

*Mejora de la Eficiencia Espectral en redes DWDM a 40Gbps
a través de los Formatos de Modulación Avanzados
DPSK y DQPSK*



Tesis de Maestría

ING. GUSTAVO ADOLFO GÓMEZ AGREDO

Director: PhD. Giovanni López Perafán

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones
Popayán, 2019**

Mejora de la Eficiencia Espectral en redes DWDM a 40Gbps a través de los Formatos de Modulación Avanzados DPSK y DQPSK

ING. GUSTAVO ADOLFO GÓMEZ AGREDO

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

**Director
PhD. Giovanni López Perafán**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES – GNTT
POPAYÁN
2019**

*A todos los que de alguna manera
Cambiaron el rumbo de mi vida,
A todos los que caminaron junto a mí,
Para ellos es este triunfo, para ellos.....*

Gustavo Gómez

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos Al ingeniero PhD. Giovanni López Perafán, Director del proyecto, por sus valiosas orientaciones.

Al comité de programa de Maestría 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 expresa un agradecimiento muy especial a sus familiares y amigos por su acompañamiento y apoyo incondicional, y sin las cuales no podríamos culminar satisfactoriamente.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	XVII
1 GENERALIDADES, CARACTERÍSTICAS Y RELACIONES DE PROPAGACIÓN DE LOS SISTEMAS	
DWDM	1
1.1 GENERALIDADES DWDM	1
1.1.1 Redes XG-PON y NG-PON	2
1.1.2 Fibras Ópticas.....	7
1.1.3 Elementos de Sistema.....	9
1.1.4 Rango de Frecuencias para Aplicaciones DWDM	11
1.2 PARÁMETROS DE MONITOREO ÓPTICO – OPM.....	13
1.2.1 Factor de Calidad – Q.....	15
1.2.2 Tasas de Errores de Bit – BER	17
1.2.3 Relación Señal a Ruido Óptico – OSNR	19
1.2.4 Penalidades del Diagrama del ojo.....	21
1.3 DEGRADACIONES DE LAS TRANSMISIONES ÓPTICAS.....	23
1.3.1 Atenuación de la Fibra	24
1.3.2 Perdidas por Manipulación.....	26
1.3.3 Dispersión Cromática - CD	27
1.3.4 Dispersión por Modo de Polarización - PMD	31
1.3.5 Modulación de Auto Fase – SPM	34
1.3.6 Modulación de Fase cruzada – XPM	36
1.3.7 Mezcla de Cuatro Ondas – FWM	39
1.4 INCIDENCIA DE LOS FENÓMENOS DE DEGRADACIÓN LINEALES Y NO LINEALES CON RESPECTO AL NIVEL DE ACCESO Y TRANSPORTE DE LA RED	41

2	FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS, EFICIENCIA ESPECTRAL Y ADAPTACIÓN DE LA TEORÍA DE INFORMACIÓN	52
2.1	GENERALIDADES Y REQUERIMIENTOS	52
2.2	FORMATOS AVANZADOS DE MODULACIÓN	57
2.2.1	Moduladores Externos de Intensidad Mach-Zehnder (MZIM)	59
2.2.2	Modulación DPSK - Differential Phase Shift Keying	62
2.2.3	Modulación DQPSK - Differential Quadrature Phase Shift Keying	66
2.2.4	Patrones de códigos de línea para sistemas DWDM	68
2.3	ADAPTACIÓN DE LA TEORÍA DE LA INFORMACIÓN PARA SISTEMAS ÓPTICOS DE ULTIMA GENERACIÓN	73
2.3.1	Teoría de la información	74
2.3.2	Eficiencia Espectral	78
3	MEJORA DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL IMPLEMENTANDO FORMATOS AVANZADOS DE MODULACIÓN EN REDES DWDM	89
3.1	HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN	89
3.2	METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN.....	91
3.2.1	Algoritmo Simplificado para la Simulación	93
3.2.2	Características Generales del entorno de Simulación	94
3.3	CASO DE ESTUDIO I – SOLUCIONES BASADAS EN EL FORMATO DE MODULACIÓN DPSK ...	98
3.3.1	16 canales de 2.5Gbps de Acceso nominal – XG-PON	98
3.3.2	4 canales de 10Gbps de Acceso nominal – XGS-PON	108
3.3.3	1 canal de 40Gbps de Acceso nominal – NG-PON	118

3.4 CASO DE ESTUDIO II – SOLUCIONES BASADAS EN EL FORMATO DE MODULACIÓN DQPSK	128
3.4.1 4 canales de 5Gbps de Acceso nominal en fase y cuadratura – para una arquitectura de red de tipo XGS-PON	129
3.4.2 1 canal de 20Gbps de Acceso nominal en fase y cuadratura – para una arquitectura de red de tipo NG-PON	138
3.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL	145
4 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	152
4.1 ENTORNO DE SIMULACIÓN	154
4.2 RECOMENDACIONES	155
4.3 TRABAJOS FUTUROS	156
ACRÓNIMOS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XV

ACRÓNIMOS

ACRZ:	Chirp Alternante con Retorno a Cero (Alternate-Chirp Return to Zero)
AON:	Redes Completamente ópticas (All Optical Networks)
ASE:	Emisiones Espontáneas Amplificadas (Amplified Spontaneous Emission)
ATM:	Modo de Transferencia Asíncrono (Asynchronous transfer mode)
BER:	Tasa de Error de Bit (Bit Error Rate)
CD:	Dispersión Cromática (Chromatic Dispersion)
CDM	Multiplexación por división de Código (Code division multiplexing)
C-NRZ:	No retorno a Cero con Chirp (Chirped Nonreturn to Zero)
CRZ:	Retorno a Cero con Chirp (Chirped Return to Zero)
CSRZ:	Retorno a Cero con Supresor de Portadora (Carrier-Suppressed Return to Zero)
CWDM:	Multiplexación por División de Longitud de Onda Ampliamente Espaciada (Coarse Wavelength División Multiplexing)
D:	Dispersión (Dispersion)
DB:	Duobinario (Duobinary)
D-BPSK:	Differential Binary phase shift keying
DCF:	Fibra Compensadora de Dispersión (Dispersion-Compensating Fiber)
DGD:	Retardo de Grupo Diferencial (Differential Group Delay)
DI:	Interferómetro de retraso (Delay Interferometer)
DPSK:	Modulación por desplazamiento diferencial de fase (Differential Phase Shift Keying)
DQPSK:	Modulación por desplazamiento por cuadratura diferencial de fase (Differential Quadrature Phase Shift Keying)
DS:	Dispersión Residual (Dispersion Slope)
DSF:	Fibra Conmutada por dispersión (Dispersion-Shifted Fiber)
DST:	Transmisión de Dispersión Soportada (Dispersion-Supported Transmission)
D-RWA:	Enrutamiento Dinámico por Asignación de Longitud de Onda (Dynamic routing wavelength assignment)
DWDM:	Multiplexación por División de Longitud de Onda Densamente Espaciada (Dense Wavelength División Multiplexing)
EAM:	Modulador de Electro-Absorción (Electroabsorption Modulator)
EDFA:	Amplificador de Fibra Dopada de Erbium (Erbium Doped Fiber Amplifier)
EPON:	Redes Ópticas Pasivas con Capacidad Ethernet (Ethernet Passive Optical Networks)
ESNR:	Relación Señal a Ruido Eléctrica (Electrical Signal to Noise Ratio)
FDP:	Función de Distribución de Probabilidad (probability distribution function)

<i>FiWi:</i>	<i>Redes de Fibra Inalámbricas (Fiber wireless networks)</i>
<i>FSAN:</i>	<i>Redes de Acceso para todos los Servicios (Full Service Access Network)</i>
<i>FTTH:</i>	<i>Fibra hasta la Casa (fiber through the home)</i>
<i>FTTx:</i>	<i>Fibra Hasta la x (fiber through the x)</i>
<i>FWHM:</i>	<i>Ruido de fase del láser (Full Width at Half Maximum)</i>
<i>FWM:</i>	<i>Mezcla de Cuatro Ondas (Four-Wave Mixing)</i>
<i>GVD:</i>	<i>Dispersión de Velocidad Grupal (Group Velocity Dispersion)</i>
<i>GPON:</i>	<i>Redes Ópticas Pasivas con capacidad Gigabit (Gigabit Passive Optical Networks)</i>
<i>IFWM:</i>	<i>Mezcla de Cuatro Ondas Intracanal (Intrachannel Four-Wave Mixing)</i>
<i>ISD:</i>	<i>Densidad Espectral de Información (spectral information density)</i>
<i>ISI:</i>	<i>Interferencia Intersimbólica (intersymbol interference)</i>
<i>IP:</i>	<i>Protocolo de Internet (Internet Protocol)</i>
<i>ITU-T:</i>	<i>Unión Internacional de Telecomunicaciones – Telecomunicaciones (International Telecommunication Union)</i>
<i>IXPM:</i>	<i>Modulación Intracanal de Fase Cruzada (Intrachannel Cross-Phase Modulation)</i>
<i>LAN:</i>	<i>Red de Área Local (Local Area Network)</i>
<i>MAN:</i>	<i>Red de Área Metropolitana (Metropolitan Area Network)</i>
<i>M-ASK:</i>	<i>Modulación por desplazamiento de Amplitud Multinivel (Multinivel Amplitud Shift Keying)</i>
<i>MI:</i>	<i>Inestabilidad de Modulación (Modulation Instability)</i>
<i>MTF:</i>	<i>Tiempo Medio entre Fallas (Mean Time to Failure)</i>
<i>MZDI:</i>	<i>Interferómetro de Retardo Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Delay-Interferometer)</i>
<i>MZIM:</i>	<i>Modulador Mach-Zehnder Interferométrico (Mach-Zehnder Interferometric Modulator)</i>
<i>MZM:</i>	<i>Modulador Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Modulator)</i>
<i>NGN-DWDM:</i>	<i>Próxima Generación de Redes Ópticas DWDM (next generation optical networks)</i>
<i>NG-OAN's:</i>	<i>Próxima Generación de Redes Ópticas de Acceso (Next-generation - Optical access networks)</i>
<i>NG-OTN:</i>	<i>Próxima Generación de Transporte de Redes Ópticas (Next Generation - Optical Transport Networks)</i>
<i>NG-PON</i>	<i>Redes Ópticas Pasivas de Próxima Generación (Next Generation Passive Optical Networks)</i>
<i>NLSE:</i>	<i>Ecuación No Lineal de Schrodinger (Nonlinear schrodinger equation)</i>
<i>NRZ:</i>	<i>No Retorno a Cero (Nonreturn to Zero)</i>
<i>NZ-DSF:</i>	<i>Fibra Conmutada por dispersión No Cero (Non-zero Dispersion-Shifted Fiber)</i>
<i>OA:</i>	<i>Amplificador Óptico (Optical Amplifier)</i>

<i>OFDM:</i>	<i>Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access)</i>
<i>OLT's:</i>	<i>Terminal de Línea Óptica (Optical Line Terminal)</i>
<i>ONU:</i>	<i>Unidades de Red Ópticas (optical network units)</i>
<i>OOK:</i>	<i>Manejo por Conmutación de Encendido y Apagado (On-Off Keying)</i>
<i>OPM:</i>	<i>Parámetros de Monitoreo Óptico (optical parameters monitoring)</i>
<i>OSNR:</i>	<i>Relación Señal a Ruido Óptico (Optical Signal to Noise Ratio)</i>
<i>PASS:</i>	<i>Señalización por Desplazamiento de Amplitud-Fase (Phased Amplitude Shift Signaling)</i>
<i>PD-FWM:</i>	<i>Mezcla de Cuatro Ondas Degenerado Parcialmente (Partial Degenerated Four-Wave Mixing)</i>
<i>PDH:</i>	<i>Jerarquía Digital Plesiócrona (Plesiochronous Digital Hierarchy)</i>
<i>PMD:</i>	<i>Dispersión por Modo de Polarización (Polarization Mode Dispersion)</i>
<i>PON:</i>	<i>Redes Ópticas Pasivas (passive optical network)</i>
<i>PSBT:</i>	<i>Transmisión Binaria Fase-Formada (Phase-Shaped Binary Transmission)</i>
<i>PSK:</i>	<i>Manejo por Conmutación de Fase (Phase Shift Keying)</i>
<i>PSP:</i>	<i>Estado Principal de Polarización (Principal State of Polarization)</i>
<i>QoS:</i>	<i>Calidad de Servicios (Quality of Service)</i>
<i>QPSK:</i>	<i>Modulación por desplazamiento de cuadratura de fase (Quadrature Phase Shift Keying)</i>
<i>RoF:</i>	<i>Radio Sobre Fibra (radio over fiber)</i>
<i>RWA:</i>	<i>Routing and wavelength assignment</i>
<i>RZ:</i>	<i>Retorno a cero (Return to Zero)</i>
<i>SBS:</i>	<i>Dispersión Estimulada de Brillouin (Stimulated Brillouin-Scattering)</i>
<i>SDH:</i>	<i>Jerarquía Digital Síncrona (Synchronous Digital Hierarchy)</i>
<i>SMF:</i>	<i>Fibra Monomodo (single mode fiber)</i>
<i>SNR:</i>	<i>Relación Señal a Ruido (Signal to Noise Ratio)</i>
<i>SONET:</i>	<i>Redes Ópticas Síncronas (Synchronous Optical Network)</i>
<i>SPM:</i>	<i>Automodulación de Fase (Self-Phase Modulation)</i>
<i>SPT:</i>	<i>Técnica de Propagación Espectral (Spectral Propagation Technique)</i>
<i>SRS:</i>	<i>Dispersión Estimulada de Raman (Stimulated Raman-Scattering)</i>
<i>SSB:</i>	<i>Banda Lateral Única (Single Sideband)</i>
<i>SSMF:</i>	<i>Estándar de Fibra Monomodo (Standard Single-Mode Fiber)</i>
<i>STM:</i>	<i>Módulo de Transporte Síncrono (Synchronous Transport Module)</i>
<i>TDM-PON:</i>	<i>Multiplexación por División de Tiempo para Redes Ópticas Pasivas (Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network)</i>

<i>TDMA:</i>	<i>Acceso Múltiple por División de tiempo (Time Division Multiple Access)</i>
<i>TWDM:</i>	<i>Multiplexación por División de Tiempo y Longitud de Onda (Time and Wavelength Division Multiplexed)</i>
<i>VBS:</i>	<i>Técnica de Ancho de Banda Variable (Variable Bandwidth Simulation Technique)</i>
<i>VSB:</i>	<i>Banda Lateral Residual (Vestigial Sideband)</i>
<i>WAN:</i>	<i>Red de Área Amplia (Wide Area Network)</i>
<i>WDM:</i>	<i>Multiplexación por División de Longitud de Onda (Wavelength División Multiplexing)</i>
<i>XG-PON:</i>	<i>Redes Ópticas pasivas con Capacidad 10Gbps (10-Gigabit-capable passive optical network)</i>
<i>XPM:</i>	<i>Modulación de Fase Cruzada (Cross-Phase Modulation)</i>
<i>XGS-PON:</i>	<i>Redes Ópticas pasivas con Capacidad 10Gbps Simétricas (10 Gigabit-capable passive optical networks (XG(S)-PON)</i>
<i>XPolM:</i>	<i>Modulación de Cross Polarización (Cross-Polarization Modulation)</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO 1.

Figura 1.1	Tendencia de las redes DWDM.....	2
Figura 1.2	Propuesta de migración de las redes PON	3
Figura 1.3	Convergencia de aplicaciones y servicios de tipo FTTx	6
Figura 1.4	Clasificación de las fibras ópticas	7
Figura 1.5	Ocupación espectral para múltiples canales DWDM	12
Figura 1.6 (a)	Factores de OPM que inciden en el desempeño de la red	14
Figura 1.6 (b)	Relación OPM.....	15
Figura 1.7	Factor de Calidad	15
Figura 1.7 (a)	Relación Factor de Calidad y Tasa de Errores de Bit	16
Figura 1.7 (b)	Factor Q vs Distancia de Transmisión para NRZ-OOK.....	16
Figura 1.8	Relación Factor Q vs BER	18
Figura 1.9	Medición de la OSNR para un sistema DWDM	19
Figura 1.10	OSNR acumulado por trayecto de fibra	20
Figura 1.11	Componentes del Diagrama del Ojo	22
Figura 1.11 (a)	Diagrama del Ojo en configuración Back to Back para el formato NRZ-OOK.....	23
Figura 1.11 (b)	Diagrama del Ojo tras 140 Km de fibra para el formato NRZ-OOK.....	23
Figura 1.12 (a)	Fenómenos Lineales	24
Figura 1.12 (b)	Fenómenos no Lineales	24
Figura 1.13	Atenuación material de la Fibra óptica	25
Figura 1.14 (a)	Diagrama del Ojo a 120Km de fibra sin Efecto de la CD en el Sistema	29
Figura 1.14 (b)	diagrama del Ojo a 120Km de fibra con una CD total acumulada de 9240 ps/nm*Km	29
Figura 1.14 (c)	diagrama del Ojo a 120Km de fibra con una CD total acumulada de 5640 ps/nm*Km	29
Figura 1.14 (d)	diagrama del Ojo a 120Km de fibra con una CD total acumulada de 12840 ps/nm*Km	29
Figura 1.15 (a)	Diagrama del ojo a 120Km de fibra en presencia de todas las linealidades con una CD total Acumulada de 2040 ps/nm*Km	30

<i>Figura 1.15 (b) Diagrama del ojo a 120Km de fibra en presencia de todas las linealidades con una CD total Acumulada de 12840 ps/nm*Km.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 1.16 Efecto PMD sobre un enlace de Fibra.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 1.17 (a) Efecto de la PMD = 0.2 ps/√Km en un enlace de 120 KM a 2.5Gbps</i>	<i>33</i>
<i>Figura 1.17 (b) Efecto de la PMD = 20 ps/√Km en un enlace de 120 KM a 2.5Gbps</i>	<i>33</i>
<i>Figura 1.18 Efecto de la SPM sobre un pulso que se propaga.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 1.19 (a) SPM y CD para bajos niveles de potencia y régimen normal</i>	<i>35</i>
<i>Figura 1.19 (b) SPM y CD para Altos niveles de potencia y régimen normal.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 1.19 (c) SPM y CD para bajos niveles de potencia y régimen anómalo</i>	<i>35</i>
<i>Figura 1.19 (d) SPM y CD para Altos niveles de potencia y régimen anómalo.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 1.20 (a) Espectro de entrada sin diferenciación en las potencias</i>	<i>37</i>
<i>Figura 1.20 (b) Espectro de salida sin diferenciación en la potencia de los canales</i>	<i>37</i>
<i>Figura 1.20 (c) Desempeño del sistema sin diferenciación en la potencia de los canales</i>	<i>38</i>
<i>Figura 1.21 (a) Espectro de entrada con diferenciación en la potencia de los canales</i>	<i>38</i>
<i>Figura 1.21 (b) Espectro de salida con diferenciación en la potencia de los canales</i>	<i>38</i>
<i>Figura 1.21 (c) Desempeño del sistema con diferenciación en la potencia de los canales</i>	<i>39</i>
<i>Figura 1.22 Principio de la Mezcla de cuatro ondas.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 1.23 (a) efecto de la XPM para un régimen de dispersión 0</i>	<i>40</i>
<i>Figura 1.23 (b) desempeño del sistema para el efecto de la FWM.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 1.24 Efecto de los Fenómenos No Lineales vs Velocidad de Acceso</i>	<i>44</i>
<i>Figura 1.25 (a) Fenómenos No-Lineales de tipo Intra-Canal.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 1.25 (b) Fenómenos No-Lineales de tipo Inter-Canal.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 1.26 Efectos de Degradación Predominantes Según el Nivel de Acceso.....</i>	<i>46</i>

CAPITULO 2.

<i>Figura 2.1 Arquitectura de red para la evolución de los sistemas FTTx</i>	<i>53</i>
<i>Figura 2.2 Proyección Comercial redes XG-PON de ZTE.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 2.3 Migración de 2.5Gbps a 40Gbps para la iniciativa NG-PON</i>	<i>55</i>
<i>Figura 2.4 Clasificación de los formatos de modulación en intensidad.....</i>	<i>58</i>

<i>Figura 2.5</i>	<i>Principio de interferencia constructivo y destructivo de un modulador MZIM para la generación de una salida óptica</i>	<i>59</i>
<i>Figura 2.6</i>	<i>Curva Característica modulador Mach-Zehnder de intensidad (MZIM).....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 2.7</i>	<i>Representación Fasorial de los vectores “Bias” del modulador MZIM.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 2.8</i>	<i>Configuración típica de un esquema de modulación basado en MZIM</i>	<i>62</i>
<i>Figura 2.9</i>	<i>Codificación Binaria y Diagrama de Símbolos DPSK</i>	<i>63</i>
<i>Figura 2.10</i>	<i>Diagrama de Bloques de un Transmisor típico basado en DPSK.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 2.11</i>	<i>Comportamiento del Match Zehnder para la modulación DPSK.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 2.12</i>	<i>Diagrama de Constelación para la modulación DQPSK.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 2.13</i>	<i>Estructura del Transmisor y Receptor del esquema DQPSK.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 2.14</i>	<i>Sistema DWDM para la modulación NRZ-OOK.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 2.15</i>	<i>Características y configuración del Transmisor NRZ-OOK.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 2.15 (a)</i>	<i>Diagrama del ojo en un Receptor Back to Back.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 2.15 (b)</i>	<i>Factor Q vs Distancia de Transmisión.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 2.15 (c)</i>	<i>Espectro óptico en los 194nm de longitud de onda</i>	<i>70</i>
<i>Figura 2.15 (d)</i>	<i>BER vs Distancia de Transmisión</i>	<i>70</i>
<i>Figura 2.15 (e)</i>	<i>Diagrama del ojo tras un tramo de 80Km de fibra.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 2.15 (f)</i>	<i>Espectro óptico de los canales en Recepción.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 2.16</i>	<i>Sistema DWDM para la modulación RZ-OOK.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 2.17</i>	<i>características y configuración del Transmisor RZ-OOK</i>	<i>72</i>
<i>Figura 2.17 (a)</i>	<i>Diagrama del ojo en un Receptor Back to Back.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 2.17 (b)</i>	<i>Diagrama del ojo tras un tramo de 80Km de fibra.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 2.17 (c)</i>	<i>Espectro óptico en los 195.5 nm de longitud de onda</i>	<i>72</i>
<i>Figura 2.17 (d)</i>	<i>Factor Q vs Distancia de Transmisión.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 2.17 (e)</i>	<i>BER vs Distancia de Transmisión</i>	<i>73</i>
<i>Figura 2.17 (f)</i>	<i>Espectro óptico de los canales en Recepción.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 2.18</i>	<i>Representación de un canal discreto sin Memoria.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 2.19</i>	<i>asignación dinámica del espectro para la capacidad máxima del canal en sistemas DWDM XG/NG-PON.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 2.20</i>	<i>espaciamiento óptico vs ancho de banda del canal.....</i>	<i>81</i>

Figura 2.21 relación del comportamiento óptico en términos de la teoría de la información adaptada 83

CAPITULO 3.

Figura 3.1 Técnicas de simulación de la Herramienta OptSim®..... 90

Figura 3.2 Algoritmo de Simulación para la Herramienta OptSim® 93

Figura 3.3 Esquema general de los escenarios de simulación 94

Figura 3.4 Modelo de Simulación de tipo XG-PON 98

Figura 3.5 (a) Señal no modulada a la salida del Tx..... 99

Figura 3.5 (b) Señal modulada y recibida a la entrada del Rx 99

Figura 3.6 Espectro de Salida de la Co-propagación de los múltiples canales ópticos para el bloque de los 4 primeros canales 100

Figura 3.7 Espectro de salida para la variación de la potencia del canal óptico en un sistema DWDM 101

Figura 3.8 (a) salida modulada para una potencia de 0dBm en el EDFA..... 102

Figura 3.8 (b) Espectro de salida para una potencia de 0dBm en el EDFA 102

Figura 3.8 (c) salida modulada para una potencia de 15dBm en el EDFA..... 102

Figura 3.8 (d) Espectro de salida para una potencia de 15dBm en el EDFA 102

Figura 3.8 (e) salida modulada para una potencia de 30dBm en el EDFA..... 103

Figura 3.8 (f) Espectro de salida para una potencia de 30dBm en el EDFA 103

Figura 3.9 (a) Espectro de salida para un (N-1) $\Delta u=100\text{Ghz}$ y una tasa de acceso nominal de 2.5Gbps 104

Figura 3.9 (b) Diagrama del Ojo para un (N-1) $\Delta u=100\text{Ghz}$ 105

Figura 3.9 (c) Espectro propagado de los 4 primeros canales para un (N-1) $\Delta u=100\text{Ghz}$ 105

Figura 3.10 (a) Diagrama del Ojo para un (N-1) $\Delta u=50\text{Ghz}$ 105

Figura 3.10 (b) Espectro propagado de los 4 primeros canales para un (N-1) $\Delta u=50\text{Ghz}$ 105

Figura 3.10 (c) Diagrama del Ojo para un (N-1) $\Delta u=25\text{Ghz}$ 106

Figura 3.10 (d) Espectro propagado de los 4 primeros canales para un (N-1) $\Delta u=25\text{Ghz}$ 106

Figura 3.10 (e) Diagrama del Ojo para un (N-1) $\Delta u=12.5\text{Ghz}$ 106

Figura 3.10 (f) Espectro propagado de los 4 primeros canales para un (N-1) $\Delta u=12.5\text{Ghz}$ 106

Figura 3.11 16 canales de 2.5Gbps en un espectro de 200Ghz 107

<i>Figura 3.12</i>	<i>Modelo de Simulación de tipo XGS-PON.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 3.12 (a)</i>	<i>señal modulada y recibida a la entrada del Rx.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 3.12 (b)</i>	<i>Espectro de Salida de la señal modulada</i>	<i>109</i>
<i>Figura 3.13</i>	<i>Espectro de Salida para 4 canales a ópticos de 10Gbps.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 3.14</i>	<i>Espectro de salida para la variación de la potencia del canal óptico en un sistema DWDM</i>	<i>111</i>
<i>Figura 3.15 (a)</i>	<i>salida modulada para una potencia de 0dBm en el EDFA.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 3.15 (b)</i>	<i>Espectro de salida para una potencia de 0dBm en el EDFA</i>	<i>112</i>
<i>Figura 3.15 (c)</i>	<i>salida modulada para una potencia de 10dBm en el EDFA.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 3.15 (d)</i>	<i>Espectro de salida para una potencia de 10dBm en el EDFA</i>	<i>112</i>
<i>Figura 3.15 (e)</i>	<i>salida modulada para una potencia de 20dBm en el EDFA.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 3.15 (f)</i>	<i>Espectro de salida para una potencia de 20dBm en el EDFA</i>	<i>113</i>
<i>Figura 3.15 (g)</i>	<i>salida modulada para una potencia de 30dBm en el EDFA.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 3.15 (h)</i>	<i>Espectro de salida para una potencia de 30dBm en el EDFA</i>	<i>113</i>
<i>Figura 3.16 (a)</i>	<i>Espectro de salida para un (N-1) $\Delta u=100\text{Ghz}$ y una tasa de acceso nominal de 10Gbps</i>	<i>114</i>
<i>Figura 3.16 (b)</i>	<i>Diagrama del Ojo para un (N-1) $\Delta u=100\text{Ghz}$</i>	<i>115</i>
<i>Figura 3.16 (c)</i>	<i>Espectro de la señal para un (N-1) $\Delta u=100\text{Ghz}$</i>	<i>115</i>
<i>Figura 3.17 (a)</i>	<i>Diagrama del Ojo para un (N-1) $\Delta u=50\text{Ghz}$</i>	<i>115</i>
<i>Figura 3.17 (b)</i>	<i>Espectro de la señal para un (N-1) $\Delta u=50\text{Ghz}$</i>	<i>115</i>
<i>Figura 3.17 (c)</i>	<i>Diagrama del Ojo para un (N-1) $\Delta u=25\text{Ghz}$</i>	<i>116</i>
<i>Figura 3.17 (d)</i>	<i>Espectro de la señal para un (N-1) $\Delta u=25\text{Ghz}$</i>	<i>116</i>
<i>Figura 3.18</i>	<i>4 canales de 10Gbps en un espectro de 180Ghz.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 3.19</i>	<i>Modelo de Simulación de tipo NG-PON.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 3.19 (a)</i>	<i>señal modulada y recibida a la entrada del Rx.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 3.19 (b)</i>	<i>Espectro de salida de la señal modulada en Rx</i>	<i>118</i>
<i>Figura 3.20</i>	<i>Espectro de Salida para un canal óptico de 40Gbps</i>	<i>119</i>
<i>Figura 3.21</i>	<i>Espectro de salida para la variación de la potencia del canal óptico en un sistema DWDM</i>	<i>120</i>
<i>Figura 3.22 (a)</i>	<i>salida modulada para una potencia de 0dBm en el EDFA.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 3.22 (b)</i>	<i>Espectro de salida para una potencia de 0dBm en el EDFA</i>	<i>122</i>

<i>Figura 3.22 (c) salida modulada para una potencia de 5dBm en el EDFA.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 3.22 (d) Espectro de salida para una potencia de 5dBm en el EDFA</i>	<i>123</i>
<i>Figura 3.22 (e) salida modulada para una potencia de 10dBm en el EDFA.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 3.22 (f) Espectro de salida para una potencia de 10dBm en el EDFA</i>	<i>123</i>
<i>Figura 3.22 (g) salida modulada para una potencia de 15dBm en el EDFA.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 3.22 (h) Espectro de salida para una potencia de 15dBm en el EDFA</i>	<i>124</i>
<i>Figura 3.22 (i) salida modulada para una potencia de 20dBm en el EDFA.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 3.22 (j) Espectro de salida para una potencia de 20dBm en el EDFA</i>	<i>124</i>
<i>Figura 3.23 (a) Espectro de salida para una tasa de nominal de 40Gbps.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 3.24 (a) Diagrama del Ojo para un (N-1) $\Delta\nu=200\text{Ghz}$</i>	<i>125</i>
<i>Figura 3.24 (b) Espectro de la señal para un (N-1) $\Delta\nu=200\text{Ghz}$</i>	<i>125</i>
<i>Figura 3.24 (c) Diagrama del Ojo para un (N-1) $\Delta\nu=100\text{Ghz}$</i>	<i>126</i>
<i>Figura 3.24 (d) Espectro de la señal para un (N-1) $\Delta\nu=100\text{Ghz}$</i>	<i>126</i>
<i>Figura 3.24 (e) Diagrama del Ojo para un (N-1) $\Delta\nu=50\text{Ghz}$</i>	<i>126</i>
<i>Figura 3.24 (f) Espectro de la señal para un (N-1) $\Delta\nu=50\text{Ghz}$</i>	<i>126</i>
<i>Figura 3.25 Dos canales de 40Gbps en un espectro de 239Ghz.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 3.26 40Gbps en un espectro de 100Ghz.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 3.27 Modelo de Simulación de tipo XG-PON</i>	<i>129</i>
<i>Figura 3.28 (a) señal modulada de fase a la entrada del Rx</i>	<i>130</i>
<i>Figura 3.28 (b) señal modulada de cuadratura a la entrada del Rx.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 3.28 (c) Espectro de salida de la señal modulada en Rx</i>	<i>131</i>
<i>Figura 3.29 Espectro de salida para la variación de la potencia del canal óptico en un sistema DWDM</i>	<i>132</i>
<i>Figura 3.30 (a) salida modulada para una potencia de 10dBm en el EDFA.....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 3.30 (b) Espectro de salida para una potencia de 10dBm en el EDFA</i>	<i>133</i>
<i>Figura 3.30 (c) salida modulada para una potencia de 15dBm en el EDFA.....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 3.30 (d) Espectro de salida para una potencia de 15dBm en el EDFA</i>	<i>133</i>
<i>Figura 3.30 (e) salida modulada para una potencia de 20dBm en el EDFA.....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 3.30 (f) Espectro de salida para una potencia de 20dBm en el EDFA</i>	<i>134</i>
<i>Figura 3.30 (g) salida modulada para una potencia de 25dBm en el EDFA.....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 3.30 (i) Espectro de salida para una potencia de 25dBm en el EDFA</i>	<i>134</i>

<i>Figura 3.31</i>	<i>Espectro de salida para un (N-1) $\Delta u=100\text{Ghz}$ y una tasa de acceso nominal de 5Gbps en fase y cuadratura</i>	<i>135</i>
<i>Figura 3.32 (a)</i>	<i>Diagrama del Ojo para los datos de fase y un (N-1) $\Delta u=20\text{Ghz}$</i>	<i>136</i>
<i>Figura 3.32 (b)</i>	<i>Diagrama del Ojo para los datos de cuadratura y un (N-1) $\Delta u=20\text{Ghz}$</i>	<i>136</i>
<i>Figura 3.32 (c)</i>	<i>Espectro de la señal para un (N-1) $\Delta u=20\text{Ghz}$</i>	<i>137</i>
<i>Figura 3.33</i>	<i>Modelo de Simulación de tipo NG-PON.</i>	<i>138</i>
<i>Figura 3.33 (a)</i>	<i>señal modulada y recibida en cuadratura en Rx</i>	<i>139</i>
<i>Figura 3.33 (b)</i>	<i>señal modulada y recibida en fase en Rx.....</i>	<i>139</i>
<i>Figura 3.33 (c)</i>	<i>Espectro de salida de la señal modulada en Rx</i>	<i>140</i>
<i>Figura 3.34</i>	<i>Espectro de salida para la variación de la potencia del canal óptico en un sistema DWDM</i>	<i>141</i>
<i>Figura 3.35 (a)</i>	<i>salida modulada para una potencia de 10dBm en el EDFA.....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 3.35 (b)</i>	<i>Espectro de salida para una potencia de 10dBm en el EDFA</i>	<i>141</i>
<i>Figura 3.35 (c)</i>	<i>salida modulada para una potencia de 15dBm en el EDFA.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 3.35 (d)</i>	<i>Espectro de salida para una potencia de 15dBm en el EDFA</i>	<i>142</i>
<i>Figura 3.35 (e)</i>	<i>salida modulada para una potencia de 20dBm en el EDFA.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 3.35 (f)</i>	<i>Espectro de salida para una potencia de 20dBm en el EDFA</i>	<i>142</i>
<i>Figura 3.35 (g)</i>	<i>salida modulada para una potencia de 25dBm en el EDFA.....</i>	<i>143</i>
<i>Figura 3.35 (h)</i>	<i>Espectro de salida para una potencia de 25dBm en el EDFA</i>	<i>143</i>
<i>Figura 3.36 (a)</i>	<i>efecto de la amplificación de línea en los datos de fase y cuadratura</i>	<i>143</i>
<i>Figura 3.36 (b)</i>	<i>efecto de la amplificación de línea en el espectro propagado</i>	<i>143</i>
<i>Figura 3.37</i>	<i>Espectro de salida para una tasa de acceso nominal de 20Gbps en fase y cuadratura.....</i>	<i>144</i>

ÍNDICE DE TABLAS

CAPITULO 1.

Tabla 1.1	Características Generales redes XGS-PON	4
Tabla 1.2	Características Generales redes NG-PON2.....	5
Tabla 1.3	Características Fibra óptica mono modo SMF-28.....	8
Tabla 1.4	Características Fibra óptica mono modo SSMF-28 e+	8
Tabla 1.5	Características Fibra óptica mono modo SSMF-28 Ultra.....	9
Tabla 1.6	Características Fibra óptica mono modo SSMF-ULL.....	9
Tabla 1.7	Parámetros Técnicos de las tarjetas OSN3500	10
Tabla 1.8	Parámetros Técnicos de los Gabinetes ZXONE 8000	11
Tabla 1.9	Asignación de una plan de canalización DWDM.....	12
Tabla 1.10	Factor Q vs Distancia máxima alcanzable para un enlace DWDM.....	17
Tabla 1.11	BER vs Distancia máxima alcanzable para un enlace DWDM	18
Tabla 1.12	Efecto de la CD en un sistema DWDM a 2.5Gbps y Modulación NRZ-OOK.....	31
Tabla 1.13	Efecto de la PMD en un sistema DWDM a 2.5Gbps.....	33
Tabla 1.14	Relación SPM, Dispersión Cromática y Potencia óptica.....	36

CAPITULO 2.

Tabla 2.1	VARIABLES Y LIMITACIONES EN LA MEDIDA DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL.....	83
-----------	---	----

CAPITULO 3.

Tabla 3.1	Características Generales del escenario de simulación	95
Tabla 3.2	Definición de los Casos de Estudio Basados en DPSK.....	96
Tabla 3.3	Parámetros de Configuración Generales DPSK	99
Tabla 3.4 (a)	Variación de la potencia del láser.....	101
Tabla 3.4 (b)	Variación de la potencia de los dispositivos EDFA	102
Tabla 3.5	Monitoreo de la Eficiencia Espectral para 16 canales co-propagantes de 2.5Gbps de Acceso Nominal.....	104

<i>Tabla 3.6</i>	<i>Monitoreo de la Eficiencia Espectral analítica y nominal para 16 canales co-propagantes de 2.5Gbps</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 3.7</i>	<i>Parámetros de Configuración Generales DPSK</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 3.8</i>	<i>Variación de la potencia del láser.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 3.9</i>	<i>Variación de la potencia de los dispositivos EDFA</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 3.10</i>	<i>Monitoreo de la Eficiencia Espectral para 4 canales de 10Gbps de acceso nominal por longitud de onda</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 3.11</i>	<i>Monitoreo de la Eficiencia Espectral analítica y nominal para 4 canales co-propagantes de 10Gbps</i>	<i>118</i>
<i>Tabla 3.12</i>	<i>Parámetros de Configuración Generales DPSK</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 3.13</i>	<i>Variación de la potencia del láser.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 3.14</i>	<i>Variación de la potencia de los dispositivos EDFA</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 3.15</i>	<i>Monitoreo de la Eficiencia Espectral para 1 canal de 40Gbps de acceso nominal por longitud de onda</i>	<i>126</i>
<i>Tabla 3.16</i>	<i>Monitoreo de la Eficiencia Espectral analítica y nominal para 1 canal de 40Gbps</i>	<i>129</i>
<i>Tabla 3.17</i>	<i>Parámetros de Configuración Generales DPSK</i>	<i>130</i>
<i>Tabla 3.18</i>	<i>Variación de la potencia del láser.....</i>	<i>131</i>
<i>Tabla 3.19</i>	<i>Variación de la potencia de los dispositivos EDFA</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 3.20</i>	<i>Monitoreo de la Eficiencia Espectral para 4 canales de 10Gbps de acceso nominal por longitud de onda</i>	<i>136</i>
<i>Tabla 3.21</i>	<i>Monitoreo de la Eficiencia Espectral analítica y nominal para 4 canales co-propagantes de 10Gbps</i>	<i>138</i>
<i>Tabla 3.22</i>	<i>Parámetros de Configuración Generales DQPSK.....</i>	<i>139</i>
<i>Tabla 3.23</i>	<i>Variación de la potencia del láser.....</i>	<i>140</i>
<i>Tabla 3.24</i>	<i>Variación de la potencia de los dispositivos EDFA</i>	<i>141</i>
<i>Tabla 3.25</i>	<i>Monitoreo de la Eficiencia Espectral para 1 canales de 40Gbps de acceso nominal por longitud de onda</i>	<i>144</i>
<i>Tabla 3.26</i>	<i>Análisis comparativo de la eficiencia espectral</i>	<i>146</i>
<i>Tabla 3.27</i>	<i>Mejoras de la eficiencia espectral</i>	<i>147</i>

INTRODUCCIÓN

Desde la introducción del primer sistema de telecomunicaciones óptico, el incremento en el ancho de banda y en la velocidad de transmisión de datos por canal se ha hecho evidente, donde hoy en día, los sistemas comerciales generalmente implementan pocas longitudes de onda con espaciamentos por canal del orden de 100GHz a velocidades de 2.5Gbps y 10Gbps, generando una eficiencia espectral para estos sistemas entre 0.2b/s/Hz a 0.4b/s/Hz, sin embargo, para estar a la par con los requerimientos de tráfico de la actualidad, se ha hecho necesario manejar altas velocidades de transmisión de datos, implementando soluciones costo-eficientes mediante una mínima renovación de los sistemas existentes.

Por otra parte, y dado que uno de los requerimientos fundamentales para transportar canales ópticos a altas velocidades de transmisión de datos es mantener en mayor medida las características de la red, se han identificado algunos desafíos fundamentales entre los cuales se destacan: i) obtener una extensión similar del espectro óptico a diferentes velocidades de transmisión de datos, ii) alcanzar distancias de transmisión a velocidades de lo 40Gbps comparables a las distancias de los sistemas de 2.5Gbps y iii) ofrecer una tolerancia similar a los efectos de las degradaciones lineales y no lineales.

Como finalidad del presente proyecto de maestría, se proponen soluciones que permitan mejorar la eficiencia espectral de un sistema DWDM a velocidades de transmisión de 40Gbps de arquitecturas FSAN, a través de la manipulación y/o modificación de algunos formatos de modulación avanzados que recientemente han generado gran atención para este tipo de sistemas Ópticos, siendo los esquemas modulados en fase diferencial y en fase y cuadratura diferencial, algunos de los más atractivos. Sin embargo, a pesar de sus importantes características, enfrentan problemas relacionados con la complejidad, la configuración y la gestión del sistema sobre una red DWDM.

CAPITULO 1.

GENERALIDADES, CARACTERÍSTICAS Y RELACIONES DE PROPAGACIÓN DE LOS SISTEMAS DWDM

En el desarrollo de este capítulo, se detallan algunas características generales sobre los sistemas de telecomunicaciones basados en fibra óptica y algunos elementos específicos pertinentes para el desarrollo de la investigación, enfocados en mejorar la eficiencia espectral mediante la implementación de esquemas de modulación avanzados.

CAPITULO 2.

FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS, EFICIENCIA ESPECTRAL Y ADAPTACIÓN DE LA TEORÍA DE LA INFORMACIÓN

Se presentan las generalidades y requerimientos de las arquitecturas de red de próxima generación, se realiza un estudio detallado sobre los formatos de modulación avanzados implementados en la presente investigación, y se define una adaptación de la teoría de la información con la finalidad de ser aplicada al contexto DWDM.

CAPITULO 3.

MEJORA DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL IMPLEMENTANDO FORMATOS AVANZADOS DE MODULACIÓN EN REDES DWDM

Se define la metodología de simulación, la herramienta de simulación y los casos de estudio implementando los formatos de modulación avanzados DPSK y DQPSK con la finalidad de mejorar la eficiencia espectral.

CAPITULO 4.

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros, alrededor de los esquemas de modulación avanzados que permitieron diseñar, configurar e implementar arquitecturas de red de última generación con la finalidad de generar mejoras en la eficiencia espectral.

ABSTRACT

Since the introduction of the first optical telecommunications system, the increase in bandwidth and data transmission rate per channel has become evident, where nowadays, commercial systems generally implement few wavelengths with spacing's per channel of 100Ghz and 2.5Gbps - 10Gbps, generating a spectral efficiency for these systems between 0.2 bps / Hz to 0.4 bps / Hz, however, to be on par with the traffic requirements of today, It's necessary to handle high data transmission speeds, implementing cost-efficient solutions that update networks at photonic and electronic level through a minimum renewal of existing systems.

On the other hand, and given the fundamental requirements for transporting optical channels at high data transmission speeds is to maintain the characteristics of the network to a greater extent, some fundamental challenges have been identified, among which stand out: i) obtain a similar extension of the optical spectrum at different data transmission speeds, ii) reaching transmission distances at speeds of 40Gbps comparable to the distances of the 2.5Gbps systems and iii) offering a similar tolerance to the effects of linear and non-linear impairments [9]

Taking account the factors described above, and as the purpose of the present Master's Thesis, solutions are proposed to improve the spectral efficiency of a DWDM system at transmission speeds of 40Gbps, through the manipulation and / or modification of some Modulation formats that have recently generated the most attention for this type of Optical Systems, being the schemes modulated in differential phase and in phase and differential quadrature, some of the most attractive. However, despite their important characteristics, they face problems related to the complexity, configuration and management of the system over a DWDM network, topics that we will develop in the present investigation.

CHAPTER 1.

GENERAL, CHARACTERISTICS AND RELATIONSHIPS OF PROPAGATION OF DWDM SYSTEMS

In the development of this chapter, some general characteristics about fiber telecommunications systems and some specific elements pertinent to the development of research, focused on improving spectral efficiency through the implementation of advanced modulation schemes are detailed.

CHAPTER 2.

ADVANCED MODULATION FORMATS, SPECTRAL EFFICIENCY AND ADAPTATION OF INFORMATION THEORY

The generalities and requirements of the next generation network architectures are presented, a detailed study is made on the advanced modulation formats implemented in this research, and an adaptation of the information theory is defined in order to be applied to the DWDM context.

CHAPTER 3.

IMPROVING SPECTRAL EFFICIENCY IMPLEMENTING ADVANCED MODULATION FORMATS IN DWDM NETWORKS

The simulation methodology, the simulation tool and the case studies are defined by implementing the advanced modulation formats DPSK and DQPSK in order to improve the spectral efficiency.

CHAPTER 4.

CONCLUSIONS, RECOMMENDATIONS AND FUTURE WORK

The conclusions, recommendations and future work are presented around the advanced modulation schemes that allowed to design, configure and implement last generation network architectures with the purpose of generating improvements in the spectral efficiency.

CAPITULO 1.

GENERALIDADES, CARACTERÍSTICAS Y RELACIONES DE PROPAGACIÓN DE LOS SISTEMAS DWDM

Debido al rápido crecimiento y desarrollo de servicios y aplicaciones, desde la introducción del primer sistema de telecomunicaciones óptico DWDM, el requerimiento en el incremento de ancho de banda y en la velocidad de transmisión de datos por canal se ha hecho evidente. Hoy en día, los sistemas comerciales DWDM generalmente implementan pocas longitudes de onda con espaciamentos por canal de 100GHz a velocidades de 10Gbps, generando una eficiencia espectral del orden de los 0.2b/s/Hz utilizado formatos de modulación simples en intensidad On-Off Keying debido a su fácil implementación; sin embargo es posible alcanzar velocidades de transmisión de datos del orden de los 40Gbps con una eficiencia espectral alrededor de los 0.8b/s/Hz mediante la implementación de soluciones costo-eficientes que actualicen las redes a nivel fotónico y electrónico mediante una mínima renovación de los sistemas existentes.

En el desarrollo de este capítulo, se detallan algunas características generales sobre los sistemas de telecomunicaciones basados en fibra óptica y algunos elementos específicos pertinentes para el desarrollo de la investigación, enfocados en mejorar la eficiencia espectral mediante la implementación de esquemas de modulación avanzados.

1.1 GENERALIDADES DWDM

DWDM es una tecnología que aprovecha las capacidades de la fibra óptica mediante la multiplexación de señales de fuentes de luz sobre un único enlace permitiendo el transporte y la implementación de diferentes velocidades de

transmisión de datos y protocolos sobre una única infraestructura de red, migrando a redes inteligentes de próxima generación NG-OTN (Next Generation - Optical Transport Networks) [1-9]. A continuación, se detallarán las principales características de algunas recomendaciones establecidas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-T), la cuales definirán parámetros, estándares y requerimientos de sistemas DWDM a 10Gbps y 40Gbps, pertinentes para el entorno de investigación.

1.1.1 Redes XG-PON y NG-PON

La Unión Internacional de Telecomunicaciones, en su estándar UIT-T Y2001, define una red de próxima generación como “una Red basada en paquetes que permite prestar servicios de telecomunicación y en la que se pueden utilizar múltiples tecnologías de transporte de banda ancha propiciadas por la QoS (Quality of Service - Calidad de Servicio), y en la que las funciones relacionadas con los servicios son independientes de las tecnologías subyacentes relacionadas con el transporte...” siendo la evolución de los sistemas de telecomunicaciones basados en Fibra Óptica fuertes candidatos a cumplir con estos requerimientos propuestos para dichas redes.

Algunas de las capacidades definidas para este tipo de sistemas se resumen en: i) permitir la creación, introducción y gestión de todos los tipos de servicios; ii) soportar a nivel de transporte, servicios con diferentes demandas de ancho de banda y iii) separar los servicios y el transporte de la red permitiendo evolucionar de manera independientemente [1].

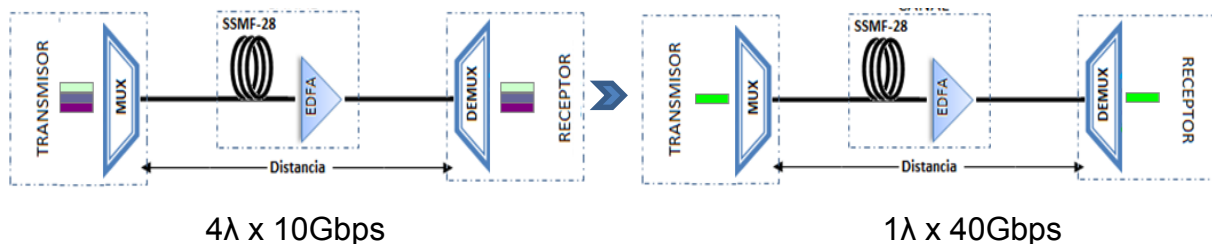


Figura 1.1 Tendencia de las redes DWDM [Por los Autores]

Como se observa en la figura 1.1 Se presentan dos soluciones al requerimiento en el incremento de ancho de banda de servicios y aplicaciones, donde un sistema DWDM puede manejar múltiples canales a bajas velocidades de transmisión de datos o puede migrar a una sola longitud de onda de alta velocidad, donde la capacidad de dicho sistema puede ser medido mediante el incremento en la tasa de transmisión de bit de cada canal óptico (10Gbps a 40Gbps), la multiplexación de canales ($n \lambda$'s a una λ), o la combinación de los dos esquemas, consiguiendo una alta eficiencia espectral. Sin embargo cada solución presenta algunos inconvenientes con respecto al máximo ancho de banda disponible a nivel de acceso, manejo de longitudes de onda a altas velocidades de transmisión de datos, efectos degradantes debido a la interacción con fenómenos de propagación lineal y no lineal, penalidades de potencia, entre otros.

El grupo de tarea para la siguiente generación de redes ópticas pasivas FSAN (Full Service Access Network), tiene el objetivo desarrollar, proponer y generar especificaciones para sistemas de acceso óptico más allá de los estándares propuestos actualmente con el objetivo de proporcionar soluciones de última generación, brindando la capacidad de permitir una migración fluida entre los diferentes reléase propuestos para los sistemas X-WDM y, cuando sea posible, permitir la convergencia y reutilización de la infraestructura de fibra instalada [2].

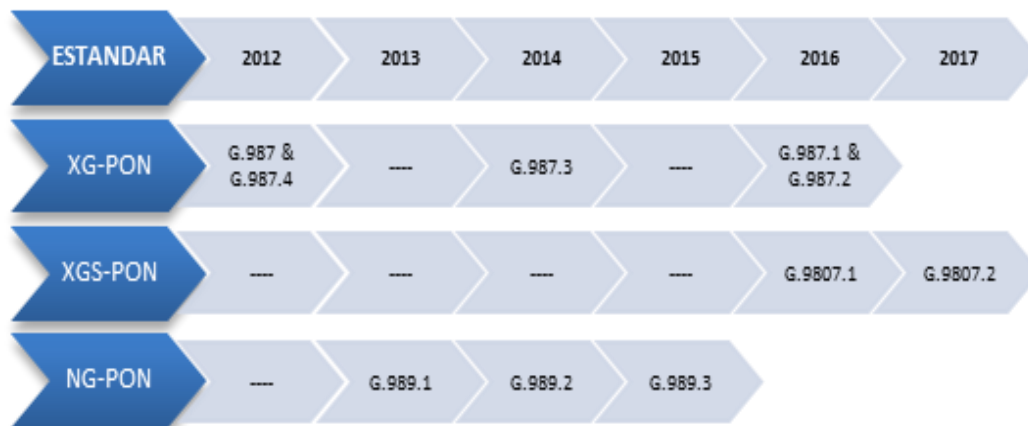


Figura 1.2 Propuesta de migración de las redes PON [3]

El comité europeo para las aplicaciones FTTH [3], en su última edición de marzo de 2018, define y propone algunas soluciones alrededor de las redes ópticas pasivas, con la finalidad de permitir la migración de manera completa a entornos de tipo FTTx, definiendo los ambientes de red, las arquitecturas, las topologías, el acceso y los estándares, para la siguiente generación de sistemas de tipo AON (All Optical Network – Redes en el dominio óptico). La figura 1.2 define la propuesta de evolución basado en los estándares sugeridos por la UIT en sus diferentes versiones.

REDES XGS-PON		
CARACTERÍSTICAS	REQUERIMIENTO	
Servicios a nivel de acceso	PDH	SDH
	T1 y E1	STM-64
mínima trama de empaquetamiento	Tipo Ethernet de 2000 bytes y hasta 9000 bytes	
Características de la fibra	Definidas en el estándar UIT-T G652	
Distancias del enlace	Definidos para distancias entre los 40Km y los 60Km	
Asignación Dinámica de Ancho de Banda	Reporte de estado SR-DBA y monitoreo de trafico TM-DBA	
Aplicaciones	FTTx	
Velocidad nominal	10Gbps Simétricos	
Métodos de coexistencia	Sobre carga de longitud de onda y/o TDMA	

Tabla 1.1 Características Generales redes XGS-PON [9-10]

Algunos requerimientos definidos por la serie de estándares UIT-T G987 [4] en sus versiones G987.1 a G987.4 de 2016 a 2012 [4-8] para redes de tipo XG-PON, definen, en general un sistema operando a una tasa de transmisión de datos

lineal nominal¹ de 2.5 / 10Gbps en el enlace de bajada y 2.5Gbps en el enlace de subida; sin embargo la última actualización del estándar definida como XGS-PON para el estándar ITU G.9807.1 [9] y G.9807.2 [10] de 2016 y 2017 respectivamente, define una versión simétrica a 10Gbps, para alcanzar mayores anchos de banda, permitiendo la coexistencia con las redes XG-PON instaladas, mejorando la capacidades de red. A continuación, se define las características mínimas de operación las cuales se resumen en la tabla 1.1.

