

**CRITERIOS PARA EL MONITOREO DEL CANAL ÓPTICO Y LA INCIDENCIA DE LOS  
PARÁMETROS QUE AFECTAN LA CALIDAD DE LA SEÑAL ÓPTICA EN EL DESEMPEÑO DE  
UNA RED METROPOLITANA WDM**



**ANDRÉS FELIPE ESCALLÓN PORTILLA  
JAMES ROLANDO BARRIOS LIS**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES – GNTT  
POPAYÁN  
Mayo de 2008**

**CRITERIOS PARA EL MONITOREO DEL CANAL ÓPTICO Y LA INCIDENCIA DE LOS  
PARÁMETROS QUE AFECTAN LA CALIDAD DE LA SEÑAL ÓPTICA EN EL DESEMPEÑO DE  
UNA RED METROPOLITANA WDM**

**ANDRÉS FELIPE ESCALLÓN PORTILLA  
JAMES ROLANDO BARRIOS LIS**

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

**Director  
Ing. Esp. ALEJANDRO TOLEDO TOVAR**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES – GNTT  
POPAYÁN  
Mayo de 2008**

*A Dios*

Todo poderoso y fuente de inspiración

*Con Amor*

A mi Madre Luz Marina por darme la vida

A mi Abuelita Rosa por sus sabios consejos

A toda la Familia Portilla Caicedo por todo su cariño y  
colaboración incondicional

**Andrés Felipe**

Dedico este triunfo de todo corazón

A Dios mi guía, amigo y compañero en todo momento

A mi Abuelita Aura y a mi Abuelito Gerardo por sus innumerables enseñanzas

A mi Madre por su fuerza y amor

A Toño, a mi Hermanita y a toda mi Familia

por su apoyo incondicional en los buenos

y en especial en los malos momentos.

**James Rolando**

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a: Alejandro Toledo, Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones y Director del proyecto, por sus valiosas orientaciones.

A Oscar Calderón, Giovanni López, Jenny Cuatyndioy, Harold Romo y Pablo Jojoa, Ingenieros en Electrónica y Telecomunicaciones, por su valiosa colaboración y dedicación hacia nosotros para completar con éxito este trabajo de grado.

Es pertinente agradecer a Connie Singleton y Richard Rambaran de Optiwave, Inc. por facilitar la licencia de la herramienta de simulación (OptiSystem 6.0) por 45 días. Además, se expresan agradecimientos especiales a Marcio Freitas cuyo apoyo brindado fue muy importante para lo consecución de los objetivos propuestos.

También agradecemos a nuestras familias y amigos por su apoyo incondicional en la consecución de nuestras metas.

---

**TABLA DE CONTENIDO**

<b>LISTA DE ACRÓNIMOS</b> .....	<b>XI</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>XIV</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS DE LA TÉCNICA WDM, PRINCIPIOS DE CALIDAD DE SERVICIO, REDES MAN Y ARQUITECTURA DE RED METROPOLITANA WDM</b> .....	<b>3</b>
1.1 MARCO TEÓRICO.....	3
1.1.1 Redes Ópticas .....	3
1.1.2 Modelos de Redes Ópticas.....	3
1.1.3 Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM).....	4
1.1.3.1 Multiplexación por división de longitud de onda ampliamente espaciada (CWDM).....	5
1.1.3.2. Multiplexación por división de longitud de onda densamente espaciada (DWDM).....	6
1.2 REDES DE ÁREA METROPOLITANA (MAN).....	7
1.3 CALIDAD DE SERVICIO (QoS).....	8
1.3.1 Definición de QoS .....	8
1.3.2 QoS vs Modelo IP .....	9
1.4 ARQUITECTURA DE UNA RED METROPOLITANA WDM.....	10
1.4.1. Esquema General de Red .....	10
1.4.2. Esquema de la Red Metropolitana WDM.....	11
1.4.3. Esquema General del Canal Óptico (OCh).....	11
1.4.3.1. Esquema básico del OCh .....	13
1.4.3.2. Esquema del OCh con OADM .....	13
1.4.4. Tipos de Interconexión de Redes.....	13
1.4.4.1. Red punto a punto.....	13
1.4.4.2. Red en cadena.....	14
1.4.4.3. Red en anillo .....	14
1.5. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS ÓPTICOS.....	14
1.5.1. Multiplexor Terminal Óptico (OTM) [12].....	15
1.5.2. Amplificador de Línea Óptico (OLA) [12] .....	16
1.5.3. Multiplexor Óptico de Adición/Extracción (OADM) [12].....	17
1.5.3.1. OADM serial [12].....	17
1.5.3.2. OADM paralelo [12].....	18
1.5.4. Regenerador (REG) [12].....	19
1.5.5. Ecuilizador Óptico (OEQ) [12].....	20
1.5.5.1 Ecuilizador de potencia óptico (OPE) [12] .....	20
1.5.5.2 Ecuilizador de dispersión (DE) [12] .....	21
1.6. DISEÑO DE UNA RED METROPOLITANA IP/DWDM.....	21
1.6.1. Planteamiento del Diseño .....	22
1.6.1.1.Planeación de capacidad [2] .....	22
1.6.1.2. Matriz de tráfico [2].....	22
1.6.1.3. Definición de la topología física de red .....	23

1.6.1.4	Definición de la topología lógica de red .....	23
1.6.1.5	Determinación del modelo de control de red .....	24
1.6.1.6	Selección del esquema de direccionamiento .....	24
1.6.1.7	Selección del protocolo de enrutamiento .....	24
1.6.1.8	Selección del protocolo de señalización .....	24
1.6.1.9	Esquema de protección y seguridad de red .....	24
1.6.1.10	Medio de transmisión de red .....	24
<b>CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS PARA EL MONITOREO DEL CANAL ÓPTICO BASADO EN OPM. (CRITERIOS TEÓRICOS) .....</b>		<b>27</b>
2.1.	CONSIDERACIONES EN CUANTO AL DESEMPEÑO DE LOS SISTEMAS DWDM .....	27
2.2.	MONITOREO DE REDES ÓPTICAS INTELIGENTES Y TRANSPARENTES .....	28
2.2.1	Modelo de Referencia y Parámetros de Monitoreo .....	29
2.2.2	Plano de Transporte .....	30
2.3.	DEGRADACIONES ÓPTICAS Y PARÁMETROS DE MONITOREO ÓPTICO .....	30
2.3.1	Efectos Lineales .....	32
2.3.1.1	Atenuación .....	32
2.3.1.2	Dispersión .....	34
2.3.1.2.1	Dispersión cromática .....	34
2.3.1.2.2	Dispersión por modo de polarización (PMD) .....	35
2.3.2.	Efectos No Lineales .....	36
2.3.3.	Tasa de Error de Bit (BER) .....	37
2.3.4.	Relación entre BER y Factor Q .....	38
2.3.5.	Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR) .....	38
2.3.5.1.	Potencia de señal óptica [29] .....	41
2.3.5.2.	Potencia de ruido óptica [29] .....	41
2.3.5.3.	Cálculo de la OSNR [29] .....	41
2.3.5.4.	Correspondencia entre la OSNR y la relación señal a ruido eléctrica [29] .....	42
2.3.5.5.	Sensitividad, OSNR y BER .....	43
2.4.	MONITOREO DEL CANAL ÓPTICO .....	44
2.4.1.	Monitoreo Óptico en Sistemas DWDM [14] .....	45
2.4.1.1.	Panorama general del monitoreo óptico [14] .....	45
2.4.1.2.	Degradaciones ópticas [14] .....	46
2.4.1.3.	Parámetros de monitoreo óptico [14] .....	47
2.4.1.4.	Correlación entre algunas degradaciones ópticas y parámetros de monitoreo óptico .....	48
2.4.1.5.	Aplicaciones del monitoreo óptico en sistemas DWDM .....	48
2.5.	MONITOREO DE DESEMPEÑO ÓPTICO (OPM) .....	49
2.5.1.	Definición de OPM .....	49
2.5.2.	Introducción a OPM .....	49
2.5.3.	Modelo de Referencia OPM .....	50
2.5.3.1.	Capa de monitoreo de transporte .....	50
2.5.3.2.	Capa de monitoreo de la calidad de la señal .....	51
2.5.3.3.	Capa de monitoreo del protocolo .....	51
2.5.4.	Deterioros o daños ópticos .....	51
2.5.4.1.	Ruido .....	51
2.5.4.2.	Distorsión .....	51
2.5.4.3.	Temporización [16] .....	51
2.5.4.4.	Fallas de componentes .....	52

2.5.4.5. Daños de transmisión óptica [16] .....	52
2.5.5. Gestión de fallas en redes ópticas [16].....	52
2.5.6. Técnicas OPM .....	53
2.6. PANORAMA ACTUAL DE ESTUDIOS QUE INVOLUCREN A OPM .....	54
<b>CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN DE EQUIPOS DE TELECOMUNICACIONES. DISEÑO DE LA SIMULACIÓN, DEFINICIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL Y DEL MODELO DE RED METROPOLITANA WDM.....</b>	<b>55</b>
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN DE EQUIPOS DE TELECOMUNICACIONES .....	55
3.1.1 Fundamentos Teóricos [43] .....	55
3.1.2 Formulación de la Metodología [43] .....	56
3.2 ESTUDIO PREVIO DE ALGUNAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN DE REDES ÓPTICAS .....	57
3.2.1 Herramienta Software de Simulación [44].....	57
3.2.1.1 VPItransmissionMaker™ WDM .....	57
3.2.1.2 OptiSystem 6.0 .....	58
3.2.1.3 OptSim 4.6.....	59
3.3 DISEÑO DE LA SIMULACIÓN CON LA HERRAMIENTA SOFTWARE (OptiSystem 6.0) .....	59
3.4 DEFINICIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL .....	60
3.5 DEFINICIÓN DEL MODELO DE RED EN EL ENTORNO DE SIMULACIÓN (OptiSystem 6.0) .....	65
3.6 FIBRAS DE DISPERSIÓN NEGATIVA PARA REDES MAN DWDM .....	66
3.7 TIPOS DE LÁSER Y SU ESCOGENCIA .....	67
3.8 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN.....	68
3.8.1 Escenarios de Simulación sin Multiplexación WDM .....	69
3.8.2 Escenarios de Simulación con Multiplexación WDM .....	70
3.8.3 Planes de frecuencia para sistemas WDM .....	71
3.8.3.1 Longitudes de Onda Centrales Nominales para Sistemas CWDM .....	71
3.8.3.2 Frecuencias Centrales Nominales para Sistemas DWDM .....	72
<b>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN LA CALIDAD DE LA SEÑAL ÓPTICA EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED METROPOLITANA WDM Y DEFINICIÓN DE CRITERIOS PARA EL MONITOREO DEL CANAL ÓPTICO. ....</b>	<b>74</b>
4.1 MONITOREO DE DESEMPEÑO ÓPTICO (OPM) AVANZADO [16].....	74
4.1.1 Diagrama del Ojo .....	75
4.1.1.1 Máscaras de un diagrama de ojo [55].....	76
4.1.2 Monitoreo Avanzado de la BER (Factor Q) [16] .....	77
4.1.2.1 Probabilidad de Error.....	78
4.1.3 Monitoreo Avanzado de la Dispersión Cromática [16] .....	80
4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS, GRÁFICAS Y CONCLUSIONES DEL MONITOREO DEL CANAL ÓPTICO (INCIDENCIA DE LA DISPERSIÓN CROMÁTICA Y DE LA ATENUACIÓN). .....	81
4.2.1 Escenarios de Simulación sin multiplexación WDM .....	81
4.2.1.1 Ventana de 1310 nm .....	82

4.2.1.2 Ventana de 1550 nm .....	89
4.2.2 Escenarios de Simulación con Multiplexación WDM .....	102
4.2.2.1 CWDM simultánea .....	105
4.2.2.1.1 Dos canales CWDM .....	105
4.2.2.1.2 Cuatro canales CWDM .....	108
4.2.2.1.3 Ocho canales CWDM .....	110
4.2.2.1.4 Dieciséis canales CWDM .....	113
4.2.2.2 DWDM simultánea.....	118
4.2.2.2.1 Dos canales DWDM .....	118
4.2.2.2.3 Cuatro canales DWDM .....	119
4.2.2.2.2 Ocho canales DWDM .....	121
4.2.2.4 Dieciséis canales DWDM.....	123
4.3 CRITERIOS BASADOS EN OPM PARA EL MONITOREO DEL CANAL ÓPTICO EN UNA RED METROPOLITANA	
WDM.....	128
4.3.1 Criterios Teóricos .....	129
4.3.2 Criterios Obtenidos a partir de la Simulación .....	129
4.3.3 Técnicas Utilizadas para Atenuar las Degradaciones. ....	131
4.3.3.1 Igualación de ganancia dinámica .....	131
4.3.3.2 Codificación de línea (formato de modulación) .....	131
4.3.3.3 Número de canales ópticos y su separación.....	132
4.3.3.4 Tipos de fibra .....	132
4.3.3.5 Mezcla de diferentes tipos de fibras en un tramo .....	132
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS (TRABAJO FUTURO).....</b>	<b>134</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>139</b>
<b>GLOSARIO .....</b>	<b>144</b>
<b>ANEXO A – Degradaciones Ópticas.</b>	
<b>ANEXO B – Herramienta Software de Simulación (OptiSystem 6.0).</b>	

## LISTA DE FIGURAS

## CAPÍTULO 1.

Figura 1.1. Modelo de capas [2].	4
Figura 1.2. Esquema básico del funcionamiento de un sistema WDM. Para cada uno de los canales hay un láser emitiendo a diferente frecuencia. Posteriormente se multiplexan todos los canales en una fibra óptica de gran capacidad. En el receptor un filtro óptico selecciona cada uno de los canales.	5
Figura 1.3. Esquema general de una red óptica [6].	7
Figura 1.4. Qos aplicada al modelo IP. Arquitectura lógica.	9
Figura 1.5. Qos aplicada al modelo IP. Arquitectura física.	9
Figura 1.6. Esquema general de red.	10
Figura 1.7. Esquema de la red metro WDM.	11
Figura 1.8. Esquema general del OCh.	12
Figura 1.9. Esquema básico del OCh.	13
Figura 1.10. Esquema del och con OADM.	13
Figura 1.11. Red punto a punto.	13
Figura 1.12. Red en cadena.	14
Figura 1.13. Red en anillo.	14
Figura 1.14. Flujos de señales del OTM.	16
Figura 1.15. Flujos de señales del OLA.	17
Figura 1.16. Flujos de señales del OADM serial.	18
Figura 1.17. Flujos de señales del OADM paralelo.	19
Figura 1.18. Flujos de señales del REG.	20
Figura 1.19. Flujos de señales del OPE.	21
Figura 1.20. Flujos de señales del DE.	21
Figura 1.21. Topología física de red [2].	23
Figura 1.22. Topología lógica de red [2].	23

## CAPÍTULO 2.

Figura 2.1. Dimensionamiento de factores críticos en sistemas DWDM [2].	28
Figura 2.2. Monitoreo óptico en nodos IP/WDM [15].	30
Figura 2.3. Fuentes de deterioro de la calidad de transmisión en DWDM.	31
Figura 2.4. Dispersión de rayleigh [13].	32
Figura 2.5. Curva total de atenuación [13].	33
Figura 2.6. Principio de dispersión [13].	34
Figura 2.7. Dispersión cromática [13].	35
Figura 2.8. PMD en fibra monomodo cuya asimetría es uniforme a lo largo de su longitud [23].	36
Figura 2.9. Efectos no lineales a altos niveles de potencia [2].	37
Figura 2.10. Ruido asociado con señal (una sola etapa de amplificación) [25].	40
Figura 2.11. Acumulación de ruido debido a la amplificación multietapa [25].	40
Figura 2.12. Niveles de osnr en términos de los niveles de potencia de señal y ruido para una transmisión WDM multietapa [28].	40
Figura 2.13. Arquitectura general del sistema de monitoreo para redes de fibra óptica [30].	44
Figura 2.14. Las 3 capas de opm: monitoreo de transporte, monitoreo de la calidad de la señal, monitoreo del protocolo [16].	50

**CAPÍTULO 3.**

Figura 3.1. Diseño de la simulación. ....	60
Figura 3.2. Esquema general del modelo.....	61
Figura 3.3. Esquema general de un enlace sin multiplexación. ....	61
Figura 3.4. Esquema general de un enlace con multiplexación. ....	61
Figura 3.5. Subsistema transmisor. ....	62
Figura 3.6. Subsistema multiplexor WDM. ....	62
Figura 3.7. Subsistema de canal óptico. ....	63
Figura 3.8. Subsistema demultiplexor WDM.....	63
Figura 3.9. Subsistema de recepción.....	63
Figura 3.10. Modelo de la red metropolitana wdm característica.....	65
Figura 3.11. Comparación del comportamiento de una fibra con dispersión negativa con una de dispersión positiva. ....	66
Figura 3.12. Esquema general para los escenarios de simulación sin multiplexación WDM.....	69
Figura 3.13. Esquema general para los escenarios de simulación con multiplexación WDM.....	70

**CAPÍTULO 4.**

Figura 4.1. Combinaciones posibles en una secuencia de tres bits [51]. ....	75
Figura 4.2. Diagrama del ojo [55].....	76
Figura 4.3. Patrones del diagrama del ojo.....	76
Figura 4.4. Concepto de máscara en el diagrama de ojo [55]. La línea roja corresponde a la variación del factor Q en función del período de bit. ....	77
Figura 4.5 . Diagrama de ojo: marcas, espacios y su relación con el factor Q [52].....	78
Figura 4.6. Relación entre la función de densidad de probabilidad y la BER [59].....	79
Figura 4.7. Modelo de red general de los escenarios de simulación sin multiplexación WDM. ....	81
Figura 4.8. Salida de datos (tráfico) del PRBS-NRZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5 Gbps.....	82
Figura 4.9. Salida de datos (tráfico) del PRBS-NRZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps.....	82
Figura 4.10. Salida de potencia del láser para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5 Gbps. ....	82
Figura 4.11. Salida de potencia del láser para SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps. ....	82
Figura 4.12. Salida de datos (tráfico) del modulador MZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5 Gbps.....	82
Figura 4.13. Salida de datos (tráfico) del modulador MZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps.....	82
Figura 4.14. Salida de potencia del modulador MZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5 Gbps.....	83
Figura 4.15. Salida de potencia del modulador MZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps. ....	83
Figura 4.16. OTDV antes del filtro óptico (Tx) para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5 Gbps. ....	83
Figura 4.17. OTDV antes del filtro óptico (Tx) para SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps. ....	83
Figura 4.18. OSA después del filtro óptico (Tx) para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5 Gbps.....	84
Figura 4.19. OSA después del filtro óptico (Tx) SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps.....	84
Figura 4.20. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps.....	84
Figura 4.21. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 10 Gbps.....	84
Figura 4.22. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps. ....	84
Figura 4.23. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 10 Gbps. ....	84
Figura 4.24. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 2.5 Gbps.....	85
Figura 4.25. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 10 Gbps.....	85
Figura 4.26. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 2.5 Gbps. ....	85
Figura 4.27. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 10 Gbps. ....	85
Figura 4.28. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 2.5 Gbps. ....	85
Figura 4.29. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 10 Gbps. ....	85
Figura 4.30. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 2.5 Gbps.....	85

Figura 4.31. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 10 Gbps.....	85
Figura 4.32. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps.....	86
Figura 4.33. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 10 Gbps.....	86
Figura 4.34. Osciloscopio después del pin para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps.....	86
Figura 4.35. Osciloscopio después del pin para la fibra SMF-28 a 10 Gbps.....	86
Figura 4.36. Osciloscopio después del filtro butterworth (recuperación de datos) para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps.....	86
Figura 4.37. Osciloscopio después del filtro butterworth (recuperación de datos) para la fibra SMF-28 a 10 Gbps.....	86
Figura 4.38. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 2.5 Gbps.....	87
Figura 4.39. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 10 Gbps.....	87
Figura 4.40. Osciloscopio después del pin para la fibra DSF a 2.5 Gbps.....	87
Figura 4.41. Osciloscopio después del pin para la fibra DSF a 10 gbps.....	87
Figura 4.42. Osciloscopio después del filtro butterworth (recuperación de datos) para la fibra DSF a 2.5 gbps.....	87
Figura 4.43. Osciloscopio después del filtro butterworth (recuperación de datos) para la fibra DSF a 10 gbps.....	87
Figura 4.44. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 2.5 gbps.....	87
Figura 4.45. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 10 gbps.....	87
Figura 4.46. Osciloscopio después del PIN para la fibra MetroCor a 2.5 gbps.....	88
Figura 4.47. Osciloscopio después del PIN para la fibra MetroCor a 10 gbps.....	88
Figura 4.48. Osciloscopio después del filtro butterworth (recuperación de datos) para la fibra MetroCor a 2.5 gbps.....	88
Figura 4.49. Osciloscopio después del filtro butterworth (recuperación de datos) para la fibra MetroCor a 10 gbps.....	88
Figura 4.50. Diagrama del ojo (factor Q = 6) para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps (xmax = 62274 km).....	88
Figura 4.51. Diagrama del ojo (factor Q = 6) para la fibra SMF-28 a 10 Gbps (xmax = 52310 km).....	88
Figura 4.52. Diagrama del ojo (factor Q = 6) para la fibra DSF a 2.5 Gbps (xmax = 46745 km).....	88
Figura 4.53. Diagrama del ojo (factor Q = 6) para la fibra DSF a 10 Gbps (xmax = 37540 km).....	88
Figura 4.54. Diagrama del ojo (factor Q = 6) para la fibra MetroCor a 2.5 Gbps (xmax = 53533 km).....	89
Figura 4.55. Diagrama del ojo (factor Q = 6) para la fibra MetroCor a 10 Gbps (xmax = 39119 km).....	89
Figura 4.56. Salida de datos (tráfico) del PRBS-NRZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5 Gbps.....	89
Figura 4.57. Salida de datos (tráfico) del PRBS-NRZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps.....	89
Figura 4.58. Salida de potencia del láser para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5Gbps.....	89
Figura 4.59. Salida de potencia del láser para SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps.....	89
Figura 4.60. Salida de datos (tráfico) del modulador MZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5 Gbps.....	90
Figura 4.61. Salida de datos (tráfico) del modulador MZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps.....	90
Figura 4.62. Salida de potencia del modulador MZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5 Gbps.....	90
Figura 4.63. Salida de potencia del modulador MZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps.....	90
Figura 4.64. OTDV antes del filtro óptico (Tx) para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5 Gbps.....	90
Figura 4.65. OTDV antes del filtro óptico (Tx) para SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps.....	90
Figura 4.66. OSA después del filtro óptico (Tx) para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5 Gbps.....	91
Figura 4.67. OSA después del filtro óptico (Tx) SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps.....	91
Figura 4.68. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps.....	91
Figura 4.69. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 10 Gbps.....	91
Figura 4.70. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps.....	91
Figura 4.71. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 10 Gbps.....	91
Figura 4.72. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 2.5 Gbps.....	92
Figura 4.73. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 10 Gbps.....	92
Figura 4.74. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 2.5 Gbps.....	92
Figura 4.75. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 10 Gbps.....	92
Figura 4.76. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 2.5 Gbps.....	92
Figura 4.77. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 10 Gbps.....	92
Figura 4.78. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 2.5 Gbps.....	92
Figura 4.79. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 10 Gbps.....	92
Figura 4.80. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps.....	93
Figura 4.81. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 10 Gbps.....	93
Figura 4.82. Osciloscopio después del pin para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps.....	93
Figura 4.83. Osciloscopio después del pin para la fibra SMF-28 a 10 Gbps.....	93

Figura 4.84. Osciloscopio después del filtro butterworth (recuperación de datos) para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps. ....	93
Figura 4.85. Osciloscopio después del filtro butterworth (recuperación de datos) para la fibra SMF-28 a 10 Gbps. ....	93
Figura 4. 86. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 2.5 Gbps. ....	94
Figura 4.87. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 10 Gbps. ....	94
Figura 4.88. Osciloscopio después del PIN para la fibra DSF a 2.5 Gbps. ....	94
Figura 4.89. Osciloscopio después del PIN para la fibra DSF a 10 Gbps. ....	94
Figura 4.90. Osciloscopio después del filtro butterworth (recuperación de datos) para la fibra DSF a 2.5 Gbps. ....	94
Figura 4.91. Osciloscopio después del filtro butterworth (recuperación de datos) para la fibra DSF a 10 Gbps. ....	94
Figura 4.92. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 2.5 Gbps. ....	94
Figura 4.93. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 10 Gbps. ....	94
Figura 4.94. Osciloscopio después del PIN para la fibra MetroCor a 2.5 Gbps. ....	95
Figura 4.95. Osciloscopio después del PIN para la fibra MetroCor a 10 Gbps. ....	95
Figura 4.96. Osciloscopio después del filtro butterworth (recuperación de datos) para la fibra MetroCor a 2.5 Gbps. ....	95
Figura 4.97. Osciloscopio después del filtro butterworth (recuperación de datos) para la fibra MetroCor a 10 Gbps. ....	95
Figura 4.98. Diagrama del ojo (factor Q = 6) para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps (xmax = 62274 km). ....	95
Figura 4.99. Diagrama del ojo (factor Q = 6) para la fibra SMF-28 a 10 Gbps (xmax = 52310 km). ....	95
Figura 4.100. Diagrama del ojo (factor Q = 6) para la fibra DSF a 2.5 Gbps (xmax = 46745 km). ....	95
Figura 4.101. Diagrama del ojo (factor Q = 6) para la fibra DSF a 10 Gbps (xmax = 37540 km). ....	95
Figura 4. 102. Diagrama del ojo (factor Q = 6) para la fibra MetroCor a 2.5 Gbps (xmax = 53533 km). ....	96
Figura 4.103. Diagrama del ojo (factor Q = 6) para la fibra MetroCor a 10 Gbps (xmax = 39119 km). ....	96
Figura 4.104. Modelo general de red. Subsistema de transmisión .....	104
Figura 4.105. Modelo general de red. Subsistema de OCh. ....	104
Figura 4.106. Modelo general de red. Subsistema de recepción. ....	105

## LISTA DE TABLAS

### CAPÍTULO 1.

Tabla 1.1. Fortalezas y debilidades de las tecnologías de transporte [2]. ....	4
Tabla 1.2. Comparación entre las tecnologías de transporte [2]. ....	6
Tabla 1.3. Aspectos de dimensionamiento para definir la arquitectura de la red metropolitana WDM [2]. ....	10

### CAPÍTULO 2.

Tabla 2.1. Degradaciones ópticas y parámetros de monitoreo óptico [14]. ....	31
Tabla 2.2. Degradaciones ópticas. [fuente: Rec. ITU-T G.697]. ....	46
Tabla 2.3. Correlación entre las degradaciones de elevada frecuencia de ocurrencia y los parámetros de monitoreo [14]. .....	48
Tabla 2.4. Parámetros OPM sugeridos [16]. ....	53

### CAPÍTULO 3.

Tabla 3.1. Pruebas para los escenarios de simulación sin multiplexación WDM. ....	70
Tabla 3.2. Pruebas para los escenarios de simulación con multiplexación WDM. ....	71
Tabla 3.3. Longitudes de onda centrales nominales [53]. ....	71
Tabla 3.4. Ejemplo de frecuencias centrales nominales del plan con DWDM [54]. ....	73

## CAPÍTULO 4.

Tabla 4.1. Escenario sin multiplexación WDM a 2.5 Gbps.....	96
Tabla 4.2. Escenario sin multiplexación WDM a 10 Gbps.....	96
Tabla 4.3. Diferencia de distancias para una fibra óptica (2,5 Gbps vs 10 Gbps).....	96
Tabla 4.4. Resultados de monitoreo del OCh con la fibra SMF-28 a 2,5 Gbps (CWDM no simultánea).....	98
Tabla 4.5. Resultados de monitoreo del OCh con la fibra SMF-28 a 10 Gbps (CWDM no simultánea).....	98
Tabla 4.6. Resultados de monitoreo del OCh con la fibra MetroCor a 2.5 Gbps (CWDM no simultánea).....	99
Tabla 4.7. Resultados de monitoreo del OCh con la fibra MetroCor a 10 Gbps (CWDM no simultánea).....	99
Tabla 4.8. Resultados de monitoreo del OCh con la fibra SMF-28 a 2,5 Gbps (DWDM no simultánea).....	100
Tabla 4.9. Resultados de monitoreo del OCh con la fibra SMF-28 a 10 Gbps (DWDM no simultánea).....	100
Tabla 4.10. Resultados de monitoreo del OCh con la fibra MetroCor a 2.5 Gbps (DWDM no simultánea).....	101
Tabla 4.11. Resultados de monitoreo del OCh con la fibra MetroCor a 10 Gbps (DWDM no simultánea).....	101
Tabla 4.12. Distancias obtenidas para el canal simple (CWDM no simultánea).....	102
Tabla 4.13. Distancias obtenidas para el canal simple (DWDM no simultánea).....	102
Tabla 4.14. Distribución de canales simultáneos para multiplexación wdm. ....	103
Tabla 4.15. Resultados de la multiplexación de 2 canales CWDM (SMF-28 a 2.5 Gbps).....	105
Tabla 4.16. Resultados de la multiplexación de 2 canales CWDM (SMF-28 a 10 Gbps).....	106
Tabla 4.17. Resultados de la multiplexación de 2 canales CWDM (MetroCor a 2.5 Gbps).....	106
Tabla 4.18. Resultados de la multiplexación de 2 canales CWDM (MetroCor a 10 Gbps).....	107
Tabla 4.19. Resultados de la multiplexación de 4 canales (SMF-28 a 2.5 Gbps).....	108
Tabla 4.20. Resultados de la multiplexación de 4 canales CWDM (SMF-28 a 10 Gbps).....	108
Tabla 4.21. Resultados de la multiplexación de 4 canales CWDM (MetroCor a 2.5 Gbps).....	109
Tabla 4.22. Resultados de la multiplexación de 4 canales CWDM (MetroCor a 10 Gbps).....	109
Tabla 4.23. Resultados de la multiplexación de 8 canales CWDM (SMF-28 a 2.5 Gbps).....	110
Tabla 4.24. Resultados de la multiplexación de 8 canales CWDM (SMF-28 a 10 Gbps).....	110
Tabla 4.25. Resultados de la multiplexación de 8 canales CWDM (MetroCor a 2.5 Gbps).....	111
Tabla 4.26. Resultados de la multiplexación de 8 canales CWDM (MetroCor a 10 Gbps).....	112
Tabla 4.27. Resultados de la multiplexación de 16 canales CWDM (SMF-28 a 2.5 Gbps).....	113
Tabla 4.28. Resultados de la multiplexación de 16 canales CWDM (SMF-28 a 10 Gbps).....	114
Tabla 4.29. Resultados de la multiplexación de 16 canales CWDM (MetroCor a 2.5 Gbps).....	115
Tabla 4.30. Resultados de la multiplexación de 16 canales CWDM (MetroCor a 10 gbps).....	116
Tabla 4.31. Resultados de la multiplexación de 2 canales DWDM (SMF-28 a 2.5 gbps).....	118
Tabla 4.32. Resultados de la multiplexación de 2 canales DWDM (SMF-28 a 10 gbps).....	118
Tabla 4.33. Resultados de la multiplexación de 2 canales DWDM (MetroCor a 2.5 gbps).....	118
Tabla 4.34. Resultados de la multiplexación de 2 canales DWDM (MetroCor a 10 gbps).....	119
Tabla 4.35. Resultados de la multiplexación de 4 canales DWDM (SMF-28 a 2.5 gbps).....	119
Tabla 4.36. Resultados de la multiplexación de 4 canales DWDM (SMF-28 a 10 gbps).....	120
Tabla 4.37. Resultados de la multiplexación de 4 canales DWDM (MetroCor a 2.5 gbps).....	120
Tabla 4.38. Resultados de la multiplexación de 4 canales DWDM (MetroCor a 10 gbps).....	120
Tabla 4.39. Resultados de la multiplexación de 8 canales DWDM (SMF-28 a 2.5 gbps).....	121
Tabla 4.40. Resultados de la multiplexación de 8 canales DWDM (SMF-28 a 10 Gbps).....	121
Tabla 4.41. Resultados de la multiplexación de 8 canales DWDM (MetroCor a 2.5 Gbps).....	122
Tabla 4.42. Resultados de la multiplexación 8 canales DWDM (MetroCor a 10 Gbps).....	122
Tabla 4.43. Resultados de la multiplexación de 16 canales DWDM (SMF-28 a 2.5 Gbps).....	123
Tabla 4.44. Resultados de la multiplexación de 16 canales DWDM (SMF-28 a 10 Gbps).....	124
Tabla 4.45. Resultados de la multiplexación de 16 canales DWDM (MetroCor a 2.5 Gbps).....	126
Tabla 4.46. Resultados de la multiplexación 16 canales DWDM (MetroCor a 10 Gbps).....	126

## LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>AI:</b>	( <i>Alarm Indicator</i> ). Indicador de Alarma.
<b>AON:</b>	( <i>All-Optical Networks</i> ). Redes Totalmente Ópticas.
<b>APS:</b>	( <i>Automatic Protection Switching</i> ). Conmutación de Protección Automática.
<b>ASE:</b>	( <i>Amplified Spontaneous Emission</i> ). Emisión Espontánea Amplificada.
<b>ASON:</b>	( <i>Automatic Switched Optical Networks</i> ). Redes Ópticas de Conmutación Automática.
<b>ATM:</b>	( <i>Asynchronous Transfer Mode</i> ). Modo de Transferencia Asíncrono.
<b>AWGN:</b>	( <i>Additive White Gaussian Noise</i> ). Ruido Gaussiano Blanco Aditivo.
<b>BER:</b>	( <i>Bit Error Rate</i> ). Tasa de Error de Bit.
<b>BW:</b>	( <i>BW, BandWidth</i> ). Ancho de Banda.
<b>CATV:</b>	( <i>Cable Television</i> ). Televisión por Cable.
<b>CWDM:</b>	( <i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i> ). Multiplexación por División de Longitud de Onda Ampliamente Espaciada.
<b>DCF:</b>	( <i>Dispersion Compensating Fiber</i> ). Fibra Compensadora de Dispersión.
<b>DCM:</b>	( <i>Dispersion Compensation Module</i> ). Módulo de Compensación de Dispersión.
<b>DE:</b>	( <i>Dispersion Equalizer</i> ). Ecuador de Dispersión.
<b>DFB:</b>	( <i>Distributed Feedback</i> ). Realimentación Distribuida.
<b>DML:</b>	( <i>Directly Modulated Laser</i> ). Láser Modulado Directamente.
<b>DSF:</b>	( <i>Dispersion Shift Fiber</i> ). Fibra de Dispersión Modificada.
<b>DSL:</b>	( <i>Digital Subscriber Line</i> ). Línea de Suscriptor Digital.
<b>DWDM:</b>	( <i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> ). Multiplexación por División de Longitud de Onda Densamente Espaciada.
<b>EA-DFB:</b>	( <i>Electroabsorption modulator integrated- Distributed FeedBack</i> ). Realimentación Distribuida integrada con un modulador de Electroabsorción.
<b>EDFA:</b>	( <i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> ). Amplificador de Fibra Dopada con Erblio.
<b>ELH:</b>	( <i>Extra Long Haul</i> ). Extra Larga Distancia.
<b>EML:</b>	( <i>Externally Modulated Laser</i> ). Láser Modulado Externamente.
<b>E-NNI:</b>	( <i>External-Network to Network Interface</i> ). Interfaz de Red Externa a Red Externa.
<b>ESCON:</b>	( <i>Enterprise Systems Connection</i> ). Conexión de Sistemas Empresariales.
<b>ESNR:</b>	( <i>Electrical Signal to Noise Ratio</i> ). Relación Señal a Ruido Eléctrica.
<b>ESR:</b>	( <i>Errored Seconds Rate</i> ). Tasa de Segundos con Error.
<b>FEC:</b>	( <i>Forward Error Correction</i> ). Corrección de Errores en Recepción.
<b>FIU:</b>	( <i>Fiber Interface Unit</i> ). Unidad de Interfaz de Fibra.
<b>FSO:</b>	( <i>Free Space Optics</i> ). Óptica de Espacio Libre.
<b>FTTH:</b>	( <i>Fiber To The Home</i> ). Fibra Hasta La Casa.
<b>FWM:</b>	( <i>Four Wave Mixing</i> ). Mezcla de Cuatro Ondas.
<b>GMPLS:</b>	( <i>Generalized Multiprotocol Label Switching</i> ). Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo Generalizado.
<b>GVD:</b>	( <i>Group Velocity Dispersion</i> ). Dispersión de Velocidad de Grupo.
<b>IETF:</b>	( <i>Internet Engineering Task Force</i> ). Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet.
<b>I-NNI:</b>	( <i>Internal- Network to Network Interface</i> ). Interfaz de Red Interna a Red Interna.
<b>IP:</b>	( <i>Internet Protocol</i> ). Protocolo de Internet.
<b>ISI:</b>	( <i>InterSymbol Interference</i> ). Interferencia entre Símbolos.
<b>ISP:</b>	( <i>Internet Service Provider</i> ). Proveedor de Servicio de Internet.
<b>ITU:</b>	( <i>International Telecommunications Union</i> ). Unión Internacional de Telecomunicaciones.

---

<b>LAN:</b>	( <i>Local Area Networks</i> ). Redes de Área Local.
<b>LCK:</b>	( <i>Locked</i> ). Enganchado.
<b>MAN:</b>	( <i>Metropolitan Area Networks</i> ). Redes de Área Metropolitana.
<b>MCA:</b>	( <i>Multi-Channel spectrum Analyzer unit</i> ). Unidad Analizadora de espectro Multicanal.
<b>MPLS:</b>	( <i>Multiprotocol Label Switching</i> ). Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo.
<b>MS:</b>	( <i>Maintenance Signal</i> ). Señal de Mantenimiento.
<b>NC:</b>	( <i>Network Controller</i> ). Controlador de Nodo.
<b>NDSF:</b>	( <i>Non Dispersion Shift Fiber</i> ). Fibra de Dispersión No Modificada.
<b>NGF:</b>	( <i>New Generation Fiber</i> ). Fibra de Nueva Generación.
<b>NMS:</b>	( <i>Network Management System</i> ). Sistema de Gestión de Red.
<b>NRZ:</b>	( <i>Non Return to Zero</i> ). No Retorno a Cero.
<b>NZDSF:</b>	( <i>Non Zero Dispersion Shifted Fiber</i> ). Fibra de Dispersión Modificada No Cero.
<b>OA:</b>	( <i>Optical Amplifier</i> ). Amplificador Óptico.
<b>OADM:</b>	( <i>Optical Add/Drop Multiplexer</i> ). Multiplexor Óptico de Inserción/Extracción.
<b>OC:</b>	( <i>Open Connection</i> ). Conexión Abierta.
<b>OCC:</b>	( <i>Optical Connection Controller</i> ). Controladores de Conexión Óptica.
<b>OCh:</b>	( <i>Optical Channel</i> ). Canal Óptico.
<b>OCM:</b>	( <i>Optical Channel Monitoring</i> ). Monitoreo del Canal Óptico.
<b>OD:</b>	( <i>Optical Demultiplexer</i> ). Demultiplexor Óptico.
<b>ODU:</b>	( <i>Optical channel Data Unit</i> ). Unidad de Datos del Canal Óptico.
<b>O-E-O:</b>	( <i>Optical-Electrical-Optical</i> ). Óptica-Eléctrica-Óptica.
<b>OEQ:</b>	( <i>Optical Equalizer</i> ). Ecuilizador Óptico.
<b>OLA:</b>	( <i>Optical Line Amplifier</i> ). Amplificador de Línea Óptico.
<b>OM:</b>	( <i>Optical Multiplexer</i> ). Multiplexor Óptico.
<b>OMS:</b>	( <i>Optical Multiplex Section</i> ). Sección de Multiplexación Óptica.
<b>OOK:</b>	( <i>On-Off Keying</i> ). Llaveado Encendido - Apagado.
<b>OPC:</b>	( <i>Optical Phase Conjugation</i> ). Conjugación de Fase Óptica.
<b>OPE:</b>	( <i>Optical Power Equalizer</i> ). Ecuilizador de Potencia Óptico.
<b>OPM:</b>	( <i>Optical Performance Monitoring</i> ). Monitoreo de Desempeño Óptico.
<b>OPU:</b>	( <i>Optical channel Payload Unit</i> ). Unidad de Carga Útil del Canal Óptico.
<b>OSA:</b>	( <i>Optical Spectrum Analyzer</i> ). Analizador de Espectro Óptico.
<b>OSC/OTC:</b>	( <i>Optical Supervisory Channel unit or Supervisory Channel and Timing Transporting</i> ). Unidad de Canal de Supervisión Óptica o Unidad de Canal de Supervisión y Transporte de Temporización.
<b>OSNR:</b>	( <i>Optical Signal to Noise Ratio</i> ). Relación Señal a Ruido Óptica.
<b>OTDR:</b>	( <i>Optical Time-Domain Reflectometer</i> ). Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo.
<b>OTDV:</b>	( <i>Optical Time-Domain Visualizer</i> ). Visualizador Óptico en el Dominio del Tiempo.
<b>OTM:</b>	( <i>Optical Terminal Multiplexer</i> ). Multiplexor Terminal Óptico.
<b>OTN:</b>	( <i>Optical Transport Network</i> ). Red de Transporte Óptica.
<b>OTS:</b>	( <i>Optical Transmission Section</i> ). Sección de Transmisión Óptica.
<b>OTU:</b>	( <i>Optical Transponder Unit</i> ). Unidad de Transponder Óptica.
<b>OXC:</b>	( <i>Optical Cross Connect</i> ). Conector Cruzado Óptico.
<b>O&amp;AM:</b>	( <i>Operation, Administration &amp; Management</i> ). Operación, Administración y Gestión.
<b>PBU:</b>	( <i>Power Backup Unit</i> ). Unidad de Resguardo de Energía.
<b>PDH:</b>	( <i>Plesiochronous Digital Hierarchy</i> ). Jerarquía Digital Plesiócrona
<b>PIN:</b>	( <i>Positive-Intrinsic-Negative</i> ). Positivo-Intrínseco-Negativo.
<b>PMD:</b>	( <i>Polarization Mode Dispersion</i> ). Dispersión por Modo de Polarización.

<b>PON:</b>	( <i>Passive Optical Networks</i> ). Redes Ópticas Pasivas.
<b>POP:</b>	( <i>Point Of Presence</i> ). Punto de Presencia.
<b>POTS:</b>	( <i>Plain Old Telephone Services</i> ). Servicios Telefónicos Tradicionales.
<b>PPC:</b>	( <i>Protection Control Channel</i> ). Canal de Control de Protección.
<b>PPM:</b>	( <i>Protocol Performance Monitoring</i> ). Monitoreo de Desempeño del Protocolo.
<b>QoS:</b>	( <i>Quality of Service</i> ). Calidad de Servicio.
<b>REG:</b>	( <i>Regenerator</i> ). Regenerador.
<b>RIN:</b>	( <i>Relative Intensity Noise</i> ). Ruido de Intensidad Relativa.
<b>RoF:</b>	( <i>Radio over Fiber</i> ). Radio sobre Fibra.
<b>RPU:</b>	( <i>Raman Pump Amplifier Unit</i> ). Unidad Amplificadora de Bombeo Raman.
<b>RZ:</b>	( <i>Return to Zero</i> ). Retorno a Cero.
<b>SBS:</b>	( <i>Stimulated Brillouin Scattering</i> ). Difusión Estimulada de Brillouin.
<b>SCC:</b>	( <i>System Control &amp; Communication unit</i> ). Unidad de Comunicación y Control de Sistema.
<b>SDH:</b>	( <i>Synchronous Digital Hierarchy</i> ). Jerarquía Digital Síncrona.
<b>SESR:</b>	( <i>Severely Errored Seconds Rate</i> ). Tasa de Segundos con Muchos Errores.
<b>SLA:</b>	( <i>Service Level Agreement</i> ). Acuerdo de Nivel de Servicio.
<b>SNMP:</b>	( <i>Simple Network Management Protocol</i> ). Protocolo de Gestión de Red Simple.
<b>SNR:</b>	( <i>Signal to Noise Ratio</i> ). Relación Señal a Ruido.
<b>SONET:</b>	( <i>Synchronous Optical Network</i> ). Red Óptica Síncrona.
<b>SPM:</b>	( <i>Self-Phase Modulation</i> ). Automodulación de Fase.
<b>SRS:</b>	( <i>Stimulated Raman Scattering</i> ). Difusión Estimulada de Raman.
<b>TDM:</b>	( <i>Time Division Multiplexing</i> ). Multiplexación por División de Tiempo.
<b>ULH:</b>	( <i>Ultra Long Haul</i> ). Ultra Larga Distancia.
<b>UNI:</b>	( <i>User to Network Interface</i> ). Interfaz de Usuario a Red.
<b>WDM:</b>	( <i>Wavelength Division Multiplexing</i> ). Multiplexación por División de Longitud de Onda.
<b>XPM:</b>	( <i>Cross-Phase Modulation</i> ). Modulación de Fase Cruzada.
<b>3R:</b>	( <i>Reshape - Retime - Retransmit</i> ). Reformar - Retemporizar - Retransmitir.

## RESUMEN

El monitoreo de desempeño de las redes juega un papel esencial en la futura evolución y en el despliegue de la industria óptica, ya que una de las claves del éxito de las redes de nueva generación es asegurar Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*) y ofrecer servicios ópticos dinámicos y diferenciados. Un sistema de monitoreo para redes de fibra óptica facilita la administración de dichas redes a través de pruebas y documentación precisa de la red, aumentando de esta manera el desempeño. También se incrementa la satisfacción del cliente mediante un mejor monitoreo de red, destacándose el Monitoreo de Desempeño Óptico (OPM, *Optical Performance Monitoring*).

Es importante decir que en las redes ópticas actuales, donde la tecnología de Multiplexación por División de Longitud de Onda Densamente Espaciada (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*) está avanzando a un ritmo veloz, aumentando continuamente los límites de distancia, la cantidad de canales (longitudes de onda) y la velocidad de canal, se justifica implementar el monitoreo óptico debido a que dichas redes están evolucionando desde el contexto opaco, por ejemplo la Red Óptica Síncrona-Jerarquía Digital Síncrona (SONET-SDH, *Synchronous Optical Network/ Synchronous Digital Hierarchy*), el cual se maneja en el dominio eléctrico y se necesita la conversión Óptica-Eléctrica-Óptica (O-E-O, *Optical-Electrical-Optical*) de la señal óptica, al contexto transparente (por ejemplo redes totalmente ópticas), donde se trabaja en el dominio óptico sin necesidad de dicha conversión (O-E-O), con excepción del terminal final donde debe llegar la señal óptica.

Este trabajo de grado estudia la necesidad de definir criterios basados en OPM para el monitoreo adecuado del canal óptico y la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana con Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*) característica, a través de un adecuado Monitoreo del Canal Óptico (OCM, *Optical Channel Performance*).

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad es cada vez más notorio el incremento en el número de los usuarios de las redes de telecomunicaciones y también de la diversidad y complejidad de los servicios que estos demandan. Las exigencias de Ancho de Banda (BW, *BandWidth*), diferenciación y calidad en los servicios, gestión de recursos, etc., por parte de los operadores de las redes y los proveedores de servicio y de los usuarios, es cada día más difícil de satisfacer, lo cual requiere que se desarrollen y apropien nuevos métodos de manejo de información, tecnologías de red y prestación de servicios.

En general, un sistema de monitoreo entrega información eficiente para garantizar que la fibra óptica esté lista para usarse en el momento preciso requerido, mejorando así la rentabilidad de su inversión, el óptimo nivel de utilización y aprovechamiento de la red y la calidad de los servicios ofrecidos.

Dado que las redes actuales incluyen varios elementos ópticos transparentes entre los puntos de regeneración eléctricos, se hace necesario efectuar la comprobación de la calidad de desempeño en el dominio óptico para evaluar el comportamiento del canal óptico, tal como se afirma en la Rec. ITU-T G.697.

El presente trabajo de grado es un paso en la consolidación del conocimiento en el área de la Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de Telecomunicaciones. Específicamente busca resolver la necesidad de definir criterios para el monitoreo del canal óptico y la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana WDM.

Por otro lado establece un avance al aportar dichos criterios para el monitoreo efectivo del canal óptico y la incidencia que tienen tales parámetros en el desempeño de una red metropolitana WDM característica, lo cual se constituirá en una guía factible de ser adoptada por los operadores de este tipo de redes.

Con el fin de abordar los temas necesarios para el desarrollo de este trabajo de grado, el contenido consta de 5 capítulos que se distribuyen de la siguiente manera:

### **Capítulo 1. Fundamentos de WDM, principios de Calidad de Servicio, Redes MAN y Arquitectura de Red Metropolitana WDM.**

Trata sobre los fundamentos de las redes ópticas, la técnica WDM, los principios de las Redes de Área Metropolitana (MAN, *Metropolitan Area Networks*), y QoS, en cuanto al desempeño de nivel físico se refiere. Además, se define una arquitectura de red metropolitana WDM que sirve de referencia para el modelo de red que se utiliza en el capítulo 3, constituyéndose en información clave dentro del desarrollo de este trabajo de grado.

### **Capítulo 2. Fundamentos para el Monitoreo del Canal Óptico basado en OPM (Criterios Teóricos).**

Es una recopilación de los fundamentos de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica como: atenuación, dispersión cromática, Dispersión por Modo de Polarización (PMD, *Polarization Mode Dispersión*), efectos no lineales, diafonía (crosstalk), jitter; y los fundamentos de OPM, además de realizar una descripción sobre cómo hacer un adecuado monitoreo del canal óptico basado en OPM, de donde es posible extraer algunos criterios teóricos relacionados.

**Capítulo 3. Descripción de la Metodología para la Simulación de Equipos de Telecomunicaciones. Definición del Modelo de red y Diseño de la Simulación.**

Se describe la metodología de simulación de equipos de telecomunicaciones y su aplicación a la simulación. También incluye el estudio previo de las herramientas de simulación de redes ópticas y la selección de la herramienta más conveniente. Finalmente, se realiza el modelo conceptual de la simulación, y se define una red metropolitana WDM característica como un modelo (abstracción de la realidad), realizando el diseño de la simulación en diferentes escenarios, en el entorno que ofrecen las herramientas software para realizar el monitoreo del canal óptico.

**Capítulo 4. Análisis de la Incidencia de los Parámetros que afectan la calidad de la Señal Óptica en el Desempeño de una Red Metropolitana WDM y Definición de Criterios para el Monitoreo del Canal Óptico.**

Se realiza un estudio sobre OPM avanzado, se implementan los escenarios de simulación con el fin de determinar el comportamiento del canal óptico, se analizan los resultados y las conclusiones de la simulación; finalmente se analiza la incidencia de la atenuación y dispersión cromática en el desempeño de la red metropolitana WDM propuesta, y se definen los criterios para el monitoreo del canal óptico.

**Capítulo 5. Conclusiones, Recomendaciones y Perspectivas (trabajo futuro).**

Se da una serie de conclusiones, recomendaciones y perspectivas a futuro, obtenidas del desarrollo del trabajo de grado.

## CAPÍTULO 1.

### FUNDAMENTOS DE LA TÉCNICA WDM, PRINCIPIOS DE CALIDAD DE SERVICIO, REDES MAN Y ARQUITECTURA DE RED METROPOLITANA WDM

Teniendo en cuenta que este trabajo de grado consiste en el monitoreo del Canal Óptico (OCh, *Optical Channel*), este capítulo trata sobre: los fundamentos de las redes ópticas, la técnica WDM, incluyendo la Multiplexación por División de Longitud de Onda Ampliamente Espaciada (CWDM, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*) y DWDM, los principios de las redes MAN, y la QoS, en cuanto al desempeño de nivel físico se refiere.

Además, en este capítulo se define una arquitectura de red metropolitana WDM que sirve de referencia para el modelo de red que se utiliza en el capítulo 3 de este documento, constituyéndose en información clave dentro del desarrollo de este trabajo de grado.

#### 1.1 MARCO TEÓRICO

##### 1.1.1 Redes Ópticas

Hoy en día, la fibra óptica es el mejor medio físico de transmisión de información, y la luz es la mejor fuente para su transporte.

En general, las redes ópticas son redes de telecomunicaciones de alta capacidad basadas en tecnologías ópticas y componentes que proporcionan enrutamiento, agrupamiento y regeneración de señales. Los orígenes de las redes ópticas están relacionados directamente con WDM, la cual surgió como un medio para proporcionar capacidad adicional en las fibras existentes. La capa óptica cuyos estándares están desarrollados, es completamente transparente a las señales de la tecnología SONET-SDH. Lo anterior implica que en esencia una gran cantidad de elementos de red pueden ser eliminados con la consiguiente reducción en equipos [1].

##### 1.1.2 Modelos de Redes Ópticas

Para el desarrollo de este trabajo de grado es de vital importancia hacer un análisis sobre el comportamiento del tráfico generado por redes que trabajan con el Protocolo de Internet (IP, *Internet Protocol*) directamente sobre la capa óptica, utilizando tecnología DWDM, debido a que el desarrollo del trabajo de grado se centra en el monitoreo del canal óptico. Para llegar a esto se necesita conocer las diferentes configuraciones de red existentes, según se aprecia en la figura 1.1, las cuales incluyen diversas tecnologías que trabajan como capas intermedias y que son el resultado de la adecuación de la tecnología ya adquirida a las necesidades de los operadores [2].

La figura 1.1 representa la relación existente entre las capas, mostrando las diferentes maneras que se tienen para pasar de la capa IP a la capa óptica, como por ejemplo: IP/MPLS/Modo de Transferencia Asíncrono (ATM, *Asynchronous Transfer Mode*)/SONET-SDH/WDM-DWDM, IP/ATM/WDM-DWDM, IP/MPLS/ WDM-DWDM, IP/SONET-SDH/WDM-DWDM, IP/MPLS/ATM//WDM-DWDM e IP/WDM-DWDM [2].

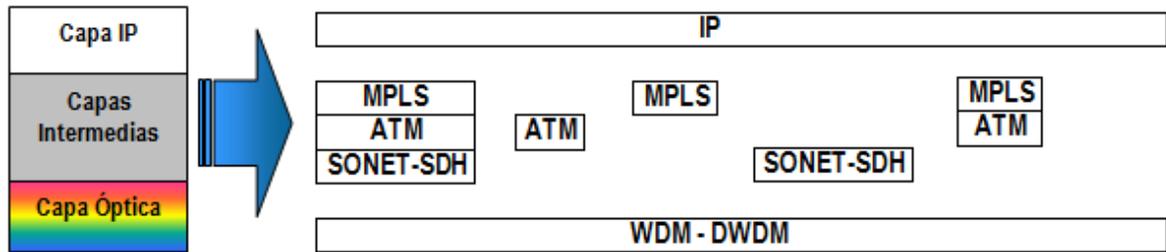


Figura 1.1. Modelo de Capas [2].

Por ende, es necesario determinar las fortalezas y debilidades de estas tecnologías según se aprecia en la tabla 1.1, para mostrar que la tendencia es llegar a transportar paquetes IP directamente sobre DWDM, permitiendo definir la arquitectura más idónea para este propósito.

Tabla 1.1. Fortalezas y Debilidades de las Tecnologías de Transporte [2].

