAGACIÓN ÓPTICO . . . . .	12
1.2.1 Dispersion Managed Soliton . . . . .	14
1.2.2 Quasi-Linear Transmission . . . . .	15
1.2.3 Pseudo-Linear Transmission . . . . .	16
1.3 EFICIENCIA ESPECTRAL . . . . .	17
1.4 ADAPTACIÓN DE LA TEORÍA DE LA INFORMACIÓN PARA UN RÉGIMEN DE PROPAGACIÓN CUASILINEAL . . . . .	22
<b>2 METODOLOGÍAS, ESCENARIOS DE SIMULACIÓN Y CASOS DE ESTUDIO</b>	<b>28</b>
2.1 HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN . . . . .	28
2.1.1 Optsim . . . . .	28
2.1.2 Optisystem . . . . .	30
2.1.3 Optilux . . . . .	31
2.1.4 Viavi FiberChekPRO . . . . .	32
2.2 METODOLOGÍAS . . . . .	33
2.2.1 Metodología de Investigación . . . . .	33
2.2.2 Metodología de Simulación . . . . .	34
2.3 MODELO GENERAL DE RED . . . . .	37
2.3.1 REDES DWDM . . . . .	37
2.3.2 REDES MLR . . . . .	46
2.4 ESQUEMA GENERAL . . . . .	52
2.5 CASOS DE ESTUDIO . . . . .	66
<b>3 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL PARA UNA ARQUITECTURA DE RED HETEROGÉNEA DE TIPO NG-PON</b>	<b>68</b>
3.1 Redes heterogéneas tipo 1, basadas en XG-PON Y XGS-PON. . . . .	68
3.1.1 Caso de estudio: 12 canales de 2,5 Gbps + 1 canal de 10 Gbps. . . . .	68
3.1.2 Caso de estudio: 8 canales de 2,5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps. . . . .	77
3.1.3 Caso de estudio: 4 canales de 2,5 Gbps + 3 de 10 Gbps. . . . .	83
3.2 Redes heterogéneas tipo 2, basadas en XGS-PON Y NG-PON. . . . .	87

3.2.1	Caso de estudio: 2 canales de 10 Gbps + 1 canal de 40 Gbps . . . .	87
3.3	Redes heterogéneas tipo 3, basadas en XG-PON, XGS-PON y NG-PON . .	94
3.3.1	Caso de estudio: 4 canales de 2,5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 1 de 40 Gbps . . . . .	94
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>103</b>
4.1	Conclusiones . . . . .	103
4.1.1	Conclusiones sobre los resultados . . . . .	103
4.1.2	Conclusiones sobre la investigación . . . . .	104
4.2	Recomendaciones . . . . .	105
4.3	Trabajos futuros . . . . .	106

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Cuadro Comparativo entre las herramientas de simulación investigadas.	33
Tabla 2.2	Cuadro Comparativo de diferentes tipos de Láseres, adaptado de [75].	40
Tabla 2.3	Características típicas de los amplificadores ópticos, adaptado de [71]	41
Tabla 2.4	Características de los fotodiodos, adaptado de [76]	43
Tabla 2.5	Tabla comparativa entre Splitters FBT y PLC [85]	45
Tabla 2.6	Elementos de una red WDM.	46
Tabla 2.7	Esquemas de transmisión más prometedores para la actualización del canal de 40 / 100 Gbps, adaptado de [92].	49
Tabla 2.8	Características de una red MLR.	49
Tabla 2.9	Variables del Modelo General	52
Tabla 2.10	Características de una red MLR.	56
Tabla 2.11	Comparación de resultados para diferentes distancias canal interno.	59
Tabla 2.12	Variables de medición y control, un canal.	64
Tabla 2.13	Variables de medición y control, 4 canales.	64
Tabla 3.1	Variables de medición y control de los 12 canales de 2,5 Gbps.	76
Tabla 3.2	Variables de medición y control del canal de 10 Gbps.	76
Tabla 3.3	Variables de medición y control, esquema híbrido.	77
Tabla 3.4	Variables de medición y control de los 8 canales de 2,5 Gbps.	82
Tabla 3.5	Variables de medición y control de los 2 canales de 10 Gbps.	82
Tabla 3.6	Variables de medición y control, esquema híbrido.	82
Tabla 3.7	Variables de medición y control de los 4 canales de 2,5 Gbps.	85
Tabla 3.8	Variables de medición y control de los 3 canales de 10 Gbps, caso de estudio 3	86
Tabla 3.9	Variables de medición y control, esquema híbrido.	86
Tabla 3.10	Variables de medición y control de los 2 canales de 10 Gbps.	92
Tabla 3.11	Variables de medición y control del canal de 40 Gbps.	93
Tabla 3.12	Variables de medición y control, esquema híbrido.	93
Tabla 3.13	Variables de medición y control de los 4 canales de 2,5 Gbps.	100
Tabla 3.14	Variables de medición y control de los 2 canales de 10 Gbps.	100
Tabla 3.15	Variables de medición y control del canal de 40 Gbps.	101
Tabla 3.16	Variables de medición y control, esquema híbrido.	101
Tabla 4.1	Red heterogénea basada en MLR.	104

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Arquitectura de red FSAN de referencia [2]. . . . .	6
Figura 1.2	Arquitectura de red PON [3]. . . . .	7
Figura 1.3	Escenarios de aplicaciones XG-PON [8]. . . . .	9
Figura 1.4	Coexistencia de GPON y XG-PON [9]. . . . .	10
Figura 1.5	Representación de un canal discreto sin memoria [18]. . . . .	19
Figura 1.6	Espaciamiento Óptico vs Ancho de Banda de Canal [18]. . . . .	25
Figura 1.7	Relación de Comportamiento Óptico en términos de la Teoría de la Información Adaptada [18] . . . . .	26
Figura 2.1	Logo del Software Optsim [56]. . . . .	29
Figura 2.2	Logo del software OptiSystem [56]. . . . .	30
Figura 2.3	Logo de Optilux [59]. . . . .	31
Figura 2.4	Logo de Viavi Solutions [61]. . . . .	32
Figura 2.5	Metodología RUP [64]. . . . .	35
Figura 2.6	Diagrama de flujo para el proceso de simulación. . . . .	36
Figura 2.7	Arquitectura de un Sistema DWDM [68]. . . . .	37
Figura 2.8	Funcionamiento Rejilla de Bragg [84] . . . . .	44
Figura 2.9	Esquema General de una Red MLR [69]. . . . .	47
Figura 2.10	Diseño red WDM – MLR con diferentes formatos de modulación [89]	48
Figura 2.11	Diferente tipos de redes FTTx [93] . . . . .	50
Figura 2.12	Esquema general. . . . .	53
Figura 2.13	Propiedades Láser, canal 1. . . . .	54
Figura 2.14	Preamplificación. . . . .	54
Figura 2.15	Propiedades Rejilla de Bragg para una distancia de 80 km. . . . .	55
Figura 2.16	Parámetros del receptor óptico. . . . .	55
Figura 2.17	Cálculo OSNR real. . . . .	57
Figura 2.18	Diagrama del ojo . . . . .	57
Figura 2.19	Diagrama del ojo en recepción . . . . .	57
Figura 2.20	Espectro óptico en Tx. . . . .	58
Figura 2.21	Espectro óptico en Rx (simulaciones superpuestas. . . . .	58
Figura 2.22	Espectro óptico en Tx. . . . .	58
Figura 2.23	Espectro óptico en Rx. . . . .	58
Figura 2.24	Diagrama del ojo 80/0,5 km, . . . . .	59
Figura 2.25	Diagrama del ojo para todas las . . . . .	59
Figura 2.26	Espectro óptico 80/0.5km . . . . .	60
Figura 2.27	Espectros ópticos superpuestos . . . . .	60
Figura 2.28	Diagrama del ojo, . . . . .	60
Figura 2.29	Diagrama del ojo, . . . . .	60
Figura 2.30	Espectro óptico canal interno. . . . .	61
Figura 2.31	Espectro óptico canal externo. . . . .	61
Figura 2.32	Espectro óptico en Tx, esquema de un solo canal . . . . .	62
Figura 2.33	Espectro óptico en Tx, esquema de varios canales. . . . .	63
Figura 2.34	Espectro óptico en Rx . . . . .	63
Figura 2.35	Fenómenos FWM y XPM PTx= 0 dBm . . . . .	65

Figura 2.36	Fenómenos FWM y XPM $P_{Tx} = 20$ dBm . . . . .	66
Figura 2.37	Casos de estudios . . . . .	67
Figura 3.1	Esquema del caso de estudio. . . . .	70
Figura 3.2	Espectro óptico throughput. . . . .	71
Figura 3.3	Caso de estudio inicial, 3 canales. . . . .	72
Figura 3.4	Diagrama del ojo inicial, 10 Gbps. . . . .	72
Figura 3.5	Diagrama de ojo 2, canal 10 Gbps. . . . .	73
Figura 3.6	Diagrama de ojo 3 canales . . . . .	73
Figura 3.7	Espectro óptico del throughput 3 canales . . . . .	73
Figura 3.8	Espectro óptico canal de 10 Gbps. . . . .	74
Figura 3.9	Espectro óptico del throughput, 13 canales . . . . .	74
Figura 3.10	Diagrama de ojo canal 12; 2,5 Gbps . . . . .	75
Figura 3.11	Diagrama de ojo canal 7; 2,5 Gbps. . . . .	75
Figura 3.12	Diagrama de ojo canal 10 Gbps . . . . .	75
Figura 3.13	espectro canal de 11 de 2,5 Gbps. . . . .	76
Figura 3.14	espectro canal de 10 Gbps. . . . .	76
Figura 3.15	Espectro óptico del throughput, separación de 25 GHz. . . . .	78
Figura 3.16	Canal 1 de 10 Gbps, . . . . .	78
Figura 3.17	Canal 2 de 10 Gbps, . . . . .	78
Figura 3.18	Esquema caso de estudio. . . . .	79
Figura 3.19	Espectro óptico del throughput, separación de 50 GHz. . . . .	80
Figura 3.20	Diagrama de ojo, canal 7 de 2,5 GHz. . . . .	80
Figura 3.21	Canal 1 de 10 Gbps, . . . . .	81
Figura 3.22	Canal 2 de 10 Gbps, . . . . .	81
Figura 3.23	Espectro canal de 10 Gbps, . . . . .	81
Figura 3.24	Espectro canal 2 de 10 Gbps. . . . .	81
Figura 3.25	Esquema caso de estudio. . . . .	83
Figura 3.26	Espectro óptico del throughput. . . . .	84
Figura 3.27	Diagrama de ojo, . . . . .	84
Figura 3.28	Diagrama de ojo, . . . . .	84
Figura 3.29	Espectro, . . . . .	85
Figura 3.30	Espectro, . . . . .	85
Figura 3.31	Espectro, . . . . .	85
Figura 3.32	Espectro, . . . . .	85
Figura 3.33	Esquema caso de estudio. . . . .	87
Figura 3.34	Diagrama de ojo, . . . . .	88
Figura 3.35	Diagrama de ojo, . . . . .	88
Figura 3.36	Diagrama de ojo, . . . . .	88
Figura 3.37	Espectro Throughput. . . . .	88
Figura 3.38	Diagrama de ojo, . . . . .	88
Figura 3.39	Diagrama de ojo, . . . . .	88
Figura 3.40	Diagrama de ojo Back to Back, canal de 40 Gbps. . . . .	89
Figura 3.41	Transmisión canal de 40 Gbps. . . . .	89
Figura 3.42	Espacio óptico canal de 40 Gbps. . . . .	90
Figura 3.43	Espectro óptico del throughput. . . . .	90

Figura 3.44	Back to Back, . . . . .	91
Figura 3.45	Back to Back, . . . . .	91
Figura 3.46	Espectro throughput. . . . .	91
Figura 3.47	Diagrama de ojo, . . . . .	91
Figura 3.48	Diagrama de ojo, . . . . .	92
Figura 3.49	Diagrama de ojo, . . . . .	92
Figura 3.50	Espectro óptico, . . . . .	92
Figura 3.51	Diagrama de ojo, . . . . .	92
Figura 3.52	Esquema caso de estudio. . . . .	94
Figura 3.53	Espectro en TX, . . . . .	95
Figura 3.54	Espectro en RX, . . . . .	95
Figura 3.55	Espectro en TX, . . . . .	95
Figura 3.56	Espectro en RX, . . . . .	95
Figura 3.57	Espectro en RX, . . . . .	96
Figura 3.58	Espectro en RX, . . . . .	96
Figura 3.59	Espectro en TX, . . . . .	96
Figura 3.60	Espectro en RX, . . . . .	96
Figura 3.61	Espectro óptico en RX, canal de 40 Gbps, espaciamiento de 200 GHz. . . . .	97
Figura 3.62	Espectro óptico throughput ideal. . . . .	97
Figura 3.63	Espectro óptico throughput rectangular. . . . .	98
Figura 3.64	Diagrama de ojo en TX, . . . . .	98
Figura 3.65	Diagrama de ojo en RX, . . . . .	98
Figura 3.66	Diagrama de ojo en TX, . . . . .	99
Figura 3.67	Diagrama de ojo en RX, . . . . .	99
Figura 3.68	Diagrama de ojo en TX, . . . . .	99
Figura 3.69	Diagrama de ojo en RX, . . . . .	99
Figura 3.70	Diagrama de ojo, . . . . .	100
Figura 3.71	Diagrama de ojo, . . . . .	100

# LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>ASE</b>	<i>Amplified Spontaneous Emission</i> , Emisión Espontánea Amplificada.
<b>BER</b>	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit.
<b>BPON</b>	<i>Broadband Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva de Banda Ancha.
<b>BW</b>	<i>Bandwidth</i> , Ancho de Banda.
<b>CAPEX</b>	<i>Capital Expenditure</i> , Costo de Inversión.
<b>CSRZ</b>	<i>Carrier-Suppressed Return to Zero</i> , Modulación con Portadora Suprimida con Retorno a Cero.
<b>DBA</b>	<i>Dynamic Bandwidth Allocation</i> , Asignación Dinámica del Ancho de Banda.
<b>DMF</b>	<i>Dispersion Managed Fiber</i> , Fibra Gestionada por Dispersión.
<b>DMNLS</b>	<i>Dispersion-Managed Nonlinear Schrödinger</i> , Ecuación No Lineal de Schrödinger Gestionada por Dispersión.
<b>DMS</b>	<i>Dispersion Managed Soliton</i> , Solitón Administrado por Dispersión.
<b>DP-QPSK</b>	<i>Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura de Polarización Dual.
<b>DPSK</b>	<i>Differential Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase.
<b>DWDM</b>	<i>Dense Wavelength División Multiplexing</i> , Multiplexado Denso por División en Longitudes de Onda.
<b>EDFA</b>	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> , Amplificador de Fibra Dopada con Erbio.
<b>EPON</b>	<i>Ethernet Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva para Redes Ethernet.

<b>OF</b>	<i>Optical Fiber</i> , Fibra Óptica.
<b>FEC</b>	<i>Forward Error Correction</i> , Corrección de Errores Hacia Adelante.
<b>FSAN</b>	<i>Full Service Access Network</i> , Red de Acceso al Servicio Completo.
<b>FTTH</b>	<i>Fiber to the Home</i> , Fibra hasta el Hogar.
<b>FTTx</b>	<i>Fiber to the x</i> , Fibra hasta x.
<b>FWM</b>	<i>Four-Wave Mixing</i> , Mezcla de Cuatro Ondas.
<b>GEM</b>	<i>GPON Encapsulation Mode</i> , Modo de Encapsulación GPON.
<b>GNLSE</b>	<i>General Schrodinger Nonlinear Equation</i> , Ecuación No Lineal de Schrödinger Generalizada.
<b>GPON</b>	<i>Gigabit-capable Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva con capacidad de Gigabit.
<b>GVD</b>	<i>Group Velocity Dispersion</i> , Dispersión de Velocidad de Grupo.
<b>ICI</b>	<i>Intercarrier Interference</i> , Interferencia entre Portadoras.
<b>IFWM</b>	<i>Intra-Channel Four-Wave Mixing</i> , Mezcla Intracanal de Cuatro Ondas.
<b>ITU</b>	<i>International Telecommunication Union</i> , Unión Internacional de Telecomunicaciones.
<b>IXPM</b>	<i>Intra-Channel Cross-Phase Modulation</i> , Modulación de fase cruzada intracanal.
<b>IFWM</b>	<i>Intra-Channel Four-Wave Mixing</i> , Mezcla Intracanal de Cuatro Ondas.
<b>MLR</b>	<i>Mixed Line Rates</i> , Velocidades de Línea Mixta.
<b>NG-PON</b>	<i>Next-Generation Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva de Próxima Generación.
<b>NLS</b>	<i>Nonlinear Schrödinger</i> , Schrödinger no lineal.
<b>NRZ</b>	<i>Non Return to Zero</i> , No Retorno a Cero.

<b>OAM</b>	<i>Operations, Administrations, Maintenance</i> , Administración, Supervisión y Mantenimiento.
<b>OCDMA</b>	<i>Optical Code-Division Multiple Access</i> , Sistemas ópticos con multiplexación por división en código.
<b>ODN</b>	<i>Optical Distributed Network</i> , Red Óptica Distribuida.
<b>OFDM</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal.
<b>OLT</b>	<i>Optical Line Termination</i> , Terminal de Línea Óptica.
<b>ONT</b>	<i>Optical Network Terminal</i> , Terminal de Red Óptica.
<b>ONU</b>	<i>Optical Network Unit</i> , Unidad de Red Óptica.
<b>OOK</b>	<i>On-Off Keying</i> , Modulación Binaria Sencilla.
<b>OPEX</b>	<i>Operational Expenditure</i> , Costo de Operación.
<b>OPM</b>	<i>Optical Performance Monitoring</i> , Monitoreo de Desempeño Óptico.
<b>OSNR</b>	<i>Optical Signal to Noise</i> , Relación señal a ruido óptico
<b>OTDM</b>	<i>Optical Time-Division Multiplexing</i> , Multiplexación Óptica por División de Tiempo
<b>OTN</b>	<i>Optical Transport Network</i> , Red de Transporte Óptico
<b>P2MP</b>	<i>Point-to-Multipoint Communication</i> , Comunicación Punto a Multipunto
<b>PERT</b>	<i>Program Evaluation and Review Technique</i> , Técnica de Evaluación y Revisión de Programas
<b>PLT</b>	<i>Pseudo-linear Transmission</i> , Transmisión Pseudolineal
<b>PON</b>	<i>Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva
<b>QoS</b>	<i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio

<b>QPSK</b>	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase
<b>RSOA</b>	<i>Reflective Semiconductor Optical Amplifier</i> , Amplificador Óptico Semiconductor Reflectante
<b>RZ</b>	<i>Return to Zero</i> , Retorno a cero
<b>SBS</b>	<i>Stimulated Brillouin-Scattering</i> , Dispersión Estimulada de Brillouin
<b>SNI</b>	<i>Service Node Interface</i> , Interfaz de Nodo de Servicio
<b>SLR</b>	<i>Single Line Rate</i> , Velocidad de Línea Única
<b>SNR</b>	<i>Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido
<b>SOA</b>	<i>Service Oriented Architecture</i> , Arquitectura orientada a servicios
<b>SPM</b>	<i>self-Phase Modulation</i> , Automodulación de Fase
<b>SRS</b>	<i>Stimulated Ramman-Scattering</i> , Dispersión Estimulada de Ramman
<b>TDM</b>	<i>Time Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Tiempo
<b>TDMA</b>	<i>Time Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Tiempo
<b>UNI</b>	<i>User Network Interface</i> , Interfaz de Red de Usuario
<b>WDM</b>	<i>Wavelength División Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda
<b>XG-PON</b>	<i>10-Gigabit-capable Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva con Capacidad de 10 Gigabit
<b>XGS-PON</b>	<i>10-Gigabit-capable Symmetric Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva Simétrica con Capacidad de 10 Gigabit
<b>XPM</b>	<i>Cross Phase Modulation</i> , Modulación de Fase Cruzada

# INTRODUCCIÓN

La evolución de las tecnologías multimedia ha provocado el desarrollo continuo de muchos tipos de servicio de banda ancha. Por ejemplo, en la banda ancha móvil, el número de abonados está en constante crecimiento con tasas de penetración que han pasado de 4 abonados por cada 100 habitantes en 2007 a 69,3 en 2018, y para banda ancha fija una velocidad mínima de descarga de 2 Mbps. Por lo anterior, resulta importante implementar redes de acceso, que soporten altas velocidades de transmisión de datos y un gran ancho de banda para el transporte de información; siendo la Fibra Óptica, OF (Fiber Optical), el medio de transmisión más idóneo para cumplir con estos requerimientos a nivel de núcleo de red.

Por otra parte, las Redes Ópticas Pasivas, PON (*Passive Optical Network*) se han popularizado como una solución de red de acceso de OF; debido a que soportan el ancho de banda requerido para la transmisión de servicios triple-play, convirtiéndose en una solución para el problema de los cuellos de botella presentes en las redes de acceso, adicionalmente, PON utiliza componentes pasivos de baja potencia que eliminan la necesidad de alimentación de energía en la red de distribución de fibra.

En el artículo “Adaptación de la Teoría de la Información para el Régimen de Propagación Lineal de una Red Óptica DWDM de Próxima Generación” publicado el 5 de junio de 2019 por la revista Lámpsakos, desarrollado por los ingenieros Gustavo Gómez y Giovanni López se propone una ecuación que expresa la eficiencia espectral en términos de la capacidad que se podría brindar para el transporte de una red, esta ecuación es una adaptación de la Teoría de la Información presentada por Shannon, sin embargo, es importante destacar que, dicha ecuación sólo realizó un análisis de diferentes arquitecturas de red para enlaces homogéneos, por lo que, con respecto a las redes de tipo heterogéneas no se ha realizado ningún análisis. El principal aporte de investigación es conocer el comportamiento de la ecuación adaptada de Shannon mencionada anteriormente, para la medida de la eficiencia espectral en una red heterogénea, siendo estas el futuro de las redes ópticas.

Fundamentado en lo expuesto anteriormente, se requiere investigar cómo se afecta la medida de la Eficiencia Espectral para la ecuación adaptada de la Teoría de Shannon en un régimen de propagación Cuasi-Lineal de una arquitectura de red heterogénea de tipo NG-PON.

A continuación, se describe el contenido de este trabajo, distribuido en cuatro capítulos, de acuerdo con la información obtenida en el desarrollo de la investigación.

## **Capítulo 1: Arquitecturas de red FSAN, régimen de propagación y eficiencia espectral.**

Para la realización de este capítulo, se toman como referencia algunas investigaciones sobre redes PON y eficiencia espectral, las cuales sugieren las generalidades de las archi-

tecturas de Red de Acceso al servicio Completo, FSAN (*Full Service Access Network*), más específicamente, a NG-PON y a arquitecturas de red ópticas heterogéneas, régimen de propagación óptico y eficiencia espectral.

## **Capítulo 2: Metodologías, escenarios de simulación y casos de estudio.**

En este capítulo se definen la metodología y herramienta de simulación, las cuales permitirán desarrollar y evaluar mediante escenarios de simulación la medida de la eficiencia espectral de una arquitectura de red heterogénea de tipo NG-PON para un régimen de propagación cuasilineal.

## **Capítulo 3: Evaluación de la eficiencia espectral.**

En este capítulo se va a analizar la medida de la eficiencia espectral para la ecuación adaptada de la Teoría de Shannon en un régimen de propagación cuasilineal de una arquitectura de red heterogénea de tipo NG-PON propuesta en capítulos anteriores, con el fin de identificar los parámetros que intervienen en un buen uso del espectro óptico para sacar el máximo provecho del ancho de banda sin afectar el throughput de la red.

## **Capítulo 4: Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.**

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

# ABSTRACT

The evolution of multimedia technologies has led to the continuous development of many types of broadband service. For example, in mobile broadband, the number of subscribers is constantly growing with penetration rates that have increased from 4 subscribers per 100 inhabitants in 2007 to 69.3 in 2018, and for fixed broadband a minimum download speed of 2 Mbps. Therefore, it is important to implement access networks that support high data transmission speeds and high bandwidth for the transport of information; being Fiber Optic (OF), the most suitable transmission medium to meet these requirements at the network core level.

On the other hand, Passive Optical Networks, PON, have become popular as an OF access network solution; because they support the bandwidth required for the transmission of triple-play services, becoming a solution to the problem of bottlenecks present in access networks, additionally, PON uses low-power passive components that eliminate the need for power supply in the fiber distribution network.

In the article “Adaptación de la Teoría de la Información para el Régimen de Propagación Lineal de una Red Óptica DWDM de Próxima Generación” published on June 5, 2019 by Lámpsakos magazine, developed by engineers Gustavo Gómez and Giovanni López an equation is proposed that expresses the spectral efficiency in terms of the capacity that could be provided for the transport of a network, This equation is an adaptation of the Information Theory presented by Shannon, however, it is important to note that this equation only performed an analysis of different network architectures for homogeneous links, therefore, no analysis has been performed with respect to heterogeneous networks. The main research contribution is to know the behavior of the adapted Shannon equation mentioned above, for the measurement of spectral efficiency in a heterogeneous network, being these the future of optical networks.

Based on the above, it is required to investigate how the Spectral Efficiency measurement is affected by the adapted Shannon’s Theory equation in a Quasi-Linear propagation regime of a heterogeneous network architecture of NG-PON type.

## **Chapter 1: FSAN network architectures, propagation regime and spectral efficiency.**

For the realization of this chapter, some researches on PON networks and spectral efficiency are taken as reference, which suggest the generalities of Full Service Access Network architectures, FSAN, more specifically, to NG-PON and heterogeneous optical network architectures, optical propagation regime and spectral efficiency.

## **Chapter 2: Methodologies, simulation scenarios and case studies.**

This chapter defines the methodology and simulation tool, which will allow to develop

and evaluate through simulation scenarios the spectral efficiency measurement of a heterogeneous network architecture of NG-PON type for a quasi-linear propagation regime.

### **Chapter 3: Evaluation of spectral efficiency.**

In this chapter we will analyze the spectral efficiency measurement for the adapted Shannon Theory equation in a quasilinear propagation regime of a heterogeneous NG-PON network architecture proposed in previous chapters, in order to identify the parameters involved in a good use of the optical spectrum to get the most out of the bandwidth without affecting the throughput of the network.

### **Chapter 4: Conclusions, recommendations and future works.**

This chapter presents conclusions, recommendations and future work related to the most important aspects that contributed to the achievement of the proposed objectives.

# CAPÍTULO 1

## 1. ARQUITECTURAS DE RED DE ACCESO AL SERVICIO COMPLETO, RÉGIMEN DE PROPAGACIÓN Y EFICIENCIA ESPECTRAL

El surgimiento de nuevos servicios de telecomunicaciones, como: video 4K / 8K ultra HD, realidad virtual, multimedia, computación en la nube, entre otros, y la mejora constante de los ya existentes, hace que sea necesario la implementación de tecnologías capaces de satisfacer las demandas tanto de velocidad como de ancho de banda; el medio de transmisión que ofrece ventajas en cuanto a la velocidad de transmisión de datos, es la Fibra Óptica, OF, es por ello que, dichas tecnologías basan su arquitectura en este medio de transmisión. Las redes ópticas pasivas, PON, se han popularizado como una solución de red de acceso de OF; logrando en su tercera generación una arquitectura capaz de ofrecer un rendimiento total de red de 40 Gbps, gracias al estándar de redes ópticas pasivas de próxima generación, NG-PON2 (*Next Generation Passive Optical Network 2*). Estos enlaces de 40 Gbps se pueden lograr mediante la combinación de sistemas heterogéneos de bajas velocidades de transmisión de datos, de 2,5 Gbps y 10 Gbps, lo cual permite analizar en cada combinación el comportamiento de la eficiencia espectral en un régimen de propagación cuasilineal.

Para la realización de este capítulo, se toman como referencia algunas investigaciones al respecto, las cuales sugieren las generalidades de las arquitecturas de red FSAN, más específicamente, a NG-PON y a arquitecturas de red ópticas heterogéneas, régimen de propagación óptico y eficiencia espectral.

### 1.1. ARQUITECTURAS DE RED DE ACCESO AL SERVICIO COMPLETO - FSAN

El Grupo de Red de Acceso al Servicio Completo, FSAN es una organización para los proveedores de servicios de telecomunicaciones líderes en el mundo cuya misión es impulsar los estándares existentes en los servicios y productos de la industria de las telecomunicaciones, creando las condiciones para el desarrollo y la introducción de sistemas de acceso compatible con una gama completa de banda estrecha y banda ancha. FSAN tiene más de 70 organizaciones miembros, incluidos más de 20 operadores de red, que representan a los principales expertos en tecnologías de Red Óptica Pasiva de Banda Ancha, BPON (*Broadband Passive Optical Network*), Red Óptica Pasiva con Capacidad de Gigabit, GPON (*Gigabit-capable Passive Optical Network*), Ethernet sobre Red Óptica Pasiva a 10 Gbps, XG-PON (*10 Gbps Ethernet Passive Optical Network*), Ethernet sobre Red Óptica Pasiva a 10 Gbps Simétrica, XGS-PON (*10 Gbps Symmetrical Ethernet Passive Optical Network*) y NG-PON2 [1]. El grupo ha contribuido a la Unión Internacional de

Telecomunicaciones, ITU (International Telecommunications Union) en la estandarización de una serie de sistemas PON, incluyendo GPON (serie ITU-T G.984) XG-PON (serie G.987) y NG-PON2 (serie G.989). Además, FSAN definió una arquitectura de red general observada en la Figura 1.1 [2]

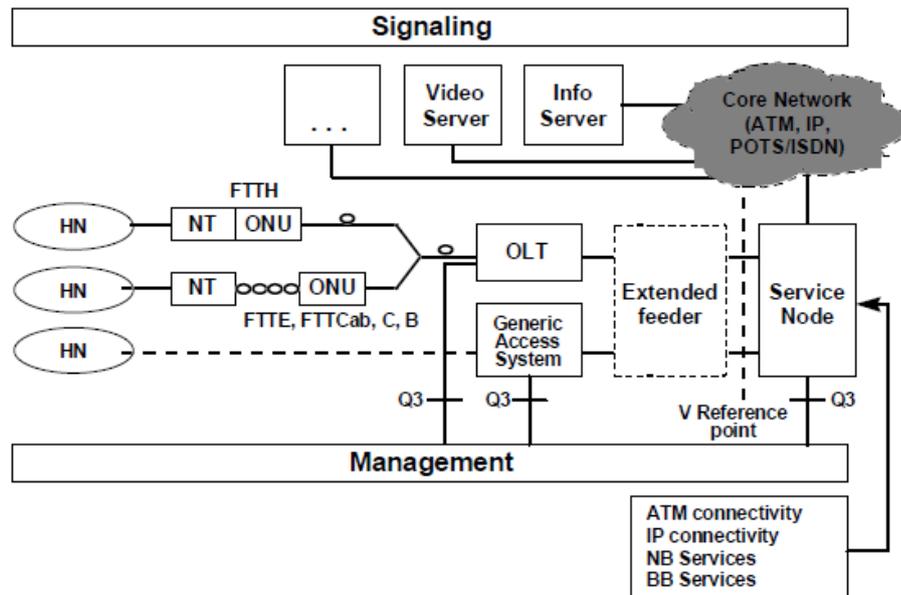


Figura 1.1. Arquitectura de red FSAN de referencia [2].

Asimismo, las redes de acceso FSAN establecen la estandarización de tres bloques: la interfaz para el nodo de servicio, SNI (*Service Node Interface*), la terminal de línea óptica, OLT (*Optical Line Termination*) y la unidad de red óptica, ONU (*Optical Network Unit*). Adicionalmente, se incorporan funciones de Administración, Supervisión y Mantenimiento, OAM (*Operations, Administration, Maintenance*) logrando una solución de gestión rentable, y asegurando un alto nivel de calidad de servicio, QoS (*Quality of Service*) [2].

FSAN es compatible con la tecnología FTTx (*Fiber to the x*) que ha surgido como una solución para aprovisionar las necesidades del mercado, además, ofrece diversas soluciones dependiendo de la demografía de clientes, densidad de estos y demanda de servicios (tipo, crecimiento esperado, ancho de banda, entre otros) siendo la Fibra Hasta el Hogar, FTTH (*Fiber to the home*) el objetivo de la mayoría de los operadores [2].

### 1.1.1. Next Generation Passive Optical Network - NG-PON

Una red óptica pasiva es un sistema de red que envía la señal de todo o casi todo el recorrido hasta el usuario final, se caracteriza por tener un modelo de distribución punto a multipunto, P2MP (*point-to-multipoint communication*) utilizando componentes pasivos [3].

En la Figura 1.2, se observa que una PON está conformada por una OLT, donde se ejerce el control de acceso y está ubicada en la empresa de telecomunicaciones proveedora, la ONU, que se encuentra situada cerca a los usuarios finales, sirven a uno o más usuarios, y la Red de Distribución Óptica, ODN (*Optical Distribution Network*) correspondiente a cada puerto PON de la OLT, los divisores ópticos pasivos o splitters, encargados de dividir la señal óptica hacia cada usuario, de esta manera, se reduce los dispositivos activos en la planta externa y se minimiza el planeamiento de red, contribuyendo a la reducción del costo de inversión, CAPEX (*Capital Expenditure*) y de operación, OPEX (*Operational Expenditure*) [3].

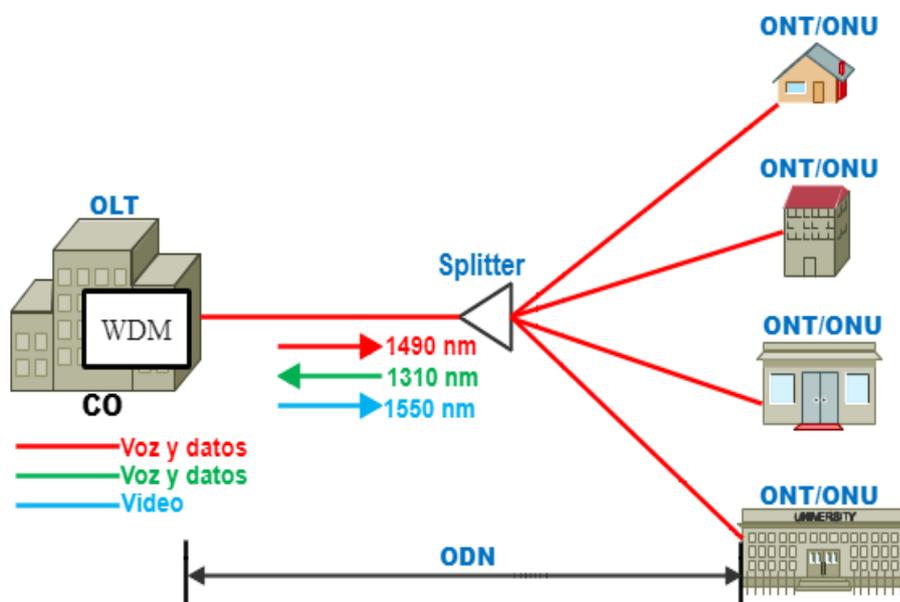


Figura 1.2. Arquitectura de red PON [3].

El desarrollo de las redes PON continuó con el surgimiento de GPON bajo la recomendación ITU-T-G.984, el cual especifica las velocidades de transmisión simétricas y asimétricas de 2,5 Gbps para esta tecnología, que también, tiene la capacidad de soportar tráfico de datos nativos de diferentes servicios, independiente del tipo de protocolo utilizado; GPON ofrece una distancia cerca de 20 km entre el proveedor y el cliente final, manejando amplios niveles de ancho de banda para los servicios, y reduce el tendido de fibra óptica entre el distribuidor y los circuitos de llegada al cliente [4].

Como se mencionó anteriormente, a las redes PON las componen equipos para la transmisión y recepción de datos, entre ellos, la OLT, que se encuentra en la Oficina Central, CO (*Central Office*) y corresponde a un elemento activo de la red, estos equipos se conectan a través de fibra óptica con la red troncal de transporte digital, la cual lo enlaza con las plataformas de servicios y con la red de acceso, también, de fibra óptica, que lleva los diferentes servicios hacia los usuarios. Como la capacidad de ancho de banda de un OLT es amplia, el enlace de fibra óptica se subdivide para diversas ONU's, para ello se requieren

de divisores ópticos, elementos pasivos en la red de acceso, que se encargan de dividir la señal de luz que viaja por el hilo de la fibra en varios caminos correspondientes a cada usuario. De acuerdo con el número total de divisiones, se origina la relación de división total de la red o *splitting*, que generalmente, es 1:32 o 1:64, pero puede ser definida por cada operador. Al final de la red se encuentran los módems de abonado ONU, elementos activos, encargados de entregar los datos a los equipos terminales. Para el enlace de subida se utiliza una longitud de onda de 1310 nm, y para el de bajada, de 1490 nm, sin embargo, para enviar video RF broadcasting se puede utilizar una tercera longitud de onda de 1150 nm, utilizando la tecnología multiplexación por división de longitud de onda, WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), que mezcla la longitud de onda de los datos con la de video [4].

La OLT utiliza multiplexación por división de tiempo, TDM (*Time Division Multiplexing*) para enviar la información de cada ONU en intervalos regulares de tiempo de 125  $\mu$ s, y cada una de estas selecciona la información que le corresponde y omite lo demás. Para controlar permanentemente el flujo de datos, cada ONU utiliza la asignación dinámica del ancho de banda mediante el algoritmo DBA (*Dynamic Bandwidth Allocation*), más específicamente, las ONU informarán su ocupación de memoria intermedia a la OLT, que luego, asignará el ancho de banda ascendente a las ONU en función de sus demandas. En el flujo de datos ascendentes TDM se distribuye la información de la ONT en ranuras de 125  $\mu$ s, utilizando un mecanismo de control del acceso para evitar colisiones de datos, aquí la OLT recibe los datos de todos y distingue lo correspondiente a cada ONT. Para evitar las colisiones de datos y sincronizar el retorno, la OLT evalúa los tiempos de retardo de cada ONU de acuerdo con la distancia hasta el puerto OLT en la central, pues normalmente tienen diferentes distancias entre sí, con el fin de proporcionar una comunicación de datos ascendente eficiente y sin colisiones [4], [5].

GPON cuenta con dos mecanismos de QoS, el primero, DBA, que proporciona apoyo flexible para los diferentes servicios, mejorando la calidad y la eficacia de la velocidad instalada, y el segundo, modo de encapsulación GPON, GEM (*GPON Encapsulation Mode*), que hace diferencia en el servicio mediante el mejoramiento al transporte de datos [5]. Las demandas de tráfico de hasta 10 Gbps conducen a la evolución de GPON a NG-PON, la cual está dividida en dos fases. La primera fase hace referencia a un sistema PON con capacidad de 10 Gbps en al menos una dirección, mientras que, en la segunda fase se logran velocidades hasta de 40 Gbps de bajada y 10 Gbps de subida [1].

#### **10-GIGABIT-CAPABLE PASSIVE OPTICAL NETWORK (XG-PON):**

la Red Óptica Pasiva con Capacidad de 10 Gigabit se divide en dos clases. La primera clase llamada XG-PON1, proporciona transmisión asimétrica con 10 Gbps en sentido descendente y 2,5 Gbps en sentido ascendente; la segunda clase es XG-PON2 que proporciona una transmisión simétrica de 10 Gbps, a la cual se le conoce como, Red Óptica Pasiva Simétrica con Capacidad de 10 Gigabit [6]. Una de las características importantes de este estándar, es el poder coexistir con redes GPON, además del hecho de beneficiar el desarrollo de servicios de nueva generación, como: televisión en alta definición, televisión IP, videoconferencias, entre otros [7]. La Figura

1.3 presenta ejemplos de escenarios de aplicaciones XG-PON.

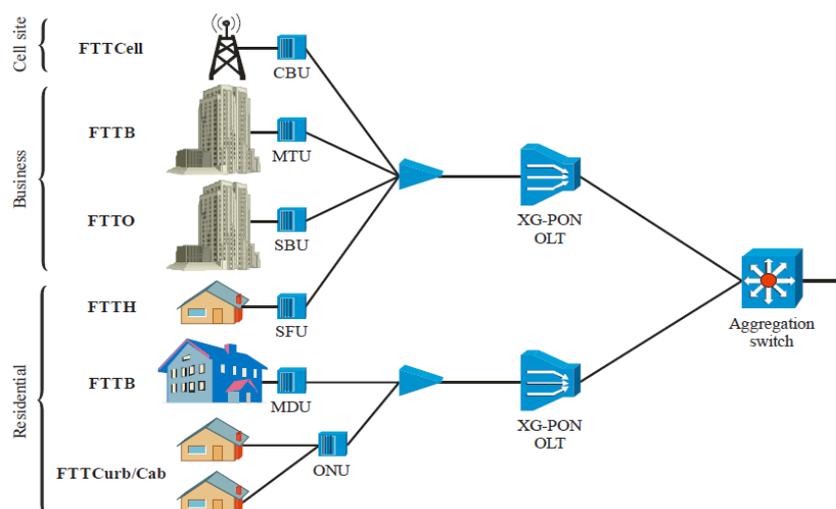


Figura 1.3. Escenarios de aplicaciones XG-PON [8].

XG-PON1 utiliza la banda de longitud de onda 1260 – 1280 nm para el tráfico ascendente y la banda de longitud de onda 1575 - 1580 nm para el tráfico descendente; las bandas de longitud de onda se seleccionaron para ampliar la banda de protección entre las longitudes de onda, lo que reduce la interferencia de la señal. La codificación de línea aplicada en XG-PON1 es 64B / 66B, que es una versión mejorada de 8B / 10B, por lo tanto, reduce la sobrecarga de bit a baudios del 20 % al 3 %. Además, la corrección de errores hacia adelante, FEC (*Forward Error Correction*) era opcional en Ethernet sobre Redes Ópticas Pasivas, EPON (*Ethernet Passive Optical Network*) pero se ha convertido en un requisito obligatorio para XG-PON1 con el uso de Reed-Solomon, RS (255, 223). Las relaciones de segmentación XG-PON1 admitidas son: 1:16 con una distancia de al menos 10 km y una relación de segmentación o de splitter, de 1:32 con una distancia de al menos 20 km [2]. En cuanto a la red de distribución óptica, se puede implementar como una PON con un alcance de hasta 60 km, haciendo uso de extensores activos como amplificadores ópticos o regeneradores óptico-eléctricos-ópticos, antes y después del divisor de línea para conectar múltiples segmentos pasivos pertenecientes a una sola red XG-PON [8].