REDES NG-PON		
CARACTERÍSTICAS	REQUERIMIENTO	
arquitectura	Tipo WDM y TDM mediante mecanismos de acceso	
canales	4 canales TWDM	
Tasa nominal por canal	10Gbps	
Máxima distancia alcanzable	Entre 20Km y 40Km	
Servicios a nivel de acceso	PDH	SDH
	T1 y E1	STM-64

Tabla 1.2 Características Generales redes NG-PON2 [11-13]

Del mismo modo, el estándar UIT-T en su serie G989 de 2015 [11] describe los requerimientos generales para redes tipo NG-PON2, soportando capacidades del orden de los 40Gbps para aplicaciones de tipo residenciales, móviles, entre otras, sus reléase para esta nueva generación se definen en los estándares G989.1 a G989.3 de 2013 a 2017 [12, 13] respectivamente. Sin embargo, una vez concluida la etapa de desarrollo para NG-PON1 que termina con el estándar XGS-PON de 2016, define, para los sistemas NG-PON2 (segunda etapa de evolución pensada para 2025) una capacidad de referencia de 40Gbps utilizando cuatro canales de longitud de onda con velocidades nominales de 10Gbps para el downstream y de

¹ Una tasa de trasmisión de datos lineal nominal se define como “el número total de bit’s que pueden ser físicamente transferidos por unidad de tiempo sobre un enlace de comunicación”

2.5Gbps para el upstream. La tabla 1.2 resume las características generales esperadas para estos nuevos sistemas ópticos.

Como se pudo apreciar en las características definidas anteriormente, para redes XG-PON y NG-PON, dentro de los estándares definidos por la serie G de la UIT, no se encuentran relacionados sistemas de fibra con longitudes de onda a velocidades de acceso nominales de transmisión de datos de 40Gbps, sino que se relacionan con la capacidad total del sistema al transportar múltiples longitudes de onda a velocidades nominales de transmisión de datos inferiores, definiendo soluciones a nivel de transporte de la red, sin embargo dentro de los desarrollos físicos de algunos fabricantes ya se implementa tarjetas para sistemas DWDM trabajando a velocidades de hasta 40Gbps nominales.

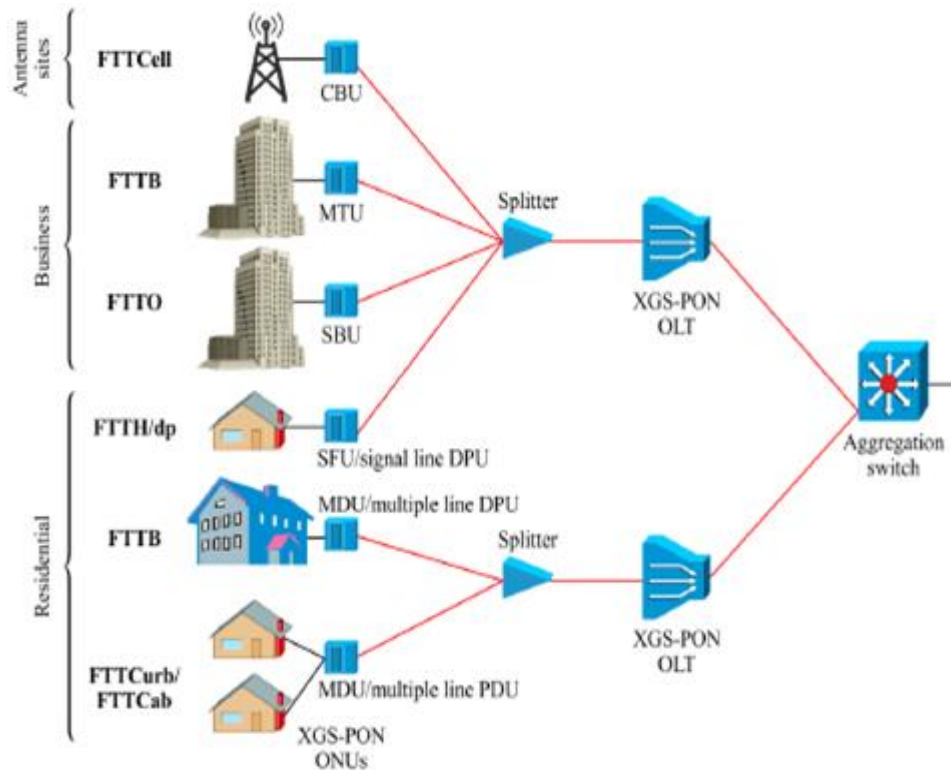


Figura 1.3 Convergencia de aplicaciones y servicios de tipo FTTx [3]

Del mismo modo, el comité europeo define la propuesta de arquitecturas de red [3], cómo múltiples aplicaciones de tipo FTTx, para diferentes escenarios de interconexión y convergencia de tecnologías, figura 1.3, donde la idea fundamental es reutilizar los recursos de red desplegados, permitiendo la migración y coexistencia de los diferentes estándares propuestos para la evolución de las redes ópticas de próxima generación.

1.1.2 Fibras Ópticas

A pesar de que el estándar UIT-T G652 define ciertos parámetros y características típicas de una fibra óptica mono modo disponible para enlaces DWDM, en los últimos años se han realizado avances significativos en la fabricación de nuevos tipos de fibra los cuales mejoran considerablemente el desempeño de los sistemas, permitiendo migrar² a altas velocidades de transmisión de datos, la figura 1.4 define una clasificación general de las fibras ópticas.

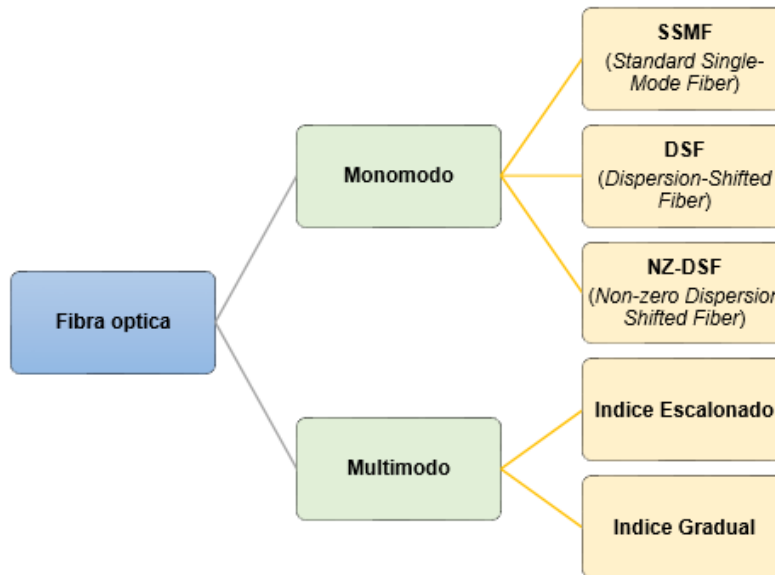


Figura 1.4 Clasificación de las fibras ópticas [Por los Autores]

² Dicha migración es resultado de la interacción de la señal óptica con el medio, la cual brinda ciertas potencialidades que permiten mejorar aún más las características del sistema de comunicación.

Corning, Coherent, Nufern, NKT Photonics y FiberHome entre otros [14-18], son algunos fabricantes que se han dedicado en los últimos años al desarrollo de nuevos tipos de cables de fibra óptica, los cuales brindan características especiales frente a tres elementos principales como son: la atenuación, la dispersión cromática (CD - *Chromatic Dispersion*) y la dispersión por modo de polarización (PMD - *Polarization Mode Dispersion*) permitiendo a nuevos esquemas de modulación aprovechar las potencialidades de dichos elementos.

ATRIBUTO	DETALLE	VALOR
Coeficiente de Atenuación	A 1550nm	0.30dB/Km
Coeficiente de PMD	Máximo PMD _Q	0.20ps/km ^{1/2}
Coeficiente de dispersión cromática	D ₁₅₅₀	17ps/nm x km

Tabla 1.3 Características Fibra óptica mono modo SMF-28 [19]

La Tabla 1.3, define las características típicas de una fibra óptica SMF-28 para el estándar UIT-T G652, del mismo modo, las tablas 1.4 a 1.6 muestran la propuesta de algunos fabricantes que han actualizado el desarrollo del medio físico. Sin embargo a pesar de mejorar considerablemente, el costo de las fibras y el bajo requerimiento de ancho de banda para el entorno de investigación hacen que no sean implementadas en mayor medida por los sistemas de telecomunicaciones.

ATRIBUTO	DETALLE	VALOR
Coeficiente de Atenuación	A 1550nm	≤ 0.20dB/Km
Coeficiente de PMD	Máximo PMD _Q	≤ 0.1ps/km ^{1/2}
Coeficiente de dispersión cromática	D ₁₅₅₀	≤ 18ps/nm x km

Tabla 1.4 Características Fibra óptica mono modo SSMF-28 e+ [20]

ATRIBUTO	DETALLE	VALOR
Coeficiente de Atenuación	A 1550nm	$\leq 0.20\text{dB/Km}$
Coeficiente de PMD	Máximo PMD_Q	$\leq 0.04\text{ps/km}^{1/2}$
Coeficiente de dispersión cromática	D_{1550}	$\leq 18\text{ps/nm x km}$

Tabla 1.5 Características Fibra óptica mono modo SSMF-28 Ultra [21]

ATRIBUTO	DETALLE	VALOR
Coeficiente de Atenuación	A 1550nm	$\leq 0.18\text{dB/Km}$
Coeficiente de PMD	Máximo PMD_Q	$\leq 0.04\text{ps/km}^{1/2}$
Coeficiente de dispersión cromática	D_{1550}	$\leq 18\text{ps/nm x km}$

Tabla 1.6 Características Fibra óptica mono modo SSMF-ULL [22]

Como se puede apreciar en los elementos anteriores, a pesar de que el incremento nominal de las características de atenuación, dispersión y polarización de algunos fabricantes no parece cambiar en mayor medida frente al estándar de comparación (UTI-T G652), dichos parámetros favorecen considerablemente el diseño del enlace y el desempeño del mismo con respecto a la implementación de nuevos esquemas de modulación; ya que análisis anteriores [23] relacionan la posibilidad de migrar a redes de ultra alta capacidad y velocidad, mediante fenómenos que relacionan interacciones lineales y no lineales dentro del sistema.

1.1.3 Elementos de Sistema

Con el fin de generar el modelo de red sobre el cual estará soportada la simulación de los diferentes esquemas de modulación, es necesario realizar un análisis detallado de las características más significativas de algunos sistemas de fibra óptica; en general, la información suministrada hace referencia a las tecnologías a nivel de acceso, velocidades y anchos de banda suministradas por algunos gabinetes comerciales implementados en el sistema.

Los equipos OSN de HUAWEI con su serie OptiX-OSN 3500, son uno de los más utilizados dentro de las configuraciones de las redes. A continuación, se detallan los parámetros de las tarjetas de interfaz óptica SF64/SL64 que son las responsables de manejar las señales a velocidades de transmisión de datos de 10Gbps.

PARAMETRO	DESCRIPCION				
Velocidad de Tx	SF64	10.709Gb/s	SL64	9.953Gb/s	
Capacidad de Acceso	SDH servicio estándar o concatenado STM-64				
Patrón de código de Línea	NRZ & RZ				
Modulación	OOK				
Longitud de Onda [nm]	1310	1550	1550	1550	1550
Distancia de Tx [Km]	0-2	2-40	30-70	30-70	80
Máxima Tolerancia de Dispersión [ps/nm]	6.6	800	1600	1200	1600

Tabla 1.7 Parámetros Técnicos de las tarjetas OSN3500 [24].

Del mismo modo, los gabinetes ZXONE 8000 de la empresa ZTE se implementaron recientemente dentro de la migración de red de uno de los proveedores de servicio más fuertes a nivel nacional llevando la tecnología de red DWDM a un nuevo nivel. La tabla 1.8 resume las principales características de estos dispositivos.

Sin embargo, a pesar de la capacidad de los equipos implementados, las características típicas de configuración³ de esta red a nivel nacional, se encuentra definida en un nivel de acceso máximo de un STM-64 por Canal (Ch) óptico, distancias típicas de los enlaces con capacidades de Add-Drop por nodo de máximo 120Km, amplificación EDFA de ganancia constante de 20dB a 40dB, canal de

³ Información confidencial suministrada solo con fines investigativos, no es posible su verificación ni su divulgación para entornos abiertos de conocimiento aplicado.

supervisión óptico en los 1510nm, máximo 4 longitudes de onda iluminadas, banda C de operación de cada canal óptico, espaciamentos de 100Ghz a partir del canal 192.1THz, fibra SSMF-28 e de Corning.

PARAMETRO	DESCRIPCION		
Velocidad de transmisión lineal	Máximo a 40Gbps		
Patrón de código de Línea	NRZ & RZ		
Esquemas de modulación	QPSK	DPSK	
Máxima tolerancia de CD	50.000 ps/nm		
Capacidad de acceso	STM-N	40GE	OUT-N
Longitudes de Onda x tarjeta	2x40GE	10x10GE	16x2.5G
Potencia de Operación	+-6dBm		

Tabla 1.8 Parámetros Técnicos de los Gabinetes ZXONE 8000 [25]

1.1.4 Rango de Frecuencias para Aplicaciones DWDM

El estándar UIT-T G694.1 [26], define la grilla espectral para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda en el cual se soporta una variedad de espaciamentos por canal fijos desde los 12.5GHz y hasta los 100GHz como una referencia en el tratamiento y configuración de los Canales Ópticos (O'ch - Optical Chanel), permitiendo definir el ancho de banda total ocupado en relación al número de canales, la velocidad nominal de transmisión y el desempeño del sistema. La tabla 1.9, define un ejemplo de una grilla central de frecuencias para un sistema DWDM.

Como se aprecia en la figura 1.5 y teniendo en cuenta la tabla definida en 1.9 con la cual se determinan algunos factores claves de configuración del sistema, es finalidad comprobar dos posibles soluciones las cuales se encuentran enmarcadas en: i) permitir que múltiples canales ópticos a diferentes velocidades de transmisión de datos se implementen con espaciamentos del mismo orden, donde cada canal

óptico ocupa su respectivo ancho de banda y además se encuentra separado a la misma distancia independientemente de la capacidad de acceso; o ii) definir canales ópticos a diferentes velocidades de transmisión de datos ocupando el mismo ancho de banda.

FRECUENCIA CENTRAL NOMINAL [THz]			
12.5 GHz de espaciamiento	25 GHz de espaciamiento	50 GHz de espaciamiento	100 GHz de espaciamiento
195.8000	195.800	195.80	195.8
195.7875			
195.7750	195.775		
195.7625			
195.7500	195.750	195.75	
195.7375			
195.7250	195.725		
195.7125			
195.7000	195.700	195.70	195.7

Tabla 1.9 asignación de una plan de canalización DWDM [26].

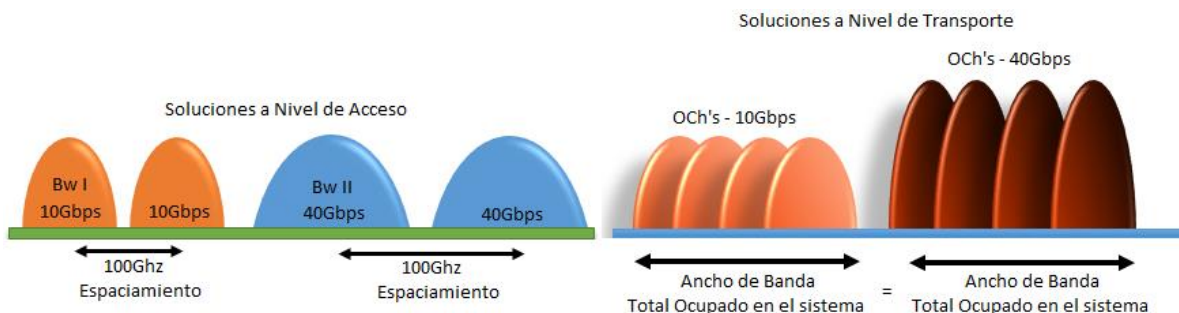


Figura 1.5 Ocupación espectral para múltiples canales DWDM [Por los Autores]

Teniendo en cuenta las posibles soluciones planteadas anteriormente, permitir, la coexistencia de diferentes tipos de canales ópticos sobre la configuración de una única red, generará escalabilidad en los requerimientos de velocidad, capacidad y ancho de banda, afectando considerablemente el transporte del sistema DWDM; por otro lado, la manipulación de algunas características especiales de configuración de cada canal óptico permitirá a nivel de acceso, que canales con diferentes tasas de transmisión nominal binarias mantengan sus propiedades constantes en la ocupación del ancho de banda mejorando la eficiencia espectral⁴.

1.2 PARÁMETROS DE MONITOREO ÓPTICO – OPM

Debido a que las redes de telecomunicaciones modernas, siguiendo los parámetros definidos para la estandarización de redes de nueva generación, deben asegurar sistemas escalables, flexibles y seguros, manejado altas tasas de transmisión de datos con una gran eficiencia espectral de manera transparente a usuarios y servicios, un mayor número de variables de medición han sido introducidas en el sistema permitiendo un medio potencial para realizar gestión y control de manera sistemática y confiable, reduciendo el tiempo promedio entre fallas (MTF - Mean Time to Failure) y mejorando la calidad de la señal óptica.

OPM apunta a redes inteligentes, las cuales permitan realizar procesos enfocados a mediciones físicas del estado y la calidad de la propagación de la señal, diagnóstico automático y reparación de fallas, priorización de recursos, manejo de potencias y longitudes de onda, compensación y ecualización sintonizable, codificación y asignación de anchos de banda dinámicos por canal, entre otros; sin embargo todos estos nuevos niveles de procesamiento de la señal óptica en tiempo real producen un incremento en la complejidad de la red y en el procesamiento de la señal [27].

⁴ Hipótesis de solución basadas en la migración y el comportamiento de los esquemas de modulación avanzados en redes DWDM desde el punto de vista de acceso y de transporte de la red.

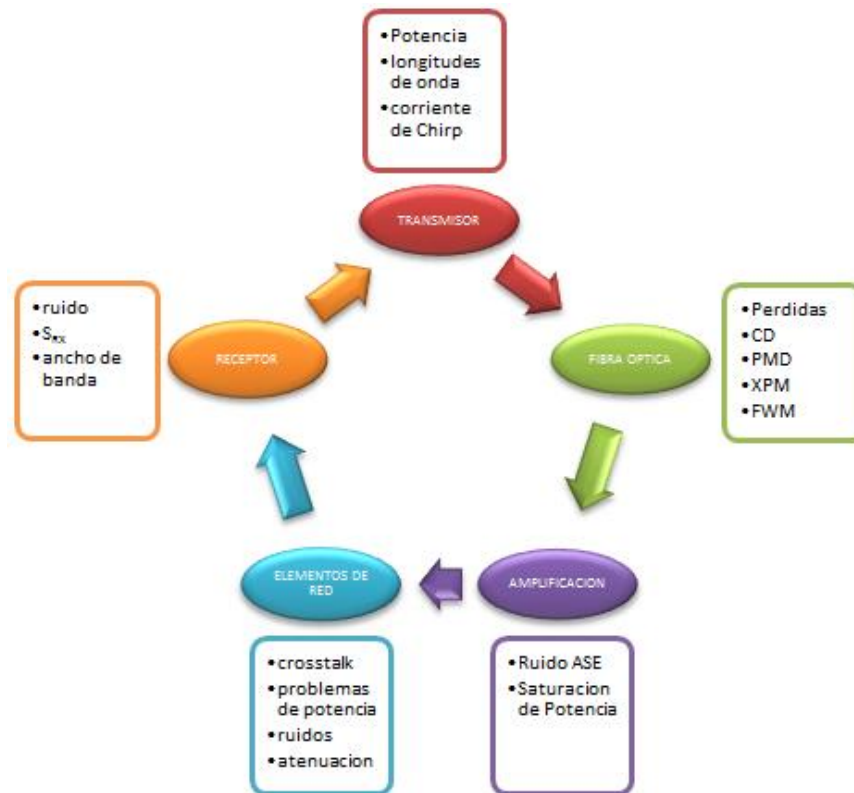


Figura 1.6 (a) Factores de OPM que inciden en el desempeño de la red [27]

Como se observa en la Figura 1.6 (a) y Figura 1.6 (b), OPM define para cada nivel de la arquitectura física de un sistema DWDM, las variables que se encuentran relacionadas con la degradación del desempeño del sistema; dichos elementos pueden ser controlados y monitoreados mediante tres esquemas de relación los cuales se encuentran definidos en i) Parámetros de desempeño, que son aquellas variables con respecto a quien quiero realizar la medición enfocados en cuatro elementos fundamentales, tasa de errores de Bit, Factor de Calidad, Relación Señal a Ruido Óptico y Diagrama de Ojo; ii) Parámetros de Monitoreo Óptico, siendo aquellos factores que se definen en cada etapa del sistema DWDM enfocados en la atenuación, ruido, degradaciones lineales y no lineales, penalidades de potencia, fluctuaciones y amplificaciones de ganancia; y iii) Técnicas de Monitoreo Óptico, los cuales relacionan la forma en la que se puede realizar la medición.



Figura 1.6 (b) Relación OPM [Por los autores]

Teniendo en cuenta los factores definidos anteriormente, y como finalidad el presente proyecto de investigación se requiere conocer la base teórica de los elementos relacionados en la figura 1.6 (a) de la siguiente forma:

1.2.1 Factor de Calidad – Q

El factor Q, se define como la relación señal a ruido SNR (Signal to Noise Ratio) en la entrada de un circuito de decisión de un receptor de señal digital. Se supone que en condiciones ideales, el factor Q está dado por los niveles lógicos μ_0 y μ_1 , y por la distribución del ruido Gaussiano en torno a los niveles de “1” y “0”, definidos por las desviaciones típicas σ_0 y σ_1 , como se puede apreciar en la figura 1.7.

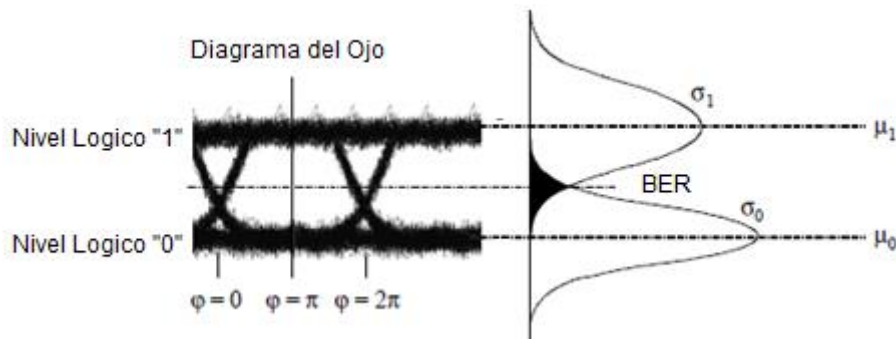


Figura 1.7 Factor de Calidad [27]

Teóricamente, el factor de calidad se define como:

$$Q (\text{Lineal}) = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad \text{Ecuación (1.1)}$$

$$Q(\text{dB}) = 20 \log_{10} Q(\text{lineal}) \quad \text{Ecuación (1.2)}$$

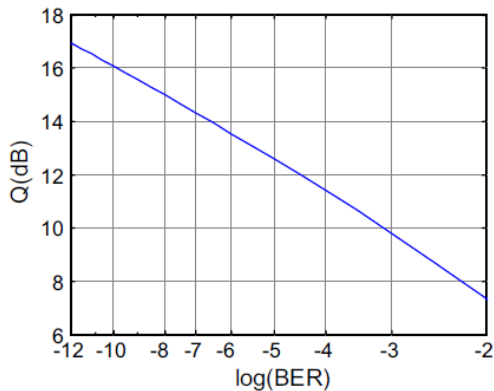


Figura 1.7 (a) Relación Factor Q y Tasa de Errores de Bit [23]

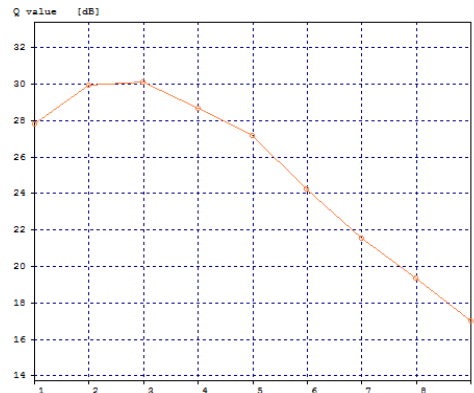


Figura 1.7 (b) Factor Q vs Distancia de Transmisión para NRZ-OOK [23]

Dicho parámetro se utiliza como una indicación del desempeño del sistema, brindando una relación con la tasa de errores de bit – BER (*Bit Error Rate*) y con la relación señal a ruido Óptico – OSNR (*Optical Signal to noise Ratio*) donde un incremento de 1dB del factor OSRN corresponde aproximadamente a un incremento de 1dB del factor Q.

En la figura 1.7 (a) y figura 1.7 (b), se puede apreciar la relación lineal que existe entre el factor Q y la máxima distancia de transmisión alcanzable para uno de los esquemas de modulación más simple y más implementados dentro de las comunicaciones ópticas (NRZ-OOK) a 2.5Gbps [23], generando una relación de los valores aproximados conseguidos para distintos enlaces DWDM en presencia de diferentes degradaciones ópticas, atenuaciones de los dispositivos y ruido de los elementos de configuración, como una base para el análisis y comparación con

algunos esquemas de modulación complejos basados en modulaciones DPSK y DQPSK resumidos en la tabla 1.10.

Distancia [Km]	Canal [THz]	FORMATO DE MODULACIÓN	Factor Q [dB]
120	195.5	NRZ-OOK	23.96

Tabla 1.10 Factor Q vs Distancia máxima alcanzable para un enlace DWDM
[Por los autores]

1.2.2 Tasas de Errores de Bit – BER

La Tasa de Errores de Bit (*Bit Error Rate*) es considerado como uno de los parámetros más importantes para cuantificar los impedimentos producidos por la transmisión de una señal⁵ interactuando con un medio, donde dicha tasa de errores, se determina como una fracción de errores ocurridos durante un intervalo de tiempo dado; como se especifica en la ecuación 1.3.

$$BER = \frac{k(\Delta t)}{K(\Delta t)} \quad \text{Ecuación (1.3)}$$

Dónde:

$k(\Delta t)$ Representa los bit's errados en el intervalo de tiempo Δt

$K(\Delta t)$ Representa el total de bit's transmitidos en el intervalo Δt

Como se observa en la figura 1.8, existe una relación directa entre el factor de calidad y la tasa de errores de bit, donde se puede aproximar el comportamiento de la BER si se considera que las distribuciones de las señales correspondientes a los "1" y "0" lógicos, tienen una forma Gaussiana, relacionados por la ecuación (1.4) donde:

⁵ Las señales de Acceso para el contexto de investigación se encuentran basadas en la jerarquía digital síncrona – SDH para una capacidad máxima por canal de un STM-64.

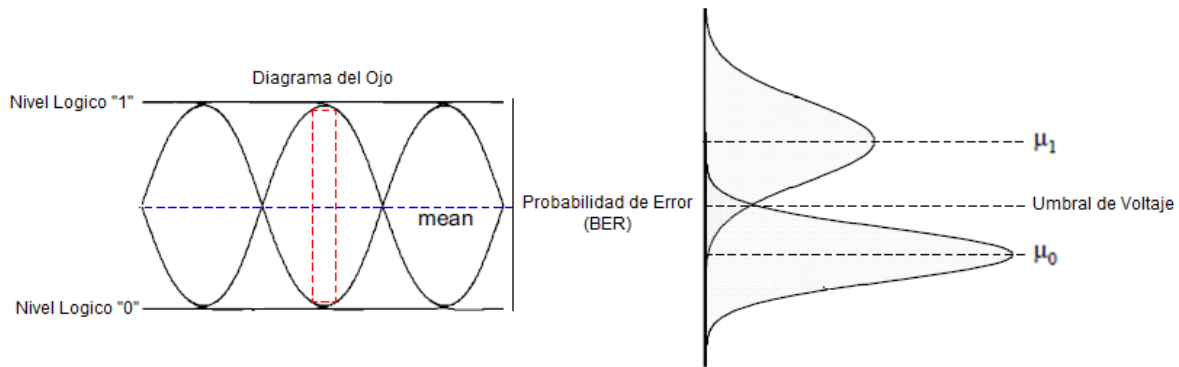


Figura 1.8 Relación Factor Q vs BER [27]

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu - \mu_0}{\sqrt{2} \sigma_0} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_1 - \mu}{\sqrt{2} \sigma_1} \right) \quad \text{Ecuación (1.4)}$$

Donde μ_1 y μ_0 son los niveles medios de tensión de los “1” y “0” lógicos, y σ_1 y σ_0 son las desviaciones típicas de la distribución de ruido, sin embargo, es posible aproximar la ecuación 1.4 a una BER óptima de tipo:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad \text{Ecuación (1.5)}$$

El estándar UIT-T define dentro de los parámetros objetivo una BER menor o igual a 10^{-12} , sin embargo, algunos resultados de investigaciones previas [23] han definido un comportamiento muy superior basado en sistemas DWDM NRZ-OOK a 2.5Gbps, donde los valores típicos para las máximas distancias de transmisión obtenidas para los diferentes formatos se resumen en la tabla 1.11.

Distancia [Km]	Canal [THz]	FORMATO DE MODULACIÓN	BER
140	195.5	NRZ-OOK	1.64e-25

**Tabla 1.11 BER vs Distancia máxima alcanzable para un enlace DWDM
[Por los autores]**

1.2.3 Relación Señal a Ruido Óptico – OSNR

La relación señal a ruido óptico (OSNR - *optical signal noise ratio*) es la medida de la relación de la potencia de la señal contra la potencia de ruido en un canal óptico normalizado en una ventana espectral de 0.1nm; OSNR es uno de los parámetros más importantes, el cual sugiere que tanto es degradada una señal óptica que es transportada dentro de un sistema debido a las múltiples atenuaciones con referencia a distintos parámetros como son: figura de ruido de los elementos de amplificación y compensación, ruido acumulado por cada trayecto de fibra, ruido introducido por los elementos generadores, emisiones de ruido espontáneamente amplificadas (ASE - *Amplified Spontaneous Emission*). La ecuación 1.6 describe la estandarización para la medida de la OSNR.

$$OSNR = 10\log \frac{P_i}{N_i} + 10\log \frac{B_m}{B_r} \quad \text{Ecuación (1.6)}$$

Dónde:

- P_i** Potencia de la señal óptica del i-ésimo canal.
- N_i** Valor promedio de la potencia de ruido acumulada
- B_m** Ancho de banda ocupado por el i-ésimo canal
- B_r** Ancho de banda óptico de referencia, típico a 0.1nm

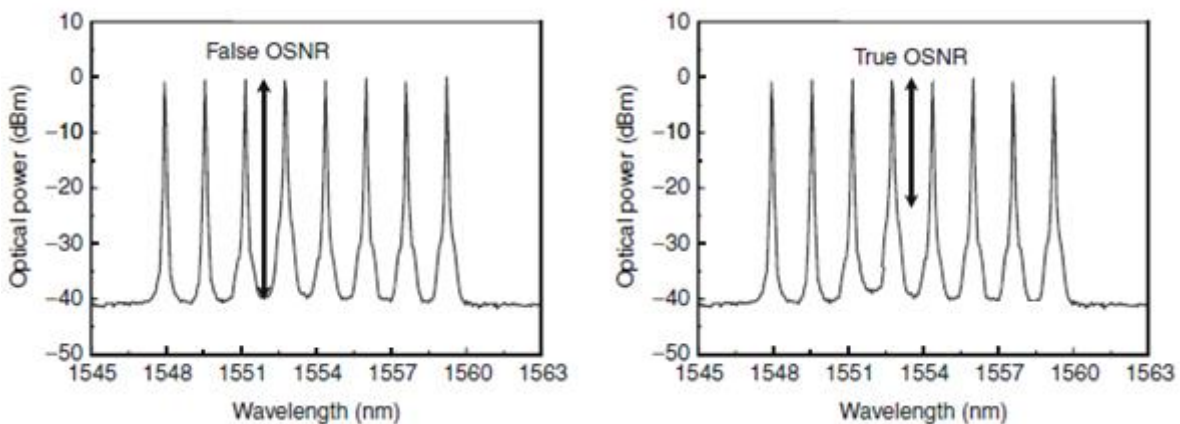


Figura 1.9 Medición de la OSNR para un sistema DWDM [28]

Como se muestra en la figura 1.9, para realizar una adecuada medición de la OSNR dentro de un canal DWDM, se deben tener en cuenta algunos factores claves los cuales permitirán minimizar el error en la cuantificación del parámetro, siendo la sensibilidad el receptor uno de los elementos más importantes a tener en cuenta [28 - 29]. Del mismo modo que para la Tasa de Errores de Bit, es posible relacionar matemáticamente el Factor de Calidad – Q, con la Relación Señal a Ruido Óptico – OSNR:

$$Q[dB] = OSNR + 10 \log \frac{Ba}{Bb} \quad \text{Ecuación (1.7)}$$

Dónde:

- Ba** Ancho de banda óptico en el dispositivo foto detector
- Bb** Ancho de banda eléctrico en el filtro receptor

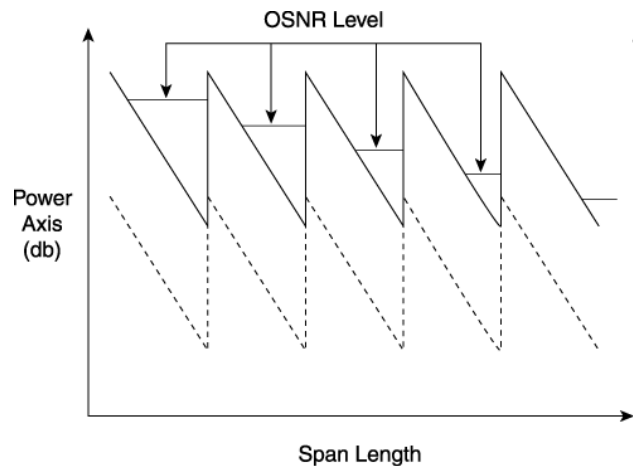


Figura 1.10 OSNR acumulado por trayecto de fibra [29]

Como se observa en la figura 1.10, la compensación de la OSNR es casi imposible para sistemas DWDM, dado que cada etapa de amplificación del trayecto de fibra involucra un incremento en los niveles de ruido con respecto a la potencia del canal, donde el objetivo de la transmisión se centra en mantener una relación BER específica al final de cada una de las etapas del enlace.

En investigaciones previas [23], se ha determinado que existe una fuerte relación de algunos elementos como son el esquema de modulación, la velocidad de transmisión, los dispositivos de amplificación que afectan considerablemente dicha relación.

Para el caso específico de un sistema DWDM implementado un solo dispositivo Dopado de Erblio (EDFA - *Erbium Doped Fiber Amplifier*), es posible determinar la relación OSNR como una media de la potencia promedio de la señal óptica vs la potencia promedio de ruido del elemento amplificador de línea, sin considerar el ruido adicionado por el trayecto de fibra [30]:

$$\text{OSNR} = \frac{P_{out}}{N_{ase}} = \frac{P_{out}}{(NF.G-1)fh\Delta f} \quad \text{Ecuación (1.8)}$$

Dónde:

- NF** Representa la figura de ruido del dispositivo EDFA
- G** Representa la ganancia del amplificador
- fh** Representa la energía del fotón
- Δf** Mediad del ancho de banda óptico

1.2.4 Penalidades del Diagrama del ojo

A pesar de que factores de medición como la OSNR, BER y Factor Q, son los elementos más monitoreados en las simulaciones de tipo analíticas, en algunos casos se requiere identificar que fenómenos se encuentran interactuando con la señal óptica produciendo distorsión y ruido pudiendo ser originados por la interferencia intersimbólica (ISI - *intersymbol interference*), la Dispersión Cromática (CD - *chromatic dispersion*) o la Dispersión por el modo de Polarización (PMD - *polarization mode dispersion*) entre otros, siendo el diagrama del ojo un elemento que permite el análisis de las formas de onda de los pulsos que se propagan en el canal de transmisión y del cual se pueden deducir dichos parámetros de medición [31 - 33].

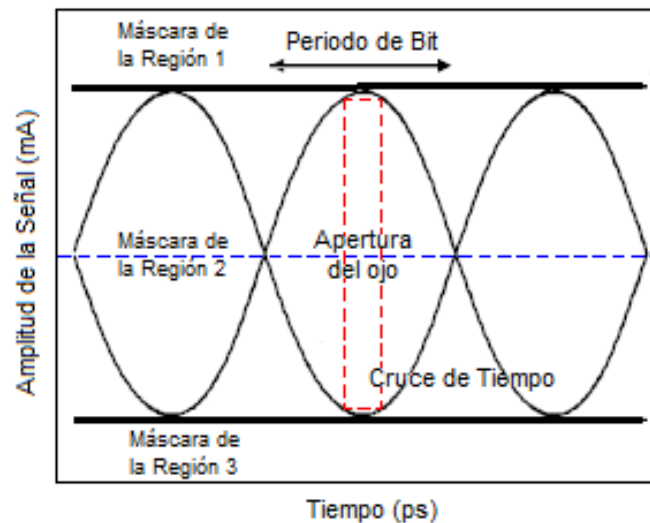


Figura 1.11 Componentes del Diagrama del Ojo [31]

La figura 1.11, describe las componentes fundamentales de un diagrama del ojo, donde la apertura definida por la máscara de la región 2, es determinada por la diferencia que existe entre los niveles de las marcas “1” (mascara de la región 1) y los espacios “0” (mascara de la región 3), siendo posible determinar las penalidades presentes en el sistema con respecto a un diagrama de referencia el cual usualmente es obtenido entorno a una configuración tipo Back to Back (EO_{ref}) en donde la longitud de onda de la señal no se encuentra distorsionada y una medición del diagrama del ojo de la señal recibida (EO_{rec}); dichas penalidades se pueden expresar matemáticamente como [31]:

$$EOP = 10 \log \left[\frac{EO_{ref}}{EO_{rec}} \right] \quad \text{Ecuación (1.9)}$$

En la figura 1.11 (a) y 1.11 (b), se puede apreciar los respectivos diagramas de ojo en configuración tipo back to back para el esquema de modulación NRZ-OOK a 2.5Gbps versus los efectos generados tras realizar una transmisión considerando los impedimentos ópticos a una distancia máxima de 140Km de trayecto de fibra [23].

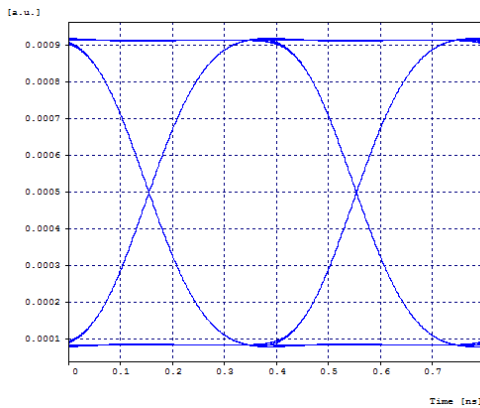


Figura 1.11 (a) Diagrama del Ojo en configuración Back to Back para el formato NRZ-OOK

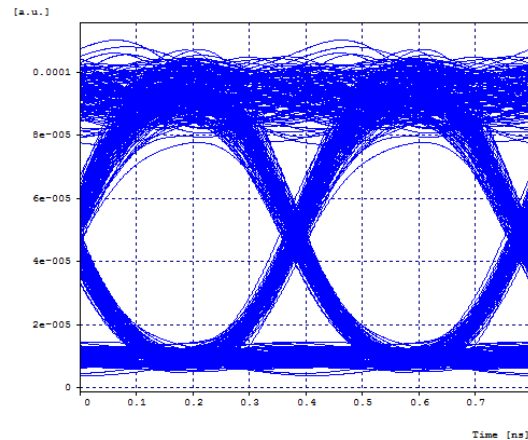


Figura 1.11 (b) Diagrama del Ojo tras 140 Km de fibra para el formato NRZ-OOK

1.3 DEGRADACIONES DE LAS TRANSMISIONES ÓPTICAS

Al transmitirse una señal óptica sobre la fibra, dicha señal sufre los efectos de degradaciones lineales y no lineales, las cuales pueden afectar considerablemente el desempeño del sistema. Estas degradaciones se han convertido en uno de los problemas fundamentales a mejorar, siendo uno de los principales inconvenientes en la migración a las redes de tipo NG-PON de alta eficiencia espectral y altas velocidades de transmisión de datos [23]. La figura 1.12 (a) y 1.12 (b), representa una clasificación de factores de tipo lineal y no lineal de los impedimentos de propagación que experimenta una longitud de onda sobre la fibra óptica, los cuales tienen una fuerte relación⁶ con la velocidad de transmisión de datos, el esquema de modulación y las características de configuración de la red, entre otros.

⁶ Dicha relación será definida y comprobada en los resultados obtenidos en los diferentes casos de estudio de los sistemas DWDM planteados para el presente proyecto de investigación.

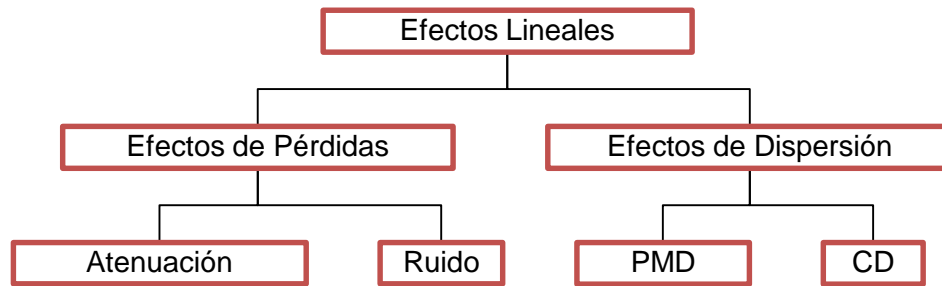


Figura 1.12 (a) Fenómenos Lineales [34-36]

A continuación se detallarán las principales características teóricas de los fenómenos lineales y no lineales y algunas pruebas iniciales del impacto de dichos fenómenos en el diseño de sistemas DWDM a bajas velocidades de transmisión de datos que afectan considerablemente la propagación de la onda a través del medio, no permitiendo en algunos casos, la migración de forma escalable a redes de nueva generación con mayores velocidades y alta eficiencia espectral sin sacrificar los recursos físicos de la red.

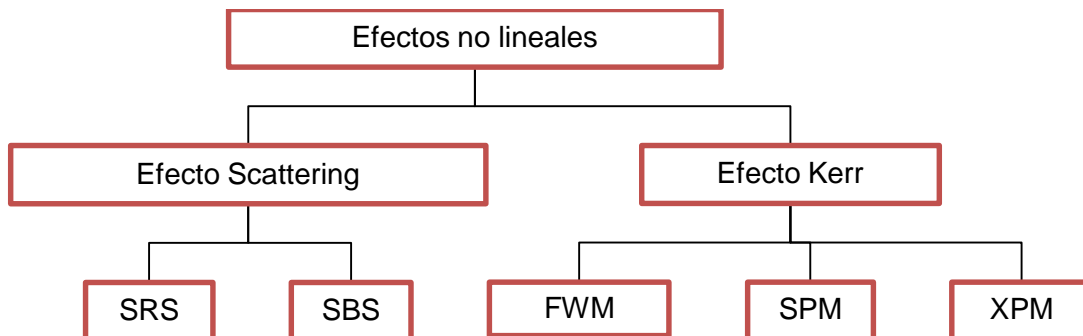


Figura 1.12 (b) Fenómenos no Lineales [34-36]

1.3.1 Atenuación de la Fibra

Uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta, depende de un factor característico del medio físico, el cual, dependiendo de los métodos de

fabricación ofrece diferentes valores de atenuación, donde dicho parámetro, está relacionado directamente con una disminución exponencial en la potencia de la señal transmitida con respecto a la distancia de transmisión; como se expresa en la ecuación 1.10. Normalmente los fabricantes definen el coeficiente de atenuación de la fibra en una relación de alpha Decibeles por kilómetro de propagación (α [dB/Km]) [23].

$$P(z) = P_0 * e^{-\alpha(z)} \quad \text{Ecuación (1.10)}$$

Dónde:

- P(z)** Potencia de la señal recibida a una distancia Z
- P₀** Potencia del canal óptico en la entrada de la fibra
- α** Constante de atenuación

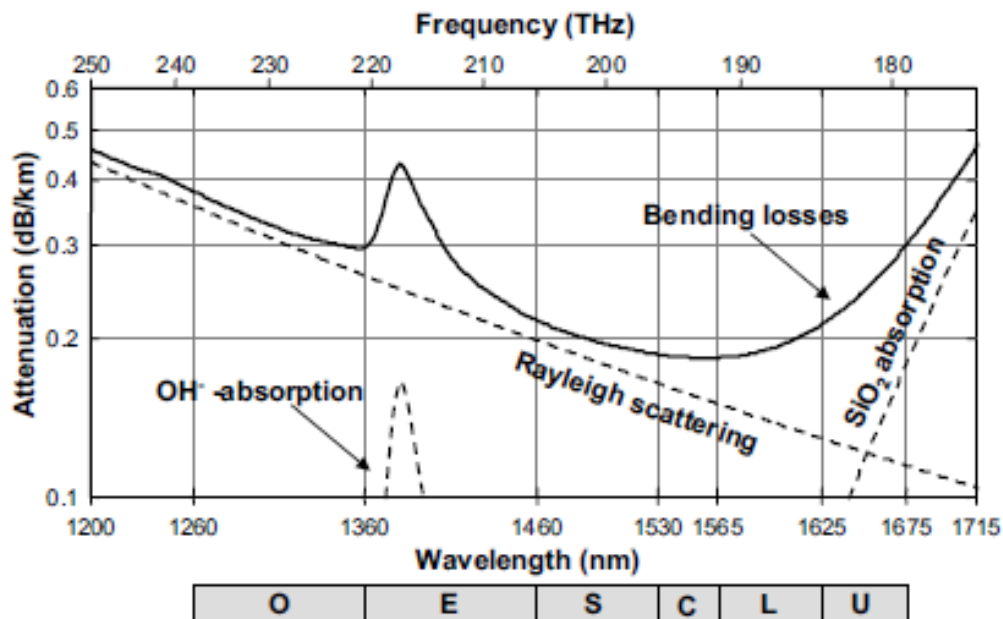


Figura 1.13 Atenuación material de la Fibra óptica [23]

Existe una relación entre el parámetro de atenuación, la calidad de los materiales ópticos implementados para la fabricación de la fibra y la ventana de trabajo seleccionada, donde fenómenos como: el pico de absorción de agua, la

dispersión de rayleigh y la absorción de silicio, afectan considerablemente el parámetro de atenuación; de modo que, como se aprecia en la figura 1.13, para el rango de los 810nm de longitud de onda (primera ventana típica de operación) se presentan altos niveles de atenuación entre los 0.5dB/Km y 0.7dB/Km, mientras que para las ventanas alrededor de los 1310nm y los 1550nm se encuentra un rango típico de atenuación entre los 0.15dB/Km a los 0.3dB/Km, mejorando considerablemente las distancia de transmisión con los mismos requerimientos de potencia.

1.3.2 Pérdidas por Manipulación

Dentro del diseño de un sistema DWDM se deben tener en consideración las pérdidas producidas por la manipulación del medio que se originan debido a empalmes o juntas de diferentes trayectos de fibra (spam) y a la curvatura producida por la topología de la red dentro de espacios interiores. La ecuación 1.11 representa las pérdidas por curvatura en términos de la longitud de onda (λ), pérdidas características del núcleo de la fibra (L_m) y el radio de curvatura (r_0), donde al exceder el Angulo crítico, se produce un exceso en la velocidad de fase del frente de onda generando fenómenos radiantes.

$$L_B = 2.15 \times 10^{-4} r_0^6 \lambda^{-4} L_m \left[\frac{dB}{Km} \right] \quad \text{Ecuación (1.11)}$$

Del mismo modo, se presentan dentro del diseño de las redes de fibra óptica, pérdidas debido al empalme de diferentes trayectos (L_s), los cuales combinados con las pérdidas intrínsecas del material ocasionan una disminución importante en la calidad de la señal y en la distancia máxima alcanzable por el enlace, como se representa en la ecuación 1.12; sin embargo para los requerimientos de esta tesis, dichas pérdidas no serán tenidas en cuenta.

$$L_s = \frac{10}{\ln 10} \left(\frac{d}{r_0} \right)^2 dB \quad \text{Ecuación (1.12)}$$

1.3.3 Dispersión Cromática - CD

Para un sistema DWDM, el fenómeno de dispersión cromática se considera como un ensanchamiento del pulso transmitido debido a la interacción de la longitud de onda propagada con el índice de refracción de la fibra, el cual produce en el sistema interferencia intersimbólica (*intersymbol interference*); de manera general, los límites de dispersión soportables por el enlace definen la máxima distancia de transmisión sin necesidad de regeneración o compensación.

$$V_p(\omega) = \frac{c}{n+n(\omega)} \quad \text{Ecuación (1.13)}$$

La ecuación 1.13, define la velocidad de fase de cualquier componente de frecuencia de la longitud que viaja a través de la fibra en términos de la velocidad de propagación de la luz en el vacío, el índice de refracción material y la frecuencia angular. Dado que el índice de refracción de la fibra es superior a 1, la velocidad de propagación de la luz en el medio es inferior a la velocidad de la propagación de la luz en el vacío [37, 38]. La dispersión cromática dentro de un sistema DWDM puede considerarse de tipo determinística, lineal, no afectada por el entorno y con la posibilidad de ser compensada debido a que es predecible y controlable.

$$D = \frac{\partial \beta_1}{\partial \lambda} = \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{1}{v_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda_0^2} \beta_2 = \frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n}{\partial \lambda^2} \quad \text{Ecuación (1.13a)}$$

La dispersión cromática D de la ecuación 1.13a, describe cómo se amplía el pulso debido a la variación del retardo de Dispersion grupal respecto a la longitud de onda, el parámetro D se dimensiona en ps/(nm*km), y representa el retraso en pico segundos para una fuente con una anchura espectral de 1nm que viaja a 1 kilómetro de distancia de la fibra. La constante de propagación β de la ecuación 1.13a de la función NLSE (*nonlinear schrodinger equation*) describe matemáticamente la propagación de un pulso en el dominio de la frecuencia, siendo

esta, una aproximación que no considera las pérdidas de la fibra y las no-linealidades.

$$E(z, \omega) = E(0, \omega)e^{-j\beta(\omega)z} \quad \text{Ecuación (1.13b)}$$

Con respecto al campo eléctrico, $E(0, \omega)$ hace referencia al valor del campo eléctrico del pulso a la entrada de la fibra y el término $e^{-j\beta(\omega)z}$ representa la constante de fase dependiente de la constante de propagación β con respecto a la frecuencia; la constante de propagación β se define términos lineales como:

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} \quad \text{Ecuación (1.13c)}$$

Donde c representa la velocidad de la luz en el vacío, $n(\omega)$ es el índice de refracción que es función de la frecuencia portadora ω_0 , dando lugar a la dispersión cromática. Una representación aproximada de la constante de propagación β puede ser desarrollada analíticamente utilizando las series de Taylor, basándose en el hecho de que la constante de propagación varía lentamente a medida que se aleja de la frecuencia de la portadora ω_0 de modo que:

$$\beta(\omega) = \frac{1}{m!} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\partial^m \beta}{\partial \omega^m} (\omega - \omega_0)^m \quad \text{Ecuación (1.13d)}$$

Desarrollando la ecuación 1.13c se obtiene la aproximación de la constante de propagación.

$$\beta(\omega) = \beta(\omega_0) + \frac{\partial \beta}{\partial \omega} (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} (\omega - \omega_0) + \dots \quad \text{Ecuación (1.13e)}$$

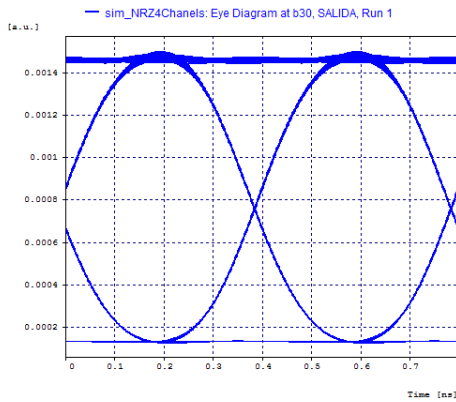


Figura 1.14 (a) diagrama del Ojo a 120Km de fibra sin Efecto de la CD en el Sistema

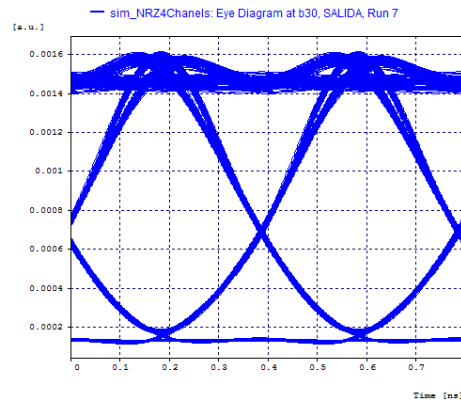


Figura 1.14 (b) diagrama del Ojo a 120Km de fibra con una CD total acumulada de 9240 ps/nm*Km

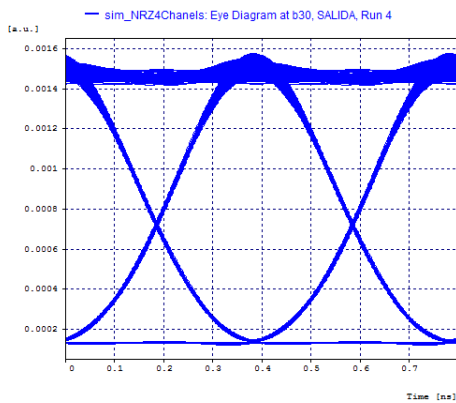


Figura 1.14 (c) diagrama del Ojo a 120Km de fibra con una CD total acumulada de 5640 ps/nm*Km

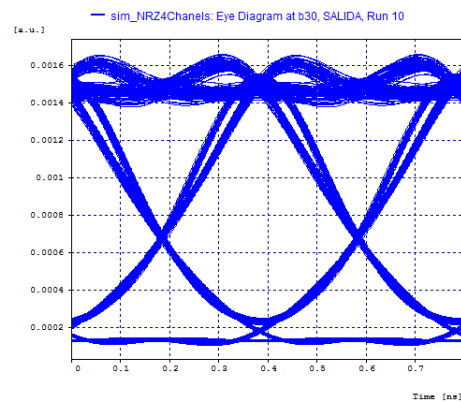


Figura 1.14 (d) diagrama del Ojo a 120Km de fibra con una CD total acumulada de 12840 ps/nm*Km

Las figuras 1.14 (a) a 1.14 (d), demuestran el efecto de la dispersión cromática en un sistema DWDM de 120Km de distancia y 2.5Gbps de acceso implementando el esquema de modulación NRZ-OOK, donde de la ecuación 1.14, se puede definir una $CD_{MAX} = 12840_{ps/(nm*Km)}$ sin involucrar otros fenómenos lineales, pérdidas y ruido; CD_{MAX} hace referencia a la dispersión intrínseca material, y D_{SPAN} a la distancia de cada trayecto de fibra.

$$CD_{MAX} = CD_{MAT} * D_{SPAN} \quad \text{Ecuación (1.14)}$$

Una vez alcanzado el límite máximo de tolerancia a la dispersión cromática acumulada en el sistema, esta debe ser compensada, dado que afecta considerablemente el desempeño, sin embargo, como se observa en la figuras 1.15 (a) y 1.15 (b), la red DWDM en presencia de todos los impedimentos de propagación interactuando con la variación de la CD, genera un comportamiento diferente y es imposible que alcance el límite establecido requiriendo compensar la dispersión mucho antes que el límite máximo establecido en el sistema, los resultados preliminares se consignan en la tabla 1.12.