Tecnología	Fortalezas	Debilidades
DWDM	Rápida, apropiada para largas distancias	No procesa información, agregación física, no tolerancia a fallos
SONET-SDH	Tecnología madura, excelente tolerancia ante fallas	Costosa
ATM	Soporte de QoS	Compleja, costosa y celdas fijas
MPLS	Funcionalidad semejante a conmutadores ATM	Simplicidad
IP	Flexibilidad, posicionamiento	No QoS, no seguridad

### 1.1.3 Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM)

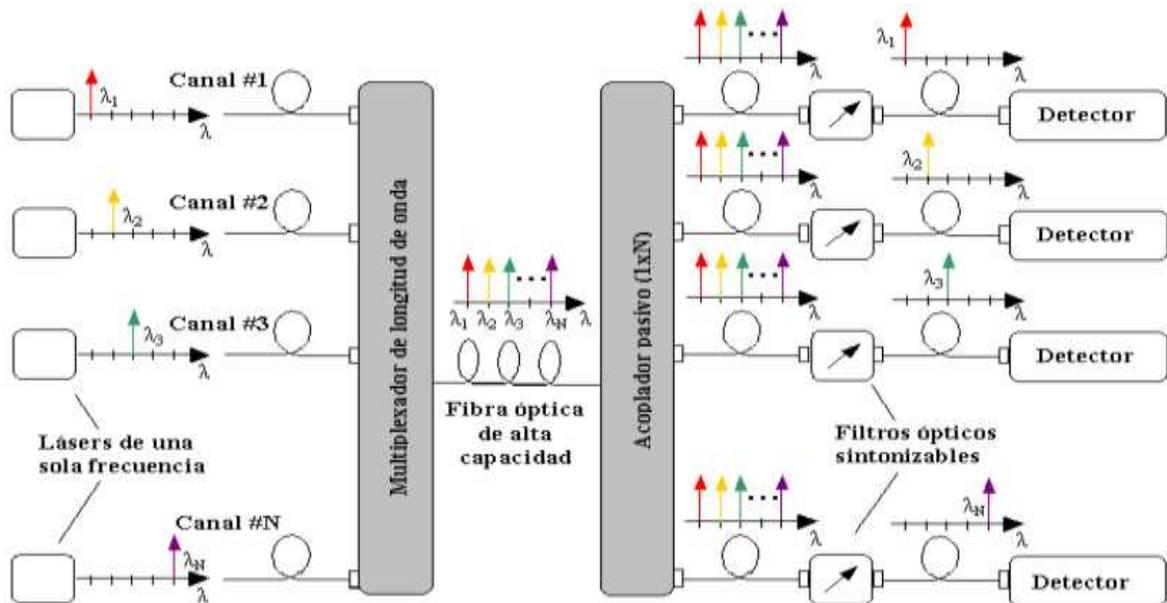
WDM consiste en la técnica de multiplexar dos o más longitudes de onda sobre una fibra usando portadoras en las distintas ventanas dentro del BW óptico disponible (1280 – 1620 nanómetros (nm)), como por ejemplo en la segunda ventana (1310 nm), en la tercera ventana (1550 nm), etc. Esta técnica permite usar eficientemente la capacidad que ofrece la fibra óptica, transmitiendo la información sobre múltiples longitudes de onda en una misma fibra [3].

Debido a que la amplificación óptica sólo está disponible en la banda de 1550 nm, los sistemas WDM actualmente están trabajando en esta banda (ya que ofrece una atenuación más baja: 0.2<sup>1</sup> decibeles por kilómetro (dB/Km), en comparación con otras); sin embargo, se debe tener en cuenta el efecto de la dispersión cromática presente en dicha banda, la cual afortunadamente se controla usando compensadores. Además, es preciso aclarar que dentro de la banda de 1550 nm existen varias bandas: la banda S (1460 - 1530 nm), la banda C (1530 -1565 nm), y la banda L (1565 -1625 nm) [4].

<sup>1</sup> En este documento no se utiliza separador de miles, solamente separador de decimales independiente del formato (coma o punto).

Lo más interesante de usar WDM es la posibilidad de manejar en cada canal o portadora óptica protocolos totalmente distintos (transparencia al protocolo), es decir una portadora podría transportar: Modo de Transferencia Asíncrono (ATM, *Asynchronous Transfer Mode*), Jerarquía Digital Plesiócrona (PDH, *Plesiochronous Digital Hierarchy*), IP, SDH, etc. [3].

El funcionamiento de WDM se ilustra mejor a través de la figura 1.2.



**Figura 1.2. Esquema básico del funcionamiento de un sistema WDM. Para cada uno de los canales hay un láser emitiendo a diferente frecuencia. Posteriormente se multiplexan todos los canales en una fibra óptica de gran capacidad. En el receptor un filtro óptico selecciona cada uno de los canales.**

[Fuente: <http://www.icfo.es/images/publications/T05-001.pdf>]

La mayoría del despliegue de WDM ha ocurrido en la forma de enlaces punto a punto con amplificadores entre ellos. Los canales WDM extremo a extremo (*lightpaths*) son estáticos. Una vez se establezcan dichos canales, ellos permanecen en su lugar. Cabe resaltar que hoy en día se desea hacer que los *lightpaths* sean más dinámicos, con el fin de aprovechar al máximo el BW de un canal cuando no curse tráfico por éste. Finalmente, se debe tener presente que los sistemas WDM pueden clasificarse tanto en sistemas CWDM como en sistemas DWDM [4].

### 1.1.3.1 Multiplexación por división de longitud de onda ampliamente espaciada (CWDM)

Los sistemas CWDM proporcionan máximo 18 longitudes de onda, definidas en el intervalo de 1270 nm a 1610 nm y poseen un espaciamiento en frecuencia correspondiente a 2.5 THz (20nm), por lo cual CWDM puede usar transmisores y filtros de menor precisión que DWDM. Sin embargo, las longitudes de onda están tan espaciadas que no se ajustan al BW del Amplificador de Fibra Dopada con Erblio (EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifier*) usado en estos sistemas, por lo tanto CWDM no aprovecha de manera eficiente el BW disponible en la fibra. Además, hoy en día entre los transmisores CWDM y DWDM solamente se aprecia una diferencia de costos significativa a velocidades de 1 Gigabit por segundo (Gbps), pero la diferencia no es tan

considerable a 10 Gbps. Por consiguiente, CWDM es apropiado para bajas velocidades de transmisión de datos de datos, para redes de corto y mediano alcance (campus universitarios), para aplicaciones no amplificadas, y potencialmente se usa en la parte de red de acceso de un Proveedor de Servicio de Internet (ISP, *Internet Service Provider*) [4].

### 1.1.3.2. Multiplexación por división de longitud de onda densamente espaciada (DWDM)

La Unión Internacional de las Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunication Union*), considera “densamente espaciados” a los sistemas WDM con más de cuatro longitudes de onda y estandariza la separación de los canales aproximadamente a un mínimo de 100 GHz, que corresponde a 0.8 nm [5].

Las ventajas principales de DWDM son que las redes de fibra existentes pueden ser escaladas para soportar un mayor BW reemplazando simplemente los componentes terminales. Otra ventaja que brindan las redes ópticas basadas en esta tecnología, es la posibilidad de crear topologías virtuales de red en el dominio óptico, sobre una topología que siempre es dependiente de la instalación de la fibra óptica [2].

Los sistemas DWDM pueden proporcionar centenares de longitudes de onda espaciadas menos de 1 nm dentro del BW disponible del amplificador. Por tanto DWDM se usa en el núcleo de las redes metropolitanas y en las redes larga distancia [4].

Finalmente retomando la tabla 1.1, es importante realizar una nueva comparación entre las tecnologías de transporte, la cual se puede apreciar en la tabla 1.2.

**Tabla 1.2. Comparación entre las Tecnologías de Transporte [2].**

Tecnología	Tipo	Niveles OSI	Confiabilidad	Seguridad	Agregación	Gestión
DWDM	Orientado a la Conexión, Multipunto-Multipunto	1	Ninguna	No	Longitudes de Onda	Centralizada
SONET-SDH	Orientado a la Conexión, Punto a Punto	1, 2	Detección Automática de Fallas (Recuperación Rápida)	No	División de Tiempo Síncrona	Centralizada
ATM	Orientado a la Conexión, Multipunto-Multipunto	2, 3	Varios	No	División de Tiempo Asíncrona	Distribuida
MPLS	Orientado a la Conexión, Multipunto-Punto	3	En desarrollo, Basado en Enrutamiento	No	División de Tiempo Asíncrona	Distribuida
IP	No Orientado a la Conexión	3	Lenta, Basado en Enrutamiento	No	División de Tiempo Asíncrona	Distribuida

Según lo anterior, desde la perspectiva técnica y económica, la posibilidad de suministrar potencialmente una capacidad de transmisión ilimitada es la ventaja más obvia de la tecnología DWDM. La actual inversión en fibra no solo puede ser preservada, sino también optimizada. A medida que la demanda cambia se puede

añadir más capacidad, ya sea actualizando los equipos o aumentando el número de longitudes de onda de la fibra sin incurrir en costos de actualización del sistema [2].

## 1.2 REDES DE ÁREA METROPOLITANA (MAN)

Debido a que las redes MAN son ambientes heterogéneos, una solución de área metropolitana debe satisfacer un amplio rango de requisitos de servicio. Variedad de formatos de datos se usan por los servicios típicos metropolitanos; entre dichos formatos se encuentran: Conexión de Sistemas Empresariales (ESCON, *Enterprise Systems Connection*), Ethernet y SDH, con velocidades de transmisión de datos de datos entre 2 Mega bits por segundo (Mbps) hasta varios Gbps. Teniendo en cuenta las circunstancias anteriores, se tiene una plataforma flexible y escalable para asegurar un servicio rápido y flexible. Finalmente, es preciso destacar que las redes MAN deben enlazar distancias medianas y largas con relativamente altas velocidades de transmisión de datos de datos [6].

En la figura 1.3 se puede apreciar la distribución general de una red óptica, recalcando los diferentes tipos de redes dentro de ella: Redes de Larga Distancia, Redes Metropolitanas y Redes de Acceso.

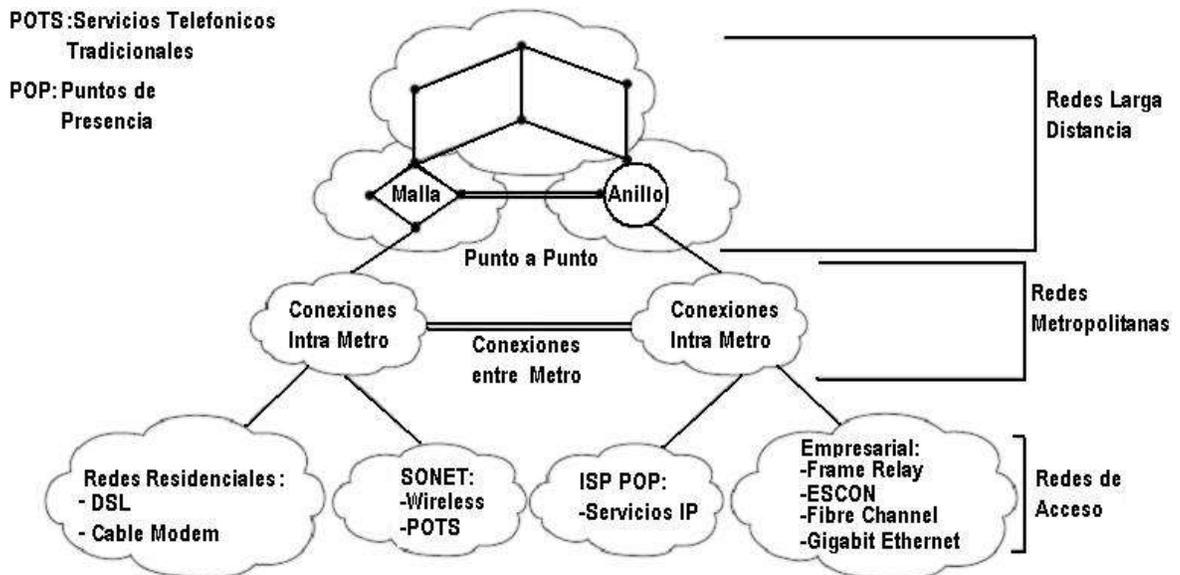


Figura 1.3. Esquema General de una Red Óptica [6].

Las redes WDM se clasifican según el área de cobertura en:

- Ultra larga distancia (intercontinentales /submarinas) WDM: >2000 Km
- Larga distancia WDM: ( 300 - 2000 Km)
- Regional WDM : (100 – 300 Km)
- Metropolitana WDM : <100 Km

Por su parte DWDM se muestra como una de las opciones más llamativas durante los últimos años en el área de las telecomunicaciones ópticas, gracias a su madurez y a la demanda de BW en las redes de acceso y metropolitanas, lo cual ha permitido aplicarla en entornos metropolitanos [7].

Por lo tanto las redes metropolitanas, dominadas hoy por las limitadas tecnologías fundamentadas en Multiplexación por División de Tiempo (TDM, *Time Division Multiplexing*), como SONET-SDH, están experimentando las ventajas que ofrece DWDM (grandes velocidades de transmisión de datos y BW) [7].

La posibilidad de aplicar la tecnología DWDM a entornos metropolitanos se ha llevado a cabo gracias al uso de componentes más simples y económicos que los usados en redes de larga distancia. Además, una gran diferencia entre los entornos de larga y los entornos de corta distancia, es que los de larga distancia se orientan cada vez más a la simple transmisión de bits al menor costo, mientras la orientación en los entornos metropolitanos está dada hacia los usuarios finales debido a los nuevos servicios y beneficios que demandan un alto grado de confiabilidad, flexibilidad y adaptabilidad [7].

### 1.3 CALIDAD DE SERVICIO (QoS)

La *calidad* hace referencia a la totalidad de características de una entidad que afectan su habilidad para satisfacer necesidades declaradas e implícitas; mientras que el *servicio* es la capacidad proporcionada a un usuario para intercambiar información a través de un medio de telecomunicaciones, por parte de un proveedor de servicio.

#### 1.3.1 Definición de QoS

La calidad de servicio está definida, según [8], como “*El efecto colectivo del desempeño del servicio, el cual determina el grado de satisfacción de un usuario del servicio*”.

La calidad de servicio es la capacidad de una red para sostener un comportamiento adecuado del tráfico que transita por ella, cumpliendo a su vez con los requerimientos de ciertos parámetros relevantes para el usuario final. Esto puede entenderse también, como el cumplimiento de un conjunto de requisitos estipulados en un Acuerdo de Nivel de Servicio (SLA, *Service Level Agreement*) entre un ISP y sus clientes.

La QoS consiste también en la capacidad de la red para reservar algunos de los recursos disponibles para un tráfico concreto con la intención de proporcionar un determinado servicio. Se debe tener en cuenta que en la red se pueden utilizar diferentes tecnologías de transporte (Frame Relay, X.25, SDH, ATM, etc.) de manera que la gestión de calidad de servicio implica la interacción con estas tecnologías y con los equipos de transporte, que son los que finalmente determinarán el nivel de calidad de servicio alcanzado [9].

Es importante aclarar que algunas redes operan de acuerdo al modelo de entrega del mejor esfuerzo (Best Effort), donde todo el tráfico tiene igual prioridad de ser entregado a tiempo; por ende, cuando ocurre congestión, todo este tráfico tiene la misma probabilidad de ser descartado [9].

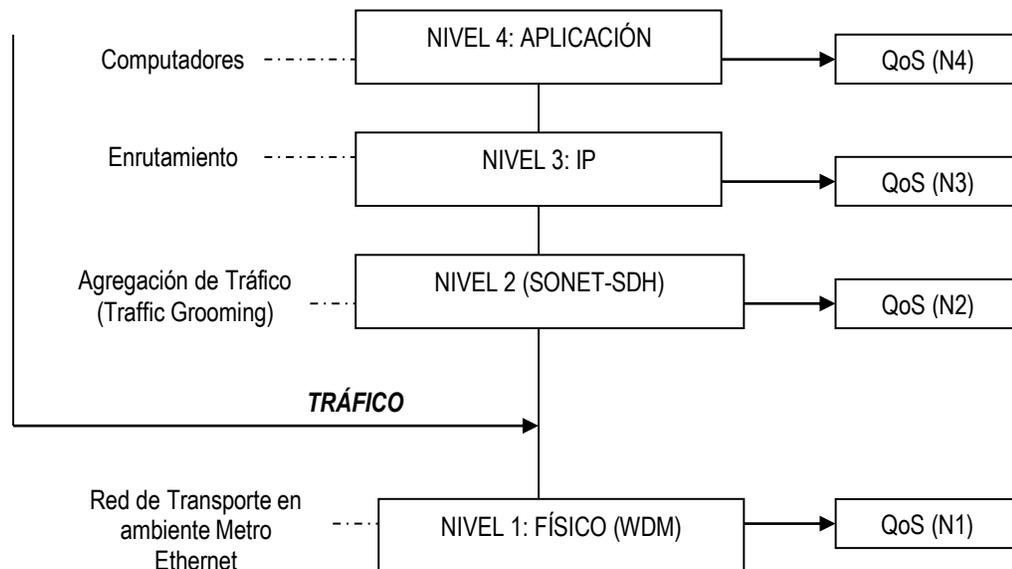
En el contexto de las comunicaciones ópticas, según [10], “*La QoS se define típicamente como la especificación de desempeño de un sistema de comunicación y usualmente se representa cuantitativamente por medio de parámetros de desempeño que pueden involucrar varios niveles del modelo OSI*”. De esta forma, la QoS se aplica al nivel físico de una red, que para este caso es el nivel WDM (nivel 1 de la arquitectura IP como lo muestra la figura 1.3); es decir, dicha QoS se refiere a la QoS de nivel 1(QoS (N1)) involucrando la calidad de la señal óptica en los enlaces WDM en el extremo receptor. Por tal razón, la QoS (N1) se mide con parámetros del nivel físico como: potencia óptica, Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR,

*Optical Signal to Noise Ratio*), Relación Señal a Ruido Eléctrica (ESNR, *Electrical Signal to Noise Ratio*), Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*), latencia extremo a extremo, entre otros [10].

### 1.3.2 QoS vs Modelo IP

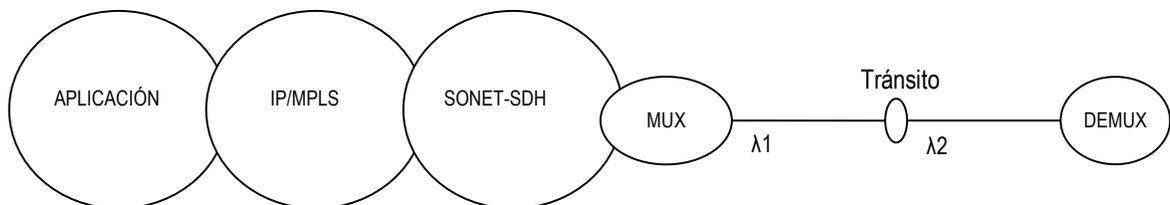
Esta sección está descrita para hacer énfasis en el contexto del objeto de estudio a lo largo del desarrollo del trabajo de grado, teniendo en cuenta que la calidad de servicio se aborda sólo desde la perspectiva de desempeño en el nivel 1 (físico).

En la figura 1.4 se muestra la arquitectura lógica IP, donde se destaca la calidad de servicio en sus distintos niveles, y los respectivos elementos que hacen parte de cada nivel, recalcando la participación de las redes ópticas en el nivel 1 y 2.



**Figura 1.4. QoS aplicada al Modelo IP. Arquitectura Lógica.**

Por su parte en la figura 1.5 se muestra la arquitectura física de conexión IP, la cual es una materialización de la arquitectura lógica IP anterior, donde se destacan los elementos que hacen parte de la misma, considerando elementos de red ópticos.



**Figura 1.5. QoS aplicada al Modelo IP. Arquitectura Física.**

## 1.4 ARQUITECTURA DE UNA RED METROPOLITANA WDM

En esta sección se mencionan las características más relevantes correspondientes a la arquitectura de una red metropolitana WDM, que servirá de referencia para el modelo de red que se utilizará en el capítulo 3 de este documento.

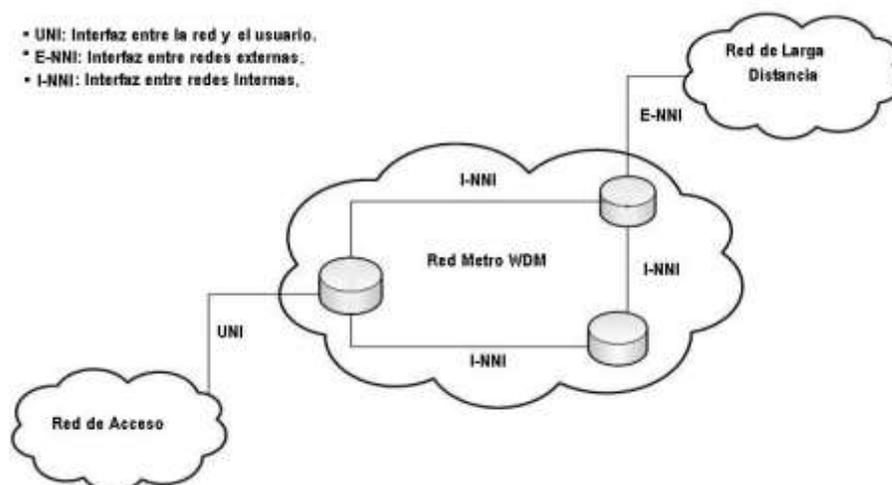
Por tanto, para definir la arquitectura de la red es preciso tener presente aspectos de dimensionamiento, según la tabla 1.3.

**Tabla 1.3. Aspectos de dimensionamiento para definir la arquitectura de la red metropolitana WDM [2].**

Longitud de la fibra óptica
Tipo de fibra óptica como por ejemplo: Fibra de Dispersión No Modificada (NDSF, <i>Non Dispersion Shift Fiber</i> ), Fibra de Dispersión Modificada (DSF, <i>Dispersion Shift Fiber</i> ), entre otras
Número de canales (CWDM, DWDM, esquema unidireccional o bidireccional)
BW óptico disponible (capacidad)
Tipo de equipos como: multiplexor, demultiplexor, amplificador, Conector Cruzado Óptico (OXC, <i>Optical Cross-Connector</i> ), Multiplexor Óptico de Adición/Extracción (OADM, <i>Optical Add/Drop Multiplexer</i> ), entre otros
Sistema de protección (redundancia)
Interfaces como: Interfaz de Usuario a Red (UNI, <i>User to Network Interface</i> ), Interfaz de Red Interna a Red Interna (I-NNI, <i>Internal- Network to Network Interface</i> ), Interfaz de Red Externa a Red Externa (E-NNI, <i>External-Network to Network Interface</i> )
Tráfico

### 1.4.1. Esquema General de Red

Para la figura 1.6 se debe tener en cuenta los siguientes aspectos: una muy alta velocidad de transmisión de datos por canal (10 Gbps), transparencia total respecto al tipo de datos y al protocolo (IP, ATM, etc.), buen desempeño de la red en cuanto a transmisión, muy alta capacidad de tráfico, calidad de servicio y posibilidad de ampliación sencilla [11].



**Figura 1.6. Esquema General de Red.**

Para ello se considera una red totalmente óptica WDM basada en una topología en anillo, en la que un canal lógico se asocia a cada destino. Con respecto a otras topologías (estrella, malla, etc.), la topología en anillo permite sincronización a muy altas velocidades de transmisión de datos, permitiendo un acceso por intervalos de tiempo (slots). De esta manera, la topología en anillo ofrece uso flexible y eficiente del BW óptico disponible para comunicación de datos. Además, tiene la ventaja de mayor resistencia, particularmente frente a roturas en la fibra y fallos en los componentes electrónicos [11].

Los canales lógicos de transmisión se obtienen por una combinación de WDM y diversidad espacial, puesto que en este caso se puede cumplir los objetivos de confiabilidad, escalabilidad y gran capacidad de tráfico [11].

#### 1.4.2. Esquema de la Red Metropolitana WDM

La figura 1.7 se compone de tres canales ópticos (enlaces de red), los cuales son pasivos y sufren degradaciones cuando se cursa tráfico a través de ellos.

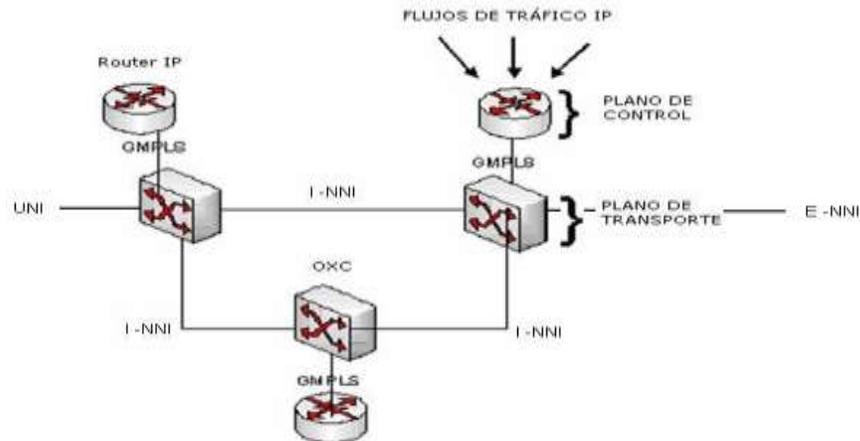


Figura 1.7. Esquema de la Red Metro WDM.

El plano de control corresponde al nivel 3 (IP) del modelo IP, mientras que el plano de transporte corresponde al nivel 1 (físico) de dicho modelo, comunicándose mediante Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo Generalizado (GMPLS, *Generalized Multiprotocol Label Switching*).

#### 1.4.3. Esquema General del Canal Óptico (OCh)

La figura 1.8 hace referencia a la descripción general del canal óptico, destacándose las secciones que lo conforman: Sección de Multiplexación Óptica (OMS, *Optical Multiplex Section*), la cual se encarga del monitoreo y la gestión de un grupo de longitudes de onda, y Sección de Transmisión Óptica (OTS, *Optical Transmission Section*), que se encarga de monitorear los niveles de potencia, dispersión y pérdidas. Además, se puede apreciar cómo se conforma la trama que se transmite por el canal óptico, la cual incluye la carga útil y los encabezados que contienen la información acerca del tráfico transmitido - en la Unidad de Carga Útil del canal Óptico (OPU, *Optical channel Payload Unit*) - funciones de Operación, Administración y Gestión (OA&M, *Operation, Administration & Management*) a nivel del OCh - en la Unidad de Datos del canal Óptico (ODU, *Optical channel Data Unit*), y monitoreo, detección y Corrección de Errores en Recepción (FEC, *Forward Error Correction*) - en la Unidad de Transporte del canal Óptico (OTU, *Optical channel Transport Unit*).

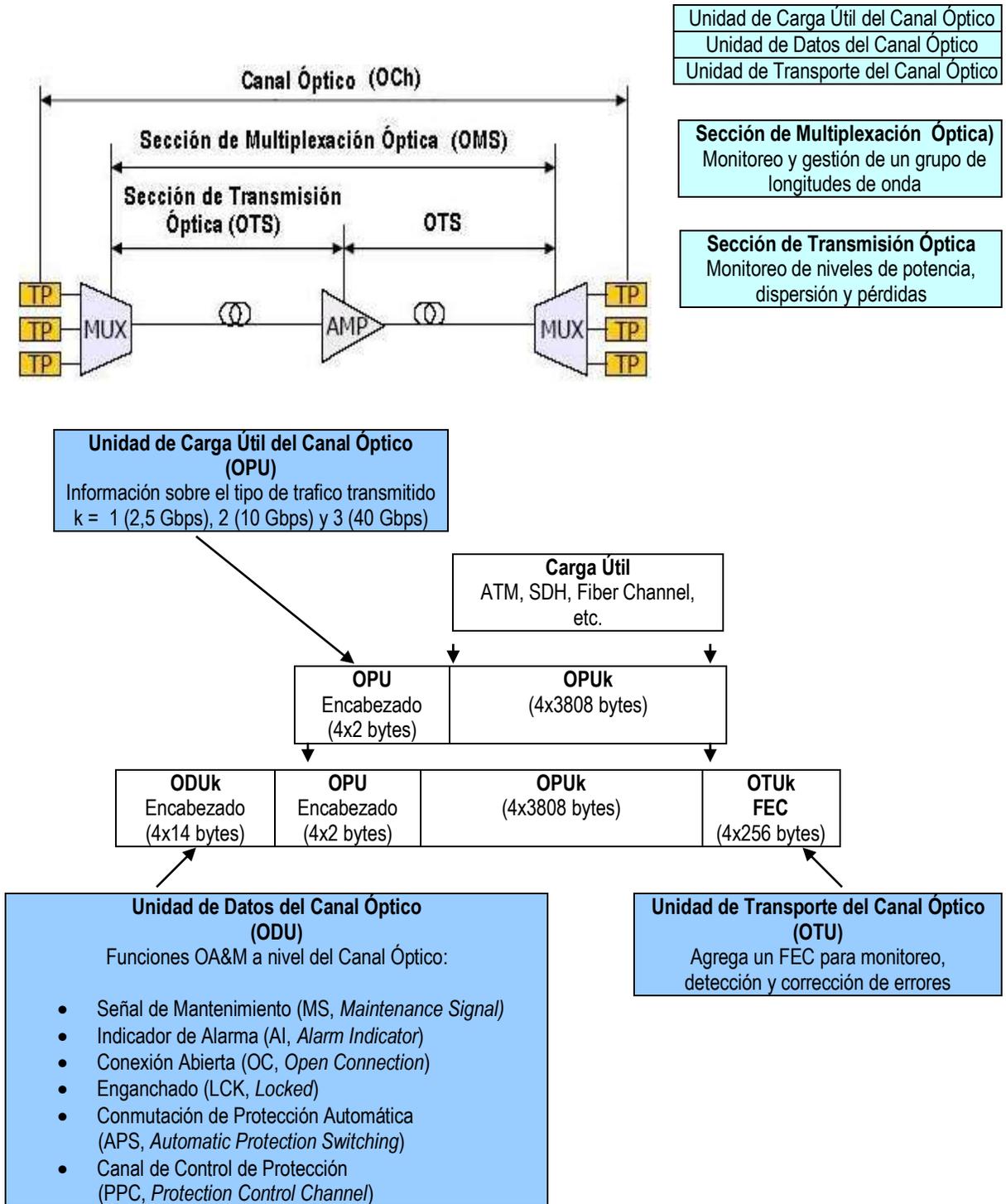


Figura 1.8. Esquema General del OCh.

[Fuente: [http://www.rediris.es/jt/jt2004/archivo/ficheros/adolfo\\_garcia-redes-opticas.pdf](http://www.rediris.es/jt/jt2004/archivo/ficheros/adolfo_garcia-redes-opticas.pdf)].

### 1.4.3.1. Esquema básico del OCh

La figura 1.9 muestra un esquema básico del OCh que se compone de un multiplexor, secciones de fibra, y por último de un demultiplexor. El esquema es básico porque no hay elementos ópticos como OADM u OXC.

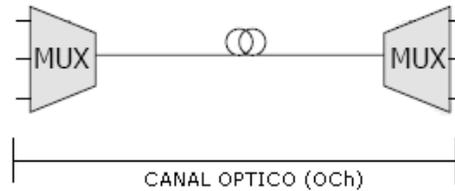


Figura 1.9. Esquema Básico del OCh.

### 1.4.3.2. Esquema del OCh con OADM

A diferencia de la figura 1.9, la figura 1.10 contiene dos elementos ópticos adicionales: un OADM que brinda flexibilidad al enlace y un amplificador óptico. Opcionalmente, con el fin de que dicho OCh sea completamente transparente puede utilizarse un OXC.

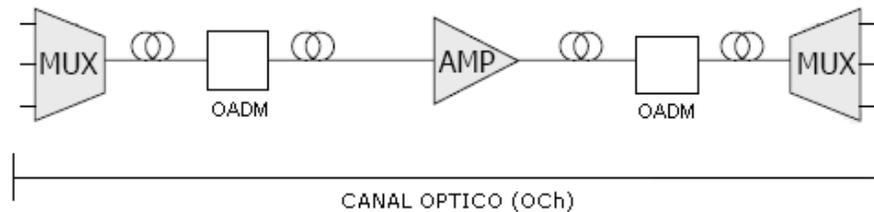


Figura 1.10. Esquema del OCh con OADM.

A continuación se detallan los tipos de interconexión de redes y la descripción de los equipos ópticos de la tecnología DWDM aplicada a las redes backbone de la multinacional Huawei Technologies, que se constituye en una referencia para la definición de la red metropolitana WDM característica.

## 1.4.4. Tipos de Interconexión de Redes

### 1.4.4.1. Red punto a punto

Está compuesta de un Multiplexor Terminal Óptico (OTM, *Optical Terminal Multiplexer*) y un Amplificador de Línea Óptico (OLA, *Optical Line Amplifier*), y es el modo de interconexión más utilizado por los equipos de Huawei (OptiX Metro 6100), como se puede apreciar en la figura 1.11 [12].

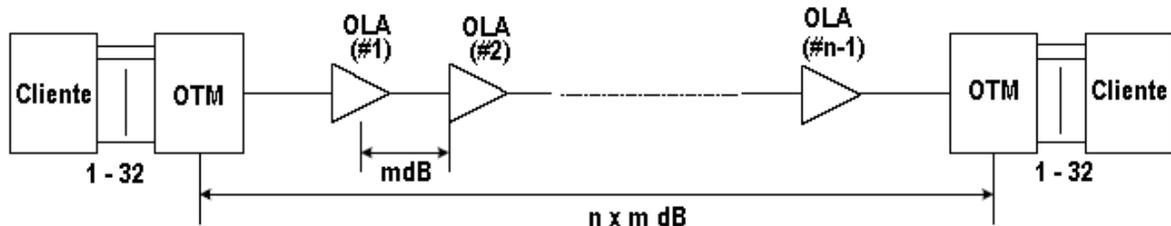


Figura 1.11. Red Punto a Punto.

[Fuente: <http://www.huawei.com>].

#### 1.4.4.2. Red en cadena

Esta red se usa comúnmente en redes backbone DWDM de gran capacidad y larga distancia. Además, se considera como una extensión de la red punto a punto incluyendo elementos adicionales como: OADM, Ecuador Óptico (OEQ, *Optical Equalizer*) y Regenerador (REG, *Regenerator*), como se muestra en la figura 1.12 [12].

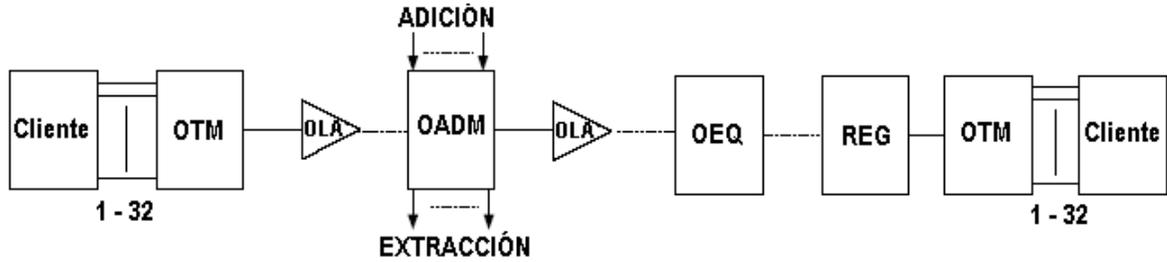


Figura 1.12. Red en Cadena.  
[Fuente: <http://www.huawei.com>].

#### 1.4.4.3. Red en anillo

Esta red se utiliza ampliamente en redes regionales y se compone de OADM y OTM espalda con espalda (back to back), para eliminar el ruido acumulado por causa de los amplificadores, según la figura 1.13 [12].

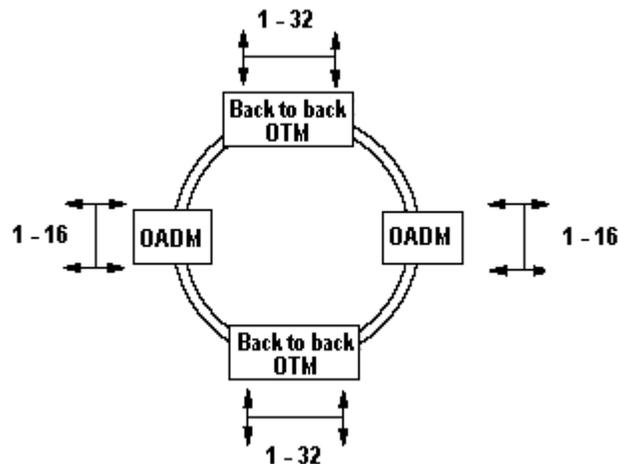


Figura 1.13. Red en Anillo.  
[Fuente: <http://www.huawei.com>].

### 1.5. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS ÓPTICOS

La figura 1.12 contiene todos los equipos de red que se van a describir, los cuales comparten un conjunto común de elementos que son:

- Amplificador Óptico (OA, *Optical Amplifier*).
- Unidad de Canal de Supervisión Óptica o Unidad de Canal de Supervisión y Transporte de Temporización (OSC/OTC, *Optical Supervisory Channel unit or Supervisory Channel and Timing Transporting*).
- Unidad de Interfaz de Fibra (FIU, *Fiber Interface Unit*).
- Unidad de Sistema de Control y Comunicación (SCC, *System Control & Communication unit*).
- Unidad de Resguardo de Energía (PBU, *Power Backup Unit*).

### 1.5.1. Multiplexor Terminal Óptico (OTM) [12]

El multiplexor terminal óptico está compuesto por:

- Elementos comunes.
- Unidad de Transponder Óptica (OTU, *Optical Transponder Unit*).
- Multiplexor Óptico (OM, *Optical Multiplexer*).
- Demultiplexor Óptico (OD, *Optical Demultiplexer*).
- Unidad Amplificadora de Bombeo Raman (RPU, *Raman Pump Amplifier Unit*).
- Módulo de Compensación de Dispersión (DCM, *Dispersion Compensation Module*).
- Unidad Analizadora de espectro Multicanal (MCA, *Multi-Channel spectrum Analyzer unit*).

En general es una estación terminal de la red DWDM que se utiliza en el extremo transmisor o receptor. En una configuración unidireccional el OTM funciona como Multiplexor Óptico o Demultiplexor Óptico, mientras que en la bidireccional cumple las dos funciones simultáneamente. En la parte de transmisión el OTM recibe las señales de múltiples clientes (por ejemplo SDH), las convierte a través de la OTU en señales DWDM estándar según la recomendación ITU-T G.694.1, las multiplexa (mediante el OM), las amplifica (mediante el OA) y las compensa (mediante el DCM); y por último las envía junto con la señal de supervisión proveniente de la OSC/OTC en una sola fibra a través de la FIU. En cambio, en la parte de recepción hace la operación inversa que consiste en amplificar (opcional) la señal principal (por medio de la RPU), la cual se divide en dos señales (servicio y supervisión). Finalmente la señal de servicio se demultiplexa en canales individuales y se distribuye a los clientes correspondientes.

El OM, OD y OA proveen puertos de monitoreo de desempeño óptico a través de los cuales el MCA accede para monitorear la longitud de onda central, la potencia óptica y la OSNR de los múltiples canales de las señales ópticas.

La figura 1.14 muestra el diagrama de bloques de los flujos de señales del OTM.

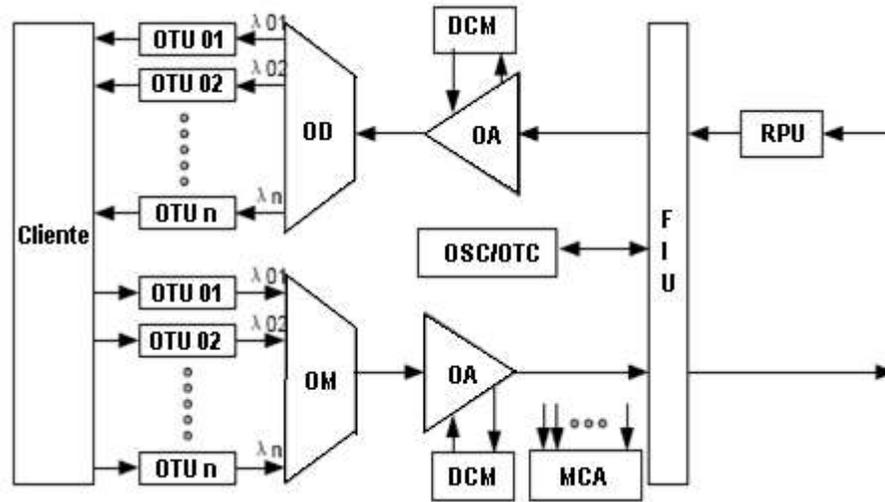


Figura 1.14. Flujos de Señales del OTM.  
[Fuente: <http://www.huawei.com>].

### 1.5.2. Amplificador de Línea Óptico (OLA) [12]

El amplificador de línea óptico está compuesto por:

- Elementos comunes.
- Unidad Amplificadora de Bombeo Raman (RPU).
- Módulo de Compensación de Dispersión (DCM).

Normalmente el OLA amplifica las señales ópticas bidireccionales y compensa su dispersión para ampliar la distancia de transmisión sin regeneración.

Las señales de servicio se envían al OA, en donde se amplifican de acuerdo a la banda (C o L); mientras tanto el DCM ejecuta la compensación. Por el contrario las señales de supervisión se envían a la OSC/OTC para procesamiento de encabezados. Finalmente se envían (por medio de la FIU) para su transmisión.

La figura 1.15 muestra el diagrama de bloques de los flujos de señales del OLA.

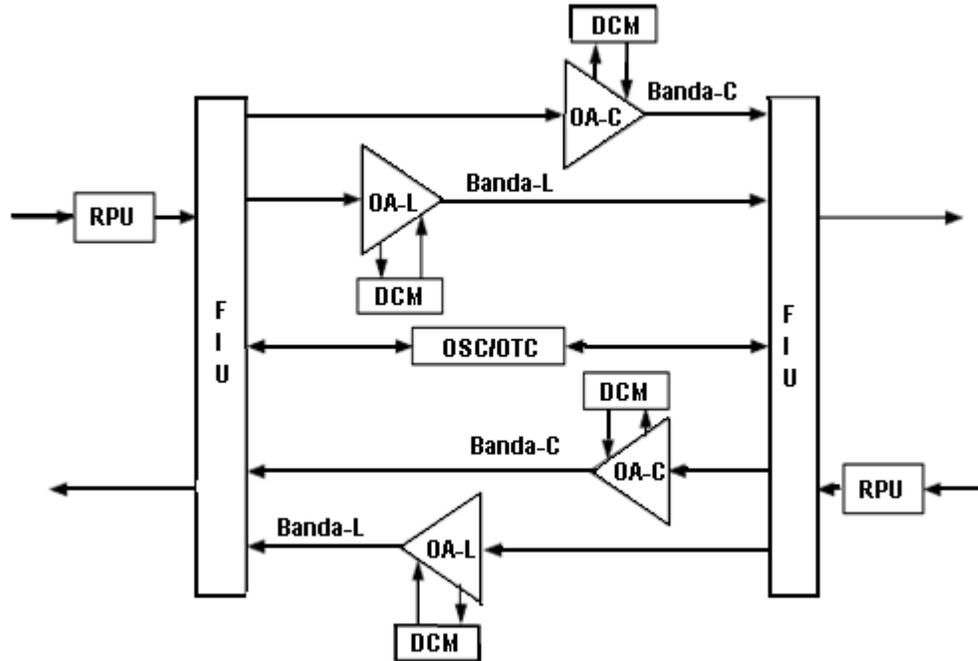


Figura 1.15. Flujos de Señales del OLA.

[Fuente: <http://www.huawei.com>].

### 1.5.3. Multiplexor Óptico de Adición/Extracción (OADM) [12]

Se usa para adicionar o extraer canales localmente hacia o desde el trayecto principal mientras los demás canales pasan transparentemente.

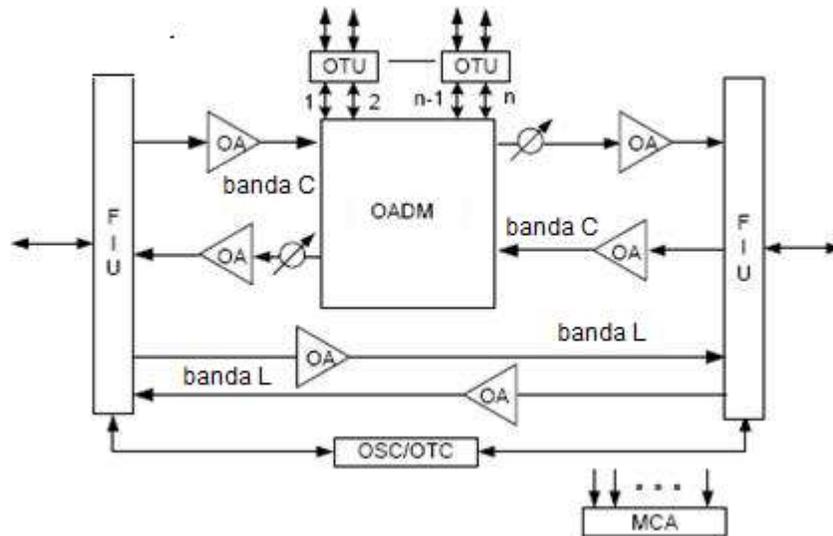
El equipo OptiX Metro 6100 tienen dos tipos de OADM: serial y paralelo.

#### 1.5.3.1. OADM serial [12]

El OADM serial está compuesto por:

- Elementos comunes.
- Multiplexor Óptico de Adición/Extracción (OADM).
- Unidad de Transponder Óptica (OTU).
- Módulo de Compensación de Dispersión (DCM).
- Unidad Analizadora de Espectro Multicanal (MCA).

La figura 1.16 muestra el diagrama de bloques de los flujos de señales del OADM serial.



**Figura 1.16. Flujos de señales del OADM Serial.**

[Fuente: <http://www.huawei.com>].

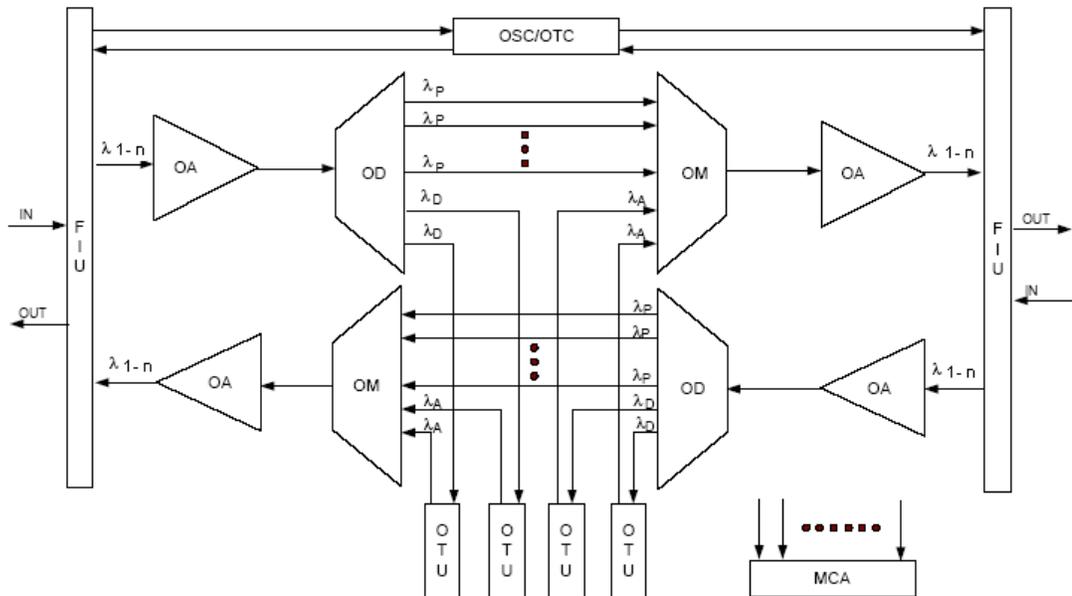
La unidad OADM en la figura 1.16 puede soportar adición/extracción completa de señales en la banda C. Es importante resaltar que dichas señales pueden necesitar ser amplificadas antes de ingresar o después de salir de la unidad OADM; además, las señales de servicio de la banda L también se amplifican a través del OA. Por último, todas las señales se combinan junto con la señal de supervisión y se envían a la fibra óptica.

### 1.5.3.2. OADM paralelo [12]

El OADM paralelo está compuesto por:

- Elementos comunes.
- Unidad de Transponder Óptica (OTU).
- Multiplexor Óptico (OM).
- Demultiplexor Óptico (OD).
- Módulo de Compensación de Dispersión (DCM).
- Unidad Analizadora de Espectro Multicanal (MCA).

La figura 1.17 muestra el diagrama de bloques de los flujos de señales del OADM paralelo, donde  $\lambda_A$  es la longitud de onda que se agrega,  $\lambda_D$  es la longitud de onda que se extrae y  $\lambda_P$  es la longitud de onda que pasa transparentemente.



**Figura 1.17. Flujos de señales del OADM paralelo.**

[Fuente: <http://www.huawei.com>].

El OADM paralelo está formado por la configuración de OTMs back-to-back, encargándose de adicionar/extraer canales a través del OM y OD mientras regenera o deja pasar los demás canales. Es importante aclarar que este tipo de OADM se usa comúnmente en redes backbone, las cuales manejan más de 32 canales, y puede actualizarse hasta 160 canales según sea necesario.

#### 1.5.4. Regenerador (REG) [12]

El regenerador está compuesto por:

- Elementos comunes.
- Unidad de Transponder Óptica (OTU).
- Multiplexor Óptico (OM).
- Demultiplexor Óptico (OD).
- Módulo de Compensación de Dispersión (DCM).
- Unidad Analizadora de Espectro Multicanal (MCA).

Se debe tener en cuenta que cuando la distancia es mayor a la trabajada por los OLA, las degradaciones que afectan la calidad de señal óptica como la dispersión cromática, la pérdida de potencia (atenuación), el ruido óptico, los efectos no lineales, o la PMD, afectarán el desempeño de la transmisión, por tanto se hace necesario regenerar las señales utilizando un REG (por medio de la OTU), llevando a cabo las funciones Reformar - Retemporizar - Retransmitir (3R, *Reshape - Retime - Retransmit*), con el fin de mejorar la calidad de la señal y ampliar la distancia de transmisión.

La figura 1.18 muestra el diagrama de bloques de los flujos de señales del REG.

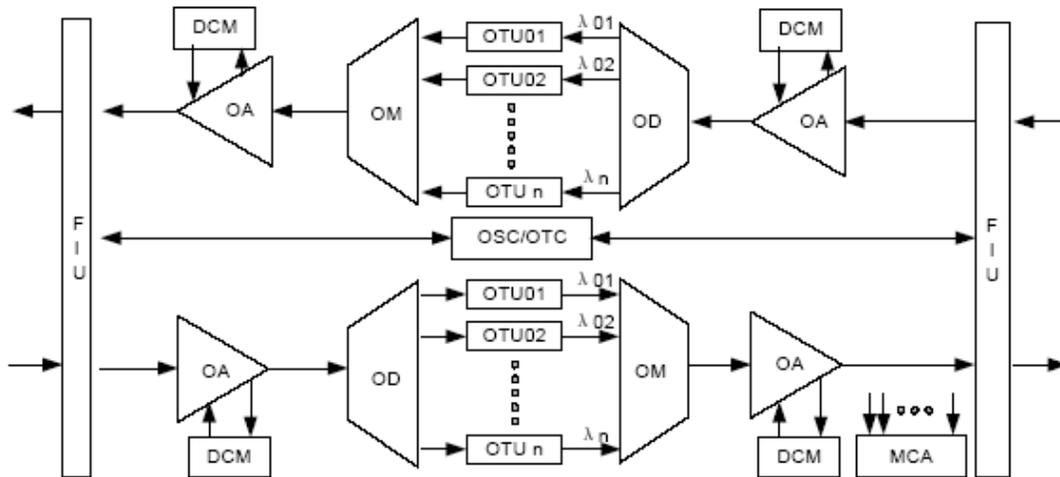


Figura 1.18. Flujos de señales del REG.

[Fuente: <http://www.huawei.com>].

### 1.5.5. Ecuilizador Óptico (OEQ) [12]

El OEQ es usado para aplicaciones de Extra Larga Distancia (ELH, *Extra Long Haul*), con el fin de obtener una mejor ecualización de la señal óptica y la compensación de la dispersión y mejorar ciertos problemas que se presentan. ELH corresponde a una distancia mucho mayor que Ultra Larga Distancia (ULH, *Ultra Long Haul*).

A continuación se nombran los problemas que se pueden presentar en ELH:

- Acumulación de ganancias no planas en el espectro de los amplificadores ópticos y el espectro de atenuación de la fibra causan desequilibrio entre la potencia óptica y la OSNR en la etapa de recepción.
- La pendiente de dispersión del DCM no se ajusta completamente con las fibras ópticas, de tal manera que no se pueden compensar completamente todas las longitudes de onda, y la dispersión en la etapa de recepción no cumple con los requerimientos del sistema.

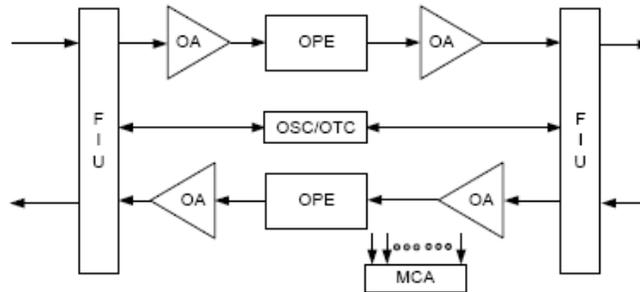
EL OEQ puede tener un Ecuilizador de Potencia Óptica (OPE, *Optical Power Equalizer*) y/o un Ecuilizador de Dispersión (DE, *Dispersion Equalizer*).

#### 1.5.5.1 Ecuilizador de potencia óptica (OPE) [12]

El ecualizador de potencia óptica está compuesto por:

- Elementos comunes.
- Ecuilizador de Potencia Óptica (OPE).
- Unidad Analizadora de Espectro Multicanal (MCA).

La figura 1.19 muestra el diagrama de bloques de los flujos de señales del OPE.



**Figura 1.19. Flujos de señales del OPE.**

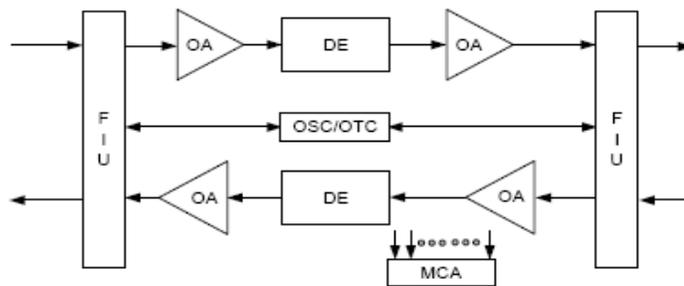
[Fuente: <http://www.huawei.com>].

### 1.5.5.2 Ecuador de dispersión (DE) [12]

El ecuador de dispersión está compuesto por:

- Ecuador de Dispersión (DE)
- Unidad Analizadora de Espectro Multicanal (MCA).
- Módulo de Compensación de Dispersión (DCM).

La figura 1.20 muestra el diagrama de bloques de los flujos de señales del ecuador de dispersión (DE).



**Figura 1.20. Flujos de señales del DE.**

[Fuente: <http://www.huawei.com>].

El ecuador de señal óptica y el ecuador de dispersión se pueden ubicar en la misma estación. A menudo el DE se ubica en la etapa de recepción del OTM para la equalización de dispersión; y se recomienda que sea en la última estación de la sección de multiplexación óptica.