La coexistencia de XG-PON1 con su antecesora GPON, es un criterio importante cuando se considera una actualización de red. Aunque este enfoque disminuye el costo total, hay un costo adicional asociado con el filtrado de longitud de onda que se requiere en las ONU. La Figura 1.4 muestra un escenario de coexistencia, donde la CO consta de dos OLT, uno para transportar la conexión GPON y la otra para transportar la conexión XG-GPON1. El nuevo equipo llamado WDMr1 se instala en la CO, cuya función es multiplexar / demultiplexar la señal de OLT y de Radiofrecuencia. Del lado del usuario, se requiere un

filtro de bloqueo de longitud de onda para diferenciar el tráfico de datos PON [6].

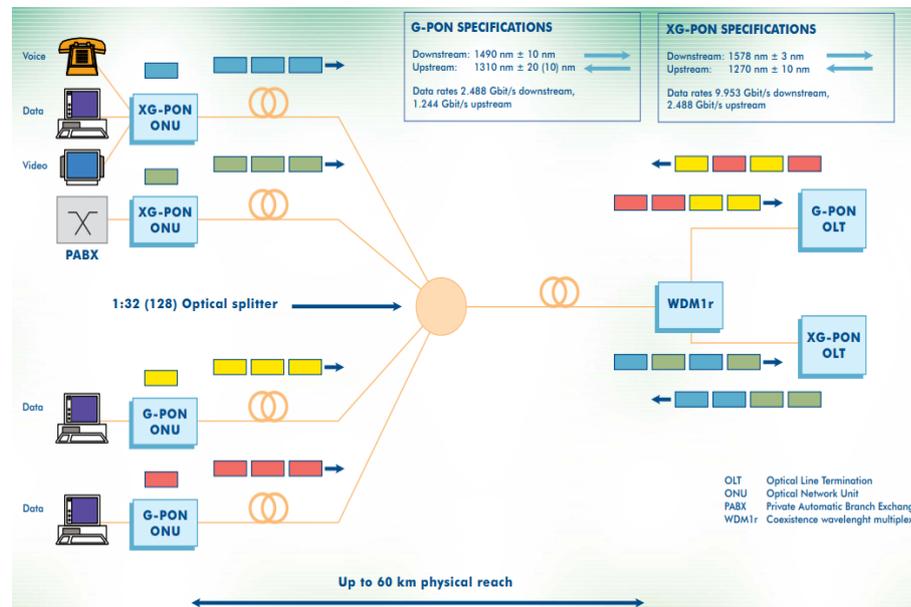


Figura 1.4. Coexistencia de GPON y XG-PON [9].

De acuerdo con la recomendación G.987.1 para XG-GPON1, se propusieron dos escenarios para permitir la migración de redes a XG-GPON1. El primer escenario de migración llamado PON brown-field, consiste en aprovechar la infraestructura de fibra existente resultante de la implementación de otro sistema PON, para ofrecer servicios portadores de mayor ancho de banda, utilizando XG-PON; este escenario cuenta con los siguientes requisitos:

- La coexistencia entre GPON y XG-PON en la misma fibra debe ser compatible para que el recurso de fibra no sea necesariamente abundante.
- Debe minimizar la interrupción del servicio para los suscriptores sin actualización.
- Debe admitir / emular todos los servicios heredados de GPON en el caso de una migración completa.

El otro escenario de migración se denomina PON green-field, que consiste en la implementación de un sistema XG-PON en un área en donde GPON no se había implementado antes, por lo que, el requisito de coexistencia, no es necesario; es decir, este escenario plantea el reemplazo de la conexión de cobre en las instalaciones por una conexión óptica [6].

### 10-GIGABIT-CAPABLE SYMMETRIC PASSIVE OPTICAL NETWORK (XGS-PON): este sistema funciona sobre una infraestructura de acceso óptico de

punto a multipunto a la velocidad de datos nominal de 10 Gbps tanto de bajada como de subida. XGS-PON opera sobre una longitud de onda descendente de 1570 - 1580 nm y una longitud de onda ascendente de 1260 - 1280 nm, lo que permite una mayor compatibilidad a través de la red de distribución óptica con GPON que utiliza diferentes longitudes de onda [10].

Los requisitos generales de la arquitectura de red XGS-PON se especifican en la norma de la ITU-T G.9807.1, en donde se establecen las interfaces de red de usuario, UNI (*User Network Interface*) e interfaces de nodo de servicio, así como las principales configuraciones de implementación que solicitan los operadores de red; entre los principales cambios que caracterizan a XGS-PON, está la adición de la fibra al escenario de punto de distribución, la adición de acceso rápido a terminales de abonado o G.fast UNI definida en UIT-T G.9701, las opciones de coexistencia con GPON y XG-PON utilizando métodos de superposición de longitud de onda y / o TDMA (*Time Division Multiple Access*), extensión de servicios Ethernet para incluir MEF Carrier Ethernet 2.0 y soporte obligatorio de tramas gigantes Ethernet con ONU XGS-PON.

Los sistemas XGS-PON vienen con dos opciones de longitud de onda operativa:

- Conjunto básico de longitud de onda: consiste en la reutilización de la longitud de onda XG-PON, en cuyo caso el sistema tiene que acomodar tanto las ONU de XGS-PON como las ONU de XG-PON heredadas, a través de un esquema de acceso múltiple por división de tiempo, de doble velocidad nativa ascendente y un esquema TDM en downstream.
- Conjunto opcional de longitud de onda: consiste en la reutilización de la longitud de onda de G-PON, para los operadores que no tienen Gigabit PON heredado en el área de despliegue. Esto permite que XGS-PON coexista con XG-PON heredado a través de la superposición de longitud de onda.

Los casos en los que el conjunto de longitud de onda XGS-PON básico existen con el conjunto de longitud de onda opcional XGS-PON son perfectamente válidos [11].

De acuerdo con la recomendación ITU-G.9807.1, existen varios escenarios de migración para satisfacer las necesidades de diferentes proveedores de servicios, a continuación, se describen dos posibles escenarios de migración:

- PON brown field: hace referencia a la implementación de un sistema XGS-PON aprovechando la infraestructura de otro sistema PON ya implementado.
- PON green field: en esta migración se plantea reemplazar la infraestructura instalada por una propia del sistema XGS-PON.

### 1.1.2. Arquitecturas de Redes Ópticas Heterogéneas

Las futuras redes de fibra óptica tienen como objetivo admitir una amplia variedad de tráfico de datos generada por la diversificación de aplicaciones con requisitos de velocidad distintos, necesidades que las actuales redes heredadas de velocidad de línea única, SLR (*Single Line Rate*) con formatos de modulación predefinidos no pueden suplir, debido a que no ofrecen suficiente flexibilidad para satisfacer los requisitos de las demandas con un rango tan amplio de granularidades. Por lo que, se prevé que las futuras redes de fibra óptica sean heterogéneas. Cuando se habla de redes ópticas heterogéneas, se hace referencia a aquellas redes que permiten implementar diferentes capacidades de acceso para diferentes formatos de modulación [12], [13].

Dado que, las velocidades de acceso, el número de longitudes de ondas y los formatos de modulación pueden variar dinámicamente en los receptores y nodos intermedios de red, estas redes deben ser totalmente capaces de reconocer la transmisión de velocidad de bits de la señal y formato de modulación de forma autónoma. Aquí se destaca la importancia de las técnicas de monitorización del rendimiento óptico, OPM (*Optical Performance Monitoring*) empleadas en estos nodos (para permitir la información continua y en tiempo real sobre el alcance de diversas deficiencias de transmisión) [14]

## 1.2. RÉGIMEN DE PROPAGACIÓN ÓPTICO

La luz, como un campo electromagnético con una longitud de onda específica está regida mediante las ecuaciones de Maxwell, al propagarse la onda en el medio o núcleo de la fibra, sufrirá de efectos degradantes de tipo lineal y no lineal los cuales limitarán el rendimiento del sistema. Tecnologías como WDM en las que se permiten transmitir varias señales independientes sobre una sola fibra óptica, logran expandir la capacidad de datos y generar altas velocidades por canal, a costo del uso de altos niveles de potencia para satisfacer el requisito de relación señal-ruido, SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) en el receptor, mientras que, en sistemas de Multiplexado Denso por División en Longitudes de Onda, DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) el espacio estrecho entre canales y las altas velocidades de bits intensifican los efectos no lineales como la mezcla de cuatro ondas, FWM (*Four Wave Mixing*) afectando el rendimiento del sistema en ambos casos [15].

La formación de solitones en fibras ópticas es un fenómeno que involucra efectos no lineales. Se ha demostrado que los solitones aparecen en la fibra como resultado de la interacción entre los efectos no lineales y dispersivos en la región de dispersión anómala [16].

En fibras con núcleos extremadamente pequeños (aprox. 10  $\mu\text{m}$ ) se produce un alto grado de confinamiento, la intensidad en el núcleo es muy elevada, de tal manera que la intensidad puede producir una respuesta no lineal en el material. Se definen en efectos no lineales elásticos e inelásticos [16].

Para valores de potencia elevados, las ondas ópticas pueden interactuar con las moléculas de sílice de la fibra, produciendo procesos inelásticos como dispersión Raman estimulada,

SRS (*Stimulated Raman Scattering*) y dispersión Brillouin estimulada, SBS (*Stimulated Brillouin Scattering*), donde la luz dispersada experimenta un crecimiento exponencial si la potencia excede de un cierto valor umbral [16].

Los efectos elásticos se caracterizan por experimentar un retardo debido a cambios en el índice de refracción por la intensidad de la fuente, conocido como efecto Kerr, el cual se manifiesta en tres diferentes efectos conocidos como Automodulación de fase, SPM (*Selfphase Modulation*), Automodulación de fase cruzada, XPM (*Cross-Phase Modulation*) y FWM. En SPM se autoinduce un cambio de fase no lineal, que al compensarse con el efecto lineal dispersión de velocidad de grupo, GVD (*Group-Velocity Dispersion*) da la formación de pulsos estables llamados solitones ópticos, siendo el GVD originado, por la combinación de la dispersión de guía (depende de la geometría), y de la dispersión Rayleigh propia del material [16]–[18].

Un solitón es definido como una onda solitaria que se propaga en un medio no lineal sin deformarse; los solitones pueden tener diferentes longitudes de onda (o frecuencias) en cualquier rango del espectro electromagnético, a mayor frecuencia, mayor será la energía que posean [18]–[20].

En fibra óptica convencional estos solitones están descritos por una Ecuación de Schrödinger no lineal, NLS (*Nonlinear Schrödinger*) que se produce en el sistema Manakov, un modelo de propagación de ondas en fibra óptica, que utiliza ecuaciones de Maxwell, adaptadas a la propagación de campo en fibra óptica monomodo [21], [22]. Para un medio sin cargas libres como en una fibra óptica, la Ecuación de onda del campo Eléctrico asociada a un haz de luz se puede definir como la Ecuación (1.1): [16], [18].

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0 c^2} \frac{\partial^2 P(r, t)}{\partial t^2} \quad (1.1)$$

Donde:

$E(z, t)$  : Representa el campo eléctrico de tipo escalar.

$c$  : Representa la velocidad de la luz en el vacío.

$P(r, t)$  : Representa la polarización eléctrica inducida.

$\epsilon_0$  : Representa la Permisividad en el vacío.

La polarización eléctrica inducida puede separarse en sus partes lineal y no lineal como:

$$P(r, t) = P_l(r, t) + P_n l(r, t) \quad (1.2)$$

Para desarrollar la Ecuación de propagación se deben tomar algunas consideraciones sobre la no linealidad del sistema. i) La polarización eléctrica inducida no lineal es considerablemente pequeña por lo que se puede ser tratar como una perturbación. ii) El campo óptico puede mantener su polarización a lo largo de la fibra, esto permite usar una aproximación escalar y iii) El campo óptico es cuasi monocromático, así que su ancho espectral  $\delta\omega$  es pequeño comparado con su frecuencia central  $\omega_0$  [16], [18].

Así, para describir la propagación de la señal a través de un núcleo de fibra a una distancia se tiene la Ecuación No Lineal de Schrödinger Generalizada, GNLSE (*General Schrodinger Nonlinear Equation*) [18].

$$\frac{\partial E}{\partial z} = - \underbrace{\frac{\alpha}{2} E}_{\text{Atenuacin}} - j \underbrace{\frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial T^2}}_{\text{Dispersin}} + \underbrace{\frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 E}{\partial T^3}}_{\text{Pendiente de dispersin}} + \underbrace{jY|E^2|E}_{\text{Nolinealidad de Kerr}} \quad (1.3)$$

Esta ecuación define la presencia de los diferentes campos DWDM como las emisiones espontáneamente amplificadas, ASE (*Spontaneous Amplified Emission*) generadas durante el fenómeno Kerr en el cual no se genera transferencia de energía [16].

Donde:

$|E^2|$  : Representa la potencia del canal óptico.

$Y$  : Representa al coeficiente de no-linealidades de Kerr.

$\alpha(Z)$  : Representa la constante de atenuación.

$\beta$  : Representa la constante del modo de propagación en la frecuencia central [18]

La ecuación expresada en términos de degradaciones lineales y no lineales, se puede expresar de la forma descrita en la Ecuación (1.4).

$$\frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{\alpha(Z)}{2} E - j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial T^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 E}{\partial T^3} + jY|E^2|E \quad (1.4)$$

Donde:

$E$  : Representa la envolvente compleja del campo eléctrico óptico.

$Z$  : Representa la distancia de propagación.

$T$  : Representa el parámetro del tiempo en función de la velocidad de grupo.

$\alpha$  : Representa la atenuación en la fibra, que disminuye la potencia de la señal.

$\beta_2$  : Representa la dispersión de la velocidad grupal que provoca la dispersión cromática.

$\beta_3$  : Representa la pendiente de dispersión y hace referencia a las no linealidades de Kerr [18].

En las redes de transporte óptico, OTN (*Optical Transport Network*) en donde se consideran degradaciones de tipo no lineal a cualquier velocidad de transmisión de datos, sobresalen tres regímenes de transmisión, *dispersion managed solitons*, *quasi-linear transmission* y *pseudolinear transmission* [18].

### 1.2.1. Dispersion Managed Soliton

Con el fin de disminuir los efectos no lineales en los sistemas de transmisión lineales se han probado varios mapas de dispersión en busca de conseguir una dispersión relativamente alta para que los efectos no lineales sean menores, y así, compensar la dispersión

acumulada al final de la línea para lograr una dispersión integrada igual a cero [20].

Un método de programación de dispersión llamado gestión de dispersión, propuso el uso de un mapa periódico utilizando fibra de dispersión anómala y dispersión normal alternativamente. El pulso estacionario no lineal que se propaga en la fibra tiene un pico de potencia mayor que el solitón que se propaga en una fibra con dispersión constante, igual al promedio de dispersión del mapa periódico; dicho pulso estacionario se denomina solitón administrado por dispersión, DM soliton (*Dispersion Managed Soliton*). El manejo de la dispersión también fue efectivo en transmisiones de solitones desde la fluctuación de tiempo, que es la principal causa de error de bit en los sistemas de solitones [23].

Los sistemas de comunicación ópticos actuales se basan en dispersión de solitones ópticos gestionados. En redes de larga distancia, la dispersión se puede compensar con la Fibra gestionada por Dispersión, DMF (*Dispersion Managed Fiber*) que implican una alternancia periódica del signo de la dispersión de velocidad de grupo, a lo largo de un enlace de fibra óptica [15]. La tecnología de gestión de dispersión ha sido de fundamental importancia para la transferencia de datos a ultra alta velocidad a través de cables de fibra de vidrio sobre distancias intercontinentales y ahora es ampliamente utilizado comercialmente [24].

Las ventajas más significativas de DM operando en la longitud de onda de dispersión cero son la mejora de la energía del pulso y la reducción de la fluctuación de tiempo de Gordon-Haus (proveniente de fluctuaciones de la frecuencia central) mientras que las otras fuentes de jitter de sincronización pueden permanecer, adicional, se reduce la necesidad de componentes estabilizadores en línea. DM soliton puede propagarse de manera estable a lo largo de una transmisión lineal con cero o incluso dispersión promedio, mientras que el solitón fundamental se propaga de manera estable solo en la región de dispersión anómala [25].

Hay dos escalas de propagación principales en los sistemas de *dispersion managed soliton* típicos: (i) La escala “rápida” corresponde la dinámica de DM soliton que ocurre durante un período de mapa de dispersión; y (ii) La escala “lenta” corresponde a las distancias de propagación que son mucho más grandes que el periodo del mapa de dispersión. A menudo, la dinámica rápida se puede capturar obteniendo ecuaciones de evolución en características clave del pulso, como el ancho del pulso, la potencia máxima, la energía, el parámetro chirp y el ancho de banda [20].

### 1.2.2. Quasi-Linear Transmission

Para la transmisión de velocidades de bits ultra altas se plantean dos enfoques de transmisión: el primero, tipo solitón, donde la forma del pulso se mantiene y el segundo, la transmisión cuasi o pseudolineal, donde los pulsos pueden dispersarse [26].

El régimen cuasilineal, al que igual que el pseudolineal (sección 1.2.3) se caracteriza por tener altas tasas de bits, pulsos con un espectro amplio que se extienden rápidamente por la dispersión de la fibra, ocasionando interacciones no lineales entre los pulsos del

mismo canal, que conducen a la fluctuación de tiempo y amplitud de los pulsos transmitidos. Estas no linealidades intracanales, son: la Mezcla Intracanal de Cuatro Ondas, IFWM (*Intra-Channel Four-Wave Mixing*) y Modulación de Fase Cruzada Intracanal, IXPM (*Intra-Channel Cross-Phase Modulation*) [26]–[28].

En los últimos años, la transmisión de pulso óptico con retorno a cero, RZ (*Return-to-zero*) en fibras fuertemente gestionadas por dispersión ha logrado suprimir ciertos efectos no lineales; con pulsos más cortos se reducen las degradaciones no lineales, debido a que la longitud de dispersión en la fibra será menor que la longitud no lineal. El patrón de intensidad, por lo tanto, cambia rápidamente a lo largo de la fibra y el efecto de no linealidad en la fibra tiende a promediarse, esto es, el concepto de difundir los pulsos tan rápido como sea posible en el dominio del tiempo, creando rápidamente un modelo de intensidad variable, para combatir el impacto de la no linealidad [29]. Así, una etapa de modulación de fase periódica es adicionada a un esquema de modulación simple (RZ) permitiendo un decremento en los efectos que producen la línea de transmisión en los solitones. Este esquema es, en cierto sentido, opuesto al solitón gestionado por dispersión, donde la no linealidad juega un rol importante en preservar la forma del pulso [30].

Los pulsos RZ a menudo se denominan pulsos RZ cuasilineales [31]. Este régimen cuasilineal (sistemas de baja potencia) se rige por la Ecuación No Lineal de Schrödinger Gestionada por Dispersión, DMNLS (*Dispersion-Managed Nonlinear Schrödinger*) (Ecuación (1.5)), donde la no linealidad, es responsable de un cambio de fase en el dominio de frecuencia, que genera cierta ampliación del pulso en el dominio temporal y se conoce como superposición de pulso [32]. Estos sistemas están altamente limitados por la mezcla de cuatro ondas intracanal, que da como resultado una transferencia de energía entre ‘1’ y la creación de pulsos fantasma en los espacios [33]. Los pulsos de retorno a cero utilizados para la transmisión de ‘1’ también experimenta jitter de temporización causado por la modulación de fase cruzada intracanal[34].

$$i\hat{U} - \frac{\langle d \rangle}{2}\omega^2\hat{U} + \hat{N}[\hat{U}(\omega, Z)] = 0 \quad (1.5)$$

Donde:

$\hat{U}$  : Representa la envoltura del campo óptico.

$d$  : Representa la dispersión de velocidad de grupo.

$\hat{N}[\hat{U}(\omega, Z)]$  : Representa la amplitud de que evoluciona en el espacio de Fourier.

### 1.2.3. Pseudo-Linear Transmission

La transmisión pseudolineal, PLT (*Pseudo-linear transmission*) es un método para la transmisión de señales multiplexadas por división en el tiempo de alta velocidad donde las variaciones rápidas de cada forma de onda del canal con dispersión acumulativa permiten un promedio importante de los efectos intracanal de la no linealidad de la fibra

[27]. La expresión “pseudolineal” ha sido elegida para expresar esta característica que, el transporte de alguna manera tiene la apariencia de transmisión “lineal” [35].

PLT implica la optimización compleja del formato de modulación, el mapeo de dispersión y la no linealidad. Estas transmisiones ocupan un espacio entre la transmisión lineal mapeada por dispersión y la transmisión de solitones no lineal. El régimen de transmisión pseudolineal se caracteriza por una rápida ampliación del pulso, lo que resulta en una reducción dramática del efecto solitónico en cada pulso. Como resultado, la compensación de dispersión total se puede utilizar en este régimen [27]. La transmisión pseudolineal óptica son pulsos cortos a alta velocidad de bits que tienen dispersión distinta de cero que varía de 3 a 17 ps / nm / km. En el régimen de transmisión pseudolineal, la dispersión en la fibra es menor que en una fibra no lineal, por lo que, los pulsos ópticos se dispersan rápidamente, reduciendo efectos perjudiciales que pueden resultar de las no linealidades de la fibra, al ser estas alteraciones de transmisión originadas por la interacciones pulso a pulso, estos efectos se pueden cubrir con multiplexores correlacionados en el transmisor [36].

En estos regímenes fuertemente dispersivos, es posible la superposición de un gran número de bits (por ejemplo, decenas de bits) como resultado, los efectos de las no linealidades de fibra Kerr se manifiestan de formas muy diferentes a las de la modulación de fase cruzada y la mezcla de cuatro ondas convencionales que limitan los regímenes tradicionales de transmisión asociados con señales de baja velocidad [37]. Sin embargo, este tipo de transmisión es limitada principalmente por las no linealidades de tipo intracanal como la modulación de fase cruzada intracanal, la mezcla intracanal de cuatro ondas y la modulación auto fase [35].

En PLT, en el canal interno las interacciones no lineales comienzan a desvanecerse mientras que, las interacciones intracanal, aumentan. Los efectos no lineales intracanal tienen lugar entre bits del mismo canal, una descomposición de la no linealidad de Kerr (similar a XPM y FWM) [37]. Estas interacciones no lineales entre pulsos vecinos del mismo canal se convierten en la interacción no lineal dominante en el régimen de transmisión pseudolineal y esencialmente determina la energía máxima por bit, así como el mapa de dispersión óptimo. Estas interacciones no lineales intracanal entre pulsos son la modulación de fase cruzada intracanal y mezcla intracanal de cuatro ondas [27].

En este régimen, la transmisión óptima se obtiene cuando la dispersión residual neta al final del sistema es casi cero, una característica común con la transmisión cuando la falta de linealidad de la fibra es insignificante, es decir, cuando la transmisión es lineal [27].

### 1.3. EFICIENCIA ESPECTRAL

Las redes de fibra óptica son redes de telecomunicaciones que permiten la transmisión de información a altas velocidades; constituyen un nuevo tipo de redes de comunicaciones que sustituyen los enlaces de microondas y las tradicionales redes de cobre. La oferta actual de redes de fibra óptica permite transmitir información desde unos cuantos Mbps

hasta el orden de los Gbps [38].

El gran desafío de las redes ópticas, es satisfacer la demanda de tráfico mientras se mantienen o reducen los costos de la red, así que, para ello, no sólo basta con aumentar la capacidad<sup>1</sup>, sino que también, es necesario mejorar la utilización general del ancho de banda. Se requerirá una combinación de capacidad de transporte mejorada a través de una mayor eficiencia espectral y velocidad de bits junto con una mejor utilización de la red, al integrar la preparación eléctrica de subcanales en el sistema de transmisión [39].

La teoría de la Información fue desarrollada por C. E. Shannon en su artículo “A Mathematical Theory of Communication” expone los principales fundamentos de la teoría de la información relacionados con la potencia promedio transmitida, el ancho de banda de un canal, la potencia de ruido entre otros.

Una fuente de información produce un mensaje que debe ser comunicado a un terminal receptor, el principal problema es reproducir ese mensaje exactamente o aproximadamente en el receptor, usualmente estos mensajes están correlacionados con un sistema y tienen que ser seleccionados de un conjunto de mensajes posibles, así que, el sistema debe estar diseñado para funcionar con cada posible selección [40].

Un mensaje puede ser una secuencia de letras, una función en el tiempo  $f(t)$ , una función en el tiempo con otras variables como es el caso de la televisión en blanco y negro  $f(x; y; t)$  correspondientes a coordenadas espaciales y tiempo, o varias funciones con distintas variables  $f(x; y; t)$ ,  $g(x; y; t)$ ,  $h(x; y; t)$  y  $(x; y; t)$ , como es el caso de la televisión a color. El transmisor es quien procesa el mensaje para producir una señal apropiada sobre el canal o medio de transmisión, por ejemplo, en telefonía proporcional a la presión del sonido se crea una corriente eléctrica, en el receptor se realiza el proceso inverso del transmisor. Dependiendo del tipo de mensaje y señal los sistemas de comunicación se pueden clasificar en discretos, continuos y mixtos [18], [40].

- Canales discretos:

Un sistema discreto es aquel donde la señal como el mensaje son una secuencia de símbolos discretos, por ejemplo, en la telegrafía el mensaje es una secuencia de letras y la señal es una secuencia de puntos, guiones o espacios. Para un canal discreto hay una secuencia elecciones de un conjunto finito de elementos o símbolos para transmitir de un punto a otro. Dichos símbolos pueden tener diferentes duraciones de tiempo como por ejemplo, los puntos y guiones [18].

El índice de mensaje llamado  $W$  representa al conjunto de símbolos codificados en el transmisor  $X_i, = X_1, X_2, X_n$  que al transmitirse por el canal sufren de una distorsión causada por la matriz de distribución de entrada, para cada estado de entrada se tendrá un conjunto de probabilidad  $p(Y_i|X_i)$ , de producir diversos símbolos posibles  $Y_i, = Y_1, Y_2, Y_n$ , lo que se conoce como entropía; al ser decodificados los símbolos se tendrá un índice de

---

<sup>1</sup>Entiéndase por capacidad, el número de bits transmitidos por unidad de segundo.

respuesta  $\hat{W}$ , donde se puede afirmar que, una transmisión será exitosa si los símbolos enviados de tipo  $W$  son iguales a los símbolos recibidos de tipo  $\hat{W}$ , de modo que dichos símbolos recibidos serán una función de los símbolos enviados y de la variable de ruido del canal de tipo  $\hat{W} = f(w)$ .

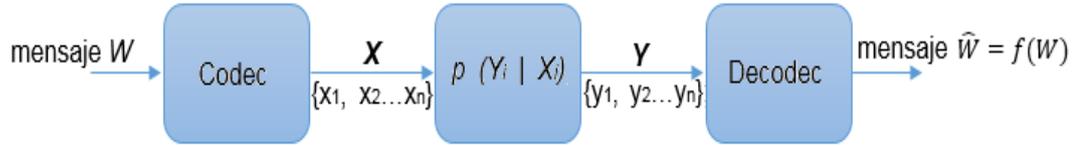


Figura 1.5. Representación de un canal discreto sin memoria [18].

La matriz de probabilidad condicional del canal  $p(Y_i|X_i)$ , está definida por las características del canal y establece la relación logarítmica entre los símbolos de entrada  $X$  y los símbolos de salida  $Y$ . La entropía  $H$  se define como la medida de que un evento en cuestión ocurra y es el promedio de estos  $H_i$  ponderados de acuerdo con la probabilidad de ocurrencia de los estados en cuestión, en las siguientes ecuaciones se definen la entropía de la fuente  $H(X)$ , entropía de salida del canal  $H(Y)$  y la entropía condicional  $H(X|Y)$ .

$$H(X) = \sum_{x_i \in X} P(x_i) \log_2 \left( \frac{1}{P(x_i)} \right) \quad (1.6)$$

$$H(Y) = \sum_{y_j \in Y} P(y_j) \log_2 \left( \frac{1}{P(y_j)} \right) \quad (1.7)$$

$$H(X|Y) = \sum_{y_i \in Y} P(y_i) \sum_{x_i \in X} P(x_i|y_j) \log_2 \left( \frac{1}{P(x_i|y_j)} \right) \quad (1.8)$$

Así, la información mutua de entrada y salida del canal se define como la Ecuación (1.9):

$$I(X|Y) = H(Y) - H(Y|X) = H(X) - H(X|Y) \quad (1.9)$$

La probabilidad de los símbolos de entrada depende de la codificación del canal discreto, la información mutua de entrada y salida está controlada por la distribución probabilística de símbolos de entrada  $P(X_i)$ , cantidad que depende únicamente de las características

del canal baja la probabilidad  $P(Y_i|X_i)$ , lo que se conoce como la capacidad del canal y está definido por la Ecuación (1.10) [18].

$$C_{bit/usocanal} = \max_{p(x_i)} I(X, Y) \quad (1.10)$$

La capacidad de un canal se puede describir dando la tasa de aumento, como el número de bits por segundo requerido para especificar la señal particular utilizada

- Capacidad del Canal Continuo sin memoria:

Un sistema continuo es aquel en el que el mensaje y la señal son funciones continuas de tiempo  $f(t)$ , por ejemplo, radio o televisión. Las señales de entrada o transmitidas  $X = (X_1, X_2, X_n)$  serán muestras pertenecientes a una variable continua relacionada con una función de densidad de probabilidad  $P(X)$ , donde se define la potencia promedio de la señal como la Ecuación (1.11) [18]:

$$P = \int_x x^2 p(X) dx \quad (1.11)$$

Para el canal continuo, se define la entropía diferencial de la fuente  $h(X)$  en la Ecuación (1.12), y en la Ecuación (1.13) se obtiene la entropía de fuente máxima  $h_{max}(X)$ , bajo la función de densidad de probabilidad Gaussiana:

$$h(X) = - \int_X p(X) \log_2 p(X) dx \quad (1.12)$$

$$h_{max}(X) = \frac{1}{2} \log_2(2\pi\sigma_{in}^2) + \frac{1}{2} \log_2(e) = \frac{1}{2} \log_2(2\pi\sigma_{in}^2 e) \quad (1.13)$$

Las señales de salida o recibidas del canal serán versiones perturbadas por el ruido durante la transmisión. Existen dos posibles casos, si se transmiten señales determinadas, y en recepción siempre se obtiene la misma señal como respuesta, siendo esta última una función definida de la otra, el efecto es llamado distorsión, el cual puede corregirse realizando una función inversa, pues, no hay dos señales transmitidas que produzcan la misma señal recibida. Pero si la señal presenta diferentes cambios en transmisión, la señal recibida será una función de la señal transmitida y una variable adicional, el ruido, considerado como una variable de probabilidad [18].

Entonces, la señal de salida  $Y_i$ , equivale a la señal de entrada  $X_i$ , más la señal de ruido aditivo  $Z$ . Para determinar la capacidad  $C$  de un canal continuo, con una distribución de ruido de tipo Gaussiano  $h(Z)$  se determina como  $Y_i = X_i + Z$ , y dado que la información mutua del canal Gaussiano está definida como la Ecuación (1.14) [18]:

$$I(X; Y) = h(X) - h(X|Y) \quad (1.14)$$

$$I(X; Y) = \frac{1}{2} \log_2(2\pi e\sigma_{out}^2) - \frac{1}{2} \log_2(2\pi e\sigma_{ch}^2) \quad (1.15)$$

$$I(X; Y) = \frac{1}{2} \log_2\left(\frac{\sigma_{out}^2}{\sigma_{ch}^2}\right) \quad (1.16)$$

Considerando  $\sigma_{out}^2 = \sigma_{in}^2 + \sigma_{ch}^2$  &  $\sigma_{in}^2 = P$ ,  $\sigma_{ch}^2 = N_0B$

$$I(X; Y) = \frac{1}{2} \log_2\left(\frac{\sigma_{in}^2 + \sigma_{ch}^2}{\sigma_{ch}^2}\right) \quad (1.17)$$

$$I(X; Y) = \frac{1}{2} \log_2\left(1 + \frac{P}{N_0B}\right) \quad (1.18)$$

La Ecuación (1.18) representa la capacidad del canal Gaussiano, ya que la distribución maximiza la entropía de la fuente, lo que equivale a la Ecuación (1.19):

$$C_{bit/usocanal} = \frac{1}{2} \log_2\left(1 + \frac{P}{N_0B}\right) \quad (1.19)$$

Partiendo de la Ecuación (1.19), se puede relacionar el ancho de banda y la tasa de transmisión del sistema, con la capacidad de un canal de comunicación Gaussiano, respecto a la cantidad de información que representa cada pulso en proporción al periodo de dos pulsos, como se puede observar en la Ecuación (1.20) [18]:

$$R_{[bps]} \leq C_{[bps]} = \frac{1}{2T} \log_2\left(1 + \frac{P}{N_0B}\right) \quad (1.20)$$

Si se toma cada pulso como una señal continua  $\text{sinc}(t/T)$ , su ancho de banda en el dominio de la frecuencia será proporcional a  $1/2T$  Hz, por lo que se puede denotar capacidad del canal en bit/s en términos de la Ecuación (1.21):

$$C_{[\text{bits/s}]} = B \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N_0 B} \right) \quad (1.21)$$

La Ecuación (1.21) establece el límite fundamental de la tasa de transmisión que se puede obtener sobre un canal Gaussiano limitado en banda y potencia, con una probabilidad de error arbitrariamente baja.

Así, la eficiencia espectral está definida como la tasa máxima de bits alcanzable por unidad de ancho de banda y la cual dependerá de aspectos como: el tipo de modulación, el régimen de propagación, el ancho de banda ocupado por el canal y la relación señal a ruido; se mide en bps/Hz, y cuanto mayor sea su valor, mejor aprovechada estará la banda de frecuencia usada para transmitir los datos [18], [41]. La Ecuación (1.22) representa cómo se calcula la eficiencia espectral.

$$\eta_{[\text{bps/Hz}]} = C_{[\text{bps}]} / B_{[\text{Hz}]} \quad (1.22)$$

Donde,

$\eta_{[\text{bps/Hz}]}$  : Representa la eficiencia espectral.

$C_{[\text{bps}]}$  : Representa la capacidad.

$B_{[\text{Hz}]}$  : Representa el ancho de banda.

La mejora de la eficiencia espectral en sistemas de OF es muy importante, debido a que, al aumentar dicha eficiencia en un canal, se logra representar la misma cantidad de información en un menor ancho de banda o mayor información en un mismo ancho de banda. Para un sistema de transmisión, la mayor eficiencia espectral de canal para un determinado ancho de banda y una relación señal / ruido óptico, OSNR (*Optical Signal to Noise*) se rige por el límite de Shannon, por debajo del cual no es posible la transmisión fiable para ninguna tasa de transmisión, pues no se puede brindar calidad infinita a la señal respecto al piso de ruido [39].

#### 1.4. ADAPTACIÓN DE LA TEORÍA DE LA INFORMACIÓN PARA UN RÉGIMEN DE PROPAGACIÓN CUASILINEAL

En el grupo de Investigación GNTT de la Universidad del Cauca, en el año del 2019 se presentó con el trabajo titulado “Mejora de la Eficiencia Espectral en redes DWDM a 40

Gbps a través de los Formatos de Modulación Avanzados DPSK y DQPSK”, una ecuación que expresa la eficiencia espectral en términos de la capacidad que se podría brindar para el transporte de una red, dicha ecuación es una adaptación de la Teoría de la Información presentada por Shannon, sin embargo, es importante destacar que se presentó sólo para enlaces de tipo homogéneo, comportamientos constantes y régimen de propagación lineal, por lo que, presenta ciertas limitantes, al ser las redes heterogéneas, el futuro las redes ópticas.

Esta información va a ser retomada nuevamente con el fin de abordar la medida de la eficiencia espectral en sistemas cuasilineales no heterogéneos en arquitecturas de red NG-PON.

Según Shannon, la capacidad de una comunicación de un canal, es la velocidad de bits máxima que se puede transmitir sin error, teniendo en cuenta el ruido, el ancho de banda disponible y el límite de potencia. Lo que implica usar códigos fuertes de corrección de errores y que la robustez de la codificación aumente a medida que se acerca a la capacidad límite [42]. La capacidad está dada por la fórmula de Shannon, como se observa en la Ecuación (1.23)

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1.23)$$

Donde:

$C$  : Representa la capacidad máxima del canal en bps.

$B$  : Representa el ancho de banda del canal medido en Hz.

$\frac{S}{N}$  : Representa la relación señal a ruido [43].

La Ley de Shannon establece que la capacidad de un sistema depende del ancho de banda del canal, BW (*Bandwidth*) y de la relación señal a ruido. Por lo tanto, un sistema más eficiente con peor SNR puede ofrecer el mismo rendimiento que otro menos eficiente, y viceversa [44]. En el caso de un sistema DWDM, el rendimiento se puede mejorar utilizando un ancho de banda óptico más amplio o aumentando la eficiencia espectral, para la primera opción se suelen requerir amplificadores adicionales por lo que, aumentar la eficiencia espectral suele ser la alternativa más económica [42].

En un sistema DWDM, el límite de eficiencia espectral es la capacidad por canal dividido por el espaciado de canales. Los sistemas actuales DWDM utilizan la modulación binaria sencilla, OOK (*On-Off Keying*) con detección directa; en busca de mejorar la eficiencia espectral, se ha investigado una variedad de técnicas de modulación binarias y no binarias para optimizar la forma del pulso, y conseguir el ancho de banda más bajo, para el cual, las distorsiones debidas a la Interferencia entre símbolos, ISI (*Intersymbol interference*) siguen siendo aceptables, entre las más destacadas se encuentra la modulación duobinaria, que permite el uso de formas de pulso de menor ancho de banda sin causar un aumento significativo en la ISI, logrando un incremento de la eficiencia espectral de 0,6 b/s/Hz [45], [46].

En el régimen lineal, el límite de eficiencia espectral es independiente de dispersión cromática, porque es posible, en principio, compensar completamente la dispersión en el receptor [42].

En el régimen no lineal, las degradaciones limitan las distancias de transmisión, como el efecto Kerr, que tiene el mayor impacto en la capacidad del canal, donde la intensidad de la señal óptica agregada perturba el índice de refracción de la fibra, modulando así la fase de señales. En algunas investigaciones se argumenta que la capacidad de los sistemas DWDM está limitada fundamentalmente por XPM, pues a medida que se propaga una señal, la dispersión cromática convierte la modulación de fase inducida por XPM en ruido de intensidad [42]. Efectos no lineales derivados de la reducción del espacio entre canales y un mayor número de canales será uno de los impedimentos mayores en la multiplexación por división de longitud de onda [47].

Para un sistema óptico basado en WDM se pueden manejar parámetros como: el número de canales copropagantes, la potencia en la señal de entrada, el espaciamiento por canal y régimen de propagación. Así, la Ecuación (1.22) se puede expresar como una adaptación a las redes de nueva generación, tal cual como se observa en las Ecuaciones (1.24) y (1.25) [18]:

$$C_{1[bits/s]} = B_{[ch1]} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{[sch1]}}{N_0 B} \right) \quad (1.24)$$

$$C_{2[bits/s]} = B_{[ch2]} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{[sch2]}}{N_0 B} \right) \quad (1.25)$$

Donde:

$P$  : Representa la potencia de cada canal de entrada.

$N_0$  : Representa el ruido del canal.

Para transmisiones con modulaciones simples con sólo efectos de tipo lineal generados por penalidades de potencia, sin que la correlación lineal y no lineal de los canales propagantes afecten en el medio; y sólo considerando la respuesta de tipo lineal y definiendo que la relación  $N_0$  no depende del cambio de longitud de onda del canal y manteniendo la misma potencia de salida para los  $\varepsilon$  canales multiplexados de tipo  $i$  y los  $\varphi$  canales multiplexados de tipo  $j$ ; la capacidad neta del sistema estará dada en términos de la Ecuación (1.26) [18]:

$$C_{tot[bits/s]} = B_{[ch1]} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{[sch1]}}{N_0 B} \right) + B_{[ch2]} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{[sch2]}}{N_0 B} \right) \quad (1.26)$$

Generalizando la ecuación anterior, se tendría la Ecuación (1.27):

$$C_{tot[bits/s]} = \left( \sum_{i=1}^{\varepsilon} B_{[chi]} + \sum_{j=1}^{\varphi} B_{[chj]} \right) \log_2 \left( 1 + \frac{P_{s-ch}}{N_0 B} \right) \quad (1.27)$$

La Ecuación (1.27) define que para un sistema híbrido de  $\varepsilon$  canales de tipo  $i$  y  $\varphi$  canales de tipo  $j$ , por ejemplo, para canales tipo  $i$  y  $j$  de 2,5 Gbps y 10 Gbps de acceso, se ve incrementado aproximado de cuatro veces la ocupación espectral de la señal por bps transmitidos, comportamiento que corresponde a la relación entre el ancho de banda ocupado y la tasa de transmisión nominal, lo que implica que la señal tipo  $j$  solo dispone de 1/4 de energía de bit en comparación con una señal tipo  $i$ , requiriendo 4 veces más potencia promedio para mantener la misma relación OSNR, la Ecuación (1.27) no tiene presente el espaciamiento de los canales ópticos, ni la respuesta lineal o no lineal del medio [18].

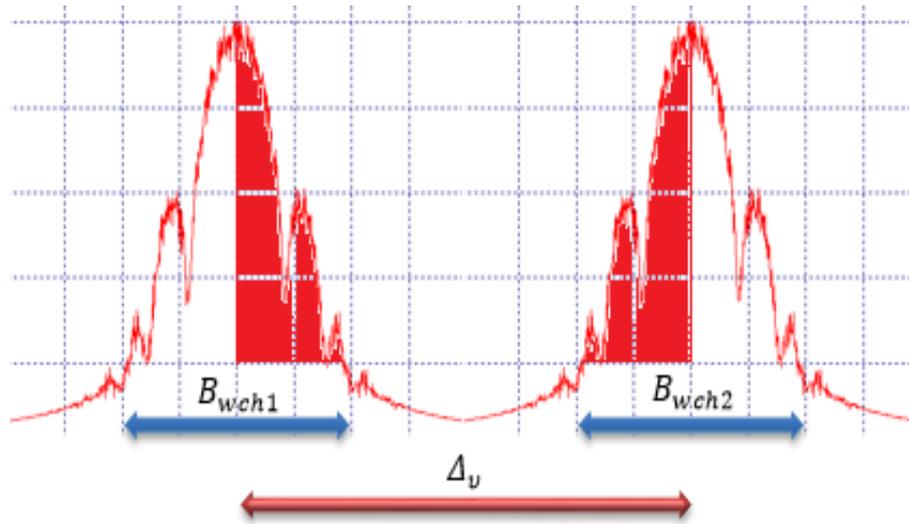


Figura 1.6. Espaciamiento Óptico vs Ancho de Banda de Canal [18].