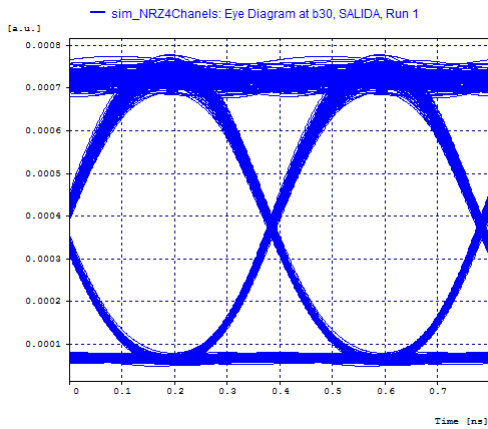


Figura 1.15 (a) Diagrama del ojo a 120Km de fibra en presencia de todas las linealidades con una CD total Acumulada de 2040 ps/nm*Km

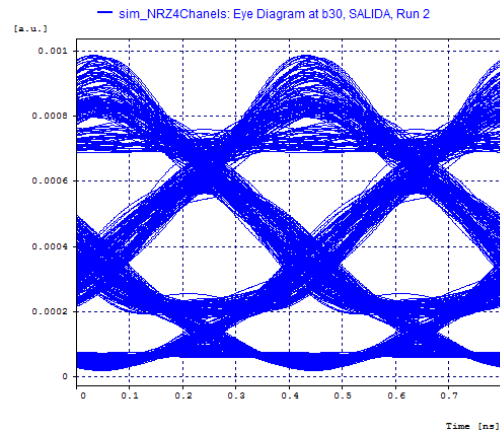


Figura 1.15 (b) Diagrama del ojo a 120Km de fibra en presencia de todas las linealidades con una CD total Acumulada de 12840 ps/nm*Km

Los diferentes modos de propagación generados por el impacto de la dispersión material en la señal modulada pueden ser descritos en términos de la frecuencia angular y las derivadas de primer orden, segundo orden conocida comúnmente como una dispersión D o de velocidad grupal (GVD – *group velocity dispersion*) en ps^2/Km y de tercer orden conocida comúnmente como una dispersión S o de velocidad grupal remanente (GVD - *Slope*) en ps^3/Km de la constante del modo de propagación β , de modo que [30]:

$$\beta(\omega) = [n + n(\omega)] \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1 (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2 (\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6} \beta_3 (\omega - \omega_0)^3 + \dots + \frac{1}{n!} \beta_n (\omega - \omega_0)^n \quad \text{Ecuación (1.15)}$$

Dónde:

- β_0 Constante de fase de la frecuencia central
- β_1 Velocidad a la cual se propagan los pulsos
- β_2 Aceleración de las componentes espectrales
- β_3 Dispersión de velocidad grupal remanente

Distancia [Km]	Canal [THz]	FORMATO DE MODULACIÓN	BER	Factor Q [dB]	CD Total Acumulada [ps/nm*Km]
120	195.5	NRZ-OOK	1e-40	29.25	2040
120	195.5	NRZ-OOK	2.95e-8	14.83	12840

Tabla 1.12 Efecto de la CD en un sistema DWDM a 2.5Gbps y Modulación NRZ-OOK [Fuente Propia]

De manera particular, se pudo concluir que las componentes de segundo y tercer orden de la dispersión cromática, no afectan considerablemente el desempeño de sistemas trabajando a bajas velocidades de transmisión de datos del orden 2.5Gbps para esquemas de modulación simples (NRZ-OOK).

1.3.4 Dispersión por Modo de Polarización - PMD

Como se aprecia en la figura 1.16, la dispersión por modo de polarización (PMD - *Polarization Mode Dispersion*) sobre una fibra óptica, se produce debido a las imperfecciones del medio, los cuales generan retardos diferentes en la propagación de los espectros polarizados ortogonalmente (DGD - *Differential Group*

Delay) debido a las múltiples birrefringencias generadas en el núcleo de la fibra, este parámetro está relacionado con β_1 de modo [30-34]:



Figura 1.16 Efecto PMD sobre un enlace de Fibra [32]

$$DGD = \Delta t = \Delta\beta_1 * L \quad \text{Ecuación (1.16)}$$

Dónde:

- Δt Retardo de la dispersión grupal a una distancia L
- β_1 Velocidad a la cual se propagan los pulsos.

Debido a la naturaleza aleatoria de las birrefringencias la cual varía a lo largo de la fibra, siendo resultado de imperfecciones en los procesos de fabricación o influencias externas como factores de curvatura en el diseño y manipulación del segmento de red, define un comportamiento DGD con una distribución estadística la cual se conoce como PMD; siendo el retardo promedio de la dispersión grupal:

$$PMD = \langle \Delta t \rangle \quad \text{Ecuación (1.17)}$$

El coeficiente de la PMD se encuentra definido por los fabricantes de fibra óptica en términos de la DGD promedio, con respecto a la raíz cuadrada de la longitud del segmento de red, dando como resultado una PMD dimensionada en $[\text{ps}/\sqrt{\text{Km}}]$, donde este parámetro puede tomar valores entre $[1 \text{ a } 0.05] \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$, dependiendo

de la calidad de la fabricación del medio; por lo general, para el estándar UIT-T G652, se define un coeficiente máximo típico de $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$.

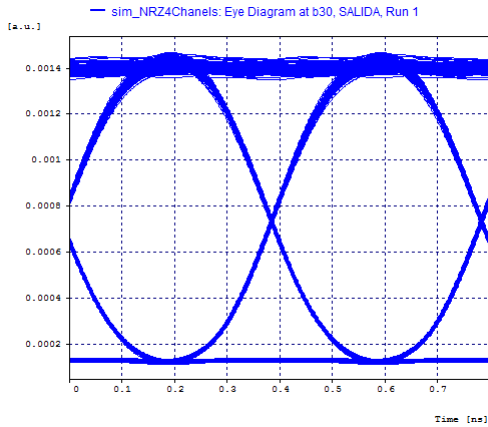


Figura 1.17 (a) Efecto de la PMD = $0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$ en un enlace de 120 KM a 2.5Gbps

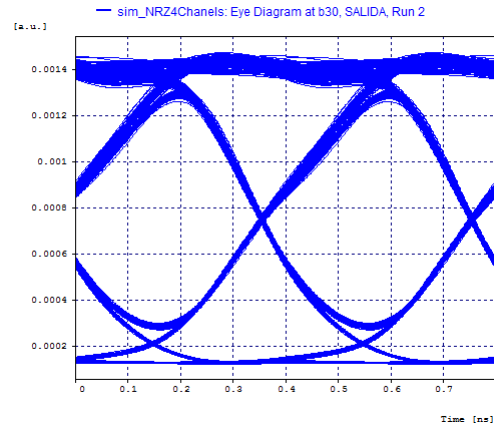


Figura 1.17 (b) Efecto de la PMD = $20 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$ en un enlace de 120 KM a 2.5Gbps

Distancia [Km]	Canal [THz]	FORMATO DE MODULACIÓN	BER	Factor Q [dB]	PMD [$\text{ps}/\sqrt{\text{Km}}$]
120	195.5	NRZ-OOK	1e-40	35.36	0.2
120	195.5	NRZ-OOK	6.79e-24	20.20	20

Tabla 1.13 Efecto de la PMD en un sistema DWDM a 2.5Gbps [Fuente Propia]

Como se aprecia en las figuras 1.17 (a) y 1.17 (b), para un enlace de 120 Km trabajando a 2.5Gbps implementado el formato de modulación NRZ-OOK, se puede identificar que solo para altos valores de PMD (no posibles dentro de los esquemas de fabricación moderno) se logra detectar impedimentos en la transmisión, produciendo degradaciones ópticas, sin embargo dicho fenómeno se podría acentuar a altas velocidades de transmisión de datos debido a la relación intrínseca con el parámetro β_1 , los resultados preliminares se especifican en la tabla 1.13.

1.3.5 Modulación de Auto Fase – SPM

En un sistema de comunicaciones ópticos, debido a la no linealidad del índice de refracción del medio, se genera una conmutación de fase inducida por una dependencia con respecto a la intensidad de los pulsos propagados; por lo tanto, diferentes componentes del pulso, se someten a diferentes cambio de fase, dando lugar a un fenómeno conocido como Chirp, como se aprecia en la figura 1.18 [23].

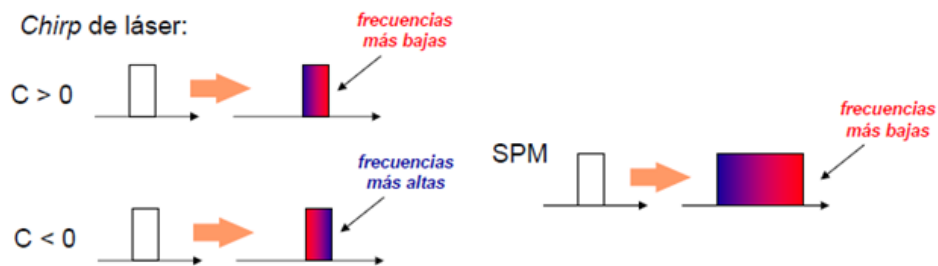


Figura 1.18 Efecto de la SPM sobre un pulso que se propaga [23].

En general, se define como “Chirp” a una variación de la frecuencia y amplitud de la señal emitida por el láser, produciendo un ensanchamiento indeseado del espectro, el cual dependiendo del tipo específico de láser y esquema de modulación utilizado puede afectar considerablemente el desempeño del sistema; para configuraciones DWDM implementando moduladores externos (e.j. *Mach Zehnder*), es posible manipular los efectos del Chirp debido a su relación con la dispersión cromática permitiéndose compensar mutuamente [37-38].

Del mismo modo, bajo un régimen de dispersión normal o de remanente negativa, el DGD de la fibra es menor para longitudes de onda más altas y mayor para longitudes de onda más bajas, por lo que el flanco de subida tenderá a ir más rápido y el de bajada más despacio; y bajo un régimen de dispersión anómalo o positivo, el DGD es mayor para longitudes de onda más altas y menor para longitudes de onda más bajas, por lo que el flanco de subida tenderá a ir más lento y el de bajada más rápido[38].

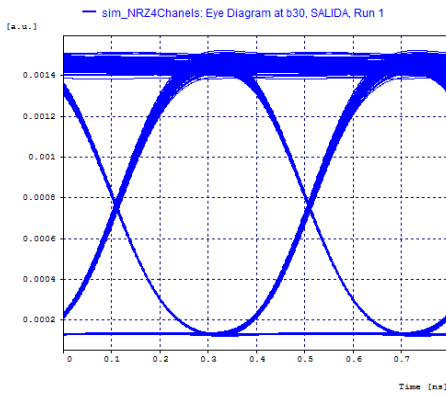


Figura 1.19 (a) SPM y CD para regimen normal

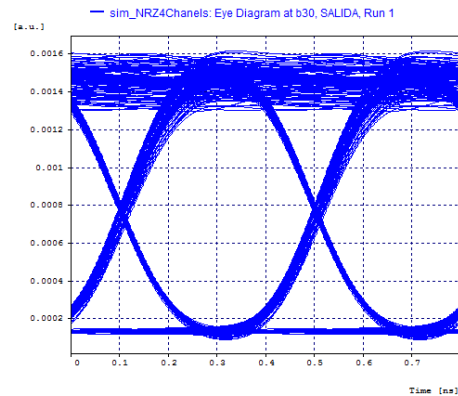


Figura 1.19 (b) SPM y CD para regimen normal

Para determinar el comportamiento de la SPM dentro de un sistema DWDM con respecto al nivel de acceso de la red, el esquema de modulación y el desempeño del sistema, tres parámetros deben ser tenidos en cuenta; i) la anchura espectral del láser o FWHM (*Full Width at Half Maximum*), ii) el régimen de dispersión del sistema, y iii) la potencia del canal óptico [23]. Como se aprecia en las figuras 1.19 (a) a 1.19 (d), es posible comprobar la relación anteriormente propuesta sobre un sistema básico trabajando a 2.5Gbps y modulación NRZ-OOK, el cual es un elemento de comparación para los desarrollos propuestos más adelante.

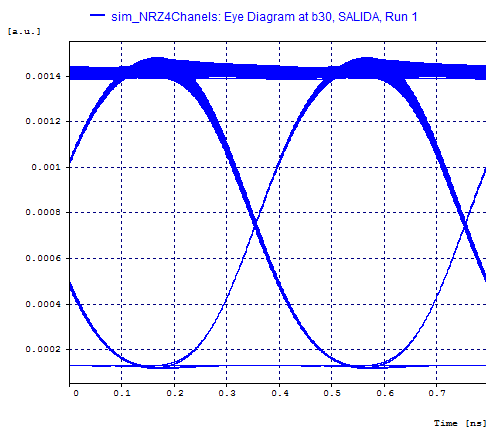


Figura 1.19 (c) SPM y CD para regimen anomalo

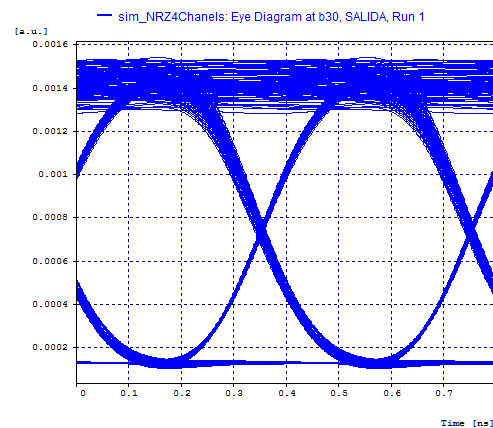


Figura 1.19 (d) SPM y CD regimen anomalo

Acorde a los resultados esperados para un sistema DWDM a bajas velocidades de transmisiones de datos, como se puede apreciar en la Tabla 1.14, no se presenta un cambio significativo en el desempeño relacionado al régimen de dispersión o al FWHM del láser, el efecto degradante se puede asociar directamente con el incremento de la potencia del canal óptico, sin embargo este comportamiento debe ser comprobado para accesos de red del orden de los 10Gbps y 40Gbps.

Régimen de Dispersión	P _{tx} [dBm]	FWHM del láser [Mhz]	BER	Factor Q [dB]	Figura
normal	0	1	1e ⁻⁴⁰	34.38	1.21(a)
normal	9	10	1e ⁻⁴⁰	26.39	1.21(b)
Anómalo	0	1	1e ⁻⁴⁰	37.38	1.21(c)
Anómalo	9	10	1e ⁻⁴⁰	25.64	1.21(d)

**Tabla 1.14 Relación SPM, Dispersión Cromática y Potencia óptica
[Fuente propia]**

1.3.6 Modulación de Fase cruzada – XPM

De manera general, la modulación de fase cruzada se genera debido a la interacción del índice de refracción del medio en función de la intensidad de la señal óptica, pudiendo producir un cambio de fase no lineal de los canales ópticos adyacentes en diferentes regiones espectrales a través del efecto Kerr, convirtiendo las fluctuaciones de potencia de un canal óptico particular en fluctuaciones de fase de otro canal óptico co-propagante; la única distinción entre los fenómenos SPM y XPM es que los pulsos propagados poseen un espectro claramente separado, como es el caso para los sistemas DWDM típico de 25Ghz a 100Ghz de espaciamiento por espectro óptico. El efecto de la XPM se puede determinar mediante un ensanchamiento asimétrico del espectro y una distorsión de la forma del pulso [30 - 34].

$$E(r, t) = E_1 \cos(\omega_1 t - \beta_1 z) + E_2 \cos(\omega_2 t - \beta_2 z) \quad \text{Ecuación (1.18)}$$

La ecuación 1.18, representa un sistema óptico propagando dos canales, donde la conmutación de fase de un canal particular no depende únicamente de su nivel de potencia, este análisis fue obtenido para la SPM para esquemas de modulación simple a bajas velocidades de transmisión de datos [23], sino también de la potencia de los canales adyacentes; pudiendo determinar la conmutación de fase no lineal del i -ésimo canal en términos de la ecuación 1.19.

$$\phi_{NL}^i = \gamma L_{eff} (P_{in}^i + 2 \sum_{j \neq i}^M P_j) \quad \text{Ecuación (1.19)}$$

Dónde:

- γ Parámetro no lineal del medio en términos del área efectiva
- L_{eff} Longitud efectiva de la guía de onda
- P_{in}^i Potencia máxima de entrada suministrada al canal
- P_j Potencia suministrada a los canales adyacentes

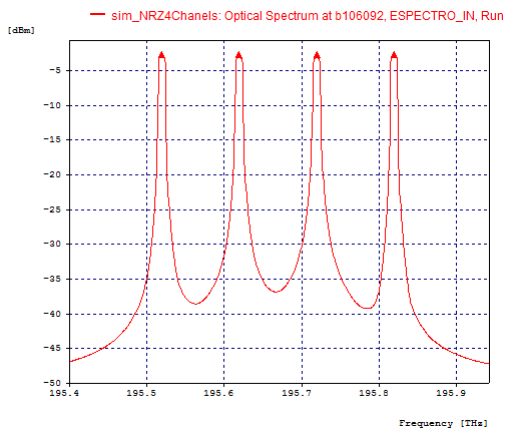


Figura 1.20 (a) espectro de entrada sin diferenciación en la potencia

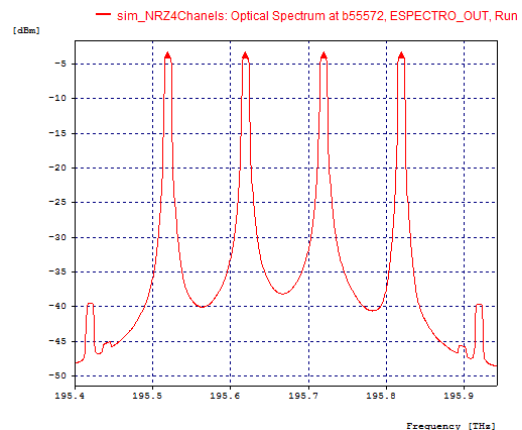


Figura 1.20 (b) espectro de salida con diferenciación en la potencia

Se puede verificar el fenómeno XPM para un sistema DWDM a 2.5Gbps, asignando a 2 de los 4 canales transmitidos espaciados 100GHz una potencia menor de transmisión variando la dispersión cromática de la fibra. Lo anterior, se

realiza con el fin de verificar si la potencia de un canal afecta a la fase de otro, provocando efectos de ensanchamiento de los pulsos.

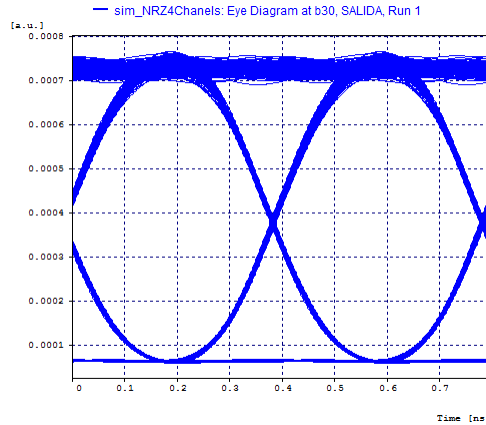


Figura 1.20 (c) desempeño del sistema sin diferenciación en la potencia de los canales

Como se puede apreciar en las figuras 1.20 (a) a 1.20 (c), el efecto de la XPM aun en presencia de la PMD y la CD no genera degradaciones significativas en el desempeño del sistema, debido a que todos los canales manejan la misma potencia optica de entrada y un gran espaciamiento por espectro optico.

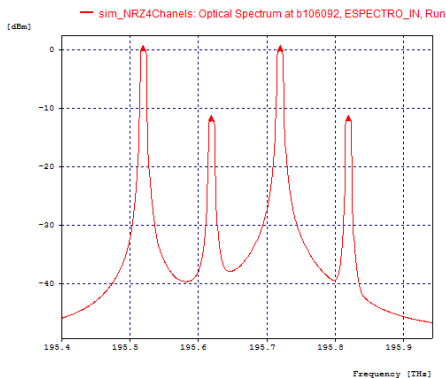


Figura 1.21 (a) espectro de entrada con diferenciación en la potencia

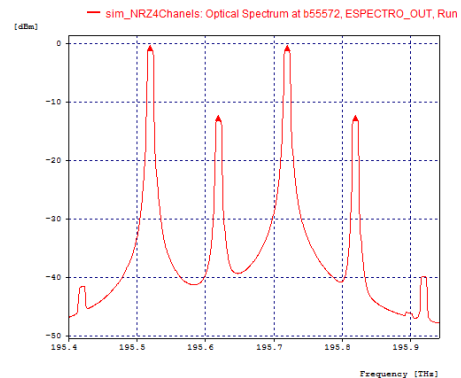


Figura 1.21 (b) espectro de salida con diferenciación en la potencia

Del mismo modo como se aprecia en las figuras 1.21 (a) a 1.21 (c), para el caso de diferentes potencias en los canales opticos a la entrada de la fibra, no se

presentan degradaciones ópticas significativas, la razón puede estar sujeta al espaciado de los canales DWDM.

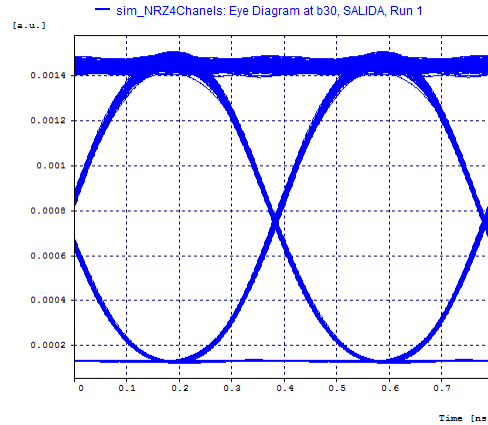


Figura 1.21 (c) desempeño del sistema con diferenciación en la potencia

1.3.7 Mezcla de Cuatro Ondas – FWM

Mezcla de cuatro ondas, es un proceso no lineal el cual involucra la interacción de la mezcla de tres longitudes de onda y la generación de una cuarta onda la cual podría coincidir con el espectro de uno de los canales transmitidos; dicho fenómeno se presenta dentro del sistema DWDM cuando la GVD entre los canales es idéntica generando una coincidencia de fase para una condición de máxima transferencia de potencia, donde algunos fotones son aniquilados y nuevos fotones son creados a diferentes frecuencias manteniendo su momento y su energía. Este parámetro se relaciona directamente con la CD mediante un régimen de dispersión cero [30 - 34].

A diferencia de los fenómenos SPM y XPM que dependen de manera directa con la velocidad de transmisión de datos, FWM es independiente de la tasa de bits, pero posee una fuerte relación con el espaciado de los canales DWDM y la presencia de la dispersión cromática neta acumulada en el sistema, de modo que a bajos espaciados y baja CD se incrementa el efecto de la FWM.

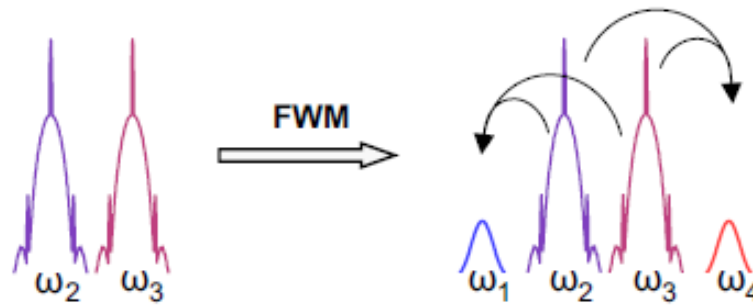


Figura 1.22 Principio de la Mezcla de cuatro ondas [34]

Como se puede apreciar en la figura 1.22, cuando dos canales DWDM a frecuencias ω_2 y ω_3 son co-propagados a través del medio, es posible que debido al efecto de la FWM se generen nuevos canales en $\omega_1 = 2\omega_2 - \omega_3$ y $\omega_4 = 2\omega_3 - \omega_2$, donde dependiendo de la intensidad de estas nuevas ondas “fantasma” se pueden generar altas degradaciones en el dominio óptico; más aún cuando la grilla del sistema es de tipo simétrico la cual mantiene el mismo espaciamiento entre todos los canales ópticos.

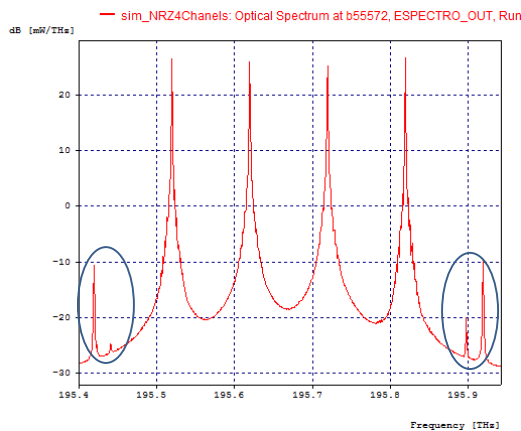


Figura 1.23 (a) efecto de la XPM para un regimen de dispersion 0

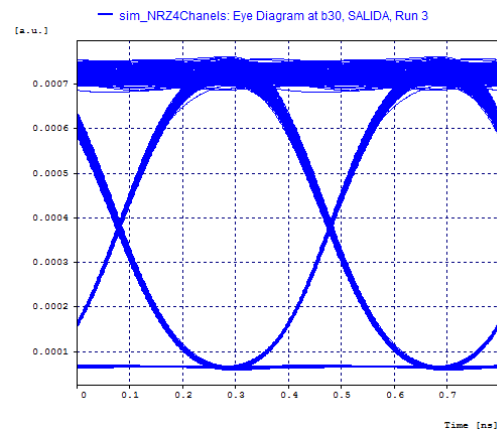


Figura 1.23 (b) desempeño del sistema para el efecto de la FWM

Mediante las figuras 1.23 (a) y 1.23 (b), elaborado por los autores, se puede comprobar el efecto de la FWM en un sistema de DWDM a 2.5Gbps, donde a partir

de cuatro canales propagantes para un régimen de dispersión cero y espaciamientos por canal de 100Ghz, se producen dos ondas fantasma a una potencia suficiente como para ser detectadas por el receptor, produciendo señales de información no deseadas.

1.4 INCIDENCIA DE LOS FENÓMENOS DE DEGRADACIÓN LINEALES Y NO LINEALES CON RESPECTO AL NIVEL DE ACCESO Y TRANSPORTE DE LA RED

Debido a las características intrínsecas de propagación de la forma de onda en el medio, al propagarse una señal de luz a través del núcleo de la fibra, esta sufrirá efectos degradantes de tipo lineal y no lineal los cuales generaran un decremento en el desempeño del sistema; sin embargo dependiendo de las características de configuración de la red a nivel de acceso y a nivel de transporte, se verán algunos de estos fenómenos más potenciados que otros. La propagación de un campo Eléctrico de tipo Escalar $E(z,t)$, asociado a un haz de luz óptico continuo, se puede modelar a partir de las ecuaciones de Maxwell de la forma:

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0 c^2} \frac{\partial^2 P(r,t)}{\partial t^2} \quad \text{Ecuación (1.20)}$$

Donde:

- c** Representa la Velocidad de la luz en el vacío
- ϵ_0** Representa la Permisividad en el vacío
- P** Representa la polarización inducida

La Ecuación $P(r, t)$ puede definirse en términos de:

$$P(r, t) = P_l(r, t) + P_{nl}(r, t) \quad \text{Ecuación (1.21)}$$

Donde:

- $P_l(r, t)$** Modela los efectos de tipo lineal
- $P_{nl}(r, t)$** Modela los efectos de tipo no lineal

De manera general, y basado en las ecuaciones de Maxwell, la ecuación Generalizada No Lineal de Schrödinger (GNLSE), es utilizada para describir los fenómenos de la propagación de la señal a través de un núcleo de fibra a una distancia x de la red para modos de transmisión simple [34-36].

$$\frac{\partial E}{\partial z} + \frac{\alpha(z)}{2} E + \frac{i}{2} \beta_2(z) \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3(z) \frac{\partial^3 E}{\partial t^3} = i\gamma |E|^2 E \quad \text{Ecuación (1.22)}$$

La ecuación 1.22, representa la ecuación de propagación de un campo óptico $E(z,t)$ que para este caso define la presencia de múltiples campos de diferentes canales DWDM así como de las emisiones espontáneamente amplificadas (ASE), en presencia de no linealidades instantáneas basadas en el fenómeno de Kerr el cual hace referencia a la dependencia de la intensidad de la señal con el índice de refracción del medio para procesos de tipo elástico en el cual no se genera transferencia de energía donde:

- $|E|^2$ *Representa la potencia del canal óptico.*
- γ *Representa el coeficiente de no-linealidades de Kerr.*
- $\alpha(z)$ *Representa la constante de atenuación.*
- β *Constante del modo de propagación en la frecuencia central.*

La ecuación no lineal de Schrödinger (NLSE) 1.22a se puede expresar en términos de la presencia de fenómenos lineales y no lineales como:

$$\frac{\partial E}{\partial z} = - \underbrace{\frac{\alpha}{2} E}_{\text{Atenuación}} - j \underbrace{\frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial T^2}}_{\text{Dispersión}} + \underbrace{\frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 E}{\partial T^3}}_{\text{Pendiente de dispersión}} + \underbrace{j \gamma |E|^2 E}_{\text{No linealidades de Kerr}}$$

Ecuación (1.22a)

Donde E representa la envolvente compleja del campo eléctrico óptico, z la distancia de propagación, T es el parámetro del tiempo en función de la velocidad

de grupo $\left(T = t - \beta_1 z = t - \frac{z}{v_g}\right)$, α es la constante de atenuación en la fibra que disminuye la potencia de la señal, β_2 es la dispersión de la velocidad grupal (GVD, *Group Velocity Dispersion*) causante de la dispersión cromática, β_3 conocido como “GVD Slope” representa la pendiente de dispersión y γ hace referencia a las no-linealidades de Kerr que caracterizan los fenómenos de tipo no lineal en los sistemas de la fibra.

Para los sistemas DWDM, los cuales consideran degradaciones de tipo no lineal a cualquier velocidad de transmisión de datos, se pueden definir prominentemente tres regímenes de transmisión, los cuales se basan en la propagación de ondas solitaria a través de medios no lineales denominados “Solitones”; siendo demostrados por primera vez en 1965 por los físicos Norman Zabusky y Martin Kruskal, quienes dieron nombre al fenómeno.

El término Soliton, el cual dentro de los sistemas de comunicaciones ópticos se puede definir como “una onda solitaria que no sufre una deformación visible durante su evolución en un medio no lineal” [39-42], puede clasificarse en dos tipos: i) Solitones temporales, donde los fenómenos no lineales logran contrarrestar la Dispersión cromática, produciendo una invariancia del perfil del tiempo, y ii) Solitones espaciales, los cuales son creados al balancear adecuadamente los fenómenos de auto-enfocamiento óptico del haz de luz (se refiere a modificar el índice de refracción, como resultado de una mayor intensidad del láser) oponiéndose a experimentar divergencia debido al fenómeno de difracción.

De manera General, los regímenes de transmisión sobre un sistema de fibra se definen predominantemente en términos de: i) “*dispersion managed solitons*”, los cuales son los más implementados a nivel de estudio en comunicaciones ópticas mediante la compensación de la Dispersión requiriendo un balance promedio de los efectos dispersivos y los efectos no lineales en la propagación que generalmente se adecua a tasas de transmisión por canal alrededor de los 10Gbps, ii) “*quasi-linear transmission*”, donde una etapa de modulación de fase periódica es adicionada a

un esquema de modulación simple (RZ-OOK) permitiendo un decremento en los efectos que producen la línea de transmisión en los Solitones, generando mejoras en el desempeño del sistema y iii) “*pseudolinear transmission*”, donde para este régimen, la forma de onda de la señal evoluciona muy rápido a través de la interacción con la línea de transmisión, permitiendo promediar el comportamiento de las no linealidades intra he inter canal generando transmisiones de señales de alta velocidad de manera eficiente de 10Gbps y superiores [40-42].

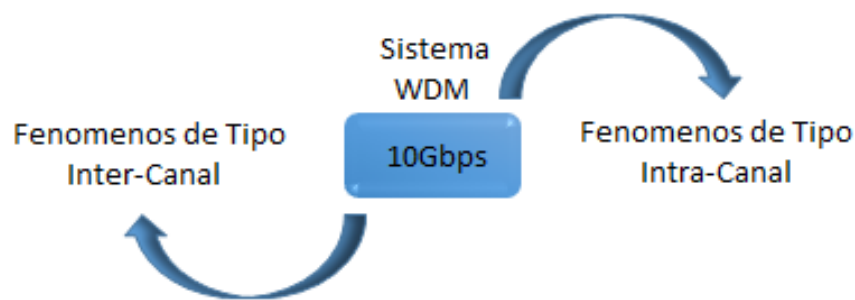


Figura 1.24 Efecto de los Fenómenos No Lineales vs Velocidad de Acceso
[Fuente propia]

Dependiendo del nivel de acceso de la red, es posible clasificar las interacciones no lineales que pueden distorsionar la señal óptica en términos de fenómenos de tipo intra-canal; los cuales ocurren debido a la interacción de los pulsos del mismo canal WDM y en algunos casos a la interacción del ruido ASE; he inter-canal los cuales hacen referencia a la interacción entre dos o más canales propagados sobre el mismo sistema WDM.

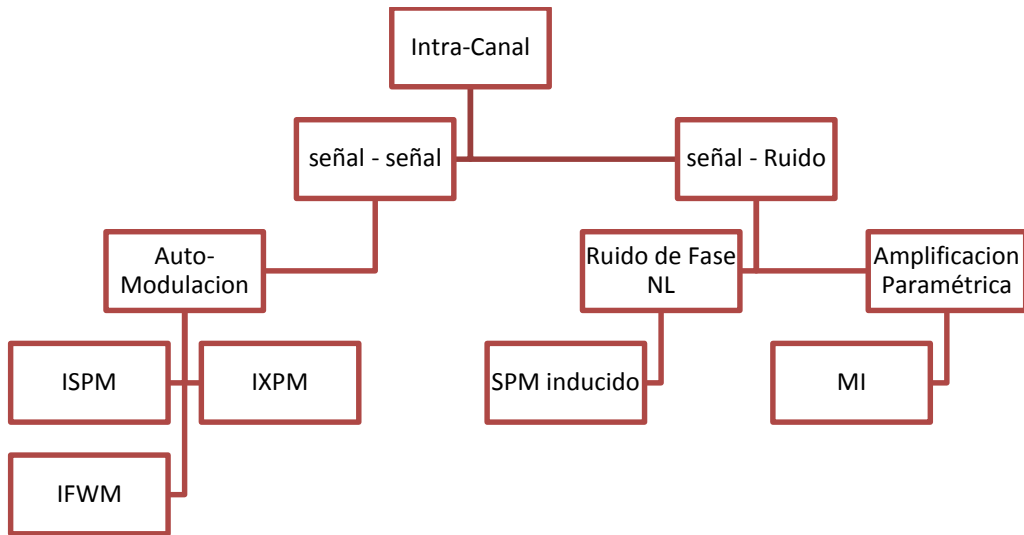


Figura 1.25 (a) Fenómenos No-Lineales de tipo Intra-Canal [40]

Como se aprecia en la figura 1.24, el impacto del efecto de las no linealidades dependerá significativamente de la velocidad neta de transmisión por canal, donde tomando como referencia una tasa a nivel de acceso de 10Gbps se puede definir que para velocidades de configuración del sistema DWDM por debajo afectan predominantemente los fenómenos inter-canal y para tasas superiores, afectan predominantemente los fenómenos de tipo intra-canal. La clasificación general de las No-Linealidades se puede observar en las figuras 1.25 (a) y 1.25 (b).

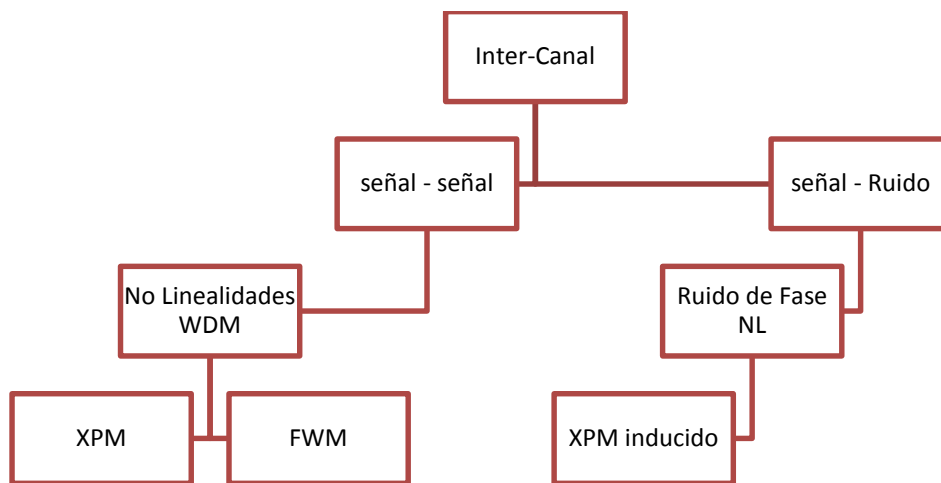


Figura 1.25 (b) Fenómenos No-Lineales de tipo Inter-Canal [40]

Como se aprecia en la figura 1.26, Según el análisis y las conclusiones realizadas en [23], el impacto de las no linealidades en un sistema DWDM dependerá principalmente del formato de modulación implementado, de las características físicas del medio y de las configuraciones del sistema (Espaciamientos por canal, velocidades de acceso, filtrado) entre otras; por otro lado, los efectos de tipo lineal (Dispersión cromática, atenuación-ruido y Dispersión debido al modo de polarización) afecten considerablemente de manera indiferente a las características de configuración de la red, permitiendo definir una incidencia predominante de los fenómenos lineales y no lineales, para esquemas de modulación simples (OOK) y fibras de tipo SSMF; los cuales se demostraran en la implementación de los casos de estudio en los capítulos posteriores.

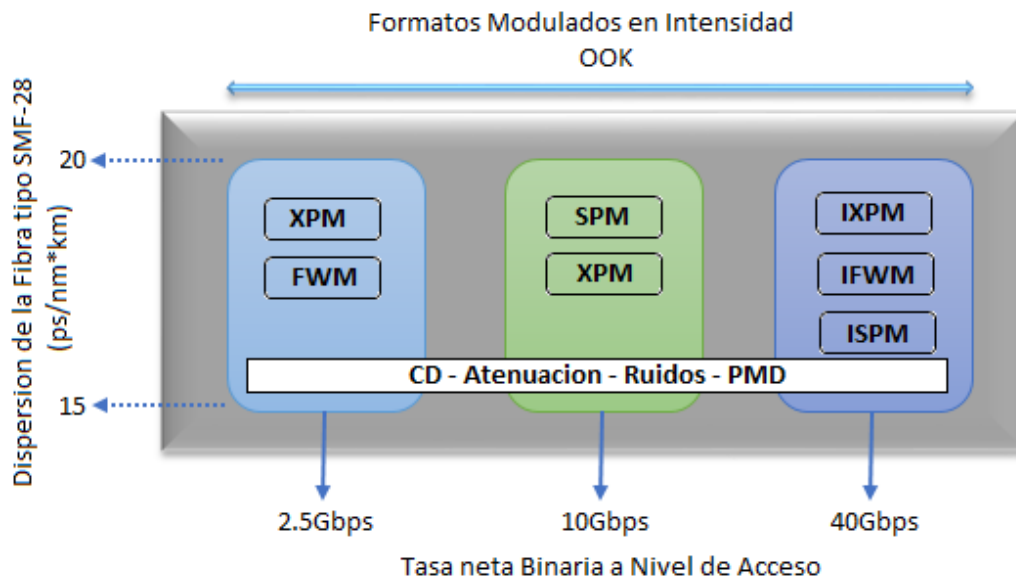


Figura 1.26 Efectos de Degradación Predominantes Según el Nivel de Acceso [Fuente Propia]

Nota del Autor.

Mediante el desarrollo del presente capítulo se definió un estándar de comparación con respecto a los esquemas de modulación más implementados

dentro de los sistemas ópticos y se identificó la relación que existe entre los fenómenos lineales y no líneas con respecto a la propagación en el medio, pudiendo determinar a nivel teórico los efectos más predominantes a diferentes velocidad de trasmisión de datos, Del mismo modo, se pudo comprender los requerimientos que los sistemas DWDM deben soportar en busca de alcanzar redes con mayor eficiencia espectral, velocidades de acceso y manejo de Ancho de Banda, para los estándares de tipo XG-PON y NG-PON.

Referencias

- [1] S. D. N., UIT, “*Visión general de las redes de próxima generación*”, Recommendation UIT-T Y. 2001, Ginebra, 2004.
- [2] FSAN - Full Service Access Network, “*comité desarrollador UIT*”, Página Web disponible en: <https://www.fsan.org/>. [Acceso: Mar - 2019].
- [3] F. C. Europe, “*FTTH handbook*”, FTTH Council Europe, 2018.
- [4] S. D. N., UIT, “*10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms*”, Recommendation UIT-T. G. 987, Ginebra, 2012.
- [5] S. D. N., UIT, “*10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements*”, Recommendation UIT-T. G. 987.1, Ginebra, 2016.
- [6] S. D. N., UIT, “*10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification*”, Recommendation UIT-T. G 987.2, Ginebra, 2016.

- [7] S. D. N., UIT, “*10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Transmission convergence (TC) layer specification*”, Recommendation UIT-T. G. 987.3, Ginebra, 2014.
- [8] S. D. N., UIT, “*10 Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Reach extensión*”, Recommendation UIT-T. G 987.4, Ginebra, 2012.
- [9] S. D. N., UIT, “*10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON). Ginebra*”, Recommendation UIT-T. G. 9807.1, Ginebra, 2016.
- [10] S. D. N., UIT, “*10 Gigabit-capable passive optical networks (XG(S)-PON): Reach extensión*”, Recommendation UIT-T. G. 9807.2, Ginebra, 2017.
- [11] S. D. N., UIT, “*40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements*”, Recommendation UIT-T. G 989.1, Ginebra, 2013.
- [12] S. D. N., UIT, “*40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification*”, Recommendation UIT-T. G 989.2, Ginebra, 2019.
- [13] S. D. N., UIT, “*40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Transmission convergence layer specification*”, Recommendation UIT-T. G 989.3, Ginebra, 2015.
- [14] Corning INC, “*Redes de Comunicación*”, Página Web disponible en: <http://www.corning.com/california/products/communication-networks/products.html>, [Acceso: Mar - 2019].
- [15] Coherent INC, “*Productos / fibra óptica y ensamblajes avanzados*”. Página Web disponible en: <https://www.coherent.com/lasers/main/advanced-optical-fiber-assemblies>, [Acceso: Mar - 2019].

- [16] Nufern INC, “*Optical Fibers*”. Página Web disponible en: http://www.nufern.com/pam/optical_fibers/, [Acceso: Mar - 2019].
- [17] Nktphotonics A/S, “*Products / Fiber Delivery*”. Página Web disponible en: <https://www.nktphotonics.com/lasers-fibers/>, [Acceso: Mar - 2019].
- [18] Fiberhomegroup, “*Productos y Soluciones*”. Página Web disponible en: <http://www.fiberhomegroup.com/es/Operators/96.html>, [Acceso: Mar - 2019].
- [19] S. D. N., UIT, “*Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*”, Recommendation UIT-T. G 652, Ginebra, 2016.
- [20] Corning® SMF-28e+ Product Information, DataSheet, Single-Mode Optical Fiber, Corning Incorporated, 2019.
- [21] Corning® SMF-Ultra Fiber Product Information, DataSheet, Single-Mode Optical Fiber, Corning Incorporated, 2019.
- [22] FiberHome® ULLOptical Fiber Product Information, DataSheet, Single-Mode Optical Fiber, ITU-UG652, fiberhomegroup, 2019.
- [23] G. Gómez, J. Grijalba, “*Análisis del desempeño de formatos de modulación en comunicaciones ópticas sobre redes WDM*”, Tesis de Pregrado, Universidad Del Cauca, Mayo 2010.
- [24] HUAWEI, “*OptiX OSN 3500 Intelligent Optical Transmission System, Hardware Description Manual*” Manual Version T2-042552-20050228-C-1.21, Product Version V100R002, 2016.
- [25] ZTE, “*ZXONE 8000 Intelligent OTN Equipment*”. Página Web disponible en: <http://www.zte.com/>, [Acceso: Mar - 2019].

- [26] S. D. N., UIT, “*Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*”, Recommendation UIT-T. G 694.1, Ginebra, 2012.
- [27] C. K. Chan, “*Optical performance monitoring: advanced techniques for next-generation photonic networks*”, Academic Press, ISBN-13: 978-0128102190, 2010.
- [28] A. T. Tovar, G. L. Méndez, J. G. Perafán, “*Análisis del efecto del ruido en recepción de redes WDM con detección coherente*”, Entre Ciencia e Ingeniería, vol 14, pp. 17-23, 2013.
- [29] C. Fludger, A. Maroney, N. Jolley, & R. Mears, “*An analysis of the improvements in OSNR from distributed Raman amplifiers using modern transmission fibres*”, In Optical Fiber Communication Conference, Vol. 4, pp. 100-102, IEEE, 2000.
- [30] L. B. Nguyen, “*Optical Fiber Communications Systems: Theory and Practice with MATLAB® and Simulink® Models*”, Crc Press, ISBN-13: 978-1439806203, 2011.
- [31] D. D. van den Borne, “*Robust optical transmission systems: modulation and equalization*”, Doctoral dissertation, Technische Universiteit Eindhoven, 2008.
- [32] L. N. Binh, “*Digital optical communications*”, CRC Press, ISBN-13: 978-1420082050, 2008.
- [33] R. Ramaswami, K. Sivarajan, G. Sasaki, “*Optical networks: a practical perspective*”, Morgan Kaufmann, ISBN-13: 978-0123740922, 2009.
- [34] S. Kumar, “*Impact of nonlinearities on fiber optic communications*”, Springer Science & Business Media, ISSN 1619-1447, 2011.
- [35] G. P. Agrawal, “*Nonlinear fiber optics*”, Academic press, ISBN: 9780123973078, 2007.

- [36] K.H. Kim, H.K. Lee, “*Nonlinear effects in optical fibers*”, John Wiley & Sons, ISSN: 0306-8919, 2011.
- [37] L. Štěpánek, “*Chromatic dispersion in optical communications*”, International Journal of Modern Communication Technologies & Research, vol 7, 2012.
- [38] S. P. Singh, N. Singh, “*Nonlinear effects in optical fibers: Origin, management and applications*”, Progress in Electromagnetics Research, 73, 249-275, 2007.
- [39] L. Bohac, “*The soliton transmissions in optical fibers*”, Advances in Electrical and Electronic Engineering, vol. 8, no 5, pp. 107, 2010.
- [40] M. G. Patel, S. B. Khant, “*Soliton Transmission in fiber optics for long distance communication*”, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, vol. 3, no 2, 2014.
- [41] F. M. Knox, W. Forysiak, N. J. Doran, “*10-Gbt/s soliton communication systems over standard fiber at 1.55/spl mu/m and the use of dispersion compensation*”, Journal of lightwave technology, vol. 13, no 10, pp. 1955-1962, 1995.

CAPITULO 2.

FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS, EFICIENCIA ESPECTRAL Y ADAPTACIÓN DE LA TEORÍA DE LA INFORMACIÓN

Históricamente, los sistemas de comunicación ópticos han utilizado formatos de modulación basados en intensidad de tipo On Off Keying (OOK) siendo los preferidos por la mayoría de los enlaces debido a su fácil implementación. Sin embargo, desde que las distancias de transmisión y las velocidades de datos por canal se han incrementado, otros formatos de modulación han sido sugeridos para mitigar los impedimentos de las transmisiones (fenómenos lineales y no lineales) y facilitar el incremento de las velocidades de datos por canal más allá de los límites de los sistemas binarios. Algunos de los principales requerimientos de los sistemas actuales DWDM basados en los estándares XG-PON y NG-PON es el de permitir un alto volumen de tráfico a altas velocidades de transmisión de datos para arquitecturas SDH/SONET con Accesos típicos de un STM-64 manteniendo una buena relación costo-eficiente permitiendo escalabilidad en la red.

2.1 GENERALIDADES Y REQUERIMIENTOS

Las redes Ópticas Pasivas (PON) se han convertido en los últimos años a través de sus evoluciones definidas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) en términos de dos grupos principales; el primero de ellos basado en ATM (GPON “*Gigabit Passive Optical Networks*”) y el segundo basado en Ethernet (EPON “*Ethernet Passive Optical Networks*”) en una solución de arquitectura de red de acceso de banda ancha que permite transparencia en los servicios, ahorro de energía, alta seguridad y escalabilidad para los requerimientos y necesidades del entorno actual de los sistemas de telecomunicaciones [1-4]. De manera oficial, las características, arquitectura y configuración de las redes basadas

en EPON y GPON se definen en los estándares 802.3 [5] y G.984.1 [6] de la UIT, respectivamente, donde el grupo de tareas de la UIT-T Full Service Access Network (FSAN) y el comité europeo para la implementación de soluciones FTTx, proponen diferentes arquitecturas de red, con un objetivo común de generar redes de acceso de fibra óptica de ultra alta capacidad y velocidad, Figura 2.1.

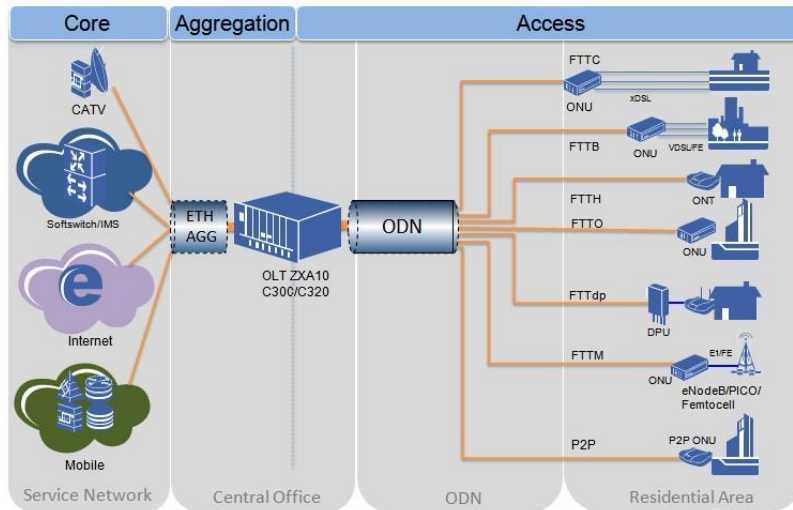


Figura 2.1 Arquitectura de red para la evolución de los sistemas FTTx [3]

Como se puede apreciar en la figura 2.2, según estudios realizados en [1-10] y algunas proyecciones del mercado de las comunicaciones ópticas [11, 12] de empresas como ZTE, siendo uno de los proveedores más grandes a nivel mundial, es posible clasificar la evolución de las redes PON en dos generaciones, de modo que, para la primera generación nombrada NG-PON1 se definen sistemas basados en acceso múltiple por división de tiempo (TDMA - *Time Division Multiple Access*) para velocidades nominales de subida de 2.5Gbps y de bajada de 10Gbps, para la siguiente generación NG-PON2 definida en las recomendaciones G989.1 a G989.3 [13] de la UIT se estandariza la velocidad nominal a 10Gbps a nivel de Acceso de la red, en espera de generar sistemas alrededor de los 40Gbps de velocidad de transmisión nominal.

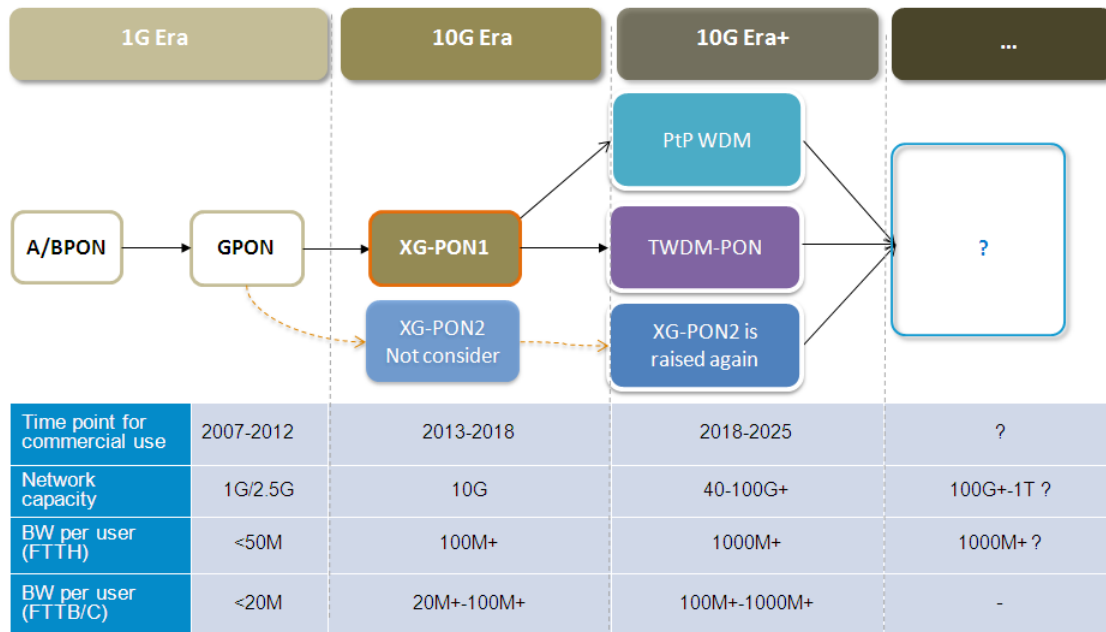


Figura 2.2 Proyección Comercial redes XG-PON de ZTE [11]

Las migraciones de tipo XG-PON [7-10] hacen referencia a la capacidad de la red de multiplexar canales a diferentes velocidades de transmisión de datos (coexistencia), pudiendo igualar el volumen máximo manejable en un instante de tiempo sin cambiar el acceso de la red, etapa previa al incremento nominal, denominados estados híbridos.