## 1.6. DISEÑO DE UNA RED METROPOLITANA IP/DWDM

Para resolver los aspectos de dimensionamiento mencionados anteriormente (tabla 1.3), se recurrió al estudio del trabajo de grado [2], adecuando el perfil de diseño de la red desarrollado en dicho trabajo al monitoreo del canal óptico en el plano de transporte que se desarrolla en este trabajo de grado. Cabe resaltar que la información de [2] es importante en el desarrollo de este trabajo de grado.

### 1.6.1. Planteamiento del Diseño

A continuación se mencionan los requerimientos de la red [2]:

- Interconectar con fibra óptica los nodos de la red metropolitana característica.
- Utilización de tecnología DWDM transparente al tipo de protocolo de transporte.
- Capacidad de soporte para necesidades de servicio actuales y futuras.
- Fácil expansión e incremento de capacidad, actualización o reconfiguración.
- Plano de control basado en GMPLS.
- Redes clientes conectadas a la red DWDM mediante enrutadores IP con interfaces UNI.
- Servicios con BW definido por las necesidades de los clientes: transmisiones de video en tiempo real (video conferencia), transmisiones de datos en tiempo real (red bancaria), transmisiones de voz (VoIP), transmisiones de información no crítica en el tiempo (e-mail).

#### 1.6.1.1. Planeación de capacidad [2]

De acuerdo con los tipos de servicio a implementar en la red, se asigna un BW promedio requerido por cada servicio para garantizar su QoS.

La asignación del BW para esta red, según el tipo de servicio mostrado en el planteamiento anterior es:

- Transmisiones de video en tiempo real: promedio 1.5 Mbps.
- Transmisiones de datos en tiempo real: promedio de 3 Mbps.
- Transmisiones de voz: promedio de 2 Mbps.
- Transmisiones de información no crítica: no superan 1 Mbps, pero se generan en gran cantidad. En promedio utilizan 0.5 Mbps.

Se debe tener en cuenta que las conexiones del mismo tipo de tráfico se agrupan para completar capacidad de longitud de onda base de 2.5 Gbps, con el fin de reducir la cantidad de canales ópticos necesarios para el sistema.

#### 1.6.1.2. Matriz de tráfico [2]

El desarrollo de la matriz de tráfico es un trabajo realizado por el personal encargado de administrar la red. En ella se deben tener en cuenta todos los factores que pueden afectar su definición, incluyendo costos y expectativas de crecimiento de red, para que las inversiones en infraestructura sean acordes a las necesidades existentes a corto y mediano plazo.

Es importante decir que para la construcción de una matriz de tráfico, cuando el número de conexiones transportado sobre un OCh no completan su capacidad total, este BW que sobra no se debe ver como un problema como tal, debido a que dicha capacidad redundante debe utilizarse para reenrutar conexiones que presenten problemas en la transmisión.

De acuerdo con [2], *“Se deben tener en cuenta canales ópticos adicionales para propósitos de protección y reenrutamiento del tráfico más importante. En el caso de esta red se utilizará una longitud de onda de protección por cada 5 longitudes de onda activas, generando un esquema de protección 1:5”*.

### 1.6.1.3. Definición de la topología física de red

Este trabajo de grado toma como referencia la red metropolitana IP/DWDM que se muestra en la figura 1.21, la cual según [2] se compone de 12 nodos y tiene una topología híbrida (anillos y mallas).

Dado que el objetivo de este trabajo de grado es definir criterios para el monitoreo del canal óptico y la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana WDM, se tomará como referencia esta red para el diseño de la red metropolitana WDM característica que se definirá en el capítulo 3 de este documento.

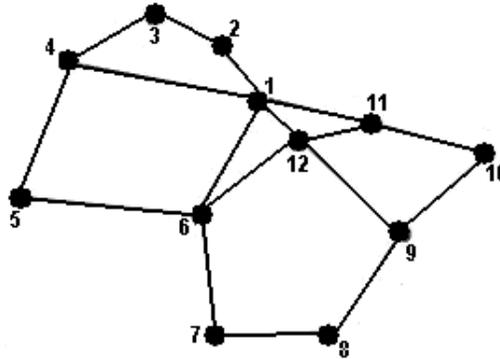


Figura 1.21. Topología Física de Red [2].

### 1.6.1.4 Definición de la topología lógica de red

Según [2], “La topología lógica de una red IP/DWDM debe definir las subredes que la componen, los puntos de frontera de interconexión entre ellas, con redes semejantes de otros operadores y con los clientes, además de las interfaces que darán soporte a esos puntos de interconexión”.

La definición de la topología lógica de la red se presenta en la figura 1.22.

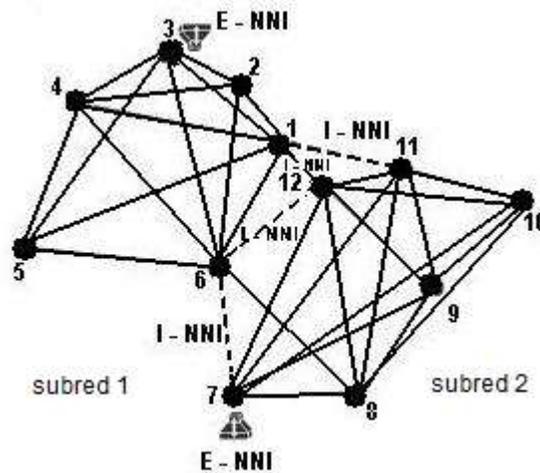


Figura 1.22. Topología Lógica de Red [2].

Al tener definidos los puntos de interconexión, se procede a asignar las interfaces que soportarán cada uno de ellos [2]:

- UNI: interfaz empleada entre los clientes y la red.
- I-NNI: interfaz utilizada entre las dos subredes.
- E-NNI: interfaz usada para la interconexión con redes de otras administraciones.

#### **1.6.1.5 Determinación del modelo de control de red**

Los dominios IP y óptico de la red tendrán un plano de control integrado (GMPLS), que permitirán la utilización de un esquema de direccionamiento unificado y facilitarán las labores de establecimiento de conexiones a lo largo de la red [2].

#### **1.6.1.6 Selección del esquema de direccionamiento**

Según [2], *“El esquema de direccionamiento propuesto para la red en diseño utiliza la identificación de los elementos de red (OXC, OADM, enrutadores, etc.) con direcciones IPv6, debido a las ventajas que esta versión del protocolo ofrece respecto al número de elementos direccionables”*.

#### **1.6.1.7 Selección del protocolo de enrutamiento**

Dado que el transporte en la capa física (WDM) es independiente del protocolo, la selección del protocolo puede ser cualquiera que convenga o sea apropiado al diseño de la red en particular, lo cual se encuentra fuera del alcance de este trabajo de grado [2].

#### **1.6.1.8 Selección del protocolo de señalización**

El protocolo de señalización a implementar debe ser el mismo para las dos subredes que componen la red, con el fin de facilitar la realización del sistema de señalización de dicha red, utilizando un mismo esquema en todas las subredes que la conforman. Para mayor información referirse a [2].

#### **1.6.1.9 Esquema de protección y seguridad de red**

Se debe tener en cuenta que para un buen desempeño y confiabilidad de la red, los esquemas de protección y seguridad son muy importantes para ésta. En [2] se puede encontrar información detallada sobre este tema.

#### **1.6.1.10. Medio de transmisión de red**

En la red de larga distancia, la mayoría de la fibra óptica embebida es de tipo monomodo estándar (G.652) con alta dispersión en la ventana de los 1550 nm, lo cual limita la distancia de transmisión para velocidades de 10 Gbps (OC-192)<sup>2</sup>. La dispersión puede ser mitigada hasta cierto punto, usando compensadores de

---

<sup>2</sup> OC-n = n \* (51,84) Mbps, donde n es un número entero positivo.

dispersión. La Fibra de Dispersión modificada No Cero (NZDSF, *Non-Zero Dispersion Shift Fiber*) puede ser desplegada para el transporte de velocidades OC-192, pero hay que tener en cuenta que potencias ópticas más altas introducen efectos no lineales [13].

En la red de corta distancia, la dispersión por modo de polarización (PMD) y los efectos no lineales no son tan críticos como lo son en sistemas de larga distancia, donde las velocidades más altas (OC-192 y mayores) son más comunes. Los sistemas DWDM que usan señales ópticas de 2.5Gbps o de menor velocidad, no están sujetos a dichos efectos no lineales en cortas distancias [13].

Los principales tipos de fibras monomodo y su aplicación se pueden resumir como se indica a continuación [13]:

- Fibra de Dispersión No modificada (NDSF) o fibra monomodo estándar. Contabiliza más del 95% de la planta desplegada; apropiado para el uso de TDM (canal simple) en la región de 1310 nm o para el uso de DWDM en la región de 1550 nm (con compensadores de dispersión). Este tipo de fibra también puede soportar el estándar de 10Gb Ethernet en distancias por encima de 300m. Este tipo de fibras se describe en la recomendación ITU-T G.652.
- Fibra de Dispersión Modificada (DSF). Apropriada para el uso de TDM en la región de 1550 nm, pero no es apropiada para DWDM en esta región ya que el fenómeno no lineal de Mezcla de Cuatro Ondas (FWM, *Four Wave Mixing*) produce degradaciones significativas. Este tipo de fibras se describe en la recomendación ITU-T G.653.
- Fibra de Dispersión modificada No Cero (NZDSF). Buena tanto para el uso de TDM y DWDM en la región de 1550 nm. Este tipo de fibras se describe en la recomendación ITU-T G.655.
- Fibra de Nueva Generación (NGF, *New Generation Fiber*). Incluye tipos de fibras que permiten que la energía viaje más allá dentro del revestimiento de la fibra, creando una pequeña cantidad de dispersión para oponerse a la FWM, y fibras de dispersión plana, las cuales permiten el uso de longitudes de onda más allá de la óptima longitud de onda sin ensanchamiento de pulso.

Dentro de las fibras monomodo también existe otro tipo de fibra que se caracteriza por un valor de dispersión cromática elevado y de signo contrario al de la fibra estándar, llamado Fibra Compensadora de Dispersión (DCF, *Dispersion Compensating Fiber*). Esta fibra se usa en sistemas de compensación de dispersión, colocando un pequeño tramo de DCF para compensar la dispersión cromática acumulada en el enlace óptico. Sin embargo, una desventaja de la fibra DCF es que tiene una menor área efectiva y una mayor atenuación (aproximadamente 0.5 dB/Km) que la fibra estándar<sup>3</sup>.

Es muy importante recalcar que a medida que la velocidad de transmisión de datos se incrementa a 40 Gbps (OC-768) y más allá, la interdependencia entre el diseño del sistema y el tipo de fibra se convertirá en un factor muy importante para la planeación estratégica [13].

Según lo anterior, el tipo de fibra NZDSF (G.655), es el más óptimo para la implementación de DWDM [2].

El tipo de fibra NZDSF *trabaja en la tercera ventana* cuyo rango va desde 1528 nm hasta 1561 nm permitiendo conjugar, sin problema, velocidades por encima de los 10 Gbps y donde los niveles de dispersión se mantienen entre 1 y 6 picosegundos/nanómetro (ps/nm), pero adicionalmente los desarrollos en la fabricación de fibras mucho más avanzadas permiten que se pueda trabajar, en algunos casos, en la cuarta ventana (L) que va desde 1561-1620 nm [2].

---

<sup>3</sup> Tomado de: [http://www.radioptica.com/Fibra/tipos\\_fibra\\_optica.asp](http://www.radioptica.com/Fibra/tipos_fibra_optica.asp)

En [2] se dice que: *“Esta fibra permite trayectos entre amplificadores de 120 a 160 Km, y entre repetidores de 600 a 1200 Km para regenerar la señal”*.

La fibra óptica seleccionada para la red de la figura 1.21 es aquella que cumple con la recomendación G.655 de la ITU-T, pues ha sido optimizada para las aplicaciones basadas en multiplexación de longitudes de onda [2].

Se debe tener en cuenta que el monitoreo del canal óptico depende del tipo de fibra óptica utilizada, por lo tanto en el capítulo 4 se analizan los distintos efectos sobre la red metropolitana característica variando el tipo de fibra óptica.

Finalmente, después de haber estudiado los fundamentos de la técnica WDM, los principios de QoS, las redes MAN y haber definido una arquitectura de red metropolitana WDM, a continuación se procede a estudiar fundamentos para el monitoreo del canal óptico basado en OPM, con el fin de extraer algunos criterios teóricos relacionados.

## CAPÍTULO 2.

### FUNDAMENTOS PARA EL MONITOREO DEL CANAL ÓPTICO BASADO EN OPM. (CRITERIOS TEÓRICOS)

Este capítulo es una recopilación de los fundamentos de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica como: atenuación, dispersión cromática, PMD, efectos no lineales, diafonía (crosstalk), jitter; y los fundamentos de OPM, además de realizar una descripción sobre cómo hacer un adecuado monitoreo del canal óptico basado en OPM, de donde es posible extraer algunos criterios teóricos relacionados.

Existen diferentes tipos de parámetros que describen la transmisión a través de un enlace de fibra óptica, los cuales se pueden catalogar como “parámetros que afectan la calidad de la señal óptica”. Sin embargo, es preciso aclarar que de acuerdo con la recomendación ITU-T G.697 [14], tales parámetros se clasifican en dos categorías: Degradaciones Ópticas y Parámetros de Monitoreo Óptico. Entre las degradaciones ópticas se encuentran: dispersión cromática, PMD, diafonía, atenuación, jitter, entre otros; mientras que dentro de los parámetros de monitoreo (supervisión) óptico están: longitud de onda de cada canal, relación señal a ruido óptica (OSNR), potencia por canal DWDM, potencia total en la fibra, y factor Q (estrechamente ligado a la BER).

El modelo de referencia OPM indica el camino apropiado para efectuar un correcto monitoreo del canal óptico. Además, como se trata de un monitoreo transparente (totalmente óptico) por el hecho de estar basado en OPM, es importante decir que los parámetros: OSNR, longitud de onda de cada canal, potencia por canal DWDM, y potencia total en la fibra, conciernen a las *características analógicas* de la señal óptica y no a las *digitales*, como: BER, factor Q, jitter o dispersión, las cuales no pueden ser monitoreadas usando OPM convencional [15]; sin embargo, si pueden monitorearse a través de OPM avanzado, como se menciona en el capítulo 4 de este documento.

#### 2.1. CONSIDERACIONES EN CUANTO AL DESEMPEÑO DE LOS SISTEMAS DWDM.

Los factores críticos que limitan el desempeño de los sistemas DWDM se muestran en la figura 2.1. Existen tres categorías, dentro de las cuales se encuentran divididos tales factores: *potencia*, *longitud de onda* y *tiempo*. Es importante recalcar que es posible que se originen otros factores de igual importancia debido a la combinación de dichas categorías [13].

En el eje de la potencia se pueden encontrar elementos como: potencia del láser, atenuación de la fibra, y pérdidas de los componentes; en el eje de la longitud de onda se localizan elementos como: estabilidad espectral, rango espectral de los EDFA, longitud de onda central y BW; y en el eje del tiempo se tienen elementos como: dispersión de la fibra, jitter de la señal y tasa de transmisión de datos. En la intersección entre el eje de la potencia y el de la longitud de onda se encuentran: Emisión Espontánea Amplificada (ASE, *Amplified Spontaneous Emission*) del EDFA, ganancia de los EDFA, la interferencia entre canales (diafonía) y FWM; en la esquina entre el eje de la longitud de onda y el del tiempo aparecen: inestabilidad del láser,

dispersión cromática, estabilidad de la frecuencia óptica y ruido de fase por la modulación; por último, en la intersección entre el eje del tiempo y el de la potencia se encuentran: profundidad de la modulación del láser, falta de linealidad de la fibra y de los componentes, Ruido de Intensidad Relativa (RIN, *Relative Intensitive Noise*) y BER [13].

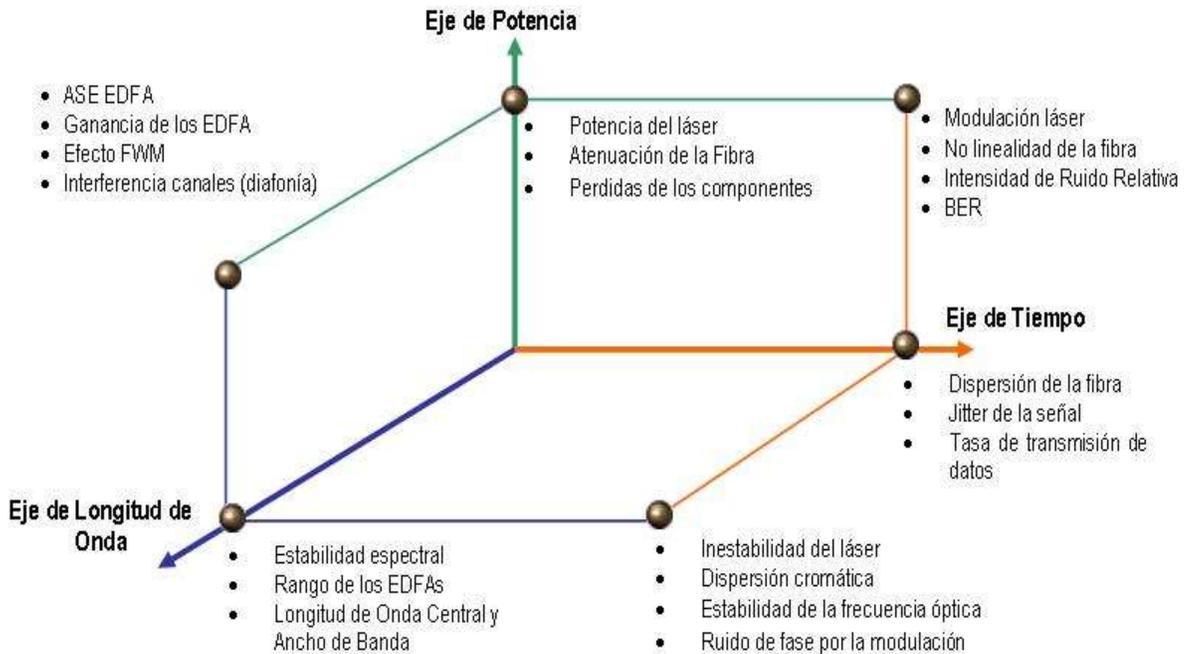


Figura 2.1. Dimensionamiento de Factores Críticos en Sistemas DWDM [2].

## 2.2. MONITOREO DE REDES ÓPTICAS INTELIGENTES Y TRANSPARENTES

Es importante destacar el artículo [15] que se enfoca en el diseño y la implementación experimental de un mecanismo de diálogo entre el plano de transporte y el plano de gestión óptico de una red IP/WDM transparente para intercambiar información relevante con el fin de asegurar QoS de los servicios transportados (longitudes de onda ópticas o canales ópticos establecidos en la red), utilizando el modelo de referencia OPM.

El monitoreo de desempeño de las redes juega un papel esencial en la futura evolución y en el despliegue de la industria óptica, ya que una de las claves del éxito de las redes de nueva generación será asegurar QoS, puesto que dichas redes serán capaces de ofrecer servicios ópticos dinámicos y diferenciados [15].

El Protocolo de Gestión de Red Simple (SNMP, *Simple Network Management Protocol*) desde el punto de vista de protocolos de información de gestión, ha sido la referencia industrial para gestión de redes desde finales de los 80's, y existen agentes SNMP instalados en casi todos los sistemas para proporcionar acceso remoto a sus componentes, lo cual convierte a SNMP en un *estándar de facto* para gestión de hardware en la red; por otra parte, GMPLS, desde el punto de vista de protocolos para redes IP/WDM, está llamado a ser una parte integral del futuro Internet óptico, fundamentalmente como plano de control de las Redes Ópticas de Conmutación Automática (ASON, *Automatic Switched Optical Networks*), debido a que otorga inteligencia a dicha redes [15].

### 2.2.1 Modelo de Referencia y Parámetros de Monitoreo

En la actualidad no existen estándares para OPM ni para la medida de la calidad de los servicios ópticos, aunque el Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la Unión Internacional de las Telecomunicaciones (ITU-T) ha elaborado una recomendación al respecto [14]. Por eso, en la literatura sólo se pueden encontrar sugerencias sobre OPM, como por ejemplo las descritas en [16], [17].

En la capa WDM, los parámetros más importantes son: la longitud de onda de cada canal, la potencia por canal DWDM, la potencia total en la fibra, la OSNR, y las desviaciones de dichos parámetros [15].

En [15] se considera que un servicio óptico contiene los siguientes parámetros de QoS:

- Retardos de establecimiento y liberación del canal [17], los cuales pueden ser monitoreados directamente en el gestor de la red (figura 2.2).
- Buen desempeño del canal que contiene el servicio<sup>4</sup>.
- Estado de los subsistemas y componentes como transmisores, receptores, conmutadores ópticos, filtros o amplificadores, que pueden sufrir desperfectos y causar degradaciones en los servicios ópticos.

Cabe resaltar que otros parámetros importantes para la QoS son la degradación de la BER y el retardo en la restauración del servicio en caso de fallas [17].

Según [15], *“Para localizar e identificar las causas de un fallo o degradación de un servicio se necesita ubicar varios puntos de monitoreo en la red óptica, en lugares bien elegidos, por ejemplo a la entrada y a la salida de cada nodo”*.

Dentro de una red óptica, las fallas pueden clasificarse como [15]:

- *Fallas de los nodos ópticos*: los deterioros más importantes pueden tener lugar en el plano de control (fallas en los Controladores de Conexión Óptica (OCCs, *Optical Connection Controllers*) basados en GMPLS [18], [19]), y en el plano de transporte (subsistemas y componentes ópticos).
- *Fallas de los enlaces ópticos*: pueden sufrir degradaciones causadas por un corte o una atenuación alta en la fibra, en sus conexiones, o por un fallo en la cadena de amplificación óptica, además de efectos de dispersión y/o efectos no lineales que se pueden presentar en la fibra.

Con el fin de realizar el monitoreo de los componentes de la red a través de OPM, la ubicación de los puntos de monitoreo se divide entre el Controlador de Nodo (NC, *Network Controller*) (figura 2.2), el monitor de transporte y el agente del plano de gestión (situado tanto en el OCC como en el OADM, como se indica en la figura 2.2). En [15] se consideran las fallas del plano de transporte, con lo cual no se describe el agente de gestión OCC, cuya arquitectura y funcionamiento experimental se describen de forma extensa en [18] - [20].

---

<sup>4</sup> Se considera redes de conmutación de longitudes de onda en que cada canal transporta un único servicio óptico.

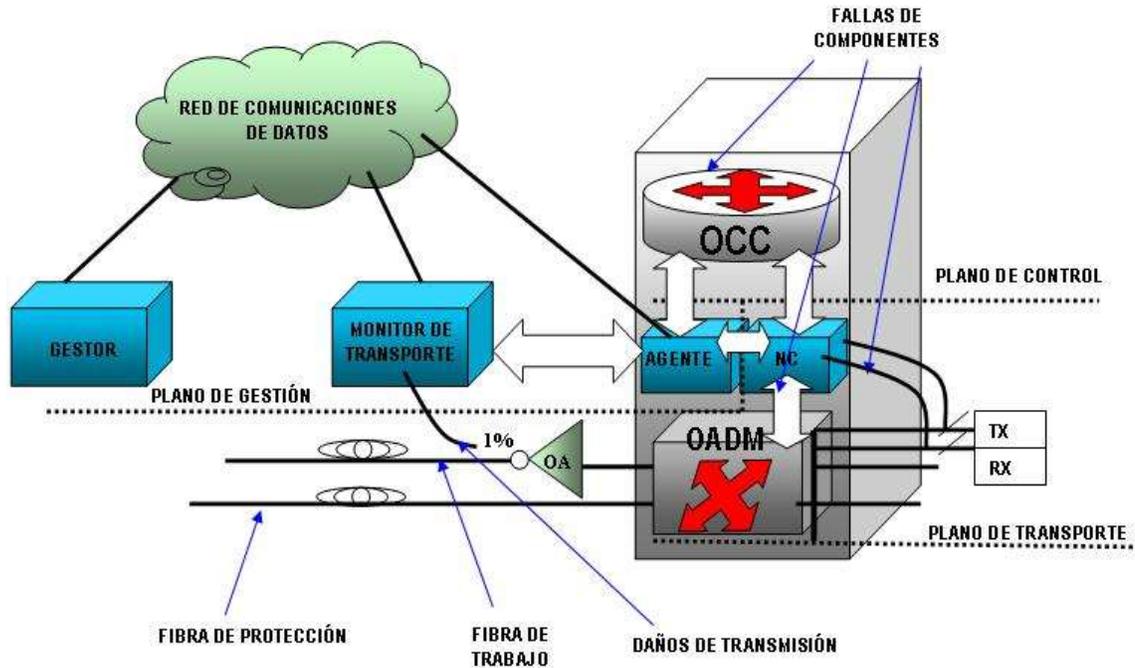


Figura 2.2. Monitoreo Óptico en Nodos IP/WDM [15].

### 2.2.2 Plano de Transporte

El plano de transporte es una Red de Transporte Óptica (OTN, *Optical Transport Network*) transparente al formato, protocolo y velocidad de transmisión de datos de las señales clientes, que permite el suministro de canales ópticos tanto unidireccionales como bidireccionales [7]. OPM utiliza el plano de transporte como fuente principal de información para detectar de manera totalmente transparente el estado de las conexiones y sus prestaciones [15].

Finalmente, es pertinente aclarar que el objetivo de este trabajo de grado es trabajar con el plano de transporte, en concordancia con OPM, y no con los planos de control y de gestión.

### 2.3 DEGRADACIONES ÓPTICAS Y PARÁMETROS DE MONITOREO ÓPTICO

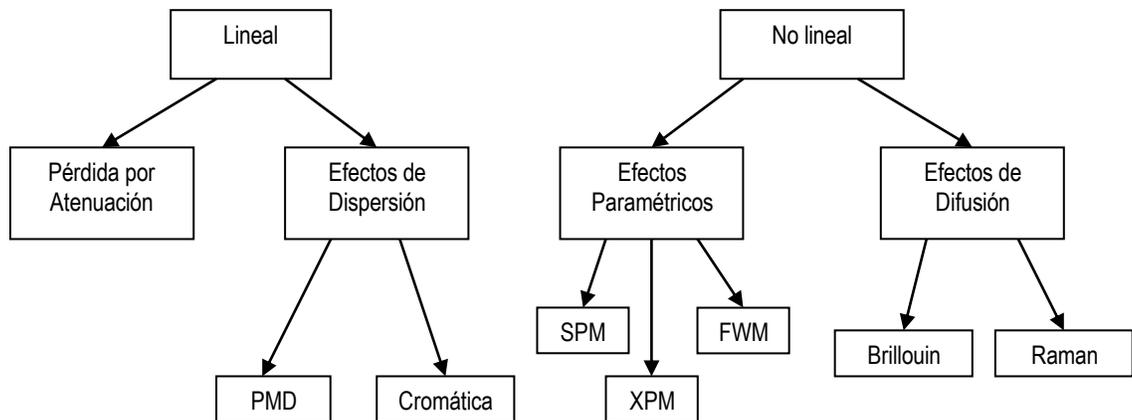
Los tres efectos importantes que se presentan en la fibra óptica, que afectan la transmisión de las señales limitando su desempeño, y que se consideran como algunos de los parámetros que degradan la calidad de la señal óptica, son [13]:

- *Atenuación*: pérdida de la potencia de la luz o decaimiento de la fuerza de la señal, a medida que la señal se propaga a través de la fibra.
- *Dispersión*: ensanchamiento de los pulsos de luz a medida que viajan por la fibra.
- *Efectos no lineales*: efectos acumulativos producto de la interacción de la luz con el material por el cual ésta viaja, resultando en cambios en la onda de luz e interacciones entre ondas de luz.

Cada uno de estos efectos tiene varias causas, y no todas afectan a DWDM. Más adelante se discuten aquellas causas relevantes para DWDM.

Como se aprecia en la figura 2.3 las fuentes de deterioro de la calidad de transmisión en DWDM se agrupan en dos categorías:

- *Lineal*. Aquí se encuentran la pérdida por atenuación y los efectos de dispersión (cromática y PMD).
- *No Lineal*. Aquí se destacan los efectos paramétricos entre los cuales están: Automodulación de Fase (SPM, *Self Phase Modulation*), Modulación de Fase Cruzada (XPM, *Cross Phase Modulation*), y FWM; y los Efectos de difusión que son: Difusión Estimulada de Brillouin (SBS, *Stimulated Brillouin Scattering*), y Difusión Estimulada de Raman (SRS, *Stimulated Raman Scattering*).



**Figura 2.3. Fuentes de deterioro de la calidad de transmisión en DWDM.**

[Fuente: Rec. ITU-T O.201].

En síntesis, este trabajo de grado hace énfasis en las degradaciones ópticas y los parámetros de monitoreo óptico que se muestran en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1. Degradaciones Ópticas y Parámetros de Monitoreo Óptico [14].**

DEGRADACIONES ÓPTICAS	PARÁMETROS DE MONITOREO ÓPTICO
1. Dispersión Cromática.	1. Longitud de onda de cada canal.
2. PMD.	2. BER (factor Q).
3. Atenuación.	3. OSNR.
4. Diafonía <sup>5</sup> .	4. Potencia por canal DWDM.

La tabla 2.1 muestra el orden de prioridad de las degradaciones ópticas (a excepción de la diafonía) y el orden de prioridad de los parámetros de monitoreo óptico. Para las degradaciones, si se presenta cualquier tipo de dispersión, se produce Interferencia entre Símbolos (ISI, *InterSymbol Interference*) y finalmente la

<sup>5</sup> Toda la información sobre la Diafonía Óptica y el Jitter se encuentra en los Anexos (Parte A: Degradaciones Ópticas).

atenuación es el reflejo de las degradaciones sufridas a lo largo de la transmisión. Paralelamente es posible que se produzca diafonía (interferencia entre canales) debido a la posible variación de las frecuencias centrales y a la multiplexación y demultiplexación anómala. Por otra parte, para los parámetros de monitoreo óptico, la longitud de onda de cada canal es indispensable ya que sin ella no sería posible transportar información. Una vez haya sido asignada una longitud de onda, la BER (factor Q) junto con la OSNR se convierten en parámetros importantes que brindan información relevante en cuanto a la calidad de la señal óptica (desempeño del sistema), y finalmente la potencia por canal DWDM se constituye en un parámetro de monitoreo relevante para obtener información adicional del canal.

A continuación se hará una descripción sobre las degradaciones ópticas, que en mayor grado afectan la calidad de la transmisión de las señales en los sistemas DWDM, y que están directamente relacionados con la fibra y los componentes ópticos.

### 2.3.1 Efectos Lineales

#### 2.3.1.1 Atenuación

La atenuación en las fibras ópticas es un efecto lineal que se origina por factores intrínsecos, principalmente dispersión y absorción, y por factores extrínsecos que incluyen defectos en el proceso de fabricación, el entorno y doblamiento físico. La forma más común de dispersión (dispersión de Rayleigh) se produce por pequeñas variaciones en la densidad del vidrio a medida que se enfría. Estas variaciones son más pequeñas que las longitudes de onda usadas, y por consiguiente actúan como objetos de dispersión, como se aprecia en la figura 2.4. La dispersión afecta en mayor grado a longitudes de onda cortas (de valor numérico pequeño) y limita el uso de longitudes de onda por debajo de 800 nm [13].



**Figura 2.4. Dispersión de Rayleigh [13].**

La atenuación debida a la absorción, se origina por las propiedades intrínsecas del propio material, las impurezas del vidrio, y algunos defectos atómicos en el vidrio. Estas impurezas absorben la energía óptica haciendo que la potencia de la luz disminuya. Es relevante decir que la absorción intrínseca es un problema clave en las longitudes de onda largas (de valor numérico grande) y se incrementa dramáticamente por encima de 1700 nm. Sin embargo, la absorción debida a los picos de agua introducidos en el proceso de fabricación está eliminándose en algunos nuevos tipos de fibra [13].

Los factores principales que afectan la atenuación en fibras ópticas son: la longitud de la fibra y la longitud de onda de la luz. En la figura 2.5 se muestra la pérdida en dB/Km en función de la longitud de onda.

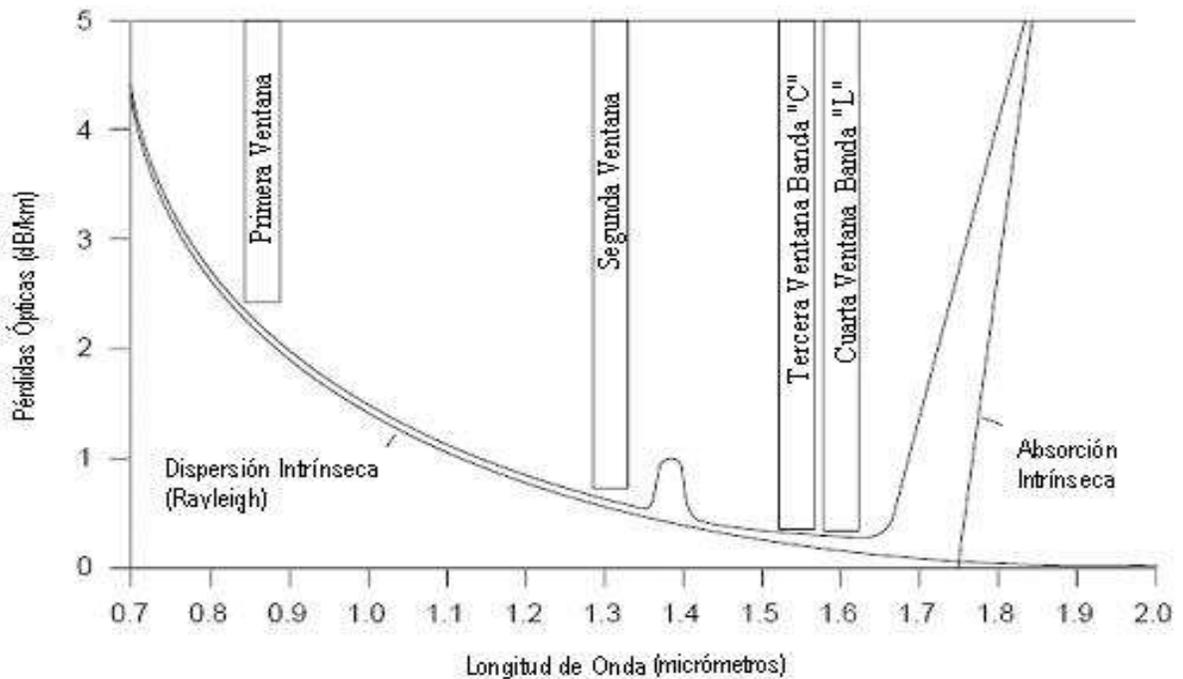


Figura 2.5. Curva Total de Atenuación [13].

La atenuación en fibra se compensa principalmente con el uso de amplificadores ópticos. Por tanto es importante hacer un análisis para determinar la atenuación de acuerdo con las distancias determinadas para los enlaces y con ellos disponer del equipo necesario para garantizar el correcto desempeño del sistema [2].

Dicho análisis permite la previsión de las pérdidas del enlace y con ellas determinar la potencia óptica requerida, que es una parte crítica y necesaria en la planificación de una red. Los fabricantes deben suministrar pautas, o reglas de ingeniería, a emplear para sus equipos. En general, hay muchos factores que pueden causar pérdidas de señal óptica. El más obvio es la longitud de la propia fibra, el cual acostumbra a ser el factor más importante en el transporte a larga distancia. En las redes MAN, el número de nodos de acceso, tales como OADM es generalmente el factor que más contribuye a las pérdidas ópticas [2].

La clave para un cálculo preciso de la previsión (presupuesto) de la potencia óptica es conseguir una medida exacta en la fibra utilizando un Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo (OTDR, *Optical Time Domain Reflectometer*). Este es un equipo de prueba que permite obtener información importante sobre un tramo de fibra (tal como la medida de la longitud de la fibra y la atenuación del enlace), así como la atenuación de cada una de las secciones que conforman todo el tramo, características de atenuación de la propia fibra, ubicación de los conectores, empalmes y fallos en el cable [2].

El objetivo del cálculo de la pérdida óptica es asegurar que la pérdida total no exceda el presupuesto para dicho trayecto del enlace de fibra. Típicamente se tienen unos valores de pérdidas [2]:

- *Pérdida por conector*: aproximadamente de 0.2 dB si los conectores son modernos monomodo del mismo fabricante. Si los fabricantes de los dos conectores (mitades de cada conexión) son diferentes, entonces la pérdida media es de 0.35 dB.

- *Pérdida por empalme*: alrededor de 0.1 dB.
- *Pérdida de fibra*: es de 0.25 dB/Km debido a la constante de atenuación (típicamente, pero depende del fabricante).
- *Edad de la fibra*: es de 2 dB.

Posteriormente se suman todos estos valores según los requerimientos (número de empalmes, longitud de la fibra, etc.), para luego obtener las pérdidas totales del sistema. Este valor final se compara con las presupuestadas y si están dentro de la previsión no hay problema, pero si por el contrario sobrepasa lo estimado, se deben hacer cambios sobre el diseño para compensar el margen excedido. Esto puede incluir la adición de un amplificador o reducir el número de elementos que están introduciendo pérdidas en el tramo [2].

Además hay que anotar que los amplificadores ópticos amplifican tanto la señal como el ruido. Así la relación señal a ruido puede llegar a ser tan baja que la señal no puede ser detectada en el extremo receptor; por lo que para resolver este inconveniente se deben usar regeneradores que realicen funciones 3R [2].

### 2.3.1.2 Dispersión

Uno de los deterioros o daños físicos más importantes en la transmisión de información sobre la fibra es la dispersión [10]. Según muestra la figura 2.6, la dispersión es un efecto que produce distorsión en la señal, debido a que ensancha el pulso de luz mientras viaja a través de la fibra, mezclándose dentro de pulsos adyacentes, haciendo difícil la recuperación de la señal en su destino, y además limitando el BW disponible en la fibra. Los sistemas DWDM son afectados por dos tipos generales de dispersión: *Dispersión Cromática* y *Dispersión por Modo de Polarización (PMD)* [10], [13].

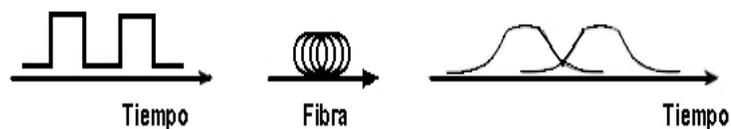


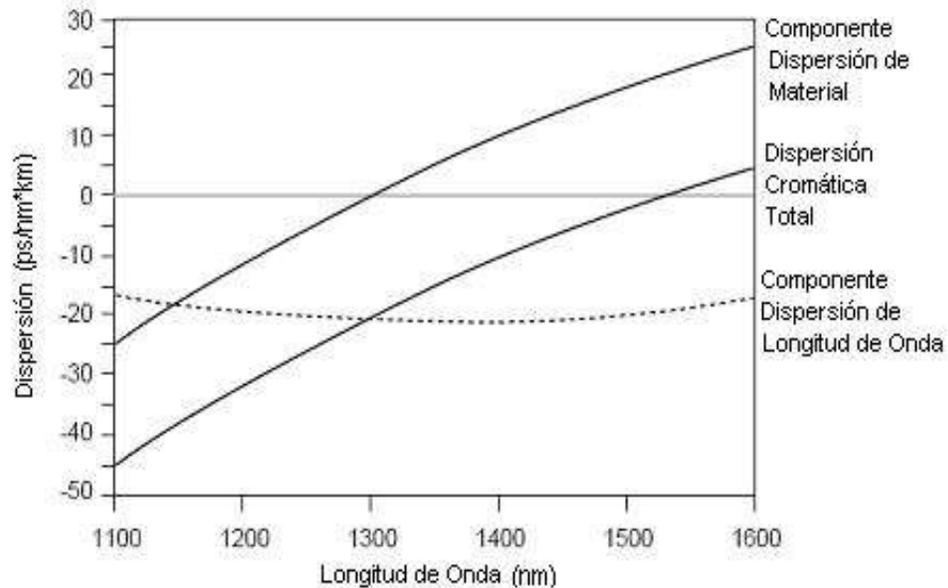
Figura 2.6. Principio de Dispersión [13].

#### 2.3.1.2.1 Dispersión cromática

Es un efecto determinístico por naturaleza y que puede compensarse fácilmente en los enlaces ópticos, especialmente en sistemas lineales [10]. Se produce cuando las distintas longitudes de onda se propagan a diferentes velocidades, y se incrementa con el cuadrado de la velocidad de transmisión de datos. En la fibra monomodo, la dispersión cromática está formada por dos componentes correspondientes a: *dispersión material*, que ocurre cuando las longitudes de onda viajan a diferentes velocidades a través del material, y *dispersión de guía de onda*, que es consecuencia de los diferentes índices de refracción del núcleo y el revestimiento de la fibra, lo cual resulta en un retardo de propagación en una o más de las longitudes de onda en relación con las demás. Por tanto, se puede deducir que la dispersión varía como función de la longitud de onda para un material dado [13]. Además, a medida que la longitud del enlace y la velocidad de transmisión de datos aumentan, los efectos de la dispersión cromática también se incrementan.

Es importante tener en cuenta que la dispersión cromática no está influenciada significativamente por el decremento en el espaciamiento de los canales o el incremento en el número de canales [2].

En la figura 2.7, se encuentra la dispersión cromática total, junto con sus componentes, en función de la longitud de onda para una fibra óptica tipo DSF. Para una fibra óptica tipo NDSF, la longitud de onda de dispersión cero es 1310 nm [13].



**Figura 2.7. Dispersión Cromática [13].**

Aunque la dispersión cromática no es generalmente un problema en velocidades inferiores a 2.5 Gbps (OC-48), esta se incrementa con velocidades de transmisión de datos más altas debido al ancho espectral requerido. Los nuevos diseños de fibra buscan disminuir en gran parte los efectos de este fenómeno, pero se pueden mitigar haciendo uso de compensadores de dispersión, dispositivos conocidos como Módulos de Compensación de Dispersión (DCM), aunque se debe evitar el uso de estos componentes debido a su elevado costo [2], [13].

Por otra parte, la dispersión cromática residual es la dispersión cromática que queda después de la transmisión por un tramo de fibra óptica, con o sin compensación de la dispersión cromática. Aunque compensar la dispersión cromática acumulada en un solo canal es relativamente fácil, compensarla en toda la banda de canales de un sistema DWDM es más difícil. Además, es preciso decir que en una red óptica transparente, la dispersión cromática residual se acumulará de un nodo al siguiente, mientras que en una red de conexión cruzada óptica, la menor dispersión cromática residual minimiza la acumulación de la dispersión cromática, permitiendo así redes transparentes más grandes con un menor costo total de los sistemas [2].

Finalmente, resulta interesante analizar los resultados de [22], en donde se muestra que la región óptima de dispersión cromática de una fibra de transmisión con el fin de mejorar el desempeño de la transmisión DWDM varía con el tipo de línea de transmisión, según el modelo propuesto; además, se muestra que el tipo de línea de transmisión que tiene una mayor resistencia a los cambios en las características de compensación de la pendiente de dispersión, es una línea híbrida, en contraste con una línea de transmisión de una sola fibra con un DCM.

#### 2.3.1.2.2 Dispersión por modo de polarización (PMD)

Al contrario de la dispersión cromática, la dispersión por modo de polarización es un efecto probabilístico (impredecible), variable con el tiempo y sus efectos no son uniformes, que puede modelarse estadísticamente pero que en la práctica es más difícil de compensar, resultando una tarea dispendiosa [2], [10].

La mayoría de las fibras monomodo soportan dos modos de polarización perpendicular, uno vertical y otro horizontal. Debido a que los estados de polarización no se mantienen, hay una interacción entre los pulsos y como consecuencia un ensanchamiento de la señal [13].

La dispersión por modo de polarización es causada por la forma ovalada de la fibra como resultado del proceso de fabricación o de tensiones externas. Debido a que las tensiones pueden variar con el tiempo, la PMD, a diferencia de la dispersión cromática, puede variar con el tiempo. La PMD se ha convertido en un problema con el surgimiento de velocidades de transmisión de datos más altas, generalmente a velocidades mayores de 10 Gbps [13].

Los dos modos principales de una fibra asimétrica que es uniforme a lo largo de su longitud, se muestran en la figura 2.8. El modo en el eje Y es arbitrariamente etiquetado como un modo rápido, mientras que en el eje X es etiquetado como un modo lento. La diferencia en los tiempos de llegada en los modos de dispersión por polarización, se mide en picosegundos (ps). Si no es propiamente controlada, la PMD puede producir gran cantidad de errores en los bits para la transmisión, en sistemas digitales que pueden distorsionar señales de video transmitidas usando formato de modulación de amplitud analógico [23].



**Figura 2.8. PMD en Fibra Monomodo cuya Asimetría es Uniforme a lo largo de su Longitud [23].**

Por último se debe destacar que la PMD afecta el desempeño del sistema en las transmisiones de alta velocidad (por encima de los 10 Gbps), y habitualmente puede mitigarse al no exceder una determinada máxima longitud de fibra que asegure la compensación de dicha PMD [10]. Además, se debe tener en cuenta que cuando la señal óptica, ensanchada por efectos de la modulación, se propaga a través del enlace de fibra teniendo una PMD no despreciable, cada componente espectral podría tener un estado de polarización distinto al final de la fibra debido a los efectos de la PMD [24].

### 2.3.2. Efectos No Lineales

La no linealidad en la fibra óptica tiene efectos similares a los de los sistemas físicos no lineales, ya sean mecánicos o electrónicos. Esto causa la generación de frecuencias espúreas y de nuevas frecuencias resultado de la suma o diferencia entre ellas. Estas señales adicionales causan efectos de pérdidas inesperadas en redes de comunicación óptica [2].

La no linealidad no es un defecto de diseño o fabricación de la fibra óptica; es una característica inherente que presenta cualquier señal electromagnética cuando atraviesa un medio físico. Preocupa especialmente a los diseñadores y usuarios de sistemas de comunicación con fibra óptica, debido a la alta coherencia de la potencia del láser utilizado. La intensidad del campo eléctrico necesario para un nivel dado de potencia transmitido, se incrementa con el nivel de coherencia en la señal. De esta manera, aún niveles moderados de potencia en sistemas DWDM altamente coherentes, llevan a niveles eléctricos suficientes para producir efectos no lineales. Los efectos no lineales tienden a manifestarse cuando la potencia óptica es muy alta, como la requerida en sistemas DWDM de largas distancias, según lo indica la figura 2.9 [2],

[13]. Además, cuando la velocidad de transmisión de datos supera los 10 Gbps, los efectos no lineales empiezan a manifestarse con mayor intensidad.



Figura 2.9. Efectos No lineales a altos Niveles de Potencia [2].

Los efectos lineales tales como la atenuación y la dispersión pueden compensarse, pero los efectos no lineales son acumulativos y adicionalmente limitan la cantidad de datos que pueden ser transmitidos por fibra óptica (capacidad). Los tipos más importantes de efectos no lineales son: Automodulación de Fase (SPM), Modulación de Fase Cruzada (XPM), FWM, Difusión Estimulada de Brillouin (SBS) y Difusión Estimulada de Raman (SRS). Se debe tener en cuenta en cuenta que en sistemas DWDM, la FWM es la más crítica [2], [13]. Es importante decir que además los efectos no lineales se relacionan con la velocidad de transmisión de datos en el hecho de que a velocidades superiores a 10 Gbps, dichos efectos empiezan a manifestarse.

A continuación se hará una descripción sobre los parámetros de monitoreo óptico más relevantes en las redes WDM.

### 2.3.3. Tasa de Error de Bit (BER)

Este parámetro de transmisión es definido como la relación existente entre el número de bits que llegan errados al receptor y el número total de bits transmitidos, medido sobre un periodo característico de tiempo.

Además, es un parámetro esencial que determina la calidad de la señal. Mide el número de errores de bit de una trama independientemente del origen del error debido a que recoge todos los deterioros o daños a lo largo del trayecto (falta de nivel de señal, baja OSNR, distorsiones, entre otros). Por esta razón, midiendo sólo este parámetro y buscando la forma de conservarlo por debajo de los límites de decodificación correcta, se asegura la calidad de la señal recibida. Sin embargo, en un dominio transparente, la BER debe medirse exclusivamente en la frontera de recepción; por tanto, desde el punto de vista de enlace, la BER no se puede medir sino tan sólo estimar, por ejemplo, a través de la OSNR [21].

Es la medida que realmente evalúa la calidad de la señal y que determina si es suficiente como para ser reproducida por el receptor. Para ciertos protocolos, se exige una gran calidad (BER de hasta  $10^{-12}$ ) dependiendo de las aplicaciones específicas demandadas y de las características propias de cada protocolo [33].

Independientemente del medio de transmisión, que puede incluir la ionosfera, la troposfera, el espacio libre o simplemente una línea de transmisión como la fibra óptica, que en condiciones normales tiene una tasa de errores de  $10^{-11}$ , se introducen efectos como la atenuación y la distorsión, así como las señales de ruido

generadas en el medio y en los equipos de transmisión y recepción. En otras palabras, se puede pensar que el medio de transmisión es la principal fuente de errores en un sistema de comunicaciones. Por consiguiente, el principal problema de las comunicaciones es aumentar la efectividad de la transmisión a través del medio [34].

El desempeño de un sistema de comunicaciones digital es medido en términos de la BER. En general, este parámetro depende del método de modulación, del esquema de codificación, del tipo de onda usado, de la potencia del transmisor, de las características del medio y del esquema de demodulación [34].

Se debe tener en cuenta que el desempeño de un sistema digital en un canal lineal perturbado por ruido muestra la BER frente a  $E_b/N_0$ , donde  $E_b$  representa la energía por bit y  $N_0$  la densidad espectral de potencia del ruido introducido en el canal. Además, la BER se puede reducir incrementando la energía asociada a cada bit, transmitiendo con mayor potencia o con un mayor periodo de bit, para un nivel de ruido dado. La finalidad de las comunicaciones digitales es obtener un determinado valor de BER con el menor valor de energía por bit posible [34].

El comportamiento de la BER frente a la relación señal a ruido es otra posible representación del desempeño. Esta representación da la sensibilidad del sistema; además, la sensibilidad puede ser mejorada incrementando el periodo de bit, a diferencia de la eficiencia que es independiente de dicho valor [34].

#### 2.3.4. Relación entre BER y Factor Q

El factor Q es usado como una figura de merito intuitiva que esta directamente ligada a la BER. De esta manera, la BER puede mejorarse ya sea incrementando la diferencia entre el niveles de señal alto y bajo, o decrementando los niveles de ruido. Además, el factor Q permite realizar un análisis del desempeño del sistema. Se debe tener en cuenta que la BER es la medida más directa del desempeño de un sistema, pero el cálculo de la BER requiere una evaluación de la integral de distribución normal acumulativa. Debido a que dicha integral no tiene una forma directa de solución, su evaluación requiere del uso de tablas tabuladas o de integración numérica. Por lo anterior, existe un método mucho más simple para analizar el desempeño de un sistema, que se trata de optimizar el factor Q, sabiendo que eso reflejara el resultado de una BER optimizada [29].

Por último, es importante recalcar que en el capítulo 4 de este documento se hace una profundización sobre los anteriores dos parámetros de monitoreo (BER, factor Q), incluyendo el estudio del diagrama del ojo.

#### 2.3.5. Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR)

Se refiere a la Relación Señal a Ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*) para el caso de las comunicaciones ópticas. Es la relación de la señal óptica total al ruido total, la cual muestra que tan grande es el nivel de la señal óptica con respecto al nivel de ruido; es decir, es una medida de la calidad de la señal óptica<sup>6</sup>.

La OSNR es un término de ingeniería para la relación de potencias entre una señal óptica, que transporta la información, y el ruido de fondo:

---

<sup>6</sup> Tomado de: <http://www.fiber-optics.info/glossary-s.htm>

$$OSNR = \frac{S_o}{N_o} = \frac{P_{señal}}{P_{ruido}} = \left( \frac{A_{señal}}{A_{ruido}} \right)^2 \quad (2.1)$$

donde:  $P$  es la potencia promedio y  $A$  es la amplitud RMS (valor cuadrático medio). Tanto la potencia de señal óptica ( $S_o$ ) como la potencia de ruido óptica ( $N_o$ ) se miden dentro del BW del sistema.

Debido a que muchas señales tienen un amplio rango dinámico, la OSNR se expresa usualmente en términos logarítmicos, mediante decibeles (dB). De esta manera, la OSNR en decibeles (OSNR (dB)) es 10 veces el logaritmo de la relación de potencias entre la señal óptica y el ruido, y 20 veces el logaritmo de la relación de amplitudes entre la señal óptica y el ruido:

$$OSNR(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{S_o}{N_o} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{A_{señal}}{A_{ruido}} \right) \quad (2.2)$$

Es importante resaltar que en un sistema de comunicación óptica, la OSNR medida en el receptor corresponde a una lectura directa sobre el desempeño de dicho sistema.

Desde el punto de vista del diseño de sistemas ópticos, el ruido de los amplificadores es un gran problema. Aquí la figura de mérito es la OSNR como requisito del sistema. Debido a que la OSNR es una relación de potencias, entonces a pesar de que tanto la señal como el ruido se amplifican simultáneamente, la OSNR del sistema aún informa sobre la calidad de la señal, calculando dicha relación. Por lo anterior, el diseño de sistemas basados en este parámetro, se constituye en una herramienta imprescindible. Además, la responsabilidad del diseñador del sistema es maximizar la OSNR seleccionando fuentes y amplificadores de bajo ruido. Finalmente, teniendo en cuenta que el ruido no se puede eliminar completamente, el receptor debe funcionar de forma efectiva aún cuando se presenten niveles significativos de ruido en el sistema [25], [26].

Se debe tener presente que la OSNR no está limitada a las redes basadas en amplificadores ópticos. Otros dispositivos pasivos y activos pueden agregar ruido y crear un problema de diseño de sistema limitado por la OSNR. De esta manera, es necesario aclarar que los dispositivos activos como los láser y los amplificadores añaden ruido, mientras que los dispositivos pasivos como la fibra óptica y los conectores pueden adicionar componentes de ruido. Además, la fuente predominante para la degradación de la OSNR es el ruido de los amplificadores ópticos; pero eso no significa que otras fuentes no sean importantes [25].

A continuación se muestra en las figuras 2.10 y 2.11 el efecto del ruido sobre la señal a medida que la señal y el ruido atraviesan los amplificadores ópticos [25], teniendo en cuenta que el ruido es aleatorio por naturaleza, relativamente de banda ancha, es en sí mismo la presencia de ruido ASE, que se origina dentro del proceso de amplificación y que se acumula en cada etapa de amplificación [27].

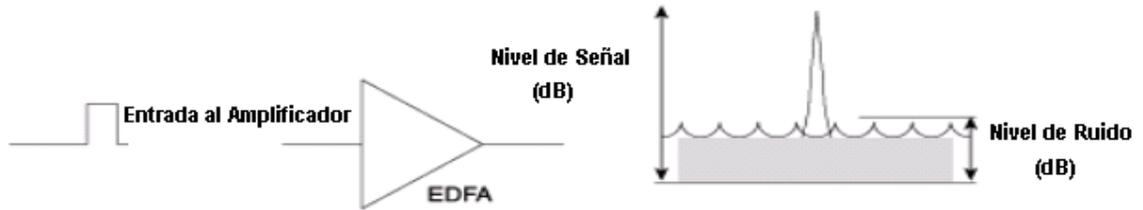


Figura 2.10. Ruido asociado con Señal (Una sola Etapa de Amplificación) [25].