Si se tiene presente este espaciamiento  $\Delta_v$ , partiendo de la Figura 1.6, se puede calcular el límite de la eficiencia espectral, si el ancho de banda de los canales ocupados es menor que el espaciamiento de los canales adyacentes, la eficiencia espectral estaría dada por la Ecuación (1.28).

$$\eta_{[bps/Hz]} = \frac{C_{0ch1[\frac{bits}{s}]} + C_{0ch2[\frac{bits}{s}]}}{\frac{B_{0ch1[Hz]}}{2} + \frac{B_{0ch2[Hz]}}{2} + \Delta_v[Hz]} \quad (1.28)$$

Es decir, que para realizar el cálculo de la eficiencia espectral se necesita que el ancho de banda lateral de cada uno de los espectros simétricos propagantes en el medio esté contenido dentro del espaciamiento implementado en el sistema DWDM.

Si se busca disminuir el espaciamiento de canales adyacentes hasta un límite en el cual no se genere Interferencia entre portadoras, ICI (*Intercarrier Interference*) dependiente del tipo de modulación y del régimen de propagación, la eficiencia máxima total de un sistema que implementa múltiples canales, estaría representada por la Ecuación (1.29) [18]:

$$\eta_{[bps/Hz]} = \frac{\sum_{i=1}^{\varepsilon} B_{[chi]} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{s-chi}}{N_0 B} + \sum_{j=1}^{\varphi} B_{[chj]} \log_2 \right) + \frac{P_{s-chj}}{N_0 B}}{\frac{B_{chi[Hz]}}{2} + \frac{B_{chj[Hz]}}{2} + (N-1)\Delta_v} \quad (1.29)$$

Donde, la capacidad total del sistema es dividida sobre la mitad del ancho de banda inferior ocupado por el primer canal óptico de la grilla espectral (frecuencia menor), más la mitad del ancho de banda superior ocupado por el ultimo canal óptico de la grilla espectral (frecuencia mayor), más el espaciamiento por canal representado como  $(N-1)\Delta_v$  (N corrimientos de frecuencia) [18].

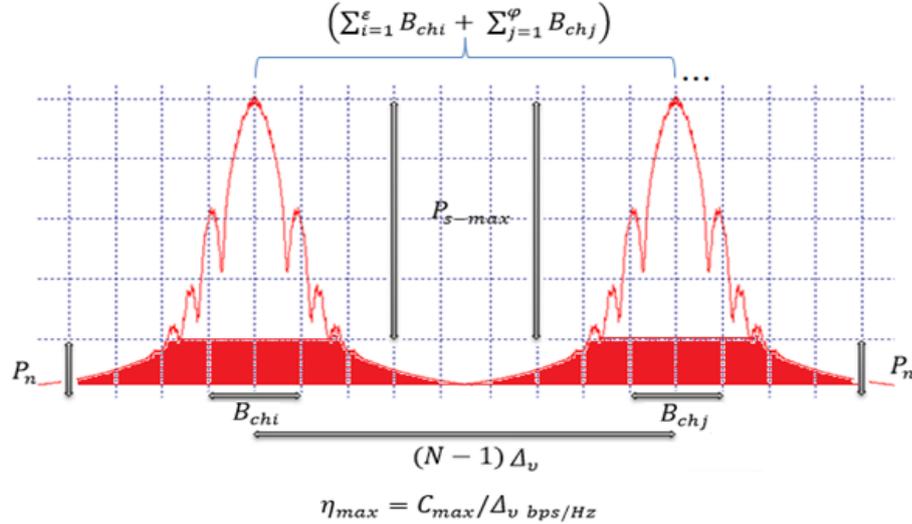


Figura 1.7. Relación de Comportamiento Óptico en términos de la Teoría de la Información Adaptada [18]

Como se puede observar en la Figura 1.7, se encuentran relacionados todos los parámetros descritos en la Ecuación (1.29), por lo que es posible manipular estos factores en función de mejorar la eficiencia espectral.

En el presente trabajo de grado se va a hacer uso de la Ecuación (1.29) para definir el comportamiento de la eficiencia espectral en un sistema cuasilineal para una red con arquitectura heterogénea tipo NG-PON.

Para hacer frente al aumento exponencial del ancho de banda, se requiere una actualización de la red de acceso. Como es sabido, las redes de acceso de próxima generación admitirán una capacidad de hasta 40 Gbps, convirtiendo a las redes ópticas pasivas, en un candidato prometedor para estas redes de acceso óptico de banda ancha de alta capacidad, debido a su rentabilidad [48]. En las redes de acceso se ha venido usando diferentes técnicas de transmisión, como por ejemplo, la Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales, OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) que ofrece una ventaja en la mejora de la eficiencia espectral debido a la flexibilidad en términos de asignación de frecuencia y tiempo y a la supresión de las bandas de guarda, respecto a la Multiplexación por división de frecuencia, FDM (*Frequency Division Multiplexing*) convencional [49].

La red de transporte es una de las más afectadas por el crecimiento del tráfico, por lo que, requiere un aumento en el throughput, para ello, la comunidad óptica ha venido explorando la viabilidad de varias opciones, como: aumentar el ancho de banda óptico, admitir múltiples núcleos de fibra y múltiples modos de propagación de fibra, incluso, aumentar la eficiencia espectral [39], [50]. Pero algunos de los inconvenientes en las redes de transporte típicas son: la baja eficiencia espectral de fibra, dificultad para soportar supercanales de gran ancho de banda e inflexibilidad en la reconfiguración y modificación del ancho de banda de la red, afortunadamente, se han propuesto varias soluciones para mitigar estos inconvenientes, como por ejemplo, el uso de una red de transporte óptico de nueva generación basada en los conceptos de operación de espectro ágil y asignación de ancho de banda elástica, esta red de nueva generación se denomina red de transporte óptico coherente de multiplexación por división de frecuencia ortogonal, CO-OFDM (*Coherent Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)[51].

Los formatos de modulación de orden superior y los supercanales espectrales son clave para maximizar la eficiencia espectral en las redes de transporte óptico de próxima generación, posponiendo / minimizando costosas implementaciones de fibra adicionales y actualizaciones ópticas reconfigurables de nodo multiplexor de agregar / soltar. Una cuadrícula flexible de DWDM es clave para acomodar eficientemente los canales de medios que requieren aproximadamente de 50 GHz de espectro contiguo [52].

*Nota de autor*

*Mediante la realización de este capítulo se definieron tanto las características generales de las Redes Ópticas Pasivas, como los diferentes regímenes de propagación ópticos a tener en cuenta, asimismo, se mencionó el concepto de eficiencia espectral y la importancia que tiene este en el desarrollo del presente trabajo de grado, en conjunto con la adaptación de la Teoría de la Información para el régimen de propagación escogido. Además, se abordó cuáles son las soluciones que se plantean para las futuras evoluciones de las redes ópticas.*

## CAPÍTULO 2

### 2. METODOLOGÍAS, ESCENARIOS DE SIMULACIÓN Y CASOS DE ESTUDIO

En este capítulo se define la metodología y herramienta de simulación, las cuales permitirán desarrollar y evaluar mediante escenarios de simulación la medida de la eficiencia espectral de una arquitectura de red heterogénea de tipo NG-PON para un régimen de propagación cuasilineal.

#### 2.1. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

La simulación es una técnica que permite reproducir la esencia de un fenómeno sin reproducir el fenómeno en sí, la simulación de redes ópticas permite diseñar y experimentar haciendo uso de herramientas software para recrear con “exactitud” los eventos, propiedades, características y funcionamiento del sistema permitiendo que sean estudiados con una inversión menor a la que se necesitaría en la experimentación sobre un modelo real [53].

Se realizó una búsqueda de herramientas de simulación para redes ópticas, tanto de código abierto como de software licenciado. A continuación, se describen algunas de las herramientas de simulación encontradas:

##### 2.1.1. Optsim

OptSim es una herramienta de software licenciado que pertenece a Synopsys Inc, para el diseño y simulación de sistemas de comunicación óptica a nivel de propagación de señales. Con técnicas de simulación de vanguardia, una interfaz gráfica de usuario fácil de usar e instrumentos de medición similares a los de un laboratorio [54]. Cuenta con una gran biblioteca de modelos de componentes flexibles y algoritmos de simulación, OptSim ha sido ampliamente validado, demostrando fiabilidad con un gran número de canales WDM, y posee una gran base instalada en organizaciones de investigación e industriales [55].



Figura 2.1. Logo del Software Optsim [56].

OptSim provee múltiples motores de simulación los cuales permiten técnicas de simulación complementarias. Esto habilita de gran modo la flexibilidad en el modelado y la simulación de sistemas, como enlaces de comunicaciones de corta distancia, sistemas de telecomunicaciones DWDM de ultra larga distancia, grandes redes metropolitanas con caminos de realimentación y transitorios EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) en la extracción y la adición de canales [55].

OptSim es ideal para el diseño asistido por computadora de sistemas de comunicación óptica que incluyen, entre otros: sistemas de comunicación óptica coherentes, formatos de modulación avanzados, Sistema DWDM / CWDM con amplificación EDFA, Raman, SOA (*Service Oriented Architecture*), sistemas FTTX / PON, incluidos BPON, G (E) PON, WDM-PON, PON coherente, PON bidireccional basado en RSOA, Enlaces fotónicos analógicos y digitales de CATV, radio sobre fibra y microondas, OCDMA / OTDM , compensación de dispersión electrónica (EDC), Óptica de espacio libre e Interconexiones ópticas [55].

OptSim permite la creación de prototipos virtuales de sistemas de comunicación óptica para aumentar la productividad, reducir el tiempo y costos de comercialización mediante la optimización del diseño haciendo uso de balances de potencia, ganancia, mapa de dispersión, adecuación de la forma del pulso y de su chirrido, preénfasis en transmisores, posicionamiento de amplificadores, análisis de las pérdidas en la transmisión y medidas correctivas (PMD, SPM, XPM, FWM), técnicas de modulación, espaciado de canales, Simulación de Monte-Carlo del sistema para evaluar la sensibilidad frente a fenómenos aleatorios. Incorpora interfaces con herramientas de terceros como MATLAB y Luna Optical Vector Analyzer. Además, posee una interfaz de programación de aplicaciones (API) para lenguajes de programación como C / C ++, a nivel de dispositivo cuenta con interfaces como BeamPROP y LaserMOD que proporcionan un potente flujo de diseño de niveles mixtos para circuitos y sistemas optoelectrónicos. La amplia biblioteca de componentes predefinidos del fabricante facilita el modelado de dispositivos disponibles comercialmente y modelado eléctrico avanzado con motor SPICE integrado [55].

### 2.1.2. Optisystem

Optisystem es un paquete completo de diseño de software licenciado, perteneciente a Optiwave Systems Inc, que permite a los usuarios planificar, probar y simular enlaces ópticos en la capa de transmisión de las redes ópticas modernas [57].



Figura 2.2. Logo del software OptiSystem [56].

OptiSystem permite la planificación, prueba y simulación jerárquica de diseños de redes ópticas, transmisión monomodo / multimodo, entre otras, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. Su elaborado paquete de diseño proporciona información global sobre el rendimiento del sistema y ayuda a las especificaciones de tolerancia de diseño. La tabla de análisis de costos del sistema se puede diseñar de acuerdo con el sistema, diseño o componente y exportar a otras aplicaciones. Con el mismo se puede diseñar, probar y optimizar cualquier tipo de enlace óptico a nivel físico y analizar las redes ópticas de banda ancha de los sistemas de larga distancia LAN y MAN. Posee un nuevo ambiente de simulación poderoso y una definición jerárquica de componentes y sistemas; con una visión global de la actuación de un sistema real [57].

OptiSystem permite el diseño de escenarios teniendo en cuenta cada uno de los elementos que componen un sistema WDM, además, es posible obtener el espectro óptico de la señal luego de la etapa de multiplexación [57].

El entorno de diseño profesional de OptiSystem puede simular las nuevas tecnologías PON, tales como los distintos tipos de Acceso Múltiple por División de Código Óptico, (OCDMA, *Optical Code-division Multiple Access*), técnicas para arquitecturas OCDMA-PON. El robusto entorno de simulación permite a los usuarios planificar, probar y simular enlaces ópticos en la capa física de una variedad de redes ópticas pasivas [58].

Entre las aplicaciones de Optisystem, se destacan:

- Diseños de red WDM/TDM o CATV.
- Diseño en anillo SONET/SDH
- Diseños de redes ópticas que incluyen OTDM, anillos SONET / SDH, CWDM, DWDM,

PON, Cable, OCDMA.

-Óptica de espacio libre (FSO), Radio sobre fibra (ROF), OFDM (directo, coherente).

-Formatos de modulación (RZ, NRZ, CSRZ, DB, DPSK, QPSK, DP-QPSK, PM-QPSK, QAM-16, QAM-64).

-Análisis del rendimiento del sistema (diagrama de ojo / factor Q / BER, potencia de señal / OSNR, estados de polarización, diagramas de constelación, penalizaciones lineales y no lineales) [58]

### 2.1.3. Optilux

Es un software lanzado en el año 2009, consiste en una colección de herramientas de código abierto que proporciona técnicas avanzadas para diseñar, simular y analizar sistemas de comunicación óptica.



Figura 2.3. Logo de Optilux [59].

Optilux se implementa como una caja de herramientas Matlab / Octave y explota eficientemente la interfaz MEX para acelerar el cálculo. La caja de herramientas incluye rutinas para describir y analizar muchos aspectos de los sistemas ópticos, que incluyen [59]:

- Generadores de patrones de bits.
- Formatos de modulación multinivel.
- Transmisión WDM.
- Fibras ópticas en régimen no lineal.
- Métodos Karhunen-Loève para la evaluación del desempeño.
- Estimación de Monte Carlo
- Efectos de polarización.
- Es de código abierto, por lo que cualquier fragmento de código es completamente legible.

- Es rápido, gracias a la interfaz MEX y a un código cuidadosamente optimizado.
- Optilux admite formatos de modulación avanzados.
- Optilux puede operar en campos eléctricos de polarización simple o dual [59].

#### 2.1.4. Viavi FiberChekPRO

FiberChekPRO fue lanzado en el año 2007 es un software de código abierto para el análisis e inspección de fibra automatizado para una red óptica. La verificación de rendimiento garantiza la conservación de las interconexiones de fibra óptica. El software realiza la adquisición de la imagen de la fibra y encuentra defectos junto con su ubicación en relación con el núcleo de la fibra. Cuando se utiliza con microscopios digitales, identifica y caracteriza los defectos y la contaminación, y proporciona un resultado de pasa o falla de acuerdo con la configuración de los criterios de falla preconfigurados. Además, permite a los usuarios importar datos guardados desde dispositivos Viavi (como SmartClass Fiber), archivar datos, generar informes y obtener mediciones de potencia óptica. La opción de informes consolidados permite la comparación entre múltiples pruebas realizadas en diferentes fibras [60].



Figura 2.4. Logo de Viavi Solutions [61].

La gran desventaja de los softwares de código abierto radica en que, desde sus lanzamientos no han tenido actualizaciones.

En la Tabla 2.1, se observa la comparación de las principales características de los cuatro softwares para simulación de sistemas ópticos, que fueron investigados.

Después de revisar las principales características de las herramientas de simulación mencionadas, se pudo concluir que, las herramientas de software libre, a diferencia de las pagas, no poseen las características necesarias para realizar las simulaciones del presente Trabajo de Grado; por otra parte, los dos softwares licenciados cumplen con los requisitos necesarios para las simulaciones requeridas. Al final, se optó por escoger Optsim, ya que la Universidad del Cauca cuenta con la licencia para su uso.

Característica	Optisim	Optisystem	Optilux	FiberChekPRO
Licenciado	Sí	Sí	No	No
Interfaz gráfica	Alta	Alta	Baja	Baja
Requerimientos Hardware	Bajo	Medio	Bajo	Bajo
Requisitos del Sistema	Windows 10 y Linux con kernel y glibc superior a 2.6.32-504 y a 2.12, respectivamente	Windows 8.1 y Windows 10.	Windows	Windows
Integración con otras herramientas	Sí	Sí	Sí	No
Componentes de librerías	Alto	Alto	Bajo	Bajo
Complejidad de manejo	Media	Media	Baja	Baja
Obtención del Software	Fácil	Media	Muy fácil	Muy fácil

Tabla 2.1. Cuadro Comparativo entre las herramientas de simulación investigadas.

## 2.2. METODOLOGÍAS

A continuación, se va a definir la metodología de investigación para el desarrollo del presente Trabajo de Grado, y la metodología de simulación para la implementación en las plataformas.

### 2.2.1. Metodología de Investigación

La metodología de investigación a utilizar para el desarrollo del Trabajo de Grado, es el modelo de Técnica de Evaluación y Revisión de Programas, PERT (*Program Evaluation and Review Technique*) el cual define un modelo de seguimiento y gestión, aplicado al sector de las tecnologías que sirve para planificar proyectos e identificar flujos de trabajos optimizados, cuya idea básica es generar un diagrama compuesto por las distintas tareas de un proyecto y sus respectivos plazos, de forma que sea posible visualizar la importancia de las labores que se encuentran interconectadas [62].

En PERT se deben tener en cuenta las siguientes definiciones [63]:

- **Nodos** : Representan instantes en el tiempo. Específicamente, representan el ins-

tante de inicio de una o varias actividades, y simultáneamente, el término de las actividades.

- **Holgura:** Es el tiempo que se puede atrasar una actividad sin afectar la duración total del proyecto.
- **Ruta crítica:** Es la que determina la duración total del proyecto, además, las actividades que la conforman deben hacerse forzosamente en el tiempo establecido.

### 2.2.2. Metodología de Simulación

Después de realizar una investigación previa de las diferentes metodologías de simulación características: SCRUM, programación extrema (XP), Kanban, Desarrollo Dirigido por Pruebas (TDD), se seleccionó la metodología Proceso Unificado Racional, RUP (**Rational Unified Process**) para el desarrollo del trabajo de grado. RUP es un proceso de desarrollo de software de Rational, una división de IBM, es una metodología ágil que se caracteriza por ser flexible, adaptarse al cambio, y que cumple con el manifiesto ágil, agrupado en cuatro valores fundamentales: individuos e interacciones sobre procesos y herramientas, software funcionando sobre documentación extensiva, colaboración con el cliente sobre negociación contractual y respuesta ante el cambio sobre seguir un plan, y comprende las siguientes etapas [64].

- **Inicio** : en esta etapa se establece la idea del proyecto, requisitos y delimita su alcance. El equipo de desarrollo determina si vale la pena continuar con el proyecto y qué recursos se necesitarán.
- **Elaboración:** la arquitectura del proyecto y los recursos necesarios se evalúan más a fondo. Se basa en analizar el dominio del problema y el diseño, establecer una base arquitectónica sólida, desarrollar el plan del proyecto y eliminar los elementos de mayor riesgo.
- **Construcción:** se lleva a cabo la construcción del producto por medio de una serie de iteraciones, para cada iteración se selecciona algunos casos de uso con su análisis y diseño, y se procede a su implementación y pruebas.
- **Transición:** se busca garantizar que se tiene un producto preparado para su entrega a los usuarios [64].

Cada fase del Rational Unified Process se puede dividir en iteraciones, cada iteración aborda una parte de la funcionalidad total que da como resultado un lanzamiento (interno o externo) de un producto ejecutable, que crece de forma incremental. Se puede determinar si han aparecido nuevos requisitos o han cambiado los existentes, afectando a las iteraciones siguientes [64].

El proceso se puede describir en dos ejes:

- El eje horizontal: representa el tiempo y muestra el aspecto dinámico del proceso a medida que se lleva a cabo.

- El eje vertical: representa el aspecto estático se describe en términos de actividades, artefactos, trabajadores y flujos de trabajo [64].

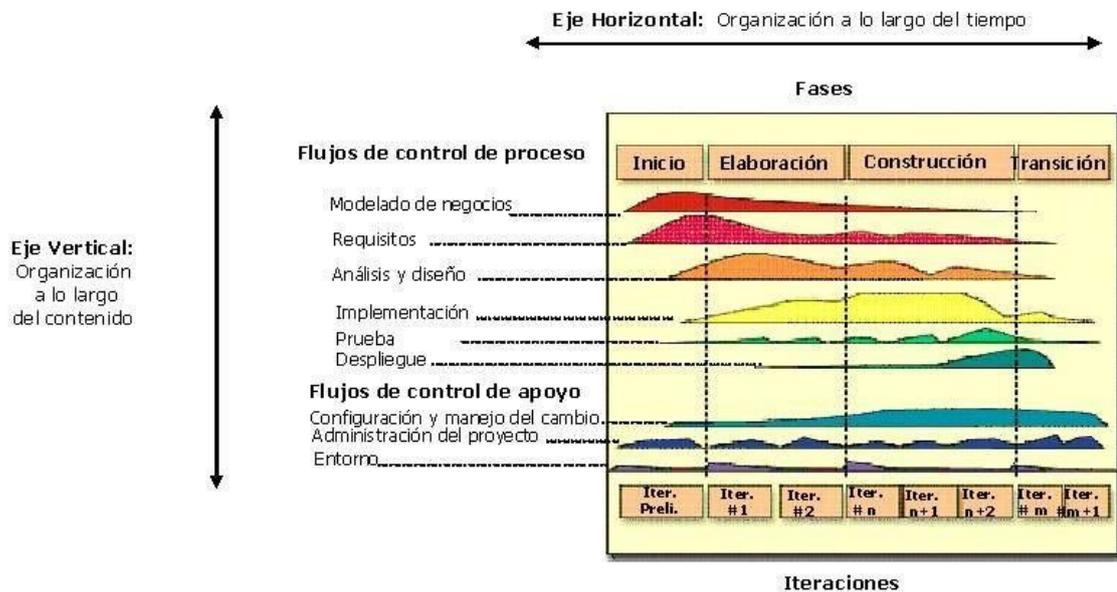


Figura 2.5. Metodología RUP [64].

Teniendo en cuenta las características de las diferentes metodologías de simulación estudiadas, se optó por escoger la metodología RUP, la cual se adapta a los requerimientos necesarios para el desarrollo del presente Trabajo de Grado.

Por otra parte, en la siguiente figura se observa el diagrama de flujo con el cual se desarrollarán las simulaciones en el presente Trabajo de Grado.

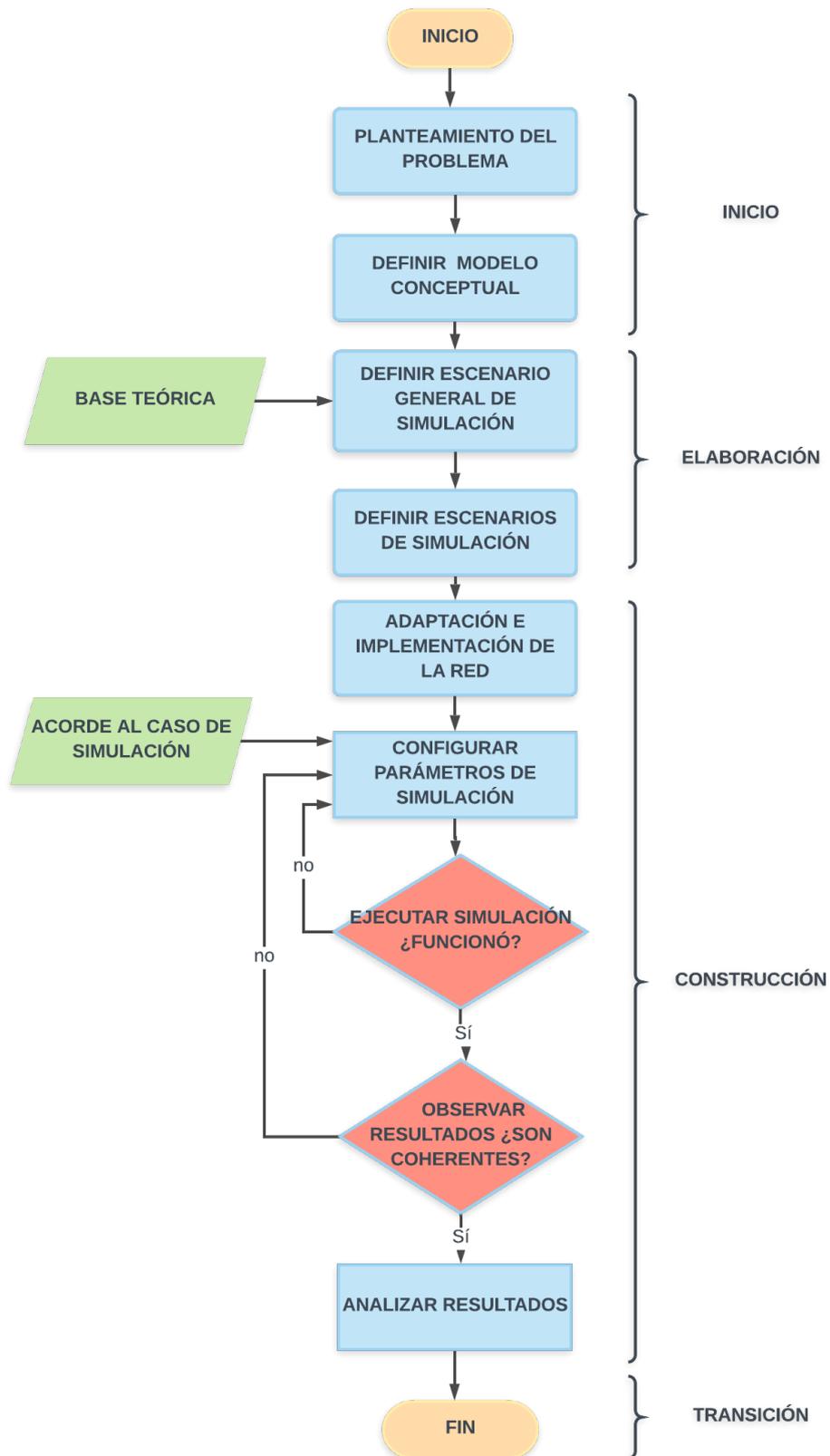


Figura 2.6. Diagrama de flujo para el proceso de simulación.

## 2.3. MODELO GENERAL DE RED

En esta sección se van a estudiar algunos tipos de redes, que permitirán establecer el modelo general de red para el presente Trabajo de Grado.

### 2.3.1. REDES DWDM

La Multiplexación por División de Longitud de Onda, WDM, es una tecnología que permite enviar señales de diferentes longitudes de onda juntas en el extremo de transmisión, y luego separar las señales de cada longitud de onda en el extremo de recepción haciendo uso de un multiplexor y demultiplexor, respectivamente, lo que suministra un gran ancho de banda a nivel físico y mantiene la señal que se transporta en las longitudes de onda de forma independiente, al igual que el formato de modulación, de esta manera, el ancho de banda se multiplica y se posibilitan las comunicaciones bidireccionales [65].

La clasificación de los sistemas WDM se define en los estándares propuestos por la ITU, teniendo en cuenta el espaciamiento entre longitudes de onda, siendo espaciado aproximado un sistema CWDM y un sistema denso DWDM [66], [67]. En la Figura 2.7, se observa la arquitectura de un sistema DWDM.

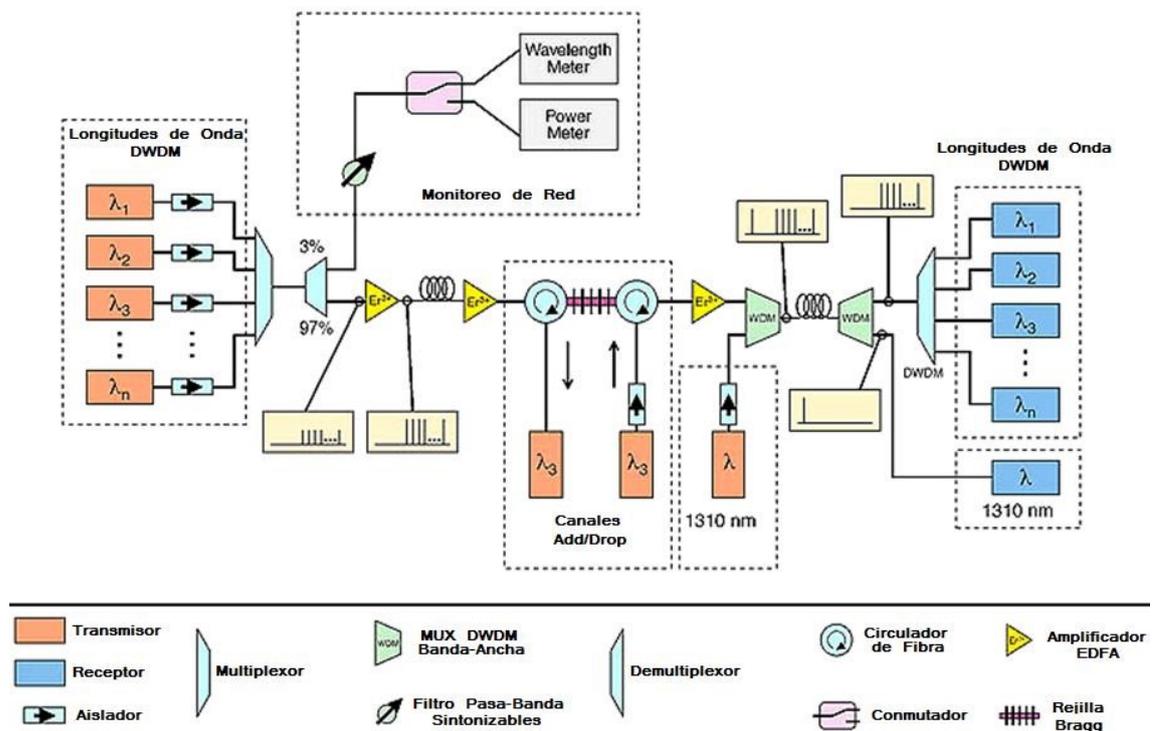


Figura 2.7. Arquitectura de un Sistema DWDM [68].

En redes WDM el ancho de banda de una fibra puede dividirse hasta en 160 canales alcanzando velocidades de hasta Tbps. En la actualidad las redes de fibra monomodo

son capaces de transportar señales a 10 Gbps en 64 longitudes de onda o más, lo que se conoce como Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa, DWDM [66]. Un sistema DWDM puede manejar múltiples canales a bajas velocidades de transmisión de datos o un solo canal de alta velocidad, su velocidad de línea en un camino de luz es una compensación entre su capacidad y su alcance transparente [69].

Según el estándar **ITU-T G.694.1**, los sistemas DWDM se caracterizan porque están en la banda C y el espaciamiento entre canales es de 100 GHz o menos, definiendo el ancho de banda total ocupado por un determinado número de canales. Debido a este espaciamiento, DWDM puede incorporar ocho o más canales dentro de la banda de los 1550 nm [67]. En la Figura 2.7 se muestra la arquitectura y componentes de un sistema DWDM para  $n$  canales, el cual incluye transmisores, receptores, multiplexores, demultiplexores y amplificadores [70].

Por otra parte, la fibra óptica es el medio de transmisión en redes ópticas, una guía de onda compuesta por un núcleo (core) de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), por el que se envían pulsos de luz. Estos son los elementos que limitan la capacidad y longitud del sistema de comunicaciones, debido a tres efectos: la dispersión, las pérdidas y la no linealidad [71].

Existen diferentes clasificaciones de las fibras ópticas; según el modo de propagación se dividen en monomodo y multimodo, el monomodo significa que en la fibra sólo puede propagarse un modo de la luz, mientras que, en multimodo pueden propagarse varios modos de la luz a la vez. La principal diferencia entre fibra monomodo y multimodo, es el diámetro del núcleo de la fibra, la longitud de onda, la fuente de la luz y el ancho de banda. La fibra monomodo se caracteriza por tener una baja dispersión intermodal (ensanchamiento de pulsos transmitidos) que se debe al cambio del índice equivalente del modo fundamental con la longitud de onda, conocido también como dispersión cromática, lo que implica una limitación en el ancho de banda, como la diferencia entre el tiempo de llegada de los diferentes modos es muy pequeña, se solapan unos con otros aunque el pulso de entrada a la fibra sea muy estrecho, siendo el resultado final un pulso ensanchado en el dominio del tiempo; a este fenómeno por el cual la velocidad de grupo del modo fundamental depende de la frecuencia, de modo que las diferentes componentes espectrales del pulso viajan a una velocidad diferente, se conoce como Dispersión de Velocidad de Grupo, GVD (*Group Velocity Dispersion*) mientras que, con una fibra multimodo de salto de índice se produce una dispersión considerable debido a las distintas velocidades de grupo de los modos propagativos [71].

Se han realizado diferentes avances en la construcción de fibras ópticas, para transmitir información sobre un amplio rango espectral. Las fibras ópticas pueden ser fabricadas con dopantes para usos particulares, como Neodimio ( $\text{Nd}^{3+}$ ), Erblio ( $\text{Er}^{3+}$ ), Iterbio ( $\text{Yb}^{3+}$ ), Tulio ( $\text{Tm}^{3+}$ ), Holmio ( $\text{Ho}^{3+}$ ), Samario ( $\text{Sm}^{3+}$ ) y Praseodimio ( $\text{Nd}^{3+}$ ). Estas tierras raras se utilizan en el núcleo más no en el revestimiento y se caracterizan porque sus iones tienen la propiedad de absorber luz a cierta longitud de onda por ejemplo, los electrones de los iones del Erblio pueden absorber rangos de longitud de onda de 980 nm, y con ello, alcanzar un estado excitado, para luego decaer a un estado base y emitir una fluorescencia

en la tercera ventana de transmisión de comunicaciones ópticas correspondiente a los 1500 nm a los 1600 nm, por ello, es una de las fibras dopadas más usadas [72]. También, se disponen de fibras ópticas monomodo hechas de silicio con pérdidas menores a 0,2 dB/km en la tercera ventana e incluso los fabricantes manipulan la Dispersión Cromática, CD (*Chromatic Dispersion*) para lograr diversos requerimientos [71]. Por tal motivo, la ITU regula y clasifica las diversas fibras monomodo en 4 categorías de acuerdo a las propiedades de CD: (NDSF, *Non-Dispersion-Shifted Fiber*), (DSF, *Dispersion-Shifted Fiber*), (NZ-DSF, *Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber*) y (WNZ-DSF, *Wideband Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber*)[18].

En las fibras ópticas DSF se incorpora un índice de refracción escalonado, de centro a bordes, con el fin de desplazar el mínimo de dispersión hasta la tercera ventana, aunque no son muy recomendadas para sistemas WDM, debido al fenómeno no lineal producido por la combinación de dos o más portadoras ópticas que generan nuevas frecuencias, conocido como FWM, que puede ser más intenso si la dispersión es nula a la longitud de onda de operación, pues las señales indeseadas se moverán a la misma velocidad que las señales deseadas. Sin embargo, las fibras NZDSF se han diseñado para mitigar las no linealidades de los sistemas WDM buscando que la dispersión sea diferente de cero en la banda de ganancia de los amplificadores dopados con Erblio, reduciendo el efecto del FWM. Otras soluciones empleadas para afrontar el problema de la dispersión cromática, es la utilización de rejillas de Bragg, en donde las componentes de longitudes de onda diferentes de un pulso ensanchado en las rejillas, se reflejan a posiciones específicas a lo largo del dispositivo, el resultado es un retardo de grupo diferencial, con el máximo retardo proporcional a la longitud de la rejilla y las fibras DCF que cuentan con una dispersión negativa muy grande, utilizadas para compensar la dispersión de las fibras monomodo estándar en la tercera ventana. Otra fibra interesante es la conocida como FDF que, presenta un mínimo de dispersión en 1310 nm y 1550 nm, relativamente alta atenuación en torno a 0,28 - 0,3 dB/km, y alto precio [71].

Dentro de las fibras monomodo se destaca la fibra SMF con una atenuación de unos 0,2 dB/km y una dispersión cromática de 16 ps/km\*nm en la tercera ventana (1550 nm). En la segunda ventana la dispersión es nula pero la atenuación es mayor casi el doble que en la tercera ventana [18].

Fabricantes como Corning y Lucent, Coherent, Nufern diseñan fibras con características que beneficien la calidad de la señal en el enlace de transmisión, dichos parámetros favorecen considerablemente el diseño del enlace, el desempeño del mismo, incorporando nuevos esquemas de modulación [18].

## ■ Láser

El láser es el dispositivo monocromático encargado de emitir una sola longitud de onda que es coherente, es decir, su fase es conocida en cualquier punto y momento. Consta de una cavidad resonante, un medio de ganancia que emite fotones al absorber energía y una fuente de bombeo, el cual puede ser lumínico, eléctrico o químico.

Para sistemas de comunicaciones ópticas basados en fibra se suelen emplear longitudes de onda de 810 nm, 1310 nm y 1550 nm respectivamente, también se pueden emplear diferentes tipos de láseres dopados con Erblio, CW, VCSEL o láseres de semiconductor. Los láseres de semiconductor en comunicaciones ópticas se dividen a su vez en diodos láser FP (Fabry Perot) y diodos láser DFB (Distributed Feedback) [72].

Un diodo láser FP es aquel que puede emitir un rango de longitudes de onda con un ancho espectral amplio de alrededor de 5 nm, mientras que, un DFB tiene un ancho espectral estrecho de alrededor de 0,05 nm (requerido en comunicaciones ópticas de alta velocidad) haciendo que estos últimos tengan un mayor costo, su principal diferencia reside en la forma en cómo se diseña la cavidad resonante [72].

Un VCSEL es un láser de emisión superficial con cavidad vertical, es un diodo semiconductor que emite luz en un haz cilíndrico, posee una corriente de umbral de 4 mA, alcanzando potencias ópticas del orden de 10 mW. Su longitud de onda central es de aproximadamente 850 nm, con un ancho espectral de 1 nm y aplicación en transmisión de datos en el rango de velocidad de 100 Mbps a 1 Gbps [73]. Por otra parte, un láser CW es aquel que emite un rayo láser continuo con una salida de calor controlada, como duración e intensidad del rayo. El primer láser de onda continua fue un láser de helio - neón que operaba a 1153 nm. Poco después, se demostró una versión que funciona con la longitud de onda de emisión ahora común de 632,8 nm [74].

Tipo de Dispositivo	Potencia de Salida [Mw]	Longitud de Onda de Operación [nm]	Ancho de Banda	Tipo de Fibra
Láser Fabry-Perot	1 a 10	850,1310,1550	>10 Ghz	Multimodo, Monomodo
Láser DFB	40 a 100	1310 a 1064	>10 Ghz	Monomodo
VCSEL	<10	850	>10 Ghz	Monomodo
Láser CW	Hasta 1 W	355 a 1154		Monomodo

Tabla 2.2. Cuadro Comparativo de diferentes tipos de Láseres, adaptado de [75].

En un sistema WDM, cada longitud de onda necesitaría ser separada antes de ser amplificada electrónicamente, y después recombinada antes de ser retransmitida. Los amplificadores ópticos son los encargados de regenerar la señal óptica sin la necesidad de convertirla en una señal eléctrica, lo que supone una total transparencia de los datos, es decir, es independiente del formato de modulación de la señal, se

caracterizan por poseer una alta ganancia y potencia de salida que consigue duplicar o triplicar la distancia óptima entre repetidores eléctricos sin embargo, también amplifica el ruido además de la señal, degradándose la relación señal a ruido en el receptor [71].

## ■ Amplificadores

Los dos principales tipos de amplificadores ópticos son los amplificadores láser semiconductores y los amplificadores dopados con tierras raras. Un amplificador láser semiconductor es un semiconductor modificado, una señal débil se envía a través de la región activa del semiconductor, que, mediante la emisión estimulada que tiene lugar cuando el fotón pasa muy cerca de un electrón excitado, resulta en la emisión desde el semiconductor de una señal más potente. Los tipos principales de amplificadores láser son, el amplificador Fabry-Perot, que es básicamente un semiconductor láser, y el TWA, cuya principal diferencia es la reflectividad de los espejos extremos, de alrededor de un 30 % en los Fabry-Perot, lo que genera resonancia y anchos pasos de banda de alrededor de unos 5 GHz, por lo que, no son apropiados para un sistema WDM y un 0,01 % en los TWA [71].

Los amplificadores de fibra dopada, son tramos de fibra dopados con un elemento capaz de amplificar la luz como el Erblio, que proporciona ganancia en la región de 1525 - 1560 nm. En la parte final de la fibra, un láser transmite una señal bastante intensa a una longitud de onda menor, que excita los átomos dopantes transfiriéndolos a un estado de mayor energía, produciendo emisión estimulada. La ganancia típica de los EDFA está en torno a los 25 dB y experimentalmente ya se ha demostrado la posibilidad de conseguir ganancias superiores a 51 dB. En general, los láseres de bombeo utilizados trabajan a 980 y 1480 nm, con una eficiencia en ganancia de 10 dB/mW y 5 dB/mW, respectivamente [71].

Por otra parte, los amplificadores conocidos como PDFFA, tienen unas características de diafonía y de ruido muy bajas, y posibilitan altas ganancias, son capaces de operar sobre un rango de unos 50 nm en la región de 1280 - 1330 nm [71]. La Tabla 2.3 muestra las características típicas de los amplificadores ópticos.

Tipo de amplificador	Región de ganancia	Ancho de banda de ganancia	Ganancia
Semiconductor	Cualquiera	40 nm	25 dB
EDFA	1525-1560 nm	35 nm	25-51 dB
PDFFA	1280-1330 nm	50 nm	20-40 dB

Tabla 2.3. Características típicas de los amplificadores ópticos, adaptado de [71]

### ■ Interferómetro

La interferencia óptica es un efecto físico que ocurre cuando dos o más haces de luz se encuentran en superposición produciendo un patrón de franjas intensas y oscuras.