La figura 2.3, representa la posibilidad de generar transmisiones de tipo asimétricas del orden de los 10Gbps y los 2.5Gbps para los enlaces de bajada y subida respectivamente; donde el requerimiento de la coexistencia de señales de diferentes tasas de transmisión binaria se debe al deseo de generar una actualización simple a sistemas de mayores velocidades de acceso y anchos de banda. NG-PON definido por la recomendación G989.1 [14] de la UIT, se presenta como una solución óptima y costo-eficiente al deseo de manejar mayores velocidades de acceso del orden de los 40Gbps y 100Gbps, sin embargo, la propuesta de su evolución se hace a través de redes de tipo XG-PON operando a una tasa de transmisión de datos lineal nominal de 2.5/10Gbps en el enlace de

bajada y en el enlace de subida; sin embargo la última actualización del estándar definida como XGS-PON de 2016 y 2017, define una versión simétrica a 10Gbps, para alcanzar mayores anchos de banda, permitiendo la coexistencia con las redes de primera generación instaladas [8].

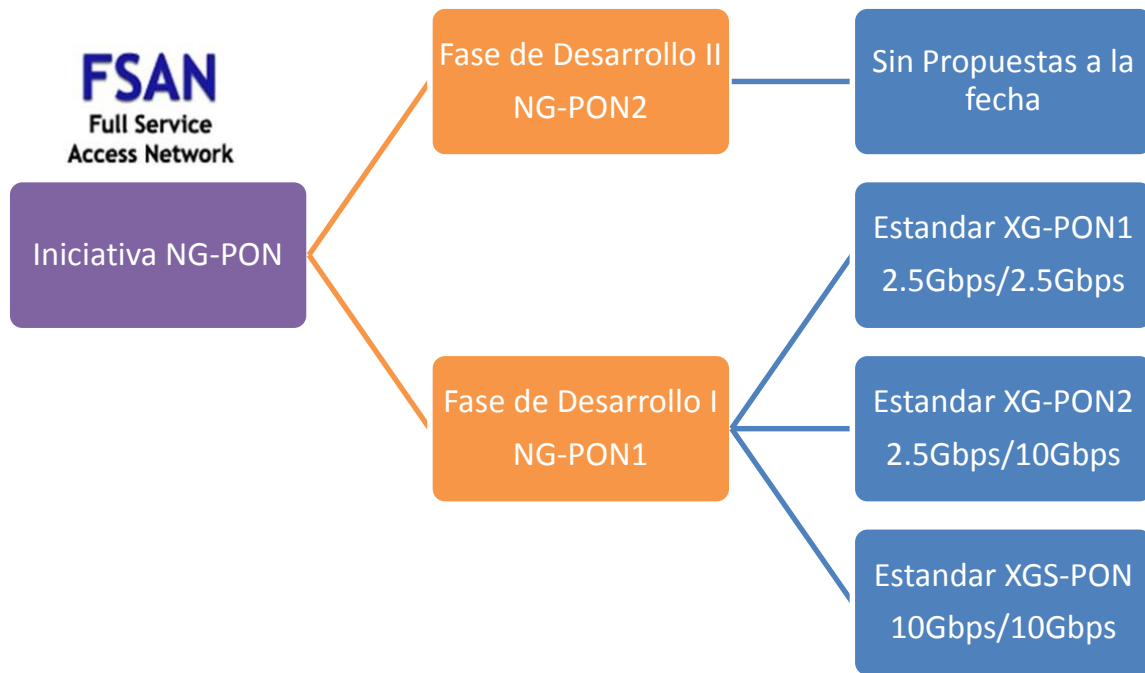


Figura 2.3. Migración de 2.5Gbps a 40Gbps para la iniciativa NG-PON

[Por los Autores]

Para servicios y aplicaciones de tipo comercial y residencial, se debe desarrollar fases en términos de soluciones costos-eficientes que permitan dicha migración y que se encuentren enmarcados en las características definidas para las redes de nueva generación de tipo NG-OAN's (*next-generation optical access networks*) permitiendo; seguridad, escalabilidad y transparencia de servicios y aplicaciones, para lo cual algunos estudios desarrollados en [1-2], [7] y [10-12] entre otros, proponen:

- i) “*Wavelength division multiplexing passive optical networks*” WDM-PONs, los cuales fueron diseñados en primera instancia como sistemas de

múltiples longitudes de onda para entornos DWDM contando con esparcimientos típicos por canal de 0.8nm a 0.4nm, con la capacidad de asignar canales de forma dedicada a las unidades de redes ópticas (ONU) conectadas a los equipos terminales ópticos (OLT's), permitiendo explotar el máximo ancho de banda disponible por trayecto para sistemas bidireccionales, y debido a la alta capacidad de multiplexación de longitudes de onda sobre la fibra, generar teóricamente un ancho de banda "infinito".

- ii) *"Hybrid TDM/WDM passive optical networks" H-TDM/WDM PONs*, es una arquitectura y diseño de red que propone provechar las altas velocidades alcanzables por sistemas de tipo TDM-PON junto con la alta capacidad de transporte de longitudes de onda de WDM-PON, permitiendo asignaciones de tipo estáticas y dinámicas a los canales ópticos del sistema.

- iii) *"Code division multiplexing passive optical networks" CDM-PONs*, es un diseño de sistema que propone asignar a cada transmisor de un equipo terminal óptico una codificación única, donde la señal de todos los transmisores configurados en el equipo OLT multiplexados sobre el mismo tramo de fibra será difundida para todas las unidades ópticas de modo que cada una de ellas aceptara únicamente la información proveniente de su propia codificación.

- iv) *"Fiber wireless networks" FiWi*, es una propuesta de tecnología basada en la integración de redes ópticas e inalámbricas en una sola estructura de red, la cual provee alta capacidad y movilidad para servicios de tipo Quad-Play para RoF (Radio sobre Fibra), donde una portadora óptica es modulada por una señal de radio frecuencia en el momento de ser enviada a través de la fibra a una antena remota (RAU) para ser retransmitida de forma inalámbrica.

- v) *“Orthogonal Frequency Division Multiplexing passive optical networks” OFDM-PON’s*, considerada como una de las propuestas de migración de redes NG-OAN’s más atractivas para el mercado debido a su alta eficiencia espectral y escalabilidad, implementa técnicas de multiplexación OFDM para alcanzar tasas de transmisión netas del orden de los 40Gbps basadas en sub-portadoras ortogonales que son a su vez divididas en diferentes instantes de tiempo (“Time Slote” TDMA’s).

- vi) *“Advanced Optical Modulation Formats”*, una de las propuestas actuales para permitir la migración a redes con alta eficiencia espectral y alta capacidad de acceso y transporte de información, implementando esquemas de modulación y codificación avanzados, basados en el comportamiento y la interacción de formatos simples como DPSK y multinivel como DQPSK con respecto a las características intrínsecas de propagación de la señal a través de un segmento de fibra óptica, permitiendo soluciones costo-eficientes, escalables, seguras y transparentes para los nuevos requerimientos de las redes NG-OAN’s.

Mediante la implementación y desarrollo de las soluciones propuestas anteriormente, 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, con miras a implementar redes de tipo All Optical Network (AON-DWDM).

2.2 FORMATOS AVANZADOS DE MODULACIÓN

El campo óptico tiene tres atributos físicos que pueden ser implementados para transportar información: la intensidad, la fase y la polarización. En la figura 2.4 se presenta la forma general en que estos formatos de modulación codifican la

información en la representación de los símbolos de la portadora óptica, según su tipo [15-16].

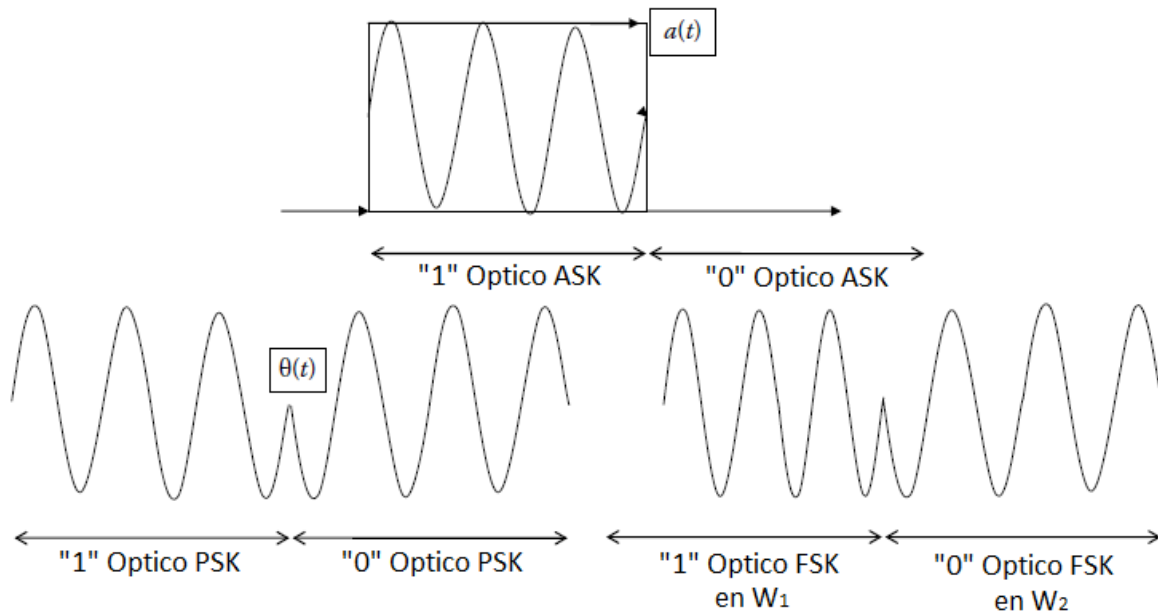


Figura 2.4 Clasificación de los formatos de modulación [16].

La modulación óptica, es el proceso mediante el cual las características de una fuente de luz pueden ser manipuladas en términos de la corriente del diodo laser que podría generar una o varias fuentes co-propagantes a través del medio o mediante la integración de dispositivos en el modulador óptico, siendo estas técnicas conocidas como modulación directa, donde se manipula la emisión estimulada desde adentro de la cavidad del láser mediante el uso de efectos electro-ópticos y modulación externa, donde las características de fase o amplitud del láser que se encuentra emitiendo en todo momento se integran con un modulador óptico para acoplar los efectos electro-ópticos con señales eléctricas [16].

Mientras los formatos modulados en intensidad y fase han sido ampliamente utilizados en comunicaciones ópticas, el atributo de la polarización ha recibido muy poca atención, debido principalmente a la necesidad de realizar control en el receptor generado por los cambios aleatorios de polarización en la fibra óptica (fenómenos de primer y segundo orden), haciendo difícil su detección, sin embargo,

para el propósito de la presente investigación, y como resultado frente al comportamiento de las degradaciones ópticas (**anexo A y anexo B**), se desea hacer énfasis en las soluciones que se pueden proponer desde el punto de vista de los esquemas modulados en fase diferencial (DPSK) y fase y cuadratura diferencial (DQPSK), quienes se mostraron altamente robustos frente a los impedimentos en las transmisión.

2.2.1 Moduladores Externos de Intensidad Mach-Zehnder (MZIM)

Este tipo de moduladores externos se encuentran basados en la generación de cambios en el índice de refracción de la guía de onda generando el “ON” el cual hace referencia al modo de interferencia constructivo y el “OOF” el cual hace referencia al modo de interferencia destructivo a la salida del modulador que fracciona un haz que incide sobre la entrada del sistema en dos haces secundarios, los cuales recorren diferentes caminos ópticos generando diferencias de fase, hasta converger en una única salida ocasionando como resultado los dos tipos de interferencia.

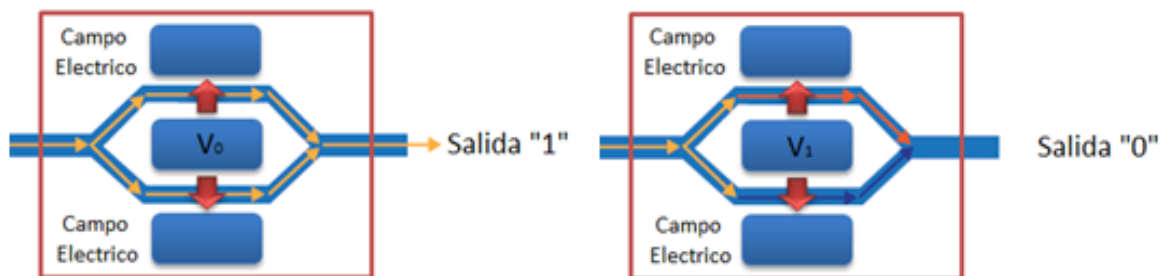


Figura 2.5 Principio de interferencia constructiva y destructiva de un modulador MZIM para la generación de una salida óptica [15]

La figura 2.5, demuestra los procesos de tipo constructivo y destructivo mediante la implementación de dispositivos MZIM de modo que para generar el estado “ON” o salida en “1”, ningún voltaje es aplicado al electrodo de excitación permitiendo combinar las dos señales de los diferentes trayectos en una salida

simple con presencia de señal en el modulador, para el caso “OFF” o salida en “0”, un voltaje es aplicado al electrodo de excitación generando un cambio en el índice de refracción de la guía de onda, que produce un desplazamiento de fase sobre uno de los trayectos y un retardo de fase sobre el otro, si la fase retardada es un múltiplo del factor π , las señales de los dos trayectos se encuentran completamente desfasadas y su combinación será completamente destructiva para ninguna presencia de señal a la salida del modulador. Los voltajes V_0 y V_1 los cuales inducen los diferentes estados sobre el modulador son conocidos como voltajes de control o “Driving Voltage” siendo un importante parámetro en su desempeño [17].

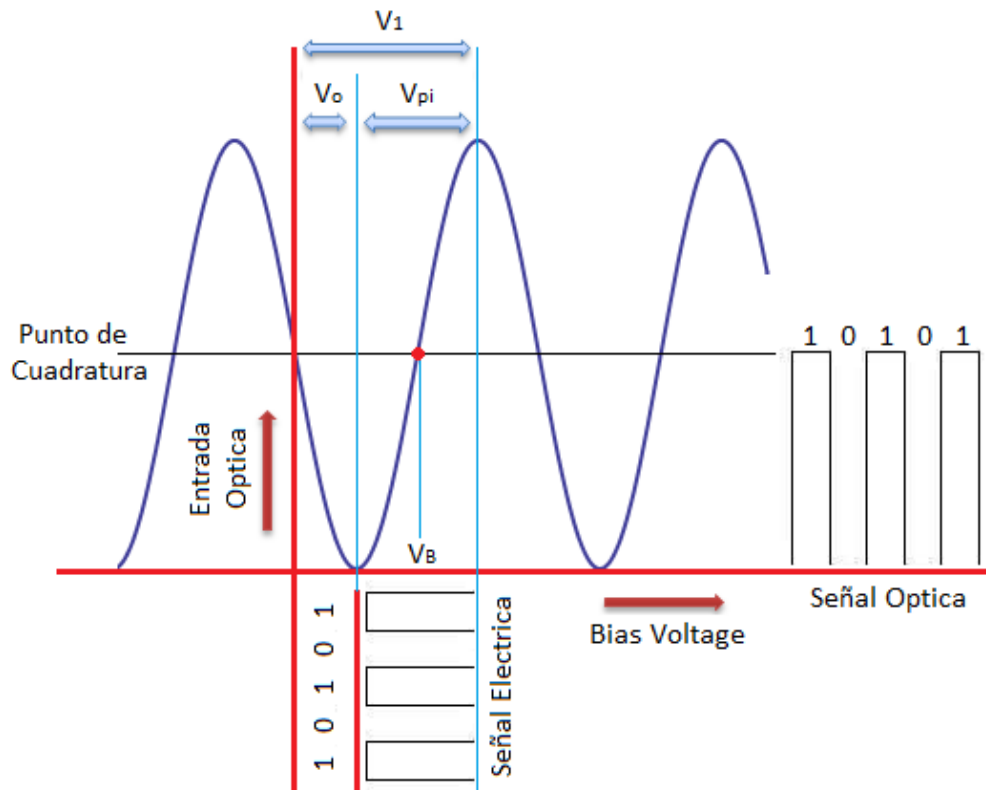


Figura 2.6 Curva Característica modulador Mach-Zehnder de intensidad (MZIM)

[17]

La figura 2.6, describe la curva característica y el comportamiento que se genera entre la potencia óptica de salida y los voltajes de polarización “Bias” aplicados al electrodo de excitación de un modulador de tipo Mach-Zehnder, donde si el voltaje de entrada es una secuencia de pulsos, entonces la secuencia de pulsos

ópticos de salida seguirán la forma de la onda de la señal cuadrada; del mismo modo, si el voltaje “Bias” es establecido en el punto de cuadratura V_B y la amplitud de los voltajes de control “Driving Voltage” se encuentran dentro de la región lineal de la curva de transferencia, entonces la respuesta óptica será lineal.

Como se aprecia en la figura 2.7, es posible representar fasorialmente la forma de los campos de las longitudes de onda a través de los dos trayectos del modulador para una conmutación de fase de $\pi/2$ de modo que; su función de transferencia de potencia se puede representar en términos de:

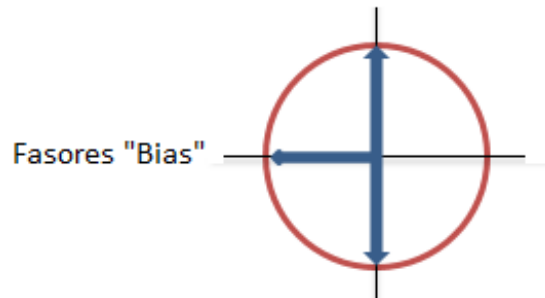


Figura 2.7 Representación Fasorial de los vectores “Bias” del modulador MZIM [17]

$$P_0(t) = \alpha P_i \cos^2 \frac{\pi V(t)}{V_\pi} \quad \text{Ecuación (2.1)}$$

Donde:

- $P_0(t)$ Representa la potencia de salida transmitida
- α Representa las pérdidas por inserción del modulador
- P_i Representa la potencia de entrada (usualmente diodo laser)
- $V(t)$ Representa la señal de voltaje aplicado en el tiempo
- V_π Representa el voltaje de control para una fase π

Es común establecer el punto del voltaje de configuración al 50% del punto de transmisión o a una diferencia de fase de $\pi/2$ entre las dos ramas de la guía de onda óptica del modulador, con el fin de transformar las señales digitales eléctricas en señales digitales ópticas mediante la conmutación de dicho voltaje [16].

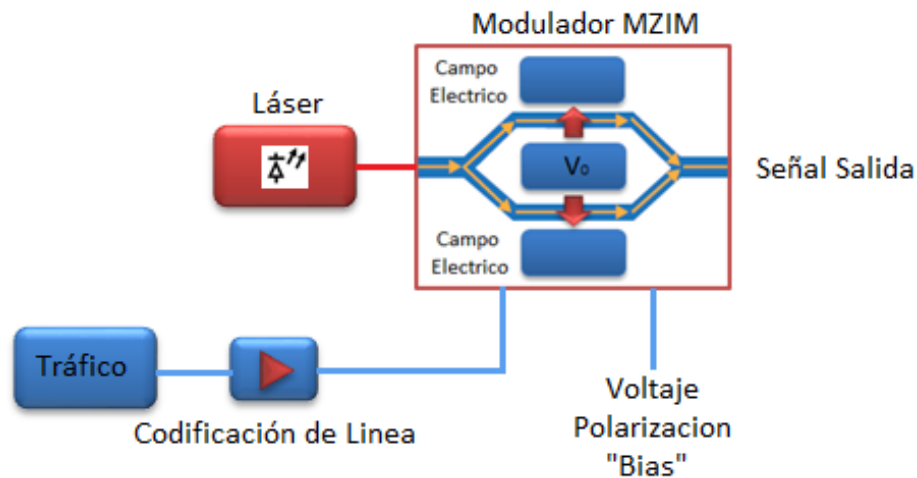


Figura 2.8 Configuración típica de un esquema de modulación basado en MZIM [16]

La figura 2.8, representa la implementación típica de los moduladores MZIM para generar la forma de onda deseada (señal de salida), teniendo como referencia la codificación requerida relacionada con el código de línea, donde para esquemas diferentes de codificaciones diferentes, la configuración final se adaptara a la presencia de uno (formatos de modulación simples) o múltiples (formatos de modulación multinivel) moduladores.

2.2.2 Modulación DPSK - Differential Phase Shift Keying

La modulación basada en el desplazamiento de fase binaria diferencial D-BPSK (*Differential Binary phase shift keying*), también llamada desplazamiento de fase diferencial DPSK , es una técnica de modulación propuesta para resolver los inconvenientes de su precursor PSK (*Phase Shift Keying*), en donde se requiere la manipulación absoluta de la fase de la portadora óptica para un sistema de tipo coherente, generando inconvenientes en los pulsos ópticos y problemas de Chirp⁷.

⁷ De manera general, el cactor de Chirp, conocido como fase residual o frecuencia de Chirp, es un efecto que se produce debido a los cambios temporales de fase asociados a los cambios de intensidad del modulador óptico.

Debido a que la modulación DPSK codifica la información en la fase de la señal y puede ser detectada de manera no coherente, solo se requiere coherencia de la portadora óptica sobre un único periodo de bit para la comparación de la fase codificada diferencialmente de los pulsos ópticos consecutivos, de modo que; Como se aprecia en la figura 2.9, de forma similar a una operación de tipo XOR, los “1’s” digitales son codificados si se presenta un cambio en la fase de π entre los bits de datos consecutivos de la portadora óptica, mientras que los “0’s” digitales serán codificados si no se presenta dicho cambio de fase [18 - 19].

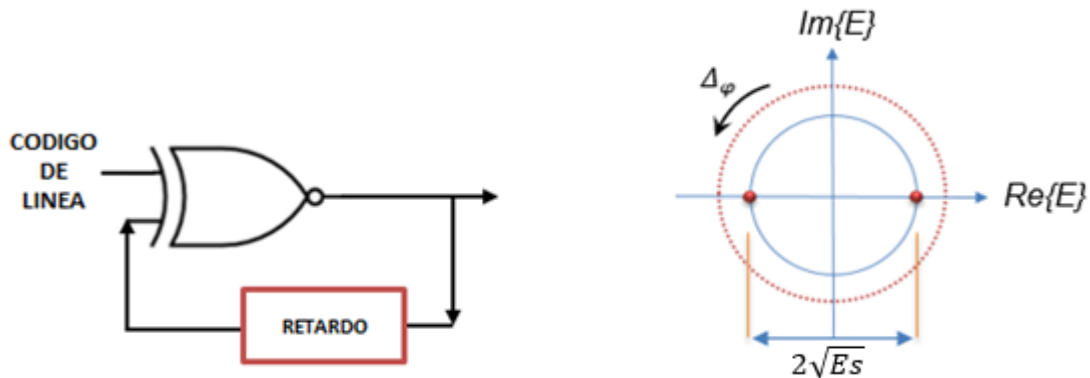


Figura 2.9 Codificación Binaria y Diagrama de Símbolos DPSK

[18]

La principal ventaja de implementar esquemas modulados en conmutación de fase diferencial con respecto a las modulaciones de intensidad de tipo OOK (*On Off Keying*), es, como se aprecia en la figura 2.9, el incremento en el espaciamiento de los símbolos, el cual genera una reducción de aproximadamente 3dB en el requerimiento de la Relación Señal a Ruido Óptica OSNR (*Optical Signal Noise Ratio*), donde, dependiendo de los parámetros de configuración del sistema, el patrón de código de línea y el tipo de modulador externo, es posible exceder la ganancia del esquema DPSK en 3dB y ofrecer una eficiencia espectral teórica superior o igual a 0.8bits/s/Hz, del mismo modo el comportamiento de este esquema de modulación para velocidades netas binarias a partir de los 10Gbps mejora

significativamente su respuesta frente a las degradaciones de tipo lineal y no lineal presentes en la transmisión óptica [19].

El diagrama de símbolos de la modulación DPSK definido en la figura 2.9, sugiere que los dos puntos de constelación poseen la misma señal de energía E_s cada uno correspondiente a una fase diferencial $\Delta\varphi=0$ y $\Delta\varphi=\pi$. Cuando la diferencia entre los dos puntos de constelación es igual a $2\sqrt{E_s}$, la potencia promedio será la misma que para los esquemas modulados en intensidad de tipo OOK, pero dado que la distancia incrementa, se mejora la tolerancia de la OSNR en 3dB.

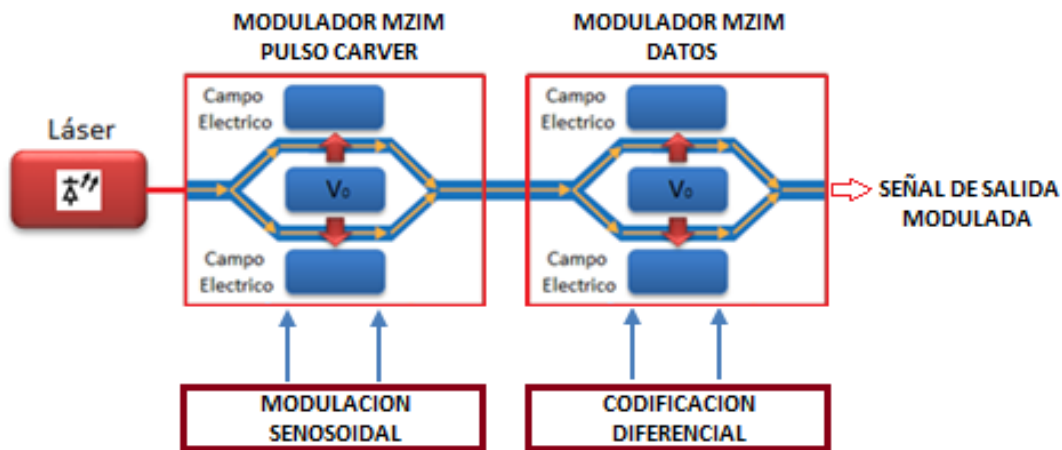


Figura 2.10 Diagrama de Bloques de un Transmisor típico basado en DPSK [19]

De manera práctica, el esquema de un transmisor basado en la modulación DPSK, y considerando los requerimientos de codificación, se puede definir en términos de la implementación de uno o varios moduladores MZIM como se aprecia en la figura 2.10, donde, debido a que la conmutación de fase de 180° de la información codificada no es instantánea, se produce un fenómeno de Chirp entre los símbolos transmitidos, el cual, en presencia de fenómenos de tipo lineal limita considerablemente el desempeño del sistema. La curva característica del comportamiento de la conmutación de fase del interferómetro MZIM se puede

observar en la figura 2.11, donde de manera ideal se configura el voltaje eléctrico pico a pico de $2V_\pi$ permitiendo conmutar el MZIM entre las dos crestas, codificando la información en saltos de 180° [20].

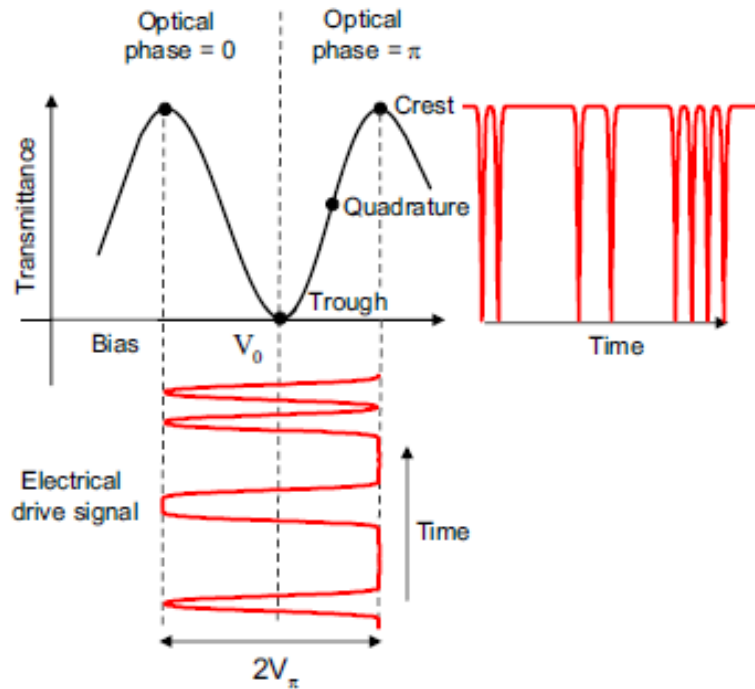


Figura 2.11 Comportamiento del Match Zehnder para la modulación DPSK [20].

En los capítulos posteriores, se presentaran soluciones desde el punto de vista de la implementación del esquema de modulación DPSK en busca de mejorar la tolerancia y eficiencia espectral de los sistemas DWDM para los estándares de nueva generación XG-PON, XGS-PON y NG-PON.

2.2.3 Modulación DQPSK - Differential Quadrature Phase Shift Keying

El manejo por conmutación de fase y cuadratura diferencial DQPSK, es un esquema de modulación multinivel el cual representa dos bit por símbolo transmitido generados en dos ejes ortogonales de fases discretas, donde uno de los principales atractivos de este esquema de modulación es la capacidad de ofrecer el doble de

ancho de banda incrementando significativamente la eficiencia espectral comparado con los esquemas de modulación simples (i.e. OOK o DPSK). El propósito fundamental en el diseño de este esquema de modulación multinivel es la de aplicar una forma diferencial a la modulación por conmutación de fase de la portadora óptica que codifica los datos, y la de permitir la detección de tipo no coherente en recepción disminuyendo la complejidad de la implementación, de modo que DQPSK se propone como una extensión del esquema de modulación DPSK [21].

A diferencia de la modulación DPSK, DQPSK emplea cuatro símbolos de conmutación de fase equivalentes a $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$, donde, dependiendo de la diferencia de fase $\varphi_2 - \varphi_1$ de los símbolos adyacentes transmitidos por la portadora óptica, será representada la combinación de bit deseados de modo que, el diagrama de constelaciones puede ser propuesto en términos de la fase residual Δ_φ como se aprecien en la figura 2.12 [22].

Fase residual DQPSK	
Bit Codificados	$\Delta_\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$
00	0
01	$\frac{\pi}{2}$
10	π
11	$\frac{3\pi}{2}$

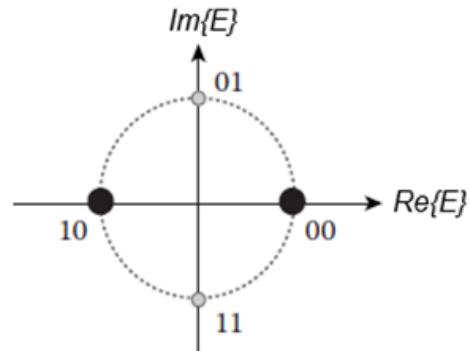


Figura 2.12 Diagrama de Constelación para la modulación DQPSK [21]

Considerando la representación de más de un bit por símbolo transmitido, DQPSK tiene la capacidad de doblar la tasa de transmisión binaria total generada en el sistema, sin embargo y dado que, la distancia entre los símbolos representados se reduce a la mitad comparado con DPSK, este formato de modulación requiere al menos 3dB mas de relación señal a ruido (OSNR) para mantener la misma tasa de error (BER) [20].

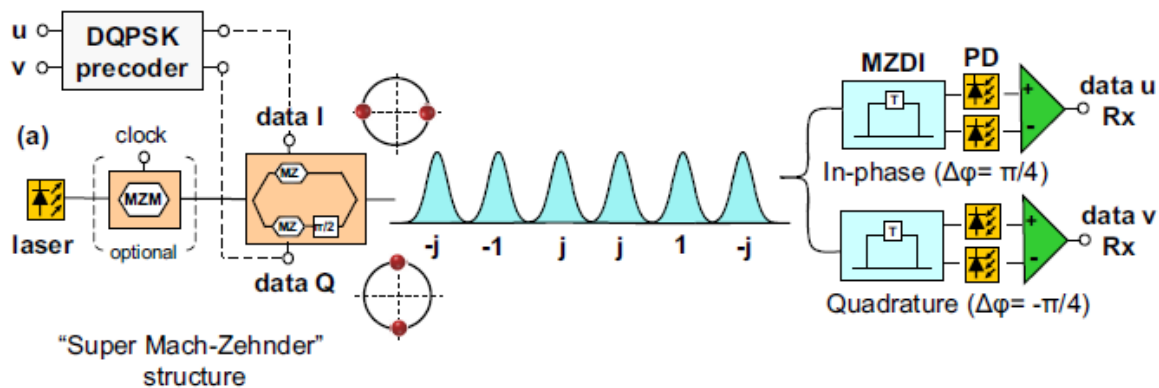


Figura 2.13 Estructura del Transmisor y Receptor del esquema DQPSK [20]

Como se aprecia en la figura 2.13, la estructura típica de un transmisor basado en la modulación DQPSK, se propone a partir de la configuración de súper estructuras Mach Zehnder los cuales a partir de moduladores paralelos DPSK generan la señal mediante una conmutación adecuada de fase típica de $-\pi/2$ o $\pi/2$, donde cada señal de información es independiente y conjugada finalmente en el receptor para alcanzar el doble de la velocidad neta binaria inicial de cada trayecto modulado, manteniendo la misma OSNR de esquemas simples de tipo OOK.

Para implementar moduladores de tipo DQPSK basados en súper estructuras Mach Zehnder, se requiere un pulso carver, el cual es utilizado para generar un tren de pulsos periódicos para el formato requerido, un modulador adicional MZIM el cual genera la conmutación de fase de la portadora óptica en 0 o π grados y la información generada por una fuente de datos aleatoria a la velocidad neta binaria requerida, del mismo modo, en recepción, dos moduladores separados MZDI los cuales conmutan su fase en $\Delta\phi = +\pi/4$ y $\Delta\phi = -\pi/4$ son utilizados para demodular los datos de fase (I) y cuadratura (Q) respectivamente, dado que los MZDI poseen salidas de tipo constructiva y destructiva, 4 fotodiodos son requeridos para generar una detección balanceada en DQPSK [22].

Del mismo modo que para las soluciones planteadas con base en el estándar de modulación DPSK, en los capítulos posteriores, se presentaran soluciones desde

el punto de vista de la implementación del esquema de modulación DQPSK en busca de mejorar la tolerancia y eficiencia espectral de los sistemas DWDM para los estándares de nueva generación XG-PON y NG-PON.

2.2.4 Patrones de códigos de línea para sistemas DWDM

Los esquemas de modulación simples o multinivel, pueden ser implementados para diferentes códigos de línea dentro de los sistemas DWDM, donde dependiendo de las características espectrales y la configuración de diferentes elementos de red, pueden presentar ventajas o desventajas en el deseo de alcanzar altas tasas de velocidades de transmisión de datos del orden de los 40Gbps. A continuación se definen las codificaciones más utilizadas dentro del ámbito de las comunicaciones ópticas.

- **Codificación Sin Retorno a Cero Modulada en Intensidad**

El esquema de modulación NRZ-OOK (*non return to zero on off keying*) ha sido uno de los formatos dominantes en los sistemas de comunicaciones ópticos, este formato, es altamente tolerante al Ruido de Fase del Láser (FWHM - Full Width at Half Maximum) y cuenta con una configuración simple de elementos en transmisor y receptor, sin embargo, una señal óptica NRZ-OOK no presenta un comportamiento superior frente a la interacción de los fenómenos de transmisión lineales y no lineales de la propagación de la onda a través del medio, siendo algunos de los fenómenos más degradantes, la Dispersión cromática (CD - *chromatic dispersion*) y la Mezcla de cuatro ondas (FWM - *four wave mixing*) [23], fenómenos que limitan significativamente el desempeño del sistema frente al deseo de alcanzar altas velocidades de transmisión de datos para los nuevos estándares NG-PON.

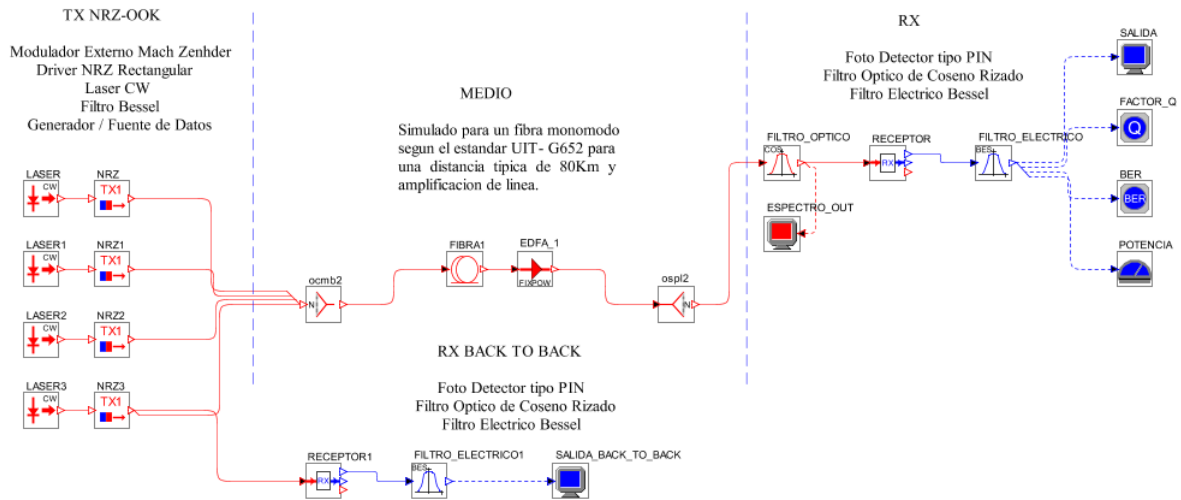


Figura 2.14 Sistema DWDM para la modulación NRZ-OOK

La figura 2.14, presenta el diseño de un sistema DWDM basado en el formato de modulación NRZ-OOK, para 4 canales y un medio de 80Km el cual considera fenómenos lineales y no líneas, así como fenómenos degradantes de atenuaciones y penalidades de potencia, partiendo de una velocidad de 2.5Gbps, definiendo su comportamiento y sus características generales, como se puede apreciar en la figura 2.15 y 2.15 (a) a 2.15 (f), del siguiente modo:

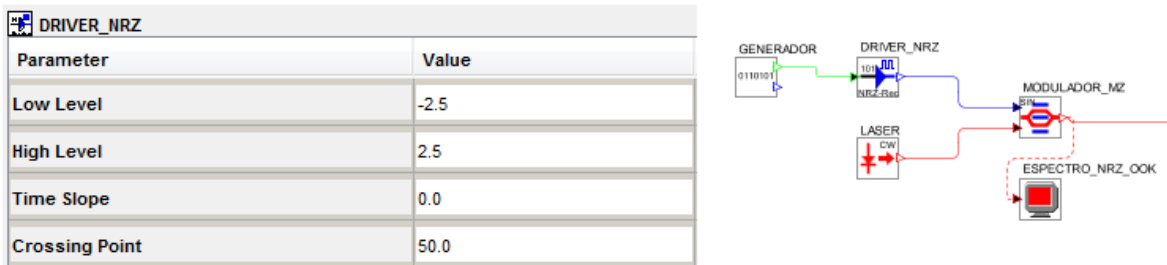


Figura 2.15 características y configuración del Transmisor NRZ-OOK

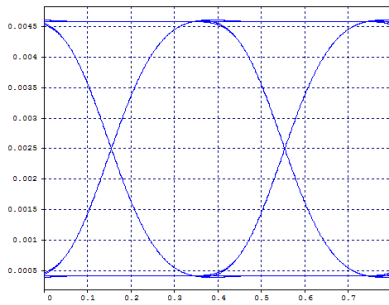


Figura 2.15 (a) Diagrama del ojo en un Receptor Back to Back.

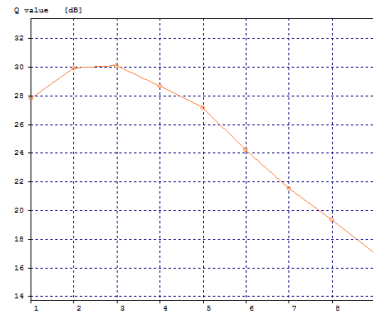


Figura 2.15 (b) Factor Q vs Distancia de Transmisión.

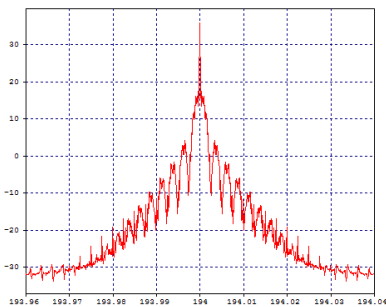


Figura 2.15 (c) Espectro óptico en los 194nm de longitud de onda.

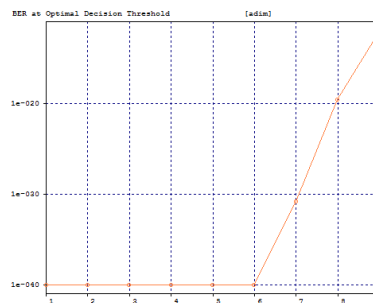


Figura 2.15 (d) BER vs Distancia de Transmisión.

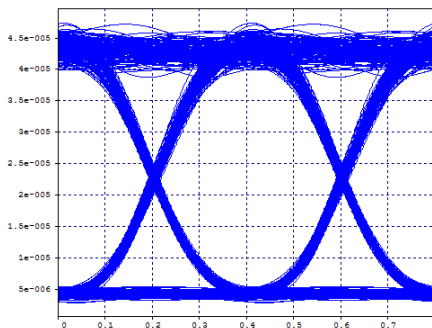


Figura 2.15 (e) Diagrama del ojo tras un tramo de 80Km de fibra

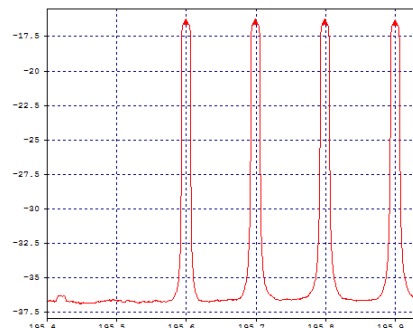


Figura 2.15 (f) Espectro óptico de los canales en Recepción

En análisis posteriores, se demostrara que no es posible mediante la implementación de este esquema de modulación alcanzar velocidades iguales o superiores a los 40Gbps de transmisión nominal binaria a nivel de acceso por longitud de onda transmitida, del mismo modo, se utilizara como referente para el análisis comparativo de la eficiencia espectral que este tipo de modulaciones puede ofrecer, versus soluciones planteadas con base en los formatos de modulación avanzados de tipo DPSK y DQPSK.

- **Codificación con Retorno a Cero Modulada en Intensidad**

Del mismo modo que para el caso del formato de modulación NRZ-OOK, el esquema de modulación RZ-OOK (*return to zero on off keying*) es uno de los más utilizados en las comunicaciones ópticas, este formato se presenta más robusto frente a las degradaciones generadas por los fenómenos de propagación lineal y no línea, mejora significativamente el desempeño del sistema, es indiferente al FWHM del láser y obtiene mejores resultados frente a los parámetros de degradaciones ópticas OPM.

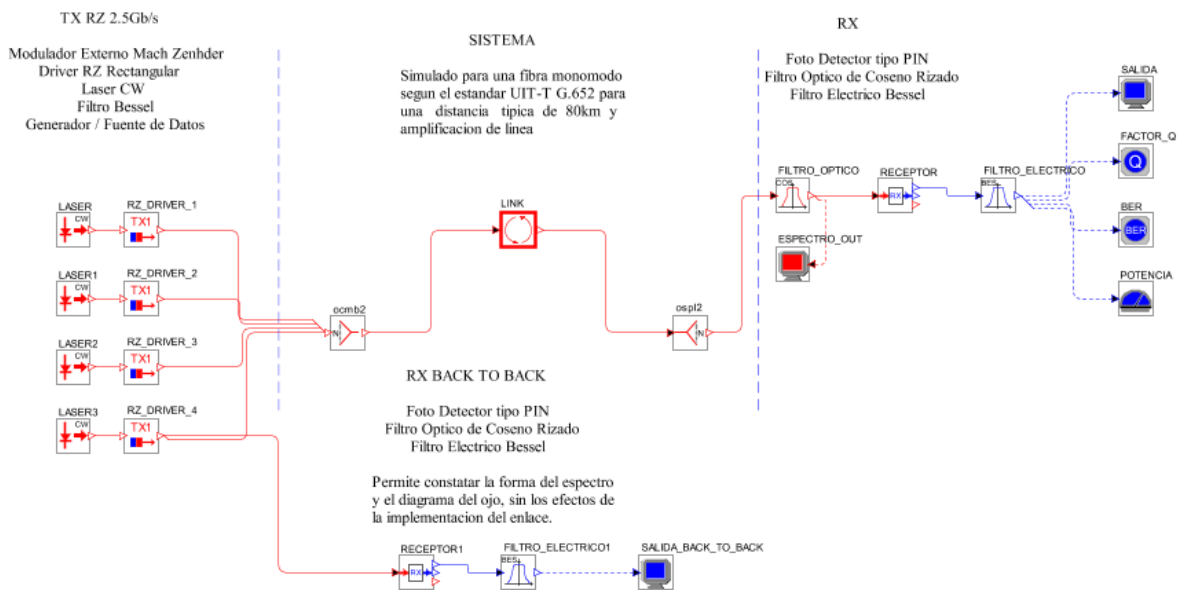


Figura 2.16 Sistema DWDM para la modulación RZ-OOK

La figura 2.16, presenta el diseño de un sistema DWDM basado en el formato de modulación RZ-OOK, para 4 canales y un medio de 80Km el cual considera fenómenos lineales y no líneas, así como fenómenos degradantes de atenuaciones y penalidades de potencia, partiendo de una velocidad de 2.5Gbps, definiendo su comportamiento y sus características generales, como se puede apreciar en las figuras 2.17 y 2.17 (a) a 2.17 (f), del siguiente modo:

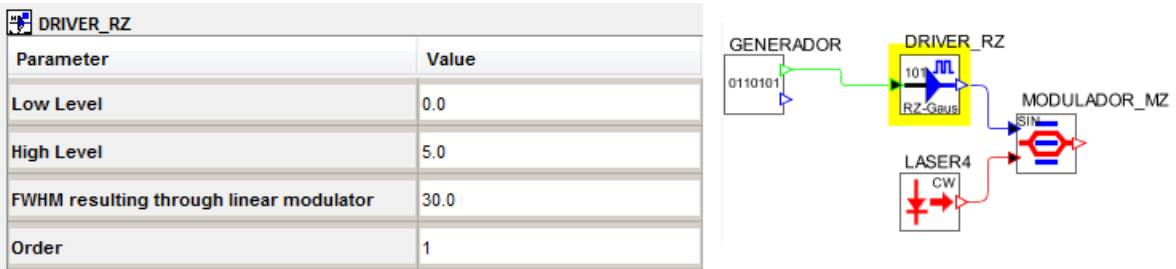


Figura 2.17 características y configuración del Transmisor RZ-OOK

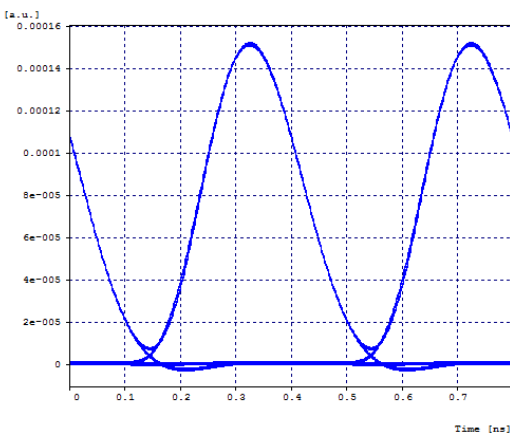


Figura 2.17 (a) Diagrama del ojo en un Receptor Back to Back.

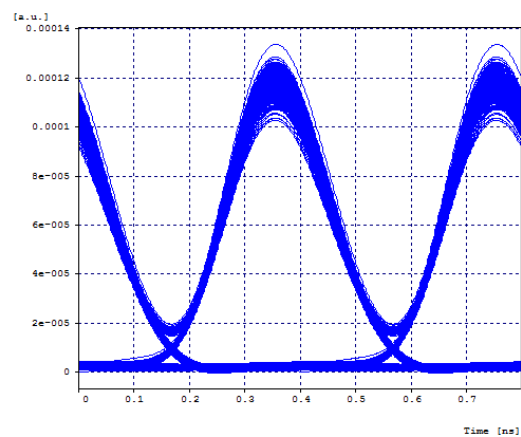


Figura 2.17 (b) Diagrama del ojo tras un tramo de 80Km de fibra

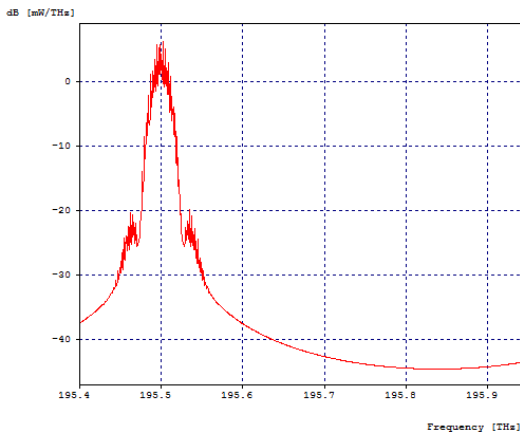


Figura 2.17 (c) Espectro óptico en los 195.5 nm de longitud de onda.

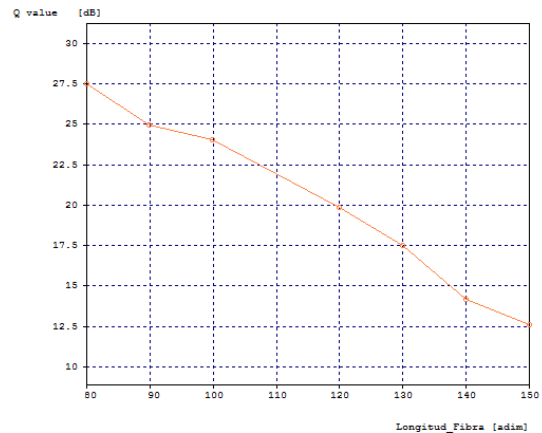


Figura 2.17 (d) Factor Q vs Distancia de Transmisión.

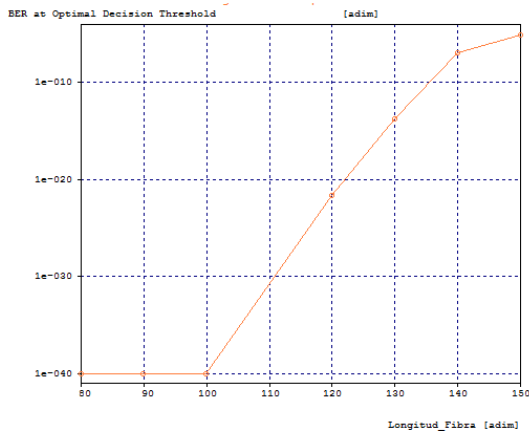


Figura 2.17 (e) BER vs Distancia de Transmisión.

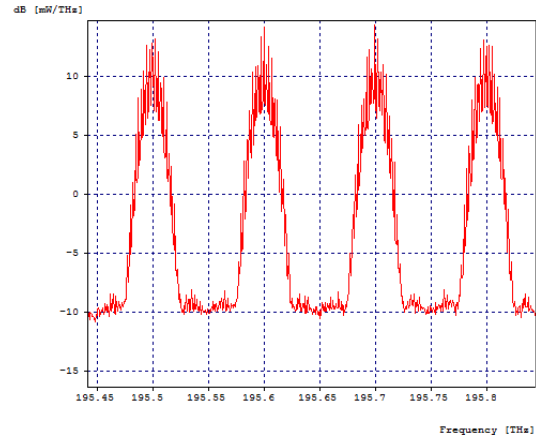


Figura 2.17 (f) Espectro óptico de los canales en Recepción

En los resultados preliminares, este esquema de modulación se presenta más óptimo para alcanzar velocidades alrededor de los 40Gbps de transmisión neta binaria por longitud de onda transmitida, del mismo modo, se utilizara como referente para el análisis comparativo de la eficiencia espectral que este tipo de modulaciones puede ofrecer.

2.3 ADAPTACIÓN DE LA TEORÍA DE LA INFORMACIÓN PARA SISTEMAS ÓPTICOS DE ULTIMA GENERACIÓN

En la actualidad, los sistemas comerciales DWDM más robustos, definen una arquitectura de red para una capacidad máxima de transporte de hasta 32 longitudes de onda con espaciamentos típicos por canal del orden de los 100GHz y velocidades netas de transmisión binaria de 2.5Gbps y 10Gbps, implementado esquemas de modulación basados en intensidad “OOK” y Codificaciones de tipo “RZ” y “NRZ”, los cuales definen su eficiencia espectral en términos de la capacidad de transmisión por unidad de ancho de banda, alrededor de los 0.2 b/s/Hz a 0.4 b/s/Hz; sin embargo debido al deseo de alcanzar sistemas basados en los nuevos estándares de tipo XG-PON y NG-PON, nuevos formatos de modulación son propuestos en busca de alcanzar eficiencias espectrales superiores a los 0.8 b/s/Hz [24].