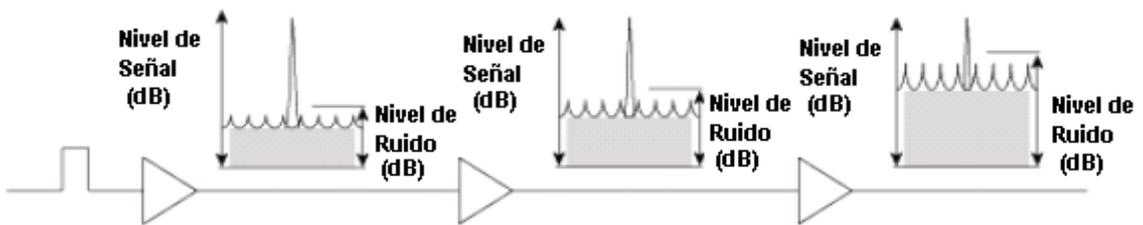


Figura 2.11. Acumulación de Ruido debido a la Amplificación Multietapa [25].

En la figura 2.12 se muestra un mapeo de la OSNR, indicando el nivel de la señal óptica y el nivel de ruido a medida que la señal cruza cada etapa de amplificación.

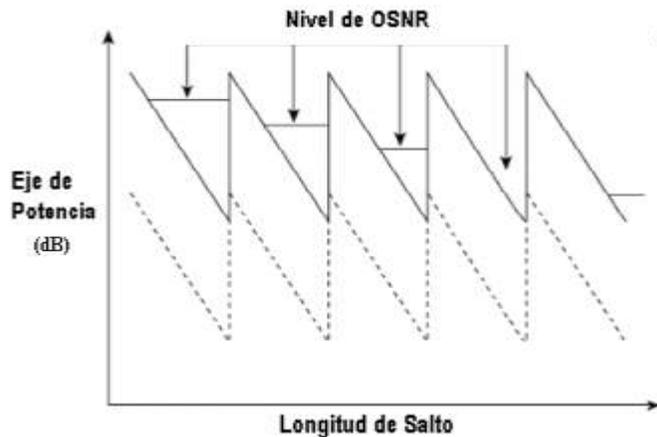


Figura 2.12. Niveles de OSNR en Términos de los Niveles de Potencia de Señal y Ruido para una Transmisión WDM Multietapa [28].

Por último, es importante decir que el ruido proveniente de la ASE es un daño o deterioro dominante a cualquier velocidad de transmisión de datos, el cual no se puede compensar. Además, el ruido ASE se puede estimar o medir por medio de los valores de la OSNR y/o a través de niveles individuales de potencia de señales y ruido en sistemas WDM [10].

### 2.3.5.1. Potencia de señal óptica [29]

Para calcular la potencia de la señal óptica ( $S_o$ ) se usa notación vectorial electromagnética. De ésta manera,  $S_o$  se define como la magnitud del producto cruz vectorial entre los campos eléctrico y magnético, que se puede escribir y simplificar de la siguiente forma<sup>7</sup>:

$$S_o(t) = |\mathbf{E}(t) \times \mathbf{H}(t)| = |\mathbf{E}(t)| \frac{|\bar{\mathbf{E}}(t)|}{\eta} = \frac{|\bar{\mathbf{E}}(t)|^2}{\eta} \rightarrow S_o = \frac{|\mathbf{E}|^2}{\eta} \quad (2.3)$$

donde: la notación  $|X|$  representa la magnitud del vector  $X$ , y

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}} \quad (2.4)$$

es la impedancia de la fibra óptica:  $\mu$  = permeabilidad.  $\varepsilon$  = permitividad.

$\mu_0 = 1.257 \mu\text{H/m}$  (permeabilidad del vacío)

$\varepsilon_0 = 8.854 \text{ pF/m}$  (permitividad del vacío)

$\mu_r$  = permeabilidad relativa (depende del medio)

$\varepsilon_r$  = permitividad relativa (depende del medio)

### 2.3.5.2. Potencia de ruido óptica [29]

El ruido se puede definir como cualquier “señal” aleatoria (significa que el valor de la amplitud de ruido es impredecible), interferente o indeseada distinta a la que se espera. Aquí se tiene en cuenta que por ser el tipo más común de ruido, este es Ruido Gaussiano Blanco Aditivo (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*).

La siguiente ecuación muestra la potencia de ruido óptica:

$$N_o = \frac{1}{T} \int_0^T |\mathbf{E}_N(t)|^2 \frac{1}{\eta} dt = \sigma_o^2 \frac{1}{\eta} \quad (2.5)$$

donde:  $N_o$  es la potencia de ruido óptica,  $T$  es el período de integración,  $\mathbf{E}_N$  es el campo eléctrico asociado al ruido, y  $\sigma^2$  es la potencia promedio.

### 2.3.5.3. Cálculo de la OSNR [29]

El conocimiento sobre la OSNR es muy importante dado que está directamente relacionado con la BER en sistemas de comunicaciones digitales, y la BER es un indicador significativo de la calidad de todo el sistema.

Por lo anterior, es primordial realizar el cálculo de la OSNR, teniendo en cuenta los resultados de (2.1) y (2.5), expresándola matemáticamente como:

<sup>7</sup> En todas las ecuaciones, tanto el campo eléctrico ( $E$ ) como el campo magnético ( $H$ ) se consideran vectores.

$$OSNR = SNR_o = \frac{S_o}{N_o} = \frac{|E|^2 \frac{1}{\eta}}{\sigma_o^2 \frac{1}{\eta}} = \frac{|E|^2}{\sigma_o^2} \quad (2.6)$$

#### 2.3.5.4. Correspondencia entre la OSNR y la relación señal a ruido eléctrica [29]

En cuanto a la Relación Señal a Ruido Eléctrica (ESNR) más conocida simplemente como SNR, se puede decir que los fundamentos matemáticos están establecidos de forma análoga a la OSNR, y se expresan mediante las siguientes ecuaciones:

$$ESNR = SNR_E = \frac{S_E}{N_E} \quad (2.7)$$

donde:  $S_E$  es la Potencia de la señal eléctrica, y  $N_E$  es la potencia de ruido eléctrica.

Además, teniendo en cuenta que la potencia de una señal ( $P$ ) es igual al producto entre el voltaje ( $V$ ) y la corriente ( $I$ ) ( $P=VI$ ), y usando la ley de Ohm ( $R=V/I$ ),  $S_E$  puede expresarse de la siguiente forma:

$$S_E = \frac{V^2}{R} \quad (2.8)$$

$$S_E = I^2 R$$

donde:  $R$  es la resistencia medida en ohms ( $\Omega$ ).

De forma análoga a la potencia de ruido óptica ( $N_o$ ),  $N_E$  se puede expresar así:

$$N_E = \frac{1}{T} \int_0^T V_N^2(t) \frac{1}{R} dt = \sigma_V^2 \frac{1}{R} \quad (2.9)$$

$$N_E = \frac{1}{T} \int_0^T I_N^2(t) R dt = \sigma_I^2 R$$

donde:  $N_E$  es la potencia de ruido eléctrica,  $T$  es el período de integración,  $V_N$  es el voltaje e  $I_N$  es la corriente asociados al ruido, y  $\sigma^2$  es la potencia promedio.

Luego, retomando (2.7), la ESNR se calcula como:

$$SNR_E = \frac{S_E}{N_E} = \frac{V^2 / R}{\sigma_V^2 / R} = \frac{V^2}{\sigma_V^2} \quad (2.10)$$

$$SNR_E = \frac{S_E}{N_E} = \frac{I^2 R}{\sigma_I^2 R} = \frac{I^2}{\sigma_I^2}$$

En la práctica las potencias ópticas raramente se miden de forma directa. En lugar de ello, la potencia óptica se convierte a una corriente eléctrica proporcional usando un dispositivo como el fotodiodo Positivo-Intrínseco-Negativo (PIN, *Positive-Intrinsic-Negative*), y luego se procede a medir dicha corriente equivalente. La relación entre la corriente de salida y la potencia óptica incidente se conoce como *Responsividad* (Re), la cual tiene unidades de amperios por vatio (A/W).

Por lo anterior se deduce que:

$$Re = \frac{I_{señal}}{S_o} \quad \rightarrow \quad I_{señal} = I = S_o Re \quad (2.11)$$

$$Re = \frac{I_{ruido}}{N_o} \quad \rightarrow \quad I_{ruido} = \sigma_I = N_o Re \quad (2.12)$$

Entonces, retomando (2.10), (2.11) y (2.12), cuando se convierte la ESNR en OSNR, se obtiene:

$$\sqrt{SNR_E} = \sqrt{\frac{S_E}{N_E}} = \frac{I}{\sigma_I} = \frac{S_o Re}{N_o Re} = SNR_o \quad \rightarrow \quad OSNR = \sqrt{ESNR} \quad (2.13)$$

### 2.3.5.5. Sensitividad, OSNR y BER

La OSNR se puede decrementar mediante amplificación, conversión de ruido de fase y otros efectos, a medida que la señal se propaga a través de la fibra óptica. En un ambiente experimental, estos efectos se simulan usando una fuente de ruido ASE [26].

De hecho, el ruido óptico próximo a la longitud de onda de la señal impacta la habilidad del receptor para decodificar apropiadamente la transmisión en curso. Por otra parte, el ruido incrementa la desviación estándar de la fotocorriente para las señales "0" y "1", lo cual incrementa la BER. A medida que aumenta el nivel de ruido, se requiere de una mayor potencia recibida para mantener una constante BER. De esta manera, se define la sensitividad del receptor como la potencia de entrada requerida para una BER en particular bajo unas condiciones dadas como la OSNR y la longitud del trayecto. Ciertamente, un receptor bien diseñado puede mantener una alta sensitividad (mínima potencia requerida) en presencia de ruido. Lo anterior incrementa el presupuesto efectivo del enlace, reduciendo a la vez la complejidad y los costos de la red [26].

Una de las consecuencias de tener una baja OSNR es que sin importar que tan fuerte sea la señal que se presenta a un buen receptor, habrán errores asociados con la presencia de la ASE. El nivel exacto de la BER

para una OSNR dada depende del receptor, y de esta forma se podría determinar la OSNR mínima aceptable para alcanzar una BER estipulada. En conclusión, para mejorar la BER, sería necesario incrementar la OSNR, usar corrección de errores en recepción (FEC), y/o usar un receptor distinto [27].

Finalmente, se debe recalcar que para una red dada es importante calcular la OSNR y hacer un diseño basado en las limitaciones de la misma. Es posible compensar la OSNR, pero dicha compensación necesita las funciones 3R (óptica-eléctrica-óptica), que es muy costosa. En otras palabras, la compensación de la OSNR es casi imposible para sistemas WDM multicanal. Por lo tanto, al diseñar un enlace WDM, es pertinente considerar en primera instancia las limitaciones de la OSNR. De forma esencial, el diseño basado en la OSNR significa que la OSNR en la etapa final (en el receptor) está de acuerdo con la OSNR que se desea para lograr la BER requerida [28].

#### 2.4. MONITOREO DEL CANAL ÓPTICO

En la figura 2.13 se muestra una arquitectura general del sistema de monitoreo de redes de fibra óptica, donde se destacan los componentes que la conforman y la manera en la cual se hace un adecuado monitoreo para redes ópticas [30].

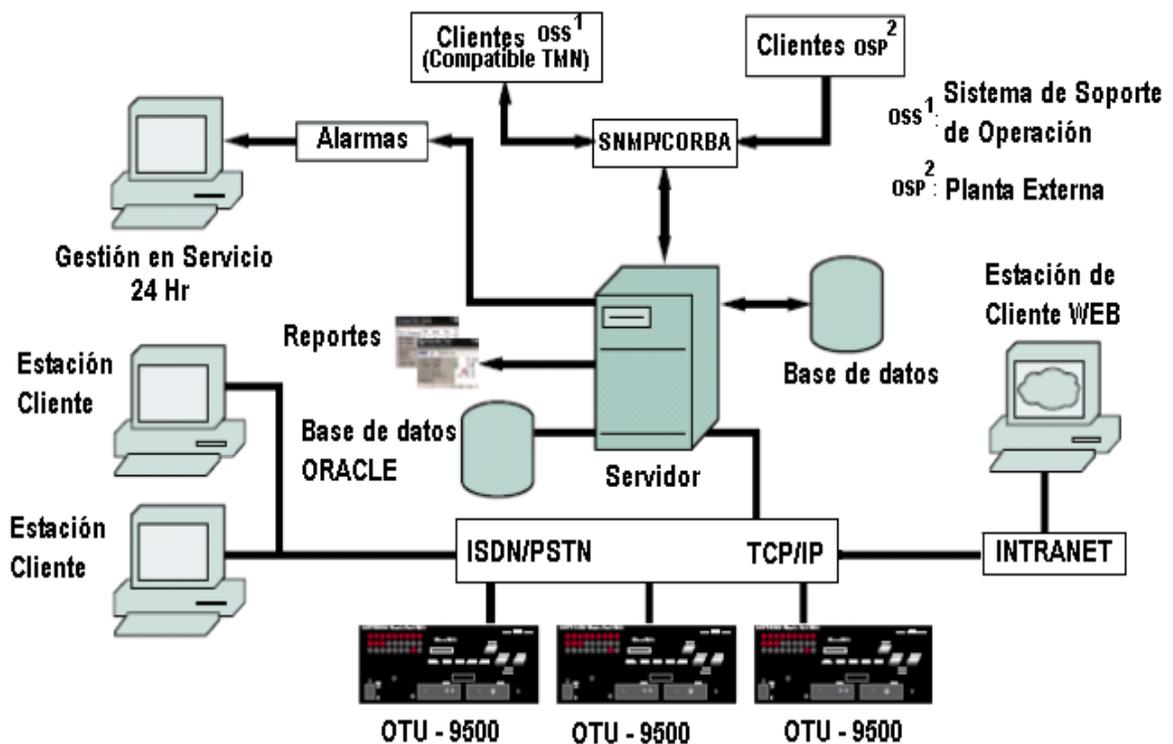


Figura 2.13. Arquitectura General del Sistema de Monitoreo para Redes de Fibra Óptica [30].

Por otra parte, existe en el mercado un sistema llamado "Sistema de Gestión de la Plataforma MetroPad®", el cual permite el monitoreo de cada uno de los canales de transmisión ópticos a través de un canal de monitoreo óptico fuera de banda, con acceso a todos los nodos del sistema. Todos los elementos activos son

gestionados por una unidad conocida como pasarela de elemento de red a través de una interfaz propietaria con las unidades activas, y SNMP con el sistema de gestión. Los algoritmos utilizados para el control de la red quedan almacenados en la unidad de procesamiento principal, que trabaja de forma redundante en el modo maestro/esclavo y se localiza en el centro de gestión. Además, la interacción con el operador es totalmente gráfica, y el sistema de gestión de la plataforma MetroPad® usa como sistema operativo Linux y como plataforma de transporte TCP/IP [31].

#### **2.4.1. Monitoreo Óptico en Sistemas DWDM [14]**

El monitoreo (supervisión) óptico es una valiosa herramienta que se puede usar en sistemas DWDM con el fin de realizar las siguientes aplicaciones:

- *Gestión de configuración*: empleada para activar sistemas y canales, agregar nuevos canales, etc.
- *Gestión de fallos*: empleada para detectar y aislar fallos.
- *Gestión de desempeño*: empleada para mantener el sistema en funcionamiento y para detectar degradaciones antes que se produzca un fallo.

Teniendo en cuenta lo anterior, cabe aclarar que dentro del desarrollo de este trabajo de grado sólo se abordará la aplicación de monitoreo óptico correspondiente a gestión de desempeño.

Es importante decir que en las redes ópticas actuales, donde la tecnología DWDM está avanzando a un ritmo veloz, aumentando continuamente los límites de alcance, la cantidad de canales y la velocidad de canal, se justifica implementar el monitoreo óptico debido a que dichas redes están evolucionando desde el contexto opaco (por ejemplo redes SONET-SDH), el cual se maneja en el dominio eléctrico y se necesita la conversión Óptica-Eléctrica-Óptica (O-E-O) de la señal óptica, al contexto transparente (por ejemplo redes totalmente ópticas), donde se trabaja en el dominio óptico sin necesidad de dicha conversión O-E-O, con excepción del terminal final a donde debe llegar la señal óptica. Dado que las redes actuales incluyen varios elementos ópticos transparentes entre los puntos de regeneración eléctricos, se hace necesario efectuar la comprobación de la calidad de desempeño en el dominio óptico para evaluar el comportamiento del canal óptico.

##### **2.4.1.1. Panorama general del monitoreo óptico [14]**

De acuerdo con [14], *“La gestión de las redes SDH existentes dependen de parámetros digitales de comprobación tales como: BER, Tasa de Segundos con Error (ESR, Errored Seconds Rate) y Tasa de Segundos con Muchos Errores (SESR, Severely Errored Seconds Rate) que se miden en la capa eléctrica (en regeneradores 3R), como se describe en la Rec. ITU-T G.826”*.

El método de la Rec. ITU-T G.826 que mide en la capa eléctrica la BER, la ESR y la SESR, no puede ser aplicado dentro de un dominio óptico transparente, donde no se dispone de regeneradores 3R para terminar la tara<sup>8</sup> de trama, a pesar de que suministre mediciones confiables de la calidad de desempeño extremo a extremo de un canal óptico; por consiguiente, dicho método no puede proporcionar la información suficiente para establecer el origen de los problemas en redes DWDM complejas.

En efecto, una óptima solución para una óptica de transporte (OTN) combina:

---

<sup>8</sup> De las 270 columnas que forman la trama STM-1, las 9 primeras forman la denominada tara o encabezado (Overhead).

- *Diseño de red* eficaz con la finalidad de limitar las fuentes de ruido y los efectos de dispersión e intermodulación.
- *Alarmas* apropiadas para los componentes ópticos activos dentro de la red con la finalidad de detectar y localizar fallas.
- *Monitoreo óptico* adecuado en toda la red con la finalidad de controlar los parámetros ópticos más críticos.

Tendiendo presente lo anterior, cabe notar que dentro del desarrollo de este trabajo de grado solamente se aborda la parte de monitoreo óptico; no obstante, considerando que tanto el diseño de red, las alarmas, y el monitoreo óptico podrían combinarse para ofrecer una óptima solución de desempeño en un contexto limitado como una red metropolitana WDM.

Es preciso decir que cuando se combinan las anteriores acciones, proporcionan una solución adecuada para la gestión de redes ópticas de transporte, ya que de manera individual no pueden garantizar una calidad óptica apropiada.

Además, se debe tener en cuenta que según [14], “*Los objetivos de la supervisión óptica son: detectar anomalías, defectos, degradaciones y fallos que afectan la calidad de la capa óptica. Los parámetros ópticos que se han de comprobar deben ser establecidos y definidos conforme a requisitos específicos*”.

La importancia del monitoreo óptico es progresiva ya que mantiene un alto grado de confiabilidad del equipo, junto con la posibilidad de localizar y reparar problemas de red, y diagnosticar eficazmente fallas y degradaciones. Asimismo, el monitoreo óptico es un proceso activo que puede ayudar a gestionar los SLA y reducir los costos operacionales, a expensas de un aumento en los costos de los equipos, tornándose más interesante a medida que aumenta la complejidad de la red. Por consiguiente, el monitoreo es un elemento fundamental en la gestión de redes ópticas.

#### 2.4.1.2. Degradaciones ópticas [14]

A continuación se clasifican y enumeran las principales degradaciones de los sistemas en la capa óptica que limitan la capacidad del sistema para transportar información. En la tabla 2.2 se muestra una lista de las principales posibles degradaciones de sistema.

**Tabla 2.2. Degradaciones Ópticas.** [Fuente: Rec. ITU-T G.697].

Variación de la Degradación	Frecuencia de Ocurrencia Relativa	Descripción
Atenuación	Elevada	
Variaciones de la Potencia del Canal Óptico debido a Variaciones de Ganancia	Elevada	
Desviación de la Frecuencia (o Longitud de Onda) del Valor Nominal	Elevada	Rec. ITU-T G.692
Dispersión por Modo de Polarización (PMD) (primer orden y órdenes superiores)	Media	Apéndice II/G.663
Mezcla de Cuatro Ondas (FWM)	Media	Apéndice II/G.663

Ruido de Emisión Espontánea Amplificada (ASE) en Amplificación Óptica	Media	Apéndice II/G.663
Dispersión Cromática	Media	Apéndice II/G.663
Pendiente de Dispersión Cromática	Media	Recs. ITU-T G.652, G.653, G.655
Reflexiones	Media	Apéndice III/G.663
Ruido de Láser	Media	
Diafonía entre Canales	Media	Sup. ITU-T 39
Diafonía Interferométrica	Media	Sup. ITU-T 39
Modulación de Fase Cruzada (XPM)	Baja	Apéndice II/G.663
Automodulación de Fase (SPM)	Baja	Apéndice II/G.663
Difusión Estimulada de Brillouin (SBS)	Baja	Apéndice II/G.650.2, Apéndice II/G.663
Difusión Estimulada de Raman (SRS)	Baja	Apéndice II/G.663

Se debe tener en cuenta que todas las anteriores degradaciones pueden ser suficientemente fuertes para producir una degradación profunda en una señal óptica hasta un nivel en que el receptor ya no puede detectar los datos con una tasa de error razonable.

Los niveles de frecuencia de ocurrencia relativa en la tabla 2.2 son:

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

Hay que tener en cuenta que un evento podría causar una penalidad de X dB en un canal óptico simple o en un sistema multicanal<sup>9</sup>.

Por último, como se mencionó anteriormente, en este trabajo de grado se abordan de forma exclusiva las siguientes degradaciones: dispersión (cromática y PMD), diafonía (entre canales e intracanal) y atenuación.

#### 2.4.1.3. Parámetros de monitoreo óptico [14]

Los parámetros ópticos que se pueden medir utilizando la tecnología actual en sistemas de transmisión óptica son:

- Longitud de onda de canal.
- Potencia de canal.
- Potencia total.
- Factor Q.
- OSNR cuando no está presente una conformación de ruido significativa.

<sup>9</sup> Un operador, teniendo en cuenta una red DWDM de 10000 Km sugiere definir un valor X de penalidad de 3 dB como el valor que corresponde a una degradación significativa.

Asimismo, como ya se dijo previamente, en este trabajo de grado sólo se tratan los siguientes parámetros de monitoreo: longitud de onda de canal, OSNR, potencia por canal DWDM, y potencia total en la fibra.

#### 2.4.1.4. Correlación entre algunas degradaciones ópticas y parámetros de monitoreo óptico

De acuerdo a la tabla 2.3, se puede concluir que todas las degradaciones ópticas señaladas, tienen una correlación directa con los parámetros de monitoreo: *potencia de canal*, *OSNR*, y *factor Q*, indicando que dichos parámetros son de especial importancia para un buen desempeño de la red, teniendo en cuenta que en este contexto, para el desarrollo de este trabajo de grado, se van a trabajar con mayor énfasis los parámetros: *OSNR* y *Factor Q (BER)*.

**Tabla 2.3. Correlación entre las Degradaciones de Elevada Frecuencia de Ocurrencia y los Parámetros de Monitoreo [14].**

PARÁMETROS / DEGRADACIONES	Potencia Total	Potencia del Canal	Longitud de Onda del Canal	OSNR	Factor Q
Variación de Atenuación	X	X		X	X
Desviación de Frecuencia (o Longitud de Onda del Valor Nominal)		X	X	X	X
Variaciones de la Potencia del Canal Óptico Debido a Variaciones de Ganancia		X		X	X

Es necesario aclarar que tanto la variación de atenuación como las variaciones de potencia del canal óptico debido a variaciones de ganancia, se encuentran todavía en estudio. Por el contrario, como se puede apreciar en la tabla 2.3, existe una correspondencia directa entre la desviación de frecuencia del valor nominal y la longitud de onda de canal ya que la exactitud de medición requerida para la longitud de onda de canal depende de la desviación de frecuencia central máxima para el canal [14].

#### 2.4.1.5. Aplicaciones del monitoreo óptico en sistemas DWDM

Para las aplicaciones del monitoreo óptico, se debe considerar una o más de las siguientes posibilidades usadas para monitorear internamente sistemas DWDM [14]:

- Potencia total a la entrada de las diversas etapas de la amplificación óptica.
- Potencia total a la salida de las diversas etapas de la amplificación óptica.
- Potencia de canal a la salida del transmisor DWDM antes del multiplexor.
- Potencia de canal a la entrada del receptor DWDM después del demultiplexor.
- Potencia de canal a la salida de las diversas etapas de la amplificación óptica.
- OSNR del canal a la salida de las diversas etapas de la amplificación óptica.
- Desviación de la longitud de onda del canal a través del trayecto óptico.

Es importante tener presente que de acuerdo a las características específicas del sistema DWDM (longitud, número de tramos, cantidad de canales, inaccesibilidad de los sitios, etc.), y a consideraciones sobre costos y

beneficios, se procede a utilizar algunas de las anteriores opciones, como por ejemplo los ítems: c), d), f), y g), porque desde un punto de vista objetivo son los más esenciales (con el fin de tener un valor de referencia antes, durante y al final de la transmisión) [14].

## **2.5 MONITOREO DE DESEMPEÑO ÓPTICO (OPM)**

### **2.5.1. Definición de OPM**

Desde comienzos de 1990, en la literatura se ha discutido acerca del monitoreo de desempeño óptico, tema que ha sido objeto de múltiples definiciones. En general, OPM se refiere al monitoreo a nivel de la capa física de la calidad de la señal, con el propósito de determinar el buen funcionamiento de la señal en el dominio óptico [10].

### **2.5.2. Introducción a OPM**

Como se menciona en [16], *“El progreso en el networking óptico ha estimulado el gran interés en OPM, tecnología emergente para los avances en redes conmutadas ópticamente y de alta velocidad, al considerar medidas de calidad de señales ópticas como la OSNR, el factor Q, y la dispersión. Es importante destacar que estos métodos avanzados de monitoreo tienen el potencial de extender la gestión de fallas y la gestión (monitoreo) de la QoS dentro del dominio óptico”*. Los métodos avanzados, a los cuales se hace referencia son: monitoreo de la OSNR, monitoreo de la dispersión cromática, monitoreo de la PMD, monitoreo del factor Q o de la BER, y monitoreo del jitter de temporización (en el capítulo 4 se amplía la información sobre estos métodos).

OPM es esencial para gestionar tanto la alta capacidad de transmisión óptica que ofrece WDM, como los sistemas de conmutación. Entre los ejemplos de funciones que requieren OPM se encuentran: control de los amplificadores, identificación de canal y valoración de la señal [16].

La necesidad de una capacidad para la gestión de fallas en la capa física, también es manejada por requerimientos de transmisión para sistemas de muy alta velocidad. Mientras se han identificado claras ventajas para el incremento de la transparencia y velocidades de transmisión de datos, estas tendencias establecen restricciones más ajustadas en las reglas de ingeniería y en los márgenes de transmisión. Así pues, OPM es un mecanismo potencial para aliviar esta tensión a través del control mejorado de transmisión, y de la gestión de fallas a nivel físico. Las nuevas funcionalidades de la capa óptica tales como la reconfiguración dinámica y la restauración del nivel de enlace, introducen también un nivel de complejidad que puede requerir capacidades avanzadas de OPM. Todos estos problemas enfocan a OPM como una tecnología emergente para redes ópticas de nueva generación [16].

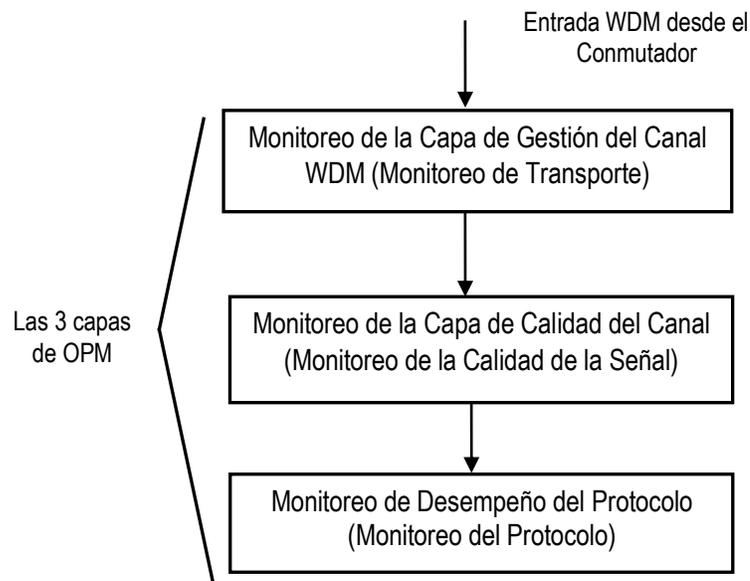
Tradicionalmente, el monitoreo de desempeño se refiere al monitoreo de la capa SONET-SDH para las tasas de error de bit/bloqueo y otras medidas de QoS. La aplicación primordial del monitoreo de desempeño es para certificar los SLA entre los operadores de red y sus clientes. OPM involucra el monitoreo del desempeño de la capa física, el cual no necesariamente está correlacionado con el desempeño digital (eléctrico), aunque se ha enfocado mucho trabajo en identificar las técnicas OPM que pueden ser usadas para evaluar aplicaciones de QoS [10], [16].

En los sistemas de transporte ópticos, el desempeño de la capa física está cercanamente atado a la gestión de fallas y al control de aplicaciones que a las aplicaciones de QoS digitales. El control de la transmisión óptica es la primera área de aplicación clave para OPM [16].

En la actualidad, el monitoreo de desempeño en la capa física (OPM) involucra una combinación de alarmas de componentes individuales, potencia agregada, y en algunos casos el monitoreo del canal óptico (OCM). Las alarmas de los componentes incluyen el monitoreo de parámetros como la potencia del amplificador de bombeo láser o los límites del controlador de temperatura. Por un lado, OCM incluye medidas de potencia del canal, presencia de canal, y registro de longitud de onda; por otro lado, el término OPM a menudo es aplicado a los dispositivos OCM con la capacidad adicional de monitorear la OSNR así como también otras medidas de calidad de la señal como la dispersión, PMD, o jitter [16].

### 2.5.3. Modelo de Referencia OPM

El Modelo de Referencia OPM, consta de tres capas como lo muestra la Figura 2.14.



**Figura 2.14. Las 3 capas de OPM: Monitoreo de Transporte, Monitoreo de la Calidad de la Señal, Monitoreo del Protocolo [16].**

#### 2.5.3.1. Capa de monitoreo de transporte

Involucra una determinación de las características del dominio óptico esenciales para el transporte y la gestión del canal a nivel de la capa WDM (OCM). Por ejemplo, medidas en tiempo real de la presencia del canal, registro de longitud de onda, niveles de potencia y la OSNR espectral son medidas de la capa de transporte [16].

### 2.5.3.2. Capa de monitoreo de la calidad de la señal

Actúa sobre una sola longitud de onda y realiza medidas sensitivas de transición de señal. Ejemplos de características que pueden ser analizadas en esta capa son: el “diagrama del ojo analógico (analogic eye diagram)” y las “estadísticas del diagrama del ojo (eye diagram statistics)”, el factor Q, la ESNR, y la distorsión que ocurre dentro del “diagrama del ojo (eye diagram)” debido a la dispersión y a los efectos no lineales [16].

### 2.5.3.3. Capa de monitoreo del protocolo

Involucra el monitoreo de la información del protocolo de datos, y el Monitoreo de Desempeño del Protocolo (PPM, *Protocol Performance Monitoring*). Esto incluye medidas digitales tales como la BER, cuando se usa para inferir propiedades de la señal óptica analógica [16].

Teniendo en cuenta las descripciones de cada capa del modelo de referencia mencionadas anteriormente, dentro del desarrollo de este trabajo de grado, se consideran únicamente las capas de transporte (OCM) y de la calidad de la señal, enfatizando en el monitoreo del canal óptico, lo cual se podría modelar como en [15], donde se manifiesta que: *“El método elegido para implementar OPM es mediante un monitor dedicado no intrusivo y totalmente óptico, que extrae una pequeña parte (1% al 5%) de la señal óptica DWDM transportada en la fibra y permite monitorear varios parámetros de la señal transportada en la fibra y cada una de las diferentes longitudes de onda multiplexadas en dicha señal”*.

### 2.5.4. Deterioros o daños ópticos

Pueden ser clasificados en tres categorías: ruido, distorsión, temporización [16].

#### 2.5.4.1. Ruido

Fluctuaciones de señal aleatorias que son a menudo tratadas como un proceso Gaussiano y pueden ser dependientes del nivel de la señal [16].

#### 2.5.4.2. Distorsión

Modificación de la forma de onda promedio de la señal. La distorsión puede ser dependiente tanto del nivel como del patrón de la señal y puede conducir a errores a ráfagas y caídas de la BER [16].

#### 2.5.4.3. Temporización [16]

Fluctuaciones en el registro del tiempo de los bits. El jitter de temporización puede ocurrir tan rápido como bit a bit o acumularse sobre muchos períodos de bit.

Es de gran ayuda dividir más dichos deterioros ópticos en: fallas de componentes, y daños de transmisión óptica.

#### **2.5.4.4. Fallas de componentes**

Incluyen el mal desempeño de componentes individuales o múltiples, equipos mal instalados o mal configurados, y daño o intrusión a la red. Los daños debidos a tales fallas son muy diversos y no se pueden catalogar de forma comprensiva [16].

#### **2.5.4.5. Daños de transmisión óptica [16]**

Los efectos más prevaecientes en cuanto a los daños notables de transmisión óptica se muestran a continuación:

- Ruido en los amplificadores.
- Distorsión en los amplificadores y transientes.
- Dispersión Cromática.
- PMD.
- Distorsión y diafonía inducidas por la no linealidad de la fibra (SPM, XPM, FWM, SBS, y difusión estimulada de Rayleigh).
- Jitter de temporización.
- Efectos de Polarización.
- Efectos de Interferencia.
- Transferencia RIN del láser de bombeo (pumping laser).
- Distorsión de los filtros ópticos.
- Diafonía lineal.

Los dos últimos de la lista anterior son daños de transmisión en redes con conmutadores transparentes (OXC) o con OADM.

Hay que tener en cuenta que el desempeño de la red depende de la configuración de los canales y de la distancia. Además, funciones como el enrutamiento de longitudes de onda y la reconfiguración de la red pueden requerir de una avanzada tecnología OPM por canal para asistir el diagnóstico de fallas.

#### **2.5.5. Gestión de fallas en redes ópticas [16]**

Se refiere a la identificación, diagnóstico, resolución, y rastreo de fallas en una red. Una definición general de falla sería cualquier desempeño negativo, debido a un comportamiento inapropiado de un componente o del sistema.

En aplicaciones de gestión de fallas en redes ópticas, típicamente se necesita localizar y diagnosticar una falla que ha sido activada por una alarma en el terminal final. Idealmente, esta función es automatizada a través de software.

Por ejemplo, si una alarma es activada por la unidad del transponder al final de la red, entonces cada unidad OPM indicará hacia el OADM anterior una caída en el desempeño de la red. La falla es localizada en el OADM como el primer sitio que registre una caída en el desempeño de la red.

### 2.5.6. Técnicas OPM

En los sistemas terrestres WDM, particularmente con el uso de los OADM, ha habido interés en las medidas del espectro óptico para gestionar la reconfiguración y el descubrimiento de canales. Las técnicas basadas en tonos fueron las primeras que se usaron para el monitoreo de canales ópticos. El OPM avanzado o el monitoreo de la calidad de la señal, que mide la SNR por canal, ha sido adoptado en los laboratorios como una técnica de monitoreo de nueva generación [16].

A continuación se listan las medidas de nivel físico para OPM, que se pueden realizar en una señal óptica [16]:

- Potencia promedio (por longitud de onda o agregado).
- Potencia pico.
- Forma del pulso/bit.
- Diagrama del ojo.
- Autocorrelación de la intensidad/campo (incluyendo el orden más alto).
- Espectro de amplitud de Potencia (espectro de RF).
- Estado de la Polarización.
- Espectro Óptico (longitud de onda).
- Histograma de Amplitud (síncrono y asíncrono).
- Curva V (Factor Q)/BER.
- PMD (incluyendo el orden más alto).
- Dispersión Cromática.
- Características de la portadora de Fase/Óptica.

Es importante tener presente que OPM está aún altamente restringido por la tecnología disponible para el monitoreo óptico de las características digitales de la señal óptica. Al mismo tiempo, OPM está llegando a ser mucho más común en los sistemas WDM y puede ser muy bien adaptado para estandarización [16].

Por otra parte, los parámetros frecuentemente sugeridos para OPM se indican en la tabla 2.4, donde se muestra una clasificación entre los parámetros de la capa OCM/WDM y los parámetros avanzados y de calidad de la señal, con el fin de comprender la distribución de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica con respecto a las capas del modelo de referencia OPM.

Hay que resaltar que los monitores en los elementos de red pueden ser leídos por el software de gestión de la red, a través de un canal óptico de supervisión.

**Tabla 2.4. Parámetros OPM Sugeridos [16].**

<b>Parámetros del Nivel OCM/WDM</b>	<b>Parámetros Avanzados y de Calidad de la Señal</b>
Potencia Agregada	OSNR dentro de Banda
Potencia del Canal	Factor Q / BER / ESNR
Longitud de Onda del Canal	PMD
OSNR Espectral	Dispersión Cromática Acumulada
	Velocidad de transmisión de datos
	Jitter

Por último, es importante aclarar que existe un OPM avanzando que puede trabajar tanto con las características analógicas como con las digitales, donde la señal digital se usa para inferir las características de la señal óptica [16]. Dicho OPM avanzado se detalla en el capítulo 4 de este documento.

## 2.6. PANORAMA ACTUAL DE ESTUDIOS QUE INVOLUCREN A OPM

En el panorama actual existen varios estudios donde se manifiestan algunos criterios para realizar monitoreo de desempeño en redes ópticas en general, como se lo puede apreciar en trabajos como: “*Optical Monitoring System for Scalable All-Optical Networks*” realizado en noviembre de 1997 [34], “*Monitoring Optical WDM-Networks by using Statistical Methods*” realizado en Holanda en el año 1999 [35], “*Optical Performance Monitoring in Transparent and Configurable DWDM Networks*” realizado en Alemania en el año 2002 [36], “*Monitoring Optical Network Performance Degradation Due to Amplifier Noise*” realizado en New Jersey (USA) en el año 2003, el cual aporta un criterio valioso al afirmar que medidas de señales de 10 Gbps revelan que la sensibilidad a niveles de 26 dB de la OSNR es suficiente para identificar degradaciones que impactan la BER del terminal final [37], “*Performance Monitoring in Transparent Optical Networks using Self-Monitoring Optical-Labels*” realizado en el año 2004, el cual brinda un buen criterio al decir que resultados experimentales indican estimaciones efectivas de la BER de los datos de la carga útil (payload) aproximadamente por encima de 15 dB el rango dinámico de la SNR [38], “*Optimal Monitoring Equipment Placement for Fault and Attack Location in Transparent Optical Networks*” realizado en Atenas (Grecia) en el año 2004 [39], “*Optical Monitoring Technique Based on Scanning the Gain Profiles of Erbium-Doped Fiber Amplifiers for WDM Networks*” realizado en Taiwan en noviembre de 2004 [40], “*Optical Domain Performance Monitoring*” realizado en Canada [41], y “*How Not to Build a Performance Monitoring Agent*” realizado en el año 2007 [42].

Finalmente, después de haber estudiado los fundamentos para el monitoreo del canal óptico basado en OPM, a continuación se procede a describir la metodología para la simulación de equipos de telecomunicaciones, adaptarla y aplicarla a la simulación, estudiar y escoger la herramienta de simulación, diseñar la simulación, realizar el modelo conceptual de la simulación, y definir el modelo de red con sus respectivos escenarios y configuración de parámetros.

### CAPÍTULO 3.

#### DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN DE EQUIPOS DE TELECOMUNICACIONES. DISEÑO DE LA SIMULACIÓN, DEFINICIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL Y DEL MODELO DE RED METROPOLITANA WDM

Este capítulo describe la metodología de simulación de equipos de telecomunicaciones, su adaptación y aplicación a la simulación. También incluye el estudio previo de las herramientas de simulación de redes ópticas y la selección de la herramienta más conveniente. Finalmente, se diseña la simulación, se realiza el modelo conceptual de la simulación, y se define una red metropolitana WDM característica como un modelo (abstracción de la realidad) con sus respectivos escenarios y configuración de parámetros, en el entorno que ofrecen las herramientas software para realizar el monitoreo del canal óptico.

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN DE EQUIPOS DE TELECOMUNICACIONES

El amplio campo de la simulación es muy importante en el área de la investigación. El modelado de los sistemas de comunicaciones es fundamental, antes de su implementación real [43].

Es importante tener en cuenta que se necesita tener un profundo conocimiento sobre el fenómeno que se desea simular, con el fin de que una vez se modele se tenga una presentación confiable del mismo [43].

##### 3.1.1 Fundamentos Teóricos [43]

La abstracción es el principio de ignorar aquellos aspectos de algo (cosa, sujeto, etc.) que no sean relevantes para un propósito en general, con el fin de concentrarse más fijamente en aquellos que si son relevantes.

Un sistema es una colección de entidades (objetos) que interactúan a través del tiempo para cumplir una serie de objetivos o metas. Es importante decir que los sistemas se clasifican en discretos y continuos, según el estado de las variables presentes en dicho sistema.

Un modelo es una representación en lógica matemática que se desarrolla para interpretar el sistema en términos de sus entidades y sus características (atributos). Es de importancia recalcar que el comportamiento del modelo es la representación del comportamiento del sistema.

Los elementos de un modelo son: procesos, variables y relaciones funcionales.

Los modelos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Según la forma en la cual cambian las variables en el tiempo pueden ser: discretos o continuos.
- Según el comportamiento de las variables pueden ser: determinísticos o estocásticos (probabilísticos).
- Según el manejo del tiempo pueden ser: estáticos o dinámicos.

La simulación es un proceso que permite observar el comportamiento de un sistema a partir de cierto nivel de abstracción, para alcanzar el grado de representación que satisface las expectativas preestablecidas para la simulación. Además la simulación es el arte y la ciencia de experimentar con modelos, los cuales representan el comportamiento de un ente real que generalmente consiste en un sistema físico.

Un modelo de simulación es la herramienta que permite conocer y estudiar el comportamiento de un sistema cuando se toman en consideración los aspectos de mayor interés a ser simulados.

El tipo de *modelo de simulación de evento discreto* es un modelo dinámico, estocástico y discreto. En general este tipo de modelo cubre las distintas posibilidades de simulación por computador que pueden presentarse en los sistemas de telecomunicaciones (sistemas ópticos).

### 3.1.2 Formulación de la Metodología [43]

Una metodología tiene distintas etapas que permiten modelar y simular cualquier sistema de comunicaciones. De acuerdo a la ingeniería del software existen tres fases para el tratamiento y la solución de un problema.

1. *Fase de definición:*  
En esta fase se realiza la identificación de la información disponible acerca del problema, en otras palabras aquí se busca “¿el qué?”.
2. *Fase de desarrollo:*  
En esta fase se realiza la identificación de cómo hacerlo, en lo referente al diseño de la estructura y a la arquitectura del software necesario; en otras palabras aquí se busca “¿el cómo?”.
3. *Fase de mantenimiento:*  
En esta fase se realizan los aspectos asociados a la corrección de errores.

Es importante resaltar que existen distintas etapas para cumplir con la metodología, la cual se adapta y se aplica al contexto de este trabajo de grado. Estas etapas o pasos son:

1. Formulación del problema y plan de estudios (fundamentos teóricos).
2. Recolección y procesamiento de datos.
3. Definición de un modelo conceptual.
4. Formulación de un modelo de simulación (definición de modelo de red: escenarios de simulación).
5. Diseño de experimentos (pruebas).
6. Elaboración del programa de computador (implementación de escenarios de simulación).
7. Evaluación del modelo y de los parámetros estimados.
8. Validación del programa (escenarios de simulación).
9. Análisis de los datos obtenidos con la simulación.
10. Obtención de resultados (incidencia de las degradaciones y criterios para el monitoreo del canal óptico).
11. Documentación de resultados.

Dentro del contexto anterior, es preciso tener en cuenta los siguientes dos aspectos:

- Un programa puede entenderse como: un lenguaje de programación de propósito general (C++, Java, etc.); o programas de computador (paquetes) diseñados para trabajar en simulación propiamente dicha (VPI Transmission Maker, OptiSystem, OptSim, entre otras).
- No se trata de implementar una herramienta de simulación sino de encontrar una que posibilite implementar los escenarios de simulación que permitan validar el desarrollo establecido; es decir, se utiliza para determinar las principales características de comportamiento del canal óptico, frente a la variación de los parámetros mencionados, en la red metropolitana WDM característica.

## 3.2 ESTUDIO PREVIO DE ALGUNAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN DE REDES ÓPTICAS

El primer paso para el monitoreo y análisis del comportamiento de la señal a través del canal óptico, es la elección de una herramienta software de simulación que permita realizar un determinado escenario de red, para así llevar a cabo de manera satisfactoria el desarrollo de los objetivos propuestos para este trabajo de grado. En la simulación se tiene en cuenta, la estructura (topología) de la red y el tráfico que posee la misma, con el fin de crear una especie de diagnóstico, que muestre el comportamiento que se obtiene al definir ciertas características.

### 3.2.1 Herramienta Software de Simulación [44]

La herramienta de simulación permite analizar el funcionamiento de la red metropolitana WDM característica, al monitorear el canal óptico y determinar el comportamiento de la señal óptica cuando es afectada por ciertos parámetros, además de obtener resultados que sirven para analizar la incidencia de dichos parámetros en el desempeño de la red.

A continuación se realiza una descripción de las posibles herramientas software de simulación de redes ópticas.

#### 3.2.1.1 VPItransmissionMaker™ WDM

VPItransmissionMaker™ WDM es una herramienta de VPIsystems, Inc. que permite el diseño avanzado de sistemas incluyendo novedosos esquemas de modulación, compensación de la PMD, amplificación RAMAN, regeneración parcial, compensación de dispersión adaptativa y OCM. La interfaz gráfica permite que casi cualquier topología sea construida y simulada usando los modos “sample” (“muestra”) y “block” (“bloque”), en simulaciones tanto unidireccionales como bidireccionales. Representaciones avanzadas de múltiples señales y sofisticados modelos numéricos aseguran velocidad y precisión. Entre las aplicaciones de esta herramienta se encuentran: comparación de las estrategias de actualizaciones para DWDM con sistemas de altas velocidades de transmisión de datos, selección de tecnologías para redes metropolitanas WDM y redes de acceso digital, evaluación de diafonía en redes metropolitanas WDM super densas, entre otras [45], [46].

Las representaciones de múltiples señales y el calendario de simulación sofisticado permiten un modelado eficiente de sistemas WDM arbitrarios. El modo “muestra” soporta interacciones bidireccionales en escalas de tiempo de picosegundos (ps) para el diseño de filtros, y el modo “bloqueo” brinda una simulación precisa y eficiente de sistemas WDM multicanal. Las señales parametrizadas, el ruido y las distorsiones permiten un modelado eficiente de sistemas complejos [45].

Por otra parte, los sistemas metropolitanos sirven de puente entre las redes de acceso y de larga distancia, y son muy diversos. Por un lado están los sistemas CWDM sin amplificar (costos bajos), con espaciamento de canales de 20 nm sobre múltiples bandas de longitudes de onda, y por otro lado, están los sistemas DWDM (costos altos) con espaciamento de canales de 0.2 nm. La necesidad de obtener el máximo desempeño por unidad de costo es común para todos los sistemas. VPItransmissionMaker permite cientos de variaciones de tecnologías y topologías para ser evaluadas sin prototipo, y desde distintos puntos de vista [45].

### 3.2.1.2 OptiSystem 6.0

System Design Software, Optiwave Systems Inc. introduce OptiSystem 6.0, una de las últimas versiones de la colección de diseño de sistemas de comunicaciones ópticas. Esta proporciona un gran número de nuevas características las cuales facilitan la simulación y diseño de tecnologías emergentes en sistemas de comunicaciones ópticas, incluyendo Óptica de Espacio Libre (FSO, *Free Space Optics*) y la aplicación de Radio sobre Fibra (RoF, *Radio over Fiber*) para el diseño de redes inalámbricas en malla [47].

OptiSystem es una herramienta software de diseño de redes ópticas poderosa, novedosa y de rápida evolución que permite a los usuarios planear, simular y evaluar casi cualquier tipo de enlace óptico en la capa de transmisión, desde el nivel de componente hasta el nivel de sistema. Además, esta herramienta presenta de una manera visual el análisis de escenarios [48].

Los beneficios de esta herramienta son [48]:

- Acceso directo a conjuntos extensos de datos de caracterización del sistema.
- Barrido automático de los parámetros y optimización.
- Visión global del desempeño del sistema.
- Prototipado rápido y de bajo costo.
- Opciones de diseño de forma grafica y escenarios a los clientes potenciales.
- Integración con la familia de productos Optiwave.
- Sensibilidad de los parámetros alcanzando las especificaciones de tolerancia en el diseño.
- Reducción dramática del riesgo de inversión y del tiempo de implementación para salir al mercado.

OptiSystem virtualmente permite la automatización del diseño de cualquier tipo de enlace óptico en el nivel físico, y permite el análisis de una amplia gama de redes ópticas, desde los sistemas de larga distancia hasta los de área metropolitana y de acceso. Además, OptiSystem se creó con el fin de satisfacer las necesidades de ingenieros en comunicaciones ópticas, científicos de investigación, estudiantes, integradores de sistemas y una gran variedad de otro tipo de usuarios [48].

Esta herramienta permite a los usuarios planear, simular y evaluar [48]:

- Diseño de mapas de dispersión.
- Diseño de transmisores, canales, amplificadores y receptores.
- Cálculos de la BER en sistemas amplificados y cálculos de la ecuación de balance del enlace.
- Estimación de la BER y estimación de las penalidades del sistema con modelos de receptor distintos.
- Diseños de anillos SONET-SDH. Diseño de red WDM/TDM o Cable Televisión (CATV, *Cable Television*).

- Redes Ópticas Pasivas (PON, *Passive Optical Networks*) basadas en Fibra Hasta La Casa (FTTH, *Fiber To The Home*).
- Diseño de sistemas de comunicaciones ópticas desde el nivel de componente hasta el nivel de sistema en la capa física.

Es muy importante y pertinente decir que Optiwave Systems Inc. cuenta con otra herramienta software llamada **OptiPerformer** la cual se deriva de OptiSystem, y permite ver, configurar y ejecutar los diseños (escenarios de simulación) realizados previamente en OptiSystem. En OptiPerformer, se puede hacer virtualmente todo lo que se realiza en OptiSystem, con la gran diferencia que no se puede modificar los diseños hechos; en otras palabras, solo se puede visualizar y variar parámetros previamente diseñados y configurados en el diseño total de OptiSystem.

### 3.2.1.3 OptSim 4.6

RSoft desarrolla la herramienta OptSim 4.6 la cual brinda un ambiente de modelamiento intuitivo para el diseño y simulación de sistemas de comunicaciones ópticas. Los algoritmos propietarios en el dominio del tiempo y de la frecuencia de OptSim 4.6, permiten la simulación de sistemas complejos con un alto grado de eficiencia y precisión. Las aplicaciones de OptSim incluyen: DWDM/CWDM, RoF, FSO, Redes Totalmente Ópticas (AON, *All-Optical Networks*), Redes de Área Local (LAN, *Local Area Networks*) ópticas, interconexiones ópticas, sistemas soliton, simulación extensiva de sistemas multimodo, entre otras [49].

En conclusión, según las descripciones anteriores, y teniendo en cuenta los trámites relacionados con la consecución de una licencia, tras haber evaluado las características de VPItransmissionMaker™ WDM y de OptiPerformer 6.0, la herramienta software que se utiliza en este trabajo de grado es: OptiSystem 6.0 (incluyendo OptiPerformer 6.0) de Optiwave, Inc.

A través de OptiSystem 6.0 y de OptiPerformer 6.0 se puede efectuar un adecuado monitoreo del canal óptico y comprender mejor el comportamiento del canal óptico frente a la variación de los parámetros ópticos, con la finalidad de determinar la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana WDM, y obtener criterios para el monitoreo del canal óptico.

## 3.3 DISEÑO DE LA SIMULACIÓN CON LA HERRAMIENTA SOFTWARE (OptiSystem 6.0)

Para el diseño de la simulación se debe tener en cuenta que la licencia se ha otorgado por un período de 45 días, correspondiente al software OptiSystem 6.0 de Optiwave, Inc.

El diseño de la simulación se muestra en la figura 3.1 a través de un diagrama de flujo general.

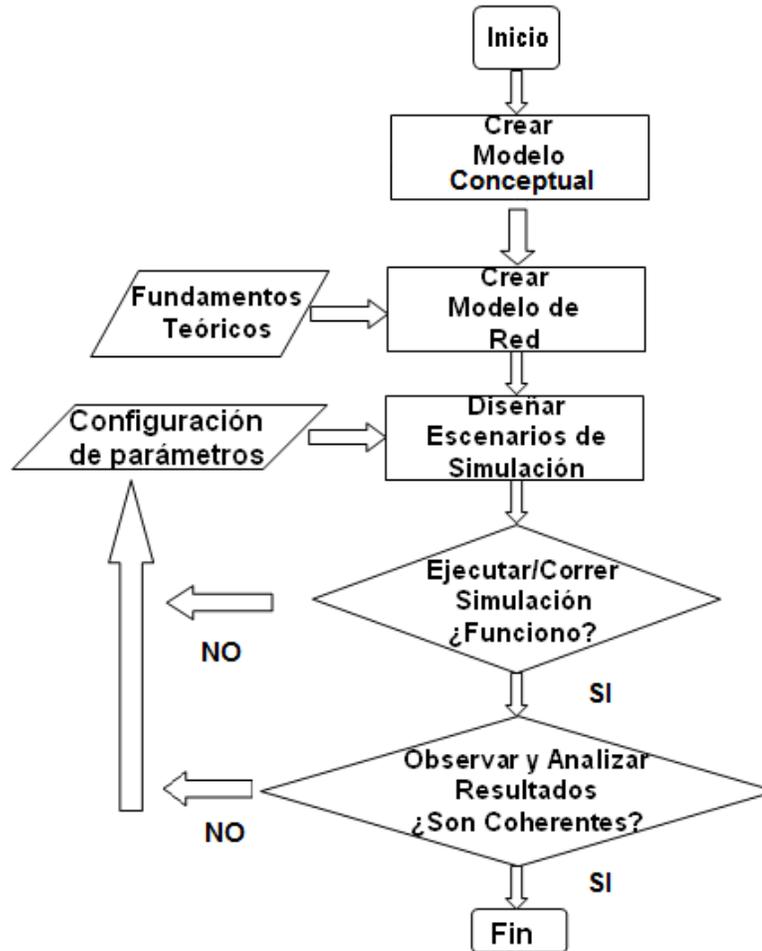


Figura 3.1. Diseño de la Simulación.