Un interferómetro es un dispositivo óptico que inicia con un haz de entrada el cual se separa en dos empleando un espejo parcialmente transmisivo, y luego se vuelven a recombinar empleando otro espejo parcialmente transmisivo o un divisor de haz (BS, Beam Splitters). El interferómetro Mach-Zehnder (MZ) fue desarrollado por Ludwig Mach y Ludwig Zehnder 1891-1892, puede ser utilizado como un dispositivo de modulación externa. Se aplica un voltaje a una de las dos guías de ondas, creando un campo eléctrico que da lugar a que las señales en las guías estén en fase o desfasadas  $180^\circ$ , interfiriendo, respectivamente, de forma constructiva o destructiva, si el desfase producido es múltiplo par de  $2\pi$  se producirá un máximo en la señal mientras que, si el desfase corresponde a un múltiplo impar de  $\pi$ , se tendrá un mínimo en la señal.

Actualmente, hay disponibles moduladores de amplitud MZ de más de 75 GHz. Dentro de las principales ventajas de utilizar interferómetro MZ es que, el láser y el modulador pueden ser integrados en una sola estructura, lo cual, resulta más eficiente en coste, se elimina la necesidad de controlar la polarización, son muy sensibles para detectar cambios en el índice de refracción causados por variaciones en temperatura y presión sobre la fibra. Igualmente, este tipo de dispositivos son muy utilizados en redes WDM [71], [72].

### ■ Receptor Óptico

La función de los receptores ópticos es convertir las señales ópticas a señales eléctricas y recuperar la información transmitida a través de los sistemas comunicación óptica, cuyo principal componente es el fotodetector, estos fotodetectores son diodos semiconductores que operan polarizados inversamente. Cuando un fotodetector es iluminado, las partículas de energía luminosa, también llamadas fotones, son absorbidas generando pares electrón - hueco, que en presencia de un campo eléctrico producen una corriente eléctrica [76].

Se distinguen por su alta sensibilidad, que hace referencia a la potencia óptica mínima que ha de llegar al receptor para generar una señal de magnitud suficiente para distinguirlo del ruido, su respuesta rápida, bajo ruido, costo y un tamaño compatible con el del núcleo de la fibra óptica. Estos requisitos son eficientemente atendidos con fotodetectores basados en materiales semiconductores como los fotodetectores PIN con zonas  $p$  y  $n$  altamente conductoras junto a una zona intrínseca poco conductiva y los APD o fotodiodos de avalancha que son polarizados en inversa, pero en este caso las tensiones inversas son elevadas, originando un fuerte campo eléctrico que acelera los portadores generados, provocando colisiones con otros átomos del semiconductor y por ende, pares electrón - hueco, los fotodiodos PIN-FET corresponden

al diodo PIN seguido por un preamplificador de entrada FET y son aún más sensibles como los APD [76].

Receptor	Nivel de Sensibilidad	Velocidad de Transmisión	Longitud de Onda
PIN	-34 dBm	2 a 34 Mbps	1a y 2a ventana
PIN-FET	-53 dBm -47 dBm	2 Mbps 34 Mbps	2a y 3a ventana
APD	-56 dBm -50 dBm	2 Mbps 34 Mbps	2a y 3a ventana

Tabla 2.4. Características de los fotodiodos, adaptado de [76]

### ■ Filtros ópticos

Los filtros ópticos se encargan de seleccionar y delimitar el rango de frecuencias de trabajo [77], son fundamentales en todas las redes de comunicación óptica, ya que se pueden utilizar para eliminar el ruido y las ondas no deseadas del canal y para separar canales ópticos con espacios reducidos en sistemas WDM [78]. Existen diferentes tipos de filtros, y su uso depende de lo que se desea lograr, a continuación, se menciona dos de los filtros que más se han usado en trabajos similares a este:

- Filtro Bessel: el filtro Bessel (a veces llamado filtro “Thomson”) está optimizado para proporcionar un retardo de grupo constante en la banda de paso del filtro, mientras sacrifica la nitidez en la respuesta de magnitud [79]. El filtro Bessel tiene una excelente respuesta de pulso, es decir, un mínimo sobre impulso y timbre, debido a su respuesta de fase lineal, además, tiene una tasa inicial de atenuación más lenta más allá de la banda de paso en comparación con otros filtros; el ancho de banda del filtro de Bessel se define por el rango de frecuencias donde la función de transferencia cae por debajo de 3 dB [80].
- Filtro Coseno Alzado: el filtro de coseno alzado es un filtro de modelado de pulsos utilizado en la modulación digital debido a su capacidad para compensar la dispersión cromática y la dispersión intermodal que causan interferencia entre símbolos[81], representando así, el filtrado Nyquist ideal [82]. La respuesta de frecuencia ideal del filtro de coseno elevado consiste en una ganancia unitaria a bajas frecuencias, una función de coseno elevado en el medio y una atenuación total a altas frecuencias; el ancho de las frecuencias medias está definido por el factor de caída  $\alpha$ , ( $0 < \alpha \leq 1$ )[83].

### ■ Rejilla de Bragg

A altas velocidades de transmisión se presenta ensanchamiento en el pulso transmitido debido a la dispersión de tercer orden, considerado como la interacción entre la longitud de onda con el índice de refracción de la fibra. Por lo que, se hace necesario compensar a estas velocidades. Entre los métodos más destacados se encuentra la fibra compensadora de dispersión, DCF (*Dispersion Compesating Fiber*) que tiene un alto coeficiente negativo que equilibra los retardos en las longitudes de onda del pulso de luz, sin embargo, estas fibras poseen una atenuación relativamente alta (0,5 dB/km aprox.). También existe otra técnica por medio de las Rejillas de Bragg, FBG ( Fiber Bragg Grating), es un dispositivo construido en el interior de la fibra óptica que genera alteraciones periódicas de distancia en el índice de refracción, donde la rejilla simula un filtro que bloquea la banda de transmisión, y una longitud de onda especifica se refleja a lo largo de la fibra cuando se cumple dicha distancia, permitiendo que las longitudes de onda más lentas alcancen a las más rápidas.

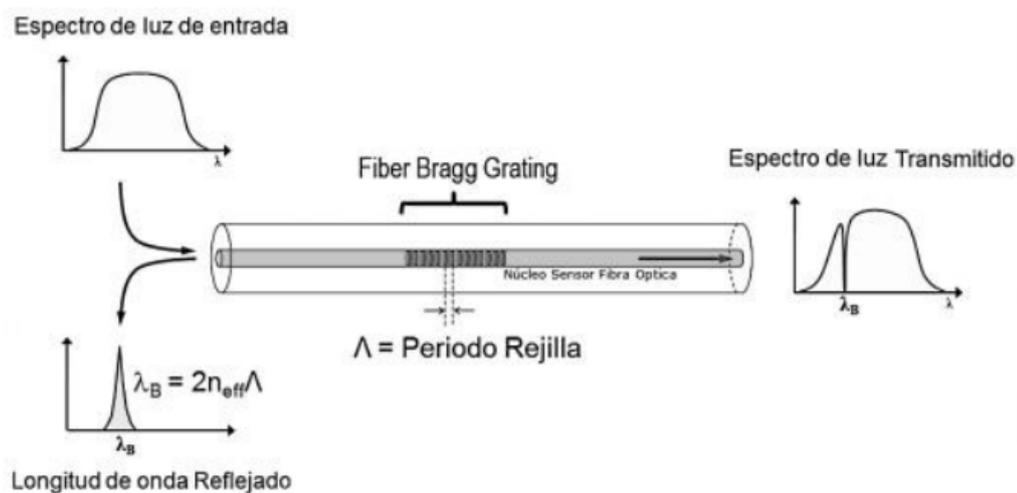


Figura 2.8. Funcionamiento Rejilla de Bragg [84]

Estos dispositivos se caracterizan por tener pérdidas bajas por inserción, por su diseño compacto y ser un elemento completamente pasivo [84].

### ■ Splitters

Un splitter es un divisor de potencia de señal, de modo en que cada fibra de salida se distribuye un nivel de señal proporcional a la cantidad de divisores, así su utilización permite implementar la arquitectura punto a multipunto utilizada en FTTH, es decir, que una fibra proveniente de la OLT o central, se divide para atender a

diferente número de usuarios [85].

Un splitter posee diferentes capacidades de división: 1x2, 1x4, 1x8, 1x16, 1x32, 1x64, 1x128. En la red FTTH se pueden incorporar diferentes niveles de splitting, la mayoría de operadores suelen usar dos niveles. Por ejemplo, con un nivel de 1:4, es decir, 4 divisiones de la señal y un splitter de segundo nivel de 1:8, se tendrá servicio para  $4 \times 8 = 32$  clientes [86].

Característica	Splitter FBT	Splitter PLC
Longitud de onda de operación	850, 1310 y 1550 nm	1260 nm – 1650 nm
Tasa de división	Asimétrico y Customizable	Igual para todas las salidas
Confiabilidad	Hasta 1:8	1:64
Máximo número de división	1:32	1:28
Otros	Alta tasa de fallos, bajo precio.	Baja tasa de fallos, alto precio.

Tabla 2.5. Tabla comparativa entre Splitters FBT y PLC [85]

De acuerdo a la técnica de fabricación los splitter se dividen en FBT (Fused Biconal Taper) y PLC (Planar Lightwave Circuit), el FBT se caracteriza por su bajo precio, adecuado para casos en donde la configuración de división es asimétrica, admiten con relativa eficiencia tres longitudes de onda: 850 nm, 1310 nm y 1550 nm, limitando su operación en escenarios donde se requieran operar otras longitudes, mientras que, la fabricación de un splitter PLC es más compleja, siendo un dispositivo de guía de ondas que utiliza la tecnología de producción de semiconductores, posee una baja sensibilidad a la longitud de onda, lo que permite el uso de una amplia gama de longitudes, es altamente confiable, simétrico y su relación de división es mayor a 1:64 o 1:128; en la Tabla 2.5 se observa la comparación entre estos dos tipos de splitter [86], mientras que, en la Tabla 2.6 se listan los elementos de una red WDM.

Sección	Elementos
TX	- Modulador Eléctrico Mach-Zehnder - Filtro Bessel - Laser CW 1MHz de FWHM - Banda C, alrededor de los 1550 nm
CANAL	- Estándar ITU-G652 - Fibra SSMF-28 - Amplificadores EDFA - Fibra de compensación DCF
RX	- Sensibilidad -30 dBm - Filtro eléctrico tipo Bessel - Filtro óptico coseno alzado.

Tabla 2.6. Elementos de una red WDM.

### 2.3.2. REDES MLR

Las futuras redes de fibra óptica tienen como objetivo proporcionar una infraestructura eficiente capaz de admitir un número creciente y variable de tráfico de datos generado por la diversificación de aplicaciones con requisitos de velocidad distintos, necesidades que, las actuales redes heredadas de Velocidad de Línea Única, SLR con formatos de modulación predefinidos no pueden suplir, debido a que no ofrecen suficiente flexibilidad para satisfacer los requisitos de las demandas con un rango tan amplio de granularidades [87].

Por ello, las redes ópticas de próxima generación serán de naturaleza altamente heterogénea, incorporando ancho de banda elástico, formatos de modulación mixtos y Velocidades de Línea Mixta, MLR (*Mixed Line Rates*) [86]. Altas velocidades como 100 Gbps, son deseables al transportar una gran cantidad de tráfico, sin embargo, se ven afectadas por degradaciones que alteran el alcance de la distancia óptica, requieren de equipos costosos para ofrecer largas distancias o en su defecto, mayor número de regeneradores, lo que se traduce en gastos. Las demandas en la red pueden no requerir una capacidad de 100 Gbps en todas partes, por lo tanto, un diseño de red rentable debe aprovechar la posibilidad de velocidades de líneas mixtas (MLR), en redes WDM, que aumentan la capacidad de una longitud de onda para 100 Gbps y presenta una compensación entre capacidad y alcance [69].

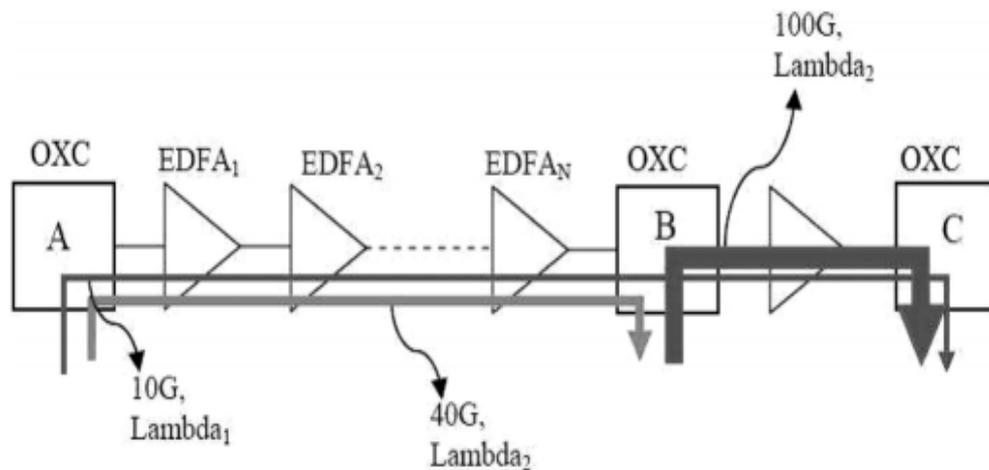


Figura 2.9. Esquema General de una Red MLR [69].

En una red MLR los canales de longitud de onda pueden tener una variedad de capacidades (10/40/100 Gbps). Sin embargo, debido a la acumulación de degradaciones de la señal, el alcance de algunos de los trayectos de luz de alta velocidad de bits podría ser limitado por la BER, deterioros de la capa física (PLI), como es el caso del ruido acumulado, debido a la emisión espontánea amplificada (ASE) efectos no lineales como la modulación de fase automática (SPM) y la modulación de fase cruzada (XPM), generados por la dispersión de la fibra y la no linealidad Kerr o la potencia de lanzamiento, que debe ser lo suficientemente grande para garantizar la resistencia al ruido en el receptor, sin sobrepasar el límite donde las no linealidades de la fibra distorsionan la señal y afectan a las longitudes de ondas vecinas con diafonía lineal y no lineal [88]. Si se condiciona algunas rutas de larga distancia y alta velocidad a un formato de modulación mejorado con mayor producto de ancho de banda - distancia y menor susceptibilidad a las deficiencias, se puede disminuir el costo de la red MLR y aprovechar la heterogeneidad en los sistemas de transmisión [69].

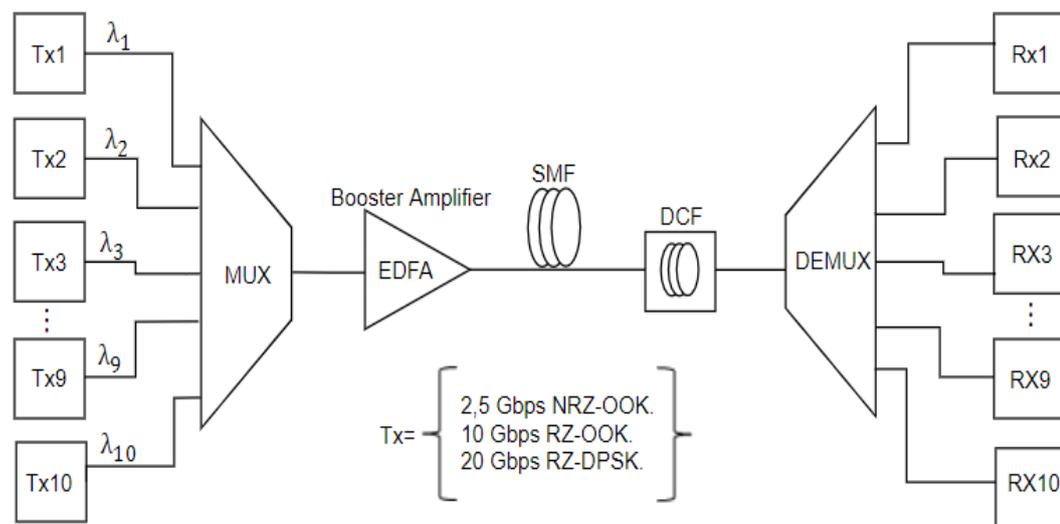


Figura 2.10. Diseño red WDM – MLR con diferentes formatos de modulación [89]

Este tipo de arquitecturas se pueden construir sobre redes ópticas transparentes, donde la señal se mantiene en el dominio óptico todo el tiempo; por tanto, el procesamiento de señales electrónicas no es necesario en los nodos intermedios o por el contrario, pueden ser de tipo opacas, donde cada nodo tiene regeneración electrónica [89].

Se han desarrollado diversos estudios para mejorar el rendimiento de las redes MLR, entre los que se destacan los valores de separación entre canales, considerando [89]. **i)** una separación uniforme de canales fijos de 50 GHz especificada por la UIT-T, **ii)** varios valores de espaciado de canales para diferentes velocidades de línea para optimizar el uso de la fibra espectral, o **iii)** definir un valor óptimo del canal espaciado que da como resultado el costo mínimo de la red. Se ha demostrado que a medida que el espaciado aumenta, el costo de la red, en términos de transpondedores, disminuye hasta un cierto espaciado de canal óptimo [90], el coeficiente de dispersión cromática es considerado de 17 ps/nm\*km, y el coeficiente de PMD de 0,06 ps/nm\*km. Respecto a los formatos de modulación se ha verificado que OOK presenta un mayor rendimiento a velocidades bajas de 10 Gbps o menores, mientras que, a velocidades altas como 20 Gbps, 40 Gbps o 100 Gbps, responden bien formatos como DPSK/DQPSK. Se recomienda utilizar codificación RZ ya que tiene una mejor tolerancia a la no linealidad que el formato sin retorno a cero (NRZ) [91].

Estas redes pueden cumplir con los requisitos de aumento de capacidad migrando de redes troncales ópticas de 10 Gbps heredadas hacia velocidades de línea más altas [88]. Para actualizar la infraestructura de 10 Gbps existente y canalizar velocidades de datos de 40 Gbps y 100 Gbps, se puede hacer uso de las redes DWDM de 10 Gbps implementadas que operan principalmente en la Banda C, típica de alta capacidad. Las redes utilizan 80 canales colocados en la ventana espectral entre 1528 nm y 1563 nm en una cuadrícula de 50 GHz, con amplificadores EDFA / Raman de banda L, que proporcionan 160 canales en 50 GHz de frecuencia sobre la banda C más L con un divisor de longitud de onda de banda C / L y elementos clave de las redes ópticas ágiles como son ROADM

y PXC, se pueden obtener muy buenos alcances [92]. A continuación, se muestran los principios de los esquemas de transmisión adecuados. Los esquemas de transmisión se diferencian por el número de bits por símbolo de transmisión y esquema de modulación [92].

1 bit por símbolo	2 bits por símbolo	4 bits por símbolo
ODB (PSBT)	RZ-DQPSK	CP-(RZ)-DQPSK
DPSK		

Tabla 2.7. Esquemas de transmisión más prometedores para la actualización del canal de 40 / 100 Gbps, adaptado de [92].

En cuestión de potencia de lanzamiento, los canales de 100 Gbps son muy susceptibles a la potencia de los canales vecinos, presentando XPM y diafonía lineal de la copropagación de los canales de 10 Gbps, que también afectan a los canales de 40 Gbps adyacentes, sin embargo, causan penalizaciones más bajas debido a la forma de los filtros del multiplexor. En el estudio del rendimiento de las trayectorias de luz a diferentes potencia de lanzamiento se utilizaron valores discretos entre -3 y 3 dBm para velocidades de línea (10 Gbps, 40 Gbps y 100 Gbps), donde se obtuvo potencias -2, 0, 2 dBm para 10 Gbps, 40 Gbps y 100 Gbps, respectivamente, como combinación de potencias iniciales de mejor rendimiento, es decir, que inducen el bloqueo mínimo, mientras que, la combinación de potencia de lanzamiento con peor rendimiento, en términos de probabilidad de bloqueo, se obtiene como 2, -3, -3 dBm para 10, 40 y 100 Gbps, respectivamente [88].

Redes MLR	Valores
Espaciamiento Canal óptico	De acuerdo a la recomendación de Cuadrícula del UIT-T, 50 GHz fijos. Puede sujetarse a cambios en busca de mayor rendimiento en el canal.
Potencia Canal óptico	Valores discretos entre -3 dm y 3dBm
Acceso nominal	10 Gbps/40 Gbps/100 Gbps
Formatos de Modulación	DPSK/DQPSK
Tipo de Fibra	SMF

Tabla 2.8. Características de una red MLR.

Partiendo de la información anterior el modelo base de red a usar es DWDM punto a punto unidireccional, que incorpora múltiples formatos de modulación, con una cuadrícula fija entre canales y velocidades de línea mixtas (MLR). Tiene una infraestructura de capa física uniforme, con tipos de transpondedores diferentes, que puede llevar señales de

2,5 Gbps, 10 Gbps y 20 Gbps, multiplexores (MUX), amplificadores (EDFA), una fibra monomodo (SMF), un módulo de compensación de fibra de dispersión cromática (DCF), un demultiplexor (DEMUX) y receptores (Rx) que coincidan secuencialmente con los transmisores correspondientes, para generar y analizar los diferentes casos de estudio con una distancia objetivo de 80 km a 120 km según el estándar **G.691** de la ITU.

Por otra parte, el acceso de banda ancha sobre fibra óptica que sustituye parcial o totalmente el cobre del bucle de acceso, se designa como Fibra hasta x, FTTx (*Fiber to the x*) se origina como generalización de las distintas configuraciones desplegadas, donde la última letra que denota los distintos destinos de la fibra (nodo, acera, edificio, hogar). La adopción de esta nueva tecnología de acceso en última milla requiere del despliegue de costosas nuevas infraestructuras, por lo que es un proceso gradual que supone la convivencia de FTTx con los servicios Híbridos de Fibra y Cobre, HFC (*Hybrid Fiber-Coaxial*)[93].

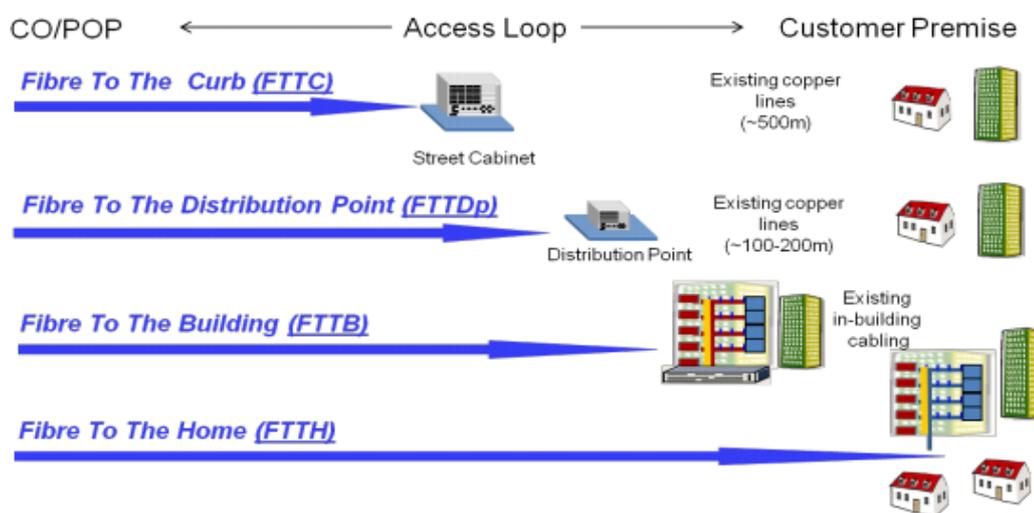


Figure 2: Different types of FTTx networks.

Figura 2.11. Diferente tipos de redes FTTx [93]

Fibra hasta el hogar, FTTH es una plataforma excelente para tecnologías de acceso de alta o ultra alta velocidad y se basa en la utilización de cable de fibra óptica hasta el hogar del usuario final, lo que se denomina la última milla. Las redes de acceso fijo no solo se benefician de las soluciones FTTH, sino que también las redes inalámbricas avanzadas [93].

Una red de fibra hasta el hogar constituye una red de acceso basada en fibra, que conecta un gran número de usuarios finales a un punto central conocido como nodo de acceso o punto de presencia (POP). El nodo de acceso contiene el equipo de transmisión electrónica (activo) necesario para proporcionar la aplicaciones y servicios como el Triple Play: telefonía, Internet de banda ancha y televisión, a los hogares y empresas utilizando fibra óptica para el abonado y cada nodo de acceso, dentro de una gran municipio o región, está conectado a una red de fibra urbana o metropolitana más grande. Así, cada suscriptor

está conectado mediante una fibra dedicada a un puerto en el equipo en el POP, o al divisor óptico pasivo, utilizando fibra de alimentación compartida al POP y Transmisión 100BASE-BX10 o 1000BASE-BX10 para tecnología Ethernet o GPON (EPON). La fibra tiene la capacidad de proporcionar velocidades de transmisión bidireccionales mucho más altas, posee larga vida útil, no se ve afectada por la interferencia electromagnética, que se traduce en tiempo de inactividad en las redes de cobre y menor consumo de electricidad en comparación con las tecnologías HFC o xDSL [93].

En el estándar ITU **G.652** se especifica que la fibra óptica utilizada comúnmente a lo largo de un enlace, es la monomodo estándar Corning SMF-28e 1550 nm, pues permite alcanzar largas distancias a altas tasas de transmisión debido a su diámetro de núcleo pequeño con un coeficiente de dispersión que se obtiene del datasheet proporcionado por el fabricante, siendo en este caso alrededor de los 16 ps/nm\*km y el valor de atenuación corresponde a 0,275 dB/km, incluyendo pérdidas en empalmes y márgenes del cable, es compatible con el estándar **G.652.D** de la ITU, el cual define las características de los cables de fibra óptica.

Debido a que la CD es uno de los fenómenos más complejos, siendo el principal causante de que las diferentes componentes espectrales del pulso viajen a velocidades levemente diferentes, se procederá a precompensar de manera ideal mediante el dispositivo de rejilla de Bragg.

El estándar **G.694.1** de la ITU, recomienda utilizar las bandas L y C para redes DWDM. Se va a trabajar en longitudes de onda discretas en la banda C que va desde los 1530 a los 1560 nm, anclada en una cuadrícula de frecuencia de 193.1 THz según la Recomendación UIT-T **G.694.1**, con un espaciado de canales de 25 GHz, 50 GHz y 100 GHz. Los canales autorizados vienen dados por espaciamientos típicos entre canales de 0.2 nm (25 GHz), 0.4nm (50 GHz) y 0.8nm (100 GHz). Al manejar largas distancias es necesario el uso de amplificadores, se elige el amplificador Dopado con Erblio, EDFA, filtros tipo Bessel y un láser de onda continua debido a la alta velocidad de transmisión que maneja junto a un modulador de intensidad basado en un interferómetro Mach-Zehnder.

La potencia de transmisión va a tomar un rango de 0 a 3 dBm, de acuerdo a los estudios previos sobre redes MLR. Por último, se va a trabajar con una BER objetivo de  $10^{-9}$  o menor, según las recomendaciones de la ITU-T.

Luego de evaluar los resultados que se han obtenido en estudios realizados, se llegó a la conclusión de que los formatos de modulación que mejor se adaptan a las velocidades a usar en este Trabajo de Grado son:

- Para 2,5 Gbps, NRZ-OOK.
- Para 10 Gbps, RZ-OOK.
- Para 20 Gbps RZ-DPSK.

En la Tabla 2.9, se muestran las variables a usar en el modelo propuesto.

<b>FASES</b>	<b>VARIABLES DEL MODELO</b>
OLT	Formatos de Modulación: NRZ-OOK, RZ-OOK, RZ-DPSK.
	Potencia del Canal Óptico: Máxima permisible para mantener un régimen de propagación predominantemente cuasilineal.
	Acceso Nominal: 2,5 Gbps, 10 Gbps, 40 Gbps.
ODN	Espaciamiento por Canal Óptico: Dependiente del factor $\Delta_v$ .
	Distancia del Enlace: 80-100 km.
	Número de canales: Máximos permisibles para alcanzar un Throughput mayor de una red NG-PON2.
	Extensiones de longitud: EDFA si se requieren para la distancia mínima.
	Tipo de servicio: FTTH.
	Tipo de enlace: DL- Unidireccional.
ONU	Número de usuarios última milla: 32
	Splitter 4:1

Tabla 2.9. Variables del Modelo General

## 2.4. ESQUEMA GENERAL

Para el presente trabajo de grado y considerando las variables del modelo del esquema general definidas en la tabla 2.9, se establece un modelo de simulación de red que consta de 4 canales DWDM a una tasa de transmisión nominal de acceso de 2,5 Gbps con formato de modulación NRZ-OOK, la distancia del enlace es de 80 km y una carga de 32 usuarios de tipo FTTH. A continuación, se muestra el esquema general y las propiedades de los elementos más importantes.

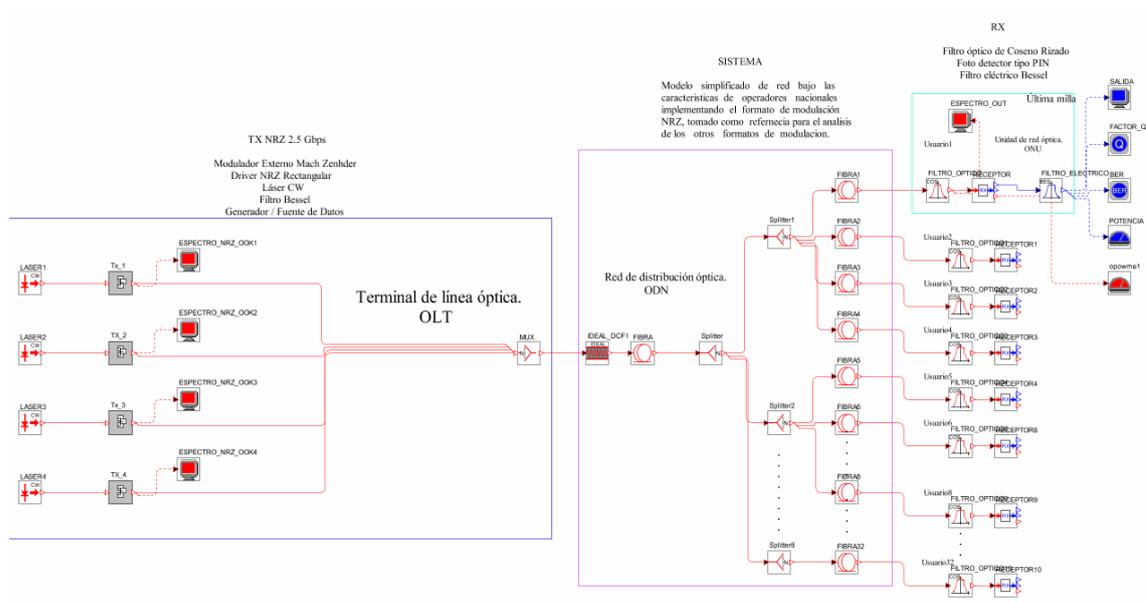


Figura 2.12. Esquema general.

La separación de canales inicialmente es de 100 GHz, siendo la frecuencia central del canal uno 195,52 GHz y la del cuarto canal 195,82 GHz. Para lograr resultados semejantes a un escenario real se estableció una FWHM de 5 MHz que está estrechamente relacionado con la coherencia temporal del láser, es decir, las fluctuaciones de fase en el campo eléctrico que impactan directamente a la pureza espectral de la luz. La potencia inicial se estableció con un valor de 0 dBm según las recomendaciones encontradas para redes MLR [94].

- **Transmisión:** a continuación, se observan las propiedades del elemento más importante de este módulo, el láser.

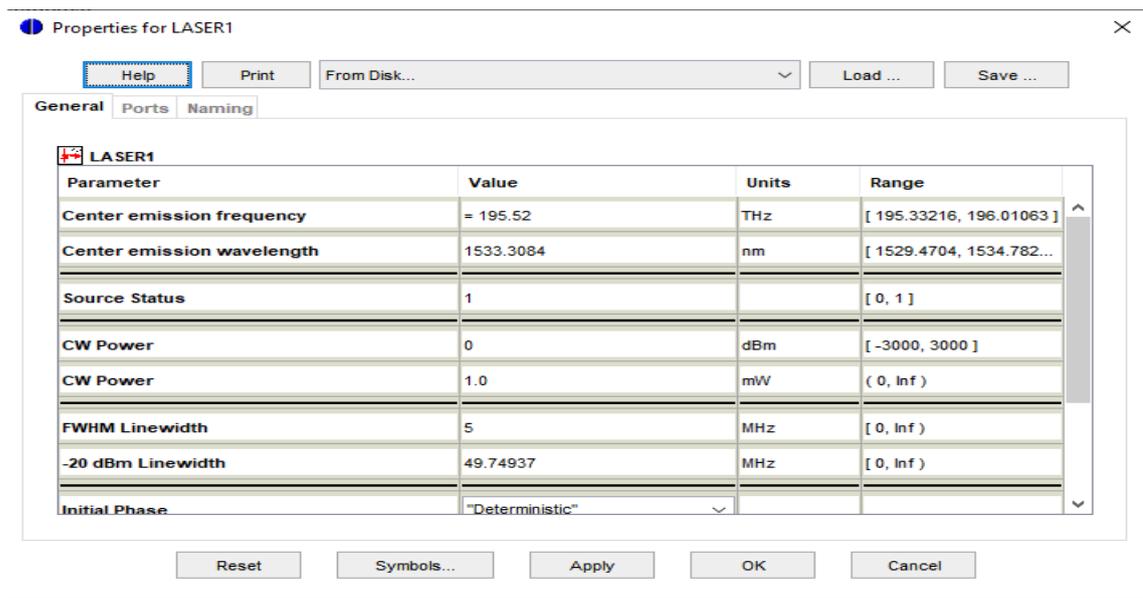


Figura 2.13. Propiedades Láser, canal 1.

- Medio de transmisión:** en el medio de transmisión se hizo uso de la fibra Corning-28e, con sus respectivas pérdidas de atenuación y coeficiente de dispersión. Se realiza una precompensación al 25 % con una rejilla ideal de Bragg con frecuencia central en 195,5 THz, que, al tener la longitud de onda más alta y la menor frecuencia del sistema, introduce menos pérdidas de atenuación. Se elige preamplificar con un EDFA, como se observa en la Figura 2.14.

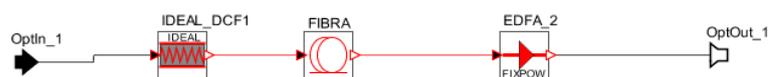


Figura 2.14. Preamplificación.

Parameter	Value	Units	Range
Reference Frequency	195.5	THz	( 0, Inf )
Reference Wavelength	1533.46526	nm	( 0, Inf )
Total Compensating Dispersion D at the ref...	-320	ps/nm	
Total Compensating Dispersion Beta2 at the...	399.48207	ps <sup>2</sup>	
Total Compensating Dispersion D Slope at t...	0.0	ps/nm <sup>2</sup>	
Total Compensating Dispersion Beta2 Slope...	0.0	ps <sup>3</sup>	

Figura 2.15. Propiedades Rejilla de Bragg para una distancia de 80 km.

- Recepción:** el dispositivo más importante en este módulo, es el receptor. Optsim dispone de 3 receptores ópticos: Sensitivity Optical Receiver, Single Channel Optical Receiver y Compound Optical Receiver, para esta simulación se escogió el primero, puesto que simula un receptor óptico completo (incluye el fotodetector, el amplificador y el filtro postdetección) y está basado en la especificación de la sensibilidad del receptor. A continuación, se observan sus parámetros.

Parameter	Value	Units	Range
Bit Rate	= 2.5	Gbit/s	( 0, Inf )
Optical test pulse shape	"NRZ_Rectangular"		
Duty Cycle	0.5		( 0, 1 ]
Normalized FWHM	0.5	fraction of bit...	( 0, 1 ]
Sensitivity under test condition	-28	dBm	( -54.8927, 1e+32 ]
Sensitivity reference error probability	1e-009		( 1e-015, 0.1 )
Overall Receiver Responsivity	1	A/W or V/W	

Figura 2.16. Parámetros del receptor óptico.

El parámetro más importante del receptor, es la sensibilidad porque es la que nos indica el umbral de detección de la señal, para este caso, se eligió -28 dBm para una BER de  $10^{-9}$ . También se observan otros parámetros como la Tasa de Bit, que para el esquema general se trabaja en 2,5 GHz con un pulso NRZ rectangular indicado en *Optical test pulse shape*.

✓ Resultados:

En la Tabla 2.10 se observan los resultados obtenidos tomando como referencia distancias de transmisión entre 80 y 100 km, y distancias de última milla de 500 m y 1 km.

<b>Distancia enlace / última milla (km)</b>	<b>Potencia TX / RX (dBm)</b>	<b>BER</b>	<b>Factor Q (dB)</b>	<b>OSNR (dB)</b>	<b>OSNR real (dB)</b>
80 / 0,5	0 / -18,644	$10^{-40}$	30,693994	51,862319	9,31167
90 / 0,5	0 / -20,596	$10^{-40}$	29,248668	51,765353	7,37344
100 / 0,5	0 / -22,587	$10^{-40}$	26,078407	51,882042	5,35797
80 / 1	0 / -18,741	$10^{-40}$	30,254940	51,844185	9,21434
90 / 1	0 / -20,693	$10^{-40}$	28,992784	51,770263	7,27609
100 / 1	0 / -22,685	$10^{-40}$	26,050647	51,874040	5,2603

Tabla 2.10. Características de una red MLR.

La OSNR se mide en dB, es un ratio que mide la relación señal a ruido óptico de un sistema y guarda una relación directa con la BER. Para una distancia de 80 km de fibra y 500 m de última milla se obtiene una OSNR de 51,861480 dB, sin embargo, esta no es la OSNR real del canal, para obtenerla se ajustan los marcadores en “Y” en la sensibilidad del receptor correspondiente a -28 dBm y a la potencia en que se está obteniendo el valor de la OSNR, es decir, -18,68 dBm, el rango entre ambas líneas paralelas azules, el delta Y corresponde a la OSNR real en dB, debido a que desde el piso de ruido en -70 dBm hasta -28 dBm, el receptor no tiene la capacidad de percibir señales.

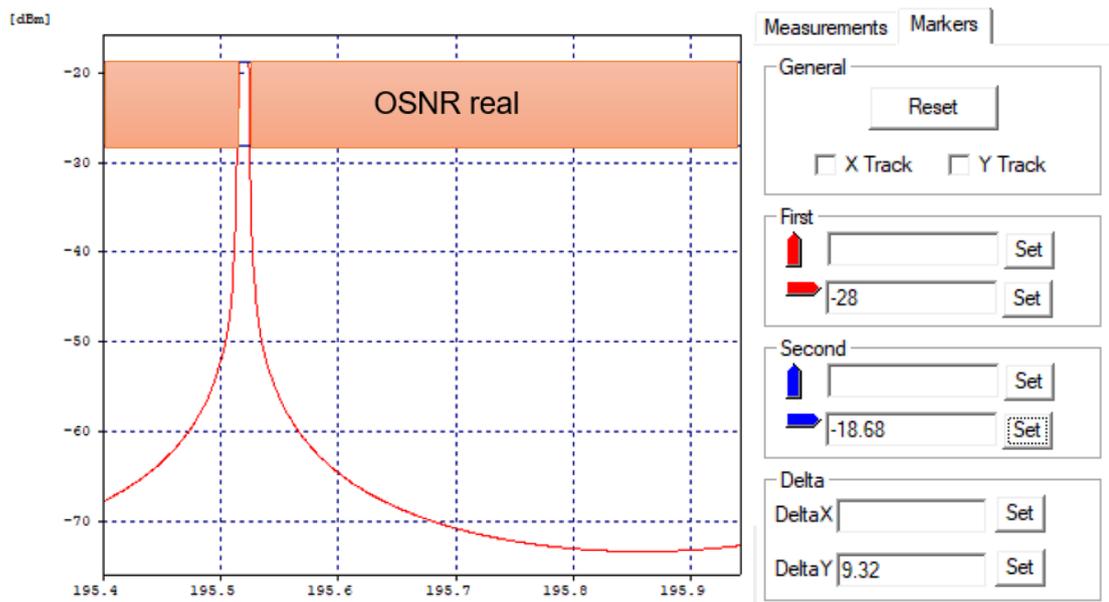


Figura 2.17. Cálculo OSNR real.

Analizando lo contenido en la anterior tabla se puede concluir que, los mejores resultados se presentan para una distancia de enlace de 80 km y 500 m en la última milla, obteniendo una potencia de -18,65 dBm en recepción, los cuales se observan a continuación

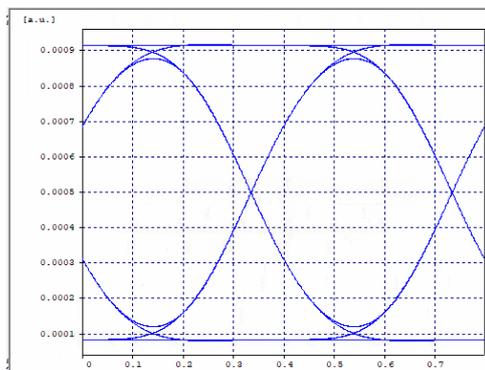


Figura 2.18. Diagrama del ojo Back to Back

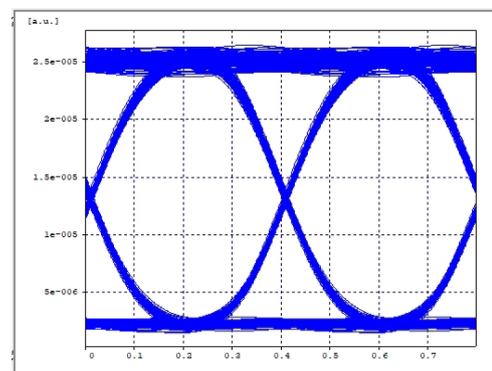


Figura 2.19. Diagrama del ojo en recepción

Ahora, se analiza el espectro óptico teniendo presente las variaciones realizadas en longitud de fibra y longitud de última milla, para este caso, se observa un comportamiento similar en las simulaciones que mantienen la misma distancia en longitud de fibra y difieren en longitud de última milla, siendo esta una variación mínima de solo 500 m, así el espectro óptico de la simulación 1 y 4, 2 y 5, y 3 y 6 coinciden al superponerse, generando la apariencia de tener solo tres variaciones en total, en la parte inferior de la imagen se puede ver la frecuencia del canal por el cual se está realizando la transmisión, en este caso, 195,52 THz.