2.3.1 Teoría de la información

Los fundamentos de la Teoría de la Información, desarrollados por C. E. Shannon en su artículo “*A Mathematical Theory of Communication*” [25] presentado en 1948 en “*The Bell System Technical Journal*”, define la relación existente entre el ancho de banda de un canal, la potencia promedio transmitida (P) y la potencia de ruido (N_0B), entre otros, es, para la teoría de la información con sus diferentes postulados i) sistemas discretos sin ruido, ii) el canal discreto con ruido, iii) preliminares matemáticas, iv) el canal continuo, v) la tasa de transmisión para una fuente continua, una fuente fundamental para la definición y el tratamiento de la información.

- Capacidad del Canal Discreto sin memoria

El canal de comunicaciones, es uno de los bloques principales de todo sistema, y define el medio físico por el cual los bits de información viajan desde el transmisor hasta el receptor; donde, se presentan fenómenos de propagación lineales, no lineales, ruido y todas aquellas degradaciones que pueden afectar la integridad de la señal. La capacidad de un canal de comunicación se puede definir, a grandes rasgos, como la cantidad máxima de información que se puede transmitir de forma confiable con una probabilidad de error mínima [26 - 29].

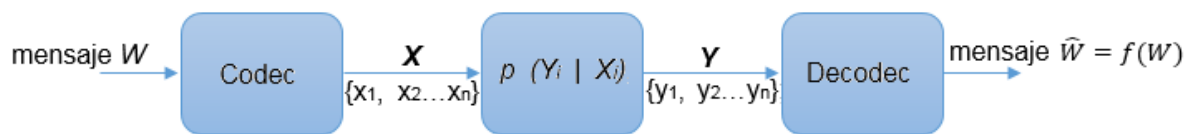


Figura 2.18 Representación de un canal discreto sin Memoria [25]

Como se aprecia en la figura 2.18, para un canal discreto sin memoria se representa un índice de mensaje llamado W , mediante un conjunto de símbolos codificados llamados $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ que al ser transmitidos por el canal, se

distorsionan debido a la interacción con el medio en función de la matriz de distribución de probabilidad de entrada $p(Y_i | X_i)$, generando un conjunto de símbolos $\mathbf{Y} = \{y_1, y_2 \dots y_n\}$; al ser decodificados dichos símbolos, producirán una respuesta de tipo \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 la variable de ruido del canal de tipo $\hat{W} = f(W)$ [25].

La relación logarítmica entre los símbolos de entrada \mathbf{X} y los símbolos de salida \mathbf{Y} se encuentra definida por la matriz de transición de probabilidad condicional del canal $p(Y_i | X_i)$. Las Ecuaciones 2.2 a 2.4 definen la entropía de la fuente $H(X)$, entropía de salida del canal $H(Y)$ y la entropía condicional $H(X|Y)$ respectivamente [26]:

$$H(X) = \sum_{x_i \in \mathbf{X}} p(x_i) \log_2 \left(\frac{1}{p(x_i)} \right) \quad \text{Ecuación (2.2)}$$

$$H(Y) = \sum_{y_i \in \mathbf{Y}} p(y_j) \log_2 \left(\frac{1}{p(y_j)} \right) \quad \text{Ecuación (2.3)}$$

$$H(X|Y) = \sum_{y_i \in \mathbf{Y}} p(y_i) \sum_{x_i \in \mathbf{X}} p(x_i, y_j) \log_2 \left(\frac{1}{p(x_i|y_j)} \right) \quad \text{Ecuación (2.4)}$$

Del mismo modo, la información mutua de la entrada y la salida del canal de comunicación se denota como $I(X, Y)$ y se define en términos de [27]:

$$I(X; Y) = H(Y) - H(Y|X) = H(X) - H(X|Y) \quad \text{Ecuación (2.5)}$$

En [28] se define que son las características del canal, los que determinan la matriz de probabilidad de transición de estados $p(Y_i | X_i)$, sin embargo, las probabilidades de los símbolos de entrada se encuentran bajo el control de la codificación del canal discreto; el valor de $I(X, Y)$ está sujeto a la distribución probabilística de símbolos de entrada $p(X_i)$, cantidad que depende únicamente de las características del canal bajo la probabilidad condicional $p(Y_i | X_i)$, dicha cantidad es llamada capacidad del canal y es denotada con el símbolo C definida en la ecuación 2.6 como:

$$C_{bit/uso\ canal} = \max_{p(x_i)} I(X, Y) \quad \text{Ecuación (2.6)}$$

- Capacidad del Canal Continuo sin memoria

En un canal de comunicaciones continuo, cuyo alfabeto de símbolos de entrada $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ representan muestras en el tiempo de una variable continua asociada a una función de densidad de probabilidad $P(X)$, donde la variable X se puede concebir como la representación de alguna forma de onda de señal; se define la potencia promedio de la señal P en términos de:

$$P = \int_{\mathbf{X}} x^2 p(x) dx \quad \text{Ecuación (2.7)}$$

Del mismo modo, y considerando el canal continuo, se define la entropía diferencial de la fuente $h(X)$ en la ecuación 2.8, donde se establece que para dicha potencia promedio (ecuación 2.7), la función de densidad de probabilidad Gaussiana es la única bajo la cual, la entropía de la fuente es máxima $h_{max}(X)$ en términos de:

$$h(X) = - \int_{\mathbf{X}} p(X) \log_2 p(X) dx \quad \text{Ecuación (2.8)}$$

$$h_{max}(X) = \frac{1}{2} \log_2(2\pi\sigma_{in}^2) + \frac{1}{2} \log_2(e) \quad \text{Ecuación (2.9a)}$$

$$= \frac{1}{2} \log_2(2\pi\sigma_{in}^2 e) \quad \text{Ecuación (2.9b)}$$

Para determinar la capacidad C de una canal continuo, con una distribución de ruido de tipo Gaussiano $h(Z)$, se determina, la salida de los símbolos de Y_i con respecto a los símbolos de entrada X_i y la señal de ruido aditivo Z , en términos de $Y_i = X_i + Z$, y dado que la información mutua del canal Gaussiano está definida como [29]:

$$I(X; Y) = h(X) - h(X|Y) \quad \text{Ecuación (2.10a)}$$

$$I(X; Y) = \frac{1}{2} \log_2(2\pi e \sigma_{out}^2) - \frac{1}{2} \log_2(2\pi e \sigma_{ch}^2) \quad \text{Ecuación (2.10b)}$$

$$I(X; Y) = \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{\sigma_{out}^2}{\sigma_{ch}^2} \right) \quad \text{Ecuación (2.10c)}$$

Considerando $\sigma_{out}^2 = \sigma_{in}^2 + \sigma_{ch}^2$ & $\sigma_{in}^2 = P$, $\sigma_{ch}^2 = N_0 B$

$$I(X; Y) = \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{\sigma_{in}^2 + \sigma_{ch}^2}{\sigma_{ch}^2} \right) \quad \text{Ecuación (2.11)}$$

$$I(X; Y) = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0 B} \right) \quad \text{Ecuación (2.12)}$$

De lo anterior, se concluye que la ecuación 2.12, también corresponderá a la capacidad del canal Gaussiano, ya que la distribución, maximiza la entropía de la fuente de modo que, de manera equivalente podemos expresar 2.12 en términos de un límite superior para la información mutua como:

$$C_{bit/uso\ del\ canal} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0 B} \right) \quad \text{Ecuación (2.13)}$$

Es posible, partiendo de la ecuación 2.13 relacionar la capacidad de un canal de comunicación Gaussiano con el ancho de banda, y la tasa de transmisión del sistema, en términos de la cantidad de información que representa cada pulso propagado con respecto al periodo de dos pulsos consecutivos de modo que:

$$R_b [bps] \leq C [bps] = \frac{1}{2T} \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0 B} \right) \quad \text{Ecuación (2.14)}$$

Si se asume que cada uno de los pulsos estará representado en el dominio del tiempo por una señal de tipo sinc $\left(\frac{t}{T}\right)$, su ocupación en el dominio de la frecuencia corresponderá a un ancho de banda (B) de $\frac{1}{2T}$ Hz con lo cual, se puede expresar la capacidad del canal en *bit/s* en términos de:

$$C_{[bit/s]} = B \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0 B} \right) \quad \text{Ecuación (2.15)}$$

La ecuación 2.15, define “el límite fundamental de la tasa de transmisión que se puede conseguir sobre un canal Gaussiano limitado en banda y una señal limitada en potencia, con una probabilidad de error arbitrariamente baja”, sin embargo, dicha ecuación debería considerar algunos factores adicionales asociados a la evolución de los nuevos sistemas de comunicaciones ópticos DWDM de tipo NG-PON donde se requieren cambios con respecto a:

- El Incremento de la tasas de transmisión nominal a nivel de acceso alrededor de los 40Gbps propuestas para la segunda fase de desarrollo NG-PON.
- La posibilidad de coexistencia de diferentes tasas binarias en una misma arquitectura de red definidas en los estándares XG-PON y XGS-PON.
- La posibilidad de asignar dinámicamente el espectro D-RWA (dynamic routing wavelength assignment) basado en la necesidad de la prestación del servicio.
- La posibilidad de implementar estándares multinivel dentro de la configuración de los nuevos sistemas DWDM, sin necesidad de migrar el medio físico o de evolucionar la arquitectura de red.
- Mejoras en la respuesta lineal y no lineal del sistema con respecto a la interacción de la señal propagada en el medio.

2.3.2 Eficiencia Espectral

Para un sistema de comunicaciones basado en fibra óptica, es posible determinar, la eficiencia espectral en términos de la ecuación 2.15, en donde, los límites máximos de la potencia de la señal permisible en el sistema, definirán un crecimiento logarítmico como una función de la relación señal a ruido del canal,

siendo el ruido un factor constante para toda señal propagada [27]; según estudios realizados en [30-35] la medida de la eficiencia espectral, dependerá de factores como la técnica de modulación, la técnica de detección, el régimen de propagación, el ancho de banda ocupado por el canal, la relación señal a ruido máxima alcanzable limitada por las penalidades de potencia; donde al aproximarse al límite máximo de la capacidad, requerirá incrementar significativamente la complejidad del sistema.

De manera general se puede asociar la eficiencia espectral η en términos de la capacidad del canal y el ancho de banda total ocupado, definido como:

$$\eta_{bps/Hz} = C_{[bps]}/B_{[Hz]} \quad \text{Ecuación (2.16)}$$

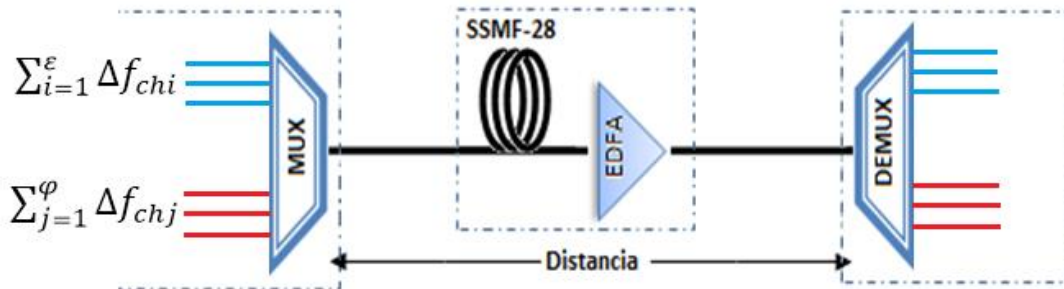


Figura 2.19 asignación dinámica del espectro para la capacidad máxima del canal en sistemas DWDM XG/NG-PON [Por los Autores]

Como se aprecia en la figura 2.19, dado que para un sistema óptico basado en la multiplexación por división de longitud de onda podemos controlar ciertas variables como i) número de canales co-propagantes, ii) espaciado por canal, iii) potencia de la señal de entrada y iv) el régimen de propagación, es posible expresar la ecuación 2.16 como una adaptación a la teoría de la información en términos de los nuevos estándares de tipo NG-PON como:

$$C_{1[bit/s]} = B_{ch1} \log_2 \left(1 + \frac{P_{sch1}}{N_0 B} \right) \quad \text{Ecuación (2.17)}$$

$$C_{2[bit/s]} = B_{ch2} \log_2 \left(1 + \frac{P_{sch2}}{N_0B} \right) \quad \text{Ecuación (2.18)}$$

Donde para transmisiones de tipo serial, multimodo y con esquemas de modulación simples, sin que la correlación lineal y no lineal de los canales propagantes afecten en el medio; y solo considerando la respuesta de tipo lineal generadas por las penalidades de potencia⁸ y definiendo que la modificación de la longitud de onda de cada canal no produce cambios en la relación señal a ruido y manteniendo la misma potencia de salida para los ϵ canales multiplexados de tipo i y los φ canales multiplexados de tipo j; la capacidad neta del sistema estará dada en términos de:

$$C_{tot} = B_{ch1} \log_2 \left(1 + \frac{P_{sch1}}{N_0B} \right) + B_{ch2} \log_2 \left(1 + \frac{P_{sch2}}{N_0B} \right) \quad \text{Ecuación (2.19)}$$

Debido a que un sistema basado en Fibra óptica, es posible multiplexar diferentes canales sobre el mismo medio permitiendo la propagación de hasta 128 o más longitudes de onda [24], se puede generalizar la ecuación 2.19 en términos de:

$$C_{tot} = \left(\sum_{i=1}^{\epsilon} B_{chi} + \sum_{j=1}^{\varphi} B_{chj} \right) \log_2 \left(1 + \frac{P_{s-ch}}{N_0B} \right) \quad \text{Ecuación (2.20)}$$

La ecuación 2.20 define que para un sistema híbrido de ϵ canales de tipo i (por ejemplo; 2.5Gbps de acceso) y φ canales de tipo j (por ejemplo; 10Gbps de acceso), la relación entre el ancho de banda ocupado y la tasa de transmisión nominal se ve reflejada en un incremento aproximado de cuatro veces la ocupación espectral de la señal por bps transmitido (ancho de banda percentil > 96%), es decir, una longitud de onda de 10Gbps ocupará cuatro veces más ancho de banda que una de 2.5Gbps, si en ese proceso se mantienen constantes los parámetros de

⁸ Es posible dentro de cualquier sistema de telecomunicaciones basado en fibra óptica, controlar la excitación de fenómenos no lineales en términos de la potencia máxima utilizada en el sistema con el fin de no provocar una respuesta no lineal a la señal propagante en el medio.

configuración, del mismo modo, se espera que una señal de Acceso 4C requiera cuatro veces más OSNR que una señal de acceso C [35], lo que significa que en la señal de 10Gbps solo se dispone de $\frac{1}{4}$ de energía de bit en comparación con una señal de 2.5Gbps, requiriendo 4 veces más potencia promedio para mantener la misma relación OSNR, la ecuación 2.20 aun no considerar el espaciamento de los canales ópticos, ni la respuesta lineal o no lineal del medio.

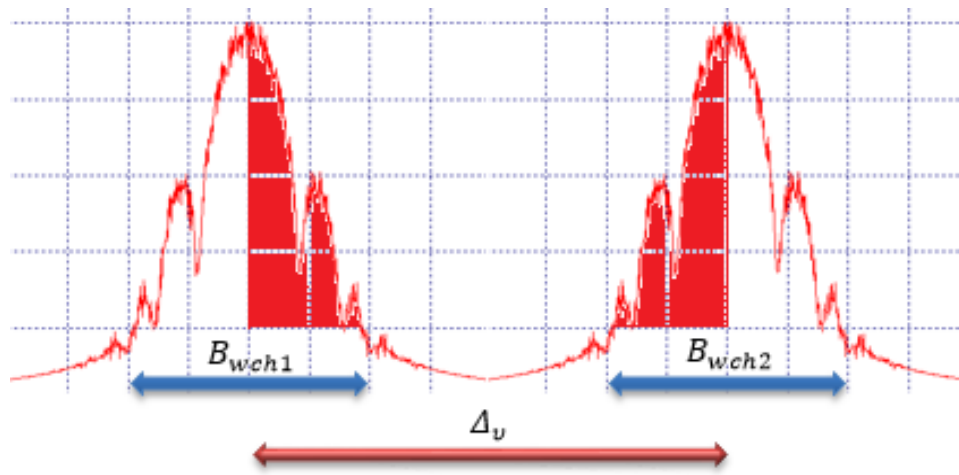


Figura 2.20 espaciamento óptico vs ancho de banda del canal
[Por los Autores]

Partiendo de la figura 2.20 es posible calcular el límite de la eficiencia espectral del sistema en términos del parámetro Δ_v , el cual representara el espaciamento entre canales, de modo que, si el ancho de banda de los canales ocupados es menor que el espaciamento de los canales adyacentes, la eficiencia espectral máxima en un ancho de banda mínimo de un sistema óptico estará dado por:

$$\eta_{bps/Hz} = \frac{(C_{Och1}[bps] + C_{Och2}[bps])}{\left(\frac{B_{Och1}[Hz]}{2} + \frac{B_{Och2}[Hz]}{2}\right) + \Delta_v [Hz]} \quad \text{Ecuación (2.21)}$$

La Ecuación 2.21 implica que solo en el caso en el que el ancho de banda lateral de cada uno de los espectros simétricos propagantes en el medio este

contenido dentro del espaciamento implementado en el sistema DWDM, es posible determinar su eficiencia espectral en términos de, por ejemplo dos canales de 2.5Gbps de velocidad de acceso y un ancho de banda ocupado de 10GHz, contando con una grilla espectral de 100GHz como:

$$\eta = \frac{2.5[\text{Gbps}] + 2.5[\text{Gbps}]}{\left(\frac{10[\text{GHz}]}{2} + \frac{10[\text{GHz}]}{2}\right) + 100[\text{GHz}]} = 0.0455 \text{ bps/Hz}$$

Sin embargo es posible controlar el espaciamento óptico permitiendo disminuir hasta un límite máximo la distancia entre canales adyacentes sin producir interferencia inter-simbólica, dependiente de la respuesta del esquema de modulación y la respuesta del medio con respecto al régimen de propagación (penalizaciones de potencia), de modo que, si se implementa múltiples canales, la eficiencia máxima total en términos del uso del ancho de banda estará dada por; la capacidad total del sistema dividida sobre la mitad del ancho de banda inferior ocupado por el primer canal óptico de la grilla espectral (frecuencia relativa más baja), más la mitad del ancho de banda superior ocupado por el último canal óptico de la grilla espectral (frecuencia relativa más alta), más el espaciamento por canal representado como $(N - 1)\Delta_\nu$ (N corrimientos de frecuencia) y debería ser una medida equivalente representada por:

$$\eta_{\max\left[\frac{\text{bps}}{\text{Hz}}\right]} = \frac{\sum_{i=1}^{\epsilon} B_{chi} \log_2\left(1 + \frac{P_s - chi}{N_0 B}\right) + \sum_{j=1}^{\phi} B_{chj} \log_2\left(1 + \frac{P_s - chj}{N_0 B}\right)}{\frac{(B_{ch1} + B_{chj})}{2} + (N-1)\Delta_\nu} \quad \text{Ecuación (2.22)}$$

La ecuación 2.22 “adaptación de la teoría de la información para el régimen de propagación lineal en arquitecturas de red de tipo NG-PON”, implica que es posible controlando los parámetros: número de Canales, P_s , Δ_ν y B_{ch} , incrementar la eficiencia espectral en un sistema DWDM, tabla 2.1.

Eficiencia espectral adaptada a los sistemas NG-PON				
C_{ch}	Canales	Δ_v	B_{ch}	P_s
Tasa de acceso nominal por canal	Número máximo de canales co-propagantes en el medio	Espaciamientos por canal adyacente	Ancho de banda ocupado por canal propagado	Potencia promedio por canal
limitación				
Máximo Teórico 40Gbps	256 canales Teóricos	25GHz Teóricos	Depende del formato de modulación	Máxima Penalidades de potencia

Tabla 2.1 Variables y Limitaciones en la medida de la Eficiencia Espectral [Por los Autores]

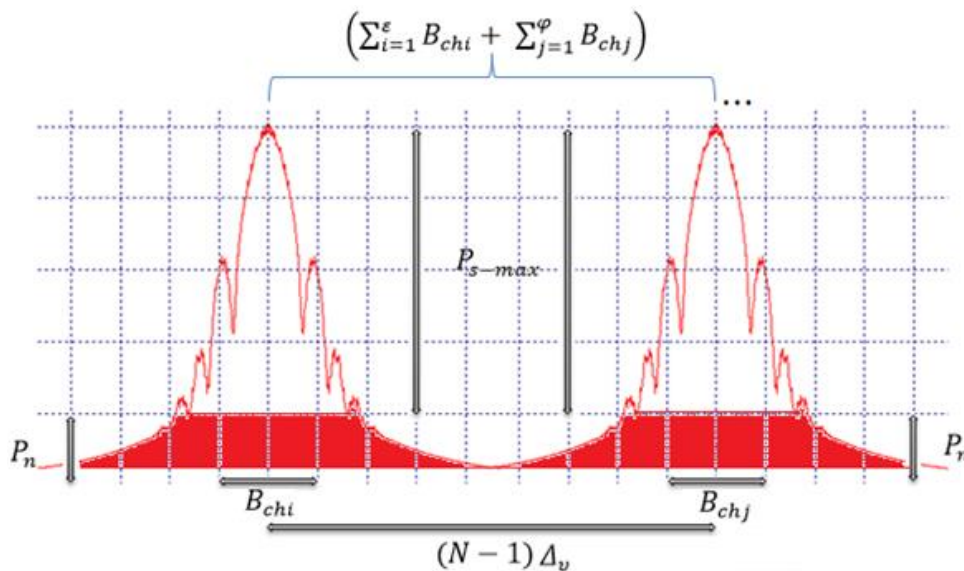


Figura 2.21 relación del comportamiento óptico en términos de la teoría de la información adaptada [Por los Autores]

Como se aprecia en la Figura 2.21, es posible relacionar todos los factores descritos en la ecuación 2.22 en términos del comportamiento espectral de cualquier cantidad de señales co-propagantes en un medio óptico, permitiendo de este modo

manipular dichas variables en función de mejorar la eficiencia espectral, sin embargo, dicha ecuación presenta las siguientes limitaciones.

- Se debe garantizar una respuesta predominantemente lineal en el sistema óptico.
- El espaciamiento de los canales ópticos no puede ser inferior al ancho de banda ocupado por el espectro de la señal óptica de cualquier canal.
- La potencia de transición de los canales ópticos no puede ser menor a la sensibilidad del receptor, ni superar el nivel máximo donde se estimulan las penalidades de potencia.

Nota del Autor.

Mediante el desarrollo del presente capítulo se demostró que es posible adaptar los conceptos de la teoría de la información en términos de los nuevos estándares de las redes DWDM enmarcadas en sistemas de tipo XG-PON y NG-PON, donde, la manipulación de parámetros y variables de suma importancia, afectaran positivamente o negativamente el desempeño del sistema, más específicamente la eficiencia espectral, del mismo modo se demostrara que mediante la implementación de formatos de modulación avanzados es posible alcanzar mayores eficiencias espectrales sin comprometer el desempeño de la red.

Referencias

- [1] H. S. Abbas, M. A. Gregory, “*The next generation of passive optical networks: A review*”, Journal of Network and Computer Applications, 67, 53-74, 2016.

- [2] I. M. Mohamed, M. S. B. Ab-Rahman, “Options and challenges in next-generation optical access networks (NG-OANs)”, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 126(1), 131-138, 2015.
- [3] K. Borzycki, “FTTx Access Networks: Technical Developments and Standardization. In *Broadband Communications Networks-Recent Advances and Lessons from Practice*”, IntechOpen, 2018.
- [4] E. Lach, W. Idler, “Modulation formats for 100G and beyond”, *Optical Fiber Technology*, 17(5), 377-386, 2011.
- [5] K. Tanaka, A. Agata, Y. Horiuchi, “IEEE 802.3 av 10G-EPON standardization and its research and development status”, *Journal of Lightwave Technology*, 28(4), 651-661, 2010.
- [6] S. D. N., UIT, “Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics”, Recommendation ITU-T G 984.1, Ginebra, 2012.
- [7] A. Srivastava, “Next generation PON evolution. In *Broadband Access Communication Technologies*”, International Society for Optics and Photonics, Vol. 8645, p. 8645092013, 2013.
- [8] A. Kaur, M. L. Singh, A. Sheetal, “Simulative analysis of co-existing 2.5 G/10 G asymmetric XG-PON system using RZ and NRZ data formats”, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 125(14), 3637-3640, 2014.
- [9] F. J. Effenberger, “The XG-PON system: Cost effective 10 Gb/s access”, *Journal of lightwave technology*, 29(4), 403-409, 2011.
- [10] J. F. P. Basto, “Evolution of FTTH networks for ng-POn2”, *PT inovação e Sist*, 9, 2014.

- [11] E. Wong, “*Next-generation broadband access networks and technologies*”, Journal of lightwave technology, 30(4), 597-608, 2012.
- [12] E. Wong, “*Next-generation broadband access networks and technologies*”, Journal of lightwave technology, 30(4), 597-608, 2012.
- [13] S. D. N., UIT, “*40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Definitions, abbreviations and acronyms*”, Recommendation ITU-T G 989, Ginebra, 2015.
- [14] S. D. N., UIT, “*40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements*”, Recommendation ITU-T G 989.1, Ginebra, 2015.
- [15] L. Tao, Y. Ji, J. Liu, at all, “Advanced modulation formats for short reach optical communication systems”, IEEE network, 27(6), 6-13, 2013.
- [16] L. N. Binh, “*Optical fiber communication systems with Matlab and Simulink models*”, CRC Press, ISBN 9781482217513, 2014.
- [17] L. Liao, D. Samara-Rubio, M. Morse, at all, “*High speed silicon Mach-Zehnder modulator*”, Optics Express, 13(8), 3129-3135, 2005.
- [18] S. Zhang, “*Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System*”, Doctoral dissertation, University of Kansas, Electrical Engineering and Computer Science, 2004.
- [19] I. Kaminow, T. Li, A. E. Willner, “*Optical fiber telecommunications VB: systems and networks*”, Elsevier, ISBN: 9780123741721, 2010.
- [20] D. D. van den Borne, “*Robust optical transmission systems: modulation and equalization*”, Doctoral dissertation, Technische Universiteit Eindhoven, DOI: 10.6100/IR633535, 2008.

- [21] L. N. Binh, “*Advanced digital optical communications*”, Taylor and Francis, ISBN-10: 9781482226522, 2015.
- [22] J. Gowar, “*Optical Communication Systems (Optoelectronics)*”, New York: Prentice-Hall, ISBN-13: 978-0136387275, 1993.
- [23] G. Gómez, J. F. Grijalba, “*Análisis del desempeño de formatos de modulación en comunicaciones ópticas sobre redes WDM*”, Tesis de Pregrado, Universidad Del Cauca, Mayo 2010.
- [24] P. J. Winzer, R. J. Essiambre, “*Advanced optical modulation formats*”, Proceedings of the IEEE, 94(5), 952-985, 2006.
- [25] C. E. Shannon, “*A mathematical theory of communication*”, The Bell System Technical Journal, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656, July, October, 1948.
- [26] H. Simon, “*Sistemas de Comunicación*”, Madrid, España. Segunda edición, Limusa Wiley, ISBN 968-18-6307-0, 2001.
- [27] J. G. Proakis, “*Digital communications*”, 1995. McGraw-Hill, New York, ISBN-13: 978-0072957167, 2007.
- [28] R. G. Gallager, “*Information theory and reliable communication*”, New York: Wiley, ISBN-13: 978-0471290483, 1968.
- [29] E. Desurvire, “*Classical and quantum information theory: an introduction for the telecom scientist*”, Cambridge university press, ISBN-13: 978-0521881715, 2009.
- [30] J. M. Kahn, K. P. Ho, “*Ultimate spectral efficiency limits in DWDM systems*”, In Proc. Optoelectronics Communications Conf (pp. 8-12), July, 2002.

- [31] K. P. Ho, J. M. Kahn, "*Channel capacity of WDM systems using constant-intensity modulation formats*", In Optical Fiber Communication Conference (p. ThGG85), Optical Society of America, March, 2002.
- [32] A. Mecozzi, M. Shtaif, "*On the capacity of intensity modulated systems using optical amplifiers*", IEEE Photonics Technology Letters, 13(9), 1029-1031, 2001.
- [33] E. E. Narimanov, P. Mitra, "*The channel capacity of a fiber optics communication system: Perturbation theory*", Journal of lightwave technology, 20(3), 530, 2002.
- [34] P. P. Mitra, J. B. Stark, "*Nonlinear limits to the information capacity of optical fibre communications*", Nature, 411(6841), 1027. 2001.
- [35] I. Brener, B. Mikkelsen, K. Rottwitt, et al., "*Cancellation of all Kerr nonlinearities in long fiber spans using a LiNbO₃ phase conjugator and Raman amplification*", In Optical Fiber Communication Conference (p. PD33), Optical Society of America, March 2000.
- [36] D. F. Alzate, A. Cárdenas, "*Retos en la transmisión de 40/100 Gb/s sobre fibra óptica*", Revista en telecomunicaciones e informática, 1(2), 2011.

CAPITULO 3.

MEJORA DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL IMPLEMENTANDO FORMATOS AVANZADOS DE MODULACIÓN EN REDES DWDM

Con el desarrollo del presenta capítulo, se define la metodología de simulación la cual permitirá generar los diferentes escenarios para cada uno de los formatos de modulación escogidos, del mismo modo la herramienta de simulación la cual estará basada en OptSim® de synopsys, definida como *“una herramienta de software premiada para el diseño y la simulación de sistemas de comunicaciones ópticos a nivel de propagación de señal, Con técnicas de simulación de última generación”*, donde se realizaran las mediciones de la eficiencia espectral basadas en la adaptación de la teoría de la información generada en capítulos anteriores, implementando los formatos de modulación avanzados DPSK y DQPSK.

3.1 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

OptSim® [1-4] es una herramienta de simulación y modelado, diseñada para sistemas de comunicación por fibra óptica adaptados a redes WDM, DWDM, CATV, entre otras aplicaciones, y soportada por plataformas Windows y UNIX, es utilizada para el diseño, simulación y análisis de sistemas de comunicaciones ópticos, del mismo modo, OptSim® es un entorno de simulación que soporta el diseño y la evaluación del desempeño de sistemas de comunicaciones ópticos. Las facilidades de visualización y post-procesamiento de datos proporcionan una interface gráfica de medición flexible que actúa como un conjunto de instrumentos virtuales de laboratorio. La herramienta de simulación puede ser utilizada para un amplio rango de aplicaciones, entre las cuales se pueden destacar: diseño y poptimización de los enlaces, análisis de las pérdidas y efectos lineales y no lineales, investigación de nuevos esquemas de modulación, entre otros.

El entorno OptSim®, define dos técnicas de simulación las cuales pueden ser utilizadas dependiendo del tipo de resultados que se deseen obtener, simulaciones en modo bloque [3], “la cual es la técnica de simulación tradicional” y simulaciones en modo muestra [4]; “la cual es totalmente temporal, siendo la más fiel del mercado”. En el modo bloque, la secuencia de entrada se evalúa por bloque hasta el punto de salida y es la más usado actualmente. Por otro lado, el modo muestra resulta útil para escoger entre diferentes tipos de variaciones en el diseño de un enlace de fibra óptica, este modo se implementa muestra a muestra, mejorando el uso de la memoria de la secuencia en cada punto de interés. En la figura 3.1, se observan las dos técnicas de simulación con las cuales cuenta la herramienta de simulación OptSim®.

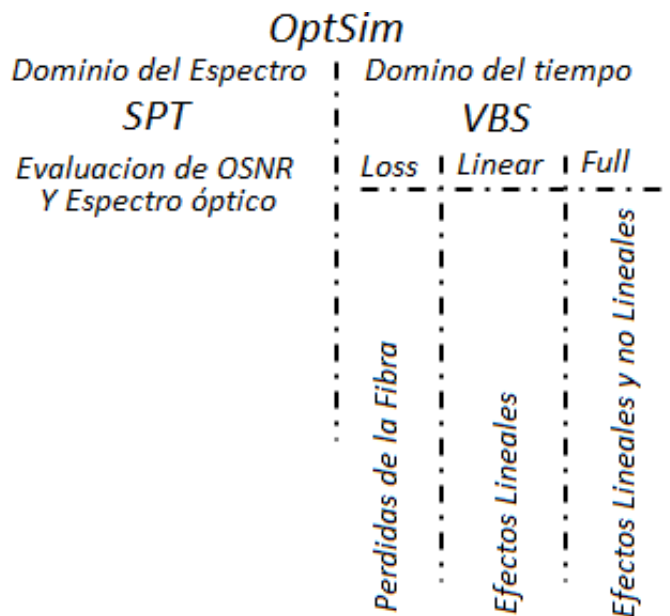


Figura 3.1 Técnicas de simulación de la Herramienta OptSim® [2].

- **Técnica de Ancho de Banda Variable (VBS)**

Es una simulación en el dominio del tiempo, la cual es el centro del entorno de simulación OptSim, donde las señales son propagadas a través de las redes como muestras en el dominio del tiempo, esta técnica es utilizada para simular tanto los efectos lineales y no lineales para las componentes ópticas y eléctricas [3].

- Técnica de Propagación Espectral (SPT)

Es una simulación en el dominio del espectro, donde las señales ópticas son propagadas como espectros de potencia, cada componente es caracterizada por una función de transferencia que no toma en cuenta las no linealidades de la fibra, sin embargo, esta técnica es utilizada por VBS para estimar los puntos operativos tales como EDFA's, donde se requiere un conocimiento previo del espectro de potencia promedio de entrada [4].

El análisis de los resultados en el entorno de simulación pueden correlacionarse con los valores de los parámetros establecidos en el caso de estudio, donde se realiza un análisis de los efectos del ruido, diafonía, la fluctuación de fase y las variaciones en los componentes, entre otros, utilizando metodologías cuasi-analíticas. De la misma forma, Los resultados de simulación que entrega la herramienta incluyen diagramas de forma de onda de la señal, diagramas de ojo, BER, potencia óptica recibida, mapas de potencia y dispersión, entre otros [1,2].

3.2 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Para definir la metodología de simulación, se tienen en cuenta los documentos "introducción a los simuladores" [5] del manual de OMNET++ y el documento "ingeniería del software, un enfoque práctico" [6]. En donde simulación se define como *"una técnica que imita el comportamiento de un sistema del mundo real conforme evoluciona en el tiempo"*.

Existen varias características mediante las cuales pueden ser clasificados los tipos de simulación, como son: la simulación estática, la cual representa un sistema en un solo instante de tiempo; la simulación dinámica, la cual representa la evolución de un sistema en diferentes instantes de tiempo; la simulación determinística, que no contiene ninguna variable aleatoria; la simulación aleatoria, la cual representa sistemas que contiene variables aleatorias; la simulación continua, donde el comportamiento del sistema cambia de forma continua en el

tiempo; y la simulación discreta, donde el comportamiento del sistema cambia solo para instantes de tiempo concretos llamados eventos [5]. Dentro de la metodología de simulación, en [6] se definen un modelo adaptado para el desarrollo de las simulaciones, donde se detalla la metodología y sus etapas en términos de:

- Definición del sistema: realizar un análisis preliminar para determinar la posible interacción con otros sistemas, restricciones y variables involucradas.
- Formulación del modelo: definir los resultados que se esperan, precisar y construir el modelo que llevará a la obtención de los resultados.
- Colección de datos: definir con precisión y claridad los datos que requiere el modelo para llegar a los resultados deseados.
- Implementación del Modelo: definir el lenguaje de programación y/o herramienta de simulación a utilizar de acuerdo a las necesidades y objetivos del proyecto.
- Validación: determinar falencias en la formulación del modelo o las variables involucradas.
- Interpretación: análisis de resultados con el fin de implementar mejoras para generar mejores resultados.
- Documentación: de tipo técnica, en la que se describe el procesamiento de los datos y de tipo manual, en la que se describe el modelo desarrollado.

3.2.1 Algoritmo Simplificado para la Simulación

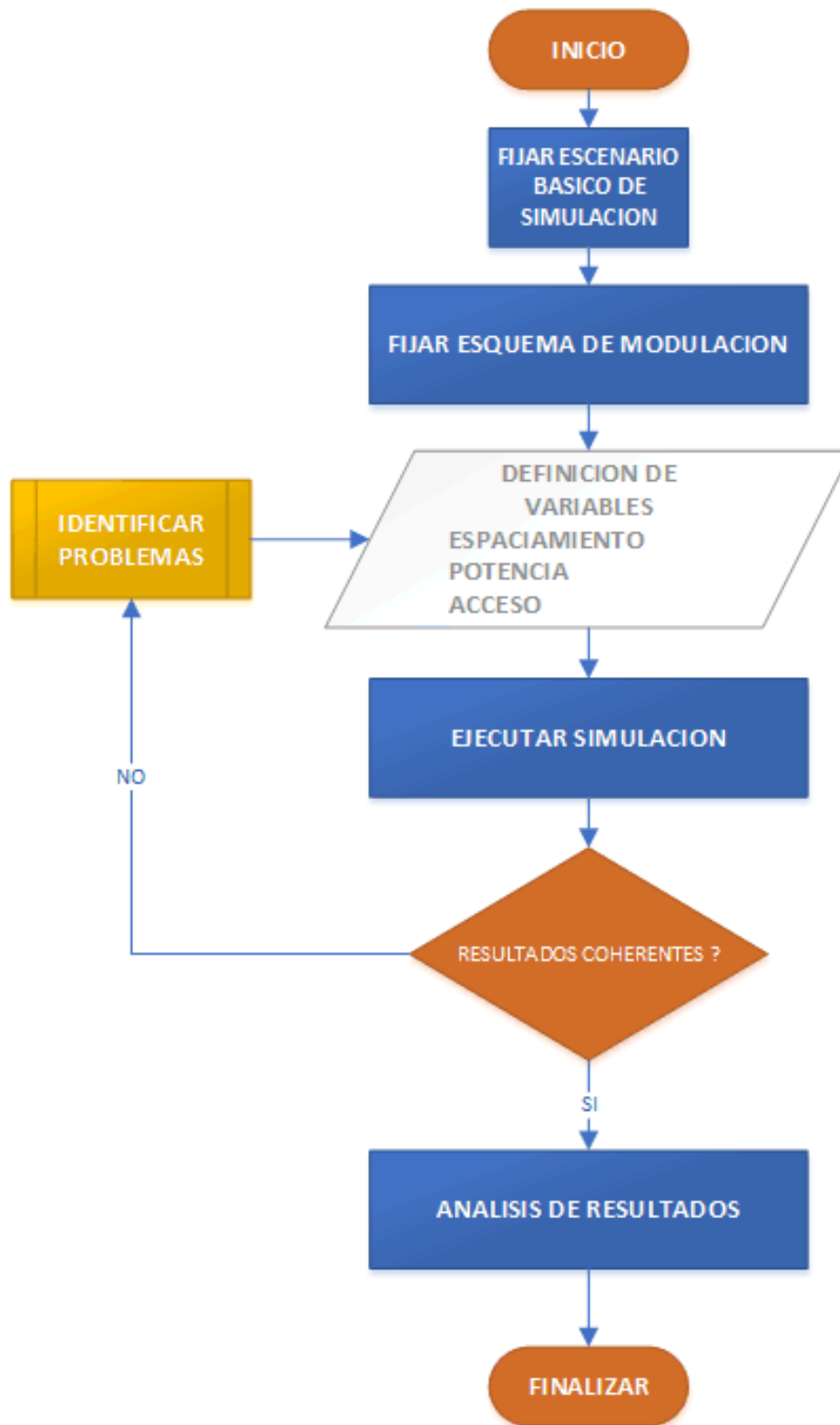


Figura 3.2 Algoritmo de Simulación para la Herramienta OptSim®

3.2.2 Características Generales del entorno de Simulación

Es necesario determinar las características generales del modelo de red sobre el cual se realizarán las diferentes simulaciones para los respectivos casos de estudio, con la finalidad de analizar el sistema DWDM propuesto como una respuesta de su medida de la eficiencia espectral en términos de la implementación de los formatos avanzados de simulación basados en DPSK y DQPSK, manteniendo las arquitecturas de red propuestas en los diferentes estándares de tipo NG-PON; como se aprecia en la figura 3.3, el diagrama general del sistema DWDM partirá como un esquema básico propuesto en términos de:

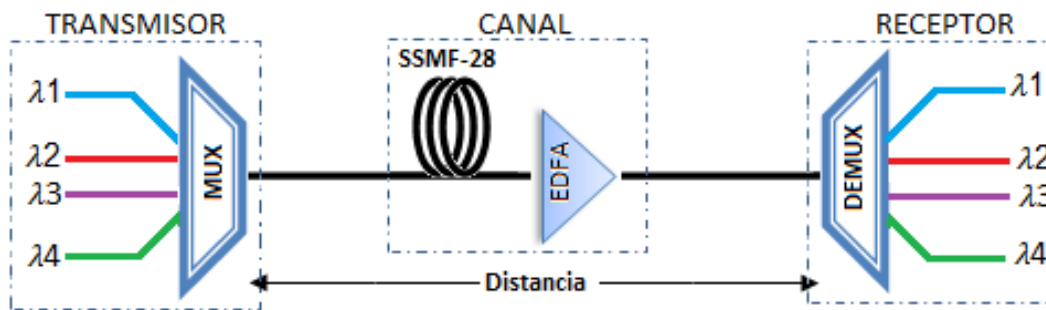


Figura 3.3 Esquema general de los escenarios de simulación.

Múltiples Longitudes de Onda implementadas a diferentes velocidades de transmisión de datos nominal con el fin de alcanzar una capacidad máxima de 40Gbps, la variación de los esquemas de modulación y los parámetros de configuración sucesibles a ser manipulados en la adaptación de la teoría de la información, y los elementos de red, fibra y dispositivos de amplificación y compensación, del mismo modo, se definen los parámetros objetivos de cada simulación en términos de i) BER $< 10^{-12}$ (teórico), ii) Factor Q = 7.2dB (teórico) y iii) Sensibilidad del Receptor > -30 dBm. La tabla 3.1 resume las características iniciales del sistema.

SECCIONES	ELEMENTOS COMUNES
Transmisor	Modulador Óptico Mach-Zehnder. Filtro Bessel. Láser CW, 1MHz de FWHM. Banda C alrededor de los 1550nm.
Medio	Estándar ITU-T G.652. Fibra SSMF-28 Corning. Amplificadores EDFA. Rejillas de compensación ideales.
Receptor	Sensibilidad de -30dBm. Filtro Eléctrico. Filtro Óptico de coseno rizado.
VARIABLES DEL MODELO	
Formatos de Modulación	DPSK - DQPSK
Espaciamientos por canal óptico	100Ghz – 50Ghz – 25Ghz - >25Ghz
Potencia del Canal Óptico	Máxima permisible para mantener un régimen de propagación predominantemente lineal
Distancia del Enlace ⁹	Teórica dentro del estándar DWDM 80Km
Acceso Nominal	2.5Gbps – 10Gbps – 40Gbps

Tabla 3.1 Características Generales del escenario de simulación

⁹ A pesar de que los estándares definidos por FSAN se encuentran enmarcados de los 20Km a los 40Km de máxima distancia, es importante lograr enlaces de 80Km con el fin de generar convergencia y escalabilidad en las arquitecturas de red DWDM actuales.

Una vez identificadas las características generales del modelo, se procederá a definir las variables de medición y los casos de estudio que permitirán realizar un análisis comparativo, con el fin de detectar las mejoras que se pueden generar con respecto a la eficiencia espectral de un sistema DWDM para una capacidad máxima de 40Gbps, implementando formatos avanzados de modulación y mediante la aplicación de la adaptación del teorema de la capacidad de la información propuesto en el capítulo 2, de modo que, se define la siguiente metodología:

Caso de estudio I - Basado en DPSK	
Implementación	finalidad
16 x 2.5Gbps de Acceso	Alcanzar la capacidad total requerida en la red de 40Gbps para XG-PON
4 x 10Gbps de Acceso	Alcanzar la capacidad total requerida en la red de 40Gbps para XGS-PON
1 x 40Gbps de Acceso	Alcanzar la capacidad total requerida en la red de 40Gbps para NG-PON (futuro del estándar, aún no está definido)
Caso de estudio II - Basado en DQPSK	
4 x 10Gbps de Acceso	Alcanzar la capacidad total requerida en la red de 40Gbps para XGS-PON
1 x 40Gbps de Acceso	Alcanzar la capacidad total requerida en la red de 40Gbps para NG-PON (futuro del estándar, aún no está definido)

Tabla 3.2 Definición de los Casos de Estudio Basados en DPSK y DQPSK

- Parámetros de monitoreo óptico:

- BER – tasa de errores de Bit
- FACTOR Q – Factor de Calidad por canal
- OSNR – Relación señal a ruido óptica
- S_{RX} – Sensibilidad del Receptor

- Variables de medición y Control:

C_N – Capacidad nominal por longitud de onda: se presenta como la capacidad neta binaria propagada a nivel de acceso.

C_{TOT} – Capacidad total del sistema co-propagante: 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.

η_{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

η_{dist} – Eficiencia espectral Distribuida Teórica del sistema: se presenta como una relación de la capacidad total generada en el sistema vs el espaciamiento óptico.

η_{disa} – Eficiencia espectral Distribuida analítica por el sistema: se presenta como una relación de la ecuación 2.22 entre la capacidad total vs el espectro real ocupado y la relación SNR máxima permisible.

3.3 CASO DE ESTUDIO I – SOLUCIONES BASADAS EN EL FORMATO DE MODULACIÓN DPSK

Para el Desarrollo de este caso de estudio, se implementaran soluciones basadas en el formato de modulación DPSK para los esquemas de codificación que permitan alcázar el objetivo de la máxima capacidad total de la red de 40Gbps manteniendo los parámetros de monitoreo óptico objetivos definidos anteriormente. El diseño del sistema partirá de la codificación simple RZ ya que sigue siendo la más utilizada en los sistemas ópticos comerciales.

3.3.1 16 canales de 2.5Gbps de Acceso nominal – XG-PON

El esquema general del sistema óptico propuesto se puede apreciar en la figura 3.4, donde se implementa un total de 16 canales ópticos cada uno con una tasa de transmisión nominal de 2.5Gbps.

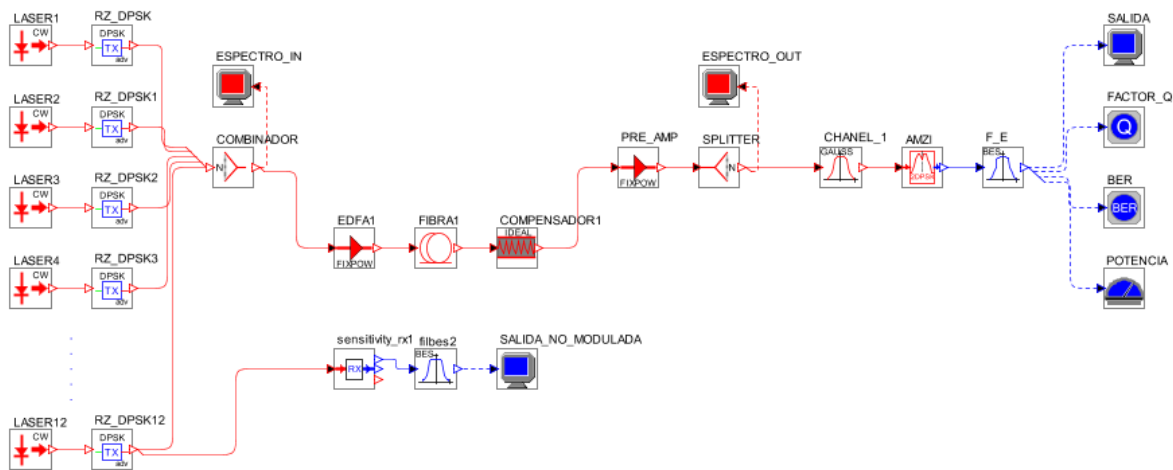


Figura 3.4 Modelo de Simulación de tipo XG-PON.

Dado que se debe garantizar un régimen de propagación predominantemente lineal, se procede a identificar el máximo nivel de potencia permisible en el sistema con el fin de no excitar las penalidades de potencia, las cuales generaran comportamientos de tipo no lineal, destacándose la mezcla de cuatro ondas FWM (*Four Wave Mixing*), la cual será un indicador de configuración del sistema, del mismo modo, dado que la Dispersion cromática es uno de los fenómenos predominantes y más complejos en la propagación lineal, se procederá a compensar de manera ideal mediante módulos “*Ideal Fiber Grating*”, suministrados por la herramienta; los parámetros generales de configuración se detallan en la tabla 3.3.

Sistema de tipo XG-PON1 – 16 canales de 2.5Gbps	
Parámetro	Valor
Velocidad de Acceso	2.5Gbps
Longitud inicial del enlace	80Km
Compensación DCF	ideal
Amplificación EDFA inicial	0dBm
Potencia del Laser Inicial	0dBm
Tipo de fibra	Corning SMF28-e 1550

Tabla 3.3 Parámetros de Configuración Generales DPSK

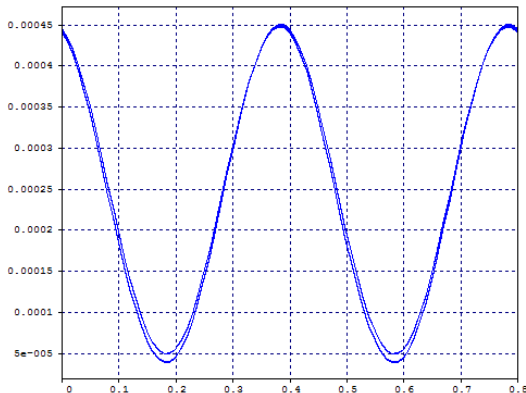


Figura 3.5 (a) señal no modulada a la salida del Tx

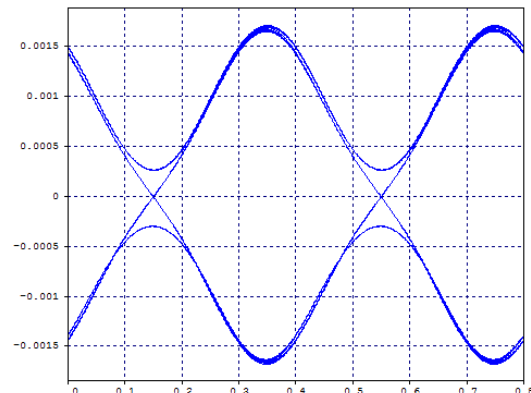


Figura 3.5 (b) señal modulada y recibida a la entrada del Rx

Para los parámetros de configuración inicial, se puede apreciar el comportamiento del sistema con respecto a las figuras 3.5 (a) y 3.5 (b), destacándose las variables de OPM enmarcadas en una $BER=1e^{-40}$, un factor $Q=40\text{dB}$, potencia en recepción alrededor de los -5dBm y una OSNR de 34dB en promedio, siendo el mejor caso de configuración permitido por la herramienta de simulación. Del mismo modo, para los valores iniciales de amplificación del láser y los dispositivos EDFA de Línea, el régimen de propagación se mantiene predominantemente lineal, solo con algunas alteraciones del espectro, como se aprecia en la figura 3.6.

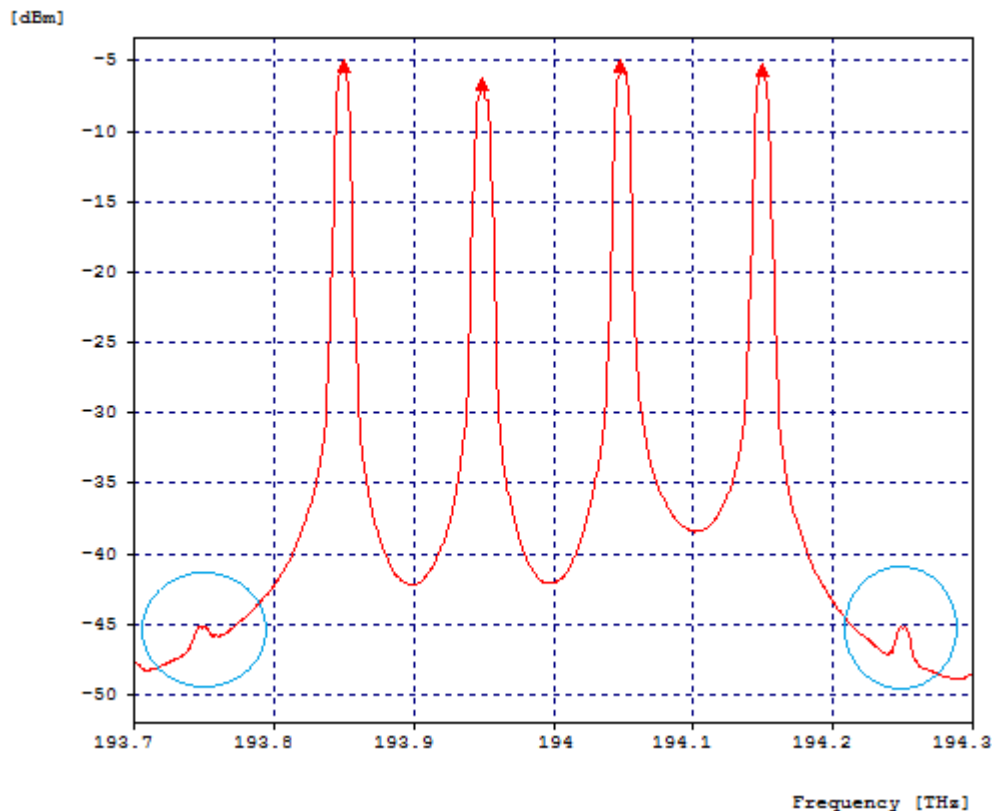


Figura 3.6 Espectro de Salida de la Co-propagación de los múltiples canales ópticos para el bloque de los 4 primeros canales

A continuación, se procederá a determinar la máxima tolerancia a las penalidades de potencia con el fin de establecer el máximo nivel permisible en el sistema sin excitar considerablemente los fenómenos No Lineales, de modo que se mantenga un régimen de propagación predominantemente lineal, de modo que las

variaciones se realizaran en el láser de los canales ópticos (rango máximo de 15dBm) y en los dispositivos EDFA de la Línea de Transmisión (rango máximo de 30dBm).