### 3.4 DEFINICIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL

Primero que todo, como se dijo en el capítulo 1 de este documento, la red metropolitana WDM característica se termina de definir en este capítulo (3) como un modelo (abstracción de la realidad) en OptiSystem 6.0, el cual permite realizar el monitoreo del canal óptico (OCh). El modelo está compuesto por 3 nodos (OADM), lo que implica que existen 3 OCh; pero en los escenarios de simulación propuestos se realiza el monitoreo de sólo un OCh de manera general con el fin de que los criterios que se obtengan sean válidos para los dos OCh restantes, asumiendo características similares entre los distintos OCh. Lo anterior se debe a que los parámetros de la red considerados están presentes en cada OCh de la red metropolitana WDM característica, y sus variaciones influyen de la misma manera en cualquier OCh que tenga unas características predeterminadas (elementos ópticos, fibra óptica, tráfico, etc.). Por otra parte, para efectos de simulación el esquema que se va a emplear en la red metropolitana WDM característica será unidireccional, debido a que las consideraciones para un esquema bidireccional (ya sea usando una sola fibra óptica o dos fibras ópticas) son análogas; sin embargo, es preciso decir que para el caso de un esquema bidireccional de una sola fibra

óptica, se debe considerar los efectos de reflexiones y pérdidas de retorno, y la Interferencia Multi-Trayecto (MPI, *Multi-Path Interference*) en los elementos ópticos (OTM, OLA, OADM) [12], [47].

De acuerdo al diseño de la simulación, el primer paso es crear un modelo conceptual. Como la metodología va de lo general a lo específico, en seguida se muestra un esquema general del modelo (figura 3.2), un esquema general de un enlace sin multiplexación (figura 3.3), y un esquema general de un enlace con multiplexación (figura 3.4).

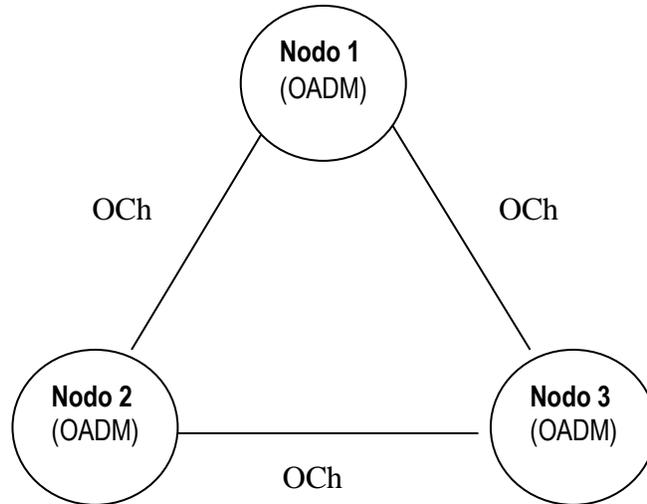


Figura 3.2. Esquema General del Modelo.

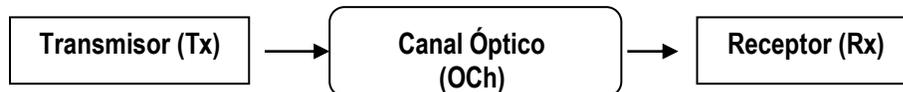


Figura 3.3. Esquema General de un Enlace sin Multiplexación.



Figura 3.4. Esquema General de un Enlace con Multiplexación.

A continuación, a través de las figuras 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9 se procede a especificar cada uno de los módulos mostrados anteriormente.

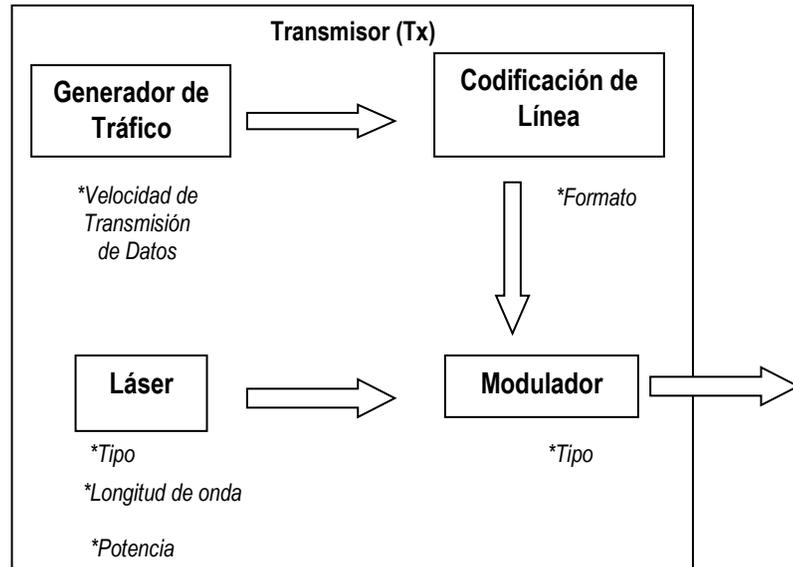


Figura 3.5. Subsistema Transmisor.

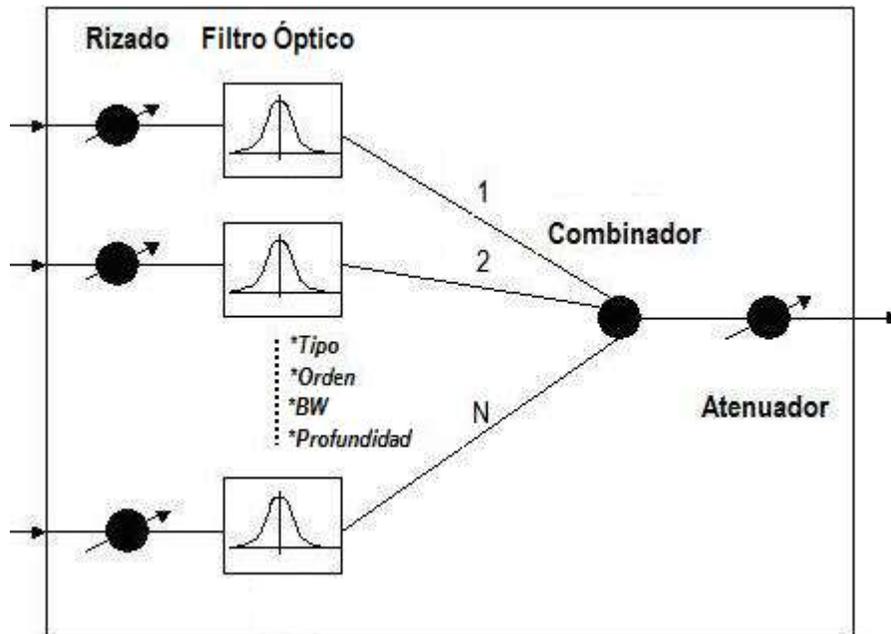


Figura 3.6. Subsistema Multiplexor WDM.

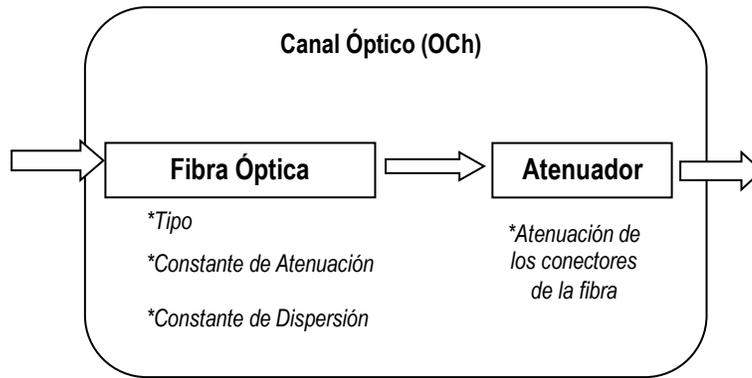


Figura 3.7. Subsistema de Canal Óptico.

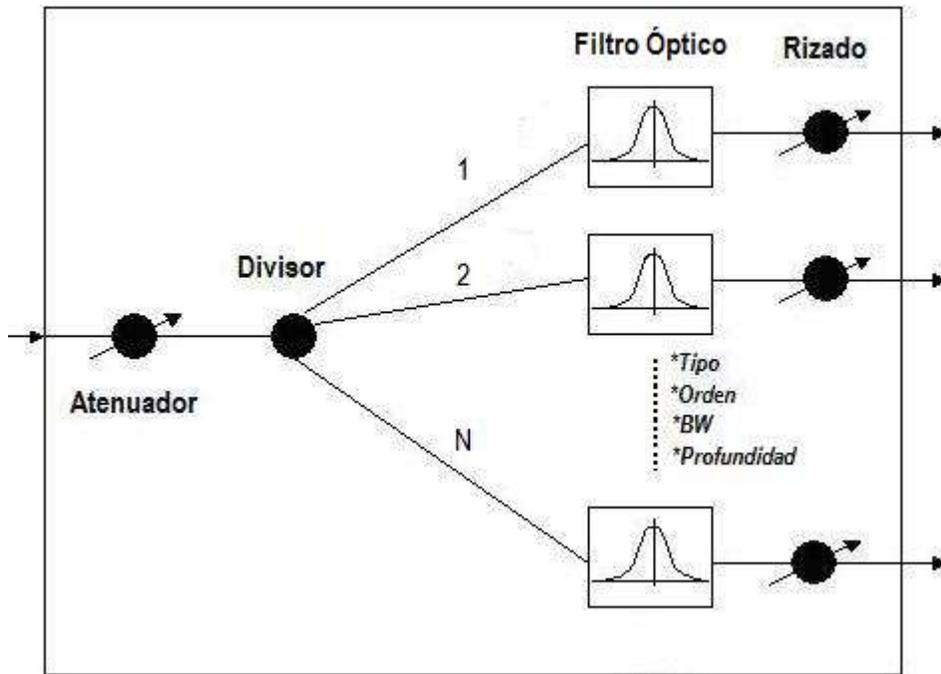


Figura 3.8. Subsistema Demultiplexor WDM.

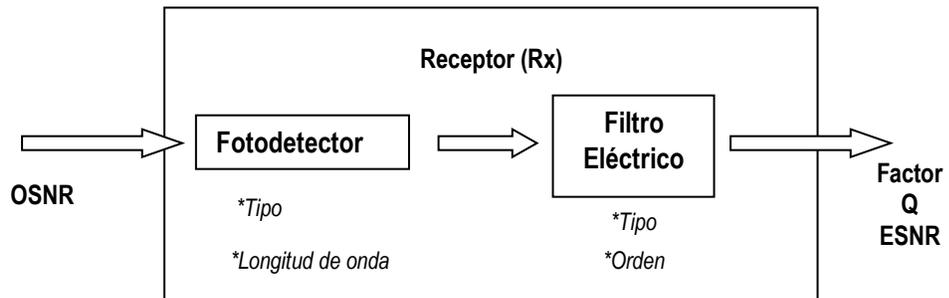


Figura 3.9. Subsistema de Recepción.

A continuación, se detallan las características y los valores que toman los parámetros de las figuras previas tras un proceso de configuración.

#### -Subsistema de Transmisión:

- **Láser:**
  - *Tipo:* Láser de Onda Continua.
  - *Longitud de Onda:* desde 1291 nm hasta 1591 nm.
  - *Potencia:* 0 dBm.
- **Generador de Tráfico:**
  - *Velocidad de Transmisión de Datos:* 2.5 Gbps y 10 Gbps.
- **Codificación Línea:**
  - *Formato:* No Retorno a Cero (NRZ, *Non Return to Zero*).
- **Modulador:**
  - *Tipo:* externo (Mach- Zehnder<sup>10</sup>).

#### -Subsistema Multiplexor/Demultiplexor WDM:

- **Filtro Óptico:** Las pérdidas adicionales del filtro para cada canal se denominan rizado.
  - *Tipo:* Bessel.
  - *Orden:* 2.
  - *BW:* equivalente a cuatro veces la velocidad de transmisión de datos. (Valor= 10 GHz, para 2.5 Gbps). (Valor = 40 GHz, para 10 Gbps).
  - *Profundidad:* atenuación que presenta el filtro para todos los canales, excepto para el que le corresponde. (Valor = 100).

#### -Subsistema de Canal Óptico:

- **Fibra Óptica:**
  - *Tipo:* SMF-28 (ITU-T G.652), DSF (ITU-T G.653), y MetroCor (ITU-T G.655)<sup>11</sup>
  - *Constante de Atenuación:* es una función de la longitud de onda y del tipo de fibra.
  - *Constante de Dispersión:* es una función de la longitud de onda y del tipo de fibra.
- **Atenuador:**
  - *Atenuación de los conectores de la fibra:* 1 dB.

#### -Subsistema de Recepción:

- **Fotodetector:**
  - *Tipo:* PIN.
  - *Longitud de Onda:* desde 1291 nm hasta 1591 nm, correspondiendo con la utilizada por el láser.
- **Filtro Eléctrico:**
  - *Tipo:* Buterworth.
  - *Orden:* 2.

---

<sup>10</sup> Tipo de modulador externo comúnmente empleado en redes WDM.

<sup>11</sup> Las fibras ópticas SMF-28 y MetroCor corresponden a nombres propios definidos por el proveedor Corning.

### 3.5 DEFINICIÓN DEL MODELO DE RED EN EL ENTORNO DE SIMULACIÓN (OptiSystem 6.0)

Como se ha venido trabajando desde el capítulo 1 de este trabajo de grado, a continuación se define el modelo de red sobre el cual se desarrollan las simulaciones, que consiste en una red metropolitana WDM con topología en anillo. Se escogió la topología en anillo por que permite sincronización a muy altas velocidades y presenta una mayor flexibilidad y resistencia a fallas [11]. La red consta de tres nodos, como se observa en la figura 3.10. Para efectos de simulación tan solo se tiene en cuenta uno de los enlaces punto a punto debido a que se asume que el comportamiento de los dos restantes es similar.

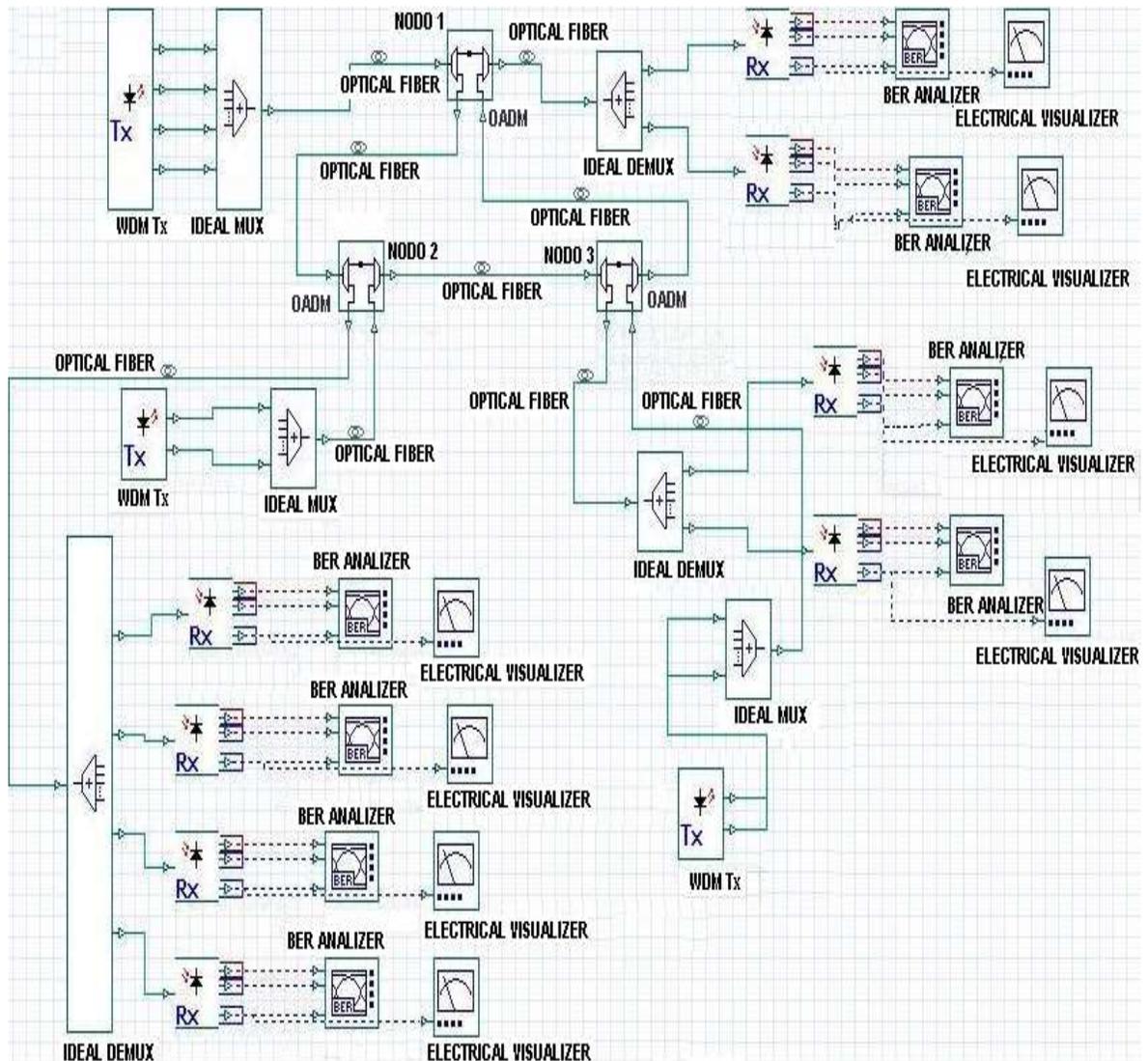
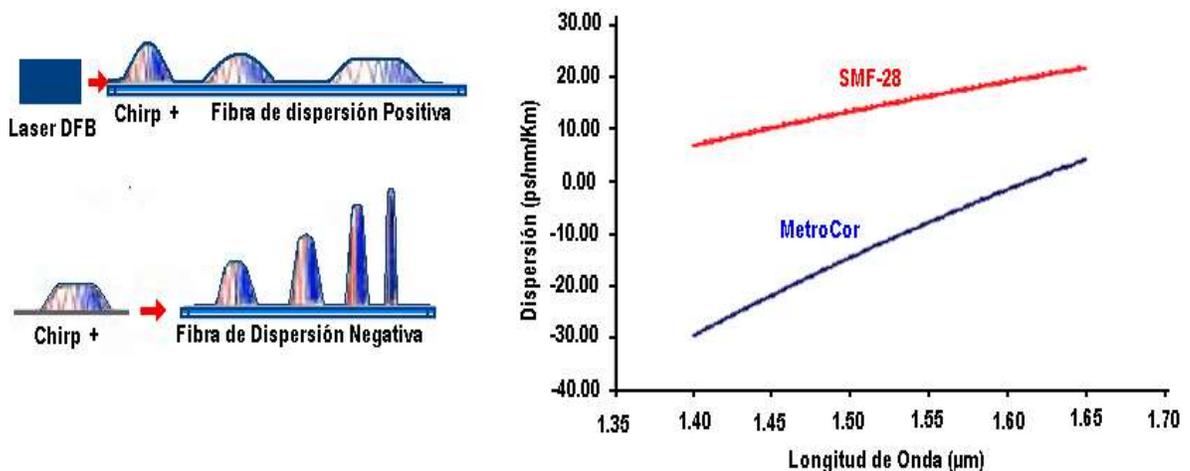


Figura 3.10. Modelo de la Red Metropolitana WDM Característica.

### 3.6 FIBRAS DE DISPERSIÓN NEGATIVA PARA REDES MAN DWDM

En [50] se realizó un estudio teórico y experimental (simulaciones por computador y pruebas de laboratorio) en el cual se demuestra que un novedoso tipo de fibra NZDSF con dispersión negativa (optimizada en dispersión) en todo el BW disponible (1280 nm a 1620 nm) mejora las capacidades de las redes metropolitanas (MAN) ópticas (DWDM), y al mismo tiempo reduce el costo del sistema eliminando la necesidad de compensar la dispersión [51]. Además, se estudia el desempeño de dicho tipo de fibra usando distintas clases de transmisores ópticos para las velocidades de transmisión de datos de 2.5 Gbps y 10 Gbps, y para las ventanas de 1310 nm y 1550 nm; es así que cuando se usa transmisores de Realimentación Distribuida (DFB, *Distributed FeedBack*) Láser Modulados Directamente (DML, *Directly Modulated Laser*) a 2.5 Gbps, se muestra que esta nueva fibra amplía la distancia sin regeneración hasta 300 Km. Cuando se utilizan transmisores láser (predispuestos a tener un chirp<sup>12</sup> positivo) de Realimentación Distribuida integrada con un modulador de Electroabsorción (EA-DFB, *Electroabsorption Modulator Integrated- Distributed FeedBack*), el desempeño de la transmisión en las redes metropolitanas también se mejora gracias a las características de dispersión negativa de la fibra. Finalmente, se calcula que el máximo alcance<sup>13</sup> logrado sin compensar la dispersión está por encima de 200 Km tanto para espaciamentos de canal de 0.8 nm (100 GHz) como para 1.6 nm (200 GHz) en el contexto de velocidades de transmisión 10 Gbps y usando transmisores Láser Modulados Externamente (EML, *Externally Modulated Laser*), como por ejemplo EA-DFB o Mach-Zehnder LiNbO<sub>3</sub><sup>14</sup> [50].

La fibra óptica MetroCor (NZDSF) tiene una dispersión negativa que reduce el uso de compensadores, y hace que el pulso transmitido no se afecte tanto por la dispersión, porque prácticamente este tipo de fibra hace que el pulso sea más angosto aprovechando el chirp positivo del láser, como se observa en la figura 3.11, por lo cual se aumenta el nivel de amplitud en la transmisión [50].



**Figura 3.11. Comparación del comportamiento de una fibra con dispersión negativa con una de dispersión positiva.**

[Fuente: <http://www.corning.com/docs/opticalfiber/pi1302.pdf>].

<sup>12</sup> Conocido como chirp de frecuencia, y se refiere a la variación con el tiempo de la frecuencia óptica instantánea dependiendo de los cambios de la potencia óptica.

<sup>13</sup> Se define como la máxima distancia que se puede obtener para un sistema con todos sus canales teniendo un factor de calidad (Q) mayor de 9.5 dB (equivalente a una BER menor que  $10^{-15}$ ) y una penalidad por cierre del ojo debida a la distorsión menor a 3 dB.

<sup>14</sup> LiNbO<sub>3</sub> se refiere a "Lithium Niobate".

Un problema que se observa en la fibra MetroCor es que se compromete el BW, sin embargo la distancia de transmisión se incrementa gracias al óptimo manejo de la amplitud de la señal.

De acuerdo a [50] *“En las redes de área metropolitana, la distorsión en la forma de onda inducida por la dispersión es el principal daño o deterioro que un diseñador del sistema debe considerar”*. Por lo anterior, es importante decir que dicha distorsión puede ser nociva, aún a pequeñas distancias, dependiendo de la escogencia del transmisor óptico y de sus características de frecuencia (chirp), lo cual determinará la máxima distancia que la señal puede ser transmitida. Por tanto la fibra MetroCor sirve para introducir DWDM en las redes metropolitanas.

En el presente los proveedores u operadores de red ya están migrando sus redes metropolitanas a velocidades de 10 Gbps y están utilizando más canales densamente espaciados (DWDM) en las bandas C (1530 nm a 1565 nm) y L (1570m nm a 1610 nm).

La necesidad de eliminar la compensación por dispersión todavía es un requerimiento. Las distancias en las redes metropolitanas son mucho más cortas que las redes de larga distancia; en consecuencia se pueden usar niveles bajos de potencia óptica y el impacto de los efectos ópticos no lineales se espera que no sea muy significativo (la dispersión aún es el deterioro o daño limitante). Por lo tanto en este trabajo de grado no se abordan los efectos no lineales ya que en [50] se demostró que su impacto no es tan significativo en redes metropolitanas a velocidades de 2.5 Gbps y 10 Gbps.

El diseño de una fibra óptica con dispersión optimizada para aplicaciones de área metropolitana, que elimine la necesidad de compensar la dispersión (lo cual introduce pérdidas por inserción e incrementa los costos del sistema), sin duda facilitaría la ingeniería de la red.

### 3.7 TIPOS DE LÁSER Y SU ESCOGENCIA

Existen dos tipos de láser: DML y EML. Los DML manejan un chirp positivo, mientras los EML se les puede variar el parámetro  $\alpha$  de valores positivos a negativos y así modificar el valor del chirp para obtener un mejor desempeño. Por lo anterior, los láser modulados internamente tienen un mejor comportamiento con la fibra MetroCor ya que esta fibra tiene una dispersión negativa, y si se desea trabajar con los modulados externamente se varia el parámetro  $\alpha$  de tal forma que se obtenga un chirp positivo y también se tendrá un buen comportamiento, aunque para el caso de estos últimos láser, la SMF-28 tiene un mejor desempeño para distancias pequeñas (hasta 50 Km) [50], [51].

En conclusión, se obtiene un mejor comportamiento al usar fibras de dispersión negativa en conjunto con DML, y fibras de dispersión positiva con EML.

Por tanto para la simulación se escogió láser de tipo EML ya que en general se comportan de una buena forma tanto con fibras de dispersión negativa como de dispersión positiva, y debido a que los escenarios de simulación varían en cuanto al tipo de fibra utilizada y a las distancias del trayecto, y los resultados obtenidos se van a comparar, se deben hacer los enlaces con las mismas condiciones [50]. Además, los láser de tipo DML son adecuados solamente para velocidades de transmisión de datos de 2.5 Gbps, y son limitados para utilizarse a velocidades superiores a 10 Gbps, por que el chirp inducido los afecta al ser modulados de forma directa. Por lo anterior, se recomienda el uso de EML, tanto para 2.5 Gbps como para 10 Gbps.

### 3.8 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Para todos los escenarios de simulación se tienen en cuenta las características de configuración de parámetros mencionadas anteriormente. Además de eso, se considera que el tráfico es permanente pero variable, de acuerdo con el código binario pseudoaleatorio  $2^7 - 1$ , utilizado en OptiSystem 6.0 y en la mayoría de los artículos consultados, como por ejemplo en [50] y [51]. Por su parte la potencia del láser es constante (0 dBm) en concordancia con datos actuales para redes metropolitanas. Además, el tipo de modulación es externa (utiliza un modulador externo - EML) debido a un mejor desempeño frente a la modulación directa (utiliza un modulador directo - DML), y el formato de codificación es NRZ debido a un mejor desempeño frente al formato Retorno a Cero (RZ, *Return to Zero*) [47]. El BW del formato NRZ es el doble del BW del formato RZ, y aunque en RZ el sincronismo está garantizado para facilitar la recuperación de la señal (apropiado para largas distancias y altas velocidades de transmisión de datos), dentro del contexto metropolitano (distancias menores a 100 Km) se escoge NRZ ya que su sincronismo no es tan crítico, y la señal se puede recuperar enviando previamente unos bits de sincronismo para enganchar el transmisor y el receptor.

Es importante decir que para la red metropolitana WDM característica no se utilizan elementos ópticos como amplificadores u OXC, debido a que un amplificador y un OXC comúnmente se emplean en redes cuya área de extensión sea mayor a la metropolitana, y además se considera que todos los elementos ópticos que se utilizan como multiplexores, filtros, demultiplexores y demás son ideales para efectos de la simulación.

En los escenarios de simulación se miden los siguientes parámetros:

- Potencia de Señal Óptica en Recepción (PRxo).
- Potencia de Ruido Óptico en Recepción (No).
- OSNR.
- Potencia de Señal Eléctrica en Recepción (PRxe).
- Potencia de Ruido Eléctrico en Recepción (Ne).
- ESNR.
- BER.
- Factor Q.
- Distancia (X).

Y sólo se trabaja con las velocidades de transmisión de datos de:

- 2.5 Gbps (no se manifiestan los *efectos no lineales*, si la potencia se mantiene dentro de la región lineal, y la *PMD* no es un problema).
- 10 Gbps (independientemente de la potencia, empiezan a manifestarse los *efectos no lineales*, y la *PMD* ya se torna problemática).

Lo anterior, debido a varios factores como:

- Licencia de OptiSystem Limitada.
- Como se menciona en el capítulo 4 de este documento, en el trabajo de grado se emplean solamente cuatro "parámetros" que son: *BER* y *Factor Q* como parámetros de monitoreo óptico avanzado, y *Dispersión Cromática* y *Atenuación* como degradaciones ópticas. Cabe notar que la

constante de dispersión (D) y la constante de atenuación (A) son propias de la fibra óptica, que a su vez modela el comportamiento del canal óptico.

- A 40 Gbps también se manifiestan en mayor grado los *efectos no lineales* y la *PMD* es muy importante, pero el límite inferior es 10 Gbps. Lo anterior se justifica porque a velocidades superiores a 10 Gbps se emplean los solitones (compensación no lineal), los cuales son pulsos de formas especiales y con altos niveles de potencia que toman partido de las no linealidades en la fibra (específicamente de SPM) con el fin de solucionar los efectos de ensanchamiento del pulso de la Dispersión de Velocidad de Grupo (GVD, *Group Velocity Dispersion*) [52].

Es importante destacar que la dispersión cromática (la cual está relacionada intrínsecamente con la fibra) es la degradación óptica más importante en el contexto metropolitano, porque es la que mayor incidencia tiene en el desempeño de una red metropolitana, cuando la señal óptica proveniente del láser se propaga a través del canal óptico. Con respecto a la diafonía óptica, cabe resaltar que debido a que el multiplexor y el demultiplexor se consideran ideales, la incidencia que tiene esta degradación en el desempeño de la red metropolitana para efectos de la simulación no se tiene en cuenta.

### 3.8.1 Escenarios de Simulación sin Multiplexación WDM

En la figura 3.12 se muestra un esquema general para los escenarios sin multiplexación WDM (canal simple).



Figura 3.12. Esquema General para los Escenarios de Simulación sin Multiplexación WDM.

Dichos escenarios cumplen con los siguientes aspectos:

-Características:

- Sin Multiplexación (canal simple = 1 sola portadora ( $\lambda$ )).

-Parámetros Fijos:

- Velocidad = 2.5 Gbps; Velocidad = 10 Gbps.

-Parámetros Variables:

- Valor de  $\lambda$ : 1310 nm, 1550 nm.
- Tipo de Fibra Óptica: SMF-28, DSF, MetroCor.

-Se realizan distintas pruebas, variando la longitud de onda y el tipo de fibra óptica, según la tabla 3.1, como por ejemplo:

- $\lambda = 1310$  nm, F.O = SMF-28;  $\lambda = 1310$  nm, F.O = DSF;  $\lambda = 1310$  nm, F.O = MetroCor;  $\lambda = 1550$  nm, F.O = SMF-28;  $\lambda = 1550$  nm, F.O = DSF;  $\lambda = 1550$  nm, F.O = MetroCor. Además, se trabaja de manera no simultánea con 16 longitudes de onda en CWDM (todo el espectro óptico) y en DWDM (ventana de 1550 nm).

Tabla 3.1. Pruebas para los Escenarios de Simulación sin Multiplexación WDM.

$\lambda$ (nm)	Tipo de Fibra
1310	SMF-28 (NDSF)
1310	DSF
1310	NZDSF
1550	SMF-28 (NDSF)
1550	DSF
1550	NZDSF

### 3.8.2 Escenarios de Simulación con Multiplexación WDM

La figura 3.13 muestra un esquema general para los escenarios con multiplexación WDM.

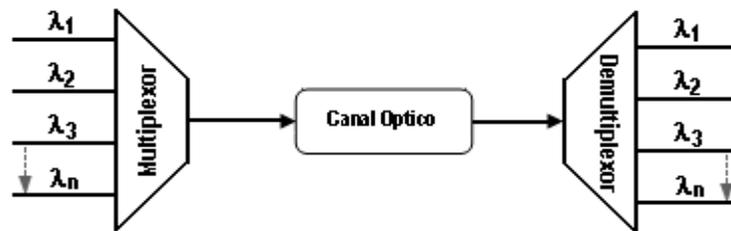


Figura 3.13. Esquema General para los Escenarios de Simulación con Multiplexación WDM.

Tales escenarios cumplen con los siguientes aspectos:

-Características:

- Con Multiplexación (WDM): CWDM y DWDM

-Parámetros Fijos:

- Tipo de Fibra Óptica = SMF-28 y MetroCor (constantes).
- Velocidad = 2.5 Gbps; Velocidad = 10 Gbps.

-Parámetros Variables:

- Valores de  $\lambda$  (según Recs. ITU-T G.694.1 y ITU-T G.694.2 las cuales especifican los planes de frecuencias para DWDM y CWDM respectivamente).
- Número de portadoras ( $\lambda$ s): 2, 4, 8, y 16.

-Se realizan distintas pruebas, variando la longitud de onda y el tipo de fibra óptica, según la tabla 3.2, como por ejemplo:

- No.  $\lambda$ s = 2, Valores de  $\lambda$  (Recs. ITU-T G.694.2, y ITU-T G.694.1); No.  $\lambda$ s = 4, Valores de  $\lambda$  (Recs. ITU-T G.694.2, y ITU-T G.694.1); No.  $\lambda$ s = 8, Valores de  $\lambda$  (Recs. ITU-T G.694.2, y ITU-T G.694.1); No.  $\lambda$ s = 16, Valores de  $\lambda$  (Recs. ITU-T G.694.2, y ITU-T G.694.1).

**Tabla 3.2. Pruebas para los Escenarios de Simulación con Multiplexación WDM.**

No. $\lambda$ s	Valores de $\lambda$
2	Recs. ITU-T G.694.2, y ITU-T G.694.1
4	Recs. ITU-T G.694.2, y ITU-T G.694.1
8	Recs. ITU-T G.694.2, y ITU-T G.694.1
16	Recs. ITU-T G.694.2, y ITU-T G.694.1

Para los escenarios de simulación, se necesita definir un plan de frecuencias con el fin de asegurar un buen desempeño del sistema, de acuerdo a las recomendaciones de la ITU-T.

### 3.8.3 Planes de frecuencia para sistemas WDM

Se usan para asegurar un funcionamiento libre de interferencias cuando se operen varias frecuencias portadoras (longitudes de onda equivalentes). El plan de frecuencias es la disposición de las frecuencias ópticas portadoras, se definen básicamente el número de portadoras o longitudes de onda centrales nominales permitidas que pueden utilizarse en la definición de las aplicaciones [53], [54].

#### 3.8.3.1 Longitudes de Onda Centrales Nominales para Sistemas CWDM

Los sistemas CWDM se pueden utilizar en las redes de transporte metropolitanas y como plataforma integrada para una diversidad de clientes, servicios y protocolos, tal como se define en la Rec. ITU-T G.671. Se usan como referencia para definir, en cada uno de los canales, el límite de longitud de onda superior (longitud de onda central del canal *más* la desviación de longitud de onda central) y el límite de longitud de onda inferior (longitud de onda central del canal *menos* la desviación de longitud de onda central) [53].

- **Espaciamiento de la Longitud de Onda Central y Variación de la Longitud de Onda:**

Debido a que CWDM no usa láser con refrigeración y los filtros son anchos, la recomendación ITU-T G.694.2 indica un espaciamiento de 20 nm entre las portadoras ópticas, los cuales aseguran las posibles desviaciones del láser que se consideran aproximadamente en  $\pm 6-7$  nm y las bandas de guarda [53].

En la tabla 3.3 se indica el plan de longitudes de onda para CWDM en el rango de 1271 nm a 1611 nm.

**Tabla 3.3. Longitudes de Onda Centrales Nominales [53].**

Longitudes de Ondas Centrales Nominales (nm) para un Espaciamiento de 20 nm					
1271	1331	1391	1451	1511	1571
1291	1351	1411	1471	1531	1591
1311	1371	1431	1491	1551	1611

En general, los transmisores utilizados en las aplicaciones DWDM requieren un mecanismo de control que les permita cumplir con los requisitos de estabilidad de frecuencia de las aplicaciones, contrario a lo que ocurre con los transmisores CWDM que no lo necesitan [53].

### 3.8.3.2 Frecuencias Centrales Nominales para Sistemas DWDM

Según [54], “El plan de frecuencias soporta diversos espaciamentos de canal que abarcan de 12.5 GHz hasta 100 GHz y espaciamentos mayores (múltiplos enteros de 100 GHz). Asimismo, se pueden utilizar espaciamentos no uniformes entre canales. El espaciamento de frecuencia actual entre canales resulta de la evolución histórica del plan inicial de 100 GHz, que se ha subdividido sucesivamente por factores de dos”. Las frecuencias (en THz) permitidas, para espaciamentos ( $\Delta f$ ) de canales de 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz y 100 GHz en una fibra, se definen de la siguiente manera [54]:

$$\Delta\lambda_{[nm]} = \left( \frac{299.792458}{(f_{c[THz]})^2} \right) \times \Delta f_{[GHz]} \quad (3.1)$$

$$f_{c[THz]}(n, k, \Delta f) = 193.1 + \frac{n}{k} \times \frac{\Delta f_{[GHz]}}{1000} \quad (3.2)$$

donde:  $n$ , es un número entero; y  $k$ , toma los valores de 1, 2, 4 y 8 correspondientes a los  $\Delta\lambda$  [nm] de 0.1, 0.2, 0.4, y 0.8 respectivamente.

Para hallar la longitud de onda se utiliza la siguiente expresión:

$$\lambda_{c[nm]} = \frac{299792458}{f_{c[THz]}} \quad (3.3)$$

Es importante aclarar que el valor 299792458 corresponde a la velocidad de la luz en el vacío ( $c$ [m/s]).

En la tabla 3.4 se indican los planes de frecuencias para DWDM en las bandas C y L (1530 nm a 1625 nm), basadas en los  $\Delta f$  (GHz) de 12.5, 25, 50 y 100 referidas a una frecuencia de 193.1 THz.

Tabla 3.4. Ejemplo de frecuencias centrales nominales del plan con DWDM [54].

Frecuencias centrales nominales (THz) para Espaciamientos ( $\Delta f$ ) de:				Longitudes de Onda centrales nominales (nm) aproximadas
$\Delta f = 12,5$ GHz	$\Delta f = 25$ GHz	$\Delta f = 50$ GHz	$\Delta f \geq 100$ GHz	
...	...	...	...	...
196,0000	196,000	196,00	196,0	1529,55
195,9875				1529,65
195,9750	195,975			1529,75
195,9625				1529,85
195,9500	195,950	195,95		1529,94
195,9375				1530,04
195,9250	195,925			1530,14
195,9125				1530,24
195,9000	195,900	195,90	195,9	1530,33
...	...	...	...	...
195,8000	195,800	195,80	195,8	1531,12
...	...	...	...	...
193,3000	193,300	193,30	193,3	1550,92
193,2875				1551,02
193,2750	193,275			1551,12
193,2625				1551,22
193,2500	193,250	193,25		1551,32
193,2375				1551,42
193,2250	193,225			1551,52
193,2125				1551,62
193,2000	193,200	193,20	193,2	1551,72
...	...	...	...	...
193,1000	193,100	193,10	193,1	1552,52
193,0875				1552,62
193,0750	193,075			1552,73
193,0625				1552,83
193,0500	193,050	193,05		1552,93
193,0375				1553,03
193,0250	193,025			1553,13
193,0125				1553,23
193,0000	193,000	193,00	193,0	1553,33
...	...	...	...	...
192,9000	192,900	192,90	192,9	1554,13
...	...	...	...	...
184,9000	184,900	184,90	184,9	1621,38
...	...	...	...	...

Finalmente, después de haber descrito, adaptado y aplicado la metodología para la simulación de equipos de telecomunicaciones, estudiado y escogido la herramienta de simulación, diseñado la simulación, definido el modelo conceptual y el modelo de red con sus respectivos escenarios y configuración de parámetros, a continuación se procede a analizar la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana WDM y a definir criterios para el monitoreo del canal óptico.

## CAPÍTULO 4.

### **ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN LA CALIDAD DE LA SEÑAL ÓPTICA EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED METROPOLITANA WDM Y DEFINICIÓN DE CRITERIOS PARA EL MONITOREO DEL CANAL ÓPTICO.**

Después de haber estudiado todos los aspectos relacionados con este trabajo de grado, tal y como se explicó en el capítulo 2 de este documento, los “parámetros que afectan la calidad de la señal óptica”, se dividen en dos: Parámetros de Monitoreo (BER, OSNR, Factor Q, etc.) y Degradaciones Ópticas (atenuación, dispersión cromática, diafonía, etc.). Por lo tanto, en este trabajo de grado se utilizan sólo cuatro de dichos “parámetros generales”: la *BER* y *el Factor Q* como dos de los parámetros de monitoreo más relevantes utilizados para medir la incidencia de la *Dispersión cromática* y de la *Atenuación* conjuntamente (es decir, las constantes típicas de Dispersión (D) y de Atenuación (A) están habilitadas simultáneamente en la fibra óptica), las cuales corresponden a dos de las degradaciones ópticas más importantes, que van cambiando de acuerdo a la variación de ciertos parámetros de la red metropolitana WDM característica como: número de canales o longitudes de onda (1, 2, 4, 8, y 16), tipo de fibra óptica (SMF-28, DSF y MetroCor), técnica de multiplexación (CWDM, DWDM), entre otros, aspectos que están plasmados en los diferentes escenarios de simulación. Se realiza un estudio sobre OPM avanzado, se implementan los escenarios de simulación con el fin de determinar el comportamiento del canal óptico, se analizan los resultados y las conclusiones de la simulación; finalmente se analiza la incidencia de la atenuación y dispersión cromática en el desempeño de la red metropolitana WDM propuesta, y se definen los criterios para el monitoreo del canal óptico.

#### **4.1 MONITOREO DE DESEMPEÑO ÓPTICO (OPM) AVANZADO [16]**

Las técnicas de OPM avanzado son sensibles a la OSNR registrando en la capa de transporte del modelo OPM las variaciones mínimas que se presenten en las señales ópticas. Dichas técnicas pueden ser tanto analógicas como digitales. Por un lado, las técnicas de medida analógica tratan la señal óptica como una forma de onda analógica e intentan medir características específicas de esta forma de onda. Comúnmente estas medidas son independientes del protocolo y pueden subdividirse tanto en métodos en el dominio de la frecuencia (espectral) como en el dominio del tiempo. Los métodos espectrales deben tratarse a través de medidas del espectro óptico y del espectro de potencia (espectro eléctrico o de RF). El espectro de potencia ofrece una mejor medida de la calidad de la señal midiendo el espectro de la señal que está codificado en la portadora óptica, asumiendo una modulación denominada Llaveado Encendido-Apagado OOK (On-Off Keying). La distorsión y el ruido en el espectro de potencia se reflejan directamente en deterioros de la señal. Por su parte, el espectro óptico se mide convenientemente usando técnicas ópticas altamente sensitivas y puede proveer información de ruido óptico. El monitoreo en el dominio del tiempo incluye medidas del diagrama del ojo y medidas de auto-correlación o correlación cruzada. Por otro lado, las técnicas digitales utilizan lógica de alta velocidad para procesar la información digital codificada en la forma de onda óptica. Las medidas en la señal digital se emplean para inferir las características de la señal óptica. Los métodos digitales tienen la más fuerte correlación con la BER (factor Q), pero generalmente son menos efectivos para aislar los efectos de deterioros o daños individuales.

A continuación se explican los fundamentos teóricos del diagrama del ojo, debido a que es de gran utilidad dentro del desarrollo de este trabajo de grado, para luego estudiar el monitoreo avanzado de la BER.

### 4.1.1 Diagrama del Ojo

La BER, la ESNR, y la OSNR son parámetros de medición que proporcionan información acerca de la calidad del enlace y del desempeño de la transmisión, involucrándose el funcionamiento de los equipos de recepción, transmisión, cable y demás. Pero en determinados casos y para diversos inconvenientes muchos de estos parámetros de medición no son apropiados para encontrar el origen del problema, por esto se hace necesario e indispensable el uso del diagrama de ojo ya 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 parámetros de medición como la BER y el factor Q [55].

El diagrama de ojo, muestra en un rango de tiempo la superposición de las distintas combinaciones posibles de unos y ceros. Dichas señales transmitidas por el enlace, permiten obtener las características de los pulsos que se propagan por la fibra óptica. Por ejemplo, en una secuencia de 3 bits tenemos una cantidad total de 8 combinaciones posibles, que se pueden observar en la figura 4.1 [56].

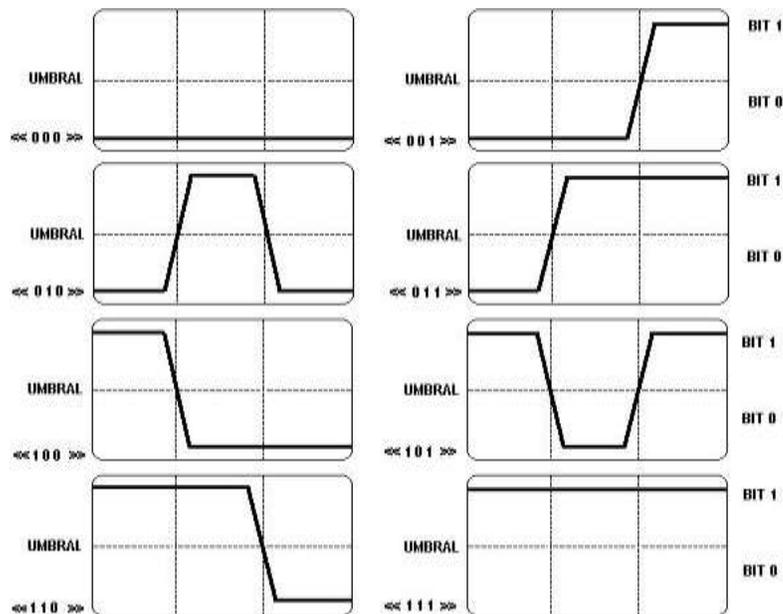


Figura 4.1. Combinaciones posibles en una secuencia de tres bits [51].

El diagrama de ojo permite observar los parámetros que determinan la calidad de la señal. Así, la apertura del ojo en cuanto al eje Y (eje de amplitudes) muestra el nivel de amplitud de la señal (atenuación), la distorsión reducida por la ISI (dispersión cromática que causa reducción de la amplitud de la forma de onda ensanchándola para conservar la energía) y el margen del ruido; por tanto, entre menor sea esta apertura, se compromete más el desempeño del sistema. Por su parte, en el eje X (eje de tiempos) se observa la incidencia del sincronismo y del jitter [50].

En el diagrama del ojo se pueden identificar claramente dos tipos de cruces (eye crossing): cruce de tiempo y cruce de amplitud, tal como se observa en la figura 4.2. El cruce de tiempo indica el tiempo en el cual se produce la apertura del ojo y su posterior cierre, y el cruce amplitud consiste en qué nivel de voltaje se produce la apertura y cierre del ojo definiéndose de este modo el periodo de bit [55]. Además, es pertinente agregar que cuando las pendientes de los pulsos sean distintas entre sí cruzándose en el diagrama del ojo (intersección entre cruces de amplitud y tiempo), es por que se ha producido ISI como un reflejo de los daños producidos por la dispersión cromática.

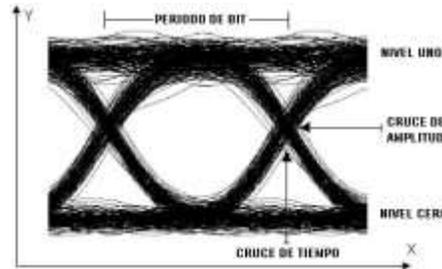


Figura 4.2. Diagrama del Ojo [55].

Hay dos formas importantes de analizar el diagrama del ojo. Una de ellas está referida al comportamiento de los niveles (nivel cero, nivel uno), cruce de tiempo y cruce de amplitud, que se deben a las formas de onda como: el tiempo de subida, tiempo de bajada, sobrepaso superior, sobrepaso inferior, etc. como se observa en la figura 4.3; y la otra consiste en la observación y comparación de las mascarar predefinidas teóricamente con las obtenidas en el momento de la medición, según se muestra en la figura 4.4 [55].

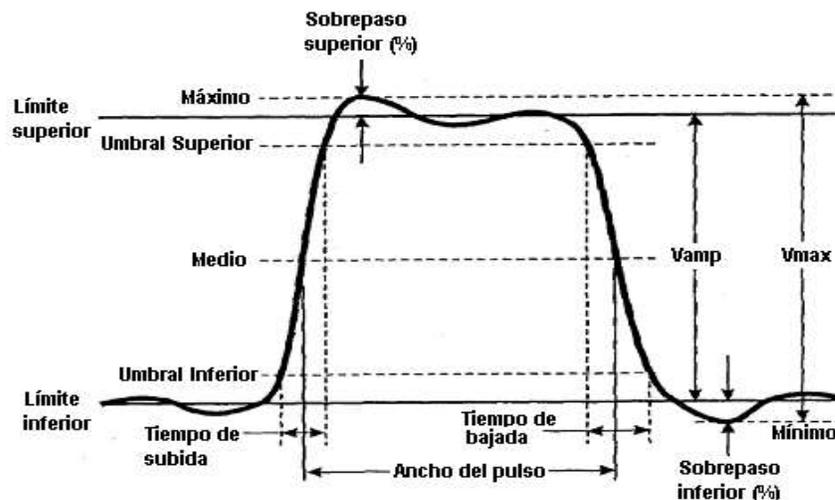


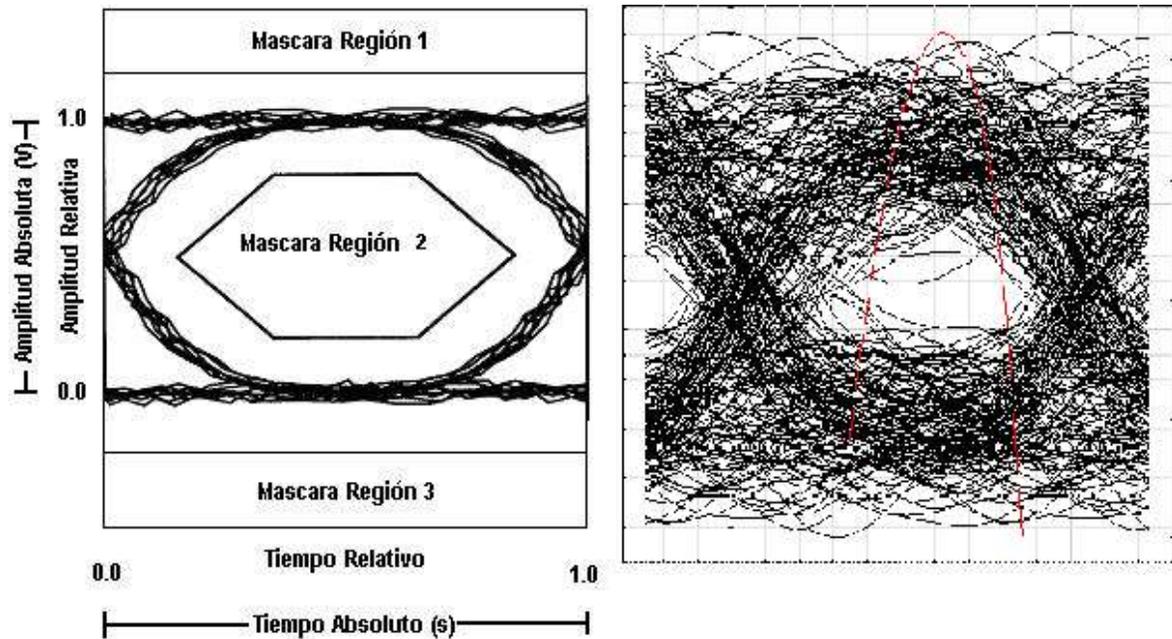
Figura 4.3. Patrones del Diagrama del Ojo.

[Fuente: <http://www.elo.utfsm.cl/~elo341/material/DiagOjos.pdf>]

#### 4.1.1.1 Máscaras de un diagrama de ojo [55]

Son regiones específicas en las cuales no se debe introducir la señal como se ve en la figura 4.4, ya que si la señal entra en estas zonas se deduce claramente que se han introducido errores o se han presentado

problemas en la transmisión. Estas regiones son de especial utilidad con el fin de observar el desempeño de la señal y de esa manera realizar un óptimo diseño del enlace de transmisión.



**Figura 4.4. Concepto de Máscara en el Diagrama de Ojo [55]. La línea roja corresponde a la variación del factor Q en función del período de bit.**

Por lo tanto, el diagrama del ojo es un instrumento de gran uso en las telecomunicaciones, ya que puede brindar información importante sobre el desempeño de un sistema, que de otra manera sería muy complicado o hasta improbable obtener.

A continuación, se mencionan dos tipos de monitoreo OPM avanzado (BER y dispersión cromática), en concordancia con los “parámetros” escogidos en el capítulo 2 del presente trabajo de grado.

#### 4.1.2 Monitoreo Avanzado de la BER (Factor Q) [16]

La BER es el parámetro más usado en la gestión de fallas. De hecho este es el parámetro que se usa en las redes de dominio eléctrico. La BER es sensible a los mismos deterioros o daños que afectan la QoS, debido a que tiene la misma métrica de QoS en cada terminal de red. En localización de fallas, se espera identificar la ubicación de la causa de la degradación de la BER. Con el fin de implementar el monitoreo de la BER en las redes ópticas actuales, es necesario terminar la línea óptica con un transponder (dominio eléctrico: O-E-O) en cada canal y por lo tanto eliminar todas las ventajas de la interconexión de las redes ópticas. Una solución alternativa es usar sondeo (polling). En lugar de usar un banco de transponders, en este caso se usa solamente un transponder en la parte de recepción y un filtro óptico sintonizable sondea secuencialmente cada canal WDM y aún múltiples fibras en un repetidor.

La baja sensibilidad del monitoreo de la BER hace necesario el uso del monitoreo del factor Q. El factor Q se obtiene ajustando el voltaje de umbral de decisión del receptor de monitoreo lejos del nivel óptimo de manera que se registren los errores.

El factor Q para una señal de transmisión digital se refiere en esencia a la SNR en el circuito de decisión de los receptores. Si se mide usando un receptor, entonces el factor Q se refiere a la ESNR; si se mide como muestreo óptico es referido a la OSNR dentro de banda. Este factor se define como la diferencia entre el valor promedio (niveles medios de tensión) de las marcas (unos) y los espacios (ceros) dividido por la suma de las desviaciones estándar de las distribuciones de ruido alrededor de las marcas y los espacios, como se muestra en la figura 4.5 y en (4.1).

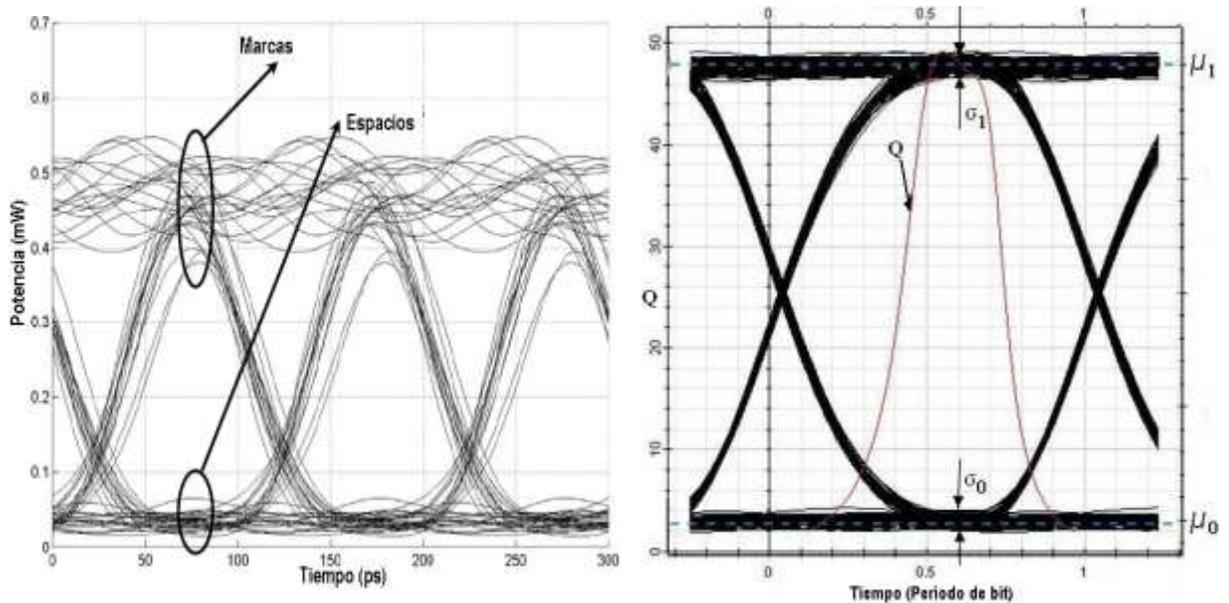


Figura 4.5 . Diagrama de Ojo: Marcas, Espacios y su Relación con el Factor Q [52].