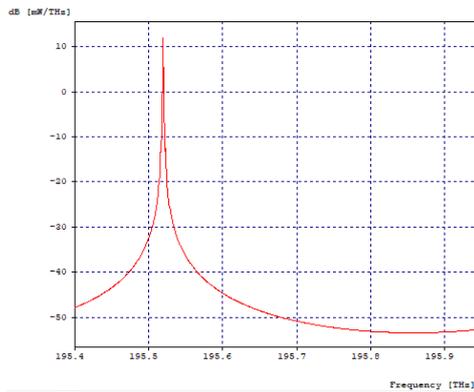


Figura 2.20. Espectro óptico en Tx.

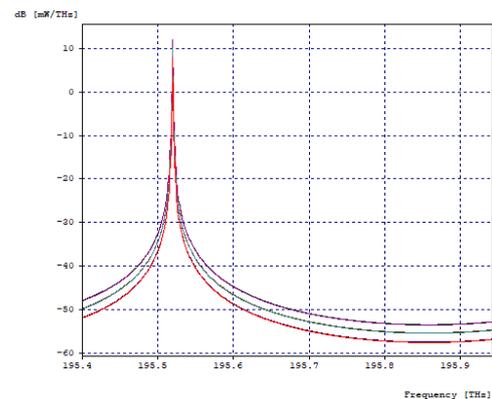


Figura 2.21. Espectro óptico en Rx (simulaciones superpuestas).

Las pequeñas degradaciones que se observan suceden a medida que se aumenta la distancia, lo que se debe a efectos lineales y no lineales, sin embargo, con la compensación de la rejilla ideal de Bragg al 25 % se obtiene una gran mejora en los resultados sin incrementar considerablemente los costos de la red DWDM, siendo el efecto de la CD uno de los que más perjudican la señal, además, al estar transmitiendo en potencias tan bajas, se evita inducir la aparición de los fenómenos no lineales.

A continuación, se observa el Back to Back del espectro óptico en transmisión y recepción, se destaca que, la potencia de recepción se encuentra dentro de los umbrales de sensibilidad ópticos, por lo que, no es necesaria la amplificación en estas instancias y el sistema no presenta mayores degradaciones que afecten la información. Para efectos de un mejor análisis del espectro óptico en Tx, se manejó una simulación donde se tenía un solo canal NRZ a 2,5 Gbps, porque Optsim adapta de forma automática el ancho de banda a la cantidad de canales según el sistema, por tanto, la visualización del espectro óptico en el esquema general no era detallado.

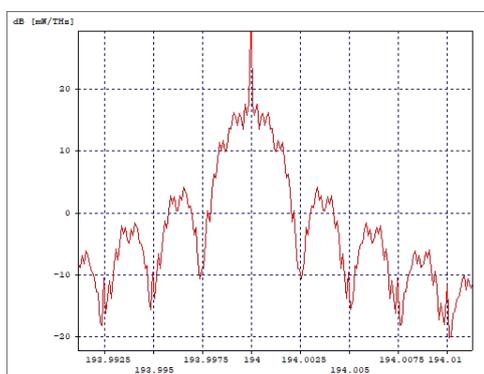


Figura 2.22. Espectro óptico en Tx.

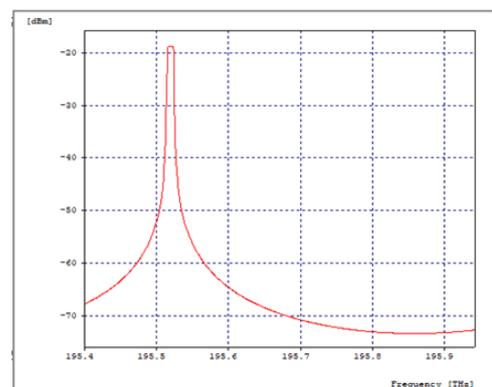


Figura 2.23. Espectro óptico en Rx.

En recientes estudios se ha demostrado que los canales internos y externos se comportan de diferentes maneras, es por ello que, a continuación, se va a analizar el comportamiento

de un canal interno.

En la Tabla 2.11 se observan los resultados obtenidos tomando como referencia distancias de transmisión entre 80 y 100 km, y distancias de última milla de 500 m y 1 km, tal cual como se hizo para el canal externo.

Distancia enlace / última milla (km)	Potencia TX / RX (dBm)	BER	Factor Q (dB)	OSNR (dB)	OSNR real (dB)
80 / 0,5	0 / -18,645	$10^{-40}$	29,643167	51,861500	9,3117
90 / 0,5	0 / -20,608	$10^{-40}$	28,017956	51,766094	7,37354
100 / 0,5	0 / -22,602	$10^{-40}$	24,879798	51,881572	5,35781
80 / 1	0 / -18,741	$10^{-40}$	29,483432	51,843679	9,21451
90 / 1	0 / -20,706	$10^{-40}$	28,044848	51,771030	7,27606
100 / 1	0 / -22,6995	$10^{-40}$	24,856147	51,871543	5,26034

Tabla 2.11. Comparación de resultados para diferentes distancias canal interno.

El mejor resultado se obtuvo para una distancia del enlace de 80 km y 0,5 km de distancia de última milla, obteniéndose una potencia de recepción de -18,645 dBm.

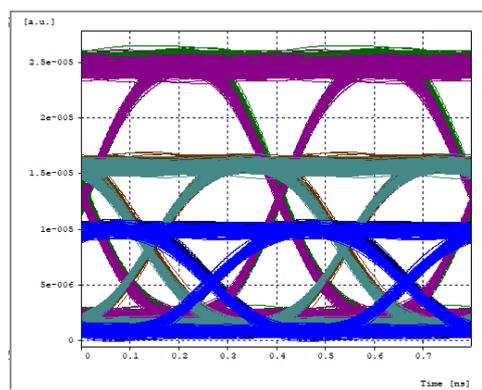
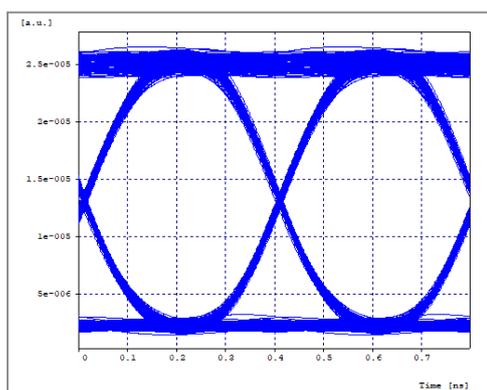


Figura 2.24. Diagrama del ojo 80/0,5 km, Figura 2.25. Diagrama del ojo para todas las distancias canal interno.

En la Figura 2.24 se observa el diagrama del ojo del mejor resultado, mientras que, en la Figura 2.25, los diagramas de ojo de todas las distancias enlace fibra / última milla, nótese que, el diagrama para una distancia 80/0,5 km es muy similar al de 80/1 km puesto que solo difieren en 500 m, de igual manera sucede para 90/0,5 km, 90/1 km, en 100/0,5 km y 100/1 km. También se observa que, para ambas distancias del enlace de 80 km la

apertura vertical del diagrama es mayor, significando que para dicha distancia se tiene una mayor inmunidad al ruido respecto a las otras distancias, siendo la de 100 km la que presenta menor inmunidad.

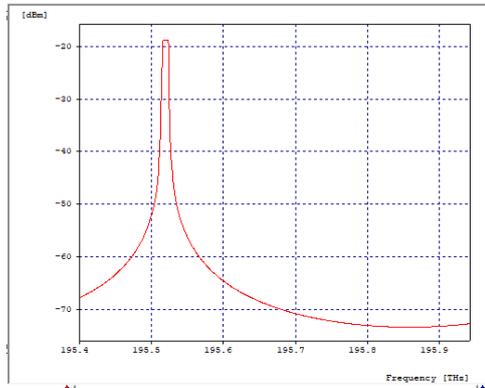


Figura 2.26. Espectro óptico 80/0.5km

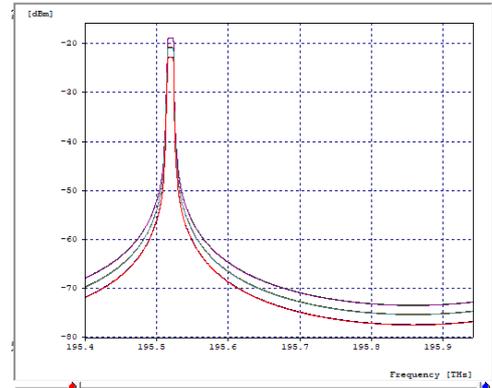


Figura 2.27. Espectros ópticos sobrepuestos

En las anteriores figuras se observan los espectros ópticos y se puede verificar que, a medida que se acerca a la frecuencia central, la potencia aumenta, alcanzando su máximo valor cuando llega a 195,52 THz.

A continuación, se realizará una comparación entre el mejor resultado del canal externo y el mejor del interno, que para ambos casos es el de 80/0,5 km.

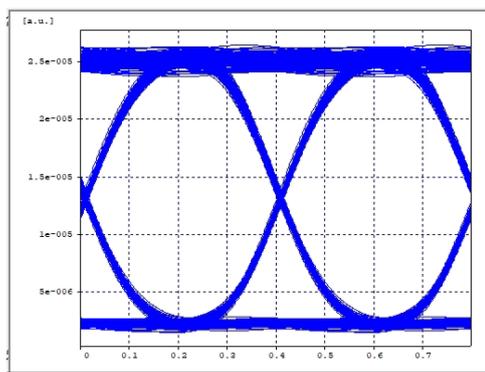


Figura 2.28. Diagrama del ojo, canal externo.

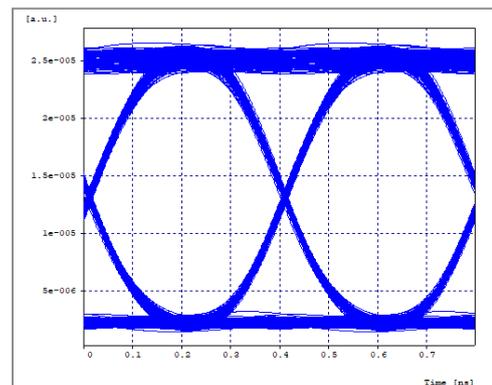


Figura 2.29. Diagrama del ojo, canal interno.

Aunque a simple vista los diagramas son muy similares, se puede notar una leve diferencia en la apertura de ojo, siendo mayor en la Figura 2.28, lo que indica que, el canal externo tiene más tolerancia a la ISI.

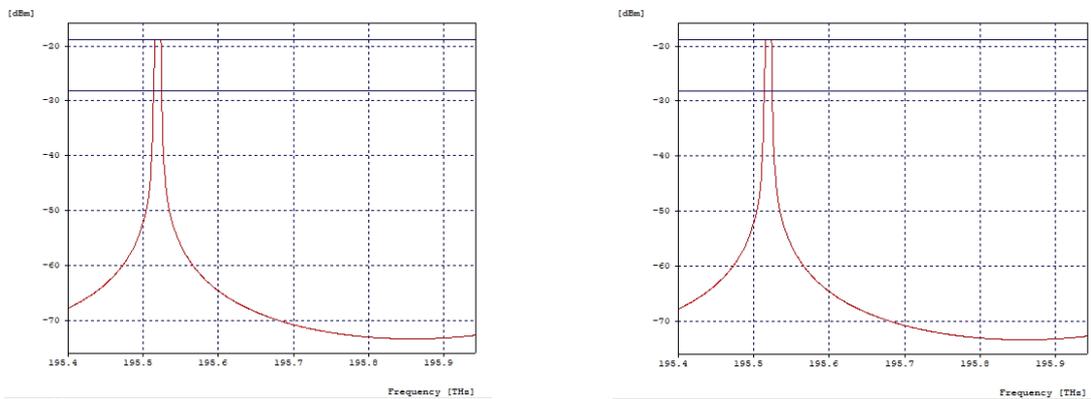


Figura 2.30. Espectro óptico canal interno. Figura 2.31. Espectro óptico canal externo.

En cuanto a los espectros ópticos no se evidencia gran diferencia puesto que ambos tienen la misma frecuencia central y valores de potencia muy similares.

Con respecto al análisis espectral se tiene que, para la red de prueba se debe asociar la Ecuación (1.29) definida en el primer capítulo en el desarrollo de la presente investigación, por lo tanto, se hace uso de la Ecuación (2.1).

$$\eta_{[bps/Hz]} = \frac{\sum_{i=1}^{\epsilon} B_{[chi]} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{s-chi}}{N_0 B} + \sum_{j=1}^{\varphi} B_{[chj]} \log_2 \right) 1 + \frac{P_{s-chj}}{N_0 B}}{\frac{B_{chi}[Hz]}{2} + \frac{B_{chj}[Hz]}{2} + (N-1)\Delta_v} \quad (2.1)$$

Cuyas variables de medición y control corresponden a:

- $C_N$  (Capacidad nominal por longitud de onda): se presenta como la capacidad neta binaria propagada a nivel de acceso.
- $C_{Total}$  (Capacidad total del sistema copropagante): se presenta como la sumatoria de las capacidades individuales de los canales propagados.
- $C_{Pro}$  (Capacidad de propagación de información por kilómetro): se presenta como la relación entre la cantidad de información y la distancia propagada.
- $\eta_{ded}$  (Eficiencia espectral dedicada por longitud de onda): se presenta como una relación neta entre la capacidad nominal y el ancho de banda ocupado.
- $(N-1)\Delta_v$  (Espaciamiento Óptico de los canales adyacentes).

- $\eta_{dist}$  (Eficiencia espectral Distribuida Teórica del sistema): se presenta como una relación de la capacidad total generada en el sistema vs el espaciamiento óptico.
- $\eta_{disa}$  (Eficiencia espectral Distribuida analítica por el sistema): se presenta como una relación de la Ecuación (1.29) entre la capacidad total vs el espectro real ocupado y la relación SNR máxima permisible [18].

Se procedió a definir el ancho de banda del sistema general, para ello, se ubicaron los marcadores en los primeros nulos del espectro óptico en Tx, obteniéndose un ancho de banda de 5,18 GHz, el cual también se puede obtener al analizar el espectro óptico de cualquiera de los canales de 2,5 Gbps en transmisión; para Rx, los marcadores se ubicaron en la frecuencia central del primer y cuarto canal, arrojando como resultado un ancho de banda de 300 GHz, sin embargo, al dificultarse determinar el primer nulo de los lóbulos, el cálculo no se tiene presente la mitad del ancho de banda, por lo que, se debe adicionar el ancho de banda correspondiente a un lóbulo completo, que es equivalente al valor de un solo canal calculado en Tx; así, el ancho de banda total del esquema general para los 4 canales es de 305,18 GHz.

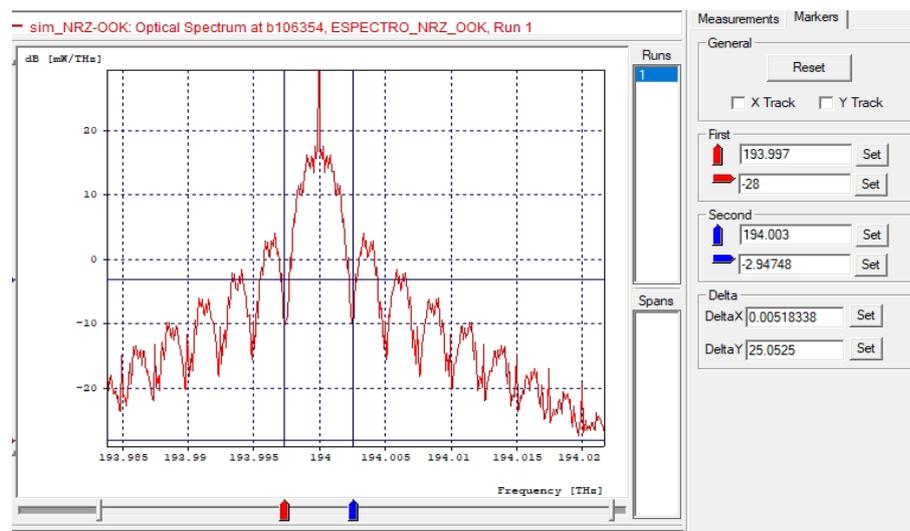


Figura 2.32. Espectro óptico en Tx, esquema de un solo canal.

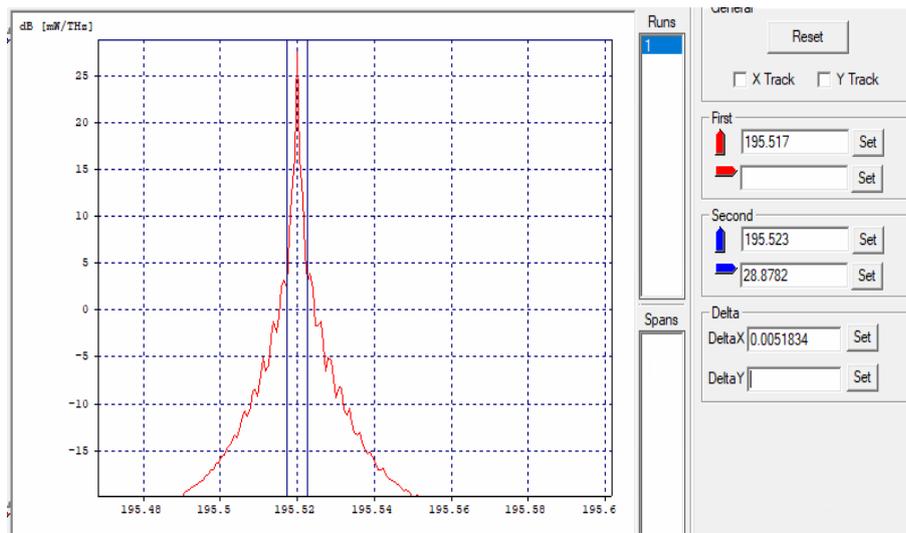


Figura 2.33. Espectro óptico en Tx, esquema de varios canales.

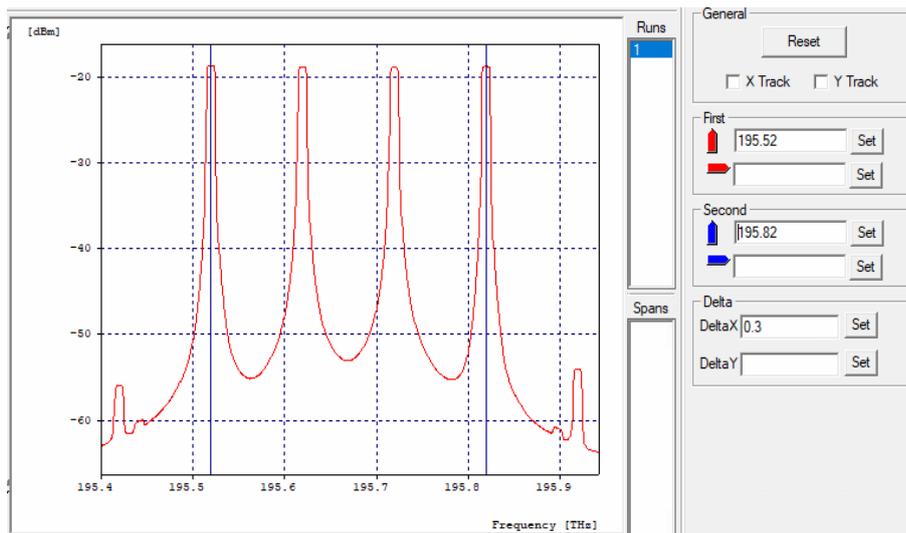


Figura 2.34. Espectro óptico en Rx.

$\Delta_v$	$C_n$	$C_{total}$	$C_{pro}$	$\eta_{ded}$	$\eta_{dist}$
—	2,5 Gbps	2,5 Gbps	Distancia 80,5 km	5,18 GHz	48,26 %
			201,25 Gbps * km	48,25 %	
<b>Parámetros</b>					
BER		factor Q		Jitter(ns)	
10 <sup>-40</sup>		30,351188		0,0682819	

Tabla 2.12. Variables de medición y control, un canal.

$\Delta_v$	$C_n$	$C_{total}$	$C_{pro}$	$\eta_{ded}$	$\eta_{dist}$
100 GHz	2,5 Gbps	4 ch x 2,5 Gbps	Distancia 80,5 km	5,18 GHz	305,18 GHz
		10 Gbps	805 Gbps * km	48,23 %	3,28 %

Tabla 2.13. Variables de medición y control, 4 canales.

Al analizar los resultados de las tablas se demuestra lo expuesto en la Ecuación (1.29) y considerando las condiciones específicas de este escenario, en donde los canales de tipo “j” se eliminan debido a que todos los canales son iguales, es decir, no poseen diferente tasa nominal entre ellos, quedando como se expresa en la Ecuación (2.2):

$$\eta_{max[bps/Hz]} = \frac{\sum_{i=1}^{\epsilon} B_{[chi]} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{s-chi}}{N_0 B} \right)}{\frac{B_{chi[Hz]}}{2} + (N - 1)\Delta_v} \quad (2.2)$$

En cuanto a la eficiencia espectral total del sistema, se tiene un valor de solo el 3,28 %, esto debido a que se pierde espectro al tener una separación de 100 GHz entre canales.

Por otra parte, para tratar de garantizar un entorno de propagación cuasi lineal, es decir, donde predominan los efectos de tipos lineales, que se caracterizan por ser constantes en el tiempo y dependen de las características de fabricación y medio, se toma la decisión de trabajar con muy bajas potencias cercanas a los 0 dBm y no implementar procesos de amplificación en línea para evitar la excitación de penalidades de las mismas, además, se hace uso de un buen receptor cuya sensibilidad permita que la potencia recibida sea baja.

En la Figura 2.35 se destacan fenómenos como la FWM, la XPM y SPM, que, aunque se encuentran presentes en el sistema son mínimos y por ende despreciables.

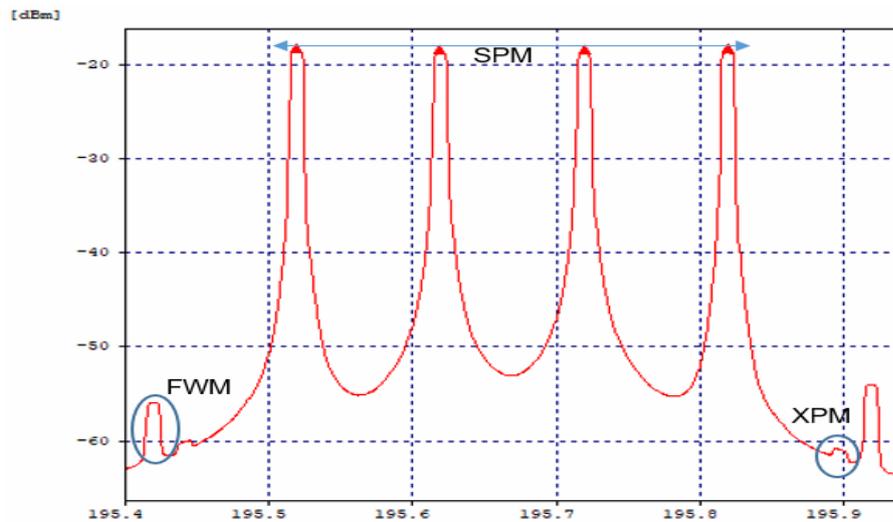


Figura 2.35. Fenómenos FWM y XPM  $P_{Tx} = 0$  dBm.

FWM o mezcla de cuatro ondas es un fenómeno de intermodulación en la óptica no lineal, por el cual las interacciones entre dos o tres longitudes de onda (canales) producen nuevas longitudes de onda de las réplicas infinitas del espectro, al ser tan pequeño es despreciable para el sistema e indica que se están usando adecuados niveles de potencia. XPM o modulación de fase cruzada se produce por el efecto óptico Keer en el que una longitud de onda de luz puede afectar la fase de otra longitud de onda de luz, o por el corrimiento de las frecuencias del láser original, fenómeno dependiente de la variable FWH que se estableció no ideal en las características del sistema, al ser tan pequeño es despreciable para el receptor y no afecta el desempeño del sistema.

En SPM o automodulación de fase, el pulso transmitido sufre un chirp de frecuencia, pues el mismo se automodula en fase, debido al cambio del índice de refracción dependiente de la intensidad, observando este fenómeno en los canales externos, que tienen una potencia levemente mayor que los canales internos.

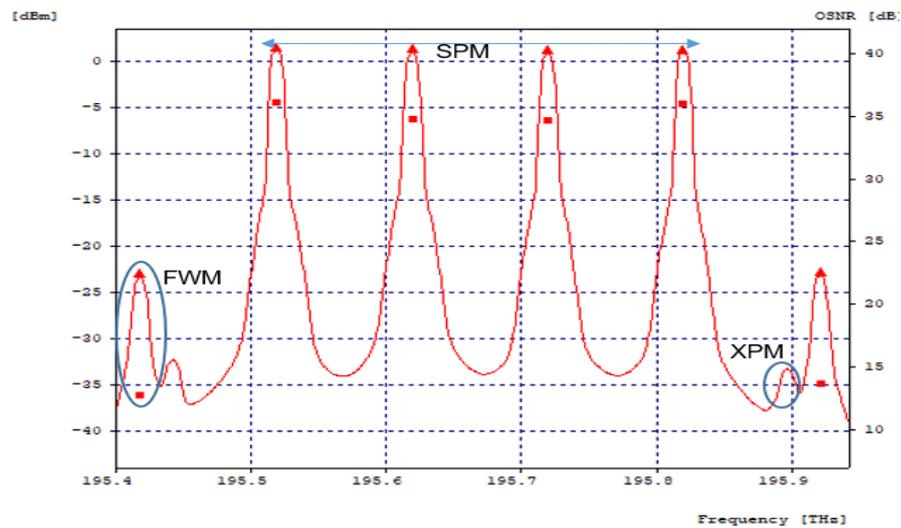


Figura 2.36. Fenómenos FWM y XPM  $P_{Tx} = 20$  dBm.

Para poder observar el impacto de los fenómenos no lineales en el sistema, se realizó una simulación del esquema general manteniendo las mismas características y variando solo la potencia de transmisión, fijando un valor de 20 dBm. En la Figura 2.36, al seleccionar la herramienta show channel, no se marcan cuatro canales (puntos superiores rojos) como al transmitir 0 dBm, sino seis, donde se están incluyendo dos canales adicionales por el fenómeno de FWM, y picos adyacentes menores por XPM, que ya no son despreciables en el sistema, también se puede apreciar la pendiente generada al unir los puntos de energía media de cada canal, siendo mayores los canales externos que internos, que se atribuye al fenómeno de SPM.

## 2.5. CASOS DE ESTUDIO

A continuación, se observan los casos de estudios definidos para el presente Trabajo de Grado.

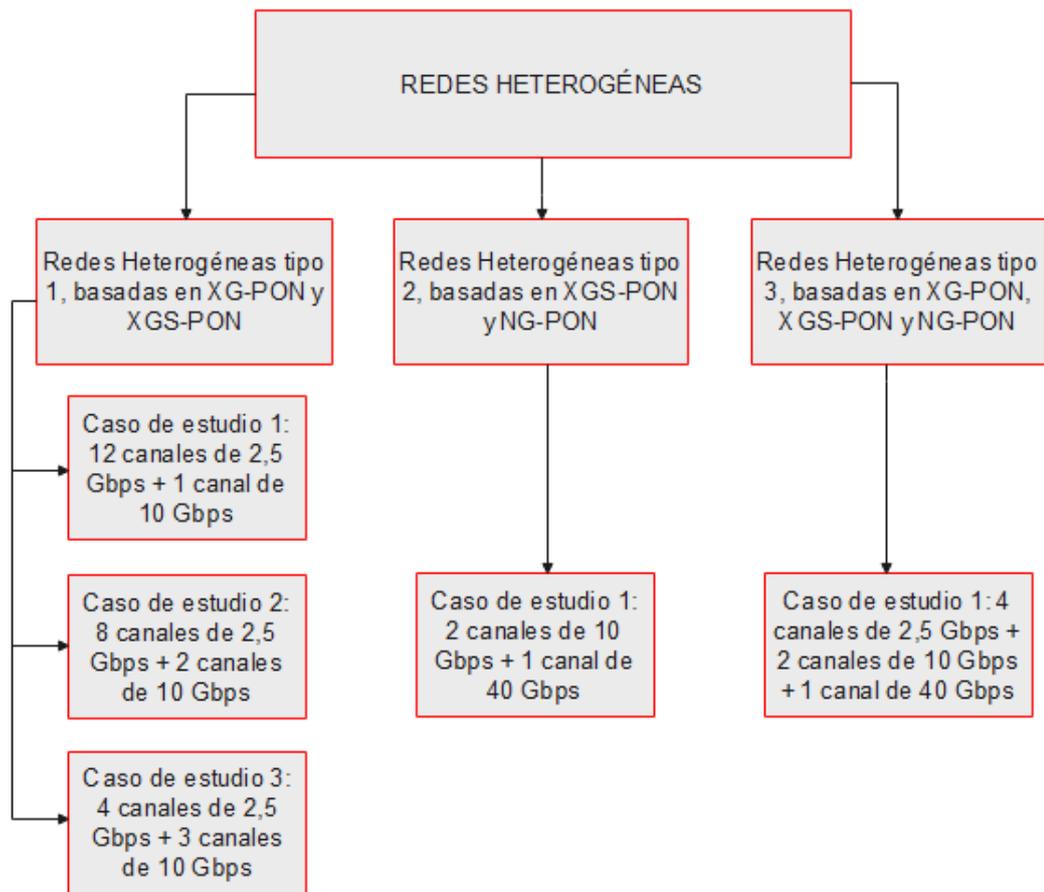


Figura 2.37. casos de estudios.

*Nota de autor.*

*Mediante la realización de este capítulo se definió un modelo de red para la simulación del enlace de bajada de una arquitectura de tipo heterogénea NG-PON para un régimen de propagación cuasilineal, identificando y estableciendo sus principales componentes de arquitectura de red, del mismo modo, se analizaron las características del sistema que influyen en el cálculo de la eficiencia espectral, permitiendo analizar los diferentes fenómenos lineales y no lineales presentes en la red partiendo de los esquemas espectrales obtenidos en cada canal, combinación de canales internos y externos mediante la aplicación de la Ecuación (1.29) “Adaptación de la teoría de la información para el régimen de propagación lineal en arquitecturas de red tipo NG-PON” logrando realizar el cálculo de la eficiencia espectral.*

## CAPÍTULO 3

### 3. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL PARA UNA ARQUITECTURA DE RED HETEROGÉNEA DE TIPO NG-PON

En este capítulo se va a analizar la medida de la eficiencia espectral para la ecuación adaptada de la Teoría de Shannon en un régimen de propagación cuasilineal de una arquitectura de red heterogénea de tipo NG-PON propuesta en capítulos anteriores, con el fin de identificar los parámetros que intervienen en un buen uso del espectro óptico para sacar el máximo provecho del ancho de banda sin afectar el throughput de la red.

#### 3.1. Redes heterogéneas tipo 1, basadas en XG-PON Y XGS-PON.

Este tipo de redes ópticas pasivas se caracterizan por proporcionar una capacidad a nivel de acceso de 10 Gbps y se dividen en dos clases, la primera llamada XG-PON1 que brinda una transmisión asimétrica, con 10 Gbps para downlink y 2,5 Gbps para uplink y XGS-PON, que proporciona una transmisión simétrica de 10 Gbps. Se destaca de este estándar la importancia de la coexistencia con redes GPON logrando altas velocidades en el throughput.

##### 3.1.1. Caso de estudio: 12 canales de 2,5 Gbps + 1 canal de 10 Gbps.

Para este primer caso de estudio se realizó el montaje de 12 canales de 2,5 Gbps y 1 canal de 10 Gbps partiendo del esquema general elaborado en el anterior capítulo. Se eligió una separación de canales de 40 GHz considerando la grilla espectral definida para este tipo de redes en los diferentes estándares, es decir, el primer canal centrado en 195,52 THz el segundo en 195,56 y el último, en 196 THz, se realizó una precompensación ideal de la dispersión cromática total acumulada en el sistema en un 25% mediante un compesador de rejilla de Bragg y se manejó una longitud de 80 km para la red de distribución y 500 m de fibra para la última milla, obteniendo así, el modelo de simulación de red observado en la Figura 3.1.

En la Figura 3.1 se observa el uso de 4 splitters, donde tres de ellos están dedicados a los canales de 2,5 Gbps, mientras que el último se emplea para un solo canal de 10 Gbps con la posibilidad de realizar un CAPEX de expansión hacia tres longitudes más, aumentando el throughput final de la red. Por otra parte, se destaca que no se usaron amplificadores en el sistema, lo que genera ahorro en costos y permite, eventualmente, una mejora de la señal, si se requiere.

Sin embargo al analizar el espectro óptico entregado después de la fibra, correspondiente al espectro throughput de la Figura 3.1, se evidenció que sólo se estaba obteniendo las frecuencias de los once primeros canales de 2,5 Gbps dejando por fuera el canal número 13 correspondiente a una velocidad de 10 Gbps, llegando a la conclusión que los límites inferior y superior del ancho de banda en el dominio de la frecuencia permitidos por el simulador Optisim generaba un tipo de acotamiento, limitando el número de canales de la grilla espectral, además, las velocidades al ser diferentes tienen requerimientos de distancia distintos, por lo que, el funcionamiento debe asegurarse primero para el canal de transmisión más complejo, el de 10 Gbps.

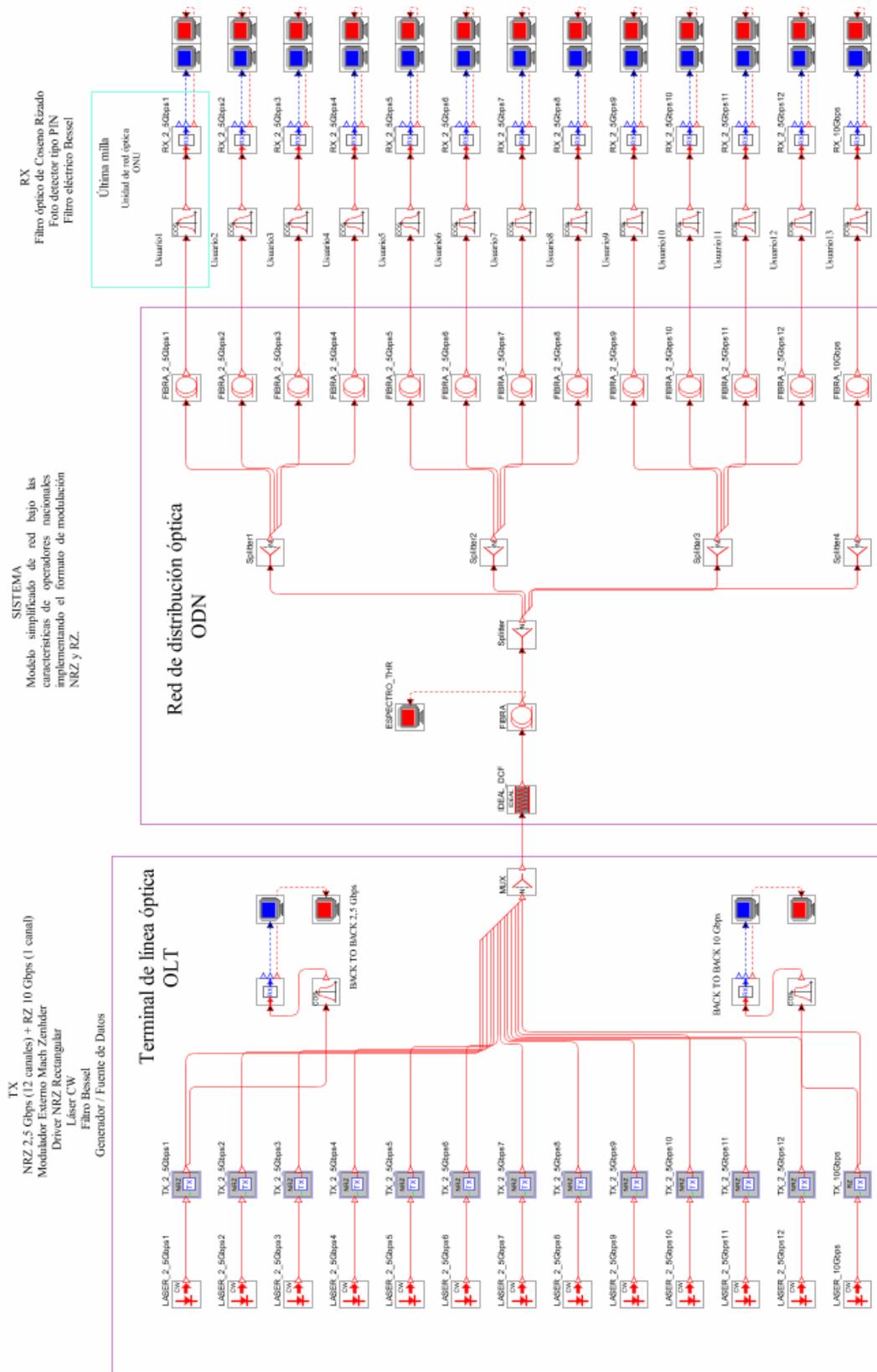


Figura 3.1. Esquema del caso de estudio.

Como se puede observar en la Figura 3.2, se encuentran las frecuencias de once canales, pero la de 195,96 y 196 THz de los canales 12 y 13 respectivamente, no se visualizan en el espectro, mientras que los pequeños picos en las frecuencias iniciales se deben a los efectos no lineales del sistema, explicados en capítulos anteriores.

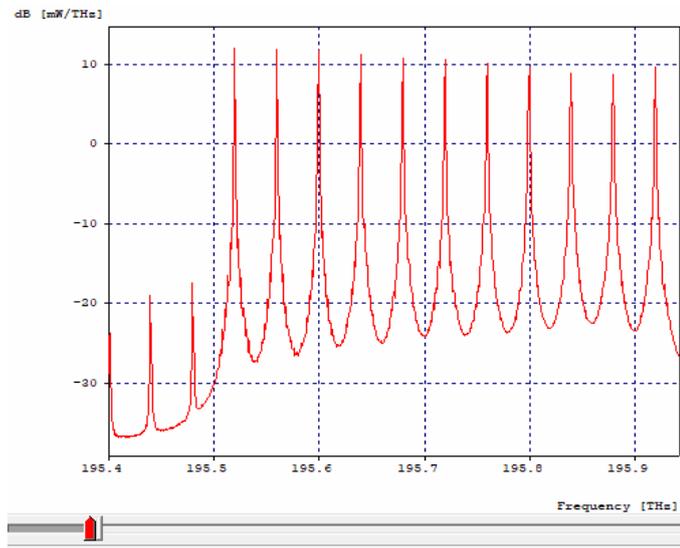


Figura 3.2. Espectro óptico throughput.

Por lo anterior, se decidió iniciar con un esquema de red heterogénea menor en volumen de canales (Figura 3.3) para identificar la grilla espectral permitida y el alcance que se podía tener con este tipo de red, con dos canales de 2,5 Gbps separados entre sí, 100 GHz y uno de 10 Gbps con una distancia de separación de 200 GHz del segundo canal de 2,5 Gbps, con una distancia del enlace de 80 km y 0,5 km de fibra para última milla, además, se realizó precompensación al 25 %, y se usó una potencia de 0 dBm para todos los canales.

Los resultados obtenidos en el espectro throughput y en el diagrama de ojo del canal de 10 Gbps (Figura 3.4), no eran los correspondientes al esquema planteado, obteniéndose una BER de 0.0227501, valor muy por debajo del establecido por el estándar de la ITU, por lo que, se procedió a iniciar con una serie de pasos y modificaciones en el esquema.

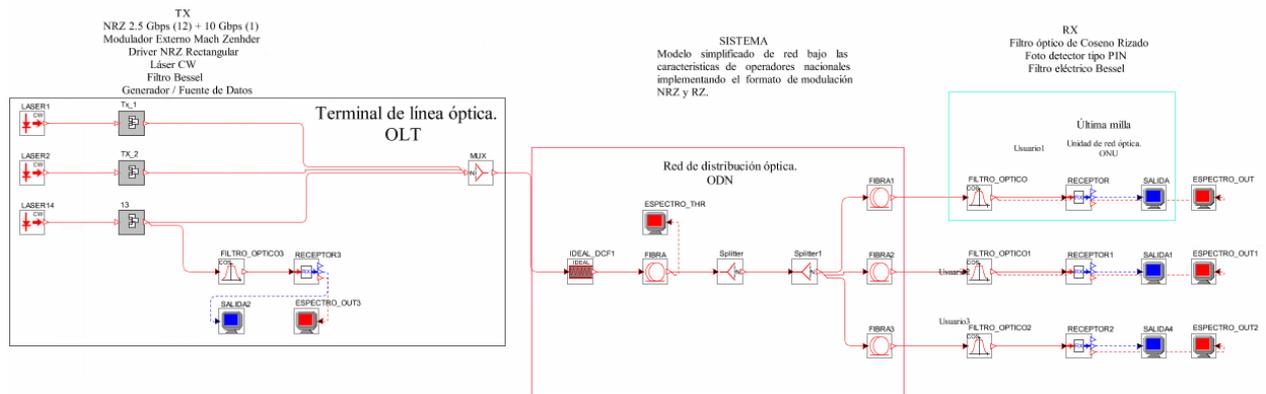


Figura 3.3. Caso de estudio inicial, 3 canales.