Variación en la Potencia de los canales ópticos	
Laser	Valor
	0dBm a 15dBm con variaciones de 2.5dBm

Tabla 3.4 (a) Variación de la potencia del laser

Como se puede apreciar en la figura 3.7, la potencia del láser no es un factor determinante en la excitación de los fenómenos no lineales, el cual no introduce ningún tipo de penalidad y su variación no aporta significativamente en un cambio de régimen de propagación, de modo que, estar trabajando con canales ópticos a 0dBm o a 15dBm no influirá en el comportamiento final del sistema, el mejor caso se presenta para una potencia de 7.5dBm por canal óptico (línea Roja).

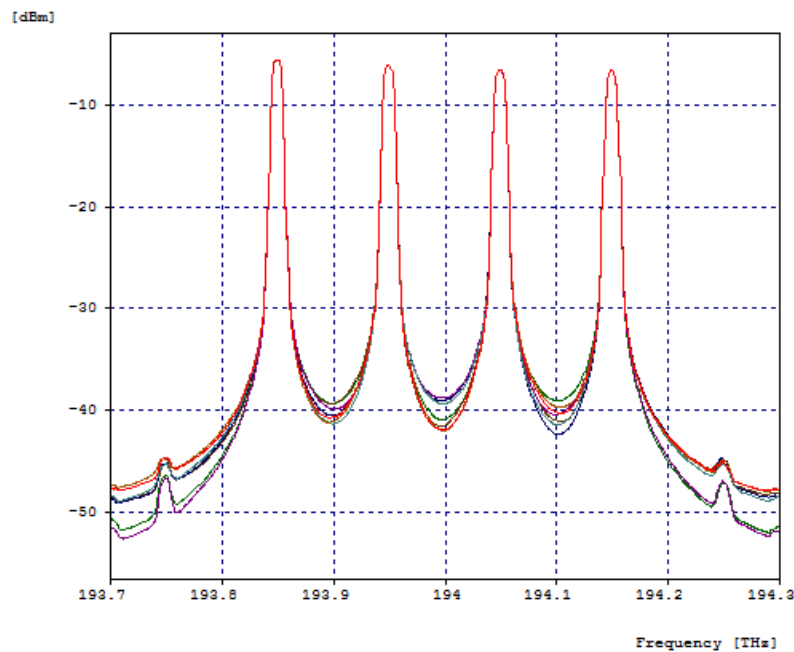


Figura 3.7 Espectro de salida para la variación de la potencia del canal óptico en un sistema DWDM

Variación en la Potencia de los dispositivos EDFA	
EDFA	Valor
	0dBm a 30dBm con variaciones de 5dBm

Tabla 3.4 (b) Variación de la potencia de los dispositivos EDFA

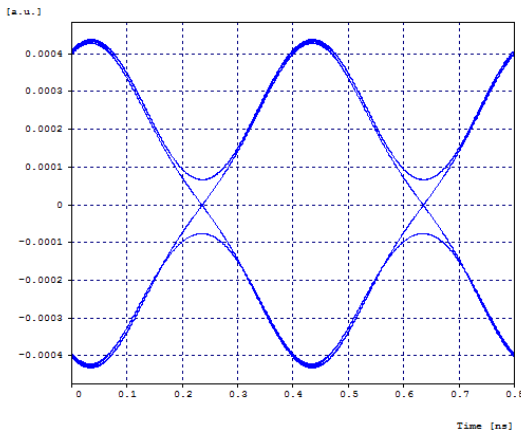


Figura 3.8 (a) salida modulada para una potencia de 0dBm en el EDFA

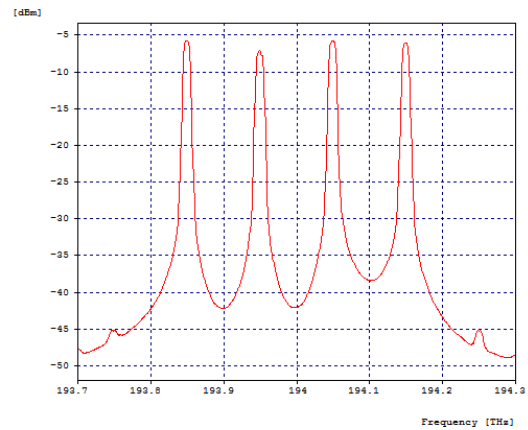


Figura 3.8 (b) Espectro de salida para una potencia de 0dBm en el EDFA

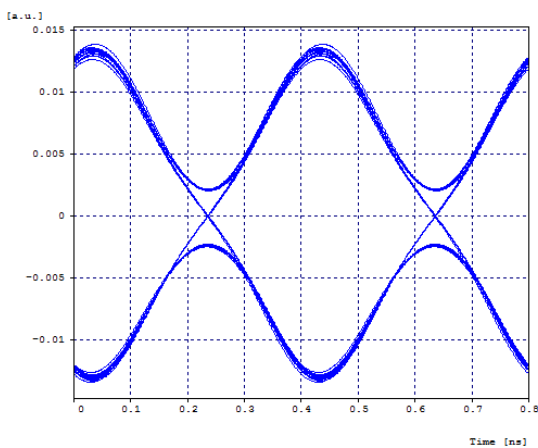


Figura 3.8 (c) salida modulada para una potencia de 15dBm en el EDFA

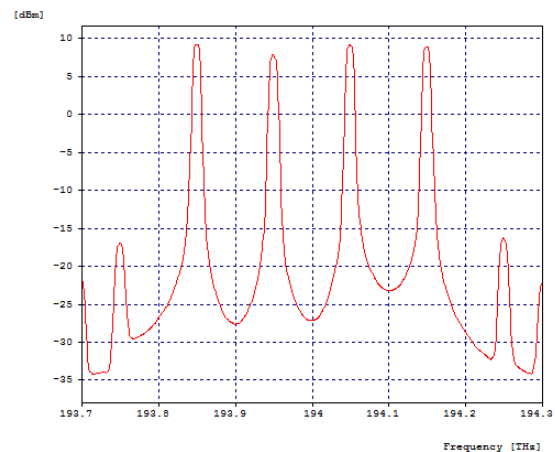


Figura 3.8 (d) Espectro de salida para una potencia de 15dBm en el EDFA

Como se puede apreciar en la figura 3.8 (a) a figura 3.8 (f), la configuración de la potencia del EDFA es un parámetro significativo en el desempeño del sistema y además cambia totalmente y debido a las penalidades de potencia introducidas, el régimen de propagación de tipo lineal a no lineal, limitándose a un valor máximo de 15dBm de amplificación de línea, los parámetros de monitoreo óptico se fijan en una $BER=4.5e^{-21}$, un factor $Q=21$ dB, potencia en recepción alrededor de los 14dBm y una OSNR de 35dB.

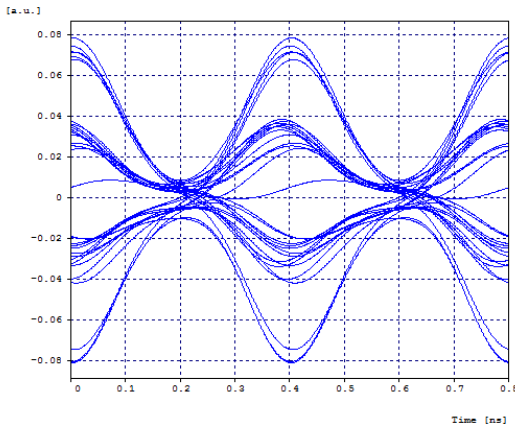


Figura 3.8 (e) salida modulada para una potencia de 30dBm en el EDFA

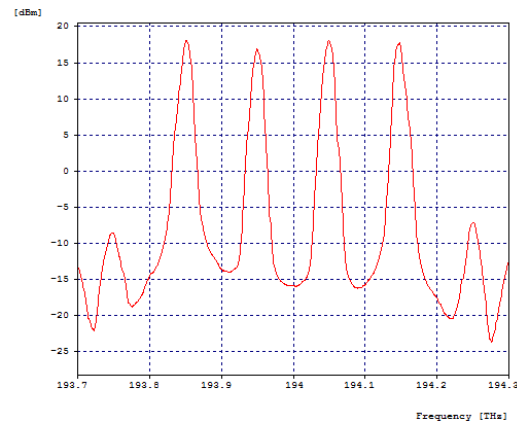


Figura 3.8 (f) Espectro de salida para una potencia de 30dBm en el EDFA

Una vez establecidas las características de potencia del sistema, con la finalidad de aplicar la ecuación 2.22 “adaptación de la teoría de la información para el régimen de propagación lineal en arquitecturas de red de tipo NG-PON” la cual define que para un sistema óptico de múltiples canales co-propagantes en el medio, es posible manipular las características del mismo con el fin de forzar la eficiencia espectral a límites más lejanos de las respuestas típicas binarias.

Variables de medición y Control - 16 canales de 2.5Gbps de Acceso nominal					
$(N - 1)\Delta_\nu$	C_N	C_{TOT} 12ch x 2.5Gbps	C_{PRO} Distancia 80Km	η_{ded} 0.01Thz	η_{dist}
100Ghz	2.5Gbps	40Gbps	3.2Tbps*Km	25% [bps/Hz]	40% [bps/Hz]
50Ghz	2.5Gbps	40Gbps	3.2Tbps*Km	25% [bps/Hz]	80% [bps/Hz]
25Ghz	2.5Gbps	40Gbps	3.2Tbps*Km	25% [bps/Hz]	error
12.5Ghz	2.5Gbps	40Gbps	3.2Tbps*Km	25% [bps/Hz]	error
Parámetros de monitoreo óptico					
$(N - 1)\Delta_\nu$	BER	FACTOR Q	OSNR	S _{RX}	
100Ghz	1e ⁻⁴⁰	40dB	36.44dB	-5.68dBm	
50Ghz	1e ⁻⁴⁰	40dB	30.12dB	-5.70dBm	
25Ghz	1e ⁻⁴⁰	40dB	22.34dB	-5.71dBm	
12.5Ghz	1e ⁻⁴⁰	40dB	46.35dB	-5.69dBm	

Tabla 3.5 Monitoreo de la Eficiencia Espectral para 16 canales co-propagantes de 2.5Gbps de Acceso Nominal

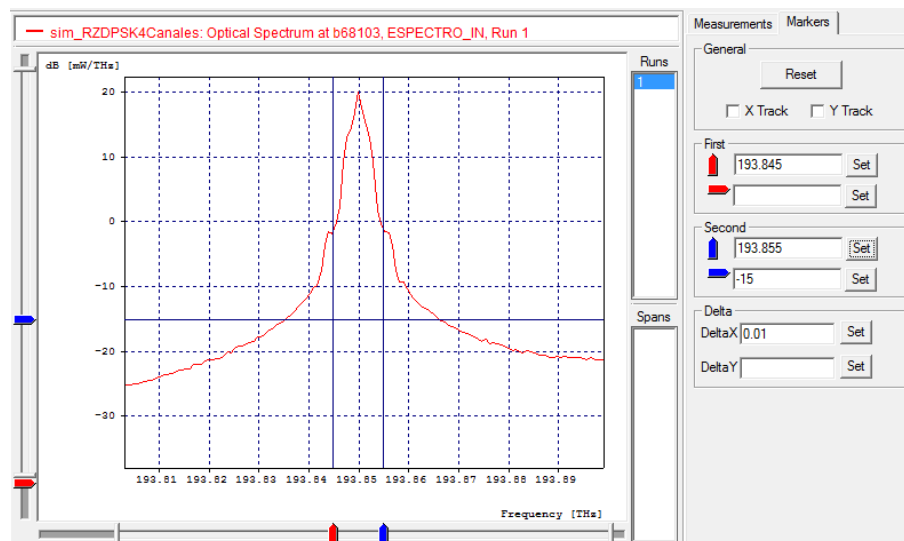


Figura 3.9 (a) Espectro de salida para un $(N - 1)\Delta_\nu = 100Ghz$ y una tasa de acceso nominal de 2.5Gbps

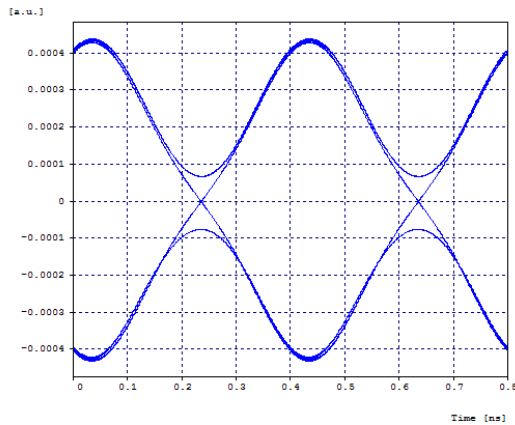


Figura 3.9 (b) Diagrama del Ojo para un $(N - 1)\Delta_v = 100\text{Ghz}$

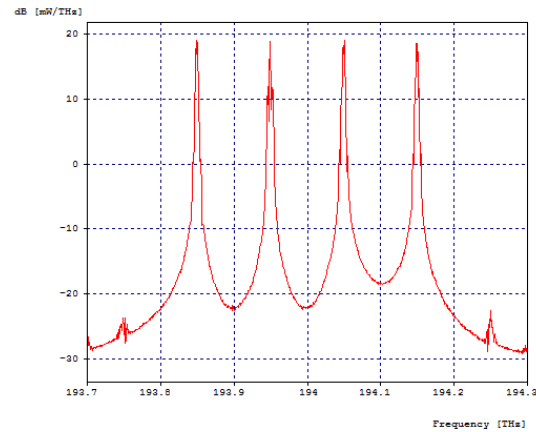


Figura 3.9 (c) Espectro propagado de los 4 primeros canales para un $(N - 1)\Delta_v = 100\text{Ghz}$

Como se puede apreciar en los resultados obtenidos en la tabla 3.5 y en las figuras 3.9 (a) a 3.9 (c), se puede lograr una eficiencia espectral de aproximadamente el 40%, manteniendo un régimen de propagación lineal y unos parámetros de desempeño óptico de tipo ideales, sin embargo el objetivo es forzar la máxima eficiencia espectral controlando el parámetro $(N - 1)\Delta_v$ y manteniendo la mejor relación OSNR posible, de modo que:

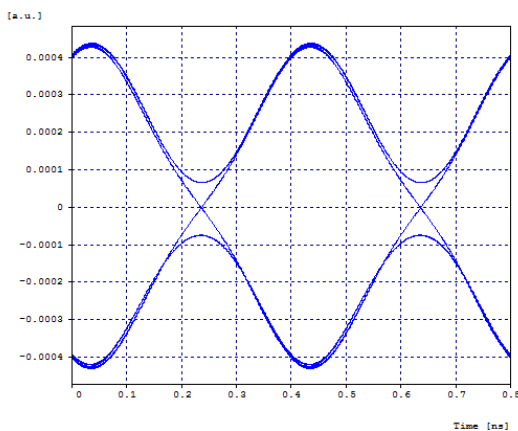


Figura 3.10 (a) Diagrama del Ojo para un $(N - 1)\Delta_v = 50\text{Ghz}$

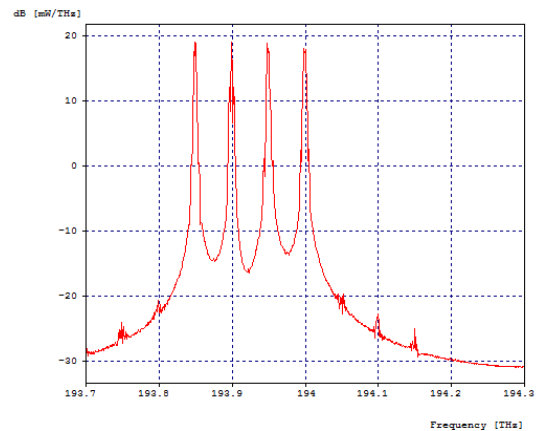


Figura 3.10 (b) Espectro propagado de los 4 primeros canales para un $(N - 1)\Delta_v = 50\text{Ghz}$

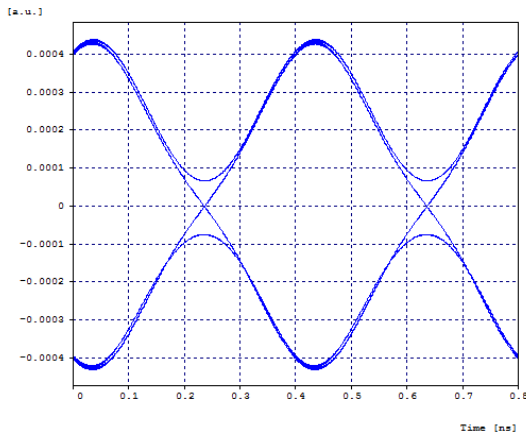


Figura 3.10 (c) Diagrama del Ojo para un $(N - 1)\Delta_\nu = 25\text{GHz}$

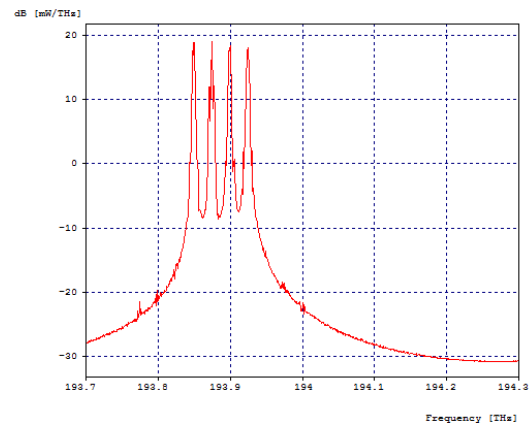


Figura 3.10 (d) Espectro propagado de los 4 primeros canales para un $(N - 1)\Delta_\nu = 25\text{GHz}$

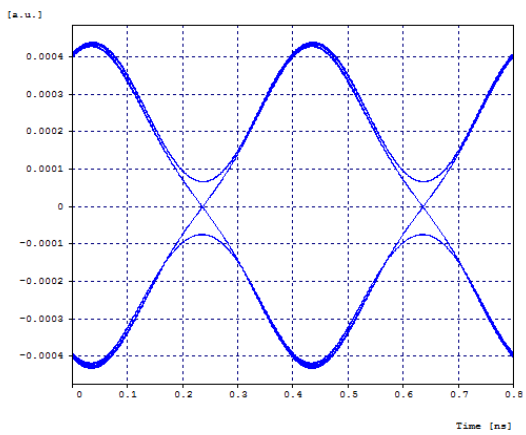


Figura 3.10 (e) Diagrama del Ojo para un $(N - 1)\Delta_\nu = 12.5\text{GHz}$

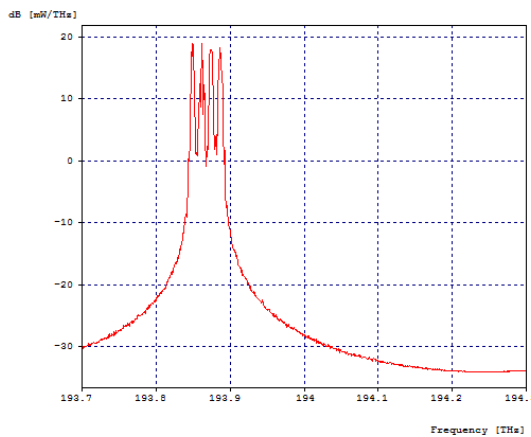


Figura 3.10 (f) Espectro propagado de los 4 primeros canales para un $(N - 1)\Delta_\nu = 12.5\text{GHz}$

Como se observa en las figuras 3.10 (a) a 3.10 (f), las soluciones basadas en el formato de modulación DPSK, son sumamente robustas frente a las degradaciones ópticas, penalidades de potencia y espaciamiento espectral, permitiendo propagar los 16 canales a un espaciamiento mínimo de 12.5GHz, alcanzando una eficiencia espectral teórica de más del 300%, sin embargo analíticamente, se debe hacer la diferenciación del espectro total ocupado frente a la máxima capacidad alcanzable por el sistema de modo que, como se aprecia en

la figura 3.11 y considerando el parámetro C_{TOT} alcanzado anteriormente en la tabla 3.5 se define que:

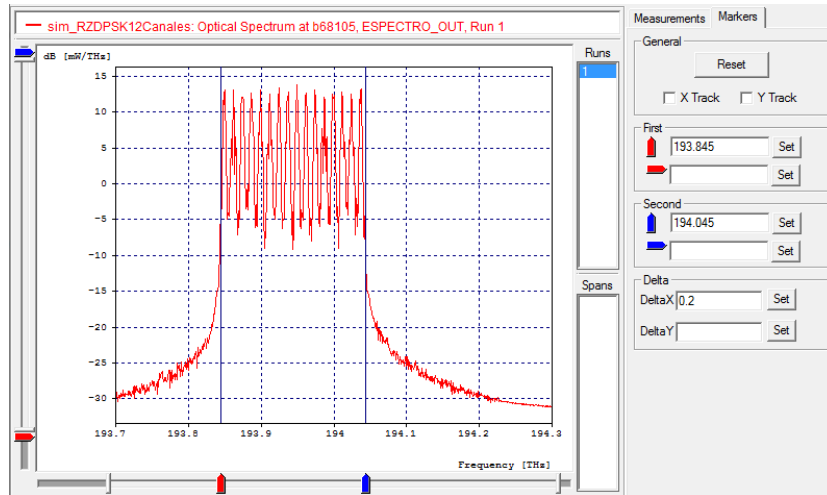


Figura 3.11 16 canales de 2.5Gbps en un espectro de 200GHz

Variables de medición y Control - 16 canales de 2.5Gbps Analíticas					
$(N - 1)\Delta_v$	C_N	C_{TOT} 12ch x 2.5Gbps	C_{PRO} Distancia 80Km	Bw Total Ocupado	η_{disa} [bps/Hz]
12.5Ghz	2.5Gbps	40Gbps	3.2Tbps*Km	200 GHz	20.0% [bps/Hz]
Parámetros de monitoreo óptico					
$(N - 1)\Delta_v$	BER	FACTOR Q	OSNR	S_{RX}	
12.5Ghz	$1e^{-40}$	40.00dB	40.34dB	-10.29dBm	

Tabla 3.6 Monitoreo de la Eficiencia Espectral analítica y nominal para 16 canales co-propagantes de 2.5Gbps

La tabla 3.6 resume el comportamiento del sistema DWDM como un resultado de la aplicación de la ecuación 2.22 donde, debido a la alta robustez de la modulación utilizada, es posible aproximar significativamente los canales ópticos co-propagantes, permitiendo asociar una capacidad total de la red con una ocupación neta del espectro propagado, haciendo que los espaciamentos sean

forzados a distancias mínimas de 12.5Ghz, debido al espectro óptico angosto generado por cada canal RZ-DPSK; esto junto con la capacidad neta de transmisión binaria vista como una sumatoria de los canales independientes, logra una eficiencia espectral del 20%, sin embargo, dicho método especifica que no es una buena opción utilizar muchos canales en el sistema, siendo la solución más óptima, incrementar la capacidad de acceso de cada longitud de onda implementada en el sistema óptico.

3.3.2 4 canales de 10Gbps de Acceso nominal – XGS-PON

El esquema general del sistema óptico propuesto se puede apreciar en la figura 3.12, donde se implementa un total de 4 canales ópticos cada uno con una tasa de transmisión nominal de 10Gbps.

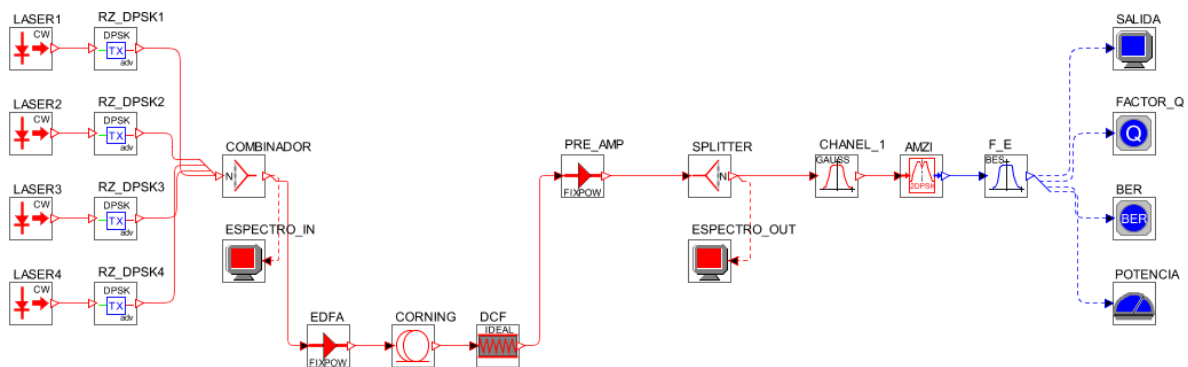


Figura 3.12 Modelo de Simulación de tipo XGS-PON.

Del mismo modo que para el caso anterior, se debe garantizar un régimen de propagación predominantemente lineal, con el fin de no excitar las penalidades de potencia, las cuales generaran comportamientos de tipo no lineal, del mismo modo, dado que la Dispersion cromática es uno de los fenómenos predominantes y más complejos en la propagación lineal, se procederá a compensar de manera ideal mediante módulos “*Ideal Fiber Grating*”, suministrados por la herramienta; los parámetros generales de configuración se detallan en la tabla 3.7.

Sistema de tipo XGS-PON – 4 canales de 10Gbps	
Parámetro	Valor
Velocidad de Acceso	10Gbps
Longitud inicial del enlace	80Km
Compensación DCF	ideal
Amplificación EDFA inicial	0dBm
Potencia del Laser Inicial	0dBm
Tipo de fibra	Corning SMF28-e 1550

Tabla 3.7 Parámetros de Configuración Generales DPSK

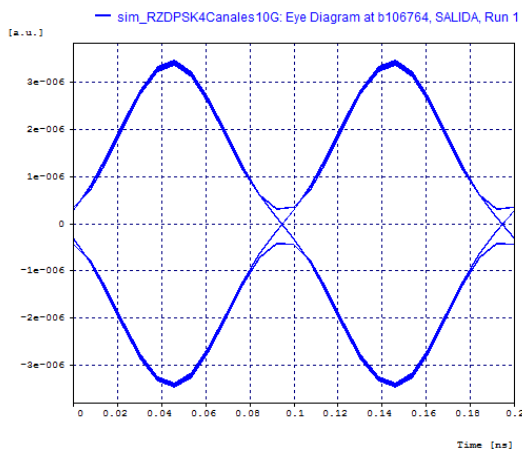


Figura 3.12 (a) señal modulada y recibida a la entrada del Rx

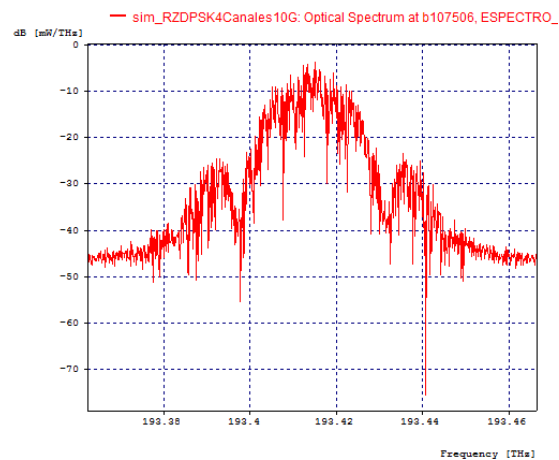


Figura 3.12 (b) Espectro de Salida de la señal modulada

Para los parámetros de configuración inicial del sistema a 10Gbps, se puede apreciar el comportamiento en las figuras 3.12 (a) y 3.12 (b), destacándose las variables de OPM para una BER=1e⁻⁴⁰, un factor Q=40dB, potencia en recepción alrededor de los -23.5dBm y una OSNR de 29.4dB en promedio, del mismo modo, para los valores iniciales de amplificación del láser y los dispositivos EDFA de Línea, el régimen de propagación se mantiene predominantemente lineal, sin ninguna alteración evidente del espectro, como se aprecia en la figura 3.13.

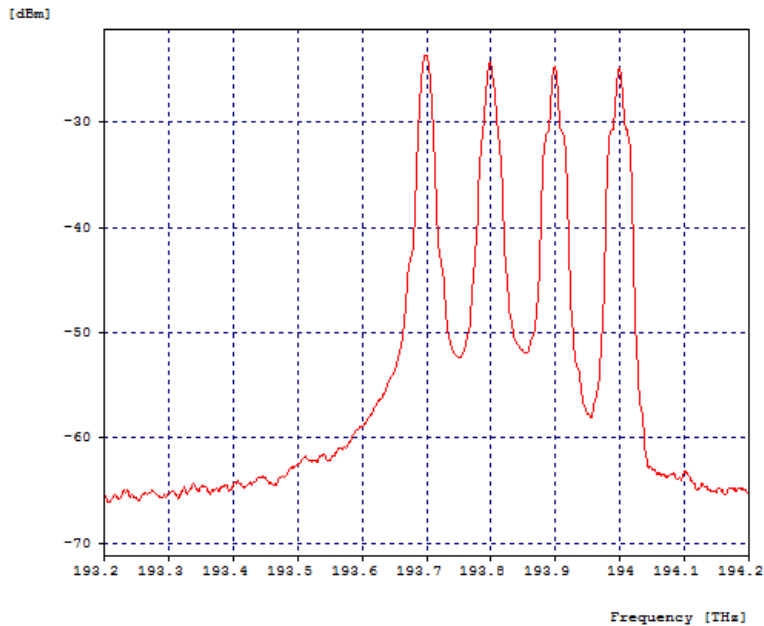


Figura 3.13 Espectro de Salida para 4 canales a ópticos de 10Gbps

A continuación, se procederá a determinar la máxima tolerancia a las penalidades de potencia con el fin de establecer el máximo nivel permisible en el sistema sin excitar considerablemente los fenómenos No Lineales, de modo que se mantenga un régimen de propagación predominantemente lineal.

Variación en la Potencia de los canales ópticos	
Laser	Valor
	0dBm a 15dBm con variaciones de 2.5dBm

Tabla 3.8 Variación de la potencia del laser

Como se puede apreciar en la figura 3.14, y a diferencia del caso anterior, la potencia del láser si es un factor determinante en la excitación de los fenómenos no lineales, el cual introduce penalidades de potencia y una pequeña variación aporta significativamente en un cambio de régimen de propagación.

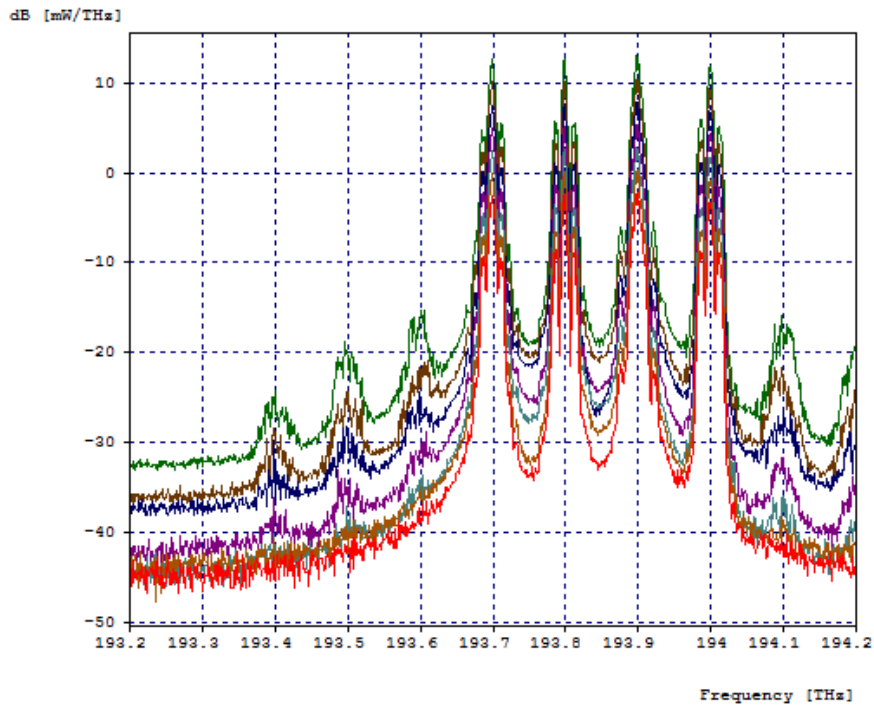


Figura 3.14 Espectro de salida para la variación de la potencia del canal óptico en un sistema DWDM

La línea roja del espectro, representa el comportamiento del sistema con una potencia de 0dBm, mientras la línea Verde lo hace para una potencia por canal óptico de 15dBm, donde es evidente el fenómeno no lineal de mezcla de 4 ondas (FWM).

Variación en la Potencia de los dispositivos EDFA	
EDFA	Valor

Tabla 3.9 Variación de la potencia de los dispositivos EDFA

Como se puede apreciar en la figura 3.15 (a) a figura 3.15 (h), la configuración de la potencia del EDFA no es un parámetro significativo en el desempeño del sistema ya que se deben usar altos valores de potencia para que cambie el régimen

de propagación de tipo lineal a no lineal, limitándose a un valor máximo de 15dBm de amplificación de línea, los parámetros de monitoreo óptico se fijan en una BER=1e⁻⁴⁰, un factor Q=38.46dB, potencia en recepción alrededor de los -14.51dBm y una OSNR de 29.46dB

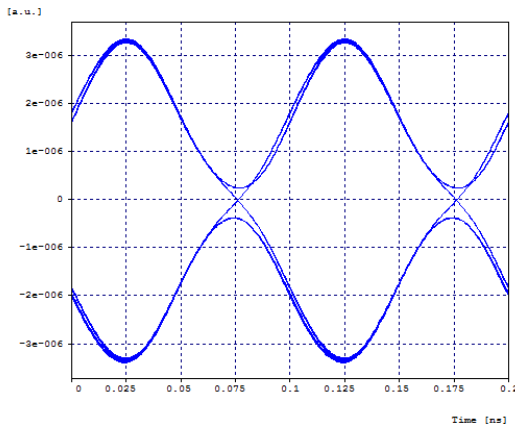


Figura 3.15 (a) salida modulada para una potencia de 0dBm en el EDFA

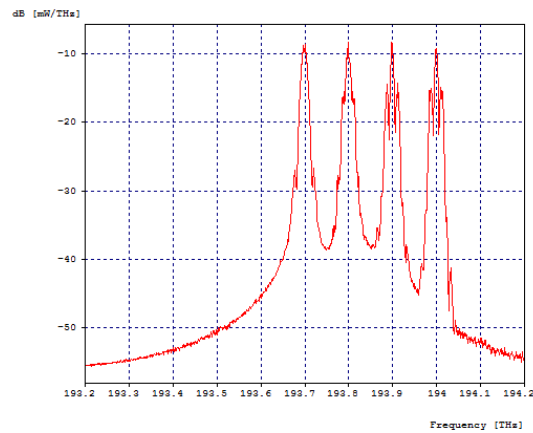


Figura 3.15 (b) Espectro de salida para una potencia de 0dBm en el EDFA

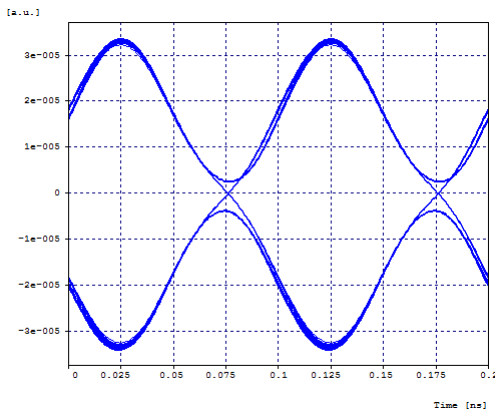


Figura 3.15 (c) salida modulada para una potencia de 10dBm en el EDFA

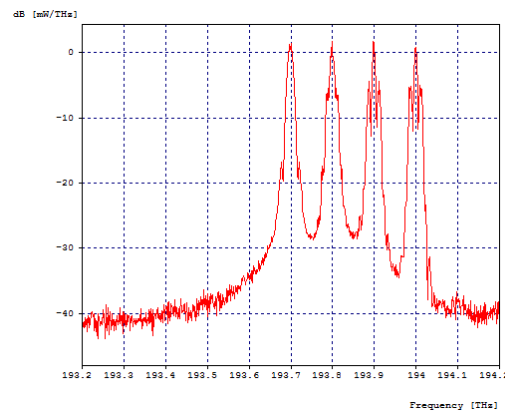


Figura 3.15 (d) Espectro de salida para una potencia de 10dBm en el EDFA

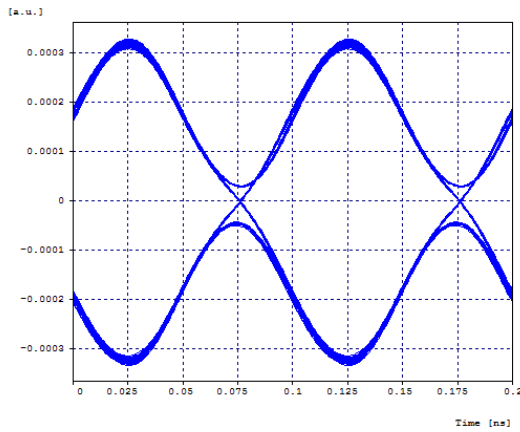


Figura 3.15 (e) salida modulada para una potencia de 20dBm en el EDFA

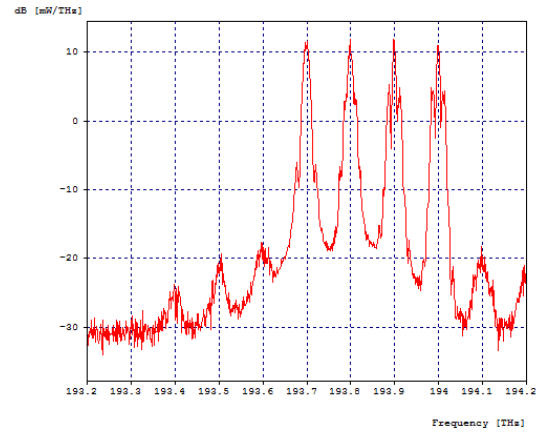


Figura 3.15 (f) Espectro de salida para una potencia de 20dBm en el EDFA

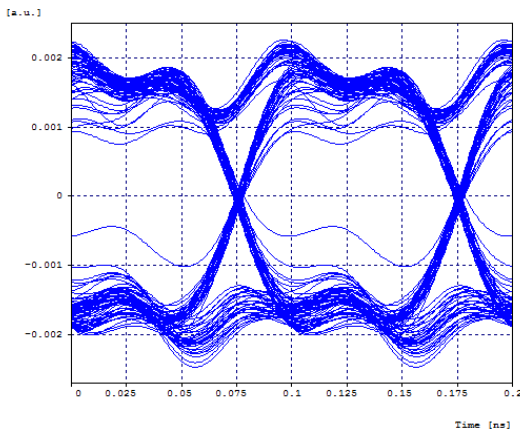


Figura 3.15 (g) salida modulada para una potencia de 30dBm en el EDFA

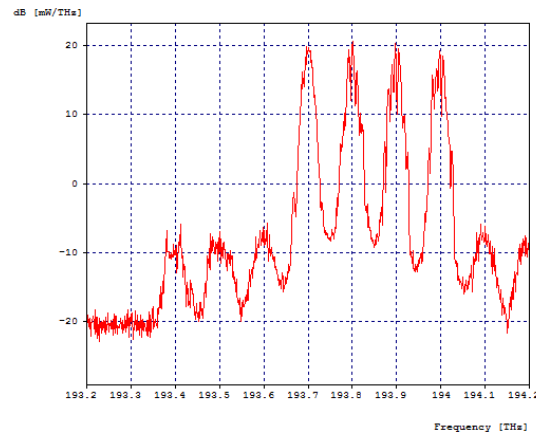


Figura 3.15 (h) Espectro de salida para una potencia de 30dBm en el EDFA

Del mismo modo, una vez establecidas las características de potencia del sistema y con la finalidad de aplicar la ecuación 2.22 se procede a definir las variables de medición especificadas en la tabla 3.10:

Variables de medición y Control - 4 canales de 10Gbps de Acceso nominal					
$(N - 1)\Delta_v$	C_N	C_{TOT} 4ch x 10Gbps	C_{PRO} Distancia 80Km	η_{ded} 0.04Thz	η_{dist}
100Ghz	10Gbps	40Gbps	3.2Tbps*Km	25% [bps/Hz]	40% [bps/Hz]
50Ghz	10Gbps	40Gbps	3.2Tbps*Km	25% [bps/Hz]	80% [bps/Hz]
25Ghz	10Gbps	40Gbps	3.2Tbps*Km	25% [bps/Hz]	error
Parámetros de monitoreo óptico					
$(N - 1)\Delta_v$	BER	FACTOR Q	OSNR	S_{RX}	
100Ghz	$1e^{-40}$	40.00dB	48.41dB	-23.5dBm	
50Ghz	$1e^{-40}$	35.09dB	18.74dB	-24.6dBm	
25Ghz	$1.6e^{-3}$	9.54dB	error	error	

Tabla 3.10 Monitoreo de la Eficiencia Espectral para 4 canales de 10Gbps de acceso nominal por longitud de onda

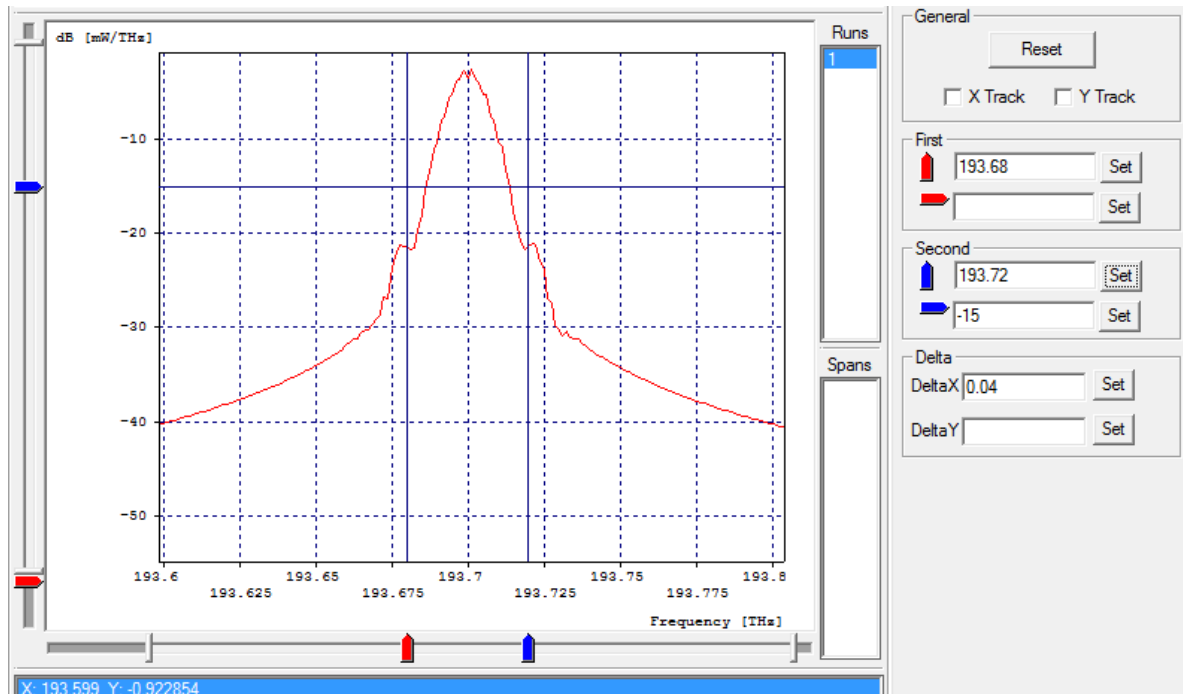


Figura 3.16 (a) Espectro de salida para un $(N - 1)\Delta_v = 100Ghz$ y una tasa de acceso nominal de 10Gbps

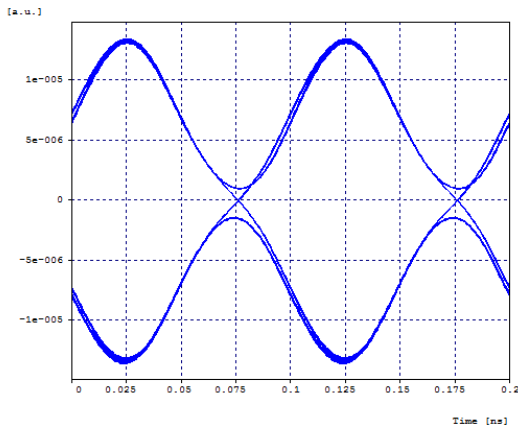


Figura 3.16 (b) Diagrama del Ojo para un $(N - 1)\Delta_\nu = 100\text{GHz}$

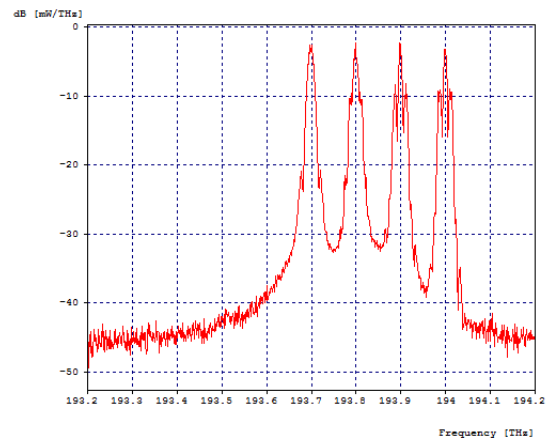


Figura 3.16 (c) Espectro de la señal para un $(N - 1)\Delta_\nu = 100\text{GHz}$

Como se puede apreciar en los resultados obtenidos en la tabla 3.10 y en las figuras 3.16 (a) a 3.16 (c), se puede lograr una eficiencia espectral de aproximadamente el 80% teóricos, manteniendo un régimen de propagación lineal y unos parámetros de desempeño óptico de tipo ideales, sin embargo el objetivo es forzar la máxima eficiencia espectral controlando el parámetro $(N - 1)\Delta_\nu$ y manteniendo la mejor relación OSNR posible, de modo que:

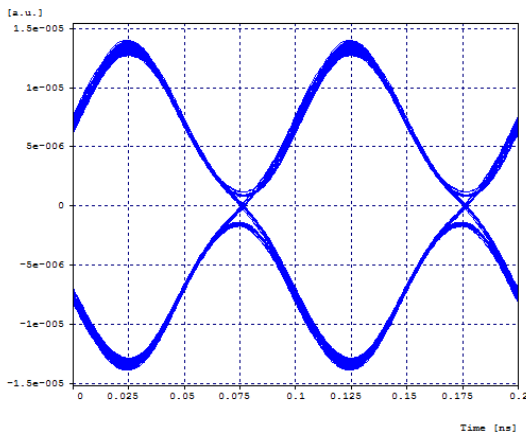


Figura 3.17 (a) Diagrama del Ojo para un $(N - 1)\Delta_\nu = 50\text{GHz}$

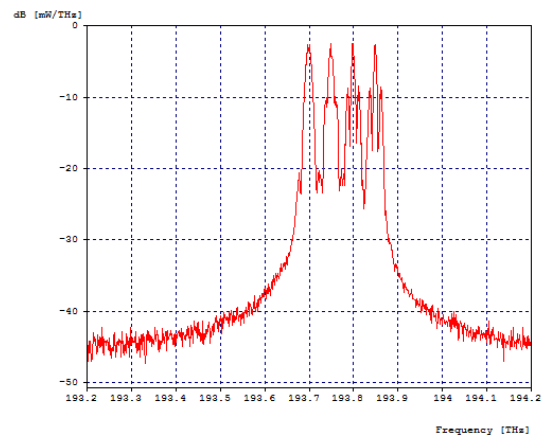


Figura 3.17 (b) Espectro de la señal para un $(N - 1)\Delta_\nu = 50\text{GHz}$

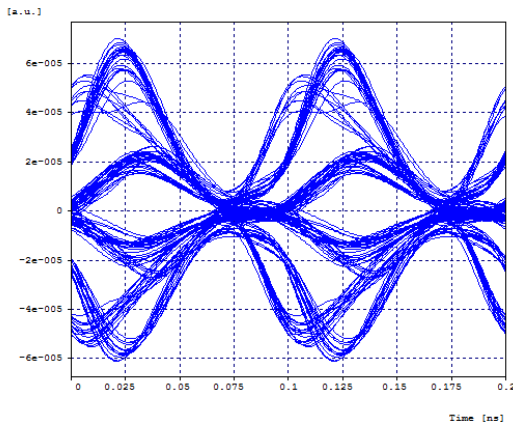


Figura 3.17 (c) Diagrama del Ojo para un $(N - 1)\Delta_v = 25\text{GHz}$

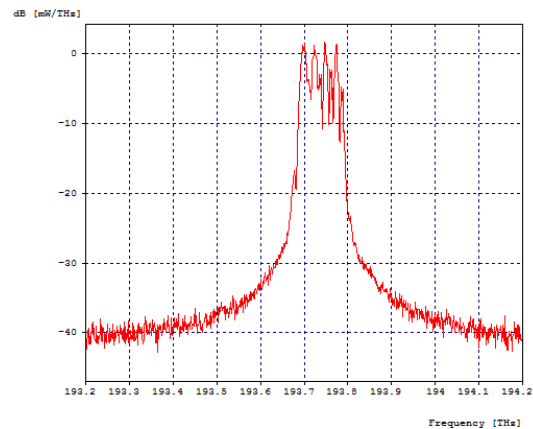


Figura 3.17 (d) Espectro de la señal para un $(N - 1)\Delta_v = 25\text{GHz}$

Para el límite máximo alcanzado para la arquitectura XG-PON alrededor de un $(N - 1)\Delta_v = 12.5\text{GHz}$ no fue posible para una velocidad de acceso de 10Gbps, esto debido a que la ocupación espectral de un solo canal es mayor que el espaciado óptico, generando de este modo ISI entre canales adyacentes degradando significativamente el desempeño del sistema.

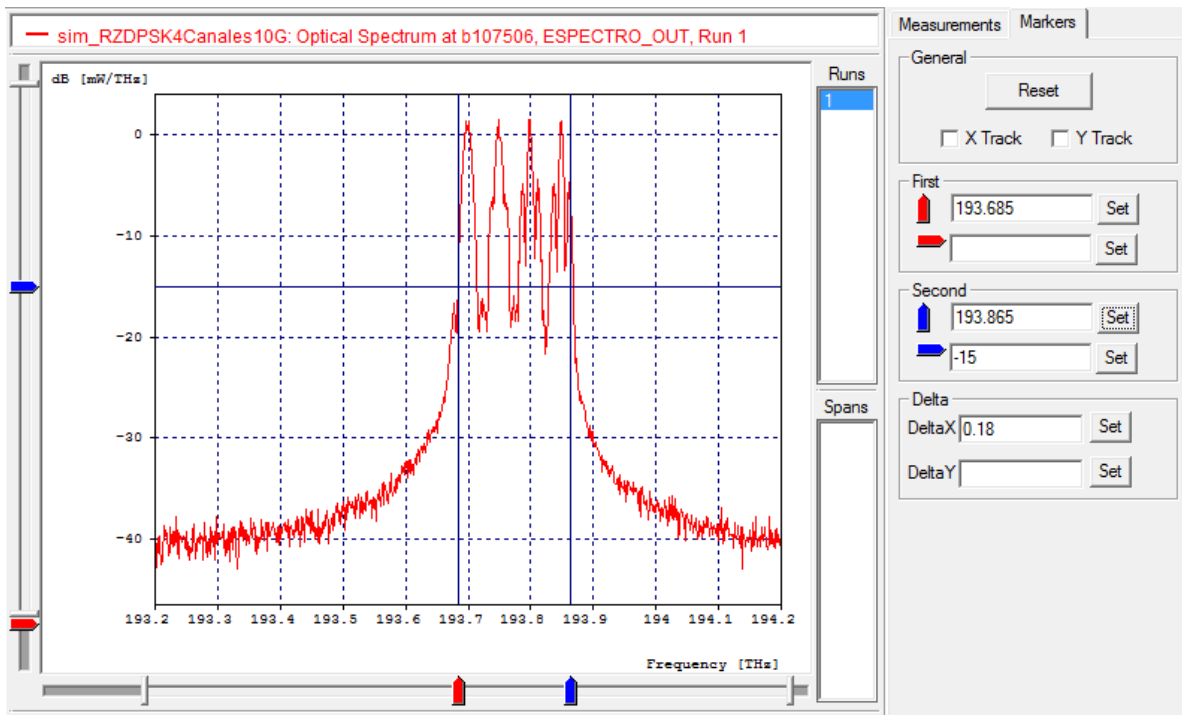


Figura 3.18 4 canales de 10Gbps en un espectro de 180GHz

De la misma forma que para el caso anterior, y como se aprecia en las figuras 3.17 (a) a 3.17 (d), el formato de modulación DPSK, se mantiene robusto frente a las degradaciones ópticas, penalidades de potencia y espaciamento espectral, siendo limitado por la ocupación neta de cada canal propagado, permitiendo un máximo de 4 longitudes de onda a un espaciamento mínimo de 50GHz, alcanzando una eficiencia espectral teórica del 80%, sin embargo analíticamente, se debe relacionar el espectro total ocupado frente a la máxima capacidad alcanzable por el sistema considerando la figura 3.18 y el parámetro C_{TOT} alcanzado definido en la tabla 3.10.

La tabla 3.11 resume el comportamiento del sistema DWDM como un resultado de la aplicación de la ecuación 2.22 donde, se asocia una capacidad total de la red con una ocupación neta del espectro propagado, haciendo que los espaciamentos sean forzados a distancias mínimas de 50GHz, debido al espectro óptico angosto generado por cada canal RZ-DPSK; esto junto con la capacidad neta de transmisión binaria vista como una sumatoria de los canales independientes, logra una eficiencia espectral de más del 22%, superando la eficiencia alcanzada para un sistema de 12 canales de 2.5Gbps basado en la arquitectura XG-PON.