En la grafica 4.5 se muestra cómo obtener el factor Q a partir de un diagrama del ojo, donde Q viene dada por [57]:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (4.1)$$

El monitoreo del factor Q es altamente efectivo para la gestión de fallas, debido a la gran correlación entre la BER y el factor Q. El factor Q es sensible a los mismos daños o deterioros que impactan el terminal receptor con la sensibilidad apropiada.

#### 4.1.2.1 Probabilidad de Error

Debido a la presencia de los diferentes tipos de ruido en un sistema de comunicaciones ópticas, existe la posibilidad de que se produzca un error en la parte de recepción.

Una de las formas para medir este error es por medio de la BER, la cual es el cociente entre el número de errores en recepción y el número de bits de información transmitidos, como se puede apreciar en (4.2) y (4.3):

$$BER = \frac{N_e}{N_t} = \frac{N_e}{bt} \quad (4.2)$$

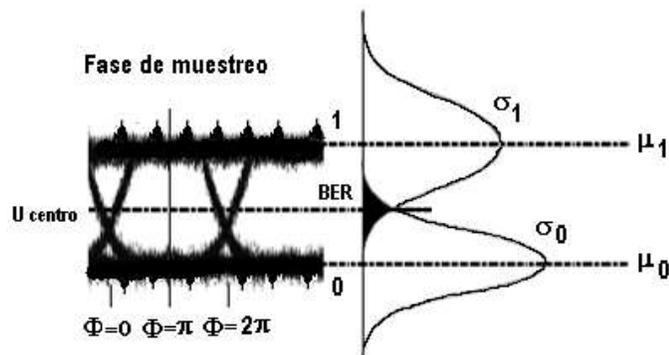
$$b = \frac{1}{T_b} \quad (4.3)$$

donde:  $N_e$  es el número de errores en recepción,  $N_t$  es el número de bits de información transmitidos,  $b$  es la velocidad de bit [bps] y  $T_b$  es el período de bit [s].

Según la ITU-T para los sistemas de comunicaciones en general, el valor usual de la BER se encuentra alrededor de  $10^{-9}$  (límite teórico). Es importante resaltar que el límite real está por encima del límite teórico [58].

Teóricamente, la probabilidad de error existente es el área sombreada (figura 4.6) y se expresa como se indica en (4.4):

$$PE = P(0|1)p(1) + P(1|0)p(0) \quad (4.4)$$



**Figura 4.6. Relación entre la función de densidad de probabilidad y la BER [59].**

Lo cual significa: (la probabilidad de reconocer "0" cuando se envió "1" por la probabilidad de enviar "1") más (la probabilidad de reconocer "1" cuando se envió "0" por la probabilidad de enviar "0").

Se debe tener en cuenta que normalmente se asume que existe la misma probabilidad de enviar un "0" o enviar un "1", según (4.5):

$$p(0) = p(1) = \frac{1}{2} \quad (4.5)$$

Por lo tanto, de (4.4) y (4.5) se tiene que:

$$PE = \frac{1}{2}(P(0|1) + P(0|1)) \quad (4.6)$$

Con el fin de determinar el valor de la BER en términos de la ESNR y del Factor Q, se procede a utilizar la teoría de la probabilidad. Es preciso decir, que el factor Q puede considerarse únicamente como indicador cualitativo de la BER real. Las relaciones matemáticas con la BER (en el caso de funcionamiento no FEC), cuando el umbral se fija en el valor óptimo son [50], [58]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\sqrt{ESNR}}{2\sqrt{2}} \right) \quad (4.7)$$

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (4.8)$$

donde:  $\operatorname{erfc}(x)$  corresponde a la función error complementaria que se define de la siguiente manera y que se encuentra tabulada:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-t^2} dt \quad (4.9)$$

Por lo tanto, de (4.7) y (4.8) se tiene que:

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{ESNR} \quad (4.10)$$

En concordancia con las recomendaciones ITU-T de la serie G, el valor mínimo para la ESNR es de 17 dB (12 dB más 5 dB de margen de seguridad) y para el factor Q, el valor mínimo es de 6 (equivalente a una BER de  $10^{-9}$ ).

#### **4.1.3 Monitoreo Avanzado de la Dispersión Cromática [16]**

La dispersión cromática es un efecto bien conocido, consecuencia de la naturaleza (dependiente de la frecuencia) del índice de refracción en una fibra óptica. Es uno de los principales deterioros o daños que limitan el desempeño de los sistemas ópticos. Para sistemas robustos de altas velocidades de transmisión de datos, es esencial que la dispersión cromática se compense dentro de rangos estrechos. Además, cabe precisar que se han demostrado varias técnicas en tiempo real para el monitoreo de la dispersión cromática, con el fin de habilitar la compensación dinámica de dispersión, y que pueda aplicarse más generalmente como técnicas OPM.

## 4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS, GRÁFICAS Y CONCLUSIONES DEL MONITOREO DEL CANAL ÓPTICO (INCIDENCIA DE LA DISPERSIÓN CROMÁTICA Y DE LA ATENUACIÓN).

A continuación se muestran los diferentes escenarios y los resultados obtenidos dentro de la simulación realizada en OptiSystem 6.0, mediante los cuales se determina el comportamiento de las longitudes de onda al monitorear su curso a través del canal óptico (representado por la fibra óptica<sup>15</sup>), con el fin de validar la incidencia de la dispersión cromática y de la atenuación en el desempeño de la red metropolitana WDM característica.

### 4.2.1 Escenarios de Simulación sin Multiplexación WDM

Los escenarios básicos de simulación constan de una sola portadora inyectada a la fibra, la cual va tomando valores dentro de las ventanas de transmisión más importantes (1300 nm, 1550 nm), de igual forma se varía el tipo de fibra óptica (SMF-28, DSF y MetroCor), la velocidad de transmisión de datos (2.5 Gbps y 10 Gbps), para luego proceder a observar y analizar los parámetros de medida de acuerdo a los resultados obtenidos (OSNR, BER, Factor Q, Distancia Máxima de Transmisión, etc.). Es importante aclarar que el modelo de red correspondiente a estos escenarios es general para cualquier tipo de fibra, velocidad de transmisión de datos y longitud de onda, y en la figura 4.7 se muestra el caso particular de una fibra SMF-28, a 2.5 Gbps y 1310 nm.

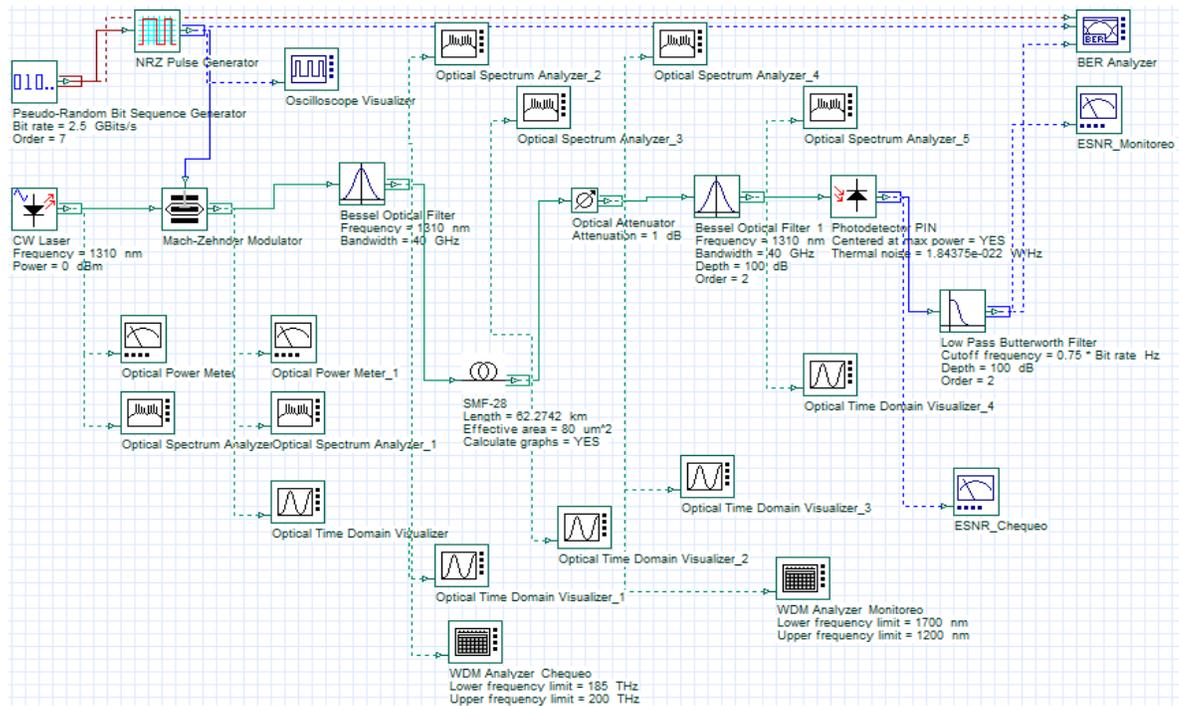


Figura 4.7. Modelo de Red General de los Escenarios de Simulación sin multiplexación WDM.

<sup>15</sup> Los valores escogidos de atenuación y de dispersión para los distintos tipos de fibra utilizadas en la simulación (SMF-28, DSF, y MetroCor) corresponden a datos de referencia y a datos reales, que se pueden encontrar en las recomendaciones ITU-T (G.652, G.653, y G.655) y en las “hojas de datos o data sheets” del proveedor de fibra Corning (<http://www.corning.com>).

A continuación se realiza una descripción total del monitoreo de la señal óptica desde su origen hasta su destino, utilizando las fibras SMF-28, DSF y MetroCor, solamente para las ventanas de 1310 nm y de 1550 nm, las cuales indican un resultado general en el espectro óptico.

#### 4.2.1.1 Ventana de 1310 nm

Para la sección de transmisión (Tx), las figuras 4.8 - 4.11 que se muestran a continuación son independientes del tipo de fibra óptica (SMF-28, DSF o MetroCor); en ellas indica el tráfico de datos (el cual no depende de la frecuencia de la portadora) mediante un osciloscopio (PRBS-NRZ), y además se muestra el espectro de potencia del láser de onda continua a través de un Analizador de Espectro Óptico (OSA, *Optical Spectrum Analyzer*), para 2.5 Gbps y 10 Gbps.

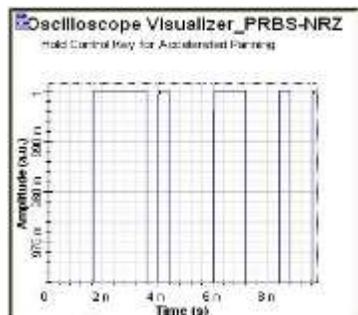


Figura 4.8. Salida de datos (tráfico) del PRBS-NRZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5 Gbps.

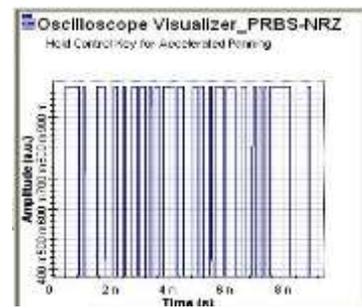


Figura 4.9. Salida de datos (tráfico) del PRBS-NRZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps.

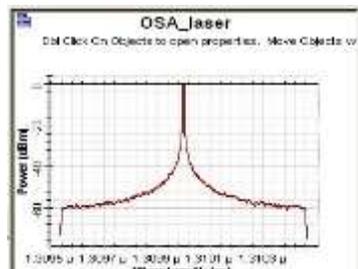


Figura 4.10. Salida de potencia del láser para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5Gbps.

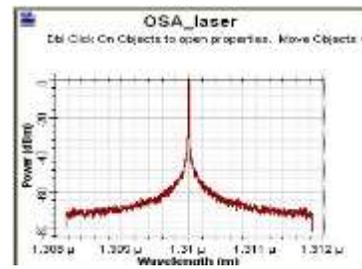


Figura 4.11. Salida de potencia del láser para SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps.

Ahora, de forma análoga se procede a mostrar mediante las figuras 4.12 – 4.15 los resultados obtenidos a la salida del modulador Mach-Zehnder (modula la señal portadora (láser) con la señal de datos (PRBS-NRZ)).

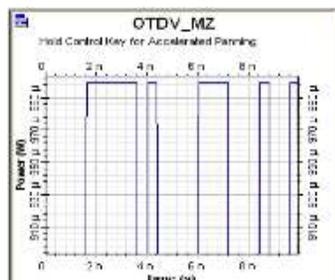


Figura 4.12. Salida de datos (tráfico) del modulador MZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5 Gbps.

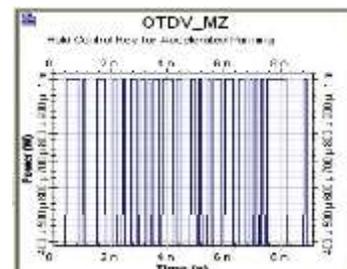


Figura 4.13. Salida de datos (tráfico) del modulador MZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps.

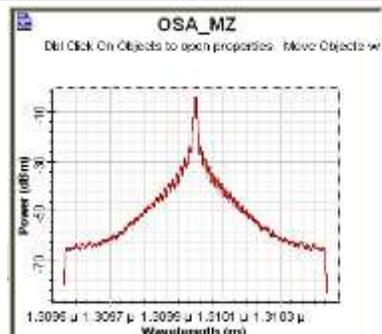


Figura 4.14. Salida de potencia del modulador MZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5 Gbps.

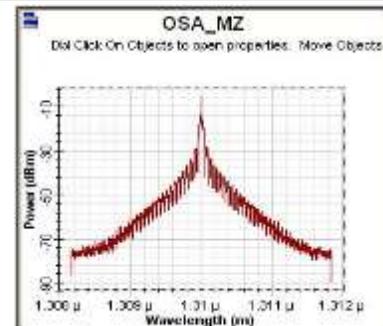


Figura 4.15. Salida de potencia del modulador MZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps.

Según lo anterior se demuestra que usando codificación NRZ, el espectro de la señal a 10 Gbps ocupa cuatro veces el BW de una señal a 2.5 Gbps, como se indica a continuación:

$$B[b/s] = \frac{1}{\tau[s]} \quad (4.11), \quad BW \cong B, \quad B[Hz] \cong \frac{1}{\tau[s]}$$

Además:

$$\tau_{10} = \frac{\tau_{2.5}}{4} \quad (4.12), \quad B_{2.5} = \frac{1}{\tau_{2.5}}, \quad B_{10} = \frac{1}{\tau_{10}} = \frac{4}{\tau_{2.5}} = 4B_{2.5} \Rightarrow BW_{10} = 4BW_{2.5} \quad (4.13)$$

A través de las figuras 4.16 – 4.19, se realiza una comparación de la calidad de la señal óptica en el dominio del tiempo (la cual depende de la dispersión), mediante un Visualizador Óptico en el Dominio del Tiempo (OTDV, *Optical Time Domain Visualizer*) que se utiliza antes del filtro óptico Bessel pasa banda (Tx), y en el dominio de la frecuencia (la cual depende de la atenuación), mediante un Analizador de Espectro Óptico (OSA, *Optical Spectrum Analyzer*) que se utiliza después del filtro óptico Bessel pasa banda (Tx), entre los tres tipos de fibra óptica para la ventana de 1310 nm a 2.5 Gbps y a 10 Gbps. Es preciso resaltar que las señales de 2.5 Gbps y 10 Gbps que atraviesan el filtro óptico Bessel (Tx) que tiene un BW equivalente a cuatro veces la velocidad de transmisión de datos (10 GHz para 2.5 Gbps y 40 GHz para 10 Gbps), están limitadas al BW de dicho filtro, sin embargo, las señales de 10 Gbps siempre ocupan más BW que las señales de 2.5 Gbps; además, se debe tener presente que las graficas del OSA muestran la forma del espectro óptico con una escala diferente en frecuencia, lo cual indica que hay que detenerse a analizar la escala en primera instancia antes de concluir equivocadamente en cuanto al BW del espectro de las señales de 2.5 Gbps y 10 Gbps.

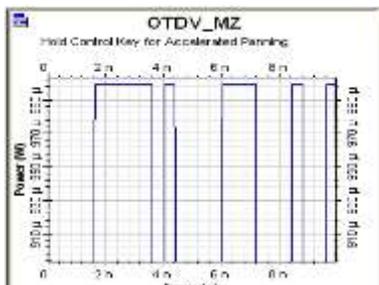


Figura 4.16. OTDV antes del filtro óptico (Tx) para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5 Gbps.

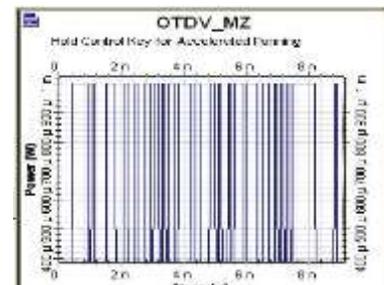


Figura 4.17. OTDV antes del filtro óptico (Tx) para SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps.

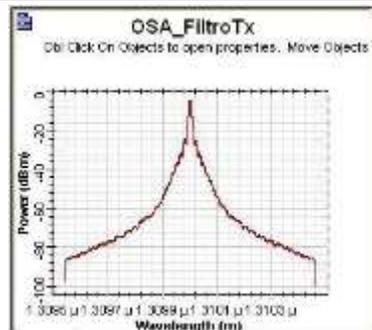


Figura 4.18. OSA después del filtro óptico (Tx) para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5 Gbps.

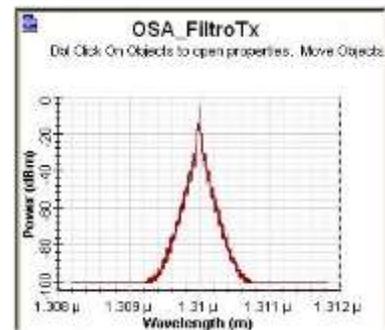


Figura 4.19. OSA después del filtro óptico (Tx) SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps.

Para la sección de recepción (Rx), análogamente se procede a mostrar los resultados del monitoreo del canal óptico en el dominio de la frecuencia (OSA), dependiendo del tipo de fibra óptica utilizada y de la velocidad de transmisión de datos. Se debe tener en cuenta que el filtro óptico (tipo Bessel, de orden 2 y con una profundidad de 100) actúa sobre la señal portadora recortando los armónicos y dejando así la frecuencia fundamental donde se encuentra aproximadamente el 90% de la energía (potencia). El comportamiento de la señal a la entrada y a la salida del filtro utilizado, de acuerdo con las condiciones establecidas se ilustra en las figuras 4.20 - 4.31, donde además se reflejan las pérdidas de potencia óptica causadas por la atenuación de la fibra (aproximadamente 23 dB).

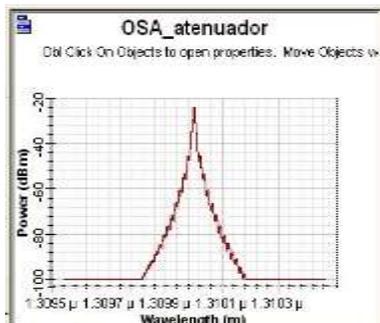


Figura 4.20. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps.

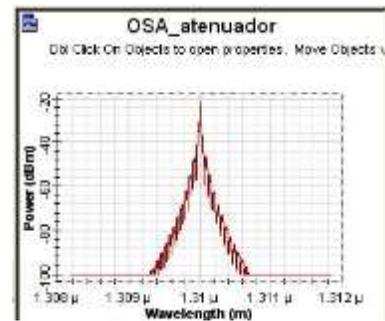


Figura 4.21. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 10 Gbps.

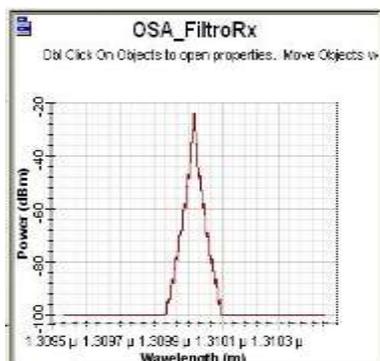


Figura 4.22. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps.

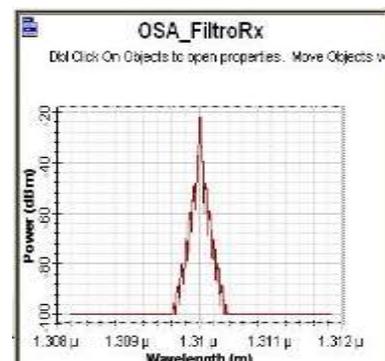


Figura 4.23. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 10 Gbps.

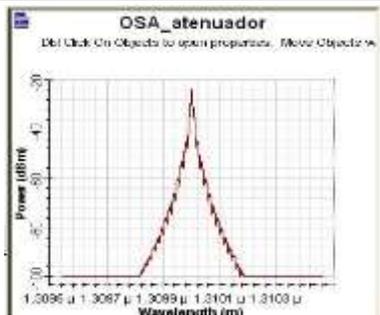


Figura 4.24. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 2.5 Gbps.

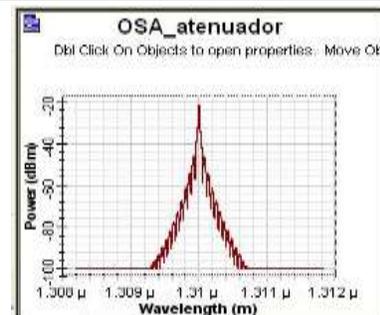


Figura 4.25. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 10 Gbps.

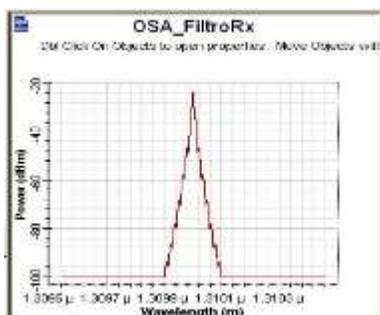


Figura 4.26. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 2.5 Gbps.

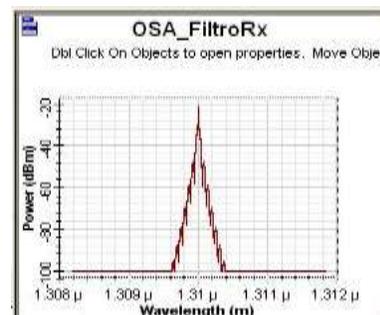


Figura 4.27. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 10 Gbps.

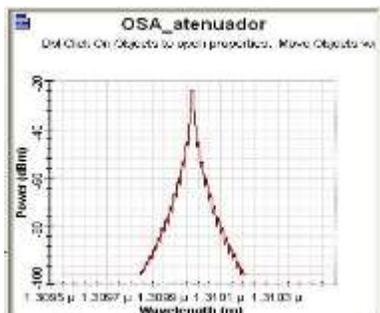


Figura 4.28. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 2.5 Gbps.

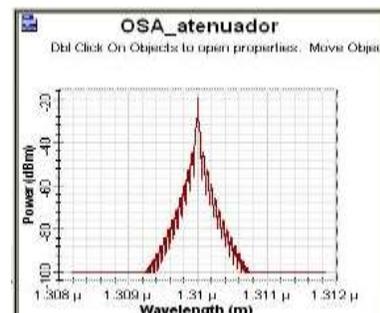


Figura 4.29. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 10 Gbps.

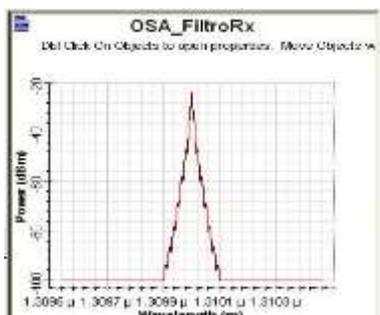


Figura 4.30. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 2.5 Gbps.

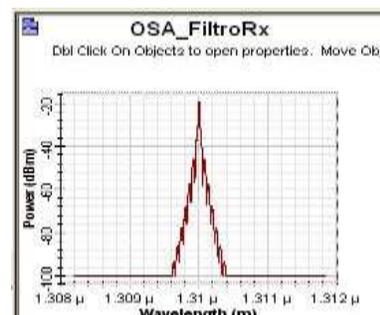


Figura 4.31. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 10 Gbps.

A continuación se muestra el comportamiento de la señal en el receptor en el dominio del tiempo (OTDV y Osciloscopio), donde se pueden analizar los daños causados por la dispersión cromática que dependen del tipo de fibra y de la velocidad de transmisión de datos, tal como se puede observar en las figuras 4.32 – 4.49.

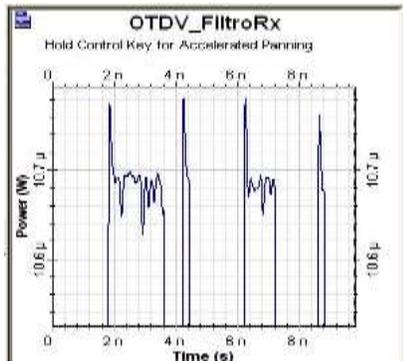


Figura 4.32. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps.

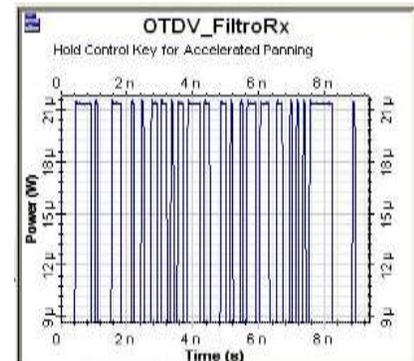


Figura 4.33. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 10 Gbps.

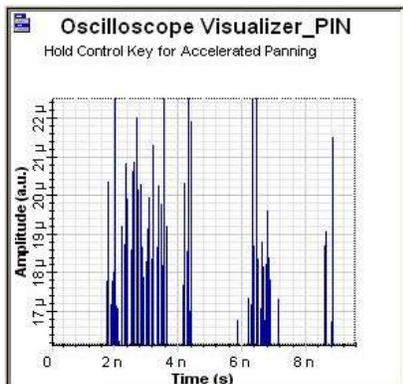


Figura 4.34. Osciloscopio después del PIN para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps.

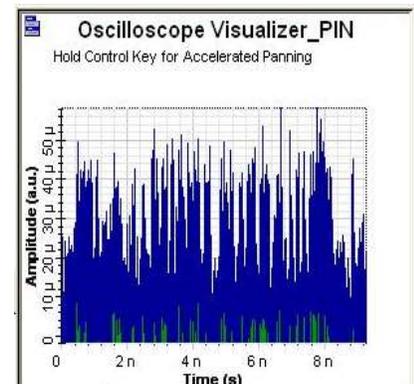


Figura 4.35. Osciloscopio después del PIN para la fibra SMF-28 a 10 Gbps.

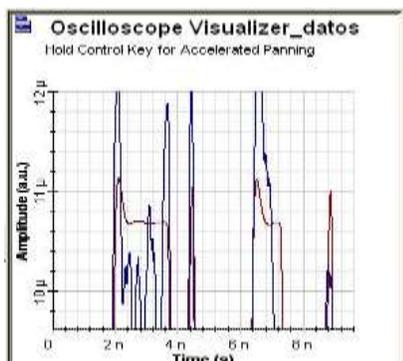


Figura 4.36. Osciloscopio después del Filtro Butterworth (recuperación de datos) para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps.

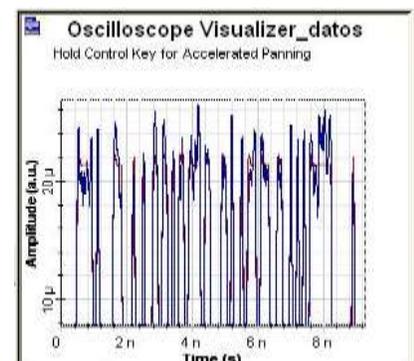


Figura 4.37. Osciloscopio después del Filtro Butterworth (recuperación de datos) para la fibra SMF-28 a 10 Gbps.

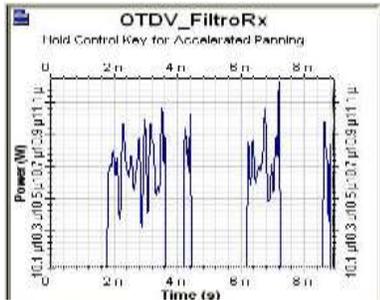


Figura 4.38. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 2.5 Gbps.

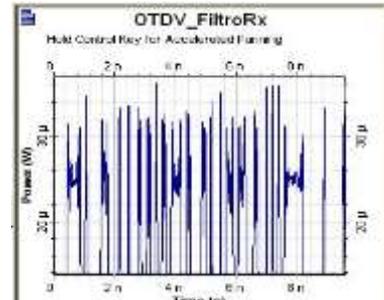


Figura 4.39. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 10 Gbps.

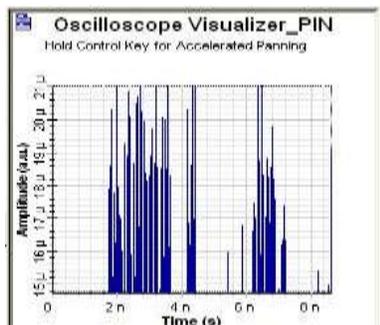


Figura 4.40. Osciloscopio después del PIN para la fibra DSF a 2.5 Gbps.

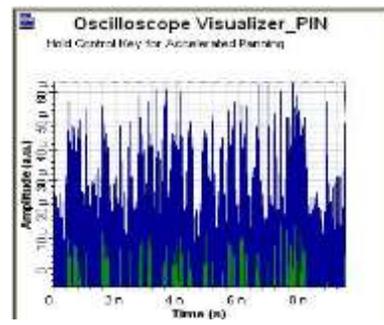


Figura 4.41. Osciloscopio después del PIN para la fibra DSF a 10 Gbps.

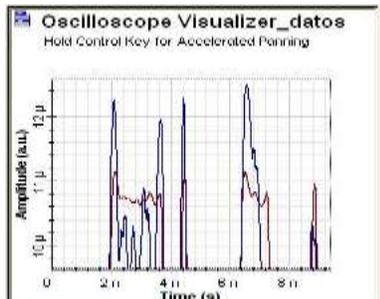


Figura 4.42. Osciloscopio después del Filtro Butterworth (recuperación de datos) para la fibra DSF a 2.5 Gbps.

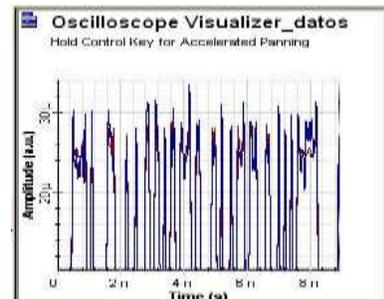


Figura 4.43. Osciloscopio después del Filtro Butterworth (recuperación de datos) para la fibra DSF a 10 Gbps.

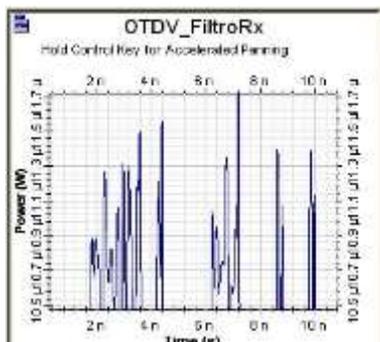


Figura 4.44. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 2.5 Gbps.

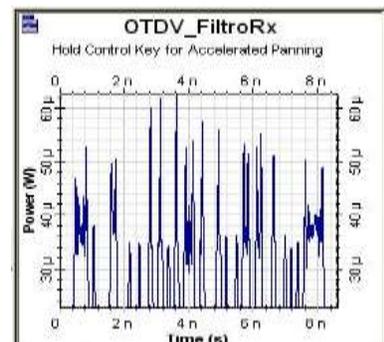


Figura 4.45. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 10 Gbps.

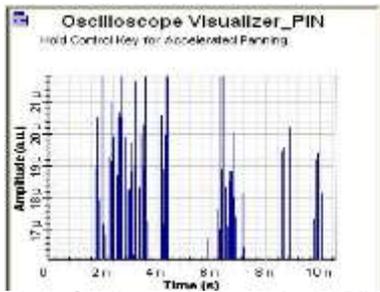


Figura 4.46. Osciloscopio después del PIN para la fibra MetroCor a 2.5 Gbps.

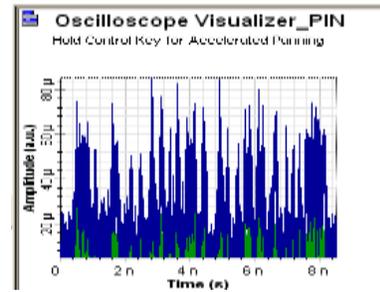


Figura 4.47. Osciloscopio después del PIN para la fibra MetroCor a 10 Gbps.

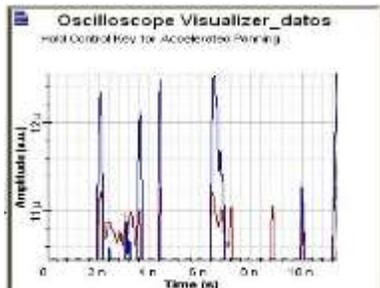


Figura 4.48. Osciloscopio después del Filtro Butterworth (recuperación de datos) para la fibra MetroCor a 2.5 Gbps.

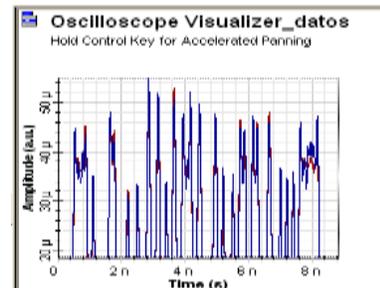


Figura 4.49. Osciloscopio después del Filtro Butterworth (recuperación de datos) para la fibra MetroCor a 10 Gbps.

Además, se muestra el diagrama del ojo del sistema forzado al peor caso ( $BER=10^{-9}$  o Factor  $Q=6$ ), según el tipo de fibra y la velocidad de transmisión de datos, para finalmente analizar el desempeño de cada señal en términos la máxima distancia alcanzada, como se puede observar en las figuras 4.50 – 4.55.

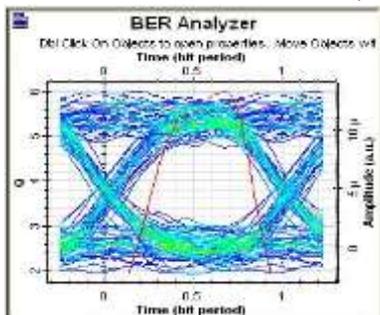


Figura 4.50. Diagrama del Ojo (factor  $Q = 6$ ) para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps ( $X_{max} = 62274$  Km).

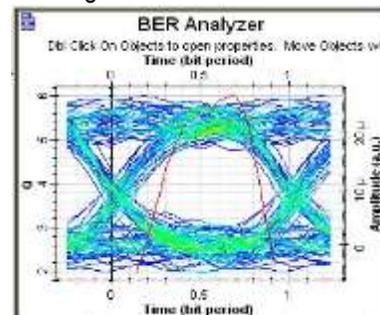


Figura 4.51. Diagrama del Ojo (factor  $Q = 6$ ) para la fibra SMF-28 a 10 Gbps ( $X_{max} = 52310$  Km).

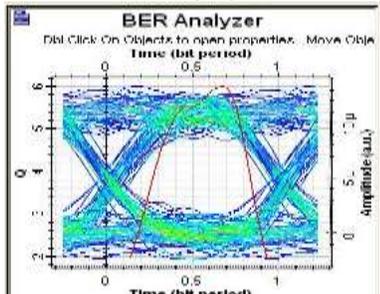


Figura 4.52. Diagrama del Ojo (factor  $Q = 6$ ) para la fibra DSF a 2.5 Gbps ( $X_{max} = 46745$  Km).

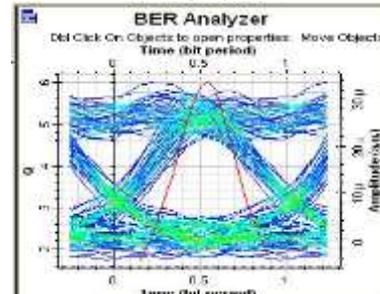


Figura 4.53. Diagrama del Ojo (factor  $Q = 6$ ) para la fibra DSF a 10 Gbps ( $X_{max} = 37540$  Km).

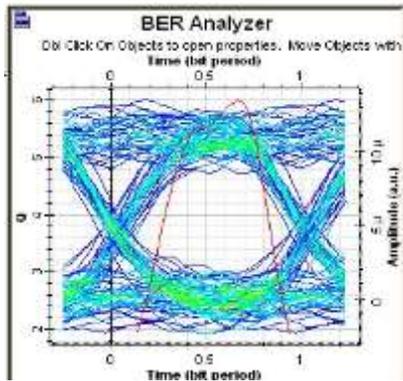


Figura 4.54. Diagrama del Ojo (factor Q = 6) para la fibra MetroCor a 2.5 Gbps (Xmax = 53533 Km).

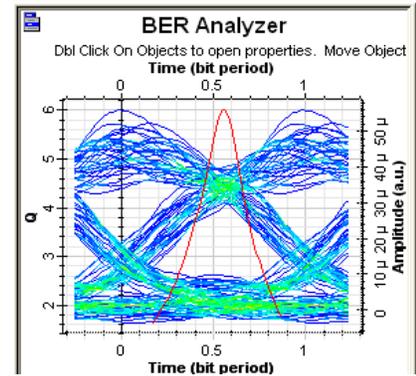


Figura 4.55. Diagrama del Ojo (factor Q = 6) para la fibra MetroCor a 10 Gbps (Xmax = 39119 Km).

#### 4.2.1.2 Ventana de 1550 nm

Los resultados correspondientes a la ventana de 1550 nm son análogos a los de 1310 nm. De esta manera para la sección de transmisión (Tx), las figuras 4.56 - 4.59 que se muestran a continuación son independientes del tipo de fibra óptica (SMF-28, DSF o MetroCor); en ellas se indica el tráfico de datos (el cual no depende de la frecuencia de la portadora) mediante un osciloscopio (PRBS-NRZ), y además se muestra el espectro de potencia del láser de onda continua a través de un OSA, para 2.5 Gbps y 10 Gbps.

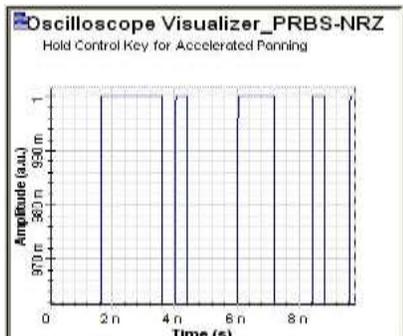


Figura 4.56. Salida de datos (tráfico) del PRBS-NRZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5 Gbps.

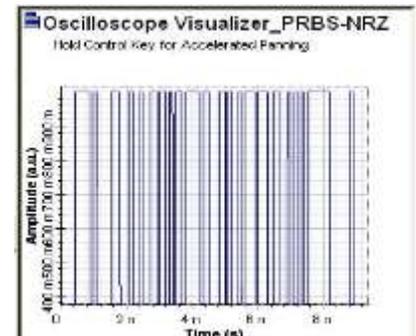


Figura 4.57. Salida de datos (tráfico) del PRBS-NRZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps.

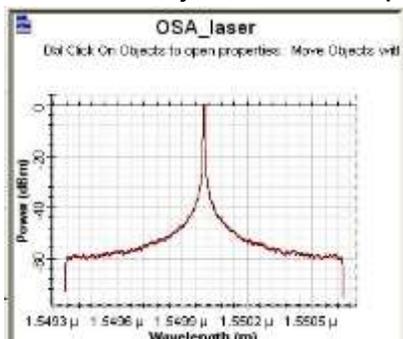


Figura 4.58. Salida de potencia del láser para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5Gbps.

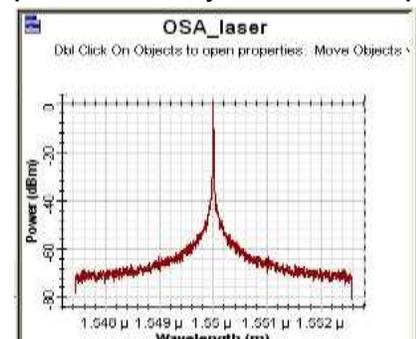


Figura 4.59. Salida de potencia del láser para SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps.

Ahora, de forma análoga se procede a mostrar mediante las figuras 4.60 – 4.63 los resultados obtenidos a la salida del modulador Mach-Zehnder.

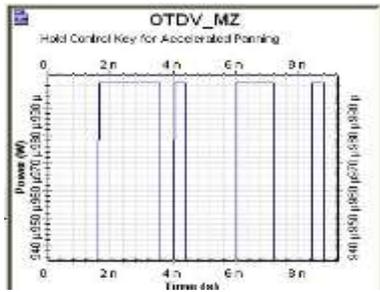


Figura 4.60. Salida de datos (tráfico) del modulador MZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5 Gbps.

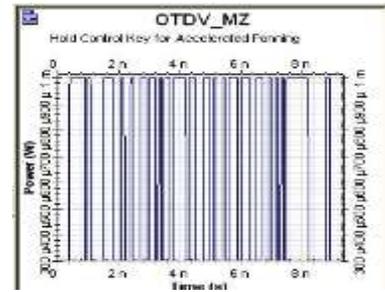


Figura 4.61. Salida de datos (tráfico) del modulador MZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps.

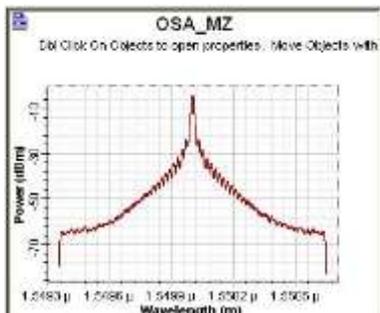


Figura 4.62. Salida de potencia del modulador MZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5 Gbps.

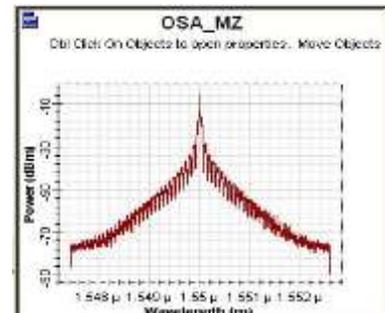


Figura 4.63. Salida de potencia del modulador MZ para SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps.

Según lo anterior, y como se mencionó para la ventana de 1310 nm, en concordancia con (4.11), (4.12) y (4.13), aquí se demuestra que usando codificación NRZ, el espectro de la señal a 10 Gbps ocupa cuatro veces el BW de una señal a 2.5 Gbps.

En la ventana de 1550 nm también se puede apreciar la incidencia que tienen los filtros ópticos cuando la señal se propaga a través de ellos, tal como se describió anteriormente para la ventana de 1310 nm. Así que, mediante las figuras 4.64 – 4.67, se realiza una comparación de la calidad de la señal óptica en el dominio del tiempo (dispersión), mediante un OTDV que se utiliza antes del filtro óptico Bessel pasa banda (Tx), y en el dominio de la frecuencia (atenuación), mediante un OSA que se utiliza después del filtro óptico Bessel pasa banda (Tx), entre los tres tipos de fibra óptica para la ventana de 1550 nm a 2.5 Gbps y a 10 Gbps.

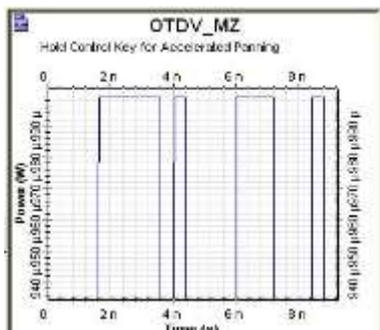


Figura 4.64. OTDV antes del filtro óptico (Tx) para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5 Gbps.

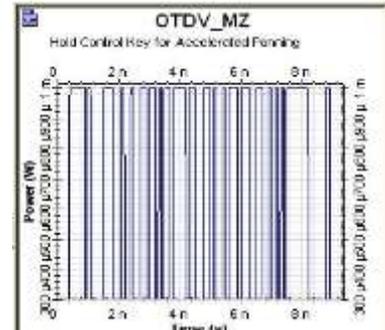


Figura 4.65. OTDV antes del filtro óptico (Tx) para SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps.

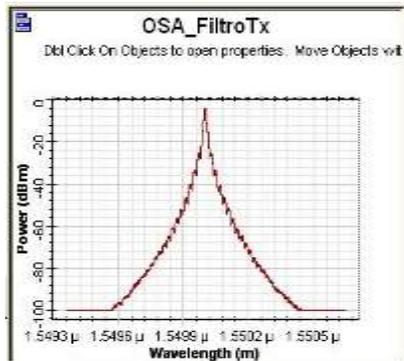


Figura 4.66. OSA después del filtro óptico (Tx) para SMF-28, DSF y MetroCor a 2.5 Gbps.

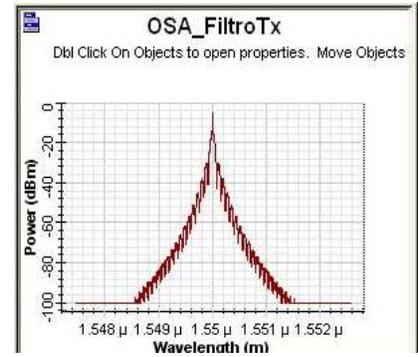


Figura 4.67. OSA después del filtro óptico (Tx) SMF-28, DSF y MetroCor a 10 Gbps.

Para la sección de recepción (Rx), análogamente se procede a mostrar los resultados del monitoreo del canal óptico en el dominio de la frecuencia (OSA), dependiendo del tipo de fibra óptica utilizada y de la velocidad de transmisión de datos. Se debe tener en cuenta que el filtro óptico (tipo Bessel, de orden 2 y con un profundidad de 100) actúa sobre la señal portadora recortando los armónicos y dejando así la frecuencia fundamental donde encuentra aproximadamente el 90% de la energía (potencia). El comportamiento de la señal a la entrada y a la salida del filtro utilizado, de acuerdo con las condiciones establecidas se ilustra en las siguientes figuras 4.68 - 4.79, donde además se reflejan las pérdidas de potencia óptica causadas por la atenuación de la fibra (aproximadamente 23 dB).

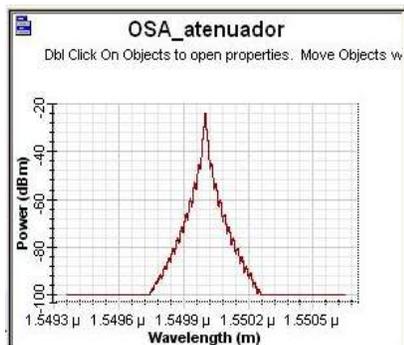


Figura 4. 68. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps.

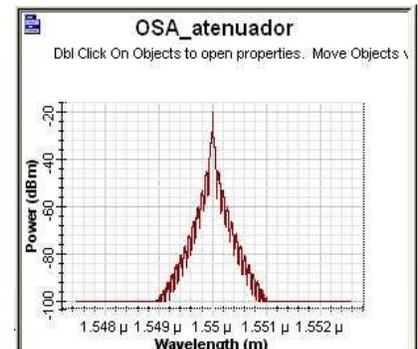


Figura 4.69. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 10 Gbps.

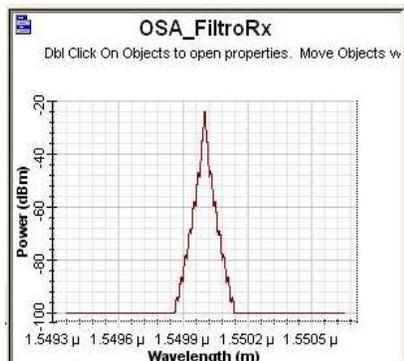


Figura 4.70. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps.

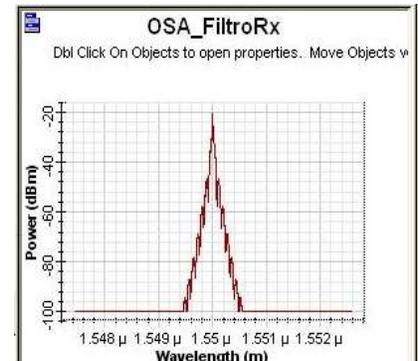


Figura 4.71. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 10 Gbps.

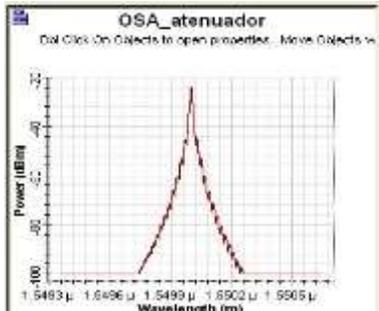


Figura 4.72. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 2.5 Gbps.

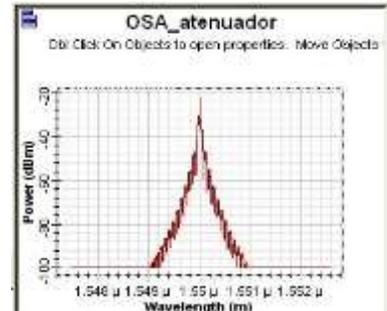


Figura 4.73. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 10 Gbps.

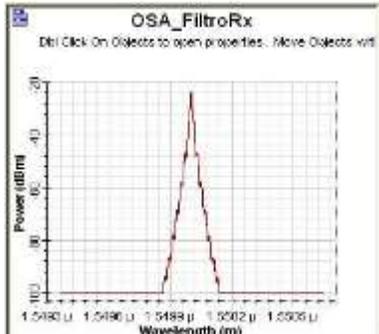


Figura 4.74. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 2.5 Gbps.

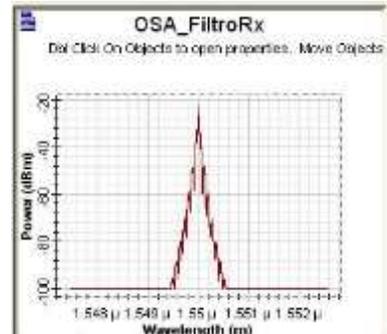


Figura 4.75. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 10 Gbps.

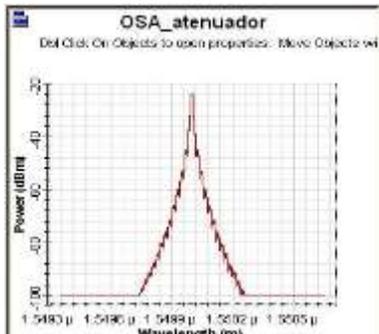


Figura 4.76. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 2.5 Gbps.

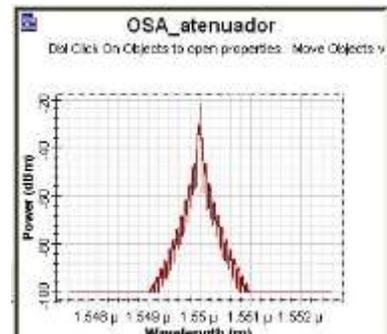


Figura 4.77. OSA antes del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 10 Gbps.

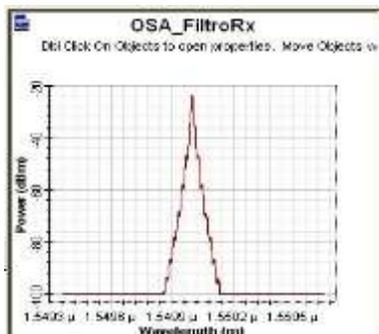


Figura 4.78. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 2.5 Gbps.

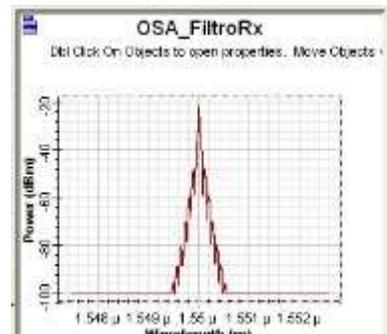


Figura 4.79. OSA después del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 10 Gbps.

A continuación se muestra el comportamiento de la señal en el receptor en el dominio del tiempo (OTDV y Osciloscopio), donde se pueden analizar los daños causados por la dispersión cromática que dependen del tipo de fibra y de la velocidad de transmisión de datos, tal como se puede observar en las figuras 4.80 – 4.97.

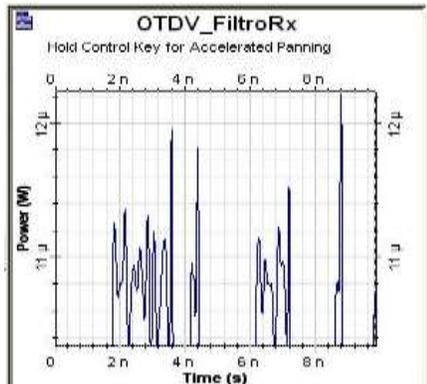


Figura 4.80. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps.

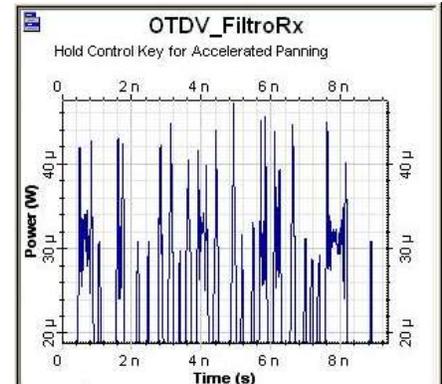


Figura 4.81. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra SMF-28 a 10 Gbps.

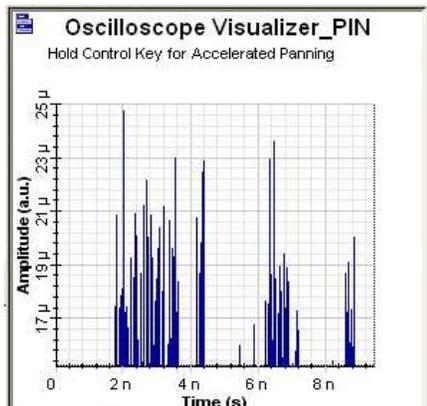


Figura 4.82. Osciloscopio después del PIN para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps.

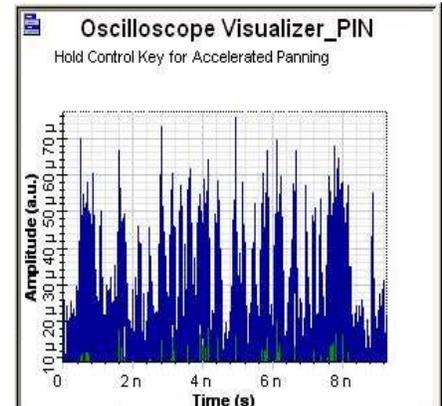


Figura 4.83. Osciloscopio después del PIN para la fibra SMF-28 a 10 Gbps.