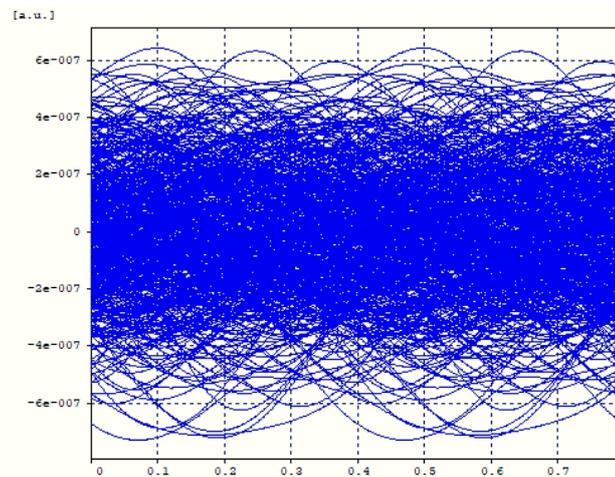


Figura 3.4. Diagrama del ojo inicial, 10 Gbps.

Se analizó el filtro óptico en el canal de 10 Gbps para cortar las frecuencias de 2,5 Gbps y obtener en solitario la frecuencia del canal de 10 Gbps; desde un filtro pasa alto, hasta un Gaussiano, se plantearon como posible solución, pero no se presentaron considerables cambios en el diagrama del ojo del canal de 10 Gbps. Pensando que el problema podría ser del espaciamiento se decidió establecer una distancia espectral de 400 GHz entre el primer canal de 2,5 Gbps y el de 10 Gbps, y de 100 GHz entre los canales de 2,5 Gbps, iniciando en la menor frecuencia posible, en este caso, el límite inferior del ancho de banda del sistema permitía una frecuencia de 195,42 THz, también se decidió simular con pérdidas solo en fibra y quitar el ruido óptico y eléctrico en el sistema, recreando un escenario ideal sin efectos lineales y no lineales, y disminuir la distancia de fibra óptica a 50 km, a pesar de ello, el problema continuaba, hasta que se abordó el filtro eléctrico Bessel, quitándolo y usando la señal filtrada que por defecto viene en el receptor donde se obtuvo un diagrama del ojo correspondiente a una modulación RZ a 10 Gbps.

A partir de ahí, se realizó la simulación con todos los efectos lineales y no lineales del sistema, con una distancia de fibra de 80 km y precompensando al 100% el módulo DCF,

el resto de parámetros se mantuvieron, obteniendo una BER de  $2.30363 \times 10^{-14}$ , cuyo diagrama del ojo se observa en la Figura 3.5.

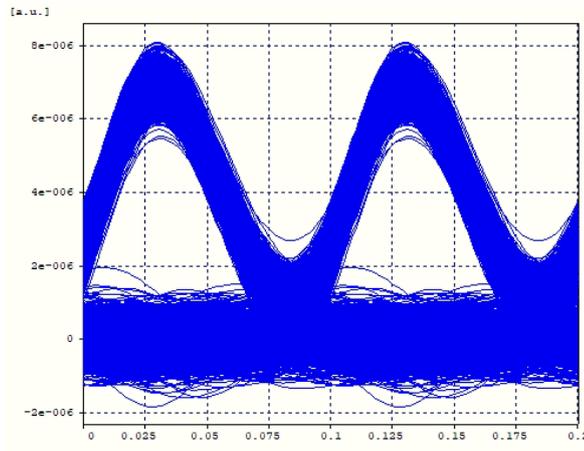


Figura 3.5. Diagrama de ojo 2, canal 10 Gbps.

Finalmente, se optó por aumentar la potencia del canal de 10 Gbps de 0 dBm a 5 dBm, para obtener mejores resultados, logrando una BER de  $10^{-40}$ , en la Figura 3.6 se observa el diagrama del ojo correspondiente a los últimos cambios realizados.

En la Figura 3.7, se observa el espectro óptico del throughput, con los dos canales de 2,5 Gbps y el canal de 10 Gbps.

En la Figura 3.7, se observa el espectro óptico del throughput, con los dos canales de 2,5 Gbps y el canal de 10 Gbps.

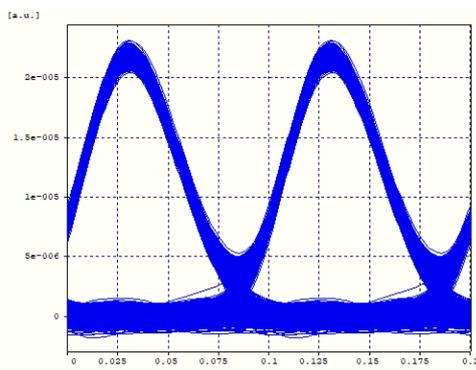


Figura 3.6. Diagrama de ojo 3 canales

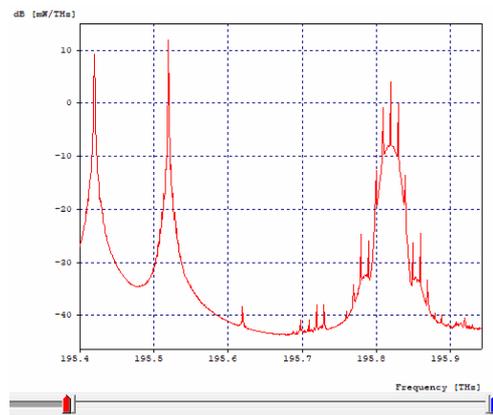


Figura 3.7. Espectro óptico del throughput 3 canales

Después de obtener este esquema de prueba funcionando correctamente, se inicia con la aproximación de los canales de 2,5 Gbps, variando las separaciones en frecuencia de 100 GHz, a 50 GHz, y finalmente a 25 GHz, de modo que, sea posible ahorrar espectro, y que

el canal de 10 Gbps no se vea afectado, evaluar el mínimo espaciado posible entre canales de 2,5 Gbps y conocer la cantidad máxima de canales que puede admitir el sistema. Finalmente se obtuvo el sistema observado en la Figura 3.1, en donde se tienen los doce canales de 2,5 Gbps, pero separados entre sí 25 GHz y el canal de 10 Gbps, separado del primero de 2,5 por 300 GHz, y con los demás parámetros iguales al esquema final de 3 canales mencionado anteriormente. Una vez obtenido el esquema final, se procedió a identificar el espacio ocupado por un solo canal de 10 Gbps.

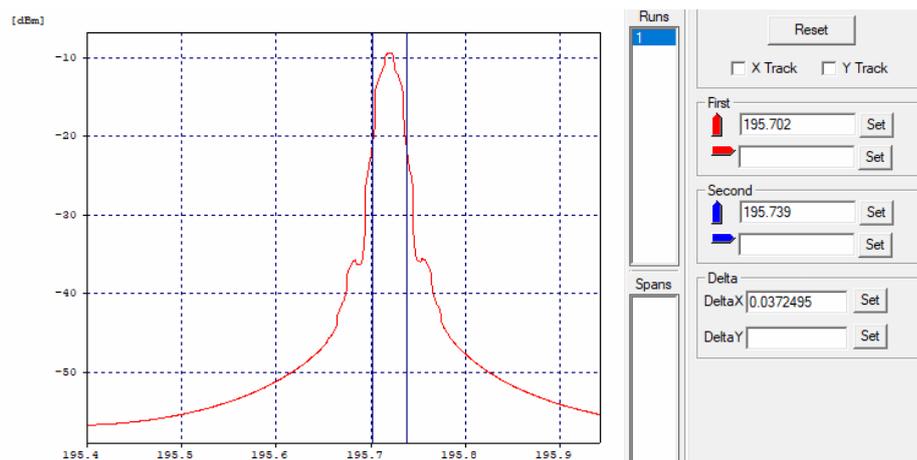


Figura 3.8. Espectro óptico canal de 10 Gbps.

Los resultados obtenidos en el esquema final, se observan a continuación:

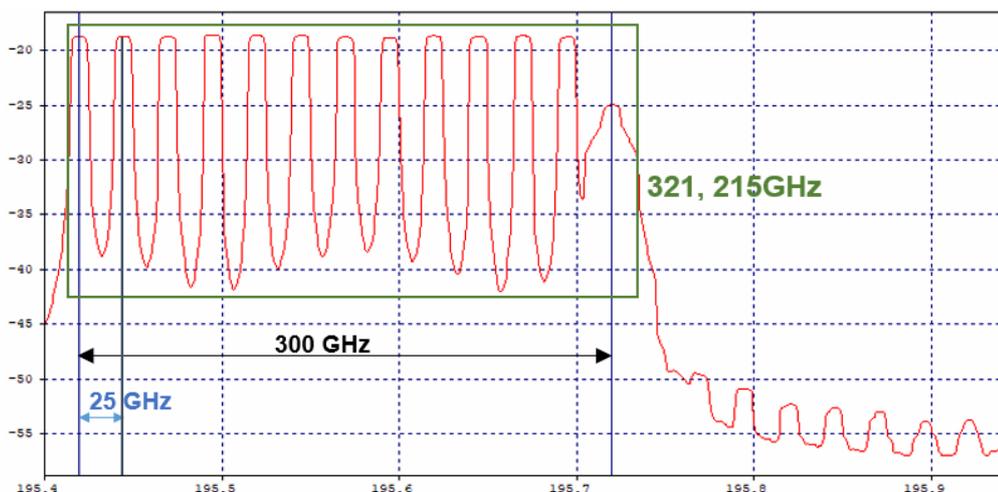


Figura 3.9. Espectro óptico del throughput, 13 canales

El espectro total utilizado para la transmisión es de 321,215 GHz, como se observa en la Figura 3,9, que resulta de sumar el espectro ocupado desde la frecuencia central del canal 1 de 2,5 Gbps hasta la del canal de 10 Gbps, más la mitad faltante del primer canal (2,59

GHz), más la faltante del último canal (18,625 GHz).

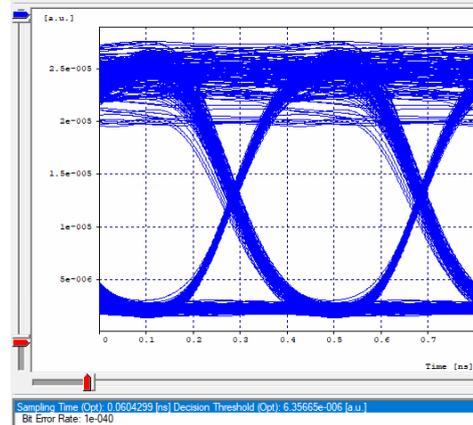
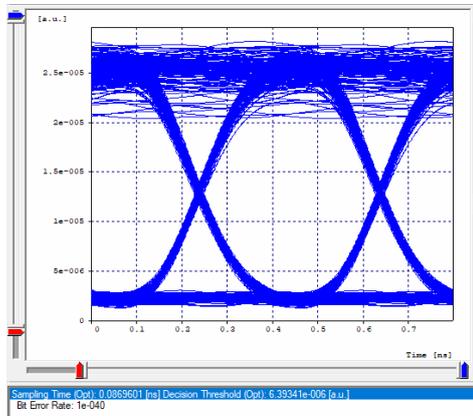


Figura 3.10. Diagrama de ojo canal 12; 2,5 Gbps      Figura 3.11. Diagrama de ojo canal 7; 2,5 Gbps.

Como se observa en las Figuras 3.10, 3.11 y 3.12, los diagramas de ojo corresponden a los esquemas de modulación usados y la BER se mantiene en  $10^{-40}$ , demostrando así, que fue posible obtener el throughput planteado para el caso de estudio 1.

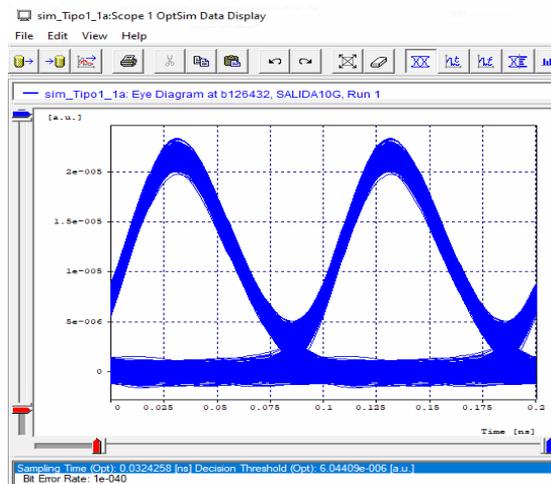


Figura 3.12. Diagrama de ojo canal 10 Gbps

En la Figura 3.13 se muestra el espectro óptico del doceavo canal de 2,5 Gbps, con el respectivo valor de potencia y OSNR, nótese que no se observa afectación alguna por el canal de 10 Gbps, como sí sucede en este último, que se ve afectado por la señal del canal de 2,5 Gbps, como se observa en la Figura 3.14.

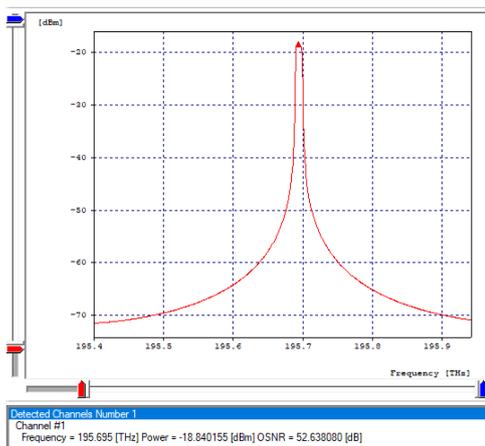


Figura 3.13. espectro canal de 11 de 2,5 Gbps.

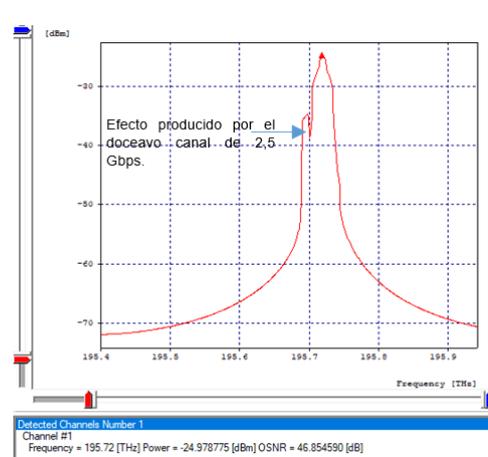


Figura 3.14. espectro canal de 10 Gbps.

Con respecto al análisis espectral, se tiene que, se debe asociar la Ecuación 29 definida en el primer capítulo; para ello, se inicia con el análisis de la eficiencia espectral de los canales por separado, como se observa en la Tabla 3.1 y 3.2.

$\Delta_{v1}$	$C_n$	$C_{total}$	$C_{pro}$	$\eta_{ded}$	$\eta_{dist}$
25 GHz	2,5 Gbps	12 ch x 2,5 Gbps	Distancia 80,5 km	5,18 GHz	305,18 GHz
		30 Gbps	2,42 Tbps*km	48,26 %	9,83 %.

Tabla 3.1. Variables de medición y control de los 12 canales de 2,5 Gbps.

$\Delta_{v2}$	$C_n$	$C_{total}$	$C_{pro}$	$\eta_{ded}$	$\eta_{dist}$
—	10 Gbps	1 ch x 10 Gbps	Distancia 80,5 km	37,25 GHz	37,25 GHz
		10 Gbps	0,81 Tbps*km	26,85 %	26,85 %.

Tabla 3.2. Variables de medición y control del canal de 10 Gbps.

Posteriormente, se procedió a realizar el cálculo de la eficiencia espectral del sistema híbrido, haciendo uso del ancho de banda total calculado y mostrado en la Figura 3.9.

$\Delta_v$ (GHz)	$C_n$	$C_{total}$	$C_{pro}$	$\eta_{ded}$	$\eta_{dist}$
$\Delta_{v1} = 25$	2,5 Gbps	12 ch x 2,5 Gbps 30 Gbps	Distancia 80,5 km	5,18 GHz	321,22 GHz
				48,26 %	
$\Delta_{v2} - - -$	10 Gbps	1 ch x 10 Gbps 10 Gbps	3,22 Tbps*km	37,25 GHz	12,45 %
				26,85 %	

Tabla 3.3. Variables de medición y control, esquema híbrido.

Los resultados expuestos en la Tabla 3.3, corresponden al análisis híbrido de la red, para este caso se maneja un  $\Delta_v$  o grilla espectral de 25 GHz, asociándose a la Ecuación (29) de la siguiente manera:

$$\eta_{max[bps/Hz]} = \frac{\sum_{i=1}^{\epsilon} 2,5Gbps + \sum_{j=1}^{\varphi} 10Gbps}{\frac{5,18}{2}GHz + 12 * 25GHz + \frac{37,25}{2}GHz}$$

$$\eta_{max[bps/Hz]} = \frac{(2,5Gbps) * 12 + 10Gbps}{321,22GHz}$$

$$\eta_{max[bps/Hz]} = \frac{40Gbps}{321,22GHz}$$

$$\eta_{max[bps/Hz]} = 0,1245[bps/Hz]$$

Se obtiene una eficiencia espectral de 12,45 % cercana a la de los canales de 2,5 Gbps, que en el respectivo análisis presentó el menor rendimiento. Aunque se tiene un throughput relativamente alto, se evidencia que se pierde eficiencia espectral al tener varios canales de baja capacidad, correspondientes a los 12 canales de 2,5 Gbps, lo cual se ve relegado en la variable de eficiencia distribuida del sistema.

### 3.1.2. Caso de estudio: 8 canales de 2,5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps.

Para este caso de estudio se realizó el montaje de 8 canales de 2,5 Gbps y 2 canales de 10 Gbps, partiendo del esquema final elaborado en el anterior caso; con una separación de canales de 25 GHz, se realizó una precompensación ideal de la dispersión cromática total acumulada en el sistema mediante un compesador de rejilla de Bragg y se manejó una longitud de 80 km para la red de distribución y 500 m de fibra para la última milla, obteniendo así, el modelo de simulación de red observado en la Figura 3.18.

Aunque en el espectro óptico del throughput (Figura 3.15) se observan los 10 canales, los resultados del esquema planteado no resultaron satisfactorios, debido a que el valor de la BER no cumple con el valor mínimo establecido por los estándares mencionados

anteriormente, como se observa en las Figuras 3.16 y 3.17.

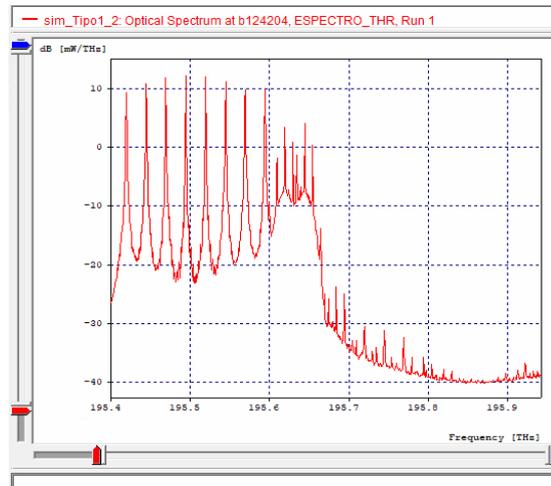


Figura 3.15. Espectro óptico del throughput, separación de 25 GHz.

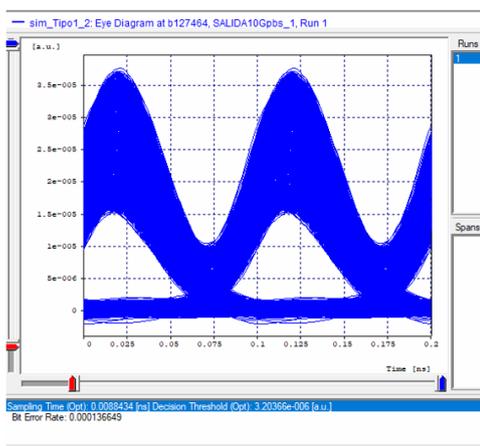


Figura 3.16. Canal 1 de 10 Gbps, separación de 25 GHz.

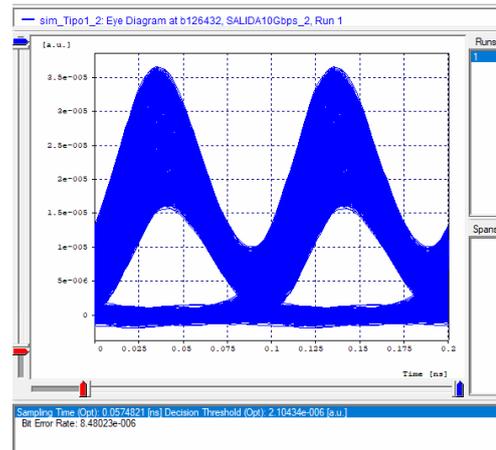


Figura 3.17. Canal 2 de 10 Gbps, separación de 25 GHz.

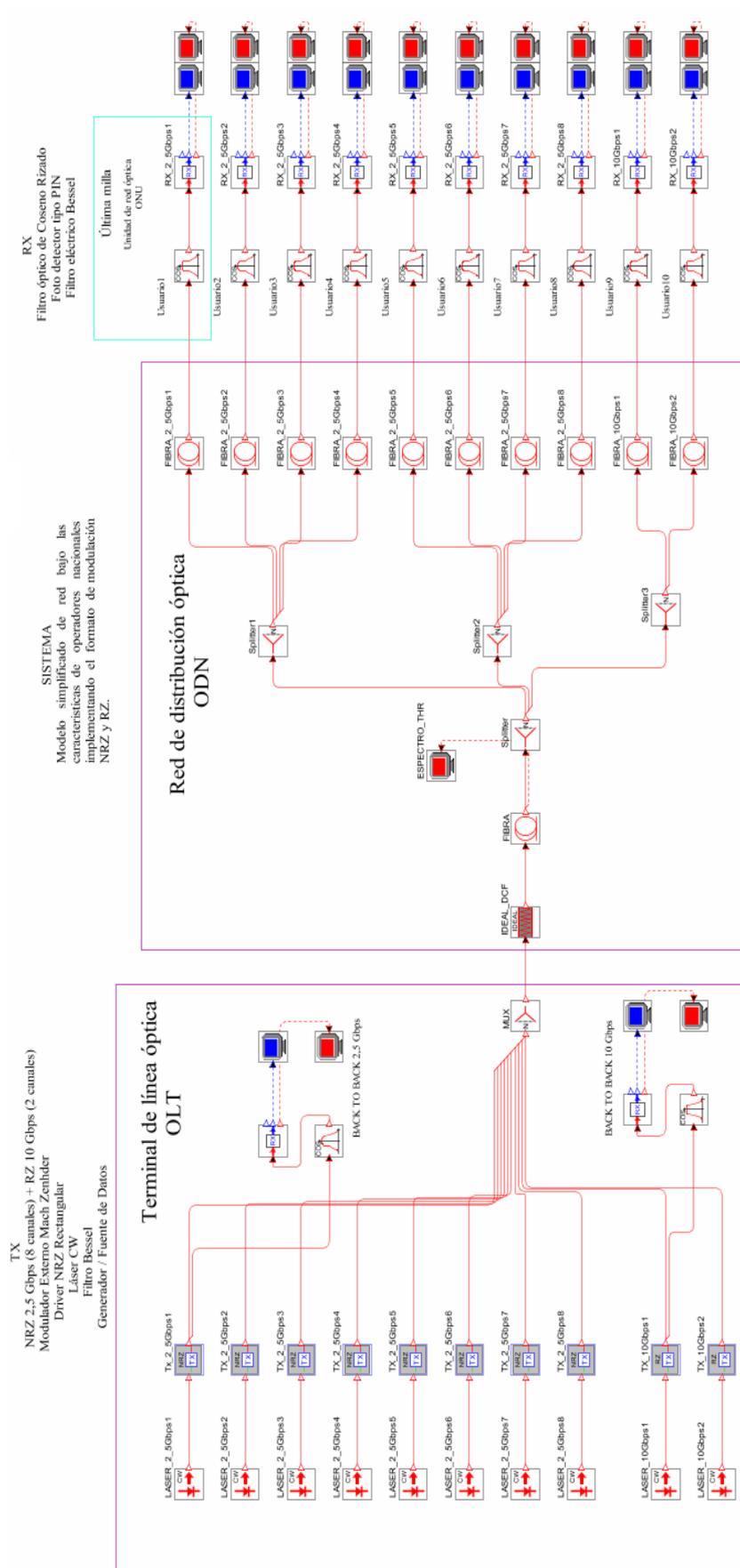


Figura 3.18. Esquema caso de estudio.

Para mejorar el valor de BER, se separó el segundo canal de 10 Gbps del primero, 50 GHz, obteniendo una BER de  $2,667 \times 10^{-39}$  en el primer canal de 10 Gbps, mientras que, en el segundo se obtuvo una BER de  $10^{-40}$ . Respecto a los canales de 2,5 Gbps, en todos se obtuvo valores de BER de  $10^{-40}$ . Los resultados mencionados anteriormente se observan desde la Figura 3.19 hasta la 3.24. .

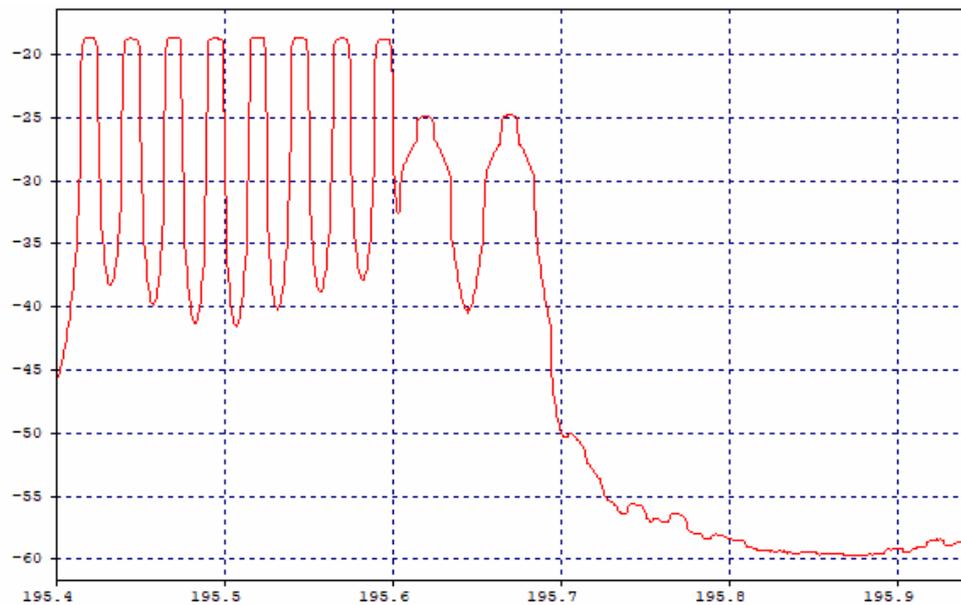


Figura 3.19. Espectro óptico del throughput, separación de 50 GHz.

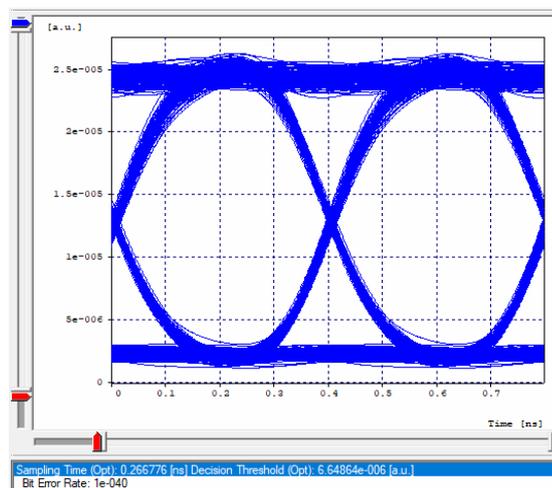


Figura 3.20. Diagrama de ojo, canal 7 de 2,5 GHz.

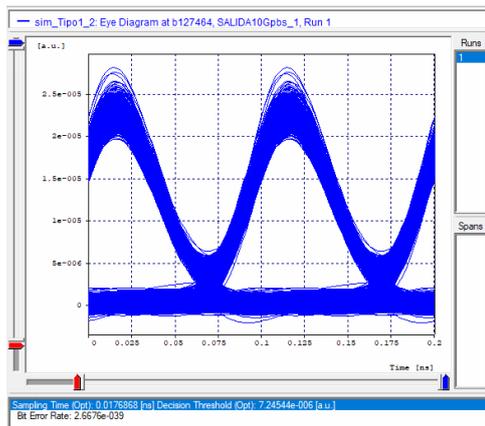


Figura 3.21. Canal 1 de 10 Gbps, separación 50 GHz.

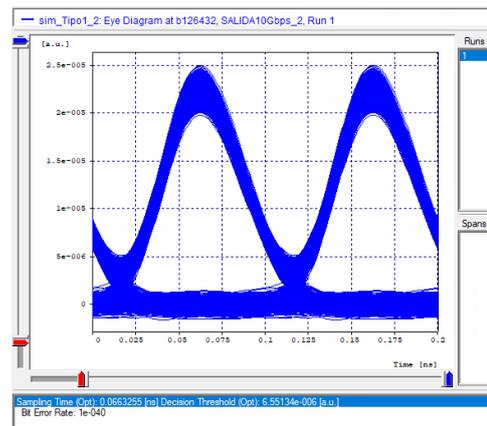


Figura 3.22. Canal 2 de 10 Gbps, separación 50 GHz.

Al analizar el espectro de cada canal, se evidencia que el de 10 Gbps contiguo al de 2,5 Gbps sufre una pequeña deformación, demostrando así, que a pesar de poder transmitir sobre una sola fibra canales con diferentes velocidades, las señales son susceptibles a pequeñas interferencias.

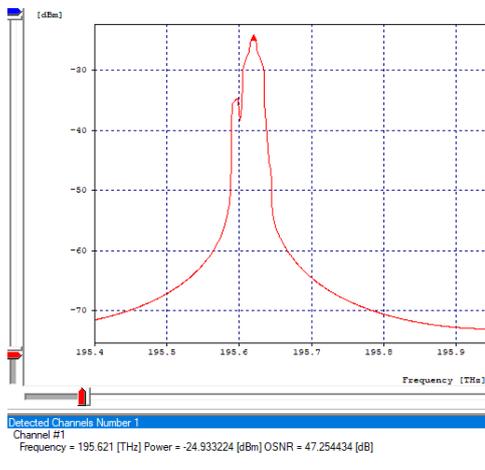


Figura 3.23. Espectro canal de 10 Gbps, contiguo al de 2,5 Gbps.

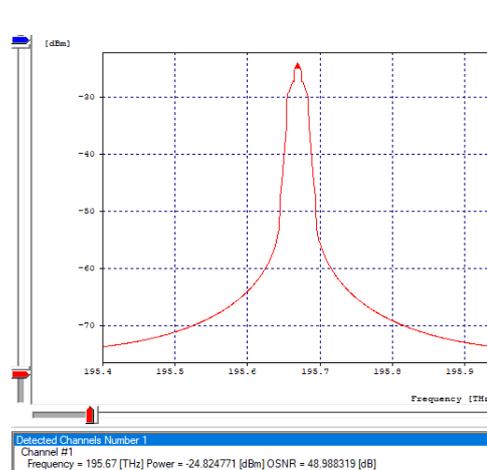


Figura 3.24. Espectro canal 2 de 10 Gbps.

En las Tablas 3.4 – 3.6 se relacionan los cálculos de la eficiencia espectral, tanto de manera individual como de manera conjunta.

En este modelo la eficiencia espectral es mayor al anterior, tal y como se esperaba, puesto que se redujo en un 66 % la cantidad de canales de 2,5 Gbps transmitidos, manteniendo el throughput y pudiendo así, transmitir un canal más de 10 Gbps.

$\Delta_{v1}$	$C_n$	$C_{total}$	$C_{pro}$	$\eta_{ded}$	$\eta_{dist}$
25 GHz	2,5 Gbps	8 ch x 2,5 Gbps	Distancia 80,5 km	5,18 GHz	180,18 GHz
		20 Gbps	1,61 Tbps*km	9,88 %	11,10 %.

Tabla 3.4. Variables de medición y control de los 8 canales de 2,5 Gbps.

$\Delta_{v2}$	$C_n$	$C_{total}$	$C_{pro}$	$\eta_{ded}$	$\eta_{dist}$
50 GHz	10 Gbps	2 ch x 10 Gbps	Distancia 80,5 km	37,25 GHz	87,25 GHz
		20 Gbps	1,61 Tbps*km	26,85 %	22,92 %.

Tabla 3.5. Variables de medición y control de los 2 canales de 10 Gbps.

$\Delta_v$ (GHz)	$C_n$	$C_{total}$	$C_{pro}$	$\eta_{ded}$	$\eta_{dist}$
$\Delta_{v1} = 25$	2,5 Gbps	8 ch x 2,5 Gbps 20 Gbps	Distancia 80,5 km	5,18 GHz	271,22 GHz
				9,88 %	
$\Delta_{v2} = 50$	10 Gbps	2 ch x 10 Gbps 20 Gbps	3,22 Tbps*km	37,25 GHz	14,75 %
				26,85 %	

Tabla 3.6. Variables de medición y control, esquema híbrido.

$$\eta_{max[bps/Hz]} = \frac{\sum_{i=1-8}^{\epsilon} 2,5Gbps + \sum_{j=1-2}^{\varphi} 10Gbps}{\frac{5,18}{2}GHz + 8 * 25GHz + 50GHz + \frac{37,25}{2}GHz}$$

$$\eta_{max[bps/Hz]} = \frac{(2,5Gbps) * 8 + 10Gbps * 2}{271,22GHz}$$

$$\eta_{max[bps/Hz]} = \frac{40Gbps}{271,22GHz}$$

$$\eta_{max[bps/Hz]} = 0,1475[bps/Hz]$$

Se obtiene una eficiencia espectral de 14,75 %, mayor a la obtenida en el caso de estudio anterior, debido a que, se redujo la cantidad de canales de 2,5 Gbps, manteniéndose el throughput. Al reducir la cantidad de canales de 2,5 Gbps, se logra acortar el espectro

utilizado para la transmisión, puesto que, el espaciamiento mínimo para transmitir 12 canales de 2,5 Gbps y uno de 10 Gbps es de 75 GHz, mientras que, para transmitir 2 canales de 10 Gbps solo se necesitan 50 GHz..

### 3.1.3. Caso de estudio: 4 canales de 2,5 Gbps + 3 de 10 Gbps.

Para este caso de estudio se realizó el montaje de 4 canales de 2,5 Gbps y 3 canales de 10 Gbps, partiendo del esquema final elaborado en el anterior caso; con una separación de 25 GHz entre los canales de 2,5 y el primero de 10 Gbps, y de 50 GHz entre los canales de 10 Gbps, se realizó una precompensación ideal de la dispersión cromática total acumulada en el sistema mediante un compesador de rejilla de Bragg y se manejó una longitud de 80 km para la red de distribución y 500 m de fibra para la última milla, obteniendo así, el modelo de simulación de red observado en la Figura 3.25.

En la Figura 3.26 se observa el espectro óptico de los 7 canales los cuales tienen el espaciamiento suficiente para poder coexistir sin que la interferencia entre ellos pueda afectar el rendimiento de cada uno de los canales, ocupando un espectro de 221,22 GHz.

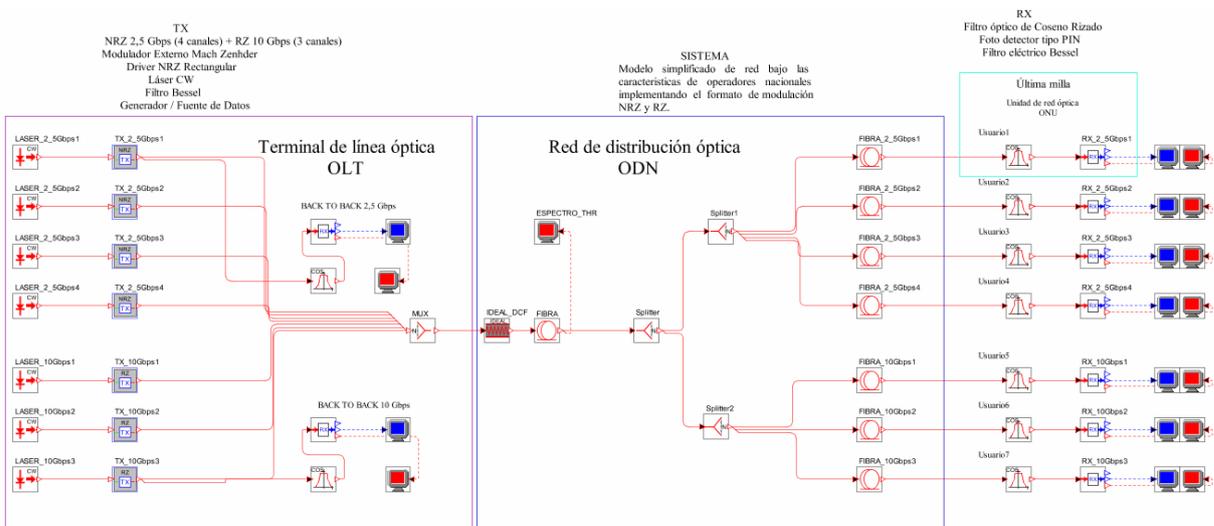


Figura 3.25. Esquema caso de estudio.

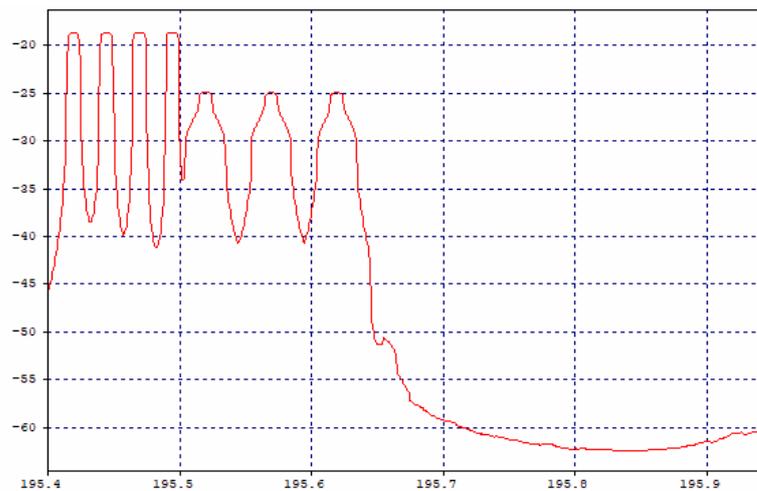


Figura 3.26. Espectro óptico del throughput.

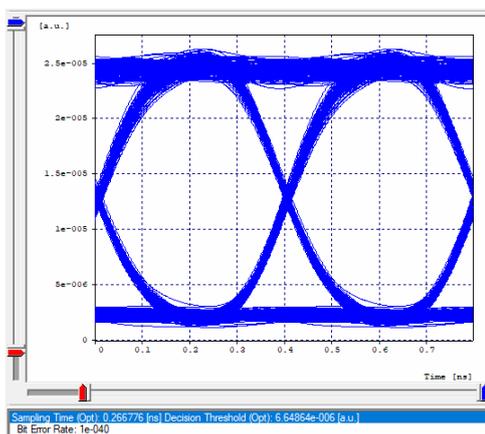


Figura 3.27. Diagrama de ojo, canal 4 de 2,5 Gbps

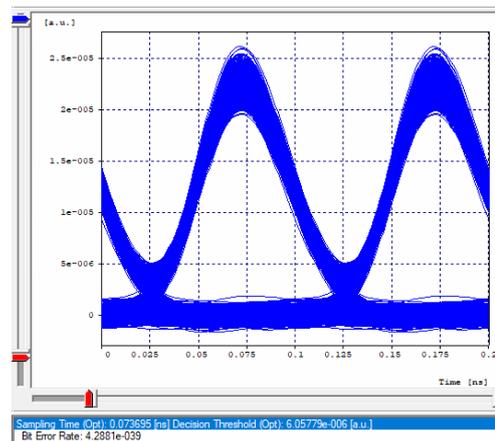


Figura 3.28. Diagrama de ojo, canal 2 de 10 Gbps

El canal de 10 Gbps del medio es aquel que se ve afectado por las señales de los 2 de los extremos, puesto que notamos que el valor de la BER es menor que el de sus homólogos, pero dicha afectación no se ve reflejada en los espectros ópticos, indicando que no se presenta FWM entre los canales de 10 Gbps (separados entre sí 50 GHz), como si sucede entre el cuarto canal de 2,5 Gbps y el primero de 10 Gbps que se ve afectado por el canal de menor velocidad debido que solo cuentan con una separación de 25 GHz entre sí, la cual no es suficiente para que el canal de mayor velocidad no sea afectado por el de menor velocidad, debido a que cuando se transmiten canales con diferentes velocidades sobre una sola fibra, los canales de mayor velocidad tienden a verse afectados por los de una velocidad de transmisión menor.

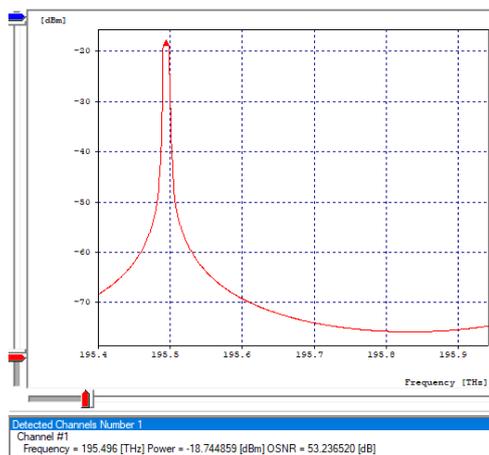


Figura 3.29. Espectro, canal 4 de 2,5 Gbps

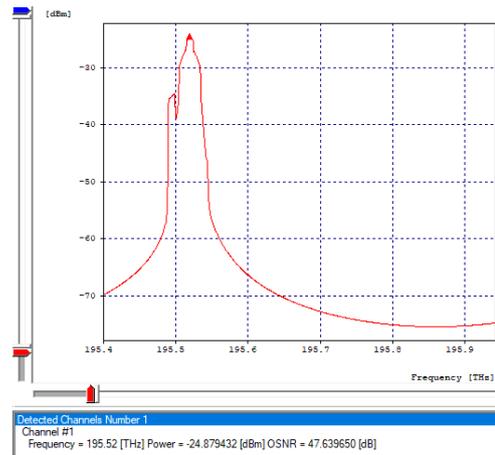


Figura 3.30. Espectro, canal 1 de 10 Gbps.