Variables de medición y Control - 4 canales de 10Gbps Analíticas					
$(N - 1)\Delta_v$	C_N	C_{TOT} 4ch x 10Gbps	C_{PRO} Distancia 80Km	Bw Total Ocupado	η_{disa} [bps/Hz]
50Ghz	2.5Gbps	40Gbps	3.2Tbps*Km	180 GHz	22.2% [bps/Hz]
Parámetros de monitoreo óptico					
$(N - 1)\Delta_v$	BER	FACTOR Q	OSNR	S_{RX}	
50Ghz	$1e^{-40}$	34.66dB	18.73dB	-19.49dBm	

Tabla 3.11 Monitoreo de la Eficiencia Espectral analítica y nominal para 4 canales co-propagantes de 10Gbps

3.3.3 1 canal de 40Gbps de Acceso nominal – NG-PON

El esquema general del sistema óptico propuesto se puede apreciar en la figura 3.19, donde se implementa un canal óptico con una tasa de transmisión nominal de 40Gbps a nivel de acceso.

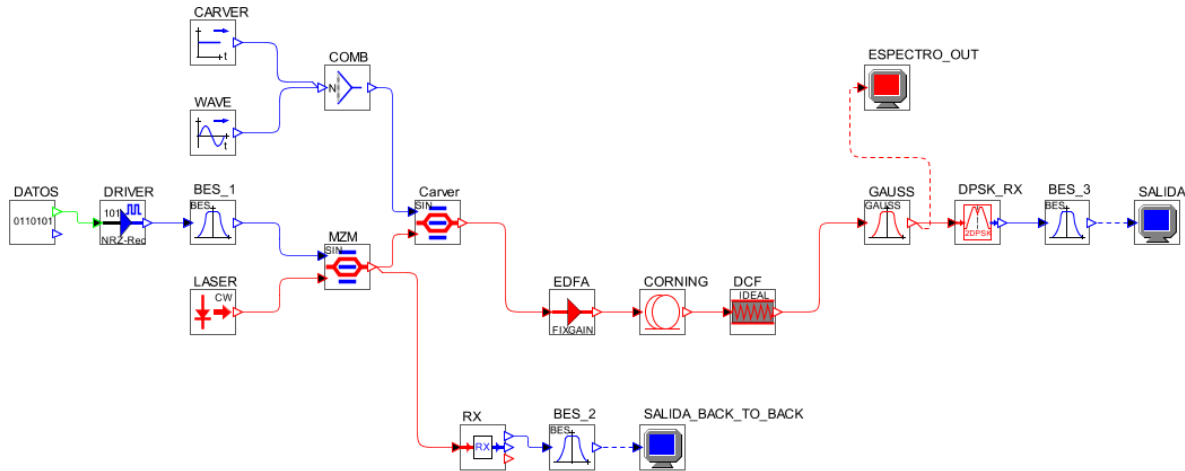


Figura 3.19 Modelo de Simulación de tipo NG-PON.

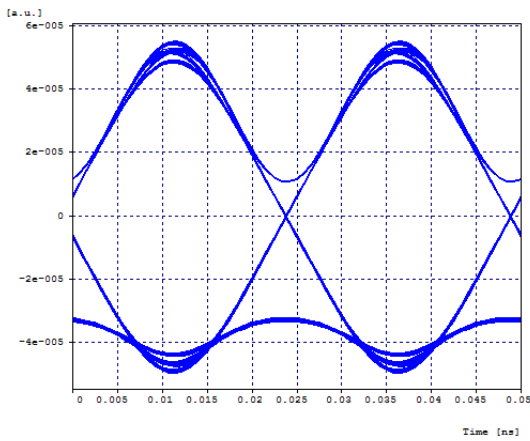


Figura 3.19 (a) señal modulada y recibida a la entrada del Rx

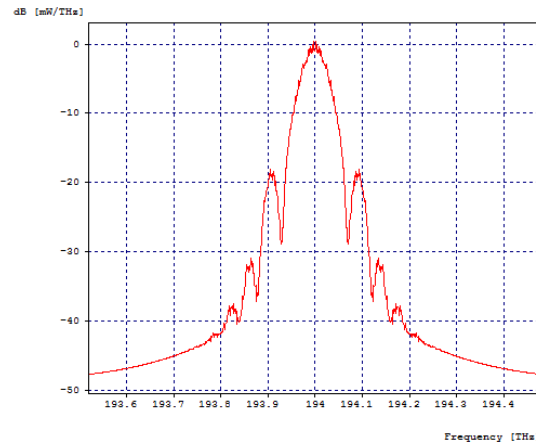


Figura 3.19 (b) Espectro de salida de la señal modulada en Rx

Del mismo modo que en los casos anteriores, se debe garantizar un régimen de propagación predominantemente lineal y dado que la Dispersión cromática es uno de los fenómenos predominantes y más complejos en la propagación lineal y

tiene un fuerte vínculo con la velocidad de acceso, se procederá a compensar de manera ideal mediante módulos “*Ideal Fiber Grating*”, suministrados por la herramienta; los parámetros generales de configuración se detallan en la tabla 3.12.

Sistema de tipo NG-PON – 1 canal de 40Gbps	
Parámetro	Valor
Velocidad de Acceso	40Gbps
Longitud inicial del enlace	80Km
Compensación DCF	ideal
Amplificación EDFA inicial	5dBm
Potencia del Laser Inicial	0dBm
Tipo de fibra	Corning SMF28-e 1550

Tabla 3.12 Parámetros de Configuración Generales DPSK

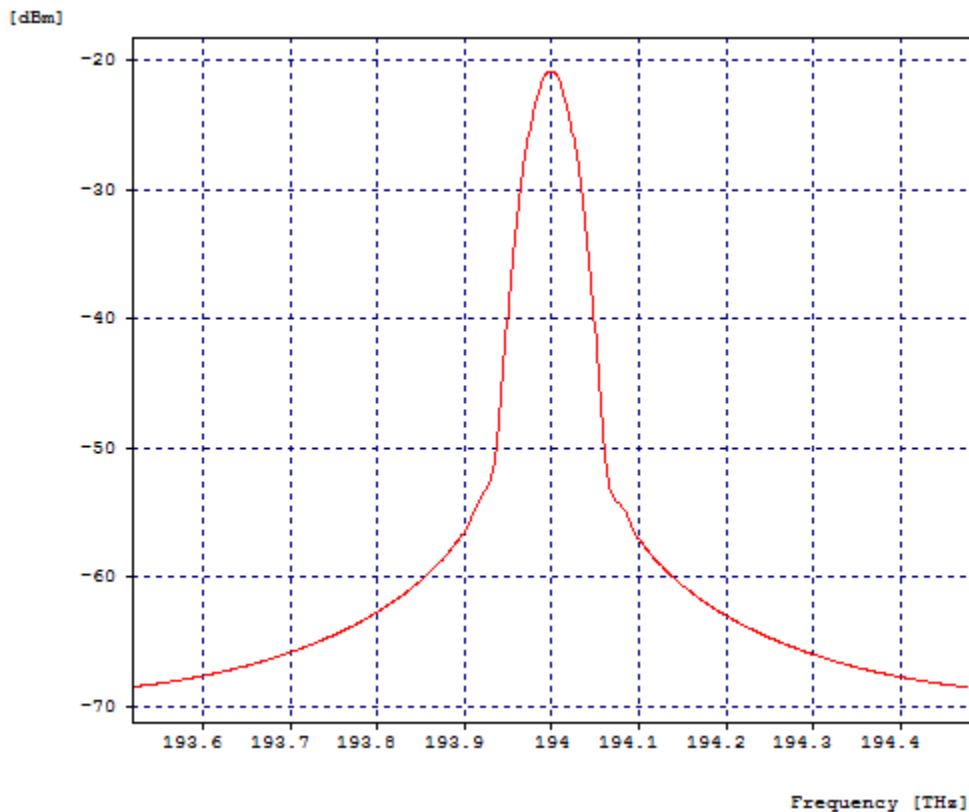


Figura 3.20 Espectro de Salida para un canal óptico de 40Gbps

Para los parámetros de configuración inicial del sistema a 40Gbps, se puede apreciar el comportamiento en las figuras 3.19 (a) y 3.19 (b), destacándose las variables de OPM para una $BER=1e^{-40}$, un factor $Q=32.43dB$, potencia en recepción alrededor de los $-20.76dBm$ y una OSNR de $47.89dB$, del mismo modo, para los valores iniciales de amplificación del láser y los dispositivos EDFA de Línea, el régimen de propagación se mantiene predominantemente lineal, sin ninguna alteración evidente del espectro, como se aprecia en la figura 3.20.

A continuación, se procederá a determinar la máxima tolerancia a las penalidades de potencia con el fin de establecer el máximo nivel permisible en el sistema sin excitar considerablemente los fenómenos No Lineales, de modo que se mantenga un régimen de propagación predominantemente lineal, dicha variación se realizara desde la potencia del láser y de los amplificadores de línea.

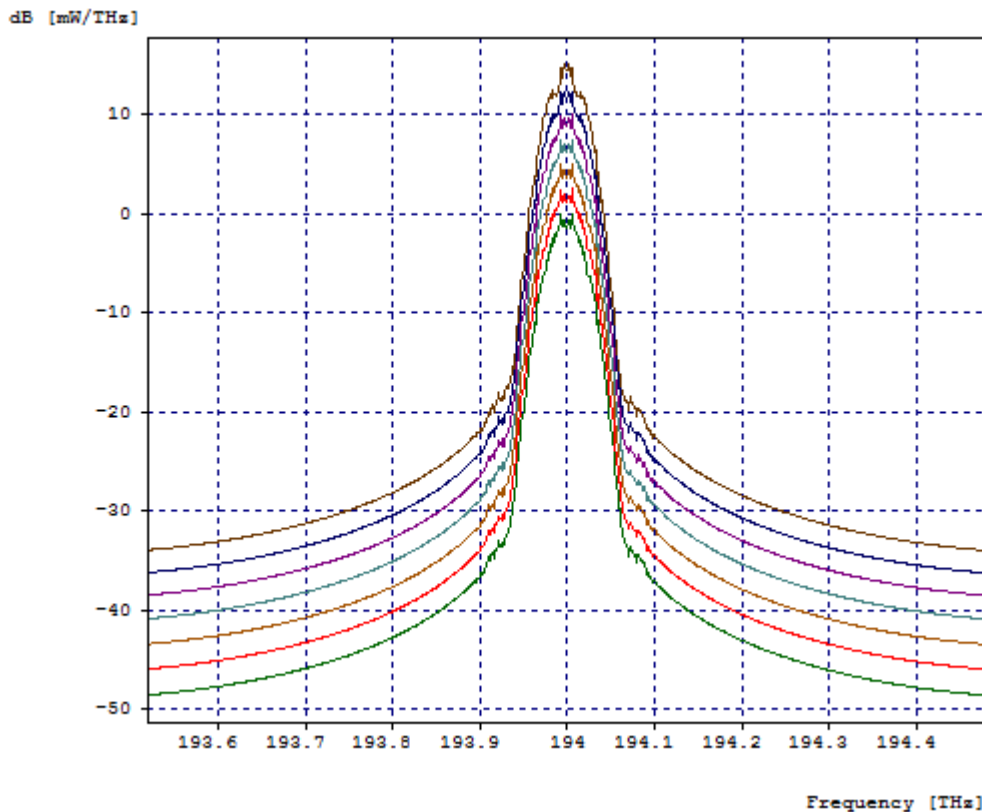


Figura 3.21 Espectro de salida para la variación de la potencia del canal óptico en un sistema DWDM

Variación en la Potencia de los canales ópticos	
Laser	Valor
	0dBm a 15dBm con variaciones de 2.5dBm

Tabla 3.13 Variación de la potencia del laser

Como se puede apreciar en la figura 3.21, la potencia del láser no es un factor determinante en la excitación de los fenómenos no lineales, el cual introduce penalidades de potencia y ninguna variación aporta significativamente en un cambio de régimen de propagación.

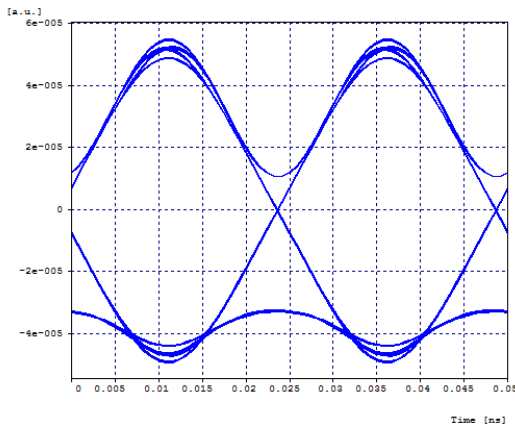


Figura 3.22 (a) salida modulada para una potencia de 0dBm en el EDFA

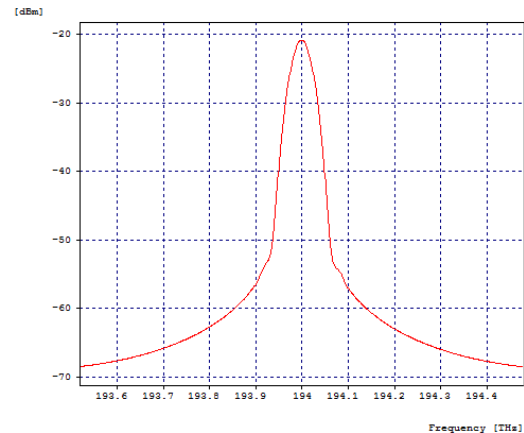


Figura 3.22 (b) Espectro de salida para una potencia de 0dBm en el EDFA

La línea verde del espectro, representa el comportamiento del sistema con una potencia de 0dBm, mientras la línea café lo hace para una potencia por canal óptico de 15dBm, donde es evidente que no se presentan fenómenos de tipo lineal dado que el espectro no cambia considerablemente.

Variación en la Potencia de los dispositivos EDFA	
EDFA	Valor
	0dBm a 30dBm con variaciones de 5dBm

Tabla 3.14 Variación de la potencia de los dispositivos EDFA

Como se puede apreciar en la figura 3.22 (a) a figura 3.22 (j), la configuración de la potencia del EDFA no es un parámetro significativo en el desempeño del sistema ya que se deben usar altos valores de potencia para que cambie el régimen de propagación de tipo lineal a no lineal, limitándose a un valor máximo de 15dBm de amplificación de línea, los parámetros de monitoreo óptico se fijan en una BER= $1e^{-40}$, un factor Q=38.46dB, potencia en recepción alrededor de los -14.51dBm y una OSNR de 29.46dB.

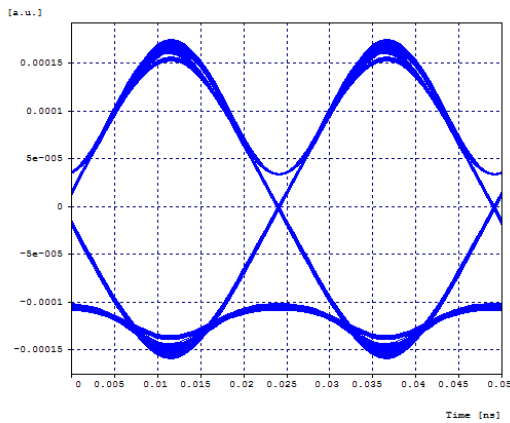


Figura 3.22 (c) salida modulada para una potencia de 5dBm en el EDFA

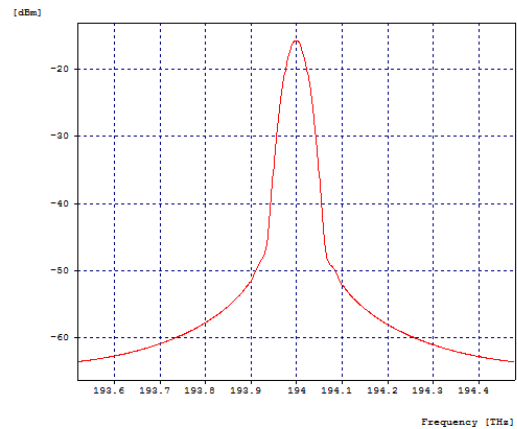


Figura 3.22 (d) Espectro de salida para una potencia de 5dBm en el EDFA

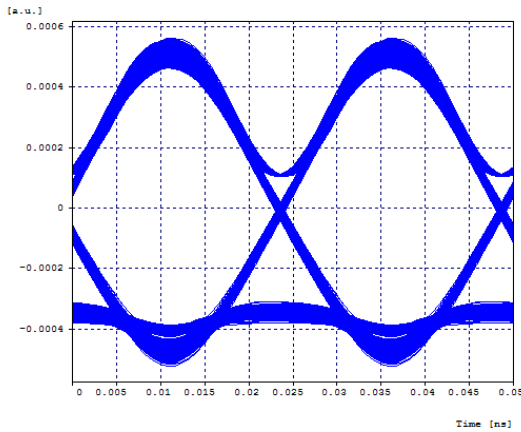


Figura 3.22 (e) salida modulada para una potencia de 10dBm en el EDFA

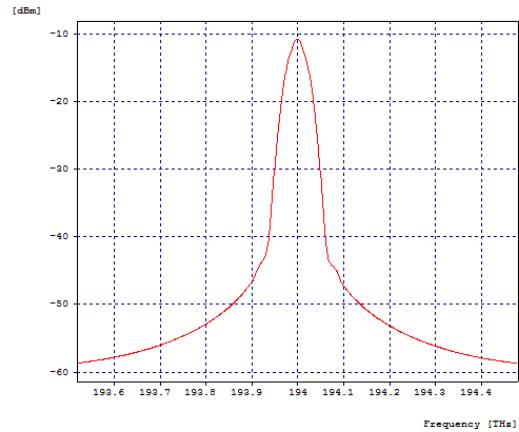


Figura 3.22 (f) Espectro de salida para una potencia de 10dBm en el EDFA

Del mismo modo, a través de la variación de la potencia del EDFA y a pesar de que en el espectro no es evidente una degradación debido a las penalidades de potencia, mediante el análisis del diagrama del ojo se puede constatar que para valores superiores a 15dB, figura 3.22 (i) y figura 3.22 (j), el sistema se degrada totalmente para unos parámetros objetivo por fuera del rango deseable, de tipo Factor Q = 8.12dB y una tasa de error BER = $5.4e^{-3}$.

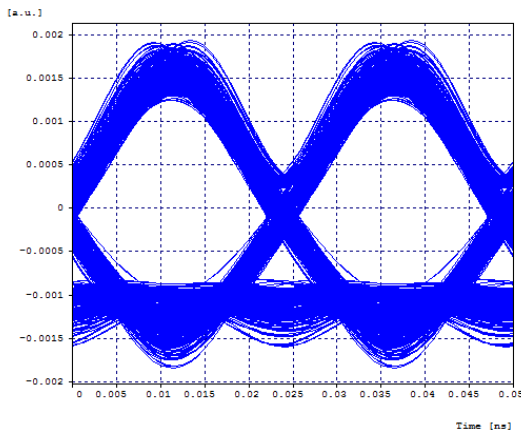


Figura 3.22 (g) salida modulada para una potencia de 15dBm en el EDFA

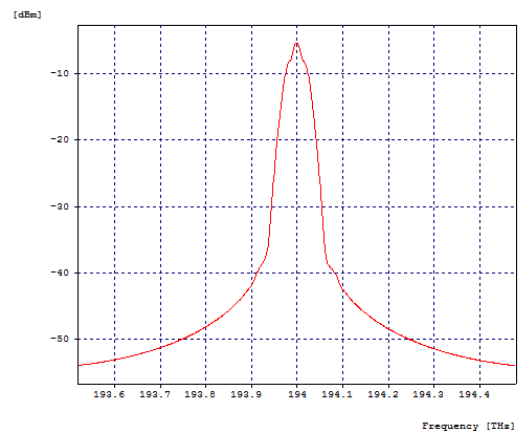


Figura 3.22 (h) Espectro de salida para una potencia de 15dBm en el EDFA

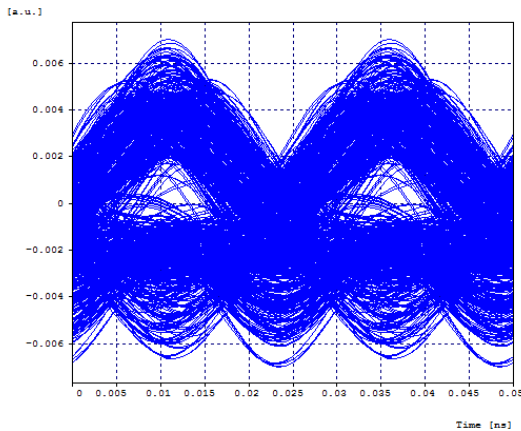


Figura 3.22 (i) salida modulada para una potencia de 20dBm en el EDFA

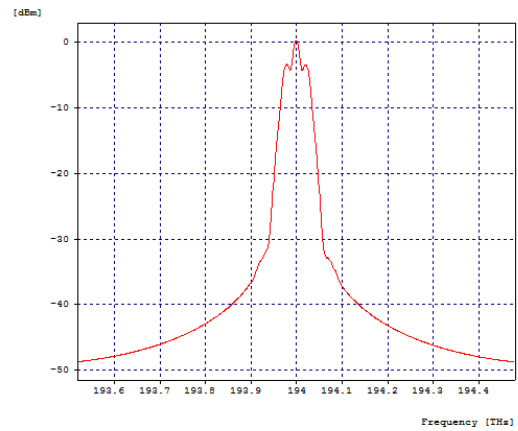


Figura 3.22 (j) Espectro de salida para una potencia de 20dBm en el EDFA

Del mismo modo, una vez establecidas las características de potencia del sistema y con la finalidad de aplicar la ecuación 2.22 se procede a definir las variables de medición especificadas en la tabla 3.15. sin embargo, y dado que para alcanzar la capacidad objetivo de 40Gbps solo es requerido un único canal por el medio, esto desaprovecha la configuración de un sistema DWDM, y con el fin de verificar el comportamiento espectral de la red, se procede a implementar un nuevo canal.

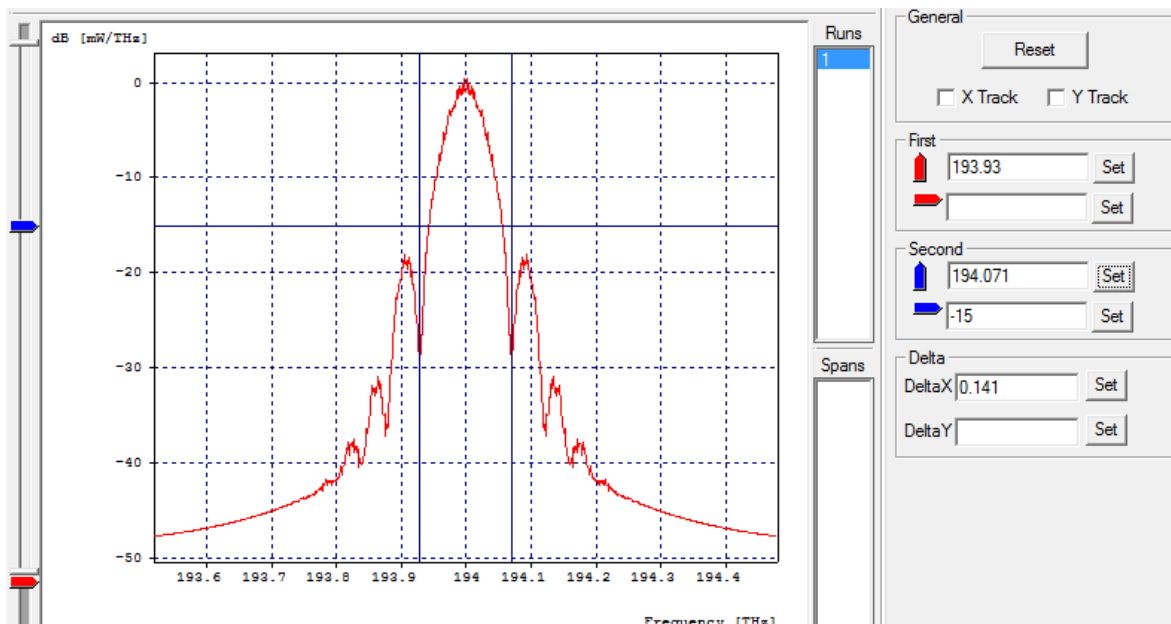


Figura 3.23 (a) Espectro de salida para una tasa de nominal de 40Gbps

Variables de medición y Control - 1 canal de 40Gbps de Acceso nominal					
$(N - 1)\Delta_\nu$	C_N	C_{TOT} 2ch x 40Gbps	C_{PRO} Distancia 80Km	η_{ded} 0.141Thz	η_{dist}
200Ghz	40Gbps	80Gbps	6.4Tbps*Km	28% [bps/Hz]	40% [bps/Hz]
100Ghz	40Gbps	80Gbps	6.4Tbps*Km	28% [bps/Hz]	80% [bps/Hz]
50Ghz	40Gbps	80Gbps	6.4Tbps*Km	28% [bps/Hz]	error
Parámetros de monitoreo óptico					
$(N - 1)\Delta_\nu$	BER	FACTOR Q	OSNR	S_{RX}	
200Ghz	$1e^{-40}$	31.95dB	19.98dB	-16.69dBm	
100Ghz	$1.51e^{-24}$	20.31dB	19.31dB	-16.71dBm	
50Ghz	$5.1e^{-4}$	10.33dB	error	error	

Tabla 3.15 Monitoreo de la Eficiencia Espectral para 1 canal de 40Gbps de acceso nominal por longitud de onda

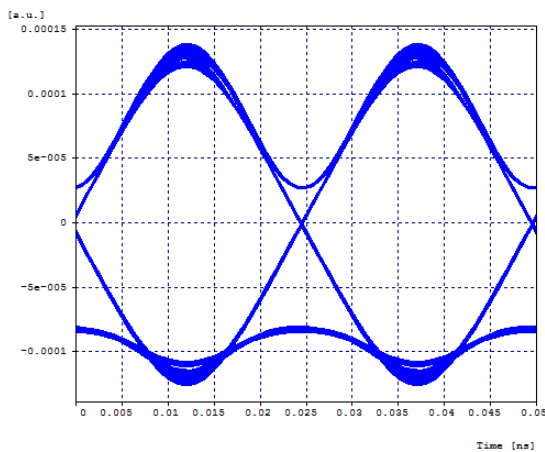


Figura 3.24 (a) Diagrama del Ojo para un $(N - 1)\Delta_\nu = 200Ghz$

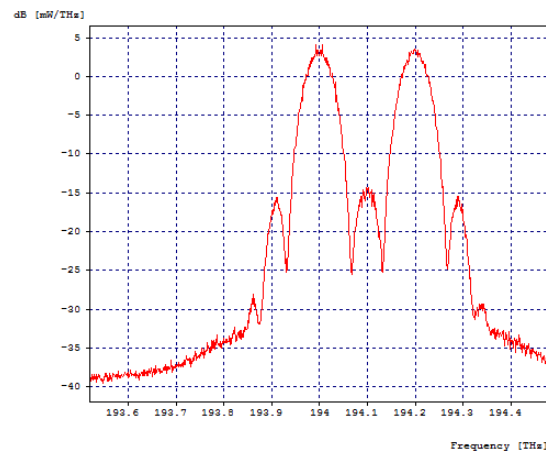


Figura 3.24 (b) Espectro de la señal para un $(N - 1)\Delta_\nu = 200Ghz$

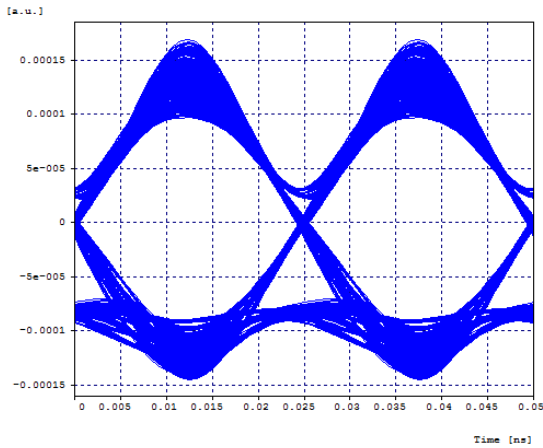


Figura 3.24 (c) Diagrama del Ojo para un $(N - 1)\Delta_\nu = 100\text{GHz}$

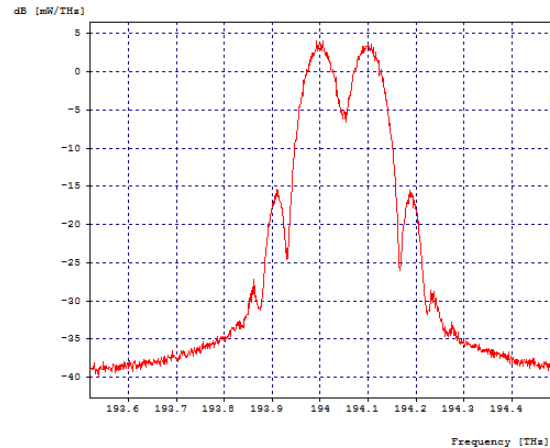


Figura 3.24 (d) Espectro de la señal para un $(N - 1)\Delta_\nu = 100\text{GHz}$

Como se puede apreciar en los resultados obtenidos en la tabla 3.15 y en las figuras 3.24 (a) a 3.24 (f), se puede lograr una eficiencia espectral de aproximadamente el 80% teóricos, manteniendo un régimen de propagación lineal y unos parámetros de desempeño óptico de tipo ideales, sin embargo el objetivo es forzar la máxima eficiencia espectral controlando el parámetro $(N - 1)\Delta_\nu$ y manteniendo la mejor relación OSNR posible, de modo que:

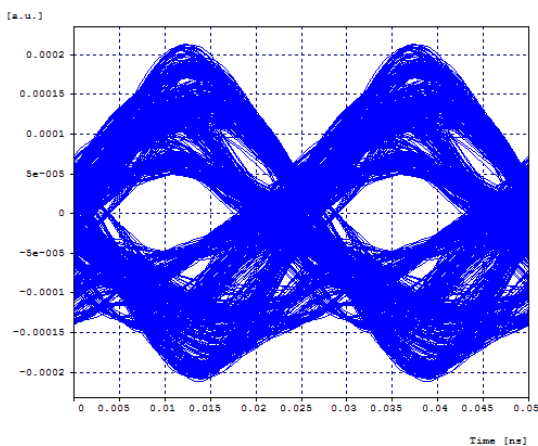


Figura 3.24 (e) Diagrama del Ojo para un $(N - 1)\Delta_\nu = 50\text{GHz}$

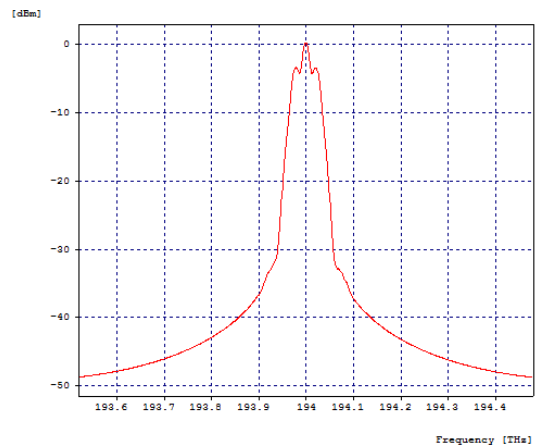


Figura 3.24 (f) Espectro de la señal para un $(N - 1)\Delta_\nu = 50\text{GHz}$

La tabla 3.16 resume el comportamiento del sistema DWDM como un resultado de la aplicación de la ecuación 2.22 donde, se asocia una capacidad total de la red con una ocupación neta del espectro propagado, haciendo que los espaciamientos sean forzados a distancias mínimas de 100Ghz, debido al espectro óptico angosto generado por cada canal RZ-DPSK; esto junto con la capacidad neta de transmisión binaria vista como una sumatoria de los canales independientes, logra una eficiencia espectral de más del 30%, superando la eficiencia alcanzada para un sistema de 12 canales de 2.5Gbps y por el sistema de 4 canales de 10Gbps, basado en la arquitectura XG-PON.

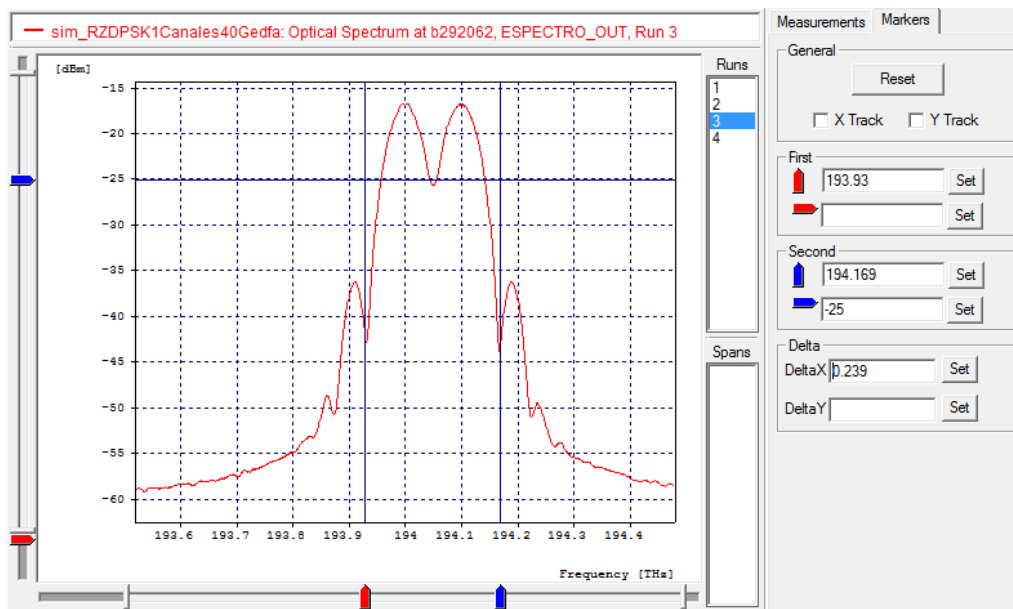


Figura 3.25 Dos canales de 40Gbps en un espectro de 239Ghz

Sin embargo, y aplicando solo para este caso, la teoría y análisis generado en el capítulo 2, sería posible manipular el espectro mediante técnicas como RWA (*routing and wavelength assignment*), filtrado dinámico y flex-grid, para lograr la misma transmisión de los 40Gbps alternando el espectro superior y el espectro inferior de las dos portadoras ópticas desplazadas 100Ghz, de modo que, como se aprecia en la figura 3.26, se puede lograr una eficiencia espectral del 40%.

Variables de medición y Control - 1 canal de 40Gbps Analíticas					
$(N - 1)\Delta_\nu$	C_N	C_{TOT} 2ch x 40Gbps	C_{PRO} Distancia 80Km	Bw Total Ocupado	η_{disa} [bps/Hz]
----	40Gbps	80Gbps	6.4Tbps*Km	100 GHz	40% [bps/Hz]
Parámetros de monitoreo óptico					
$(N - 1)\Delta_\nu$	BER	FACTOR Q	OSNR	S_{RX}	
-----	$1.51e^{-24}$	20.31.66dB	18.73dB	-19.49dBm	

Tabla 3.16 Monitoreo de la Eficiencia Espectral analítica y nominal para 1 canal de 40Gbps

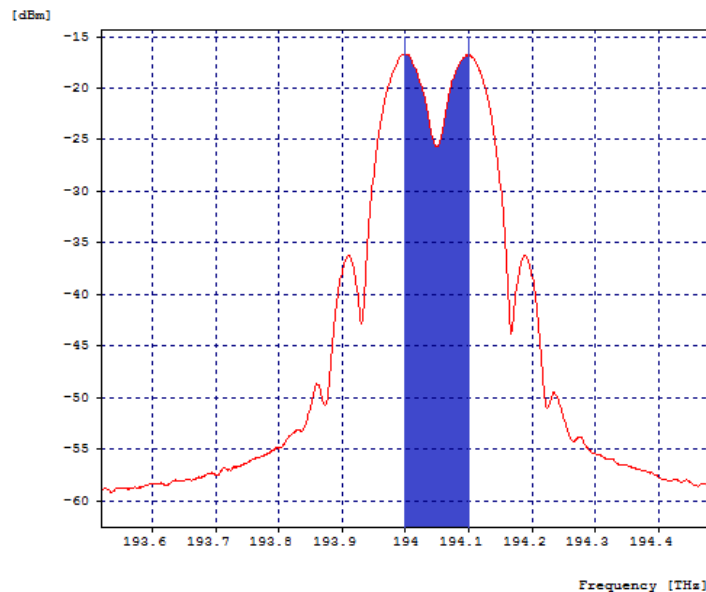


Figura 3.26 40Gbps en un espectro de 100Ghz

3.4 CASO DE ESTUDIO II – SOLUCIONES BASADAS EN EL FORMATO DE MODULACIÓN DQPSK

Para el Desarrollo de este caso de estudio, se implementaran soluciones basadas en el formato de modulación DQPSK para los esquemas de codificación que permitan alcázar el objetivo de la máxima capacidad total de la red de 40Gbps manteniendo los parámetros de monitoreo óptico objetivos definidos anteriormente. Para este caso en específico y dada la complejidad de la configuración del esquema

de modulación, realizar un montaje para propagar señales de baja velocidad no es eficiente, ya que esta modulación se desarrolló en especial para lograr altas velocidades de transmisión de datos con una alta eficiencia espectral, además de que es un estándar de tipo multinivel.

3.4.1 4 canales de 5Gbps de Acceso nominal en fase y cuadratura – para una arquitectura de red de tipo XGS-PON

El esquema general del sistema óptico propuesto se puede apreciar en la figura 3.27, donde se implementa un total de 4 canales ópticos cada uno con una tasa de transmisión nominal de 10Gbps, ortogonales en fase de 5Gbps y cuadratura de 5Gbps.

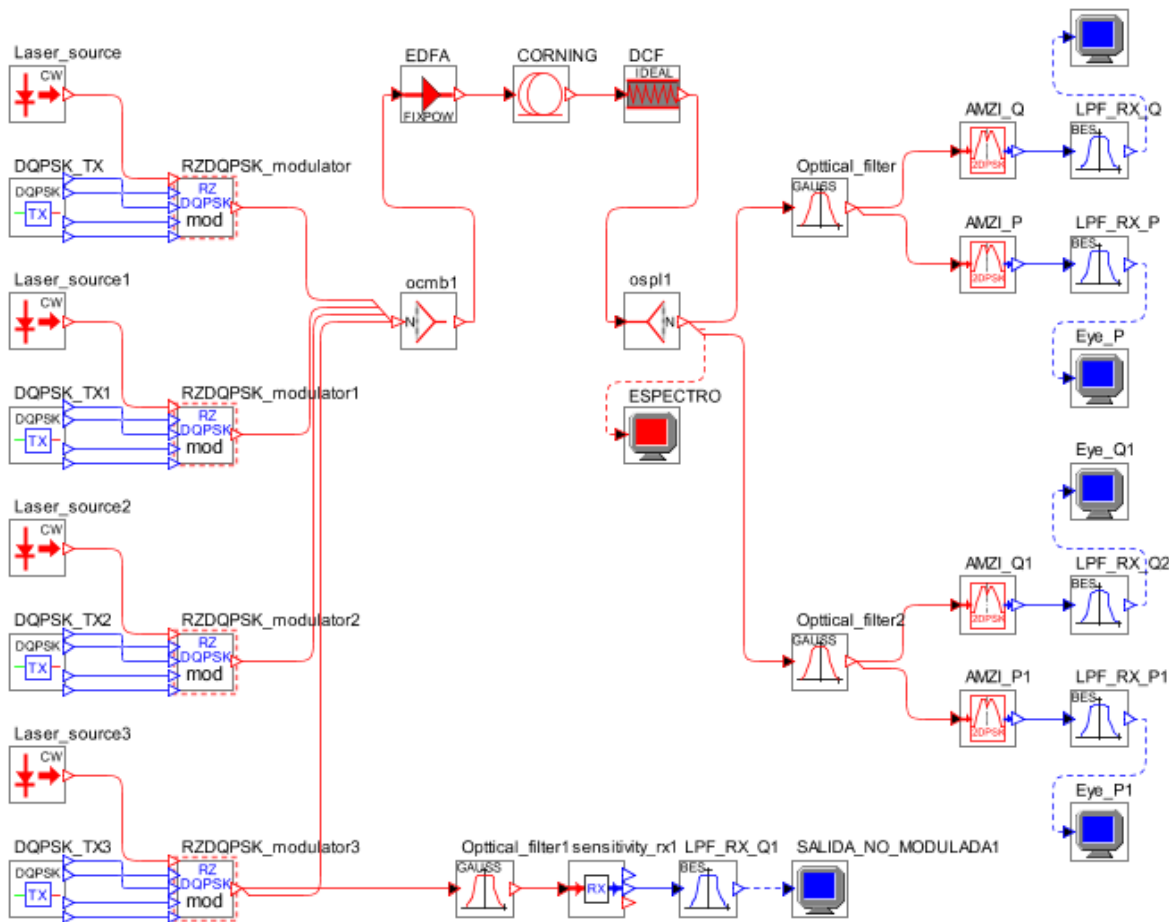


Figura 3.27 Modelo de Simulación de tipo XG-PON

De la misma forma que para los casos anteriores, se debe garantizar un régimen de propagación predominantemente lineal, se procede a identificar el máximo nivel de potencia con el fin de no excitar los comportamientos de tipo no lineal, destacándose la mezcla de cuatro ondas FWM (*Four Wave Mixing*), la cual será un indicador de configuración del sistema, del mismo modo, dado que la Dispersión cromática es uno de los fenómenos predominantes y más complejos en la propagación lineal, se procederá a compensar de manera ideal mediante módulos “*Ideal Fiber Grating*”, suministrados por la herramienta; los parámetros generales de configuración se detallan en la tabla 3.17.

Sistema de tipo XGS-PON – 4 canales de 10Gbps	
Parámetro	Valor
Velocidad de Acceso	5Gbps en fase y cuadratura
Longitud inicial del enlace	80Km
Compensación DCF	ideal
Amplificación EDFA inicial	5dBm
Potencia del Laser Inicial	0dBm
Tipo de fibra	Corning SMF28-e 1550

Tabla 3.17 Parámetros de Configuración Generales DPSK

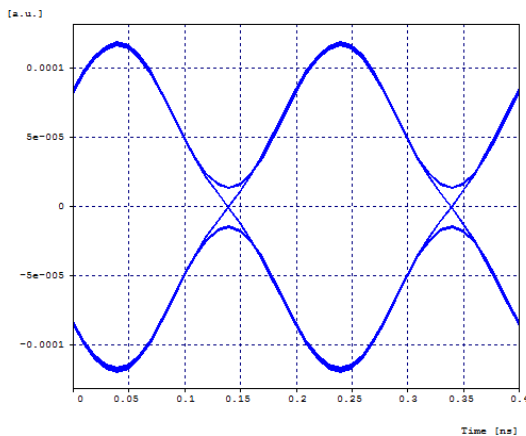


Figura 3.28 (a) señal modulada de fase a la entrada del Rx

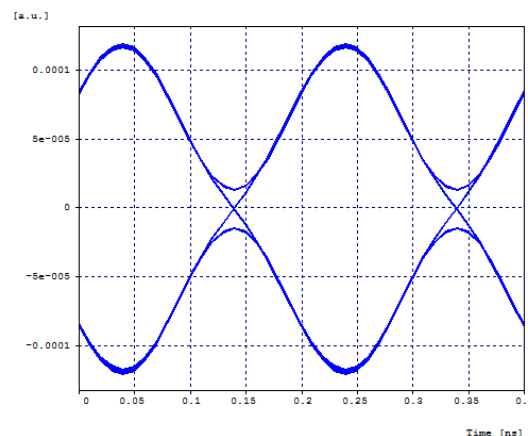


Figura 3.28 (b) señal modulada de cuadratura a la entrada del Rx

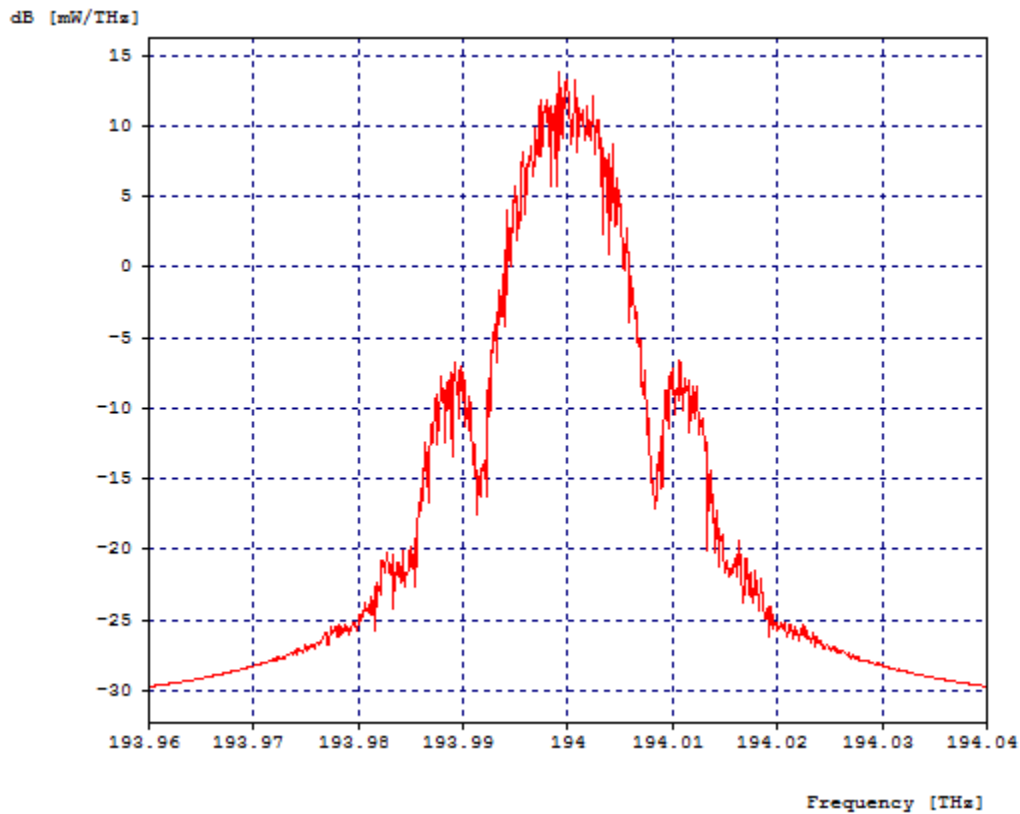


Figura 3.28 (c) Espectro de salida de la señal modulada en Rx

A continuación, se procederá a determinar la máxima tolerancia a las penalidades de potencia, de modo que se mantenga un régimen de propagación predominantemente lineal, dicha variación se realizara desde la potencia del láser y de los amplificadores de línea.

Variación en la Potencia de los canales ópticos	
	Valor
Laser	0dBm a 30dBm con variaciones de 5dBm

Tabla 3.18 Variación de la potencia del laser

Dado que el esquema de modulación es muy tolerante frente a las penalidades de potencia, se debe estimular con valores superiores a los típicos en el láser, como

se puede apreciar en la figura 3.29, la potencia del láser no es un factor determinante en la excitación de los fenómenos no lineales y ninguna variación aporta significativamente en un cambio de régimen de propagación.

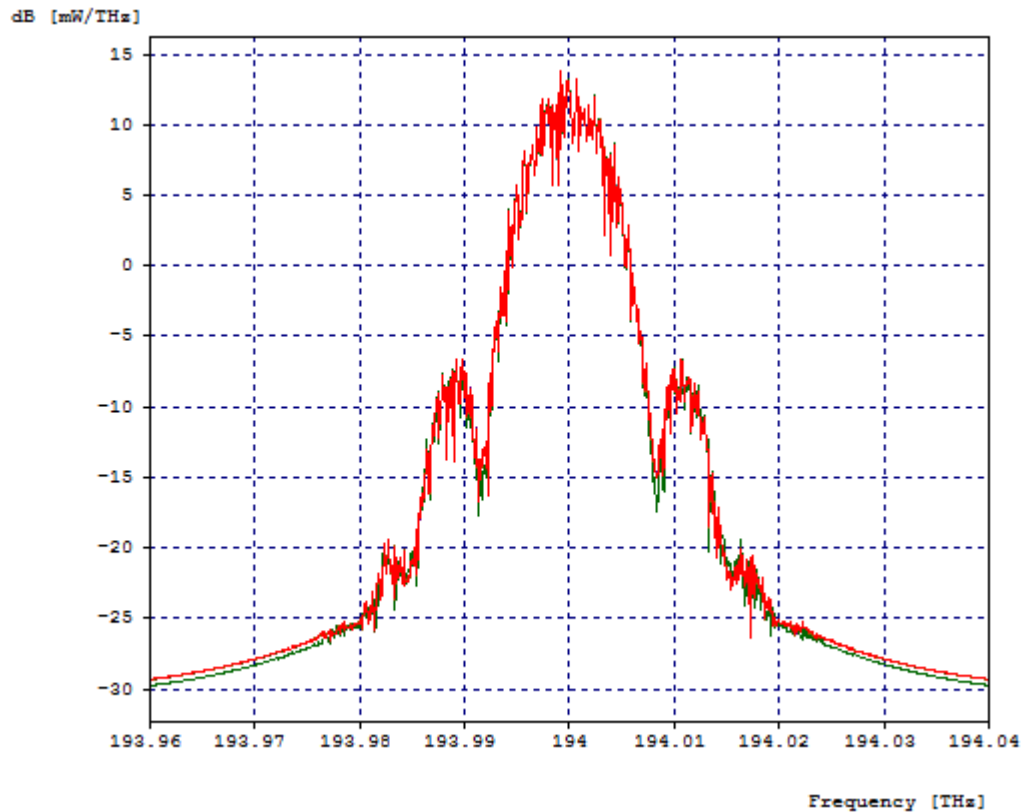


Figura 3.29 Espectro de salida para la variación de la potencia del canal óptico en un sistema DWDM

La línea verde del espectro, representa el comportamiento del sistema con una potencia de 0dBm, mientras la línea roja lo hace para una potencia por canal óptico de 30dBm, donde es evidente que no se presentan fenómenos de tipo no lineal dado que el espectro no cambia considerablemente.

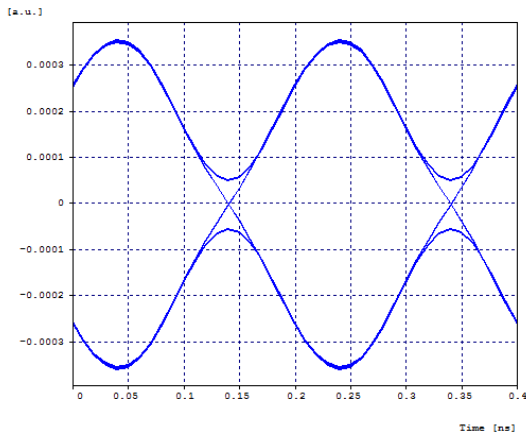


Figura 3.30 (a) salida modulada para una potencia de 10dBm en el EDFA

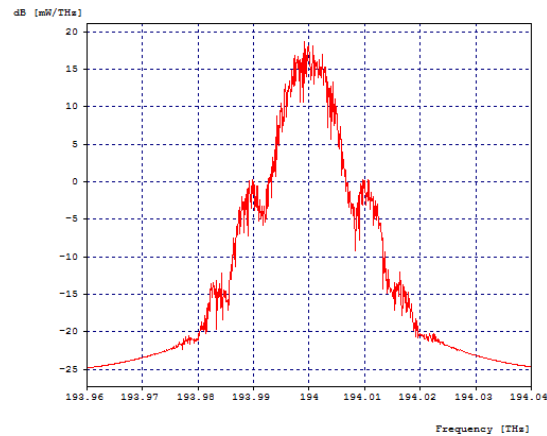


Figura 3.30 (b) Espectro de salida para una potencia de 10dBm en el EDFA

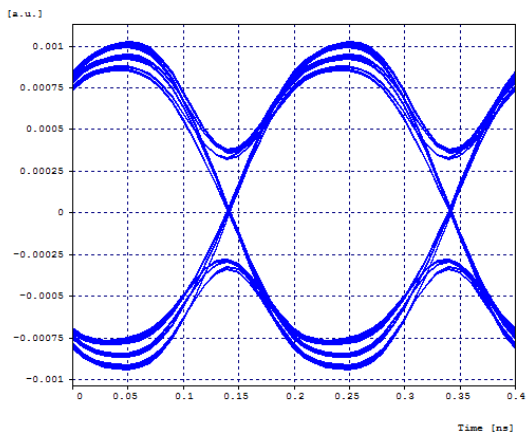


Figura 3.30 (c) salida modulada para una potencia de 15dBm en el EDFA

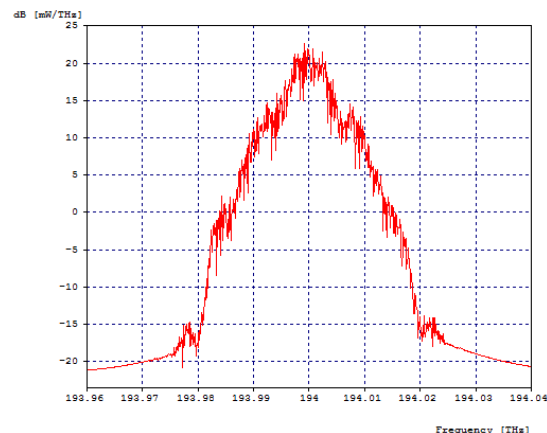


Figura 3.30 (d) Espectro de salida para una potencia de 15dBm en el EDFA

Variación en la Potencia de los dispositivos EDFA	
EDFA	Valor
	0dBm a 30dBm con variaciones de 5dBm

Tabla 3.19 Variación de la potencia de los dispositivos EDFA

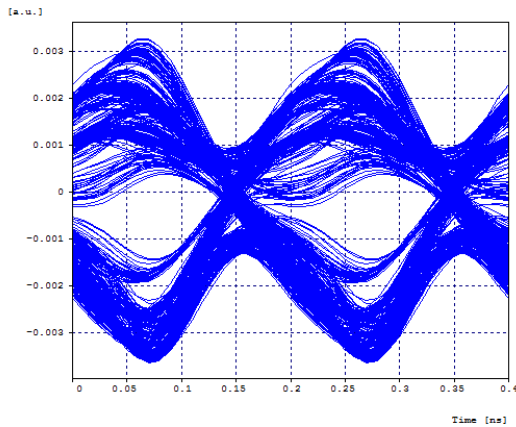


Figura 3.30 (e) salida modulada para una potencia de 20dBm en el EDFA

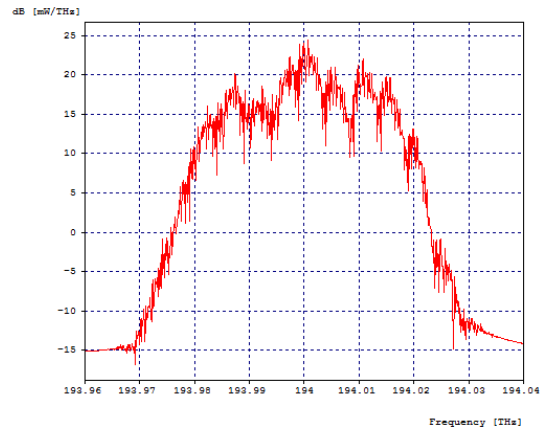


Figura 3.30 (f) Espectro de salida para una potencia de 20dBm en el EDFA

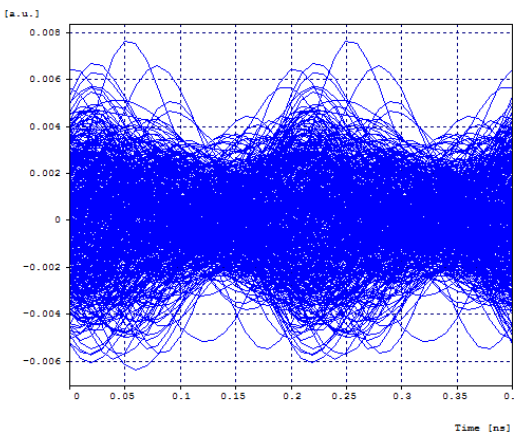


Figura 3.30 (g) salida modulada para una potencia de 25dBm en el EDFA

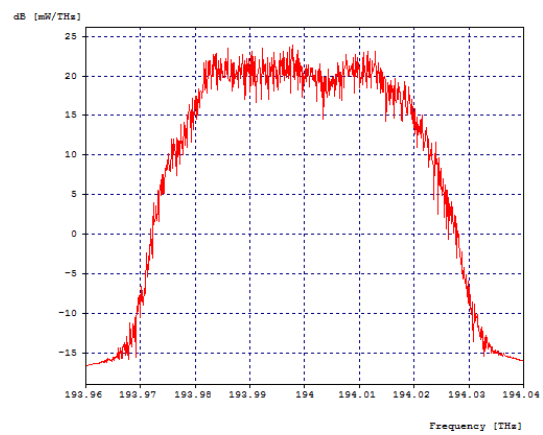


Figura 3.30 (i) Espectro de salida para una potencia de 25dBm en el EDFA

Como se puede apreciar en la figura 3.30 (a) a figura 3.30 (i), la configuración de la potencia del EDFA de la tabla 3.19, es un parámetro significativo en el desempeño del sistema ya que pequeñas variaciones de potencia generaran un cambio en el régimen de propagación y en el desempeño del sistema, limitándose a un valor máximo de 10dBm de amplificación de línea, los parámetros de monitoreo óptico se fijan en una $BER=1e^{-40}$, un factor $Q=27.83dB$, potencia en recepción alrededor de los -14.51dBm y una OSNR de 29.46dB.