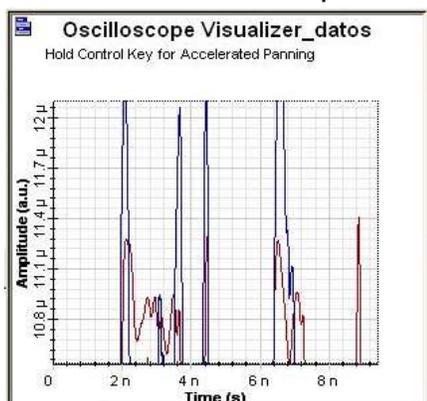


Figura 4.84. Osciloscopio después del Filtro Butterworth (recuperación de datos) para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps.

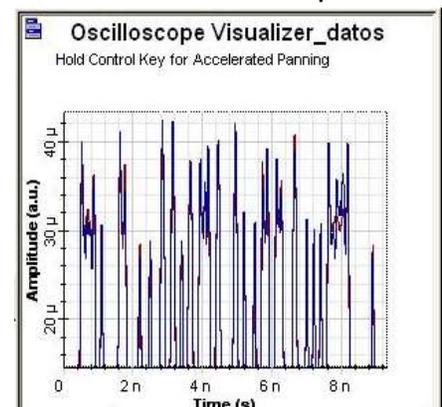


Figura 4.85. Osciloscopio después del Filtro Butterworth (recuperación de datos) para la fibra SMF-28 a 10 Gbps.

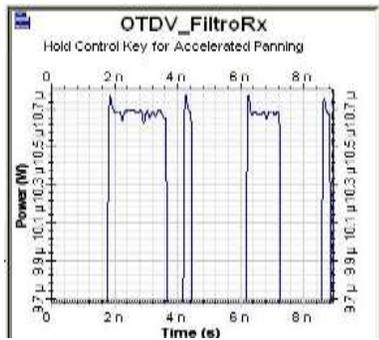


Figura 4.86. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 2.5 Gbps.

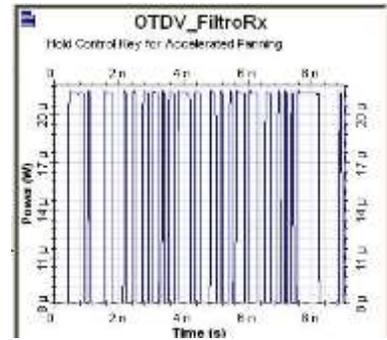


Figura 4.87. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra DSF a 10 Gbps.

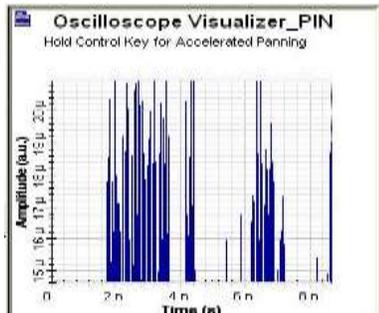


Figura 4.88. Osciloscopio después del PIN para la fibra DSF a 2.5 Gbps.

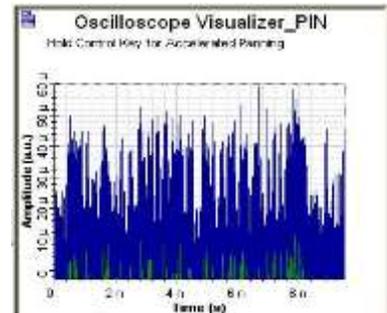


Figura 4.89. Osciloscopio después del PIN para la fibra DSF a 10 Gbps.

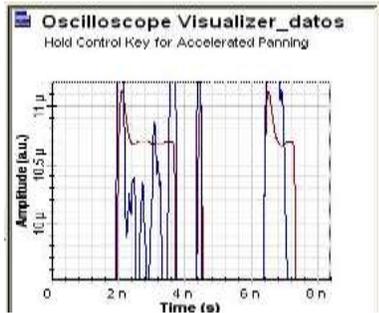


Figura 4.90. Osciloscopio después del Filtro Butterworth (recuperación de datos) para la fibra DSF a 2.5 Gbps.

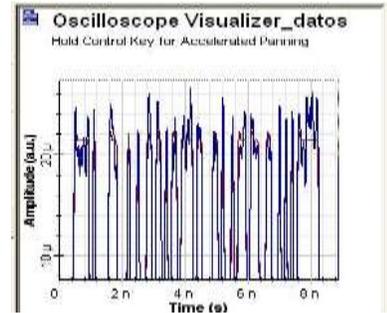


Figura 4.91. Osciloscopio después del Filtro Butterworth (recuperación de datos) para la fibra DSF a 10 Gbps.

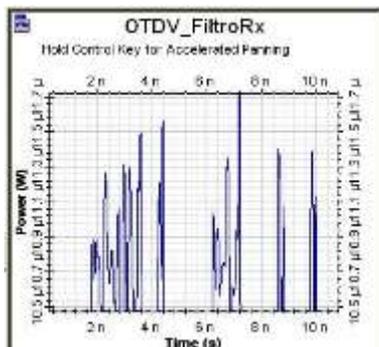


Figura 4.92. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 2.5 Gbps.

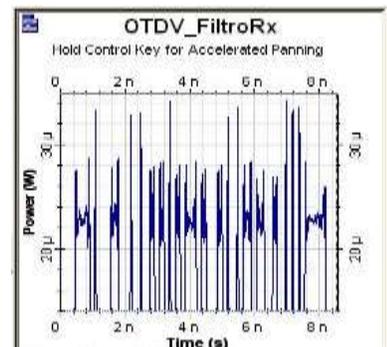


Figura 4.93. OTDV después del filtro óptico (Rx) para la fibra MetroCor a 10 Gbps.

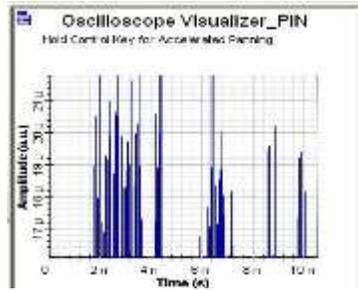


Figura 4.94. Osciloscopio después del PIN para la fibra MetroCor a 2.5 Gbps.

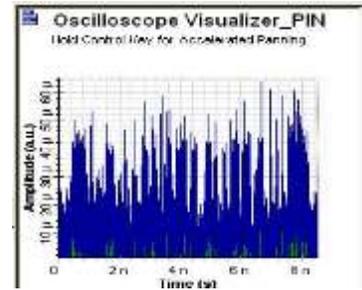


Figura 4.95. Osciloscopio después del PIN para la fibra MetroCor a 10 Gbps.

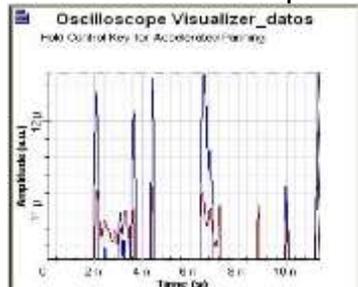


Figura 4.96. Osciloscopio después del Filtro Butterworth (recuperación de datos) para la fibra MetroCor a 2.5 Gbps.

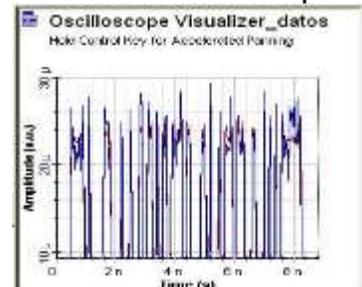


Figura 4.97. Osciloscopio después del Filtro Butterworth (recuperación de datos) para la fibra MetroCor a 10 Gbps.

Además, se muestra el diagrama del ojo del sistema forzado al peor caso ( $BER=10^{-9}$  o Factor  $Q=6$ ), según el tipo de fibra y la velocidad de transmisión de datos, para finalmente analizar el desempeño de cada señal en términos la máxima distancia alcanzada, como se puede observar en las figuras 4.98 – 4.103.

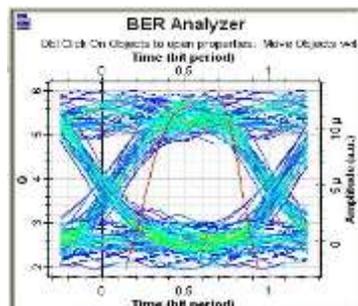


Figura 4.98. Diagrama del Ojo (factor  $Q = 6$ ) para la fibra SMF-28 a 2.5 Gbps ( $X_{max} = 62274$  Km).

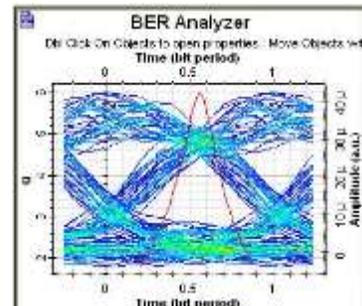


Figura 4.99. Diagrama del Ojo (factor  $Q = 6$ ) para la fibra SMF-28 a 10 Gbps ( $X_{max} = 52310$  Km).

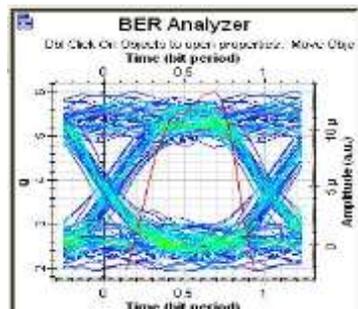


Figura 4.100. Diagrama del Ojo (factor  $Q = 6$ ) para la fibra DSF a 2.5 Gbps ( $X_{max} = 46745$  Km).

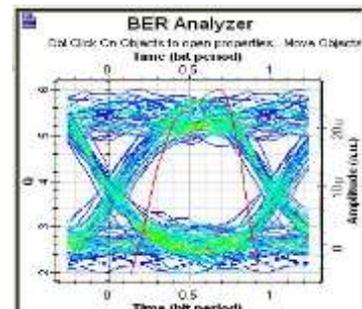


Figura 4.101. Diagrama del Ojo (factor  $Q = 6$ ) para la fibra DSF a 10 Gbps ( $X_{max} = 37540$  Km).

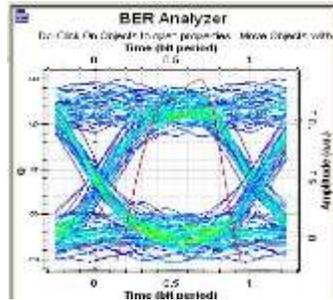


Figura 4.102. Diagrama del Ojo (factor Q = 6) para la fibra MetroCor a 2.5 Gbps (Xmax = 53533 Km).

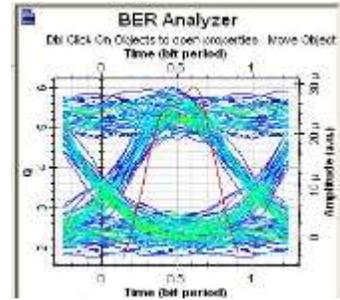


Figura 4.103. Diagrama del Ojo (factor Q = 6) para la fibra MetroCor a 10 Gbps (Xmax = 39119 Km).

Independientemente de la velocidad de transmisión de datos, la ventana de 1550 nm tiene mucho mejor comportamiento en cuanto a la incidencia de la dispersión cromática y de la atenuación para una fibra MetroCor (la cual es una de las más usadas en DWDM) y DSF. El caso contrario ocurre con la fibra SMF-28, ya que la ventana de 1310 nm es la que mejor comportamiento presenta en cuanto a la incidencia de la atenuación y de la dispersión cromática; por lo anterior, en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 se resumen los resultados de los escenarios sin multiplexación WDM (2.5 Gbps y 10 Gbps) a través de la comparación del desempeño de los tres tipos de fibras (SMF-28, DSF, MetroCor), las cuales modelan el comportamiento del canal óptico (OCh) mediante las constantes de atenuación y dispersión. Todos los resultados fueron obtenidos de OptiSystem 6.0.

Tabla 4.1. Escenario sin multiplexación WDM a 2.5 Gbps.

PRUEBAS					PARÁMETROS DE MEDIDA								
Item	$\lambda$ (nm)	Fibra	A (dB/Km)	D (ps/nm/Km)	PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER ( $10^{-10}$ )	Q	X (Km)
1	1310	SMF-28	0,30	-0,178	-23,042	-153,677	130,635	-73,152	-90,767	17,616	9,879	6,000	62,341
2	1310	DSF	0,40	-26,722	-23,038	-153,641	130,603	-73,144	-90,768	17,624	9,828	6,001	46,745
3	1310	MetroCor	0,35	-47,002	-23,017	-153,595	130,578	-73,105	-90,769	17,665	9,881	6,000	53,363
4	1550	SMF-28	0,20	16,784	-22,993	-153,603	130,610	-73,055	-90,768	17,714	9,817	6,001	93,268
5	1550	DSF	0,25	0,000	-23,042	-153,644	130,602	-73,152	-90,767	17,615	9,911	5,999	74,810
6	1550	MetroCor	0,20	-5,600	-23,042	-153,645	130,602	-73,153	-90,768	17,614	9,892	6,000	93,514

Tabla 4.2. Escenario sin multiplexación WDM a 10 Gbps.

PRUEBAS					PARÁMETROS DE MEDIDA								
Item	$\lambda$ (nm)	Fibra	A (dB/Km)	D (ps/nm/Km)	PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER ( $10^{-10}$ )	Q	X (Km)
1	1310	SMF-28	0,30	-0,178	-20,171	-86,934	66,763	-67,139	-84,743	17,603	9,913	5,999	52,327
2	1310	DSF	0,40	-26,722	-19,490	-86,279	66,789	-65,843	-84,742	18,899	9,810	6,001	37,540
3	1310	MetroCor	0,35	-47,002	-17,719	-84,521	66,801	-62,437	-84,725	22,288	9,884	5,999	37,843
4	1550	SMF-28	0,20	16,784	-18,557	-85,326	66,769	-64,069	-84,734	20,665	9,858	5,999	70,421
5	1550	DSF	0,25	0,000	-20,171	-86,930	66,760	-67,138	-84,743	17,605	9,896	6,000	62,790
6	1550	MetroCor	0,20	-5,600	-19,881	-86,676	66,795	-66,585	-84,745	18,160	9,814	6,001	77,033

Tabla 4.3. Diferencia de distancias para una fibra óptica (2,5 Gbps vs 10 Gbps).

Diferencia de distancia 10 Gbps respecto a a 2.5 Gbps			
	1310 nm	1550 nm	Delta en long. de onda
<b>SMF-28</b>	10.014	22.847	12.834
<b>DSF</b>	9.205	12.020	2.815
<b>MetroCor</b>	15.520	16.481	0.961
Promedio	11.579	17.116	5.537

De acuerdo a los resultados obtenidos en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3, se puede afirmar que:

- Los resultados muestran que la fibra DSF es la que peor desempeño presenta en cuanto a la máxima distancia alcanzada sin compensación de dispersión, cuando el sistema se optimiza para el peor caso ( $BER = 10^{-9}$  o Factor  $Q = 6$ ), independientemente de la velocidad de transmisión de datos (2.5 o 10 Gbps) y de la ventana de operación (1310 o 1550 nm), debido a su alta constante de atenuación en comparación con la fibras SMF-28 y MetroCor.
- La fibra SMF-28 es la que mejor desempeño presenta en la ventana de 1310 nm, independiente de la velocidad de transmisión de datos (2.5 o 10 Gbps), debido a su baja constante de atenuación y al pequeño valor absoluto de su constante de dispersión.
- La fibra MetroCor es la que mejor desempeño presenta en la ventana de 1550 nm, independiente de la velocidad de transmisión de datos (2.5 o 10 Gbps), debido a su baja constante de atenuación y al pequeño valor absoluto de su constante de dispersión.
- Cuando la velocidad de transmisión de datos se incrementa de 2.5 Gbps a 10 Gbps, se observa una penalidad en la máxima distancia alcanzada, que en promedio es de 11 Km para la ventana de 1310 nm y de 17 Km para 1550 nm independientemente del tipo de fibra (SMF-28, DSF, MetroCor); lo anterior se debe principalmente a los efectos de la dispersión cromática que degradan significativamente el desempeño del sistema, manteniendo constante las condiciones del sistema (peor caso). Además, el promedio de la variación de la diferencia de distancias entre las ventanas de 1310 nm y de 1550 nm, para una misma fibra, es de 5 Km.
- Como el sistema está optimizado para el peor caso ( $BER=10^{-9}$  o Factor  $Q=6$ ), el parámetro de medida que esta variando sustancialmente es la distancia máxima alcanzada sin compensación de dispersión, por que los demás parámetros (PRxo, No, OSNR, PRxe, Ne, ESNR) están condicionados a la calidad del sistema, y por lo tanto están variando de forma mínima en torno a un valor determinado.

De esta manera, con el fin de realizar un monitoreo completo del canal óptico (todo el espectro óptico) en el dominio del tiempo (DT) y de la frecuencia (DF), para los casos de una sola portadora (sin multiplexación) y para varias portadoras (con multiplexación), se trabaja solamente con las fibras SMF- 28 y MetroCor que son las que mejor desempeño presentan, quedando la fibra DSF descartada ya que no es apropiada para WDM según la recomendación ITU-T G.653.

A continuación se muestran las tablas 4.4 – 4.11 donde se encuentran los resultados de monitoreo del OCh para todo el espectro óptico en CWDM (tablas 4.4 – 4.7) y en DWDM (tablas 4.8 – 4.11) con una sola portadora inyectada a la fibra óptica (es decir, sin multiplexación o portadoras no simultáneas), utilizando las fibras SMF-28 y MetroCor, con el fin de alcanzar la máxima distancia para obtener un factor Q de 6 ( $BER=10^{-9}$ ), cuando están presentes la dispersión cromática y la atenuación.

Tabla 4.4. Resultados de Monitoreo del OCh con la Fibra SMF-28 a 2,5 Gbps (CWDM no simultánea).

f (THz)	$\lambda$ (nm)	Ch	A (dB/Km)	D (ps/nm <sup>*</sup> Km)	PARÁMETROS DE MEDIDA								
					PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER (10 <sup>-10</sup> )	Q	X (Km)
232,2	1291	1	0,30	-1,915	-23,042	-153,675	130,63	-73,152	-90,767	17,616	9,829	6,001	62,341
228,7	1311	2	0,30	-0,089	-23,042	-153,657	130,61	-73,152	-90,767	17,616	9,882	6,000	62,341
225,2	1331	3	0,30	1,655	-23,040	-153,599	130,55	-73,148	-90,767	17,619	9,828	6,001	62,335
221,9	1351	4	0,35	3,324	-23,039	-153,612	130,57	-73,146	-90,767	17,621	9,809	6,001	53,427
218,7	1371	5	0,34	4,922	-23,039	-153,620	130,58	-73,145	-90,767	17,622	9,874	6,000	54,997
215,5	1391	6	0,33	6,454	-23,037	-153,624	130,58	-73,142	-90,767	17,626	9,851	6,000	56,658
212,5	1411	7	0,32	7,926	-23,035	-153,611	130,57	-73,138	-90,767	17,629	9,865	6,000	58,423
209,5	1431	8	0,31	9,342	-23,033	-153,622	130,58	-73,133	-90,767	17,634	9,869	6,000	60,300
206,6	1451	9	0,30	10,704	-23,030	-153,609	130,57	-73,129	-90,767	17,638	9,917	5,999	62,303
203,8	1471	10	0,25	12,017	-23,023	-153,606	130,58	-73,115	-90,768	17,652	9,898	5,999	74,736
201,1	1491	11	0,20	13,285	-23,011	-153,582	130,57	-73,091	-90,768	17,677	9,857	6,000	93,359
198,4	1511	12	0,20	14,509	-23,006	-153,574	130,56	-73,080	-90,768	17,688	9,871	6,000	93,332
195,8	1531	13	0,20	15,693	-22,999	-153,599	130,60	-73,068	-90,768	17,701	9,838	6,000	93,300
193,3	1551	14	0,20	16,840	-22,993	-153,605	130,61	-73,055	-90,768	17,714	9,843	6,000	93,268
190,8	1571	15	0,20	17,951	-22,987	-153,590	130,60	-73,042	-90,769	17,726	9,891	6,000	93,236
188,4	1591	16	0,25	19,030	-22,997	-153,605	130,60	-73,063	-90,768	17,706	9,871	6,000	74,629

Tabla 4.5. Resultados de Monitoreo del OCh con la Fibra SMF-28 a 10 Gbps (CWDM no simultánea).

f (THz)	$\lambda$ (nm)	Ch	A (dB/Km)	D (ps/nm <sup>*</sup> Km)	PARÁMETROS DE MEDIDA								
					PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER (10 <sup>-10</sup> )	Q	X (Km)
232,2	1291	1	0,30	-1,915	-20,162	-86,949	66,787	-67,122	-84,744	17,622	9,868	6,000	52,295
228,7	1311	2	0,30	-0,089	-20,171	-86,940	66,769	-67,139	-84,743	17,603	9,922	5,999	52,327
225,2	1331	3	0,30	1,655	-20,154	-86,928	66,774	-67,104	-84,743	17,639	9,813	6,001	52,268
221,9	1351	4	0,35	3,324	-20,131	-86,905	66,773	-67,061	-84,745	17,684	9,862	6,000	44,738
218,7	1371	5	0,34	4,922	-20,087	-86,862	66,775	-66,975	-84,746	17,772	9,881	6,000	45,924
215,5	1391	6	0,33	6,454	-20,031	-86,806	66,774	-66,866	-84,748	17,882	9,884	6,000	47,147
212,5	1411	7	0,32	7,926	-19,970	-86,742	66,772	-66,747	-84,747	17,999	9,894	6,000	48,428
209,5	1431	8	0,31	9,342	-19,894	-86,680	66,786	-66,601	-84,745	18,145	9,813	6,001	49,748
206,6	1451	9	0,30	10,704	-19,765	-86,536	66,770	-66,349	-84,744	18,395	9,807	6,001	50,976
203,8	1471	10	0,25	12,017	-19,496	-86,283	66,788	-65,830	-84,743	18,913	9,834	6,000	60,092
201,1	1491	11	0,20	13,285	-19,388	-86,183	66,795	-65,668	-84,737	19,069	9,911	5,999	74,576
198,4	1511	12	0,20	14,509	-19,220	-85,994	66,775	-65,358	-84,736	19,379	9,814	6,000	73,737
195,8	1531	13	0,20	15,693	-18,938	-85,721	66,784	-64,815	-84,737	19,922	9,815	6,000	72,327
193,3	1551	14	0,20	16,840	-18,533	-85,301	66,768	-64,023	-84,734	20,711	9,836	6,000	70,303
190,8	1571	15	0,20	17,951	-18,029	-84,799	66,770	-63,027	-84,727	21,700	9,834	6,000	67,783
188,4	1591	16	0,25	19,030	-18,761	-85,539	66,777	-64,472	-84,736	20,264	9,866	5,999	57,155

Tabla 4.6. Resultados de Monitoreo del OCh con la Fibra MetroCor a 2.5 Gbps (CWDM no simultánea).

f (THz)	$\lambda$ (nm)	Ch	A (dB/Km)	D (ps/nm* Km)	PARÁMETROS DE MEDIDA								
					PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER ( $10^{-10}$ )	Q	X (Km)
232,2	1291	1	0,35	-51,438	-23,013	-153,585	130,57	-73,098	-90,769	17,672	9,880	6,000	53,352
228,7	1311	2	0,35	-46,774	-23,017	-153,593	130,57	-73,105	-90,769	17,665	9,866	6,000	53,363
225,2	1331	3	0,35	-42,351	-23,020	-153,595	130,57	-73,112	-90,769	17,657	9,870	6,000	53,374
221,9	1351	4	0,40	-38,150	-23,029	-153,611	130,58	-73,129	-90,768	17,640	9,905	5,999	46,725
218,7	1371	5	0,39	-34,157	-23,031	-153,621	130,59	-73,132	-90,768	17,637	9,880	6,000	47,926
215,5	1391	6	0,38	-30,356	-23,033	-153,637	130,60	-73,135	-90,768	17,633	9,879	6,000	49,192
212,5	1411	7	0,37	-26,734	-23,035	-153,661	130,62	-73,139	-90,768	17,629	9,909	5,999	50,527
209,5	1431	8	0,36	-23,279	-23,035	-153,646	130,61	-73,139	-90,768	17,629	9,808	6,001	51,932
206,6	1451	9	0,35	-19,978	-23,037	-153,638	130,60	-73,144	-90,768	17,624	9,854	6,000	53,422
203,8	1471	10	0,30	-16,823	-23,037	-153,633	130,59	-73,143	-90,768	17,625	9,853	6,000	62,325
201,1	1491	11	0,25	-13,803	-23,037	-153,636	130,59	-73,144	-90,768	17,624	9,878	6,000	74,789
198,4	1511	12	0,20	-10,909	-23,036	-153,638	130,60	-73,142	-90,768	17,626	9,831	6,001	93,481
195,8	1531	13	0,20	-8,134	-23,040	-153,640	130,60	-73,150	-90,768	17,618	9,898	5,999	93,503
193,3	1551	14	0,20	-5,469	-23,042	-153,651	130,60	-73,153	-90,768	17,614	9,886	6,000	93,514
190,8	1571	15	0,20	-2,909	-23,042	-153,661	130,61	-73,153	-90,767	17,614	9,818	6,001	93,514
188,4	1591	16	0,20	-0,445	-23,042	-153,757	130,71	-73,153	-90,767	17,615	9,894	6,000	93,514

Tabla 4.7. Resultados de Monitoreo del OCh con la Fibra MetroCor a 10 Gbps (CWDM no simultánea).

f (THz)	$\lambda$ (nm)	Ch	A (dB/Km)	D (ps/nm* Km)	PARÁMETROS DE MEDIDA								
					PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER ( $10^{-10}$ )	Q	X (Km)
232,2	1291	1	0,35	-51,438	-17,291	-84,093	66,802	-61,589	-84,721	23,132	9,812	6,001	36,620
228,7	1311	2	0,35	-46,774	-17,741	-84,542	66,801	-62,480	-84,725	22,246	9,846	6,000	37,905
225,2	1331	3	0,35	-42,351	-18,168	-84,967	66,799	-63,324	-84,730	21,406	9,881	5,999	39,125
221,9	1351	4	0,40	-38,150	-19,062	-85,851	66,789	-65,073	-84,736	19,663	9,815	6,000	36,471
218,7	1371	5	0,39	-34,157	-19,191	-85,978	66,786	-65,318	-84,735	19,416	9,855	6,000	37,737
215,5	1391	6	0,38	-30,356	-19,299	-86,085	66,786	-65,519	-84,735	19,215	9,843	6,000	39,013
212,5	1411	7	0,37	-26,734	-19,387	-86,175	66,788	-65,680	-84,736	19,057	9,826	6,001	40,305
209,5	1431	8	0,36	-23,279	-19,467	-86,237	66,770	-65,822	-84,738	18,916	9,915	5,999	41,646
206,6	1451	9	0,35	-19,978	-19,499	-86,285	66,786	-65,869	-84,741	18,872	9,872	6,000	42,928
203,8	1471	10	0,30	-16,823	-19,499	-86,281	66,782	-65,873	-84,741	18,868	9,839	6,000	50,084
201,1	1491	11	0,25	-13,803	-19,500	-86,300	66,799	-65,878	-84,740	18,863	9,875	6,000	60,103
198,4	1511	12	0,20	-10,909	-19,499	-86,287	66,788	-65,880	-84,740	18,860	9,910	5,999	75,121
195,8	1531	13	0,20	-8,134	-19,568	-86,367	66,799	-65,982	-84,744	18,762	9,849	6,000	75,468
193,3	1551	14	0,20	-5,469	-19,896	-86,694	66,798	-66,614	-84,746	18,131	9,918	5,999	77,107
190,8	1571	15	0,20	-2,909	-20,069	-86,875	66,806	-66,945	-84,748	17,803	9,868	6,000	77,972
188,4	1591	16	0,20	-0,445	-20,169	-86,925	66,756	-67,134	-84,743	17,609	9,923	5,999	78,474

Tabla 4.8. Resultados de Monitoreo del OCh con la Fibra SMF-28 a 2,5 Gbps (DWDM no simultánea).

f(THz)	$\lambda$ (nm)	Ch	A (dB/Km)	D (ps/nm* Km)	PARÁMETROS DE MEDIDA								
					PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER ( $10^{-10}$ )	Q	X (Km)
193,9	1546,119	1	0,2	16,564	-22,995	-153,602	130,607	-73,059	-90,768	17,709	9,882	6,000	93,279
193,8	1546,917	2	0,2	16,609	-22,995	-153,607	130,612	-73,059	-90,768	17,709	9,903	5,999	93,279
193,7	1547,715	3	0,2	16,654	-22,995	-153,600	130,605	-73,059	-90,768	17,709	9,924	5,999	93,279
193,6	1548,515	4	0,2	16,700	-22,994	-153,607	130,613	-73,057	-90,768	17,711	9,861	6,000	93,273
193,5	1549,315	5	0,2	16,745	-22,994	-153,605	130,611	-73,057	-90,768	17,711	9,882	6,000	93,273
193,4	1550,116	6	0,2	16,790	-22,993	-153,604	130,611	-73,055	-90,768	17,714	9,820	6,001	93,268
193,3	1550,918	7	0,2	16,835	-22,993	-153,603	130,611	-73,055	-90,768	17,714	9,841	6,000	93,268
193,2	1551,721	8	0,2	16,881	-22,993	-153,606	130,613	-73,055	-90,768	17,714	9,862	6,000	93,268
193,1	1552,524	9	0,2	16,926	-22,993	-153,603	130,610	-73,055	-90,768	17,714	9,883	6,000	93,268
193,0	1553,329	10	0,2	16,971	-22,993	-153,606	130,613	-73,055	-90,768	17,714	9,904	5,999	93,268
192,9	1554,134	11	0,2	17,016	-22,993	-153,607	130,614	-73,055	-90,768	17,714	9,925	5,999	93,268
192,8	1554,940	12	0,2	17,062	-22,992	-153,609	130,617	-73,053	-90,768	17,716	9,864	6,000	93,263
192,7	1555,747	13	0,2	17,107	-22,992	-153,602	130,610	-73,053	-90,768	17,716	9,885	6,000	93,263
192,6	1556,555	14	0,2	17,152	-22,991	-153,604	130,613	-73,051	-90,768	17,718	9,824	6,001	93,257
192,5	1557,363	15	0,2	17,197	-22,991	-153,600	130,609	-73,051	-90,768	17,718	9,846	6,000	93,257
192,4	1558,173	16	0,2	17,243	-22,991	-153,598	130,607	-73,051	-90,768	17,718	9,868	6,000	93,257

Tabla 4.9. Resultados de Monitoreo del OCh con la Fibra SMF-28 a 10 Gbps (DWDM no simultánea).

f(THz)	$\lambda$ (nm)	Ch	A (dB/Km)	D (ps/nm* Km)	PARÁMETROS DE MEDIDA								
					PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER ( $10^{-10}$ )	Q	X (Km)
193,9	1546,119	1	0,2	16,564	-18,644	-85,416	66,772	-64,241	-84,735	20,494	9,823	6,000	70,859
193,8	1546,917	2	0,2	16,609	-18,627	-85,399	66,772	-64,208	-84,735	20,528	9,881	5,999	70,773
193,7	1547,715	3	0,2	16,654	-18,608	-85,379	66,771	-64,170	-84,735	20,565	9,772	6,001	70,677
193,6	1548,515	4	0,2	16,700	-18,591	-85,361	66,771	-64,136	-84,735	20,598	9,863	5,999	70,592
193,5	1549,315	5	0,2	16,745	-18,572	-85,341	66,770	-64,098	-84,734	20,636	9,785	6,001	70,496
193,4	1550,116	6	0,2	16,790	-18,553	-85,322	66,769	-64,063	-84,734	20,671	9,813	6,000	70,405
193,3	1550,918	7	0,2	16,835	-18,535	-85,304	66,768	-64,027	-84,734	20,707	9,855	6,000	70,314
193,2	1551,721	8	0,2	16,881	-18,516	-85,284	66,768	-63,989	-84,733	20,745	9,820	6,000	70,218
193,1	1552,524	9	0,2	16,926	-18,497	-85,265	66,768	-63,951	-84,733	20,782	9,796	6,001	70,122
193	1553,329	10	0,2	16,971	-18,478	-85,245	66,768	-63,913	-84,733	20,820	9,789	6,001	70,026
192,9	1554,134	11	0,2	17,016	-18,458	-85,226	66,768	-63,875	-84,733	20,857	9,793	6,001	69,930
192,8	1554,940	12	0,2	17,062	-18,439	-85,207	66,768	-63,837	-84,732	20,895	9,811	6,000	69,833
192,7	1555,747	13	0,2	17,107	-18,420	-85,188	66,768	-63,800	-84,732	20,933	9,841	6,000	69,737
192,6	1556,555	14	0,2	17,152	-18,401	-85,168	66,767	-63,762	-84,732	20,970	9,883	5,999	69,641
192,5	1557,363	15	0,2	17,197	-18,380	-85,147	66,767	-63,722	-84,731	21,010	9,844	6,000	69,540
192,4	1558,173	16	0,2	17,243	-18,360	-85,126	66,766	-63,682	-84,731	21,050	9,820	6,000	69,438

Tabla 4.10. Resultados de Monitoreo del OCh con la Fibra MetroCor a 2.5 Gbps (DWDM no simultánea).

f(THz)	$\lambda$ (nm)	Ch	A (dB/Km)	D (ps/nm* Km)	PARÁMETROS DE MEDIDA								
					PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER ( $10^{-10}$ )	Q	X (Km)
193,9	1546,119	1	0,2	-6,110	-23,042	-153,648	130,606	-73,154	-90,768	17,614	9,920	5,999	93,514
193,8	1546,917	2	0,2	-6,005	-23,042	-153,649	130,606	-73,154	-90,768	17,614	9,910	5,999	93,514
193,7	1547,715	3	0,2	-5,900	-23,042	-153,645	130,602	-73,154	-90,768	17,614	9,910	5,999	93,514
193,6	1548,515	4	0,2	-5,795	-23,042	-153,646	130,603	-73,154	-90,768	17,614	9,900	5,999	93,514
193,5	1549,315	5	0,2	-5,690	-23,042	-153,646	130,604	-73,154	-90,768	17,614	9,900	5,999	93,514
193,4	1550,116	6	0,2	-5,585	-23,042	-153,646	130,604	-73,153	-90,768	17,614	9,890	6,000	93,514
193,3	1550,918	7	0,2	-5,480	-23,042	-153,647	130,605	-73,153	-90,768	17,614	9,890	6,000	93,514
193,2	1551,721	8	0,2	-5,375	-23,042	-153,652	130,610	-73,153	-90,768	17,614	9,880	6,000	93,514
193,1	1552,524	9	0,2	-5,271	-23,042	-153,654	130,611	-73,153	-90,767	17,614	9,880	6,000	93,514
193,0	1553,329	10	0,2	-5,166	-23,042	-153,654	130,611	-73,153	-90,767	17,614	9,870	6,000	93,514
192,9	1554,134	11	0,2	-5,061	-23,042	-153,654	130,612	-73,153	-90,767	17,614	9,870	6,000	93,514
192,8	1554,940	12	0,2	-4,957	-23,042	-153,649	130,607	-73,153	-90,767	17,614	9,860	6,000	93,514
192,7	1555,747	13	0,2	-4,852	-23,042	-153,650	130,608	-73,153	-90,767	17,614	9,860	6,000	93,514
192,6	1556,555	14	0,2	-4,748	-23,042	-153,648	130,606	-73,153	-90,767	17,614	9,850	6,000	93,514
192,5	1557,363	15	0,2	-4,644	-23,042	-153,651	130,609	-73,153	-90,767	17,614	9,850	6,000	93,514
192,4	1558,173	16	0,2	-4,539	-23,042	-153,651	130,609	-73,153	-90,767	17,614	9,850	6,000	93,514

Tabla 4.11. Resultados de Monitoreo del OCh con la Fibra MetroCor a 10 Gbps (DWDM no simultánea).

f(THz)	$\lambda$ (nm)	Ch	A (dB/Km)	D (ps/nm* Km)	PARÁMETROS DE MEDIDA								
					PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER ( $10^{-10}$ )	Q	X (Km)
193,9	1546,119	1	0,2	-6,110	-19,821	-86,621	66,800	-66,469	-84,745	18,275	9,808	6,001	76,733
193,8	1546,917	2	0,2	-6,005	-19,835	-86,633	66,798	-66,496	-84,745	18,249	9,866	6,000	76,803
193,7	1547,715	3	0,2	-5,900	-19,848	-86,644	66,796	-66,521	-84,745	18,224	9,873	6,000	76,867
193,6	1548,515	4	0,2	-5,795	-19,860	-86,654	66,794	-66,544	-84,745	18,201	9,830	6,001	76,926
193,5	1549,315	5	0,2	-5,690	-19,873	-86,666	66,794	-66,569	-84,745	18,177	9,905	5,999	76,990
193,4	1550,116	6	0,2	-5,585	-19,883	-86,678	66,795	-66,589	-84,745	18,156	9,853	6,000	77,043
193,3	1550,918	7	0,2	-5,480	-19,894	-86,691	66,797	-66,610	-84,745	18,136	9,838	6,000	77,097
193,2	1551,721	8	0,2	-5,375	-19,905	-86,705	66,800	-66,631	-84,746	18,115	9,860	6,000	77,150
193,1	1552,524	9	0,2	-5,271	-19,915	-86,719	66,803	-66,651	-84,746	18,094	9,921	5,999	77,203
193,0	1553,329	10	0,2	-5,166	-19,924	-86,729	66,805	-66,668	-84,746	18,078	9,854	6,000	77,246
192,9	1554,134	11	0,2	-5,061	-19,932	-86,738	66,805	-66,684	-84,746	18,062	9,823	6,001	77,289
192,8	1554,940	12	0,2	-4,957	-19,941	-86,745	66,804	-66,700	-84,746	18,045	9,824	6,001	77,332
192,7	1555,747	13	0,2	-4,852	-19,950	-86,752	66,803	-66,717	-84,746	18,029	9,861	6,000	77,374
192,6	1556,555	14	0,2	-4,748	-19,957	-86,758	66,801	-66,731	-84,746	18,015	9,854	6,000	77,412
192,5	1557,363	15	0,2	-4,644	-19,964	-86,764	66,800	-66,746	-84,746	18,000	9,884	6,000	77,449
192,4	1558,173	16	0,2	-4,539	-19,971	-86,770	66,799	-66,758	-84,746	17,988	9,865	6,000	77,481

Las distancias que se muestran en las tablas 4.12 y 4.13 sirven de referencia en el resto de las simulaciones, es decir, para la multiplexación de 2, 4, 8 y 16 canales empleando las fibras SMF-28 y MetroCor a velocidades de transmisión de datos de 2.5 Gbps y 10 Gbps.

Tabla 4.12. Distancias obtenidas para el canal simple (CWDM no simultánea).

<i>CWDM</i>	Xmax (Km)	Xmin (Km)	Xpro (Km)	Delta (Km)	% var (%)
<b>SMF-28 a 2.5 Gbps</b>	93.359	53.427	73.393	39.932	42.773
<b>SMF-28 a 10 Gbps</b>	74.576	44.738	59.657	29.838	40.010
<b>MetroCor a 2.5 Gbps</b>	93.514	46.725	70.120	46.789	50.034
<b>MetroCor a 10 Gbps</b>	78.474	36.471	57.473	42.003	53.525

Tabla 4.13. Distancias obtenidas para el canal simple (DWDM no simultánea).

<i>DWDM</i>	Xmax (Km)	Xmin (Km)	Xpro (Km)	Delta (Km)	% var (%)
<b>SMF-28 a 2.5 Gbps</b>	93.279	93.257	93.268	0.022	0.024
<b>SMF-28 a 10 Gbps</b>	70.859	69.438	70.149	1.421	2.005
<b>MetroCor a 2.5 Gbps</b>	93.514	93.514	93.514	0	0.000
<b>MetroCor a 10 Gbps</b>	77.481	76.733	77.107	0.748	0.965

De acuerdo con la información presentada en las tablas 4.4 – 4.7 (CWDM), 4.8 – 4.11 (DWDM), 4.12 y 4.13, se puede afirmar que:

- Los resultados de monitoreo son evidentes al obtener los valores de los parámetros de medida tanto en el dominio de la frecuencia (PRxo, No, OSNR, PRxe, Ne, ESNR) como en el dominio del tiempo (BER, Factor Q). Lo que se busca cuando se trabaja sin multiplexación (canal simple) es encontrar la máxima distancia de transmisión alcanzada para un factor Q igual o mayor a 6, lo que equivale a una BER igual o menor a  $10^{-9}$  (correspondiente al peor caso).
- Es importante resaltar que, si se busca el peor caso de desempeño de la red ( $Q=6$ ), la distancia alcanzada es mínima cuando la constante de atenuación es máxima y/o cuando el valor absoluto de la constante de dispersión es máximo; en cambio, la distancia alcanzada es máxima cuando la constante de atenuación es mínima y/o cuando el valor absoluto de la constante de dispersión es mínimo. Además, para CWDM, la distancia máxima alcanzada depende de la dispersión y de la atenuación, en 2.5 Gbps y 10 Gbps. Para DWDM, la distancia máxima alcanzada también depende de la atenuación y de la dispersión, pero generalmente a 2.5 Gbps la atenuación es la que limita la distancia máxima alcanzada; y por otro lado, generalmente a 10 Gbps la dispersión es la que limita la distancia máxima alcanzada.

#### 4.2.2 Escenarios de Simulación con Multiplexación WDM

De acuerdo a los resultados anteriormente obtenidos (tablas 4.1 - 4.13) para el caso de un canal simple (sin multiplexación), se definen tres rangos de distancias para cada tabla (máxima, promedio, y mínima), las cuales se usan como referencia para realizar de una forma análoga un monitoreo completo del canal óptico tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, con el fin de adquirir los resultados de los escenarios de simulación correspondientes al caso de la multiplexación WDM (2, 4, 8, y 16 canales). Para una red metropolitana en el contexto actual es suficiente operar máximo con 16 canales tanto en CWDM como en DWDM; aunque todo depende de la cantidad de información que se requiera transportar, para lo cual se podría aumentar el número de canales y/o la velocidad de transmisión de datos (incrementar la capacidad de información).

Además, cabe notar que los parámetros de simulación (longitud de onda ( $\lambda$ ), identificador del canal (Ch), constante de atenuación (A) y constante de dispersión (D)) usados en los escenarios sin multiplexación WDM para la fibra SMF-28 y MetroCor se mantienen constantes para que puedan usarse dentro de estos escenarios con multiplexación WDM (CWDM simultánea y DWDM simultánea), los cuales constan de varias portadoras inyectadas a la fibra al mismo tiempo, las cuales van tomando valores dentro de todo el espectro óptico para CWDM y dentro de la ventana de 1550 nm para DWDM; de igual manera se varía el tipo de fibra óptica (SMF-28 y MetroCor), la velocidad de transmisión de datos (2.5 Gbps y 10 Gbps), el número de longitudes de onda (canales), para luego proceder a observar y analizar los parámetros de medida de acuerdo a los resultados obtenidos (OSNR, BER, Factor Q, Distancia Máxima de Transmisión, etc.). Es importante aclarar que el modelo correspondiente a estos escenarios es general para cualquier tipo de fibra, velocidad de transmisión de datos y número de longitudes de onda asignadas por el plan de frecuencias que se muestra en la tabla 4.14.

**Tabla 4.14. Distribución de Canales simultáneos para multiplexación WDM.**

MULTIPLEXACIÓN WDM				CWDM	DWDM	
Distribución de Canales (chs) simultáneos				Ch #	$\lambda$ (nm)	$\lambda$ (nm)
2 chs				1	1291	1546.119
				2	1311	1546.917
4 chs				3	1331	1547.715
				4	1351	1548.515
				5	1371	1549.315
				6	1391	1550.116
8 chs				7	1411	1550.918
				8	1431	1551.721
				9	1451	1552.524
				10	1471	1553.329
				11	1491	1554.134
				12	1511	1554.590
				13	1531	1555.747
				14	1551	1556.555
16 chs				15	1571	1557.363
				16	1591	1558.173

La tabla 4.14 muestra la distribución de los canales cuando se escala el número de los mismos; es decir cuando se inyecten a la fibra simultáneamente: 2 canales (ch #1 – ch #2), 4 canales (ch #1 – ch #4), 8 canales (ch #1 – ch #8) y 16 canales (ch #1 – ch #16).

Otro aspecto para tener presente es que con el fin de definir el modelo general para los escenarios con multiplexación, este se divide en tres partes: subsistema de transmisión (figura 4.104), subsistema de OCh (figura 4.105) y subsistema de recepción (figura 4.106). Allí se muestra el caso particular de una fibra MetroCor, a 10 Gbps empleando esquema DWDM con dos canales simultáneos (ch 1 y ch 2).

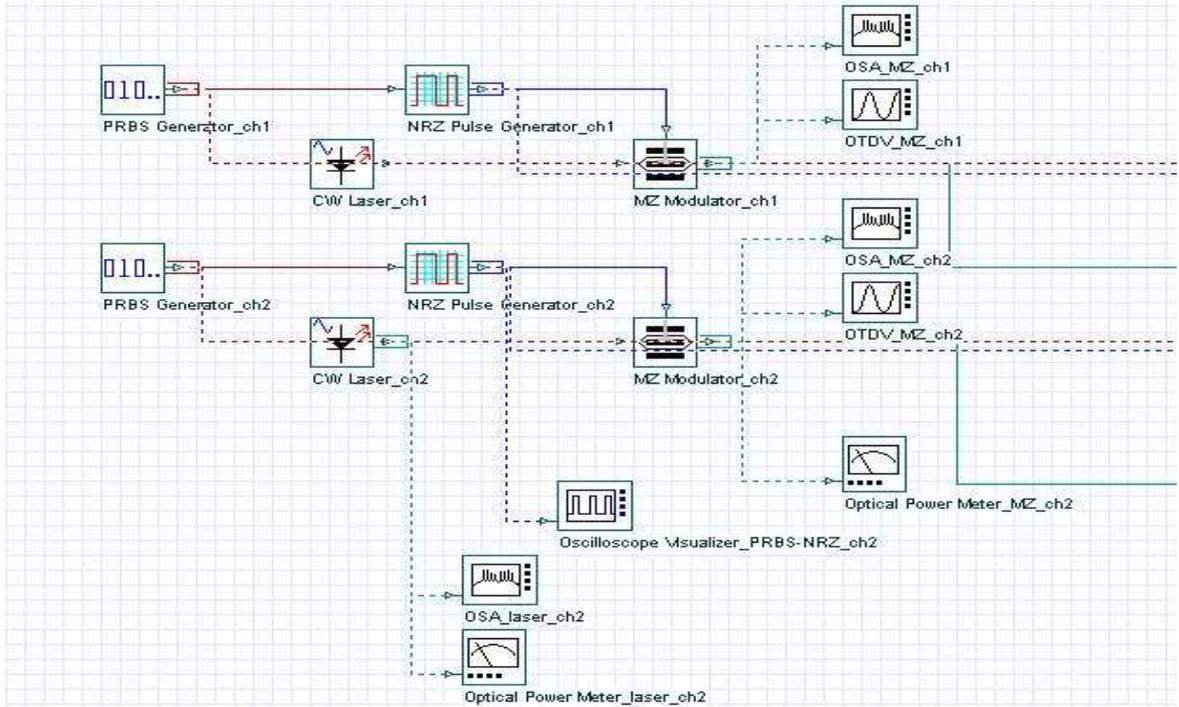


Figura 4.104. Modelo General de Red. Subsistema de Transmisión.

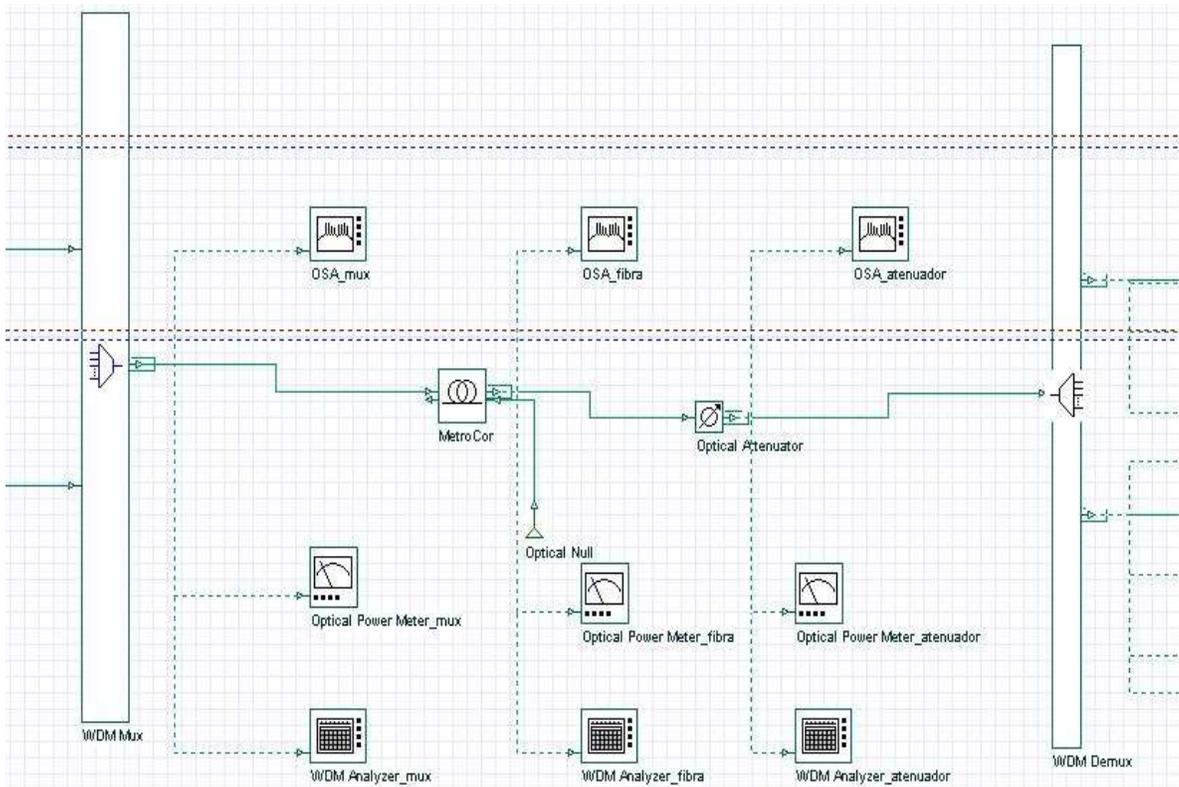


Figura 4.105. Modelo General de Red. Subsistema de OCh.

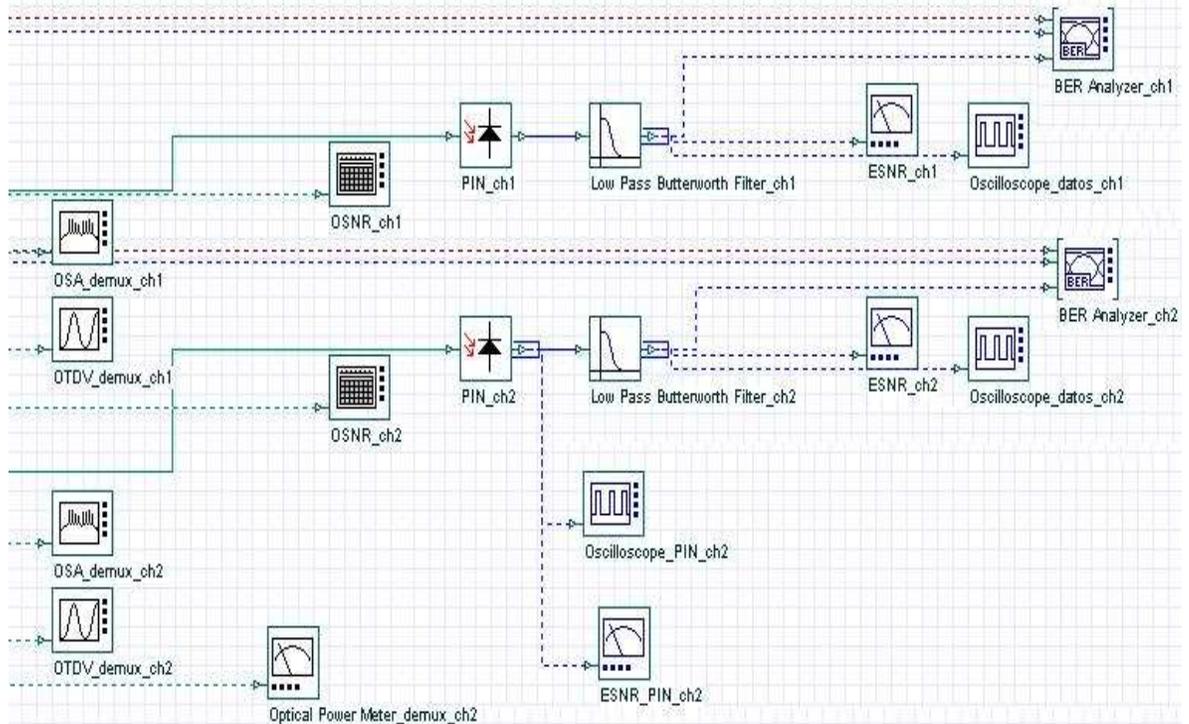


Figura 4.106. Modelo General de Red. Subsistema de Recepción.

A continuación se muestran los resultados totales correspondientes a las pruebas realizadas para el caso de la multiplexación WDM. Se empieza con 2 canales, indicando los resultados de las fibras SMF-28 y MetroCor a 2.5 y 10 Gbps con CWDM y DWDM para el monitoreo respectivo variando al distancia de transmisión ( $X_{\text{mínima}}$ ,  $X_{\text{promedio}}$  y  $X_{\text{máxima}}$ ), pasando de manera similar al mismo proceso con 4, 8 y 16 canales, como se observa en las tablas 4.15 - 4.46. Al finalizar se extraen algunas conclusiones generales.

#### 4.2.2.1 CWDM simultánea

##### 4.2.2.1.1 Dos canales CWDM

Tabla 4.15. Resultados de la multiplexación de 2 canales CWDM (SMF-28 a 2.5 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
<b>ch1 - ch2 (<math>X_{\text{min}}</math>)</b>								
-20.374	-151.035	130.661	-67.829	-90.773	22.944	1.410E-27	10.818	53.427
-20.302	-150.580	130.279	-67.749	-90.930	23.180	1.376E-29	11.235	53.427
<b>ch1 - ch2 (<math>X_{\text{pro}}</math>)</b>								
-26.364	-157.028	130.664	-79.794	-90.757	10.963	2.787E-03	2.772	73.393
-26.291	-156.570	130.279	-79.715	-90.973	11.258	3.969E-04	3.355	73.393
<b>ch1 - ch2 (<math>X_{\text{max}}</math>)</b>								
-32.353	-163.015	130.661	-91.717	-90.751	-0.965	1.000E+00	0.000	93.359
-32.281	-162.562	130.281	-91.637	-90.984	-0.653	1.000E+00	0.000	93.359

Analizando los resultados de la tabla 4.15, se puede observar que la potencia óptica y el ruido óptico en recepción tienen una caída aproximada de 6 dB al aumentar la distancia (de mínima a promedio, y de ésta a la máxima), manteniéndose la OSNR casi constante.

El ruido eléctrico introducido por el PIN es constante para todas las distancias, mientras la potencia eléctrica en recepción tiene una penalidad aproximadamente de 12 dB, por tanto la relación señal a ruido eléctrica se ve comprometida, teniendo como valor promedio 11dB.