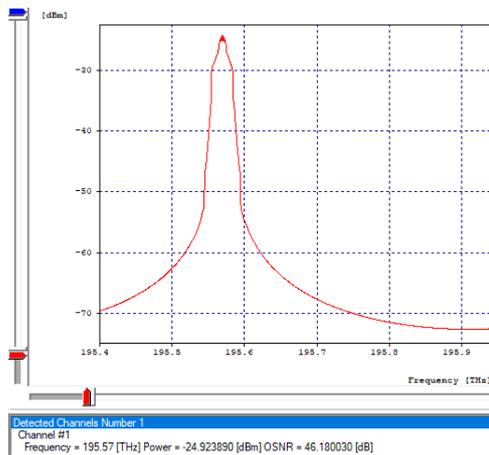


Figura 3.31. Espectro, canal 2 de 10 Gbps

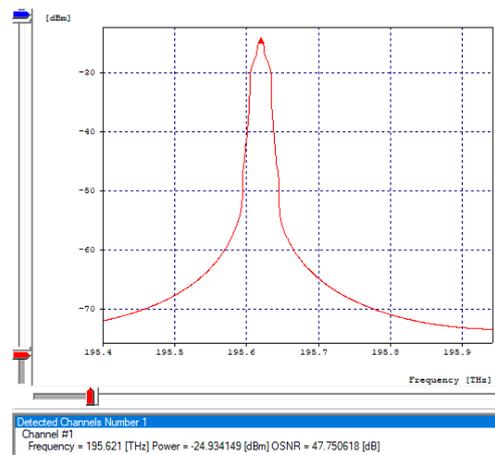


Figura 3.32. Espectro, canal 3 de 10 Gbps.

En las Tablas 3.7 – 3.9 se relacionan los cálculos de la eficiencia espectral, tanto de manera individual como de manera conjunta.

$\Delta_{v1}$	$C_n$	$C_{total}$	$C_{pro}$	$\eta_{ded}$	$\eta_{dist}$
25 GHz	2,5 Gbps	4 ch x 2,5 Gbps	Distancia 80,5 km	5,18 GHz	80,18 GHz
		10 Gbps	0,81 Tbps*km	9,88 %	12,47 %.

Tabla 3.7. Variables de medición y control de los 4 canales de 2,5 Gbps.

$\Delta_{v2}$	$C_n$	$C_{total}$	$C_{pro}$	$\eta_{ded}$	$\eta_{dist}$
50 GHz	10 Gbps	3 ch x 10 Gbps	Distancia 80,5km	37,25 GHz	137,25 GHz
		30 Gbps	2,42 Tbps*km	26,85 %	21,86 %.

Tabla 3.8. Variables de medición y control de los 3 canales de 10 Gbps, caso de estudio 3

Se tiene un aumento en la eficiencia espectral, esto porque se mantuvo el throughput, y se redujo a la mitad los canales de 2,5 Gbps, ahorrando espectro para poder adicionar el canal de 10 Gbps.

$\Delta_v$ (GHz)	$C_n$	$C_{total}$	$C_{pro}$	$\eta_{ded}$	$\eta_{dist}$
$\Delta_{v1} = 25$	2,5 Gbps	4 ch x 2,5 Gbps 10 Gbps	Distancia 80,5 km	5,18 GHz	221,22 GHz
				9,88 %	
$\Delta_{v2} = 50$	10 Gbps	3 ch x 10 Gbps 30 Gbps	3,22 Tbps*km	37,25 GHz	18,08 %
				26,85 %	

Tabla 3.9. Variables de medición y control, esquema híbrido.

$$\eta_{max[bps/Hz]} = \frac{\sum_{i=1-4}^{\epsilon} 2,5Gbps + \sum_{j=1-3}^{\varphi} 10Gbps}{\frac{5,18}{2}GHz + 4 * 25GHz + 50GHz * 2 + \frac{37,25}{2}GHz}$$

$$\eta_{max[bps/Hz]} = \frac{(2,5Gbps) * 4 + 10Gbps * 3}{221,22GHz}$$

$$\eta_{max[bps/Hz]} = \frac{40Gbps}{221,22GHz}$$

$$\eta_{max[bps/Hz]} = 0,1808[bps/Hz]$$

Para este caso, se obtuvo el valor más alto en la eficiencia espectral (18,08 %), debido a que, se transmitieron únicamente 4 canales de 2,5 Gbps y 3 de 10 Gbps, al igual que en los dos casos anteriores se transmitió un throughput de 40 Gbps. La mejora en la eficiencia espectral se debe a que, fue posible reducir el espaciamento ocupado en la transmisión de canales de 2,5 Gbps, esto, transmitiendo canales de 10 Gbps, que permiten mantener la capacidad, pero reducir el ancho de banda utilizado en el espaciamento de canales.

### 3.2. Redes heterogéneas tipo 2, basadas en XGS-PON Y NG-PON.

Como se mencionó en la sección 3.1. con las redes basadas en XGS-PON se pueden alcanzar velocidades de transmisión de 10 Gbps simétricas, mientras que en las redes NG-PON, se puede lograr una transmisión de hasta 40 Gbps en downstream.

#### 3.2.1. Caso de estudio: 2 canales de 10 Gbps + 1 canal de 40 Gbps.

Para el análisis de este caso de estudio se partió con el modelo determinado anteriormente para los canales de 10 Gbps, en donde se tiene una potencia de 5 dBm, precompesación ideal y una separación entre canales de 50 GHz, además, el primer canal de 10 Gbps se transmitió con una frecuencia central de 195,42 THz. Luego, se adicionó el canal de 40 Gbps con una potencia de 0 dBm y una separación de 50 GHz respecto al segundo canal de 10 Gbps.

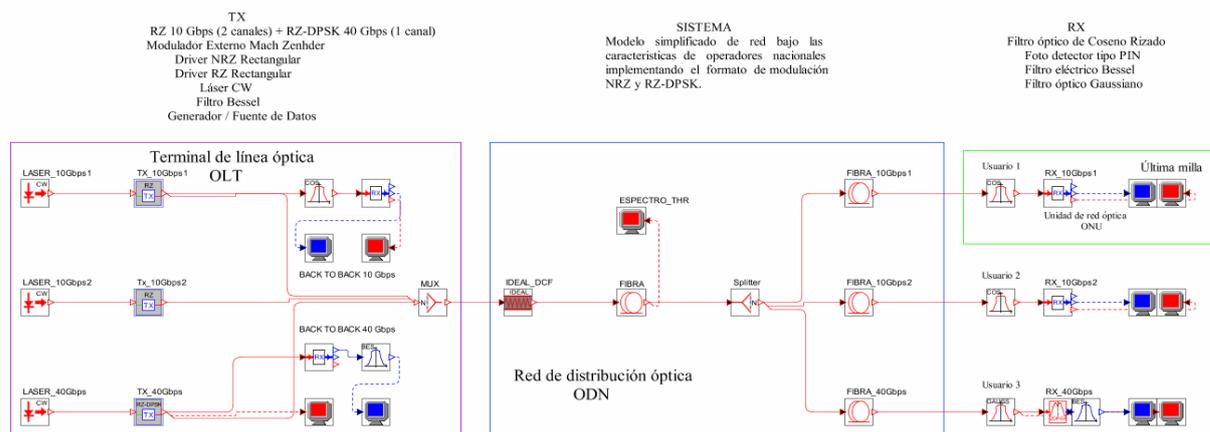


Figura 3.33. Esquema caso de estudio.

Como se puede apreciar en las Figuras 3.35 y 3.36, se observa cómo se afectan el segundo canal de 10 Gbps y el de 40 Gbps, evidenciándose una BER que no cumple con el valor mínimo establecido en los estándares, si se analiza la BER obtenida para el primer canal de 10 Gbps y el espectro throughput, se podría hipotetizar que en los 2 canales mencionados al inicio no se obtienen los resultados de BER deseados debido al espaciamiento insuficiente entre ellos, por lo que, se procedió a duplicar dicho espaciamiento.

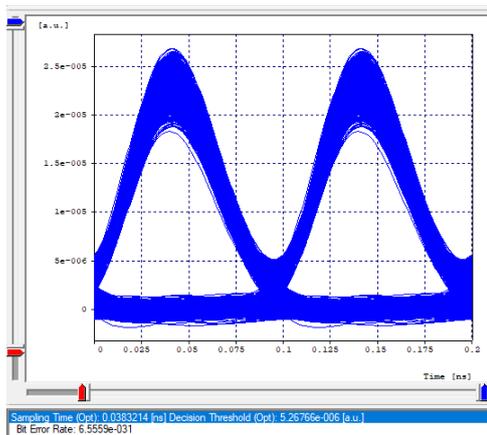


Figura 3.34. Diagrama de ojo, canal 1 de 10 Gbps

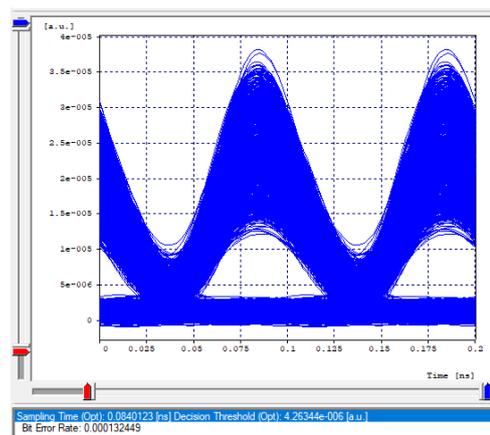


Figura 3.35. Diagrama de ojo, canal 2 de 10 Gbps

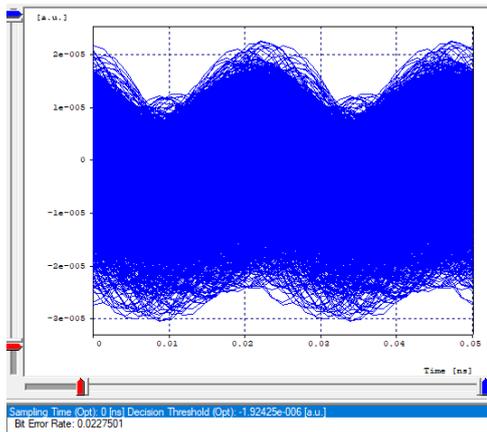


Figura 3.36. Diagrama de ojo, canal de 40 Gbps

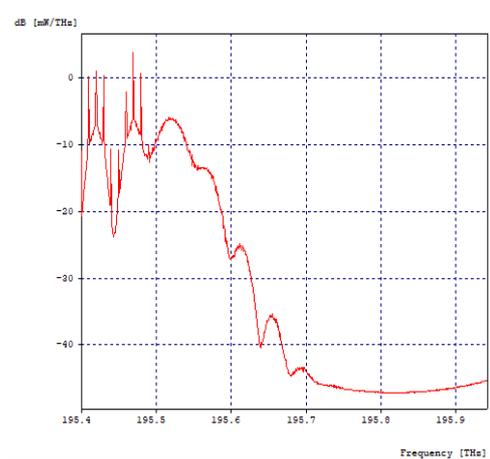


Figura 3.37. Espectro Throughput.

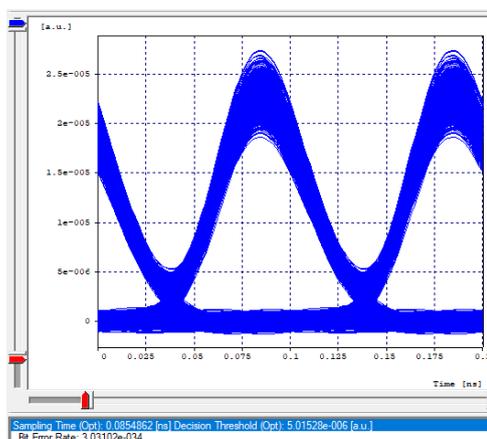


Figura 3.38. Diagrama de ojo, canal 2 de 10 Gbps

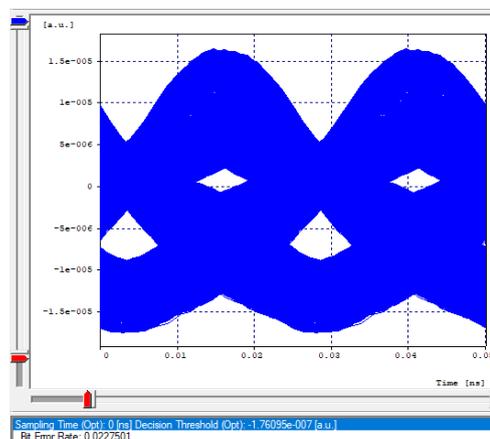


Figura 3.39. Diagrama de ojo, canal de 40 Gbps

Al utilizar un espaciamiento de 100 GHz entre los dos canales se observa una mejora en la BER, pero para el canal de 40 Gbps sigue sin obtenerse el resultado deseado, así que, se procedió a aumentar la potencia en el láser, pero el resultado fue el mismo. Como ninguno de los cambios en potencia y espaciamiento eran efectivos, se procedió a analizar diagrama de ojo en el back to back, observándose lo siguiente.

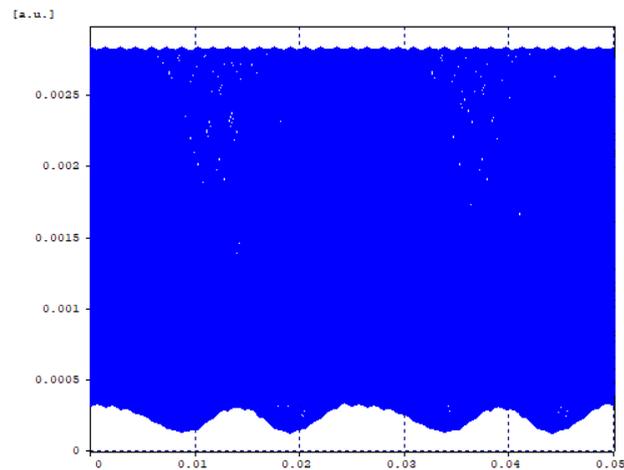


Figura 3.40. Diagrama de ojo Back to Back, canal de 40 Gbps.

El diagrama de ojo de la Figura 3.40 nos demuestra que la falla se encuentra desde la transmisión, por lo tanto, se realizaron cambios en los parámetros de los elementos que conforman el transmisor (Figura 3.41).

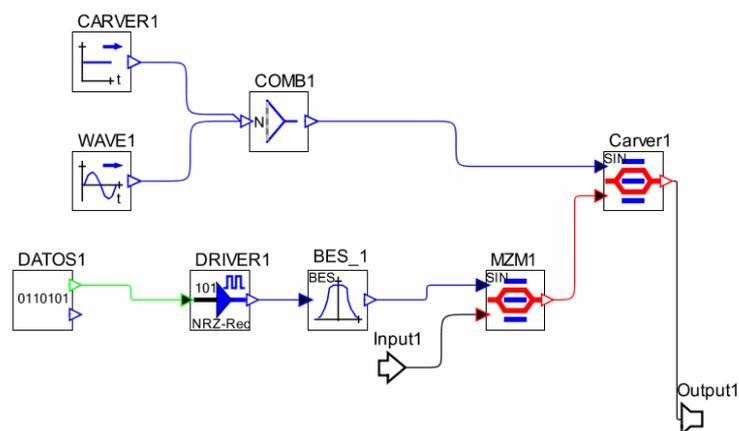


Figura 3.41. Transmisión canal de 40 Gbps.

Los cambios efectuados en los elementos de transmisión no fueron efectivos, así que, se optó por cambiar la grilla espectral, situándola entre 193,4 y 194,6 THz, obteniendo finalmente la BER deseada para el canal de 40 Gbps.

Una vez realizados los cambios para obtener los valores de BER deseados, se procedió a calcular el espacio ocupado para transmitir el canal de 40 Gbps usando el mismo procedimiento que se realizó con los canales de 2,5 Gbps y 10 Gbps.

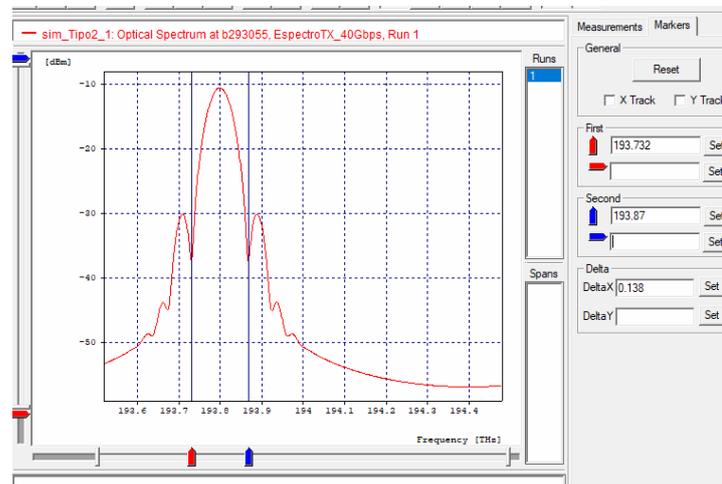


Figura 3.42. Espacio óptico canal de 40 Gbps.

El espacio mínimo para transmitir un canal de 40 Gbps es de 138 GHz como se observa en la Figura 3.42, mientras que, para este caso de estudio el espacio ocupado para transmitir los 2 canales de 10 Gbps y el de 40 Gbps fue de 237,625 GHz, resultado de sumar 150 GHz (distancia entre las frecuencias centrales del primer canal de 10 Gbps y el de 40 Gbps) más la mitad faltante del primer canal de 10 Gbps (18,625 GHz), más la mitad faltante del canal de 40 Gbps (69 GHz).

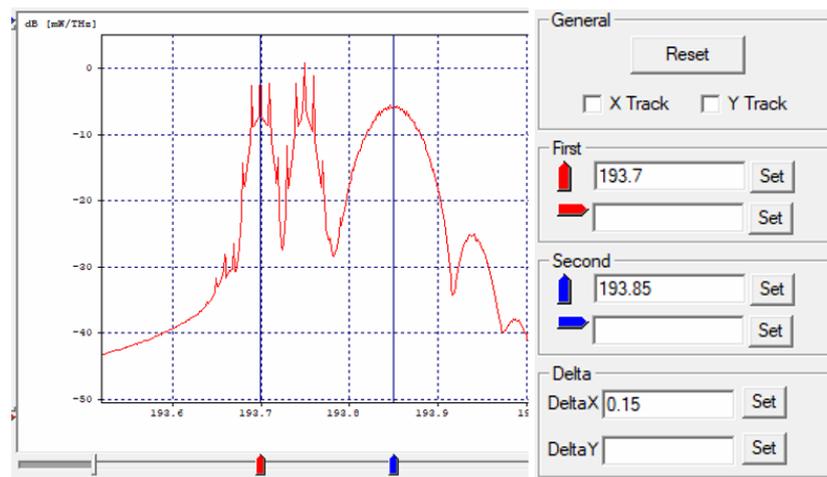


Figura 3.43. Espectro óptico del throughput.

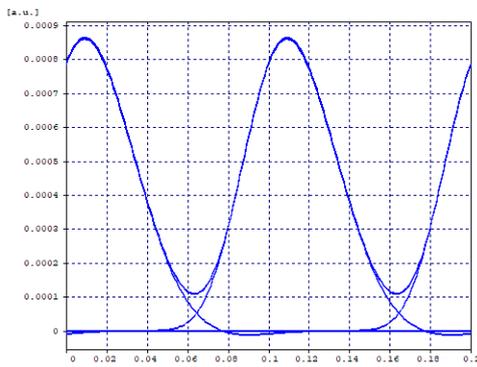


Figura 3.44. Back to Back, canal 1 de 10 Gbps.

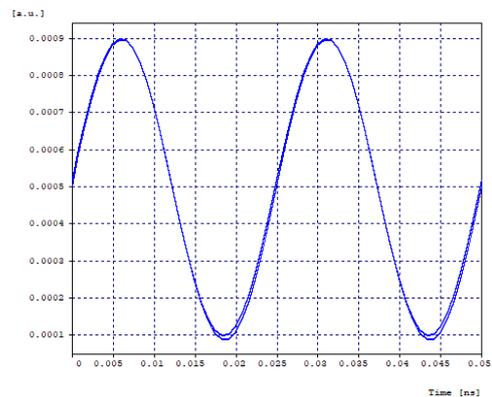


Figura 3.45. Back to Back, canal de 40 Gbps.

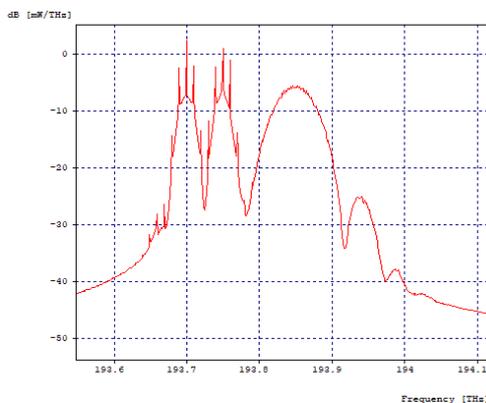


Figura 3.46. Espectro throughput.

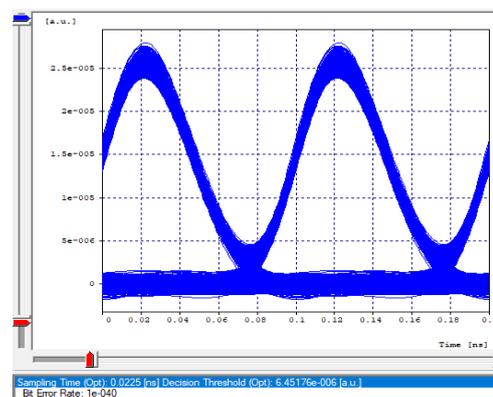


Figura 3.47. Diagrama de ojo, canal 1 de 10 Gbps.

La modulación DPSK es robusta frente a los fenómenos de ruido y pérdidas por atenuación, donde estas degradaciones no son significativas para afectar el desempeño del sistema, al combinarla con formatos como RZ-OOK, se puede duplicar la capacidad de transmisión sin incurrir en una penalización de potencia por efecto de la dispersión cromática y la PMD por lo que es de amplio uso para transmitir estas altas velocidades de bits.

En el espectro throughput de la señal, se observan los tres canales transmitidos originalmente además de pequeños canales adicionales los cuales pueden llegar a coincidir con algún canal original produciendo distorsión o pérdida de la información, como producto del efecto FWM o mezcla de cuatro ondas, esto quiere decir que, en algún momento, las señales transmitidas entran en coincidencia de fase.

Se observa en recepción el diagrama del ojo para el canal de 10 Gbps centrado en 193,7 THz, el cual en su región de la marca de unos (parte superior del diagrama) muestra poca dispersión de datos como consecuencia del ruido presente en la señal, en la región de la apertura del ojo (centro del diagrama) se muestra simetría en los cruces de tiempo, lo cual indica que en este caso la dispersión cromática no es un factor degradante del sistema.

Este mismo comportamiento sucede para el canal de 40 Gbps centrado en 193,85 THz, poca dispersión y buena apertura del ojo.

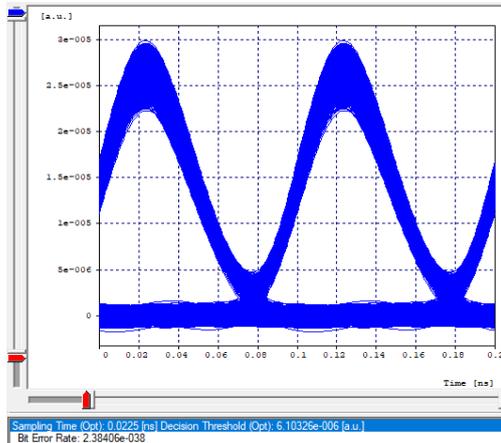


Figura 3.48. Diagrama de ojo, canal 2 de 10 Gbps.

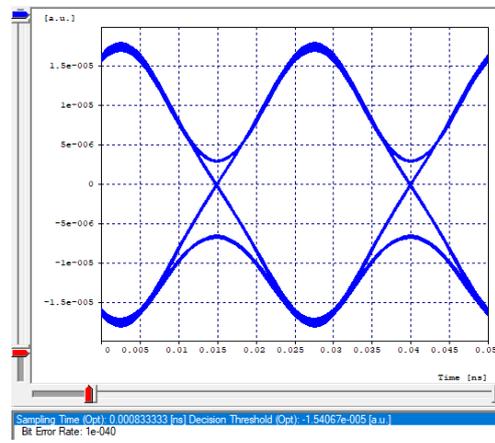


Figura 3.49. Diagrama de ojo, canal de 40 Gbps.

En la Figura 3.51 se observa que el canal de mayor velocidad está siendo afectado por el de una velocidad menor, como se había mencionado con anterioridad.

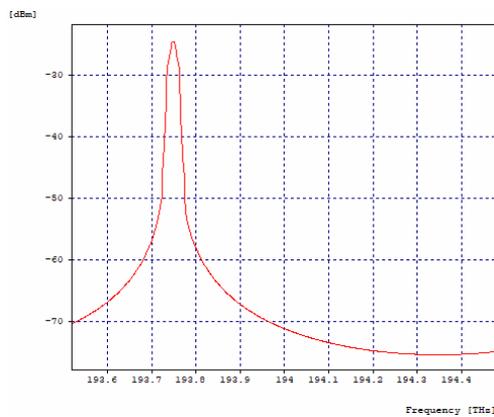


Figura 3.50. Espectro óptico, canal 2 de 10 Gbps.

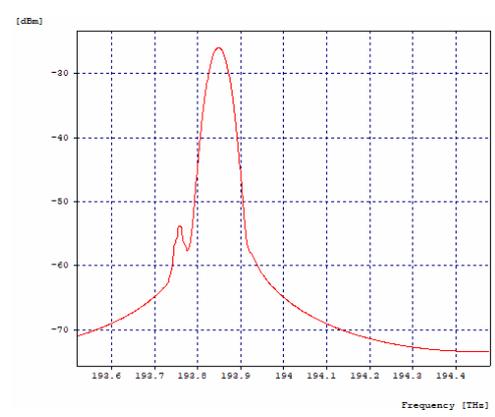


Figura 3.51. Diagrama de ojo, canal de 40 Gbps.

$\Delta_{v1}$	$C_n$	$C_{total}$	$C_{pro}$	$\eta_{ded}$	$\eta_{dist}$
50 GHz	10 Gbps	2 ch x 10 Gbps	Distancia 80,5 km	37,25 GHz	87,25 GHz
		20 Gbps	1,61 Tbps*km	26,85 %	22,92 %.

Tabla 3.10. Variables de medición y control de los 2 canales de 10 Gbps.

$\Delta_{v2}$	$C_n$	$C_{total}$	$C_{pro}$	$\eta_{ded}$	$\eta_{dist}$
—	40 Gbps	1 ch x 40 Gbps	Distancia 80,5 km	138 GHz	138 GHz
		40 Gbps	3,22 Tbps*km	28,99 %	28,99 %.

Tabla 3.11. Variables de medición y control del canal de 40 Gbps.

$\Delta_v$ (GHz)	$C_n$	$C_{total}$	$C_{pro}$	$\eta_{ded}$	$\eta_{dist}$
$\Delta_{v1} = 50$	10 Gbps	2 ch x 10 Gbps 20 Gbps	Distancia 80,5 km	37,25 GHz	237,63 GHz
				26,85 %	
$\Delta_{v2} - - -$	40 Gbps	1 ch x 40 Gbps 40 Gbps	4,83 Tbps*km	138 GHz	25,25 %
				28,99 %	

Tabla 3.12. Variables de medición y control, esquema híbrido.

$$\eta_{max[bps/Hz]} = \frac{\sum_{i=1-2}^{\epsilon} 10Gbps + \sum_{j=1}^{\varphi} 40Gbps}{\frac{37,25}{2}Ghz + 50Ghz * 1 + 25Ghz + \frac{138}{2}Ghz}$$

$$\eta_{max[bps/Hz]} = \frac{(10Gbps) * 2 + (40Gbps) * 1}{237,63Ghz}$$

$$\eta_{max[bps/Hz]} = \frac{60Gbps}{237,63Ghz}$$

$$\eta_{max[bps/Hz]} = 0,2525[bps/Hz]$$

Nótese que, la eficiencia espectral es mayor a los casos anteriores, si bien, se ocupa un mayor espectro, también se debe tener en cuenta que se está transmitiendo un throughput 33,33% mayor al transmitido en el caso descrito en la sección 3.1.3 en el que se había logrado la mejor eficiencia espectral; esta mejora se debe a que con un solo canal se logra transmitir 40 Gbps ahorrando espaciamiento entre canales homogéneos de menor velocidad.

### 3.3. Redes heterogéneas tipo 3, basadas en XG-PON, XGS-PON y NG-PON

Como se mencionó en la sección 3.1, este tipo de redes ópticas pasivas se caracterizan por proporcionar una capacidad a nivel de acceso de 10 Gbps, en XG-PON1 se alcanza esta velocidad solo en downstream, mientras que, en XGS-PON, se alcanza dicha velocidad en ambos sentido. Por otra parte, en las redes NG-PON, se puede lograr una transmisión de hasta 40 Gbps en downstream.

#### 3.3.1. Caso de estudio: 4 canales de 2,5 Gbps + 2 canales de 10 Gbps + 1 de 40 Gbps

Este caso de estudio es la máxima expresión de una red de tipo MLR, en donde se incluyen cada uno de los canales posibles que se pueden brindar dentro de un sistema de comunicaciones óptico.

Para el montaje de este caso de estudio, se tomó como base el caso anterior y se agregaron los 4 canales de 2,5 Gbps, centrando el primer canal de este tipo en 193,7 THz seguido del segundo canal de 2,5 Gbps con una separación de 25 GHz, y así sucesivamente. Posteriormente, se ubicó el canal de 10 Gbps separado del cuarto canal de 2,5 Gbps por 25 GHz, y, por último, el canal de 40 Gbps con una separación de 100 GHz como se había concluido con anterioridad.

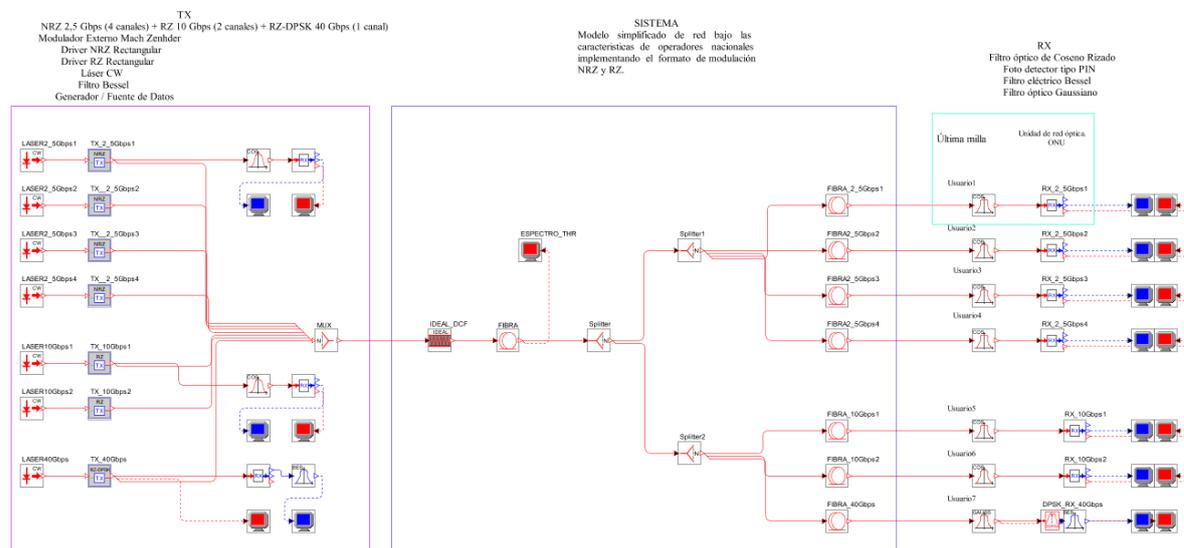


Figura 3.52. Esquema caso de estudio.

Las Figuras 3.53 y 3.54 muestran los espectros ópticos en transmisión y recepción respectivamente, del primer canal de 2,5 Gbps, en donde se evidencia una disminución en la intensidad de la señal mas no interferencia de otros canales; lo mismo sucede con los 3 canales restantes.

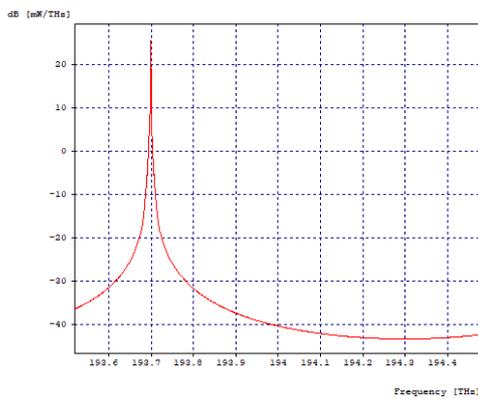


Figura 3.53. Espectro en TX, canal 1 de 2,5 Gbps.

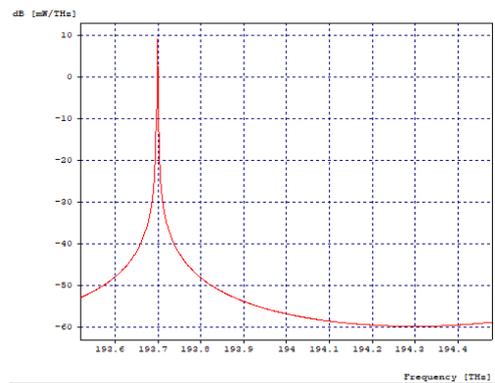


Figura 3.54. Espectro en RX, canal 1 de 2,5 Gbps.

El canal de 10 Gbps contiguo al cuarto de 2,5 Gbps se ve afectado por este, tal y como se observa en la Figura 3.56, mientras que, el segundo canal no tiene afectaciones en su espectro debido a que cuenta con el espaciado suficiente para que su homólogo y el canal de 40 Gbps no tengan incidencias sobre él.

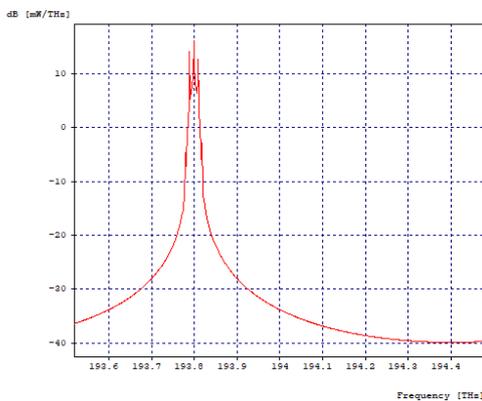


Figura 3.55. Espectro en TX, canal 1 de 10 Gbps.

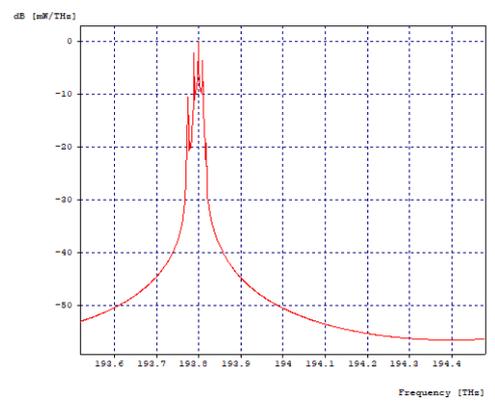


Figura 3.56. Espectro en RX, canal 1 de 10 Gbps.

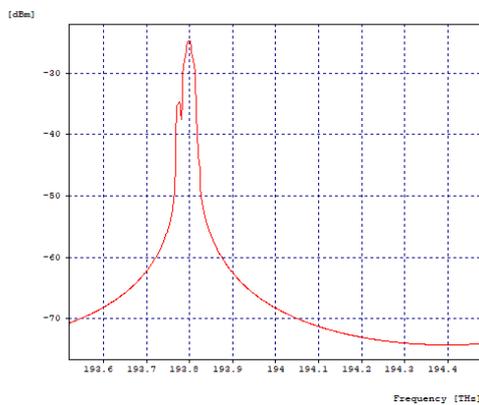


Figura 3.57. Espectro en RX, canal 1 de 10 Gbps.

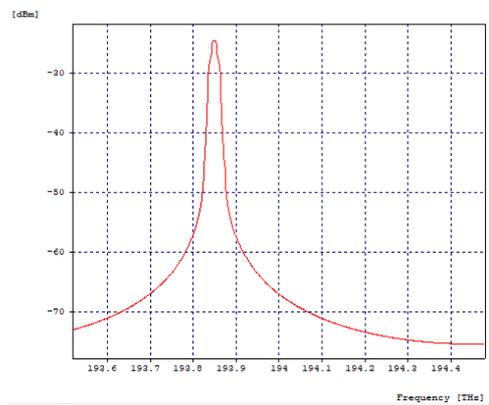


Figura 3.58. Espectro en RX, canal 2 de 10 Gbps.

En el canal de 40 Gbps se observa a la izquierda del espectro óptico una pequeña deformación, que corresponde a la interferencia causada por el canal contiguo de 10 Gbps. Cabe resaltar que el espaciamento entre el segundo canal de 10 Gbps y el de 40 Gbps no es suficiente para que el canal de menor velocidad no afecte el espectro óptico del de la mayor, pero sí para no afectar la transmisión de los datos, puesto que se logra una BER de 40 Gbps para ambos canales, como se observa en las Figuras 3.69 y 3.71.

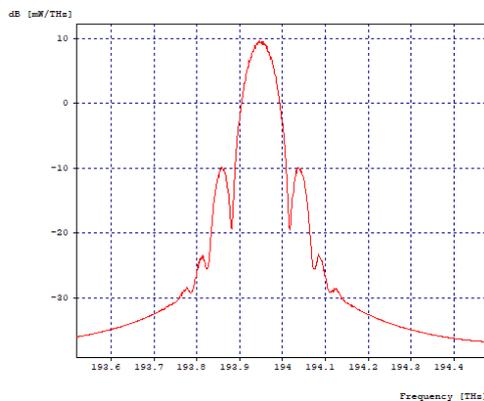


Figura 3.59. Espectro en TX, canal de 40 Gbps

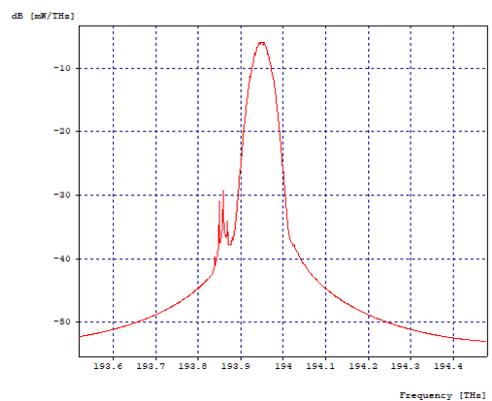


Figura 3.60. Espectro en RX, canal de 40 Gbps.

La Figura 3.61 demuestra que, si se duplica el espaciamento entre el canal de 40 Gbps y el de 10 Gbps, este último no va a interferir en la transmisión del primero.

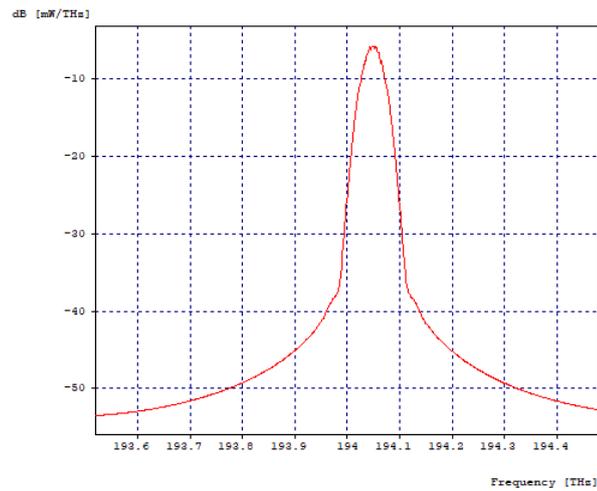


Figura 3.61. Espectro óptico en RX, canal de 40 Gbps, espaciamiento de 200 GHz.

En este modelo de red se logró transmitir 70 Gbps en un ancho de banda de 321,59 GHz.

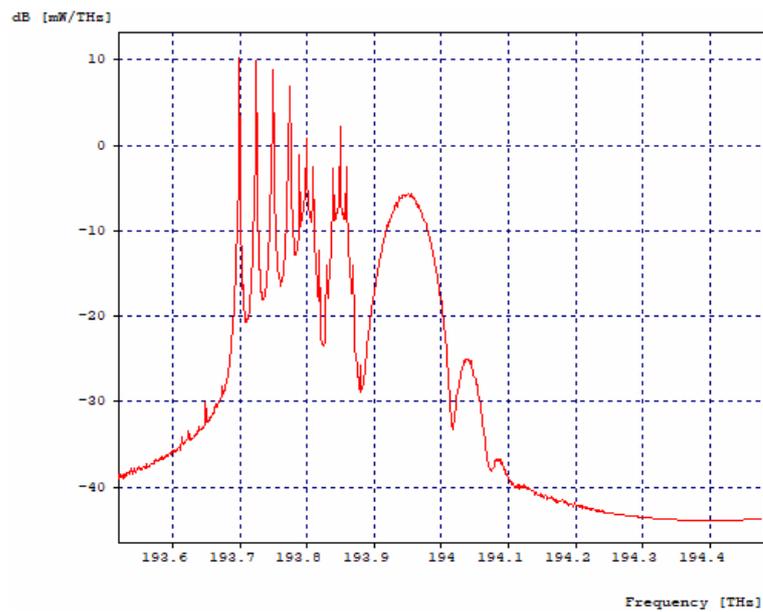


Figura 3.62. Espectro óptico throughput ideal.

En el espectro óptico del throughput (Figura 3.62 y 3.63) se observan los 7 canales transmitidos logrando diferenciar la característica propia de la señal de cada una de las diferentes modulaciones y velocidades.