Del mismo modo, una vez establecidas las características de potencia del sistema y con la finalidad de aplicar la ecuación 2.22 se procede a definir las variables de medición especificadas en la tabla 3.20, sin embargo debido a las características específicas de este esquema de modulación, se puede demostrar que dado su baja ocupación espectral por longitud de onda propagada y además su alta tolerancia a las degradaciones ópticas, las penalidades de potencia y los fenómenos lineales y no lineales, esta solución basada en el esquema de modulación RZ-DQPSK permite aproximar los canales a una distancia de 20GHz sin que esto afecte la información en el medio o la calidad de la señal, siendo el único capaz de lograr dicho $(N - 1)\Delta\nu$.

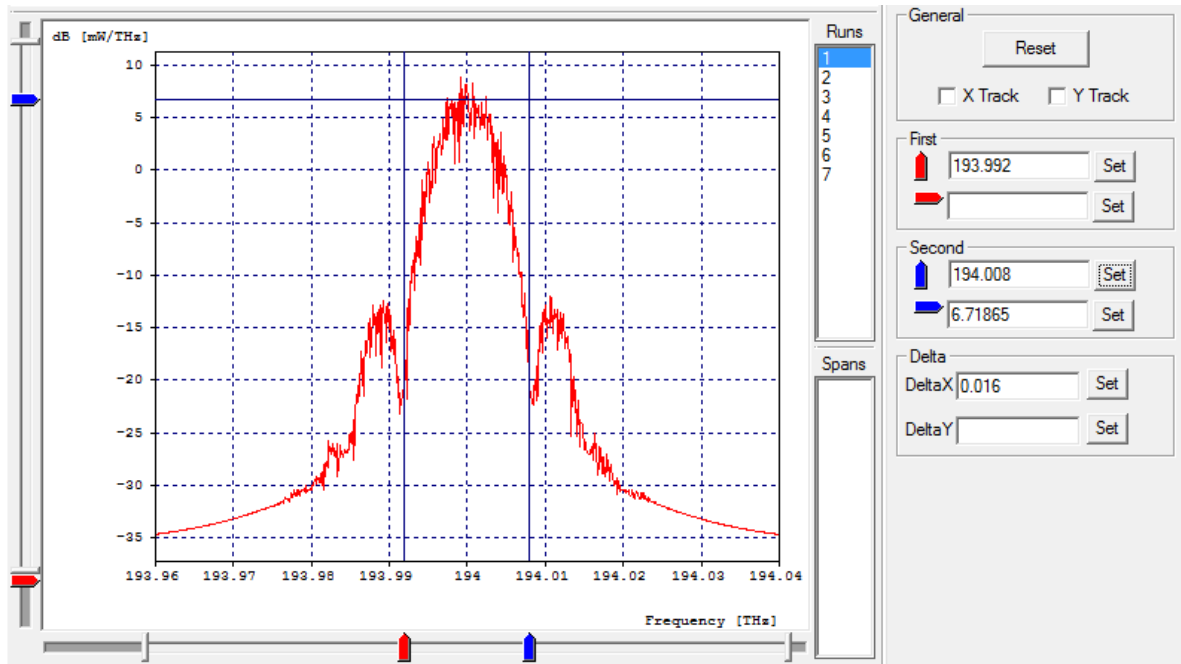


Figura 3.31 Espectro de salida para un $(N - 1)\Delta\nu = 100\text{GHz}$ y una tasa de acceso nominal de 5Gbps en fase y cuadratura

En las figuras 3.32 (a) a 3.32 (c) se puede constatar dicha proximidad y verificar el estado de los datos en recepción tanto en fase como en cuadratura, de modo que es la mínima ocupación espectral que se puede lograr de todos los casos de estudio implementados hasta el momento.

Variables de medición y Control - 4 canales de 5Gbps de Acceso nominal					
$(N - 1)\Delta_\nu$	C_N	C_{TOT}	C_{PRO}	η_{ded}	η_{dist}
		4ch x 10Gbps	Distancia 80Km	0.016Thz	
20Ghz	10Gbps	40Gbps	3.2Tbps*Km	62.5% [bps/Hz]	200% [bps/Hz]
Parámetros de monitoreo óptico					
$(N - 1)\Delta_\nu$	BER	FACTOR Q	OSNR	S _{RX}	
20Ghz	1e ⁻⁴⁰	40.00dB	12.41dB	-16.62dBm	

Tabla 3.20 Monitoreo de la Eficiencia Espectral para 4 canales de 10Gbps de acceso nominal por longitud de onda

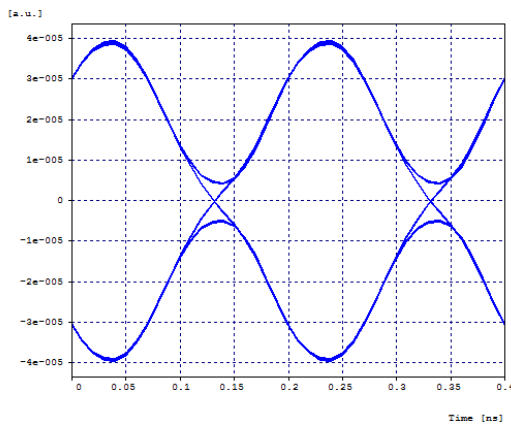


Figura 3.32 (a) Diagrama del Ojo para los datos de fase y un $(N - 1)\Delta_\nu = 20Ghz$

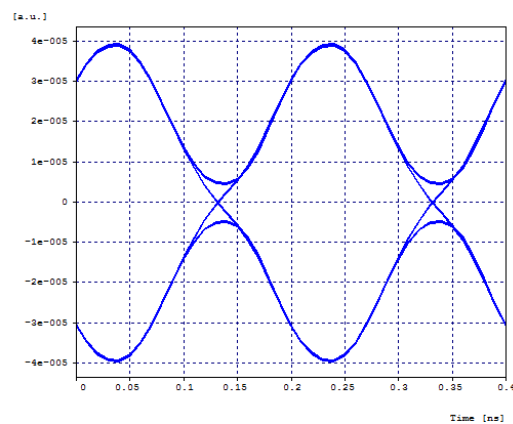


Figura 3.32 (b) Diagrama del Ojo para los datos de cuadratura y un $(N - 1)\Delta_\nu = 20Ghz$

La tabla 3.21 resume el comportamiento del sistema DWDM como un resultado de la aplicación de la ecuación 2.22 donde, se asocia una capacidad total de la red con una ocupación neta del espectro propagado, haciendo que los espaciamientos sean forzados a distancias mínimas de 20Ghz, logradas solo en este caso de estudio, donde, debido al espectro óptico angosto generado por cada canal RZ-DQPSK propagado y esto junto con la capacidad neta de transmisión binaria vista como una sumatoria de los canales independientes, logra una eficiencia

espectral de más del 50%, la máxima alcanzada hasta este momento, del mismo modo se puede constatar que su eficiencia espectral dedicada por canal óptico es la más alta conseguida hasta el momento.

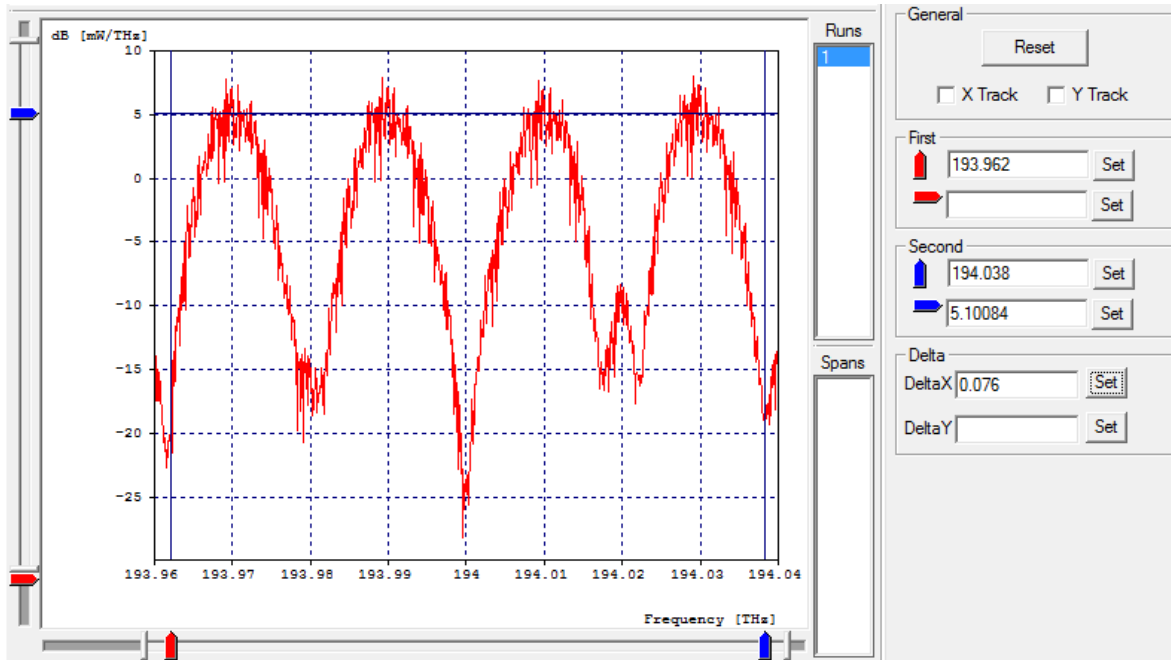


Figura 3.32 (c) Espectro de la señal para un $(N - 1)\Delta_v = 20\text{GHz}$

Variables de medición y Control - 4 canales de 5Gbps Analíticas en fase y cuadratura					
$(N - 1)\Delta_v$	C_N	C_{TOT}	C_{PRO}	Bw	η_{disa}
		4ch x 10Gbps	Distancia 80Km	Total Ocupado	[bps/Hz]
20GHz	5Gbps	40Gbps	3.2Tbps*Km	76 GHz	52.63% [bps/Hz]
Parámetros de monitoreo óptico					
$(N - 1)\Delta_v$	BER	FACTOR Q	OSNR	S _{RX}	
50GHz	1e ⁻⁴⁰	40.00dB	12.41dB	-16.62dBm	

Tabla 3.21 Monitoreo de la Eficiencia Espectral analítica y nominal para 4 canales co-propagantes de 10Gbps

3.4.2 1 canal de 20Gbps de Acceso nominal en fase y cuadratura – para una arquitectura de red de tipo NG-PON

El esquema general del sistema óptico propuesto se puede apreciar en la figura 3.33, donde se implementa un canal óptico con una tasa de transmisión nominal de 40Gbps a nivel de acceso.

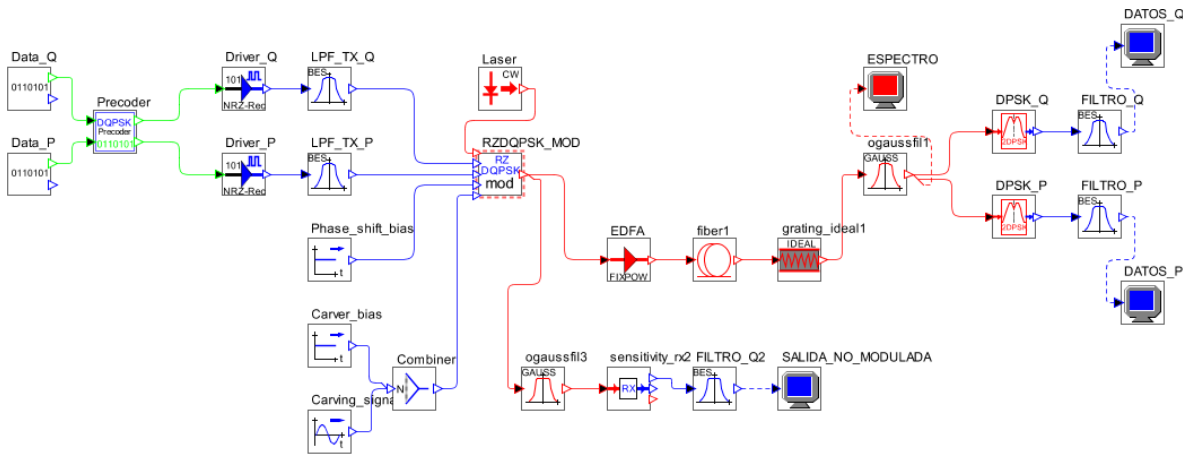


Figura 3.33 Modelo de Simulación de tipo NG-PON.

Sistema de tipo NG-PON – 1 canal de 40Gbps	
Parámetro	Valor
Velocidad de Acceso	40Gbps
Longitud inicial del enlace	80Km
Compensación DCF	ideal
Amplificación EDFA inicial	5dBm
Potencia del Laser Inicial	0dBm
Tipo de fibra	Corning SMF28-e 1550

Tabla 3.22 Parámetros de Configuración Generales DQPSK

Para garantizar que el efecto de la Dispersion cromática debido a la alta tasa de transición de datos no afecte considerablemente el desempeño del sistema, se procederá a compensar dicho fenómeno de manera ideal mediante módulos “*Ideal Fiber Grating*”, suministrados por la herramienta; los parámetros generales de configuración se detallan en la tabla 3.22. En las figuras 3.33 (a) a 3.33 (c) se detalla el comportamiento inicial del sistema óptico.

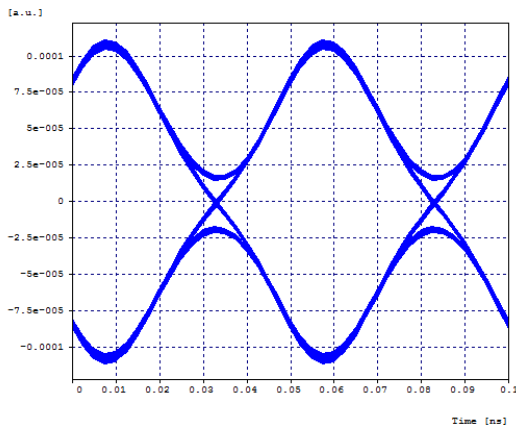


Figura 3.33 (a) señal modulada y recibida en cuadratura en Rx

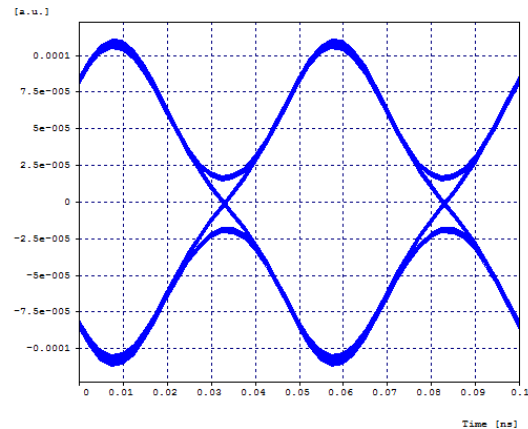


Figura 3.33 (b) señal modulada y recibida en fase en Rx

Para los parámetros de configuración inicial del sistema a 40Gbps, se determina un comportamiento inicial de las variables OPM para una BER= $1e^{-40}$, un factor Q=39.22dB, potencia en recepción alrededor de los -14.75dBm y una OSNR de 43.51dB, del mismo modo que para los casos anteriores, se debe determinar la máxima tolerancia del sistema para mantener un régimen de propagación predominantemente lineal, debido a las penalidades de potencia que puede introducir el láser de cada canal óptico o la amplificación de línea de tipo EDFA.

Variación en la Potencia de los canales ópticos	
	Valor
Laser	0dBm a 30dBm con variaciones de 5dBm

Tabla 3.23 Variación de la potencia del laser

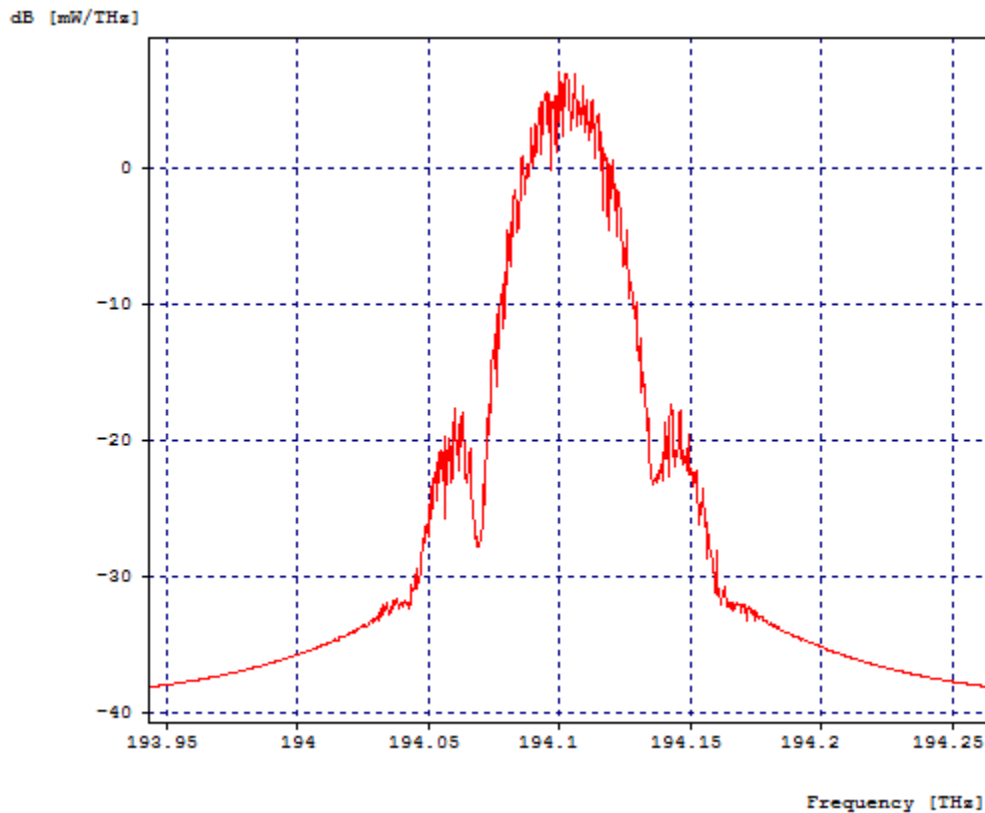


Figura 3.33 (c) Espectro de salida de la señal modulada en Rx

Como se puede apreciar en la figura 3.34, la potencia del láser no es un factor determinante en la excitación de los fenómenos no lineales, y por tanto no introduce penalidades de potencia y ninguna variación aporta significativamente en un cambio de régimen de propagación. Para este caso la línea café representa la respuesta del sistema a una excitación de 0dBm y la roja a una máxima de 30dBm.

Variación en la Potencia de los dispositivos EDFA	
EDFA	Valor
	0dBm a 30dBm con variaciones de 5dBm

Tabla 3.24 Variación de la potencia de los dispositivos EDFA

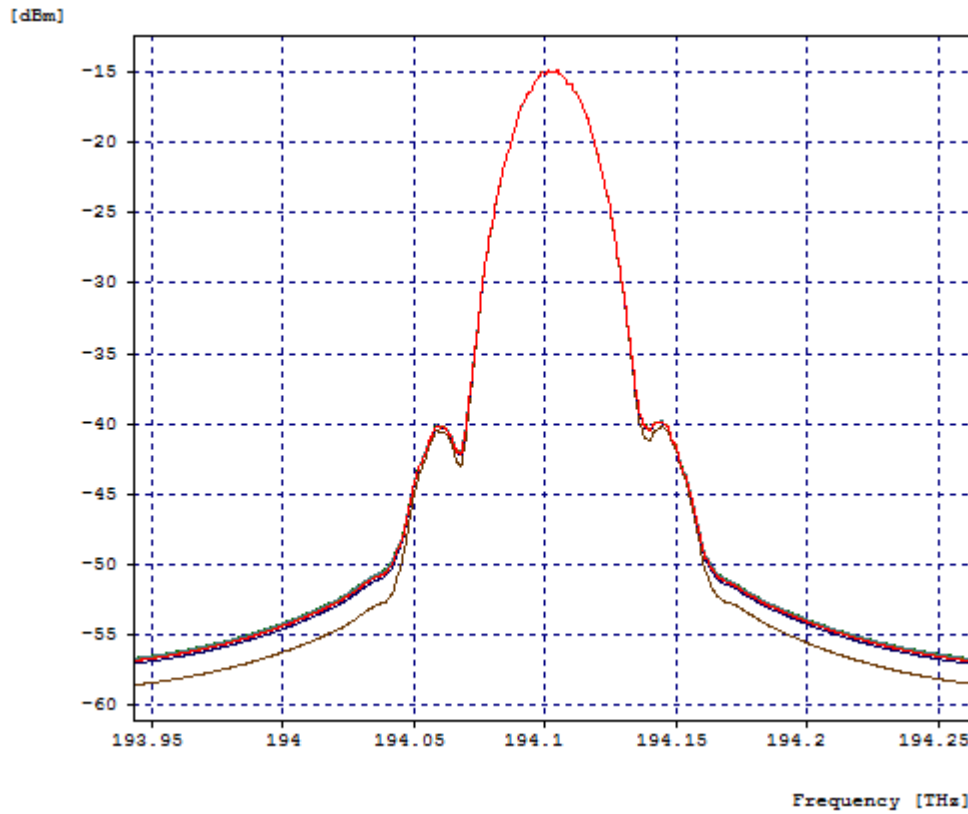


Figura 3.34 Espectro de salida para la variación de la potencia del canal óptico en un sistema DWDM

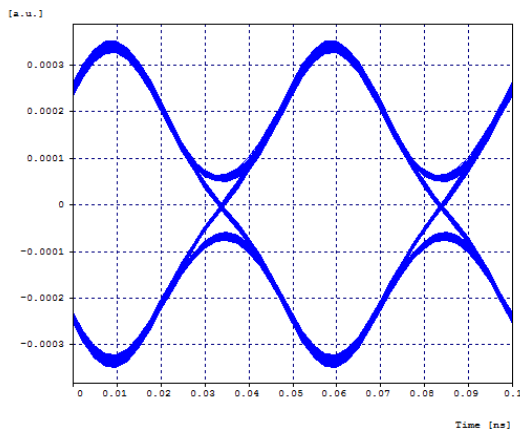


Figura 3.35 (a) salida modulada para una potencia de 10dBm en el EDFA

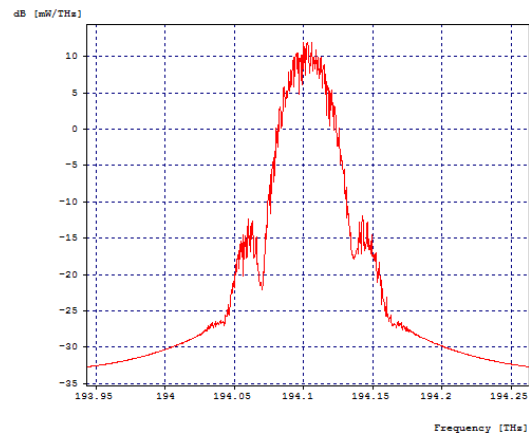


Figura 3.35 (b) Espectro de salida para una potencia de 10dBm en el EDFA

Las figuras 3.35 (a) a 3.35 (h) , determinan el comportamiento del sistema frente a la variación de la potencia del EDFA , es evidente una degradación debido a las penalidades de potencia, y un cambio a un régimen de propagación no lineal, mediante el análisis del diagrama del ojo se puede constatar que para valores superiores a 15dB, el sistema se degrada totalmente para unos parámetros objetivo por fuera del rango deseable, de tipo Factor Q = 9.17dB y una tasa de error BER = $2.2e^{-3}$.

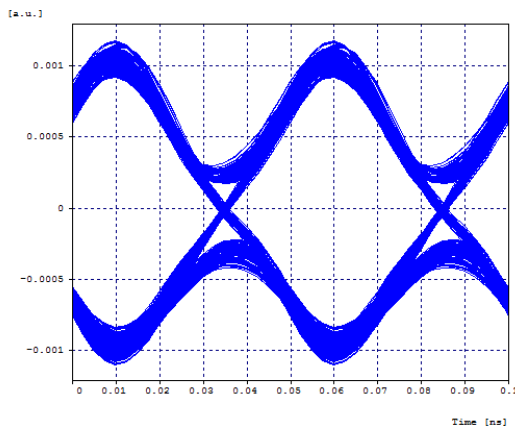


Figura 3.35 (c) salida modulada para una potencia de 15dBm en el EDFA

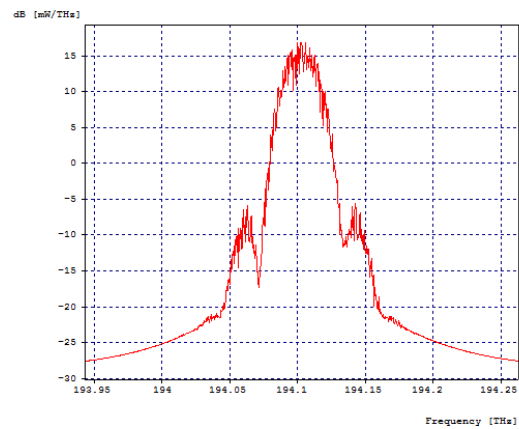


Figura 3.35 (d) Espectro de salida para una potencia de 15dBm en el EDFA

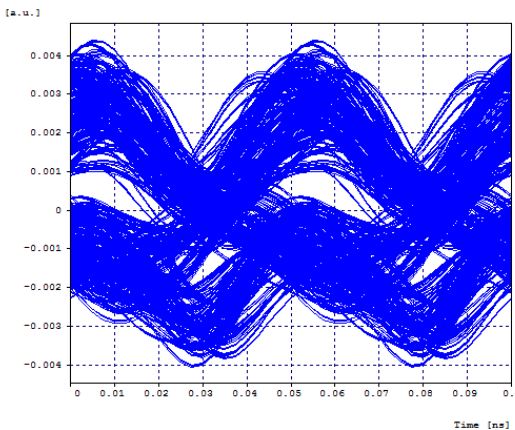


Figura 3.35 (e) salida modulada para una potencia de 20dBm en el EDFA

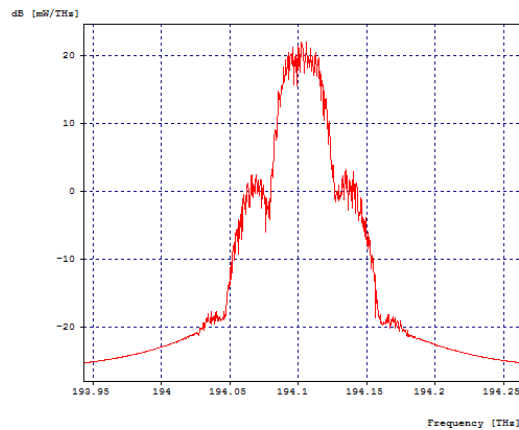


Figura 3.35 (f) Espectro de salida para una potencia de 20dBm en el EDFA

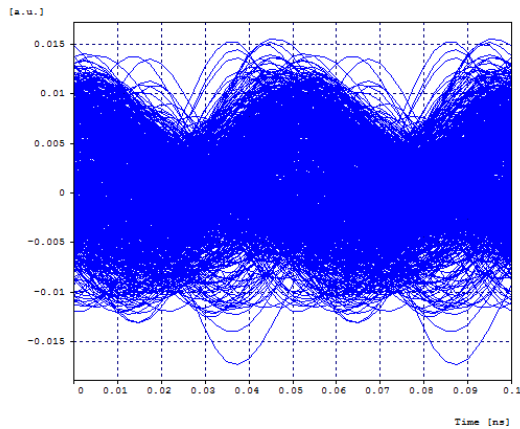


Figura 3.35 (g) salida modulada para una potencia de 25dBm en el EDFA

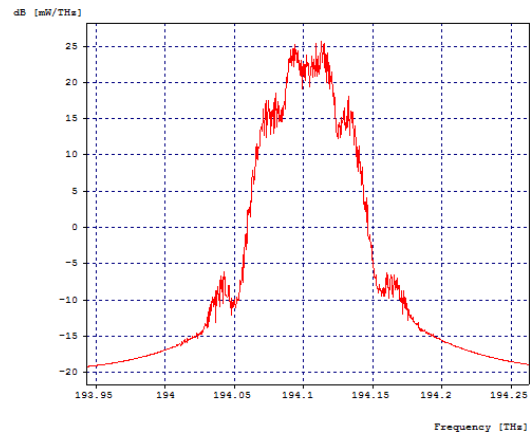


Figura 3.35 (h) Espectro de salida para una potencia de 25dBm en el EDFA

En las gráficas 3.36 (a) y 3.36 (b), se puede constatar el efecto que produce en el sistema el incremento en la amplificación de línea de los dispositivos EDFA, donde pequeñas variaciones genera cambios en la calidad de la señal de los datos en fase y en cuadratura, del mismo modo se produce una deformación del espectro propagado.

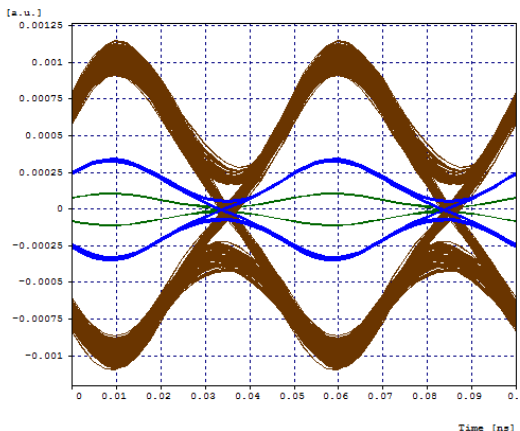


Figura 3.36 (a) efecto de la amplificación de línea en los datos de fase y cuadratura

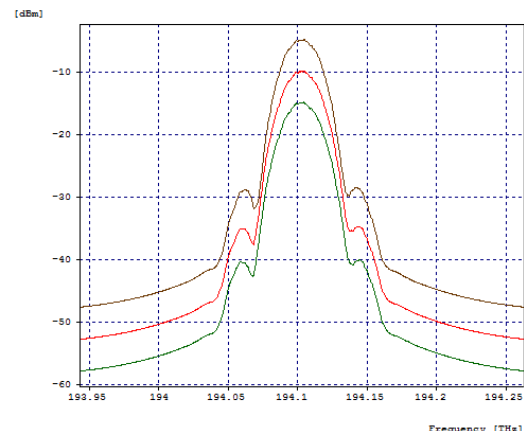


Figura 3.36 (b) efecto de la amplificación de línea en el espectro propagado

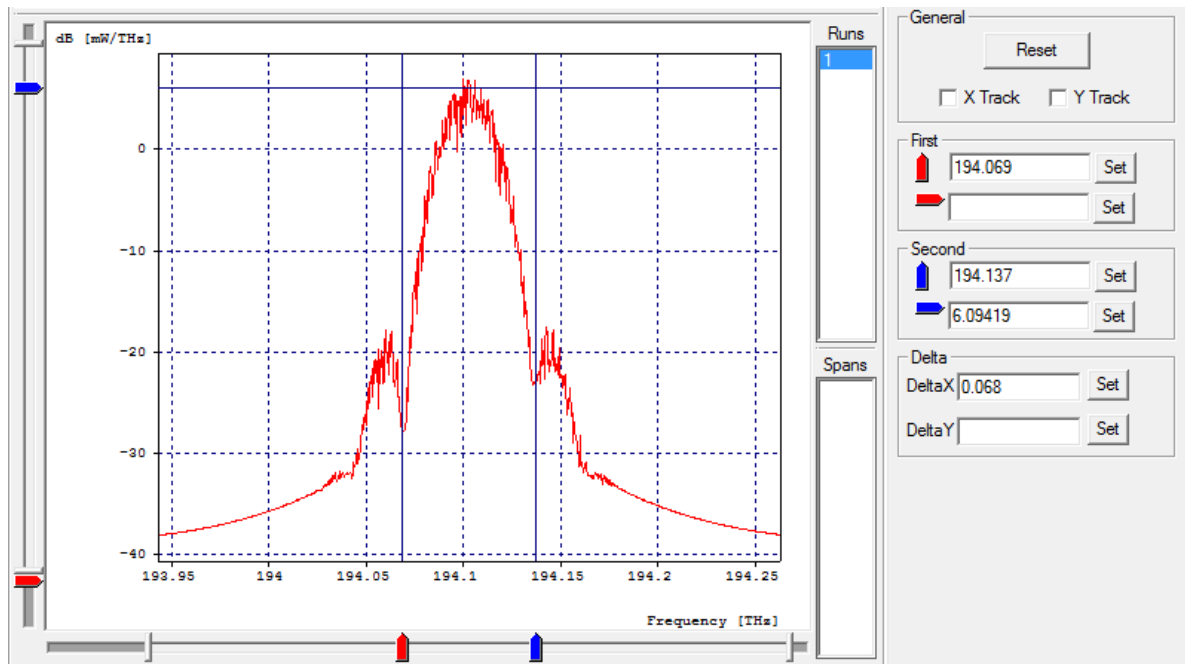


Figura 3.37 Espectro de salida para una tasa de acceso nominal de 20Gbps en fase y cuadratura

Variables de medición y Control - 4 canales de 5Gbps de Acceso nominal					
$(N - 1)\Delta_\nu$	C_N	C_{TOT} 1ch x 20Gbps + 20Gbps	C_{PRO} Distancia 80Km	η_{ded} 0.068Thz	η_{dist}
----	20Gbps	40Gbps	3.2Tbps*Km	58.82% [bps/Hz]	58.82% [bps/Hz]
Parámetros de monitoreo óptico					
$(N - 1)\Delta_\nu$	BER	FACTOR Q	OSNR	S _{RX}	
----	1e ⁻⁴⁰	40.00dB	43.52dB	-14.75dBm	

Tabla 3.25 Monitoreo de la Eficiencia Espectral para 1 canales de 40Gbps de acceso nominal por longitud de onda

Una vez establecidas las características de potencia del sistema se procede a definir las variables de medición especificadas en la tabla 3.25, donde, para esta solución propuesta basada en el esquema de modulación RZ-DQPSK y debido a las características de configuración, se puede demostrar que dado su baja

ocupación espectral por longitud de onda propagada y además su alta tolerancia a las degradaciones ópticas, se pueden alcanzar alta eficiencia espectral para altas tasas de transmisión binarias.

3.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL

Mediante las soluciones propuestas a través del diseño y la implementación de esquemas avanzados de modulación de fase diferencial DPSK y fase y cuadratura diferencial DQPSK, se pudo constatar que debido a sus características robustas de configuración, para altas tasas de transmisión de datos propuestas desde el grupo de trabajo FSAN para arquitecturas de red de tipo NG-PON, es posible alcanzar velocidades del orden de los 40Gbps de transmisión neta binaria con una muy alta eficiencia espectral, mejorando significativamente el desempeño, llegando más lejos de los límites binarios establecidos mediante modulaciones y codificaciones simples de tipo OOK.

Se debe aclarar que para codificaciones de tipo NRZ y RZ moduladas en intensidad, no es posible lograr velocidades de acceso de más de 10Gbps con eficiencias que oscilan entre 0.2 y 0.4 bps/Hz, lo que no permite mediante la implementación de este tipo de formatos de modulación, lograr arquitecturas de red más allá de tipo XGS-PON, resultados que fueron ampliamente superados mediante las soluciones propuestas. A continuación se realizara un análisis comparativo de los diferentes casos de estudio desarrollados en el presente trabajo de investigación. Para las soluciones propuestas basadas en el formato de modulación RZ-DPSK, fue posible alcanzar una tasa de transmisión neta binaria por longitud de onda de 40Gbps para una máxima eficiencia espectral del 40%, mientras que para el caso del formato de modulación RZ-DQPSK se pudo garantizar canales de 40Gbps a 80Km con una eficiencia espectral de casi el 60%, valores que superan significativamente los generados para los formatos NRZ-OOK y RZ-OOK siendo en la actualidad los más implementados a nivel comercial.

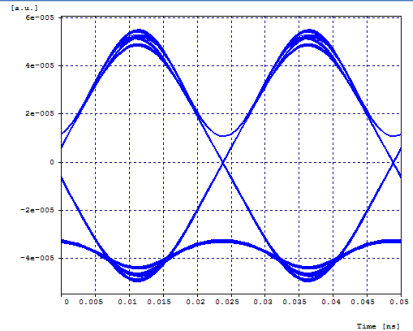
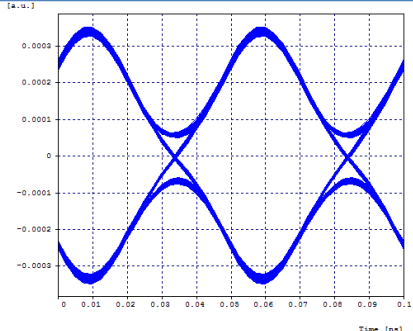
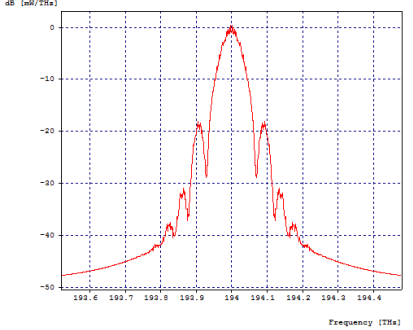
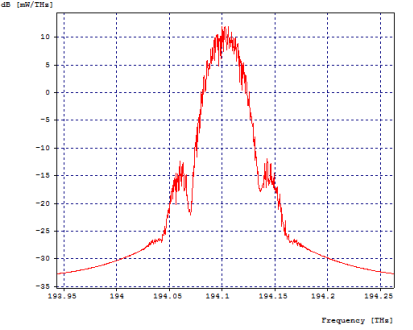
características	RZ-DPSK	RZ-DQPSK
Diagrama del ojo característico		
Espectro característico		
Tolerancia a las degradaciones ópticas	Altamente tolerante	Altamente tolerante
Penalizaciones de potencia	No muy susceptible	Altamente susceptible
Arquitectura de red alcanzada	NG-PON 40Gbps de Acceso	NG-PON 40Gbps de Acceso
Distancia de transmisión garantizada	80Km para una máxima transmisión de información de 3.2Tbps*Km	80Km para una máxima transmisión de información de 3.2Tbps*Km
Complejidad en la configuración	complejo	Significativamente complejo
Ocupación espectral para el máximo acceso	141GHz – 100GHz (RSA)	68GHz
eficiencia espectral	40%	58.83%

Tabla 3.26 Análisis comparativo de la eficiencia espectral

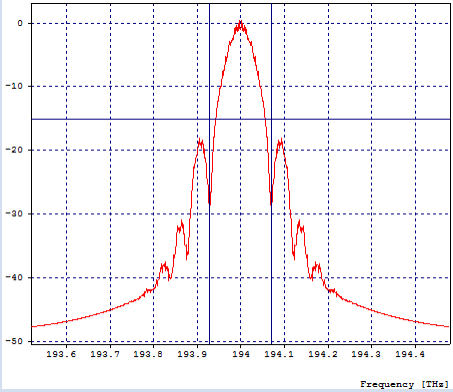
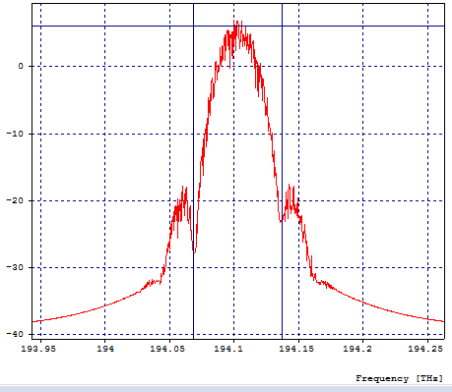
características	RZ-DPSK		RZ-DQPSK
Espectro característico o a la máxima capacidad de transmisión			
40 Gbps			
Ancho de banda Ocupado	141 GHz		68 GHz
Ahorro de Ancho de banda respecto a NRZ/RZ - OOK	19 GHz		93 GHz
Eficiencia ¹⁰ Espectral Neta Binaria	NRZ / RZ – OOK [7] 0.117 bps/Hz	RZ – DPSK 0.283 bps/Hz	RZ – DQPSK 0.588 bps/Hz
Factor de Mejora	referencia	> 180% Ó 2 Veces	>580% Ó 5 Veces

Tabla 3.27 Mejoras de la eficiencia espectral

La tabla 3.26 y tabla 3.27, resume el comportamiento de las soluciones basadas en los formatos avanzados de modulación, donde es evidente que a pesar del grado tan alto de complejidad en la configuración y la implementación de RZ-DQPSK, este es sumamente robusto, garantiza una alta eficiencia espectral y

¹⁰ Esta medida de la eficiencia espectral hace referencia a la relación de la capacidad neta binaria a nivel de acceso de la red y el ancho de banda total ocupado.

permite grandes distancias de propagación sin requerir múltiples elementos de soporte en la línea, sin embargo es necesario realizar un análisis detallado de los factores que pueden influir en la aplicación de las diferentes arquitecturas expuestas en la presente investigación, pues a través de todas ellas se puede garantizar una capacidad máxima de 40Gbps, siendo una finalidad del desarrollo de este trabajo, de modo que:

Para las arquitecturas propuestas basadas en el esquema de modulación DPSK se puede concluir que:

- Fue posible alcanzar velocidades de acceso de 40Gbps
- Es un esquema de modulación altamente robusto frente a las degradaciones ópticas
- Permite alcanzar grandes distancias sin requerir altos valores de amplificación de línea
- Manipulando el espectro y aplicando asignación dinámica del mismo, se podría alcanzar una eficiencia espectral del orden del 40%
- Los fenómenos degradantes se acentúan con el incremento de la velocidad de propagación
- Es posible garantizar información de orden de los Tbps en el medio

Para las arquitecturas propuestas basadas en el esquema de modulación DQPSK se puede concluir que:

- Fue posible alcanzar velocidades de acceso de 40Gbps

- Es el esquema de modulación más robusto frente a las degradaciones ópticas
- No permite alcanzar grandes distancias sin requerir altos valores de amplificación de línea
- Es el estándar de modulación más eficiente espectralmente alcanzando valores del orden del 60%
- Es posible garantizar información del orden de los Tbps en el medio

Sin embargo a pesar de poder garantizar en cada una de las soluciones propuestas anteriormente los objetivos de la presente investigación, se debe considerar que la manipulación de las señales a baja velocidad de propagación se prefiere sobre las señales a altas velocidades, ya que, para lograr arquitecturas en estado puro de tipo NG-PON de 40Gbps, todos y cada uno de los parámetros de configuración se deben establecer y optimizar cuidadosamente, cada uno de los elementos de red deben ser considerados y pequeños cambios o comportamientos aleatorios del sistema generara como resultado una pérdida total del tratamiento de la información.

Del mismo modo, lograr espaciamientos por debajo de los 25GHz en las diferentes arquitecturas implica que los espectros de las señales generadas por las soluciones propuestas son altamente eficientes, del mismo modo, la aplicación de la ecuación adaptada de la teoría de la información propuesta en este documento, solo está definida dentro del marco de referencia de la respuesta lineal del sistema y de valores acotados de potencia, cuyos resultados obtenidos fueron coherentes dentro de los resultados teóricos esperados.

Por último, se debe resaltar que estas solución se muestran como fuertes candidatos a la migración de las redes ópticas a arquitecturas de nueva generación,

las cuales, permitirán alcanzar altas velocidades de transmisión de datos con un gran manejo de tráfico sobre la red, siendo la mejor opción para los nuevos estándares propuestos hacia los siguientes diez años de evolución.

Nota del Autor.

Mediante el desarrollo del presente capítulo se demostró que es posible diseñar, configurar e implementar soluciones novedosas alrededor de esquemas de modulación complejos que permitan alcanzar grandes velocidades de transmisión de datos con una alta eficiencia espectral, mas lejos de los límites binarios establecidos, del mismo modo se demostró que la dimensión matemática de la ecuación adaptada de la teoría de la información, está acotada dentro de los resultados esperados.

Referencias

- [1] RSoft Design Group, “OptSim User Guide”, Ossining, NY 10562, 2010.
- [2] RSoft Design Group, “RSoft Installation Guide”, Ossining, NY 10562, 2018.
- [3] RSoft Design Group, “Models Reference, Volume II Block Mode”, Ossining, NY 10562, 2010.
- [4] RSoft Design Group, “Models Reference, Volume I Sample Mode”, Ossining, NY 10562, 2018.
- [5] A. Varga, OpenSim Ltd, “OMNeT++ user’s manual”, OMNeT++ version 5.4.1, 2016.

[6] R. S. Pressman, “Ingeniería de Software un Enfoque Práctico”, Séptima Edición, Editorial McGraw-Hill, ISBN 6071503140, Madrid, 2010.

[7] G. Gómez, J. Grijalba, “*Análisis del desempeño de formatos de modulación en comunicaciones ópticas sobre redes WDM*”, Tesis de Pregrado, Universidad Del Cauca, Mayo 2010.

CAPITULO 4.

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Mediante la realización de este trabajo de investigación, se determinaron soluciones alrededor de esquemas de modulación avanzados, que permitieron diseñar, configurar e implementar arquitecturas de red de última generación de tipo NG-PON, con la finalidad de generar mejoras en la eficiencia espectral, en la capacidad de la red, en los parámetros de monitoreo óptico y en el tratamiento de la señal. Del mismo modo, se planteó una adaptación de la teoría de la información de Shannon-Harley para la medida de la eficiencia espectral, cumpliendo de esta manera cada uno de los objetivos específicos y el objetivo general de la investigación.

Algunos de los aportes fundamentales se ven reflejados en la caracterización y el diseño de formatos de modulación avanzados, los cuales mejoran significativamente el desempeño de la red con respecto a las degradaciones ópticas y las penalidades de potencia, del mismo modo, se realizó un análisis comparativo de los estándares de modulación simples y multinivel, que garantizan altas velocidades de transmisión de datos con un alto volumen de información y una gran eficiencia espectral.

Para la realización de este proyecto se implementó la herramienta de simulación RSoft OptSim™ de Synopsys, adquirida por parte de la Universidad del Cauca, permitiendo diseños de última generación que podrían ser implementados en la academia y los cursos y electivas que a nivel de pregrado y postgrado ofrece la universidad. Del mismo modo, este trabajo de grado, es una investigación de actualidad que propone soluciones a los desafíos de las redes modernas,

permitiendo proyectar las arquitecturas de red a los siguientes diez años de evolución (Ref. FSAN – UIT).

A través de la presente investigación se impulsó una serie de trabajos de grado, artículos y asesorías que lograron un gran impacto en la comunidad científica de la universidad del Cauca siendo presentados en diferentes congresos a nivel nacional e internacional y siendo publicados en diferentes revistas científicas, entre ellos se destacan:

Investigaciones:

- Impacto sobre la Densidad Espectral de Información (ISD) en el cambio de una red DWDM de 10Gbps a 40Gbps implementando los formatos CSNRZ-OOK y CSRZ-OOK. Dirección Tesis de pregrado.
- Estudio de factibilidad para la implementación de una red FTTH/GPON en el contexto colombiano para una plataforma Multiservicio. Dirección Tesis de pregrado.
- Diseño e implementación de dispositivos Mach Zehnder de tipo single drive y dual drive para determinar efectos de compensación de dispersión cromática a nivel de acceso de una red DWDM a 10Gbps. Dirección Tesis de pregrado.
- Impacto del formato de modulación sobre la densidad espectral de información en una red DWDM a 10gbps y 40gbps. Dirección Tesis de pregrado.
- Diseño de un módulo compensador de Dispersion cromática basado en súper estructuras de interferómetro mach Zehnder MZI para redes WDM a 2,5Gbps. Dirección Tesis de pregrado.

- Análisis del desempeño de los formatos (RZ-NRZ)/ DQPSK a 10Gbps y 40Gbps en una Red Metropolitana DWDM. Dirección Tesis de pregrado.

Artículos:

- “Adaptación de la teoría de la información para el régimen de propagación lineal de una red óptica DWDM de próxima generación”, Artículo presentado a revista Lampsakos ISSN: 2145-4086, Universidad Católica Luis Amigo.
- “Eficiencia espectral de formatos de modulación avanzados en redes XGS-PON”, Artículo presentado a revista Visión Electrónica ISSN: 1909-9746, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- “Impacto sobre la Densidad Espectral de Información en una arquitectura de red NG-PON implementando formatos avanzados de modulación”, Artículo presentado a revista Ingeniería Solidaria ISSN: 1900-3102, Universidad Cooperativa de Colombia.

4.1 ENTORNO DE SIMULACIÓN

OptSim es un entorno de simulación que soporta el diseño y la evaluación de desempeño del nivel de transmisión de sistemas de comunicaciones ópticos. Las facilidades de visualización y post-procesamiento de datos proporcionan una interface gráfica de medición flexible que actúa como un conjunto de instrumentos virtuales de laboratorio. OptSim puede ser utilizado para un amplio rango de aplicaciones, entre las cuales se pueden destacar:

- Optimización de los enlaces.

- Balances de Potencia, mapa de dispersión, balance de ganancias, adecuación de la forma del pulso, posicionamiento de amplificadores.
- Rango espectral y optimización de ganancia por Amplificación.
- Análisis de las pérdidas y efectos lineales y no lineales.
- Diseño e investigación de nuevos esquemas de modulación.

Una de las ventajas fundamentales de la herramienta de simulación, es la facilidad de ser configurada para obtener resultados específicos, como solo el análisis de los efectos de tipo lineal o no lineal, las pérdidas y los ruidos de manera independiente, Por otra parte, uno de los principales inconvenientes es que al estar diseñada para sistemas de 2.5Gbps, la configuración de los parámetros para implementar modelos a 10Gbps o 40Gbps se dificulta significativamente, requiriendo especial cuidado en la configuración y en la optimización de los parámetros, sin embargo una vez configurado, los resultados obtenidos son bastante fieles permitiendo introducir las condiciones básicas de operación de la arquitectura de red, simulando todos los componentes de forma ideal o real.

4.2 RECOMENDACIONES

Para la realización de la presente investigación, es necesario tener en cuenta una serie de recomendaciones que facilita la obtención y el análisis de los resultados, las cuales se presentan a continuación:

- Se debe definir el entorno de simulación y el alcance de la investigación, dado que los formatos de modulación reaccionan de diferente manera frente a la variación de las características de la red como velocidad de acceso, potencia, espaciamiento de los canales y ubicación de los dispositivos.

- Se debe prestar mucha atención a la metodología de simulación utilizada, debido a que la herramienta cuenta con su propia metodología, facilitando la obtención de los resultados.
- Antes de crear su propio proyecto de simulación, es importante referirse a la guía de OptSim, la cual brinda ejemplos de simulación y procesamiento de resultados paso a paso, para familiarizarse con el entorno de simulación.

4.3 TRABAJOS FUTUROS

A través de cada una de las etapas de desarrollo del presente proyecto, fue posible identificar ciertas áreas nuevas de investigación que aportarían estudios y resultados que permitirán profundizar sobre las temáticas propuestas anteriormente alrededor de los siguientes criterios:

- Adaptación de la teoría de información para el régimen de propagación no lineal en una arquitectura de red óptica de próxima generación.
- Adaptación de técnicas de multiplexación OFDM para incrementar la densidad espectral de información en un sistema óptico WDM.
- Análisis de esquemas de amplificación para mitigar los fenómenos de penalidades de potencia generados en arquitecturas de red XG-PON.
- Medida de la Densidad Espectral de Información en arquitecturas de red FSN para entornos de comunicaciones ópticas.