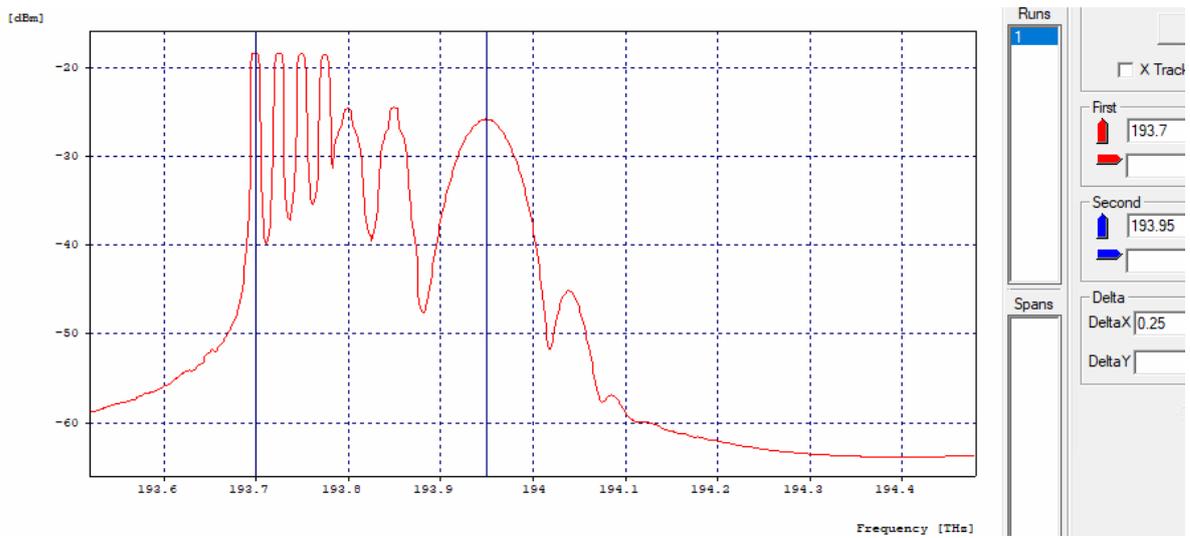


Figura 3.63. Espectro óptico throughput rectangular.

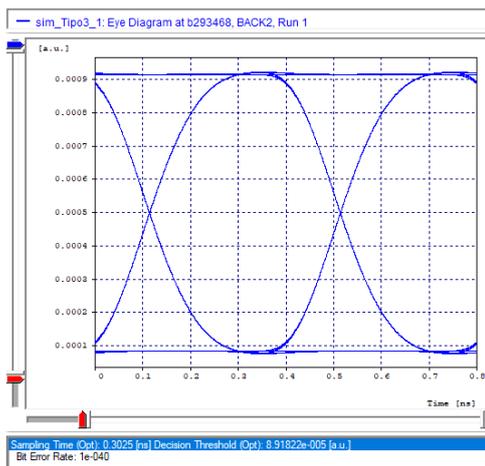


Figura 3.64. Diagrama de ojo en TX, canal 1 de 2,5 Gbps.

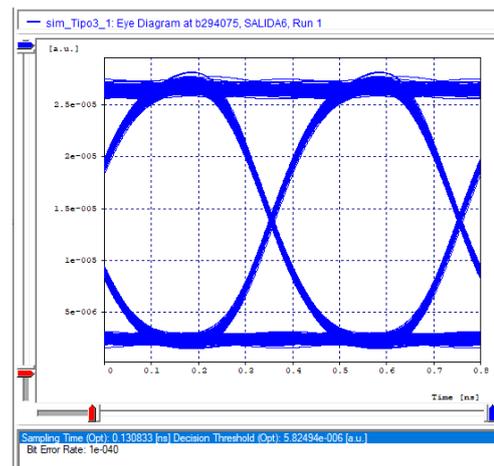


Figura 3.65. Diagrama de ojo en RX, canal 1 de 2,5 Gbps.

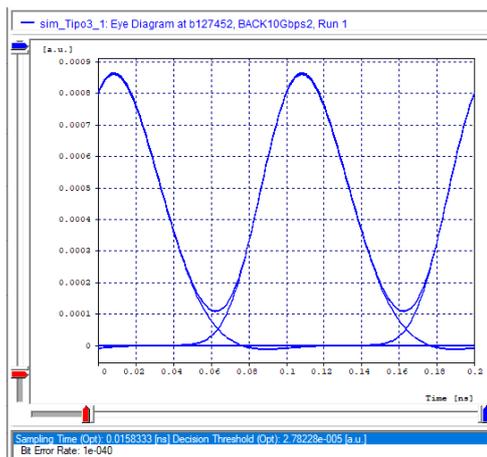


Figura 3.66. Diagrama de ojo en TX, canal 1 de 10 Gbps.

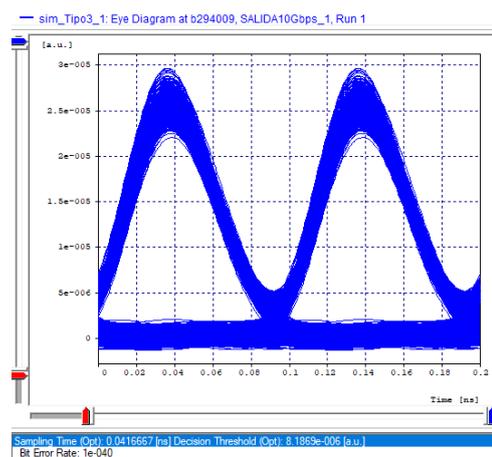


Figura 3.67. Diagrama de ojo en RX, canal 1 de 2,5 Gbps.

Los diagramas de ojo en recepción de los 7 canales (Figuras 3.65, 3.67, 3.69, 3.70 y 3.71) y sus respectivos valores de BER, indican que los parámetros definidos en transmisión (como la potencia), en el medio, como la compensación y la distancia, son los adecuadas para que las señales no presenten degradaciones y no sean afectadas considerablemente por los efectos lineales y no lineales propios de las transmisiones por medio de fibra óptica. Además, el uso de diferentes formatos de modulación impacta directamente la tolerancia al ruido mientras que aumenta la cantidad de símbolos por unidad de tiempo, es así como los moduladores Mach-Zehnder son casi exclusivamente usados en sistemas de transporte de 40 / 100 Gbps debido a su buen rendimiento para controlar las modulaciones y la posibilidad de modular independientemente la intensidad y la fase del campo óptico.

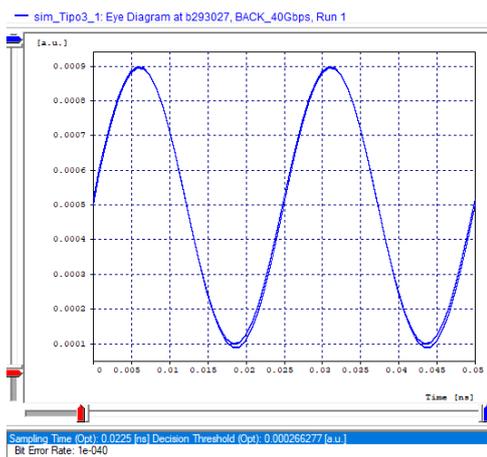


Figura 3.68. Diagrama de ojo en TX, canal de 40 Gbps.

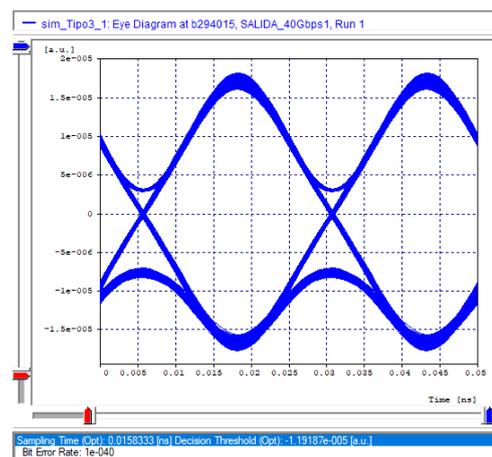


Figura 3.69. Diagrama de ojo en RX, canal de 40 Gbps.

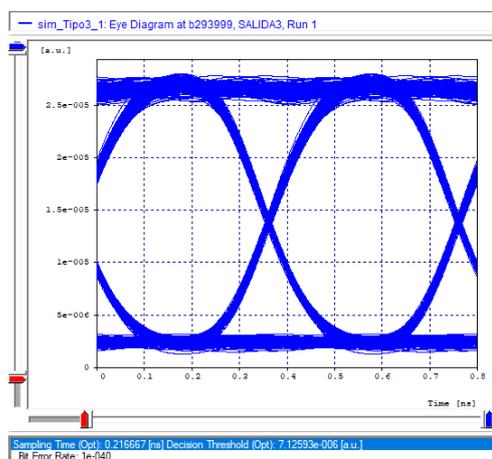


Figura 3.70. Diagrama de ojo, canal 3 de 2,5 Gbps.

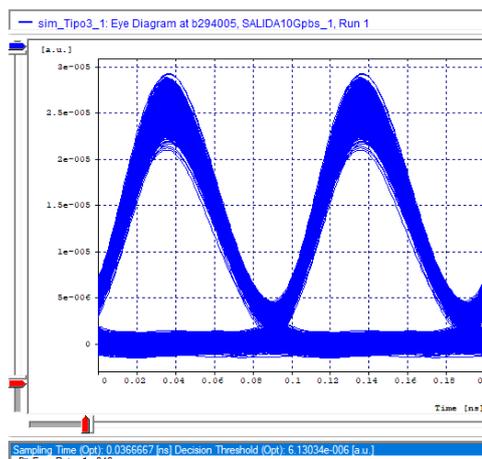


Figura 3.71. Diagrama de ojo, canal 2 de 10 Gbps.

En las Figuras 3.64, 3.66 y 3.68, se observan los diagramas de ojo en transmisión, de los canales 2,5 Gbps, 10 Gbps y 40 Gbps, respectivamente, mientras que, en las Tablas 3.13 - 3.16, se detalla el cálculo de la eficiencia espectral de las redes SLR y MLR.

$\Delta_{v1}$	$C_n$	$C_{total}$	$C_{pro}$	$\eta_{ded}$	$\eta_{dist}$
25 GHz	2,5 Gbps	4 ch x 2,5 Gbps	Distancia 80,5 km	5,18 GHz	80,18 GHz
		10 Gbps	805 Gbps*km	9,88 %	12,47 %.

Tabla 3.13. Variables de medición y control de los 4 canales de 2,5 Gbps.

$\Delta_{v2}$	$C_n$	$C_{total}$	$C_{pro}$	$\eta_{ded}$	$\eta_{dist}$
50 GHz	10 Gbps	2 ch x 10 Gbps	Distancia 80,5 km	37,25 GHz	87,25 GHz
		20 Gbps	1,61 Tbps*km	26,85 %	22,92 %.

Tabla 3.14. Variables de medición y control de los 2 canales de 10 Gbps.

$\Delta_{v1}$	$C_n$	$C_{total}$	$C_{pro}$	$\eta_{ded}$	$\eta_{dist}$
—	40 Gbps	1 ch x 40 Gbps	Distancia 80,5 km	138 GHz	138 GHz
		40 Gbps	3,22 Tbps*km	28,99 %	28,99 %.

Tabla 3.15. Variables de medición y control del canal de 40 Gbps.

$\Delta_v$ (GHz)	$C_n$	$C_{total}$	$C_{pro}$	$\eta_{ded}$	$\eta_{dist}$
$\Delta_{v1} = 25$	2,5 Gbps	4chx2,5Gbps 10Gbps	Distancia 80,5 km	5,18 GHz	321,59 GHz
$\Delta_{v2} = 50$	10 Gbps	2chx10Gbps 20Gbps		9,88 %	
$\Delta_{v3} - - -$	40 Gbps	1chx40Gbps 40Gbps	5,64 Tbps*km	37,25 GHz	21,77 %
				26,85 %	
				138 GHz	
				232,15 %	

Tabla 3.16. Variables de medición y control, esquema híbrido.

$$\eta_{max[bps/Hz]} = \frac{\sum_{i=1-4}^{\epsilon} 2,5Gbps + \sum_{j=1-2}^{\varphi} 10Gbps + \sum_{k=1}^{\gamma} 40Gbps}{\frac{5,18}{2}GHz + 25GHz * 4 + 50GHz + 100GHz + \frac{138}{2}GHz}$$

$$\eta_{max[bps/Hz]} = \frac{(2,5Gbps) * 4 + (10Gbps) * 2 + (40Gbps) * 1}{321,59GHz}$$

$$\eta_{max[bps/Hz]} = \frac{70Gbps}{321,59GHz}$$

$$\eta_{max[bps/Hz]} = 0,2177[bps/Hz]$$

La eficiencia espectral para este último caso de estudio en donde se transmite un throughput mayor que en los demás casos, y se combinan canales con velocidades y formatos de modulación distintos, no presentó los resultados que se esperaban, puesto que, el espectro utilizado se aumenta en vano ya que, los canales de baja velocidad no aportan significativamente al throughput y se desperdicia espectro en el espaciamiento requerido entre ellos. Por ejemplo, para transmitir un throughput de 40 Gbps utilizando canales de 2,5 Gbps, se necesitan como mínimo 380,18 GHz y tan solo se tiene una eficiencia espectral de 0,1052, para transmitir el mismo throughput se necesitan 4 canales de 10 Gbps, 187,25 GHz de espectro y se obtiene una eficiencia de 0,2136; y con un solo canal de 40 Gbps se ocupan 138 GHz alcanzando una eficiencia de 0,2899. Por lo tanto, si se desea usar redes MLR en un sistema, se recomienda transmitir canales de 10 Gbps y 40 Gbps.

*Nota de autor.*

*Mediante la realización de este capítulo, se definieron los modelos de red MLR, combinando velocidades de 2.5, 10 y 40 Gbps, cada una de ellas, con su respectivo esquema de modulación, definido en el capítulo 2, para así, realizar el análisis de la eficiencia espectral en cada modelo, cumpliendo de esta manera, con el segundo objetivo específico: “Evaluar la eficiencia espectral mediante la implementación de la ecuación adaptada de la Teoría de Shannon, en el modelo de simulación de la arquitectura definida en el primer objetivo específico”.*

## CAPÍTULO 4

### 4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el presente trabajo, se realizó el análisis de la eficiencia espectral para diferentes montajes de redes heterogéneas en un sistema cuasilineal, que permitió realizar la comparación entre los resultados obtenidos para determinar qué velocidades de transmisión son las más apropiadas para lograr una mejor eficiencia espectral.

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

#### 4.1. Conclusiones

Una vez definidos los modelos de red a simular, con su respectivo análisis y cálculo de la eficiencia espectral, se resume que:

##### 4.1.1. Conclusiones sobre los resultados

- Se destaca la importancia de los formatos de modulación robustos, como DPSK frente a los fenómenos de ruido y pérdidas por atenuación, donde estas degradaciones no son significativas para afectar el desempeño del sistema, al combinarla con formatos como RZ-OOK, se puede duplicar la capacidad de transmisión sin incurrir en una penalización de potencia por efecto de la dispersión cromática y la PMD por lo que es de amplio uso para transmitir estas altas velocidades de bits.
- Los formatos de modulación de orden superior y los supercanales espectrales son clave para maximizar la eficiencia espectral en las redes de transporte óptico de próxima generación. Una cuadrícula flexible de DWDM es clave para acomodar eficientemente los canales de medios que requieren aproximadamente de 50 GHz de espectro contiguo.
- Si se desea usar redes MLR en un sistema, se recomienda transmitir canales de 10 Gbps y 40 Gbps, debido a que presentan mayor cantidad de bits transmitidos en un determinado ancho de banda indicando un buen desempeño de la densidad espectral de la información, traduciéndose en sistemas eficientes espectralmente.
- En el análisis de redes homogéneas se evidenció que, la eficiencia espectral lograda es menor a la obtenida en la red heterogénea del último caso de estudio. Por ejemplo, para transmitir un throughput de 40 Gbps utilizando canales de 2,5 Gbps, se necesitan como mínimo 380,18 GHz y tan solo se tiene una eficiencia espectral de 10,52%, para transmitir el mismo throughput se necesitan 4 canales de 10 Gbps,

187,25 GHz de espectro y se obtiene una eficiencia de 21,36 %; y con un solo canal de 40 Gbps se ocupan 138 GHz alcanzando una eficiencia de 28,99 %.

Expuestos los resultados y conclusiones obtenidas en la presente investigación, que permitió realizar **la medida de la eficiencia espectral de una arquitectura de red heterogénea de tipo NG-PON para un régimen de propagación cuasilineal**. La Tabla 4.1 define el comportamiento de los esquemas de simulación propuestos, manejando parámetros como: el número de canales copropagantes, la potencia en la señal de entrada, el espaciado por canal y régimen de propagación. Se concluye que, en redes multiplexadas por división de longitud de onda (WDM), si se desea usar redes MLR en un sistema, se recomienda transmitir canales de 10 Gbps y 40 Gbps, siendo clave los formatos de modulación de orden superior para maximizar la eficiencia espectral.

Característica asociadas a una distancia de 80 km	4 canales de 2,5 Gbps + 3 de 10 Gbps	2 canales de 10 Gbps + 1 de 40 Gbps	2 canales de 2,5 Gbps + 1 de 10 Gbps + 1 de 40 Gbps
Desempeño del sistema	Medio	Alto	Medio
Eficiencia espectral	Baja	Alta	Medio
Tolerancia a degradaciones ópticas	FWM con baja incidencia	FWM con baja incidencia	FWM con baja incidencia
Complejidad configuración	Simple	Complejo	Complejo
Máxima distancia alcanzada	110 km	85 km	85 km

Tabla 4.1. Red heterogénea basada en MLR.

#### 4.1.2. Conclusiones sobre la investigación

- Uno de los mayores aportes de la tesis es permitir a nuevos proveedores de servicios implementar arquitecturas de red mixtas que hacen un uso más eficiente del espectro, y como ese espectro y capacidad es variable se vuelven adaptativos de tal forma que, se puede delimitar mejor el uso de cada servicio. Dicho uso eficiente posibilita al operador de Telecomunicaciones ofrecer un repertorio más amplio de servicios a sus clientes sin disminuir la calidad ofrecida.
- Una mayor eficiencia espectral se traduce en un menor consumo de batería en dispositivos de transmisión y recepción, menores latencias, menores costes de despliegue de infraestructuras y mayor fiabilidad de las comunicaciones.

- Para este proyecto de investigación se obtuvo una BER de  $10^{-40}$ , valor característico en la mayoría de casos de estudio, sin embargo para hacer más accesible este tipo de redes en término de coste a los operadores de red, se puede sacrificar este parámetro hasta el límite permitido por la ITU y así no se precompensaría al 100 %, se podría utilizar menores potencias en transmisión o receptores con menor índice de sensibilidad, todas estas medidas permiten que se transmitan altas capacidades en la fibra a un costo atractivo por bit de información transportado, siendo esto posible por la eficiencia espectral del transporte DWDM en redes ópticas flexibles.
- Se espera que, los sistemas de fibra óptica cuenten con una gran proyección al crecimiento y mejora en el manejo de tráfico, ancho de banda y capacidad para los servicios de última generación, con el fin de alcanzar los estándares de desarrollo propuestos por FSAN para los años futuros.

## 4.2. Recomendaciones

El cálculo y análisis de la eficiencia espectral en redes heterogéneas en un sistema cuasi-silencial, necesita considerar algunas recomendaciones que permitan la obtención y comprensión de resultados, como las presentadas a continuación:

- Realizar una búsqueda minuciosa de información teórica y práctica acerca de sistemas ópticos, esquemas de modulación y también, de trabajos previos relacionados al tema tratado en el presente trabajo.
- Establecer la metodología y el software de simulación más adecuados, para garantizar una fácil obtención de resultados de acuerdo a los objetivos del trabajo.
- Tener en cuenta que existen otros entornos de simulación diferentes a Optsim, que incluso, pueden facilitar el proceso de obtención de resultados.
- Tener como referencia guías, documentos y tutoriales, además de la explicación de los ejemplos contenidos por defecto, que contienen información sobre los componentes y funcionalidades de la herramienta de simulación OptSim.
- Simular los ejemplos contenidos en Optsim, de los esquemas de modulación a usar para tener presente las características y resultados que se esperan obtener.
- Determinar los elementos a usar en el montaje de la red, con sus respectivos parámetros.
- Realizar una primera prueba de cada simulación, por ejemplo, si se tiene una red de 8 canales con determinada velocidad, y dos canales más con otra velocidad, simular primero una red con 2 canales con la velocidad de transmisión 1 y un tercero con la velocidad 2.
- Garantizar primero que los resultados de los canales de velocidad más alta cumplan con los estándares, posteriormente, se realiza el ajuste a los canales de menor velocidad.

- Tener en cuenta que los resultados obtenidos en las simulaciones de Optsim van a diferir de los que hipotéticamente se obtendrían en una red real.
- Para la transmisión del canal de 40 Gbps, tener presente que la grilla espectral que se use para transmitirlo, puede afectar los resultados de BER y producir corrimientos en el espectro.

### **4.3. Trabajos futuros**

- Medida de La Eficiencia Espectral de una Arquitectura de Red Heterogénea de Tipo NG-PON Para un Régimen de Propagación Lineal / Pseudolineal.
- Analizar la eficiencia espectral en redes heterogéneas con un throughput mayor a 100 Gbps.
- Analizar la eficiencia espectral en redes heterogéneas haciendo uso de amplificadores.
- Realizar el análisis de la eficiencia espectral en redes DWM usando diferentes velocidades con un único esquema de modulación.

## REFERENCIAS

- [1] “FSAN | Full Service Access Network.” <http://www.fsan.org/> (accessed May 21, 2020).
- [2] U. Ferrero and A. E. D.-B. Luvison R., “The Architecture of Full Services Access Networks (FSAN),” in *Optical Networks and Their Applications*, 1998, vol. 20, p. AO1, doi: 10.1364/ONA.1998.AO1.
- [3] D. Rosabal Montero and M. Rodríguez Torres, “Tecnologías de acceso ópticas para la migración de la red de cobre a fibra Optical access technologies for migration from copper to fiber network.”
- [4] A. Kaur, A. Sheetal, and R. Miglani, “Impact of optical modulation formats on 10 G/2.5 G asymmetric XG-PON system,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 149, pp. 351–358, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.ijleo.2017.09.063.
- [5] M. Enrique et al., “N°. 23,” no. 23, pp. 1–112, 2020.
- [6] H. S. Abbas and M. A. Gregory, “The next generation of passive optical networks: A review,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 67, pp. 53–74, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.02.015>.
- [7] J. A. Arokkiam et al., “Design, implementation, and evaluation of an XG-PON module for the ns-3 network simulator,” *Simulation*, vol. 93, no. 5, pp. 409–426, May 2017, doi: 10.1177/0037549716682093.
- [8] ITU-T, “Itu-T G.987.1 XG-PON,” 10-Gigabit-capable Passiv. Opt. networks Gen. Requir., vol. 97, pp. 187–221, 2016, doi: 10.1016/bs.vh.2014.11.002.
- [9] “tsbpromo@itu.int,” 2010. Accessed: May 21, 2020. [Online]. Available: [www.itu.int/ITU-T](http://www.itu.int/ITU-T).
- [10] K. A. Mat Sharif, N. A. Ngah, A. Ahmad, K. Khairi, Z. A. Manaf, and D. Tarsono, “Demonstration of XGS-PON and GPON Co-Existing in the Same Passive Optical Network,” in *2018 IEEE 7th International Conference on Photonics, ICP 2018*, Nov. 2018, pp. 1–3, doi: 10.1109/ICP.2018.8533167.
- [11] ITU-T, “G.9807.1:10-Gigabit-capable symmetrical passive optical network (XGS-PON),” *Itu-T G-Series Recomm.*, vol. E 41042, pp. 1–286, 2016, [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9807.1-201606-I/en>.
- [12] W. Hou, Y. Yu, Q. Song, and X. Gong, “Green provisioning of the traffic partition grooming in robust, reconfigurable and heterogeneous optical networks,” *Opt. Fiber Technol.*, vol. 19, no. 1, pp. 16–25, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.yofte.2012.09.004.

- [13] Y. Zhao et al., “Application-oriented integrated control center (AICC) for heterogeneous optical networks,” in *Optics InfoBase Conference Papers*, Nov. 2011, p. 831004, doi: 10.1117/12.904068.
- [14] F. N. Khan, Y. Zhou, Q. Sui, and A. P. T. Lau, “Non-data-aided joint bit-rate and modulation format identification for next-generation heterogeneous optical networks,” *Opt. Fiber Technol.*, vol. 20, no. 2, pp. 68–74, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.yofte.2013.12.001.
- [15] A. Rostami, J. Rahbari, and A. Andalib, “Investigation of power penalty in WDM systems for dispersion managed fibers,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 124, no. 15, pp. 2072–2075, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2012.06.065>.
- [16] M. Á. Bello, “Investigación de la extracción de solitones ópticos empleando un NOLM y su aplicación en el estudio del proceso de formación de solitones en fibras ópticas,” 2010.
- [17] E. Arévalo, C. Ramírez, and A. Guzmán, “SOLITONES EN FIBRAS OPTICAS,” 1995.
- [18] G. A. Gómez 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, 2019.
- [19] K. K. Sabirov, M. E. Akramov, R. Sh. Otajonov, and D. U. Matrasulov, “Soliton generation in optical fiber networks,” *Chaos, Solitons Fractals*, vol. 133, p. 109636, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.109636>.
- [20] S. K. Turitsyn, B. G. Bale, and M. P. Fedoruk, “Dispersion-managed solitons in fibre systems and lasers,” *Phys. Rep.*, vol. 521, no. 4, pp. 135–203, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2012.09.004>.
- [21] F. J. Diaz-Otero and P. Chamorro-Posada, “Bundled solitons collision-induced frequency shifts in multiple-channel WDM dispersion managed systems,” *Opt. Commun.*, vol. 332, pp. 1–8, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.06.047>.
- [22] P. H. Grellu, J. M. Soto-Crespo, and N. Akhmediev, “Optical soliton molecules in fiber lasers,” in *2006 European Conference on Optical Communications Proceedings, ECOC 2006*, Sep. 2006, pp. 1–2, doi: 10.1109/ECOC.2006.4801025.
- [23] M. F. Ferreira, M. V. Facão, S. V. Latas, and M. H. Sousa, “Optical solitons in fibers for communication systems,” *Fiber Integr. Opt.*, vol. 24, no. 3–4, pp. 287–313, May 2005, doi: 10.1080/01468030590923019.
- [24] W. R. Green and D. Hundertmark, “Exponential Decay of Dispersion-Managed Solitons for General Dispersion Profiles,” *Lett. Math. Phys.*, vol. 106, no. 2, pp. 221–249,

Feb. 2016, doi: 10.1007/s11005-015-0811-9.

[25] K. Bhambri and N. Gupta, “Dispersion managed solitons transmission in 54,000 km optical link,” in 2012 International Conference on Radar, Communication and Computing, ICRCC 2012, Dec. 2012, pp. 312–314, doi: 10.1109/ICRCC.2012.6450602.

[26] A. Del Duce, R. I. Killey, and P. Bayvel, “Comparison of nonlinear pulse interactions in 160-Gb/s quasi-linear and dispersion managed soliton systems,” *J. Light. Technol.*, vol. 22, no. 5, pp. 1263–1271, May 2004, doi: 10.1109/JLT.2004.826384.

[27] R.-J. Essiambre, G. Raybon, and B. Mikkelsen, “Chapter 6 - Pseudo-Linear Transmission of High-Speed TDM Signals: 40 and 160 Gb/s,” in *Optics and Photonics*, I. P. Kaminow and T. B. T.-O. F. T. I.-B. (Fourth E. Li, Eds. Burlington: Academic Press, 2002, pp. 232–304.

[28] T. Broderick, “Estimation of bit error rate for pseudo-linear differential phase shift keyed transmission links,” *Opt. Commun.*, vol. 282, no. 7, pp. 1455–1462, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2008.12.057>.

[29] A. Mecozzi, C. B. Clausen, and M. Shtaif, “System impact of intra-channel nonlinear effects in highly dispersed optical pulse transmission,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 12, no. 12, pp. 1633–1635, Dec. 2000, doi: 10.1109/68.896331.

[30] A. Mecozzi, C. B. Clausen, and M. Shtaif, “Analysis of intrachannel nonlinear effects in highly dispersed optical pulse transmission,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 12, no. 4, pp. 392–394, Apr. 2000, doi: 10.1109/68.839029.

[31] M. J. Ablowitz and T. Hirooka, “Nonlinear effects in quasi-linear dispersion-managed pulse transmission,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 13, no. 10, pp. 1082–1084, Oct. 2001, doi: 10.1109/68.950742.

[32] M. J. Ablowitz, T. Hirooka, and G. Biondini, “Quasi-linear optical pulses in strongly dispersion-managed transmission systems,” 2001.

[33] L. J. Richardson, V. K. Mezentsev, and S. K. Turitsyn, “Limitations of 40 Gbit/s based dispersion managed WDM transmission: solitons versus quasi-linear propagation regime,” in *OFC 2001. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit. Technical Digest Postconference Edition (IEEE Cat. 01CH37171)*, vol. 1, p. MF5/1-MF5/3, doi: 10.1109/OFC.2001.927845.

[34] V. Pechenkin and F. R. Kschischang, “Higher bit rates for quasi-linear optical data transmission systems via constrained coding,” 2006, doi: 10.1109/ofc.2006.215788.

[35] A. Mecozzi, “A unified theory of intrachannel nonlinearity in pseudolinear phase-modulated transmission,” *IEEE Photonics J.*, vol. 2, no. 5, pp. 728–735, Oct. 2010, doi:

10.1109/JPHOT.2010.2064290.

[36] B. Mikkelsen et al., “320-Gb/s Single-Channel Pseudolinear Transmission over 200 km of Nonzero-Dispersion Fiber,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 12, no. 10, pp. 1400–1402, Oct. 2000, doi: 10.1109/68.883843.

[37] R.-J. Essiambre, “Intra-channel effects in high-speed pseudolinear transmission,” in *The 16th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, 2003. LEOS 2003., vol. 2, pp. 840–841, doi: 10.1109/LEOS.2003.1253062.

[38] E. San, R. Zubizarreta, and C. S. Román, “Redes de acceso y transmisión de Fibra Óptica: alternativas de políticas y regulaciones,” *Rev. Derecho Adm.*, vol. 0, no. 12, pp. 39–48, 2012.

[39] T. J. Xia, S. Gringeri, and M. Tomizawa, “High-capacity optical transport networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 11, pp. 170–178, Nov. 2012, doi: 10.1109/MCOM.2012.6353698.

[40] C. E. Shannon, “A mathematical theory of communication,” *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 27, no. 3, pp. 379–423, 1948, doi: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.

[41] A. Barbieri, D. Fertoni, and G. Colavolpe, “Time-frequency packing for linear modulations: spectral efficiency and practical detection schemes,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 10, pp. 2951–2959, 2009, doi: 10.1109/TCOMM.2009.10.080200.

[42] J. M. Kahn and K.-P. Ho, “Spectral Efficiency Limits and Modulation/Detection Techniques for DWDM Systems,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 10, no. 2, pp. 259–272, Mar. 2004, doi: 10.1109/JSTQE.2004.826575.

[43] J. M. Streb, “Los tres teoremas: Fourier - Nyquist - Shannon,” 2015. Accessed: May 25, 2020. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10419/130833www.econstor.eu>.

[44] “Cómo la Eficiencia Espectral permite reducir costes,” 2010.

[45] M. Shtaif and A. H. Gnauck, “The relation between optical duobinary modulation and spectral efficiency in WDM systems,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 11, no. 6, pp. 712–714, Jun. 1999, doi: 10.1109/68.766794.

[46] T. Ono et al., “Characteristics of optical duobinary signals in terabit/s capacity, high-spectral efficiency WDM systems,” *J. Light. Technol.*, vol. 16, no. 5, pp. 788–797, May 1998, doi: 10.1109/50.669006.

[47] H. Louchet, A. Hodzic, and K. Petermann, “Analytical model for the performance evaluation of DWDM transmission systems,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 15, no. 9, pp. 1219–1221, Sep. 2003, doi: 10.1109/LPT.2003.816133.

- [48] C. W. Chow, C. H. Yeh, C. H. Wang, C. L. Wu, S. Chi, and C. Lin, “Studies of OFDM signal for broadband optical access networks,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 28, no. 6, pp. 800–807, 2010, doi: 10.1109/JSAC.2010.100805.
- [49] N. Cvijetic, “OFDM for Next-Generation Optical Access Networks,” *J. Light. Technol.*, vol. 30, no. 4, pp. 384–398, 2012, doi: 10.1109/JLT.2011.2166375.
- [50] J. L. Vizcaíno, Y. Ye, T. Jiménez, and V. López, “OTN switching in protected transport networks: Spectral, cost and energy efficiency evaluation,” in *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2016, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICC.2016.7511245.
- [51] G. Shen and M. Zukerman, “Spectrum-efficient and agile CO-OFDM optical transport networks: architecture, design, and operation,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 5, pp. 82–89, 2012, doi: 10.1109/MCOM.2012.6194386.
- [52] J. Pedro, “Designing transparent flexible-grid optical networks for maximum spectral efficiency [Invited],” *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 9, no. 4, pp. C35–C44, 2017, doi: 10.1364/JOCN.9.000C35.
- [53] W. E. Castellanos and M. Chacon, “Utilización de herramientas software para el modelado y la simulación de redes de comunicaciones,” *Rev. Gerenc. Tecnológica Informática - GTI*, vol. 5, Jan. 2006.
- [54] “OptSim - Photonic System Tools | Synopsys Photonic Solutions.” <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/rsoft-system-design-tools/system-network-optsim.html> (accessed Oct. 06, 2020).
- [55] RSOFT, “Diseño de Sistemas y Redes – OptSim.” pp. 1–5, 2016, [Online]. Available: <https://www.synopsys.com/>.
- [56] D. N. Pane, M. EL Fikri, and H. M. Ritonga, “Análisis del Desempeño a Nivel de Simulación, de Amplificadores Ópticos Para un Entorno de Red DWDM XGS-PON,” 2019.
- [57] “OptiSystem Archives - Optiwave.” <https://optiwave.com/category/products/system-and-amplifier-design/optisystem/> (accessed Oct. 07, 2020).
- [58] A. P. Alarcon, “Optisystem informe.” Accessed: Oct. 07, 2020. [Online]. Available: <https://www.academia.edu/40579030/Optisysteminforme>.
- [59] “Optilux - an open source optical system simulator.” <https://optilux.sourceforge.io/> (accessed Oct. 07, 2020).
- [60] “Software For Optical Communication | Electronics For You.” <https://www.electronicshub.com/buyers-guides/software-buyers-guide/buyers-guide-optical-communication-software>

(accessed Oct. 07, 2020).

[61] “VIAMI Solutions | Command the network.” <https://www.viamisolutions.com/en-us> (accessed Oct. 07, 2020).

[62] Sinnaps, “El Diagrama de PERT: ¿qué es y cómo hacerlo fácilmente? | Sinnaps,” Jun. 20, 2017. <https://www.sinnaps.com/blog-gestion-proyectos/diagrama-de-pert> (accessed Jun. 24, 2020).

[63] M. Hernández, M. Macías, I. Figueroa, and J. Páez, “Método PERT,” Oct. 21, 2014. <https://es.slideshare.net/irisfigueroa507/mtodo-pert-expo> (accessed Jun. 24, 2020).

[64] “Rational Unified Process (RUP).” <http://ima.udg.edu/sellares/EINF-ES2/Present1011/MetodoPesadesRUP.pdf> (accessed Sep. 12, 2020).

[65] J. D. Herrera, J. T. Toledo, and A. Toledo, “Análisis comparativo del desempeño de los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK frente a Técnicas de Compensación Ópticas de la Dispersión Cromática en Redes DWDM a 10 Gbps1,” *Entre Cienc. e Ing.*, vol. 12, no. 23, p. 9, Mar. 2018, doi: 10.31908/19098367.3697.

[66] C. DeCusatis, “Dense Wavelength Division Multiplexing in Parallel Sysplex and Storage Area Networks,” *Opt. Photonics News*, vol. 11, no. 12, p. 18, Dec. 2000, doi: 10.1364/OPN.11.12.000018.

[67] F. DE Ingeniería Eléctrica Y Electrónica, E. Y. Telecomunicaciones Edison Israel Mena Soliz, and R. Elizabeth Mendoza Pantoja, “ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL PROVINCIA DE TUNGURAHUA PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN,” 2009.

[68] J. D. Bolaños and J. S. Escobar, “Impacto sobre la Densidad Espectral de Información (ISD) en el cambio de una red DWDM de 10 Gbps a 40 Gbps implementando los formatos CSNRZ-OOK y CSRZ-OOK,” Universidad del Cauca, 2017.

[69] A. Nag, M. Tornatore, and B. Mukherjee, “Optical network design with mixed line rates and multiple modulation formats,” *J. Light. Technol.*, vol. 28, no. 4, pp. 466–475, Feb. 2010, doi: 10.1109/JLT.2009.2034396.

[70] A. V. Trujillo and A. D. Zemanate, “Diseño de un módulo compensador de dispersión cromática en un entorno de Co-Simulación MATLAB/OPTSIM para una red DWDM a 10Gbps,” Universidad del Cauca, 2019.

[71] “2. Redes y tecnología WDM.” <https://www.ramonmillan.com/documentos/trabajos/PFCCapitulo2.pdf> (accessed Oct. 08, 2020).

[72] D. L. Mata, “Láser de fibra óptica WDM empleando un interferómetro Mach-Zehnder

y un amplificador óptico de semiconductor,” Universidad Nacional Autónoma de México, 2019.

[73] J. Gabriel and A. Soto, “Diodo Láser de Emisión Superficial con Cavidad Vertical (VCSEL).”

[74] A. Javan, W. R. Bennett, and D. R. Herriott, “Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a He-Ne mixture,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 6, no. 3, pp. 106–110, 1961, doi: 10.1103/PhysRevLett.6.106.

[75] “FOA Reference Guide To Fiber Optics.” <https://www.thefoa.org/ESP/Sistemas.htm> (accessed Oct. 08, 2020).

[76] UDABOL, “Receptores Ópticos.”

[77] J. C. Valencia montaña and O. J. Castiblanco Pardo, “Estudio Comparativo de Esquemas de Filtrado Optico para Redes de Acceso Convergentes,” 2016.

[78] S. Rebhi and M. Najjar, “High Q-factor optical filter with high refractive index sensitivity based on hourglass-shaped photonic crystal ring resonator,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 202, p. 163663, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.ijleo.2019.163663.

[79] M. T. Thompson, “Chapter 14 - Analog Low-Pass Filters,” M. T. B. T.-I. A. C. D. (Second E. Thompson, Ed. Boston: Newnes, 2014, pp. 531–583.

[80] K. P. Kaur, R. Randhawa, and R. S. Kaler, “Performance analysis of WDM-PON architecture using different receiver filters,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 125, no. 17, pp. 4742–4744, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.ijleo.2014.04.070.

[81] S. Devra, “Dispersion Compensation using Raised Cosine Filter in Optical Fibers,” *Int. J. Inf. Electron. Eng.*, vol. 1, no. 2, 2011, doi: 10.7763/ijee.2011.v1.7.

[82] “Catálogo de elementos de oficina de microondas de AWR: Filtro de paso de banda de banda estrecha de coseno elevado (forma cerrada): NBPFRC.” <https://awrcorp.com/download/faq/english/docs/Elements/NBPFRC.htm> (accessed Oct. 13, 2020).

[83] “Filtros de coseno elevado.” <https://www.nuhertz.com/response/iir-and-analog-filters-basic-types/raised-cosine-filters> (accessed Oct. 13, 2020).

[84] A. Vanessa, T. Imbachí, A. Daniel, and Z. Trujillo, “CO-SIMULACIÓN MATLAB/OPT SIM PARA UNA RED DWDM A 10Gbps.”

[85] E. López Pastor, “DIVISORES ÓPTICOS (SPLITTERS) EN FTTH,” Aug. 2013.

[86] E. Díaz, “Diseño del despliegue de una red FTTH en una ciudad,” Escuela Técnica

Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación, 2018.

- [87] J. Oliveira et al., “Demonstration of EDFA Cognitive Gain Control via GMPLS for Mixed Modulation Formats in Heterogeneous Optical Networks,” in Optical Fiber Communication Conference, OFC 2013, Mar. 2013, p. OW1H.2, doi: 10.1364/ofc.2013.ow1h.2.
- [88] H. Cukurtepe, M. Tornatore, A. Yayimli, and B. Mukherjee, “Provisioning of dynamic traffic in mixed-line-rate optical networks with launch power determination,” Photonic Netw. Commun., vol. 27, no. 3, pp. 154–166, Jun. 2014, doi: 10.1007/s11107-014-0435-5.
- [89] S. Iyer and S. P. Singh, “Spectral and power efficiency investigation in single- and multi-line-rate optical wavelength division multiplexed (WDM) networks,” Photonic Netw. Commun., vol. 33, no. 1, pp. 39–51, Feb. 2017, doi: 10.1007/s11107-016-0618-3.
- [90] S. Iyer and S. P. Singh, “Effect of Channel Spacing on the Design of Mixed Line Rate Optical Wavelength Division Multiplexed Networks,” J. Opt. Commun., vol. 40, no. 1, pp. 75–82, Jan. 2019, doi: 10.1515/joc-2016-0127.
- [91] S. Iyer and S. P. Singh, “Investigation of launch power and regenerator placement effect on the design of mixed-line-rate (MLR) optical WDM networks,” Photonic Netw. Commun., vol. 40, no. 1, pp. 14–30, Aug. 2020, doi: 10.1007/s11107-017-0714-z.
- [92] T. Wuth, M. W. Chbat, and V. F. Kamalov, “Multi-rate (100G/40G/10G) transport over deployed optical networks,” in OFC/NFOEC 2008 - 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, Feb. 2008, pp. 1–9, doi: 10.1109/OFC.2008.4528299.
- [93] FTTH Council Europe, “FTTH Handbook,” FTTH Counc. Eur., no. 5, pp. 1–161, 2014.
- [94] “Narrow bandwidth laser sensing (FWHM) - Optromix Fiber Lasers.” <https://lasers4lab.com/wp/narrow-bandwidth-laser-sensing-fwhm/> (accessed Jan. 22, 2021).
- [95] M. O. F. Engineering, “PERFORMANCE OPTIMIZATION OF RSOA BASED HIGH SPEED BACKHAUL XG-PON HYBRID ( DWDM- PON / FSO ) NETWORK,” 2017.

# 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.