**Tabla 4.16. Resultados de la multiplexación de 2 canales CWDM (SMF-28 a 10 Gbps).**

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
<b>ch1 - ch2 (Xmin)</b>								
-17.892	-84.531	66.639	-62.611	-84.722	22.111	8.879E-25	10.211	44.738
-17.829	-84.588	66.758	-62.530	-84.872	22.343	2.080E-25	10.351	44.738
<b>ch1 - ch2 (Xpro)</b>								
-22.368	-89.008	66.640	-71.558	-84.739	13.181	6.332E-05	3.829	59.657
-22.305	-89.062	66.757	-71.476	-84.927	13.451	1.150E-05	4.234	59.657
<b>ch1 - ch2 (Xmax)</b>								
-26.844	-93.484	66.640	-80.497	-84.778	4.281	1.000E+00	0.000	74.576
-26.781	-93.537	66.757	-80.414	-84.930	4.516	1.000E+00	0.000	74.576

**Tabla 4.17. Resultados de la multiplexación de 2 canales CWDM (MetroCor a 2.5 Gbps).**

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
<b>ch1 - ch2 (Xmin)</b>								
-20.700	-151.320	130.620	-68.484	-90.784	22.301	8.253E-26	10.438	46.725
-20.627	-150.887	130.259	-68.401	-90.930	22.528	1.533E-24	10.158	46.725
<b>ch1 - ch2 (Xpro)</b>								
-28.887	-159.506	130.619	-84.833	-90.778	5.944	1.000E+00	0.000	70.119
-28.815	-159.072	130.257	-84.750	-90.980	6.230	1.000E+00	0.000	70.119
<b>ch1 - ch2 (Xmax)</b>								
-37.076	-167.699	130.624	-100.000	-90.753	-9.247	1.000E+00	0.000	93.514
-37.004	-167.265	130.262	-100.000	-90.990	-9.010	1.000E+00	0.000	93.514

Como se puede observar en la tabla 4.17 la potencia óptica en recepción tiene una reducción aproximadamente de 8 dB a medida que aumenta la distancia (Xmin-Xpro-Xmax). También se puede ver que el ruido óptico disminuye aproximadamente en la misma proporción, y por ende la OSNR se mantiene casi constante.

Al observar el comportamiento de los parámetros eléctricos se nota que la potencia eléctrica en recepción tiene una reducción de 16 dB aproximadamente por aumento en la distancia, mientras el ruido eléctrico se mantiene constante para las diferentes distancias, esto se da por que el ruido eléctrico es introducido por el PIN y el comportamiento de este elemento es independiente de la distancia, teniendo estos resultados se calcula la ESNR y se nota una disminución con respecto a la OSNR.

También se puede observar una pequeña variación en los resultados del ruido óptico y eléctrico al cambiar la longitud de onda, por lo tanto se puede decir que tanto el ruido óptico como eléctrico dependen de las longitudes de onda usadas para la simulación, y obedecen a un comportamiento aleatorio.

Revisando los valores de BER se tiene que el único escenario con un óptimo comportamiento es el de la menor distancia, mientras los otros dos de distancia máxima y promedio se encuentran totalmente nulos en recepción, por tanto se puede decir que las distancias alcanzadas depende de la longitud de onda de transmisión ya que estas se ven afectadas de manera distinta por la atenuación y dispersión características intrínsecas de la fibra óptica.

Realizando una comparación entre el comportamiento de la fibra MetroCor y la SMF-28, la reducción que se observa en la fibra MetroCor para las longitudes de onda 1291 nm y 1311 nm es mayor respecto a la observada para la SMF-28, esto debido a que en promedio los parámetros como potencia en recepción, el ruido, tanto ópticos como eléctricos se ven más afectados que los que se presentan en la fibra óptica SMF-28. Como se nota este fenómeno se presenta en todas las distancias, y esto se da porque la fibra óptica de tipo MetroCor no ha sido diseñada para trabajar en la ventana de 1310 nm. Todo o anterior se refleja en los valores obtenidos para la BER y el factor Q.

**Tabla 4.18. Resultados de la multiplexación de 2 canales CWDM (MetroCor a 10 Gbps).**

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
<b>ch1 - ch2 (Xmin)</b>								
-17.236	-83.876	66.640	-61.507	-84.715	23.208	8.175E-10	6.030	36.471
-17.174	-83.950	66.777	-61.400	-84.905	23.505	2.420E-13	7.230	36.471
<b>ch1 - ch2 (Xpro)</b>								
-24.587	-91.225	66.639	-76.288	-84.749	8.460	1.000E+00	0.000	57.473
-24.524	-91.302	66.778	-76.185	-84.946	8.761	1.000E+00	0.000	57.473
<b>ch1 - ch2 (Xmax)</b>								
-31.937	-98.572	66.635	-90.987	-84.739	-6.249	1.000E+00	0.000	78.474
-31.874	-98.659	66.784	-90.877	-84.956	-5.921	1.000E+00	0.000	78.474

Si se observa detalladamente en las tablas 4.15 – 4.18, la OSNR permanece casi constante debido a que tanto la señal óptica como el ruido óptico varían en la misma proporción. Por su parte, la ESNR es variable porque la señal eléctrica varía, mientras el ruido eléctrico permanece casi constante.

Es pertinente decir que para 4, 8 y 16 canales (CWDM) los análisis de resultados son análogos a los mostrados anteriormente para 2 canales.

## 4.2.2.1.2 Cuatro canales CWDM

Tabla 4.19. Resultados de la multiplexación de 4 canales (SMF-28 a 2.5 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
ch1 - ch4 (Xmin)								
-20.374	-151.035	130.661	-67.829	-90.802	22.973	1.510E-29	11.227	53.427
-20.302	-150.584	130.283	-67.749	-90.919	23.170	5.943E-26	10.470	53.427
-20.455	-151.190	130.735	-67.935	-91.855	23.921	6.917E-38	12.813	53.427
-23.045	-153.768	130.723	-73.168	-90.930	17.762	2.504E-10	6.219	53.427
ch1 - ch4 (Xpro)								
-26.364	-157.026	130.663	-79.794	-90.754	10.959	1.937E-03	2.888	73.393
-26.291	-156.569	130.277	-79.715	-90.968	11.253	1.882E-03	2.897	73.393
-26.445	-157.182	130.738	-79.900	-91.863	11.964	2.884E-04	3.442	73.393
-30.033	-160.750	130.717	-87.108	-90.937	3.829	1.000E+00	0.000	73.393
ch1 - ch4 (Xmax)								
-32.354	-163.013	130.659	-91.717	-90.760	-0.957	1.000E+00	0.000	93.359
-32.281	-162.564	130.283	-91.637	-90.983	-0.655	1.000E+00	0.000	93.359
-32.434	-163.172	130.738	-91.822	-91.870	0.048	1.000E+00	0.000	93.359
-37.021	-167.740	130.719	-100.000	-90.935	-9.065	1.000E+00	0.000	93.359

Tabla 4.20. Resultados de la multiplexación de 4 canales CWDM (SMF-28 a 10 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
ch1 - ch4 (Xmin)								
-17.892	-84.528	66.636	-62.611	-84.709	22.098	1.143E-23	9.960	44.738
-17.829	-84.588	66.759	-62.530	-84.889	22.360	5.956E-23	9.794	44.738
-17.988	-84.540	66.552	-62.713	-85.773	23.060	1.619E-28	11.015	44.738
-20.135	-86.990	66.855	-67.085	-84.942	17.857	1.009E-10	6.359	44.738
ch1 - ch4 (Xpro)								
-22.368	-89.005	66.637	-71.558	-84.760	13.202	4.701E-05	3.905	59.657
-22.305	-89.063	66.758	-71.476	-84.941	13.465	5.961E-06	4.379	59.657
-22.464	-89.011	66.547	-71.660	-85.839	14.179	8.852E-06	4.292	59.657
-25.357	-92.205	66.848	-77.519	-84.916	7.397	3.324E-02	1.835	59.657
ch1 - ch4 (Xmax)								
-26.844	-93.484	66.640	-80.497	-84.733	4.235	1.000E+00	0.000	74.576
-26.781	-93.538	66.757	-80.414	-84.942	4.528	1.000E+00	0.000	74.576
-26.939	-93.490	66.551	-80.598	-85.846	5.248	1.000E+00	0.000	74.576
-30.578	-97.451	66.873	-87.930	-84.912	-3.017	1.000E+00	0.000	74.576

Tabla 4.21. Resultados de la multiplexación de 4 canales CWDM (MetroCor a 2.5 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
<b>ch1 - ch4 (Xmin)</b>								
-20.700	-151.314	130.614	-68.484	-90.727	22.243	1.141E-28	11.046	46.725
-20.627	-150.887	130.259	-68.401	-90.903	22.502	4.742E-23	9.817	46.725
-20.781	-151.552	130.772	-68.589	-91.863	23.273	2.842E-35	12.338	46.725
-23.036	-153.777	130.742	-73.149	-90.982	17.833	1.144E-10	6.340	46.725
<b>ch1 - ch4 (Xpro)</b>								
-28.887	-159.502	130.615	-84.833	-90.760	5.926	1.000E+00	0.000	70.119
-28.815	-159.071	130.256	-84.750	-90.978	6.228	1.000E+00	0.000	70.119
-28.968	-159.737	130.768	-84.939	-91.876	6.938	1.000E+00	0.000	70.119
-32.393	-163.131	130.738	-91.797	-90.934	-0.863	1.000E+00	0.000	70.119
<b>ch1 - ch4 (Xmax)</b>								
-37.076	-167.695	130.619	-100.000	-90.759	-9.241	1.000E+00	0.000	93.514
-37.004	-167.265	130.261	-100.000	-90.983	-9.017	1.000E+00	0.000	93.514
-37.157	-167.931	130.775	-100.000	-91.877	-8.123	1.000E+00	0.000	93.514
-41.751	-172.490	130.739	-100.000	-90.929	-9.071	1.000E+00	0.000	93.514

Tabla 4.22. Resultados de la multiplexación de 4 canales CWDM (MetroCor a 10 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
<b>ch1 - ch4 (Xmin)</b>								
-17.236	-83.878	66.642	-61.507	-84.707	23.200	1.077E-11	6.695	36.471
-17.174	-83.953	66.780	-61.400	-84.844	23.444	5.736E-11	6.446	36.471
-17.332	-83.896	66.563	-61.623	-85.775	24.152	2.934E-14	7.511	36.471
-19.066	-85.940	66.874	-65.101	-84.945	19.844	3.579E-10	6.162	36.471
<b>ch1 - ch4 (Xpro)</b>								
-24.587	-91.218	66.631	-76.288	-84.736	8.448	1.000E+00	0.000	57.473
-24.524	-91.298	66.773	-76.189	-84.939	8.751	1.000E+00	0.000	57.473
-24.683	-91.236	66.553	-76.460	-85.811	9.351	1.000E+00	0.000	57.473
-27.467	-94.347	66.880	-82.011	-84.929	2.917	1.000E+00	0.000	57.473
<b>ch1 - ch4 (Xmax)</b>								
-31.937	-98.561	66.624	-90.990	-84.734	-6.256	1.000E+00	0.000	78.474
-31.875	-98.660	66.785	-90.876	-84.956	-5.921	1.000E+00	0.000	78.474
-32.033	-98.581	66.548	-91.174	-85.847	-5.327	1.000E+00	0.000	78.474
-35.867	-102.752	66.885	-98.715	-84.915	-13.800	1.000E+00	0.000	78.474

## 4.2.2.1.3 Ocho canales CWDM

Tabla 4.23. Resultados de la multiplexación de 8 canales CWDM (SMF-28 a 2.5 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
ch1 - ch8 (Xmin)								
-20.374	-151.037	130.663	-67.829	-90.761	22.932	3.789E-30	11.348	53.427
-20.302	-150.582	130.281	-67.749	-90.983	23.234	1.779E-27	10.797	53.427
-20.455	-151.190	130.736	-67.935	-91.831	23.897	7.696E-34	12.069	53.427
-23.045	-153.764	130.719	-73.168	-90.924	17.756	1.786E-10	6.272	53.427
-22.743	-153.175	130.432	-72.373	-90.566	18.193	7.420E-11	6.406	53.427
-22.044	-152.833	130.789	-71.092	-90.522	19.430	6.872E-15	7.699	53.427
-21.443	-151.793	130.350	-69.966	-91.238	21.272	3.495E-20	9.128	53.427
-20.902	-151.485	130.583	-68.875	-91.502	22.627	9.023E-31	11.473	53.427
ch1 - ch8 (Xpro)								
-26.364	-157.028	130.664	-79.794	-90.775	10.981	2.228E-03	2.840	73.393
-26.291	-156.579	130.287	-79.715	-90.974	11.260	1.068E-03	3.068	73.393
-26.445	-157.190	130.746	-79.900	-91.851	11.951	2.425E-04	3.488	73.393
-30.033	-160.747	130.714	-87.108	-90.955	3.847	1.000E+00	0.000	73.393
-29.532	-159.972	130.440	-85.919	-90.638	4.718	1.000E+00	0.000	73.393
-28.633	-159.409	130.777	-84.245	-90.569	6.324	1.000E+00	0.000	73.393
-27.832	-158.185	130.354	-82.723	-91.267	8.544	1.000E+00	0.000	73.393
-27.091	-157.679	130.588	-81.237	-91.543	10.306	3.227E-03	2.723	73.393
ch1 - ch8 (Xmax)								
-32.354	-163.012	130.659	-91.717	-90.764	-0.953	1.000E+00	0.000	93.359
-32.281	-162.555	130.273	-91.637	-90.992	-0.645	1.000E+00	0.000	93.359
-32.434	-163.172	130.738	-91.822	-91.879	0.058	1.000E+00	0.000	93.359
-37.021	-167.742	130.721	-100.000	-90.937	-9.063	1.000E+00	0.000	93.359
-36.320	-166.760	130.439	-99.352	-90.639	-8.713	1.000E+00	0.000	93.359
-35.221	-166.016	130.795	-97.309	-90.554	-6.755	1.000E+00	0.000	93.359
-34.221	-164.573	130.352	-95.411	-91.251	-4.160	1.000E+00	0.000	93.359
-33.281	-163.870	130.589	-93.544	-91.546	-1.998	1.000E+00	0.000	93.359

Tabla 4.24. Resultados de la multiplexación de 8 canales CWDM (SMF-28 a 10 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
ch1 - ch8 (Xmin)								
-17.892	-84.530	66.638	-62.611	-84.632	22.021	1.840E-21	9.441	44.738
-17.829	-84.588	66.758	-62.530	-84.869	22.340	3.509E-26	10.519	44.738
-17.988	-84.541	66.553	-62.713	-85.780	23.066	7.010E-31	11.493	44.738
-20.135	-86.984	66.849	-67.085	-84.937	17.853	1.875E-11	6.613	44.738
-19.942	-86.266	66.325	-66.462	-84.609	18.148	2.332E-11	6.581	44.738
-19.305	-86.183	66.878	-65.358	-84.486	19.128	1.270E-12	7.001	44.738
-18.803	-85.465	66.662	-64.406	-85.261	20.856	1.307E-17	8.462	44.738
-18.342	-85.114	66.773	-63.494	-85.540	22.046	3.758E-21	9.366	44.738

ch1 - ch8 (Xpro)								
-22.368	-89.004	66.636	-71.558	-84.731	13.173	1.270E-04	3.658	59.657
-22.305	-89.062	66.757	-71.476	-84.910	13.434	4.194E-05	3.933	59.657
-22.464	-89.010	66.546	-71.660	-85.754	14.094	5.301E-06	4.404	59.657
-25.357	-92.215	66.858	-77.519	-84.931	7.412	1.000E+00	0.000	59.657
-25.014	-91.324	66.310	-76.600	-84.622	8.022	1.000E+00	0.000	59.657
-24.228	-91.114	66.886	-75.201	-84.520	9.319	6.317E-03	2.493	59.657
-23.577	-90.264	66.688	-73.952	-85.260	11.308	1.796E-03	2.910	59.657
-22.966	-89.751	66.784	-72.746	-85.502	12.756	3.266E-04	3.405	59.657
ch1 - ch8 (Xmax)								
-26.844	-93.490	66.647	-80.497	-84.761	4.263	1.000E+00	0.000	74.576
-26.781	-93.538	66.757	-80.414	-84.966	4.552	1.000E+00	0.000	74.576
-26.939	-93.484	66.545	-80.598	-85.802	5.204	1.000E+00	0.000	74.576
-30.578	-97.451	66.873	-87.930	-84.910	-3.020	1.000E+00	0.000	74.576
-30.086	-96.406	66.319	-86.718	-84.624	-2.094	1.000E+00	0.000	74.576
-29.151	-96.025	66.874	-85.027	-84.540	-0.488	1.000E+00	0.000	74.576
-28.351	-95.016	66.665	-83.488	-85.223	1.736	1.000E+00	0.000	74.576
-27.591	-94.372	66.781	-81.992	-85.539	3.548	1.000E+00	0.000	74.576

Tabla 4.25. Resultados de la multiplexación de 8 canales CWDM (MetroCor a 2.5 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
ch1 - ch8 (Xmin)								
-20.700	-151.314	130.615	-68.484	-90.686	22.202	8.559E-24	9.988	46.725
-20.627	-150.888	130.261	-68.401	-90.909	22.508	8.225E-30	11.280	46.725
-20.781	-151.553	130.772	-68.589	-91.841	23.251	6.706E-26	10.458	46.725
-23.036	-153.774	130.739	-73.149	-90.956	17.807	2.492E-11	6.569	46.725
-22.801	-153.246	130.445	-72.491	-90.618	18.127	1.081E-12	7.023	46.725
-22.168	-152.971	130.803	-71.343	-90.544	19.201	6.411E-13	7.096	46.725
-21.634	-152.001	130.367	-70.352	-91.245	20.894	7.058E-18	8.534	46.725
-21.161	-151.753	130.593	-69.393	-91.496	22.102	1.003E-23	9.973	46.725
ch1 - ch8 (Xpro)								
-28.887	-159.499	130.611	-84.834	-90.751	5.918	1.000E+00	0.000	70.119
-28.815	-159.063	130.248	-84.750	-90.981	6.232	1.000E+00	0.000	70.119
-28.968	-159.738	130.770	-84.939	-91.858	6.919	1.000E+00	0.000	70.119
-32.393	-163.129	130.736	-91.797	-90.939	-0.858	1.000E+00	0.000	70.119
-31.925	-162.372	130.447	-90.682	-90.635	-0.047	1.000E+00	0.000	70.119
-31.058	-161.854	130.796	-89.076	-90.553	1.477	1.000E+00	0.000	70.119
-30.290	-160.653	130.363	-87.624	-91.260	3.636	1.000E+00	0.000	70.119
-29.582	-160.186	130.603	-86.204	-91.558	5.354	1.000E+00	0.000	70.119
ch1 - ch8 (Xmax)								
-37.076	-167.694	130.618	-100.000	-90.752	-9.248	1.000E+00	0.000	93.514
-37.004	-167.270	130.266	-100.000	-90.985	-9.015	1.000E+00	0.000	93.514
-37.157	-167.935	130.778	-100.000	-91.866	-8.134	1.000E+00	0.000	93.514

-41.751	-172.497	130.746	-100.000	-90.933	-9.067	1.000E+00	0.000	93.514
-41.049	-171.496	130.448	-100.000	-90.645	-9.355	1.000E+00	0.000	93.514
-39.948	-170.740	130.791	-100.000	-90.557	-9.443	1.000E+00	0.000	93.514
-38.946	-169.317	130.371	-100.000	-91.260	-8.740	1.000E+00	0.000	93.514
-38.005	-168.606	130.602	-100.000	-91.558	-8.442	1.000E+00	0.000	93.514

Tabla 4.26. Resultados de la multiplexación de 8 canales CWDM (MetroCor a 10 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
<b>ch1 - ch8 (Xmin)</b>								
-17.236	-83.881	66.645	-61.507	-84.725	23.217	1.124E-10	6.343	36.471
-17.174	-83.959	66.785	-61.400	-84.845	23.445	7.378E-12	6.750	36.471
-17.333	-83.897	66.565	-61.623	-85.754	24.131	8.883E-16	7.956	36.471
-19.066	-85.936	66.870	-65.100	-84.934	19.833	4.145E-11	6.495	36.471
-18.956	-85.292	66.336	-64.650	-84.559	19.908	1.174E-13	7.327	36.471
-18.401	-85.298	66.897	-63.662	-84.535	20.873	7.660E-15	7.684	36.471
-17.982	-84.677	66.695	-62.856	-85.215	22.359	7.588E-20	9.043	36.471
-17.604	-84.399	66.795	-62.074	-85.358	23.284	4.894E-23	9.813	36.471
<b>ch1 - ch8 (Xpro)</b>								
-24.587	-91.225	66.638	-76.289	-84.738	8.449	1.000E+00	0.000	57.473
-24.524	-91.306	66.782	-76.187	-84.935	8.748	1.000E+00	0.000	57.473
-24.683	-91.240	66.557	-76.459	-85.851	9.393	1.000E+00	0.000	57.473
-27.467	-94.350	66.883	-82.010	-84.924	2.914	1.000E+00	0.000	57.473
-27.146	-93.476	66.330	-81.162	-84.609	3.448	1.000E+00	0.000	57.473
-26.382	-93.289	66.907	-79.735	-84.540	4.806	1.000E+00	0.000	57.473
-25.753	-92.446	66.693	-78.513	-85.223	6.710	1.000E+00	0.000	57.473
-25.164	-91.946	66.782	-77.286	-85.540	8.254	1.000E+00	0.000	57.473
<b>ch1 - ch8 (Xmax)</b>								
-31.937	-98.566	66.628	-90.987	-84.743	-6.244	1.000E+00	0.000	78.474
-31.875	-98.651	66.776	-90.875	-84.960	-5.915	1.000E+00	0.000	78.474
-32.033	-98.578	66.545	-91.175	-85.849	-5.326	1.000E+00	0.000	78.474
-35.868	-102.757	66.890	-98.718	-84.918	-13.800	1.000E+00	0.000	78.474
-35.336	-101.647	66.310	-97.481	-84.623	-12.858	1.000E+00	0.000	78.474
-34.362	-101.236	66.874	-95.656	-84.532	-11.124	1.000E+00	0.000	78.474
-33.523	-100.203	66.680	-94.047	-85.250	-8.797	1.000E+00	0.000	78.474
-32.725	-99.508	66.783	-92.412	-85.540	-6.872	1.000E+00	0.000	78.474

## 4.2.2.1.4 Dieciséis canales CWDM

Tabla 4.27. Resultados de la multiplexación de 16 canales CWDM (SMF-28 a 2.5 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
<b>ch1 - ch16 (Xmin)</b>								
-20.374	-151.041	130.667	-67.829	-90.752	22.923	1.330E-27	10.823	53.427
-20.302	-150.583	130.282	-67.749	-90.941	23.192	3.165E-32	11.759	53.427
-20.455	-151.182	130.727	-67.935	-91.830	23.895	1.763E-40	13.269	53.427
-23.045	-153.769	130.724	-73.168	-90.927	17.759	2.686E-11	6.560	53.427
-22.743	-153.175	130.432	-72.373	-90.587	18.214	5.072E-12	6.804	53.427
-22.044	-152.826	130.782	-71.092	-90.568	19.476	6.417E-14	7.408	53.427
-21.443	-151.792	130.349	-69.966	-91.254	21.288	4.102E-20	9.110	53.427
-21.057	-151.428	130.371	-69.061	-91.490	22.429	4.841E-26	10.489	53.427
-20.441	-150.731	130.290	-67.889	-91.349	23.460	1.589E-31	11.622	53.427
-17.770	-148.615	130.846	-62.548	-90.838	28.290	2.112E-96	20.801	53.427
-14.959	-145.741	130.782	-57.069	-91.404	34.335	3.385E-261	34.505	53.427
-15.031	-145.689	130.657	-57.149	-90.819	33.671	3.875E-202	30.313	53.427
-15.032	-145.620	130.588	-57.147	-91.718	34.571	1.078E-234	32.690	53.427
-14.959	-145.237	130.277	-57.068	-91.524	34.456	2.380E-256	34.180	53.427
-15.031	-145.546	130.515	-57.149	-91.871	34.722	2.944E-240	33.079	53.427
-17.696	-148.288	130.592	-62.467	-90.714	28.247	2.427E-78	18.701	53.427
<b>ch1 - ch16 (Xpro)</b>								
-26.364	-157.030	130.666	-79.794	-90.780	10.986	2.893E-03	2.760	73.393
-26.291	-156.573	130.282	-79.715	-90.978	11.263	1.240E-03	3.026	73.393
-26.445	-157.192	130.748	-79.900	-91.830	11.930	4.871E-04	3.298	73.393
-30.033	-160.753	130.720	-87.109	-90.940	3.832	1.000E+00	0.000	73.393
-29.532	-159.965	130.433	-85.919	-90.639	4.720	1.000E+00	0.000	73.393
-28.633	-159.414	130.781	-84.245	-90.555	6.310	1.000E+00	0.000	73.393
-27.832	-158.185	130.353	-82.723	-91.254	8.531	8.383E-03	2.391	73.393
-27.247	-157.629	130.382	-81.423	-91.530	10.107	3.816E-03	2.667	73.393
-26.431	-156.727	130.297	-79.854	-91.291	11.437	7.679E-04	3.168	73.393
-22.761	-153.607	130.846	-72.526	-90.866	18.340	7.266E-11	6.409	73.393
-18.952	-149.732	130.780	-65.053	-91.416	26.363	4.088E-64	16.865	73.393
-19.025	-149.681	130.657	-65.133	-90.987	25.854	5.260E-50	14.822	73.393
-19.025	-149.616	130.591	-65.130	-91.541	26.411	7.232E-58	15.992	73.393
-18.952	-149.232	130.279	-65.052	-91.584	26.532	8.899E-49	14.631	73.393
-19.025	-149.547	130.522	-65.133	-91.904	26.770	7.857E-68	17.363	73.393
-22.688	-153.273	130.585	-72.445	-90.748	18.303	1.973E-11	6.606	73.393
<b>ch1 - ch16 (Xmax)</b>								
-32.354	-163.012	130.659	-91.717	-90.757	-0.960	1.000E+00	0.000	93.359
-32.281	-162.549	130.267	-91.637	-90.982	-0.656	1.000E+00	0.000	93.359
-32.434	-163.169	130.735	-91.822	-91.871	0.049	1.000E+00	0.000	93.359
-37.021	-167.746	130.725	-100.000	-90.935	-9.065	1.000E+00	0.000	93.359
-36.320	-166.758	130.438	-99.352	-90.641	-8.711	1.000E+00	0.000	93.359

-35.221	-166.011	130.790	-97.309	-90.556	-6.753	1.000E+00	0.000	93.359
-34.221	-164.581	130.360	-95.411	-91.259	-4.152	1.000E+00	0.000	93.359
-33.436	-163.816	130.380	-93.729	-91.557	-2.173	1.000E+00	0.000	93.359
-32.420	-162.709	130.288	-91.776	-91.303	-0.474	1.000E+00	0.000	93.359
-27.753	-158.604	130.851	-82.491	-90.869	8.379	1.234E-02	2.240	93.359
-22.945	-153.728	130.782	-73.035	-91.314	18.279	2.316E-12	6.916	93.359
-23.018	-153.672	130.654	-73.114	-90.996	17.882	1.922E-11	6.610	93.359
-23.018	-153.604	130.585	-73.110	-91.614	18.504	9.977E-13	7.034	93.359
-22.946	-153.222	130.277	-73.034	-91.670	18.636	1.971E-11	6.605	93.359
-23.018	-153.529	130.512	-73.115	-91.944	18.830	6.875E-12	6.760	93.359
-27.679	-158.275	130.595	-82.411	-90.732	8.321	2.505E-02	1.959	93.359

Tabla 4.28. Resultados de la multiplexación de 16 canales CWDM (SMF-28 a 10 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
<b>ch1 - ch16 (Xmin)</b>								
-17.892	-84.524	66.631	-62.611	-84.740	22.129	3.930E-23	9.836	44.738
-17.829	-84.588	66.759	-62.530	-84.901	22.372	7.432E-27	10.664	44.738
-17.988	-84.533	66.545	-62.713	-85.796	23.083	8.237E-27	10.655	44.738
-20.135	-86.979	66.844	-67.085	-84.920	17.836	1.075E-11	6.696	44.738
-19.942	-86.266	66.324	-66.462	-84.595	18.133	3.150E-11	6.533	44.738
-19.304	-86.186	66.881	-65.358	-84.492	19.134	3.934E-13	7.161	44.738
-18.803	-85.464	66.661	-64.405	-85.185	20.779	1.275E-16	8.193	44.738
-18.509	-85.043	66.534	-63.679	-85.384	21.704	4.086E-19	8.857	44.738
-17.964	-84.790	66.826	-62.685	-85.294	22.608	3.955E-23	9.834	44.738
-15.730	-82.487	66.758	-58.218	-84.879	26.660	9.817E-31	11.463	44.738
-13.354	-80.209	66.855	-53.616	-85.313	31.697	3.674E-45	14.050	44.738
-13.404	-80.339	66.936	-53.707	-84.788	31.081	7.806E-44	13.829	44.738
-13.412	-80.269	66.857	-53.702	-85.539	31.836	2.457E-47	14.398	44.738
-13.353	-80.209	66.857	-53.645	-85.513	31.868	3.710E-42	13.554	44.738
-13.424	-80.104	66.680	-53.748	-85.736	31.988	3.773E-45	14.051	44.738
-15.657	-82.436	66.779	-58.208	-84.641	26.432	2.861E-40	13.232	44.738
<b>ch1 - ch16 (Xpro)</b>								
-22.341	-88.974	66.633	-71.504	-84.755	13.250	1.889E-04	3.555	59.567
-22.278	-89.035	66.757	-71.422	-84.910	13.488	5.207E-05	3.880	59.567
-22.437	-88.988	66.551	-71.606	-85.788	14.181	1.359E-05	4.196	59.567
-25.325	-92.184	66.859	-77.456	-84.906	7.449	1.000E+00	0.000	59.567
-24.984	-91.293	66.309	-76.538	-84.632	8.093	1.000E+00	0.000	59.567
-24.198	-91.089	66.891	-75.141	-84.537	9.396	5.601E-03	2.536	59.567
-23.548	-90.220	66.672	-73.894	-85.255	11.360	1.184E-03	3.040	59.567
-23.107	-89.648	66.541	-72.877	-85.485	12.608	1.363E-04	3.639	59.567
-22.412	-89.255	66.842	-71.591	-85.318	13.728	3.597E-05	3.970	59.567
-19.437	-86.196	66.759	-65.652	-84.827	19.175	2.067E-10	6.247	59.567
-16.319	-83.163	66.844	-59.575	-85.318	25.743	1.127E-27	10.838	59.567
-16.369	-83.275	66.906	-59.684	-84.896	25.212	6.041E-26	10.468	59.567

-16.377	-83.207	66.830	-59.688	-85.501	25.813	1.123E-25	10.409	59.567
-16.318	-83.179	66.861	-59.637	-85.528	25.891	5.131E-27	10.698	59.567
-16.389	-83.043	66.654	-59.748	-85.921	26.173	2.733E-21	9.400	59.567
-19.364	-86.147	66.783	-65.688	-84.815	19.127	6.760E-09	5.679	59.567
<b>ch1 - ch16 (Xmax)</b>								
-26.844	-93.492	66.648	-80.497	-84.731	4.233	1.000E+00	0.000	74.576
-26.781	-93.535	66.754	-80.414	-84.945	4.531	1.000E+00	0.000	74.576
-26.939	-93.494	66.555	-80.598	-85.817	5.219	1.000E+00	0.000	74.576
-30.578	-97.457	66.878	-87.929	-84.927	-3.002	1.000E+00	0.000	74.576
-30.086	-96.402	66.315	-86.718	-84.623	-2.096	1.000E+00	0.000	74.576
-29.151	-96.026	66.875	-85.028	-84.546	-0.482	1.000E+00	0.000	74.576
-28.351	-95.021	66.670	-83.488	-85.237	1.749	1.000E+00	0.000	74.576
-27.759	-94.306	66.547	-82.180	-85.546	3.367	1.000E+00	0.000	74.576
-26.915	-93.760	66.844	-80.606	-85.273	4.667	1.000E+00	0.000	74.576
-23.189	-89.957	66.768	-73.186	-84.851	11.665	1.738E-03	2.920	74.576
-19.321	-86.165	66.844	-65.617	-85.353	19.737	3.596E-12	6.854	74.576
-19.371	-86.326	66.955	-65.744	-84.937	19.194	5.489E-10	6.093	74.576
-19.379	-86.233	66.854	-65.753	-85.568	19.814	4.389E-10	6.130	74.576
-19.320	-86.158	66.838	-65.697	-85.569	19.873	3.673E-08	5.382	74.576
-19.391	-86.056	66.664	-65.806	-85.863	20.058	1.514E-07	5.121	74.576
-23.117	-89.885	66.769	-73.235	-84.720	11.485	1.290E-02	2.226	74.576

Tabla 4.29. Resultados de la multiplexación de 16 canales CWDM (MetroCor a 2.5 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
<b>ch1 - ch16 (Xmin)</b>								
-20.700	-151.310	130.611	-68.483	-90.751	22.268	1.038E-25	10.416	46.725
-20.627	-150.884	130.257	-68.402	-90.927	22.526	8.561E-28	10.864	46.725
-20.781	-151.536	130.756	-68.589	-91.814	23.224	5.849E-30	11.310	46.725
-23.036	-153.773	130.738	-73.149	-90.931	17.782	1.634E-10	6.285	46.725
-22.801	-153.243	130.442	-72.491	-90.624	18.133	1.509E-11	6.642	46.725
-22.168	-152.966	130.798	-71.343	-90.515	19.172	2.245E-13	7.239	46.725
-21.634	-151.997	130.363	-70.352	-91.234	20.882	4.921E-18	8.576	46.725
-21.316	-151.702	130.386	-69.580	-91.480	21.900	1.840E-23	9.912	46.725
-20.767	-151.069	130.302	-68.541	-91.275	22.734	1.335E-28	11.032	46.725
-18.430	-149.286	130.855	-63.870	-90.928	27.058	2.915E-60	16.332	46.725
-15.955	-146.756	130.801	-59.060	-91.284	32.225	1.604E-197	29.961	46.725
-13.691	-144.365	130.673	-54.469	-90.812	36.344	4.781E-296	36.755	46.725
-13.692	-144.288	130.597	-54.470	-91.482	37.011	0.000E+00	40.029	46.725
-13.619	-143.921	130.302	-54.388	-91.405	37.017	0.000E+00	39.261	46.725
-13.691	-144.230	130.539	-54.467	-91.662	37.195	0.000E+00	44.296	46.725
-13.685	-144.404	130.719	-54.445	-90.609	36.164	1.083E-253	34.000	46.725
<b>ch1 - ch16 (Xpro)</b>								
-28.888	-159.510	130.622	-84.834	-90.739	5.905	1.000E+00	0.000	70.119
-28.815	-159.065	130.249	-84.750	-90.974	6.224	1.000E+00	0.000	70.119

-28.968	-159.739	130.770	-84.939	-91.863	6.924	1.000E+00	0.000	70.119
-32.393	-163.127	130.734	-91.797	-90.930	-0.867	1.000E+00	0.000	70.119
-31.925	-162.370	130.445	-90.682	-90.628	-0.054	1.000E+00	0.000	70.119
-31.058	-161.851	130.793	-89.076	-90.551	1.475	1.000E+00	0.000	70.119
-30.290	-160.650	130.359	-87.624	-91.265	3.641	1.000E+00	0.000	70.119
-29.738	-160.125	130.387	-86.391	-91.571	5.181	1.000E+00	0.000	70.119
-28.954	-159.253	130.299	-84.889	-91.296	6.407	1.000E+00	0.000	70.119
-25.449	-156.301	130.852	-77.895	-90.870	12.975	2.821E-04	3.448	70.119
-21.804	-152.595	130.792	-70.752	-91.342	20.590	2.734E-21	9.399	70.119
-18.370	-149.040	130.670	-63.825	-90.951	27.126	5.743E-76	18.407	70.119
-18.371	-148.953	130.582	-63.827	-91.566	27.738	2.208E-81	19.070	70.119
-18.298	-148.593	130.296	-63.744	-91.600	27.856	1.714E-67	17.318	70.119
-18.370	-148.912	130.542	-63.823	-91.895	28.072	7.299E-87	19.720	70.119
-18.363	-149.063	130.699	-63.801	-90.766	26.965	6.929E-70	17.633	70.119
<b>ch1 - ch16 (Xmax)</b>								
-37.076	-167.698	130.622	-100.000	-90.753	-9.247	1.000E+00	0.000	93.514
-37.004	-167.257	130.254	-100.000	-90.990	-9.010	1.000E+00	0.000	93.514
-37.157	-167.929	130.772	-100.000	-91.870	-8.130	1.000E+00	0.000	93.514
-41.751	-172.499	130.747	-100.000	-90.929	-9.071	1.000E+00	0.000	93.514
-41.049	-171.488	130.439	-100.000	-90.645	-9.355	1.000E+00	0.000	93.514
-39.948	-170.749	130.801	-100.000	-90.558	-9.442	1.000E+00	0.000	93.514
-38.946	-169.321	130.374	-100.000	-91.251	-8.749	1.000E+00	0.000	93.514
-38.160	-168.543	130.383	-100.000	-91.560	-8.440	1.000E+00	0.000	93.514
-37.143	-167.450	130.308	-100.000	-91.312	-8.688	1.000E+00	0.000	93.514
-32.467	-163.322	130.855	-91.871	-90.877	-0.994	1.000E+00	0.000	93.514
-27.652	-158.450	130.798	-82.431	-91.322	8.892	1.000E+00	0.000	93.514
-23.049	-153.717	130.668	-73.177	-91.013	17.835	7.300E-10	6.048	93.514
-23.050	-153.663	130.614	-73.180	-91.628	18.448	2.473E-11	6.572	93.514
-22.977	-153.286	130.309	-73.097	-91.660	18.564	1.907E-12	6.944	93.514
-23.049	-153.602	130.553	-73.175	-91.955	18.780	1.696E-11	6.628	93.514
-23.042	-153.745	130.703	-73.153	-90.761	17.608	7.259E-10	6.049	93.514

Tabla 4.30. Resultados de la multiplexación de 16 canales CWDM (MetroCor a 10 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
<b>ch1 - ch16 (Xmin)</b>								
-17.237	-83.877	66.640	-61.509	-84.750	23.241	1.137E-09	5.977	36.471
-17.174	-83.937	66.763	-61.397	-84.873	23.475	4.887E-14	7.444	36.471
-17.333	-83.891	66.559	-61.623	-85.809	24.186	1.011E-14	7.648	36.471
-19.066	-85.913	66.847	-65.101	-84.927	19.826	1.457E-09	5.936	36.471
-18.956	-85.311	66.355	-64.651	-84.536	19.885	1.305E-12	6.997	36.471
-18.401	-85.291	66.889	-63.661	-84.515	20.854	1.780E-13	7.271	36.471
-17.982	-84.687	66.705	-62.857	-85.239	22.382	4.754E-20	9.094	36.471
-17.772	-84.294	66.523	-62.267	-85.495	23.227	1.431E-26	10.604	36.471

-17.309	-84.151	66.843	-61.411	-85.258	23.847	3.778E-25	10.291	36.471
-15.488	-82.244	66.756	-57.749	-84.824	27.075	3.262E-29	11.154	36.471
-13.526	-80.392	66.867	-53.951	-85.351	31.400	4.446E-64	16.852	36.471
-11.752	-78.693	66.941	-50.380	-84.788	34.409	7.603E-89	19.944	36.471
-11.761	-78.631	66.870	-50.382	-85.443	35.061	7.854E-167	27.501	36.471
-11.701	-78.578	66.877	-50.287	-85.321	35.034	1.758E-208	30.789	36.471
-11.772	-78.460	66.688	-50.360	-85.781	35.421	8.104E-272	35.206	36.471
-11.768	-78.499	66.731	-50.336	-84.581	34.245	2.052E-258	34.319	36.471
<b>ch1 - ch16 (Xpro)</b>								
-24.587	-91.216	66.629	-76.288	-84.718	8.430	1.000E+00	0.000	57.473
-24.525	-91.310	66.786	-76.183	-84.944	8.761	1.000E+00	0.000	57.473
-24.683	-91.246	66.563	-76.458	-85.811	9.353	1.000E+00	0.000	57.473
-27.467	-94.343	66.876	-82.007	-84.912	2.905	1.000E+00	0.000	57.473
-27.147	-93.467	66.320	-81.164	-84.617	3.453	1.000E+00	0.000	57.473
-26.382	-93.301	66.919	-79.738	-84.546	4.808	1.000E+00	0.000	57.473
-25.753	-92.458	66.705	-78.512	-85.251	6.739	1.000E+00	0.000	57.473
-25.332	-91.847	66.515	-77.490	-85.547	8.057	1.000E+00	0.000	57.473
-24.660	-91.469	66.809	-76.196	-85.289	9.094	1.000E+00	0.000	57.473
-21.789	-88.550	66.762	-70.419	-84.875	14.456	1.960E-05	4.112	57.473
-18.776	-85.629	66.853	-64.495	-85.350	20.855	4.862E-13	7.134	57.473
-15.952	-82.869	66.917	-58.807	-84.886	26.079	2.897E-26	10.536	57.473
-15.961	-82.824	66.863	-58.802	-85.493	26.691	4.790E-34	12.107	57.473
-15.902	-82.808	66.906	-58.697	-85.521	26.825	4.841E-51	14.981	57.473
-15.972	-82.701	66.729	-58.765	-85.806	27.041	2.503E-61	16.481	57.473
-15.968	-82.707	66.738	-58.736	-84.633	25.898	6.755E-49	14.650	57.473
<b>ch1 - ch16 (Xmax)</b>								
-31.937	-98.543	66.605	-90.989	-84.733	-6.256	1.000E+00	0.000	78.474
-31.875	-98.658	66.783	-90.868	-84.952	-5.915	1.000E+00	0.000	78.474
-32.033	-98.585	66.552	-91.179	-85.849	-5.330	1.000E+00	0.000	78.474
-35.868	-102.772	66.905	-98.718	-84.911	-13.807	1.000E+00	0.000	78.474
-35.337	-101.637	66.301	-97.466	-84.616	-12.850	1.000E+00	0.000	78.474
-34.362	-101.226	66.864	-95.656	-84.533	-11.123	1.000E+00	0.000	78.474
-33.524	-100.232	66.709	-94.044	-85.240	-8.804	1.000E+00	0.000	78.474
-32.893	-99.418	66.525	-92.624	-85.539	-7.085	1.000E+00	0.000	78.474
-32.010	-98.867	66.857	-90.918	-85.284	-5.633	1.000E+00	0.000	78.474
-28.089	-94.834	66.745	-83.089	-84.848	1.759	1.000E+00	0.000	78.474
-24.026	-90.905	66.878	-75.058	-85.315	10.257	1.000E+00	0.000	78.474
-20.152	-87.140	66.987	-67.254	-84.958	17.705	4.803E-09	5.737	78.474
-20.161	-86.987	66.826	-67.228	-85.583	18.355	1.601E-10	6.289	78.474
-20.102	-87.001	66.899	-67.104	-85.556	18.452	2.770E-12	6.890	78.474
-20.173	-86.824	66.651	-67.164	-85.939	18.775	2.907E-15	7.808	78.474
-20.169	-86.909	66.740	-67.134	-84.703	17.569	9.548E-09	5.619	78.474

## 4.2.2.2 DWDM simultánea.

## 4.2.2.2.1 Dos canales DWDM

Tabla 4.31. Resultados de la multiplexación de 2 canales DWDM (SMF-28 a 2.5 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
ch1 - ch2 (Xmin)								
-22.997	-111.449	88.452	-73.071	-90.425	17.354	1.458E-10	6.303	93.257
-22.925	-300.000	277.075	-72.994	-90.517	17.523	3.257E-10	6.177	93.257
ch1 - ch2 (Xpro)								
-22.999	-111.451	88.452	-73.075	-90.425	17.349	1.488E-10	6.300	93.268
-22.927	-300.000	277.073	-72.998	-90.517	17.519	3.325E-10	6.174	93.268
ch1 - ch2 (Xmax)								
-23.001	-111.453	88.452	-73.080	-90.425	17.345	1.518E-10	6.297	93.279
-22.929	-186.242	163.313	-73.003	-90.517	17.515	3.395E-10	6.171	93.279

Se observa que la dispersión afecta de manera más pronunciada a la longitud de onda del canal 1 (1546.119 nm) independientemente de lo cercanas que se encuentren las longitudes de onda, con un aumento de 0.105 ps/nm/km en la dispersión el impacto en esta longitud es realmente notorio.

Tabla 4.32. Resultados de la multiplexación de 2 canales DWDM (SMF-28 a 10 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
ch1 - ch2 (Xmin)								
-18.356	-54.839	36.483	-63.689	-84.391	20.702	2.792E-10	6.202	69.438
-18.293	-300.000	281.707	-63.618	-84.471	20.853	1.045E-10	6.354	69.438
ch1 - ch2 (Xpro)								
-18.498	-54.982	36.483	-63.976	-84.393	20.417	2.156E-09	5.872	70.149
-18.436	-300.000	281.564	-63.906	-84.475	20.569	4.166E-10	6.138	70.149
ch1 - ch2 (Xmax)								
-18.640	-55.124	36.483	-64.263	-84.395	20.133	1.283E-08	5.569	70.859
-18.578	-300.000	281.422	-64.192	-84.479	20.287	1.210E-09	5.967	70.859

Es importante resaltar que las distancias para el siguiente caso son iguales (debido a que la atenuación es constante y la dispersión varía muy poco en todas las longitudes de onda), por tanto las simulaciones quedan como se muestra en seguida, considerando la longitud como constante (Xmin=Xpro=Xmax= 93,514 km).

Tabla 4.33. Resultados de la multiplexación de 2 canales DWDM (MetroCor a 2.5 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
ch1 - ch2 (Xmin = Xpro = Xmax)								
-23.049	-111.299	88.250	-73.176	-90.470	17.294	2.841E-09	5.826	93.514
-22.977	-300.000	277.024	-73.095	-90.495	17.400	2.477E-10	6.221	93.514

En DWDM la dispersión se enmarca de manera más importante como un problema a tener en cuenta que en CWDM, donde se ve que la atenuación es el problema más substancial.

Otro fenómeno de observación es el ruido óptico (No) ya que como se puede observar en las tablas cambia drásticamente entre uno y otro valor de longitud de onda.

**Tabla 4.34. Resultados de la multiplexación de 2 canales DWDM (MetroCor a 10 Gbps).**

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
<b>ch1 - ch2 (Xmin)</b>								
-19.818	-56.269	36.451	-66.477	-84.371	17.894	3.846E-10	6.151	76.733
-19.755	-300.000	280.245	-66.390	-84.490	18.100	5.200E-10	6.103	76.733
<b>ch1 - ch2 (Xpro)</b>								
-19.892	-56.344	36.451	-66.627	-84.373	17.746	5.766E-10	6.086	77.107
-19.830	-300.000	280.170	-66.540	-84.490	17.950	9.061E-10	6.013	77.107
<b>ch1 - ch2 (Xmax)</b>								
-19.967	-56.418	36.451	-66.777	-84.374	17.597	8.731E-10	6.019	77.481
-19.905	-300.000	280.095	-66.690	-84.490	17.801	1.525E-09	5.928	77.481

El umbral de ruido óptico del equipo encargado de registrar los valores de la OSNR es -300 dBm. Además, en DWDM debido a que los canales están más cercanos entre sí, la OSNR es variable por que tanto la señal óptica como el ruido óptico varían en distintas proporciones, y las variaciones de la ESNR son mínimas y se encuentran entre los 17 y 18 dB.

Es pertinente decir que para 4, 8 y 16 canales (DWDM) los análisis de resultados son análogos a los mostrados anteriormente para 2 canales.

#### 4.2.2.2.3 Cuatro canales DWDM

**Tabla 4.35. Resultados de la multiplexación de 4 canales DWDM (SMF-28 a 2.5 Gbps).**

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
<b>ch1 - ch4 (Xmin)</b>								
-22.995	-111.457	88.462	-73.068	-90.557	17.489	3.253E-10	6.178	93.257
-22.927	-300.000	277.073	-72.997	-90.769	17.773	1.119E-09	5.979	93.257
-23.079	-142.020	118.941	-73.179	-91.119	17.940	4.272E-11	6.490	93.257
-22.995	-138.496	115.501	-73.072	-90.709	17.638	1.822E-10	6.268	93.257
<b>ch1 - ch4 (Xpro)</b>								
-22.998	-111.459	88.462	-73.072	-90.557	17.484	3.309E-10	6.175	93.268
-22.929	-300.000	277.071	-73.001	-90.769	17.769	1.134E-09	5.977	93.268
-23.082	-142.022	118.941	-73.183	-91.119	17.936	4.354E-11	6.487	93.268
-22.998	-138.498	115.500	-73.076	-90.709	17.633	1.856E-10	6.266	93.268
<b>ch1 - ch4 (Xmax)</b>								
-23.000	-111.461	88.462	-73.077	-90.557	17.480	3.366E-10	6.172	93.279
-22.931	-300.000	277.069	-73.005	-90.770	17.764	1.150E-09	5.975	93.279
-23.084	-142.025	118.941	-73.188	-91.119	17.931	4.437E-11	6.484	93.279
-23.000	-138.500	115.500	-73.080	-90.709	17.629	1.891E-10	6.263	93.279

Tabla 4.36. Resultados de la multiplexación de 4 canales DWDM (SMF-28 a 10 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
<b>ch1 - ch4 (Xmin)</b>								
-18.356	-54.839	36.482	-63.688	-84.418	20.730	8.250E-12	6.734	69.438
-18.293	-300.000	281.707	-63.597	-84.428	20.831	6.402E-13	7.096	69.438
-18.453	-77.944	59.491	-63.792	-85.334	21.542	4.482E-11	6.483	69.438
-18.364	-74.516	56.152	-63.709	-84.677	20.968	5.572E-11	6.451	69.438
<b>ch1 - ch4 (Xpro)</b>								
-18.499	-54.982	36.483	-63.976	-84.425	20.449	5.489E-12	6.793	70.149
-18.434	-300.000	281.566	-63.883	-84.430	20.547	4.049E-12	6.836	70.149
-18.594	-78.082	59.487	-64.077	-85.337	21.259	5.061E-11	6.465	70.149
-18.507	-74.657	56.151	-63.997	-84.668	20.670	1.014E-09	5.995	70.149
<b>ch1 - ch4 (Xmax)</b>								
-18.640	-55.124	36.484	-64.262	-84.428	20.166	1.045E-10	6.355	70.859
-18.577	-300.000	281.423	-64.171	-84.430	20.258	3.463E-11	6.521	70.859
-18.737	-78.225	59.488	-64.366	-85.339	20.973	9.205E-11	6.374	70.859
-18.648	-74.800	56.152	-64.283	-84.659	20.377	5.846E-09	5.704	70.859

Tabla 4.37. Resultados de la multiplexación de 4 canales DWDM (MetroCor a 2.5 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
<b>ch1 - ch4 (Xmin = Xpro = Xmax)</b>								
-23.049	-111.259	88.209	-73.177	-90.601	17.424	1.431E-09	5.939	93.514
-22.976	-197.438	174.462	-73.093	-90.775	17.681	7.523E-09	5.661	93.514
-23.130	-141.982	118.852	-73.283	-91.083	17.800	2.492E-11	6.571	93.514
-23.049	-138.526	115.477	-73.175	-90.702	17.527	1.876E-08	5.502	93.514

Tabla 4.38. Resultados de la multiplexación de 4 canales DWDM (MetroCor a 10 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
<b>ch1 - ch4 (Xmin)</b>								
-19.817	-56.265	36.448	-66.476	-84.317	17.842	7.037E-10	6.055	76.733
-19.756	-300.000	280.244	-66.369	-84.470	18.101	1.524E-09	5.929	76.733
-19.913	-79.483	59.570	-66.564	-85.272	18.708	3.538E-11	6.513	76.733
-19.826	-76.028	56.202	-66.466	-84.710	18.243	4.844E-11	6.472	76.733
<b>ch1 - ch4 (Xpro)</b>								
-19.892	-56.340	36.448	-66.625	-84.324	17.699	1.460E-09	5.936	77.107
-19.831	-300.000	280.169	-66.519	-84.470	17.950	2.702E-09	5.834	77.107
-19.988	-79.558	59.570	-66.714	-85.273	18.559	7.218E-11	6.405	77.107
-19.901	-76.103	56.202	-66.616	-84.711	18.095	7.145E-11	6.413	77.107
<b>ch1 - ch4 (Xmax)</b>								
-19.967	-56.415	36.448	-66.775	-84.327	17.552	2.300E-09	5.861	77.481
-19.906	-300.000	280.094	-66.669	-84.468	17.799	4.764E-09	5.739	77.481
-20.062	-79.633	59.571	-66.863	-85.273	18.410	1.344E-10	6.309	77.481
-19.976	-76.177	56.202	-66.766	-84.713	17.947	1.187E-10	6.335	77.481

## 4.2.2.2.2 Ocho canales DWDM

Tabla 4.39. Resultados de la multiplexación de 8 canales DWDM (SMF-28 a 2.5 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
<b>ch1 - ch8 (Xmin)</b>								
-22.999	-111.459	88.461	-73.074	-90.770	17.696	2.632E-13	7.218	93.257
-22.918	-300.000	277.082	-72.979	-91.163	18.183	3.202E-13	7.192	93.257
-23.082	-142.022	118.941	-73.183	-91.317	18.134	4.660E-12	6.816	93.257
-23.001	-137.829	114.829	-73.082	-90.673	17.592	2.157E-10	6.241	93.257
-23.233	-300.000	276.767	-73.351	-91.201	17.851	8.603E-13	7.055	93.257
-23.062	-300.000	276.938	-73.126	-92.027	18.901	1.828E-12	6.949	93.257
-22.993	-300.000	277.007	-73.063	-91.688	18.625	1.324E-12	6.994	93.257
-23.148	-142.053	118.905	-73.239	-91.031	17.792	9.042E-10	6.013	93.257
<b>ch1 - ch8 (Xpro)</b>								
-23.001	-111.461	88.460	-73.078	-90.770	17.692	2.750E-13	7.212	93.268
-22.920	-300.000	277.080	-72.984	-91.163	18.179	3.220E-13	7.191	93.268
-23.084	-142.024	118.940	-73.188	-91.317	18.129	4.738E-12	6.814	93.268
-23.003	-137.831	114.829	-73.086	-90.673	17.587	2.190E-10	6.239	93.268
-23.235	-300.000	276.765	-73.355	-91.201	17.846	8.838E-13	7.051	93.268
-23.064	-300.000	276.936	-73.130	-92.027	18.897	1.905E-12	6.944	93.268
-22.995	-187.720	164.725	-73.068	-91.688	18.621	1.336E-12	6.993	93.268
-23.151	-142.055	118.905	-73.244	-91.031	17.788	9.226E-10	6.009	93.268
<b>ch1 - ch8 (Xmax)</b>								
-23.003	-111.463	88.460	-73.082	-90.770	17.688	2.876E-13	7.206	93.279
-22.922	-186.838	163.915	-72.988	-91.163	18.175	3.236E-13	7.190	93.279
-23.086	-142.026	118.940	-73.192	-91.317	18.125	4.818E-12	6.811	93.279
-23.005	-137.834	114.828	-73.091	-90.673	17.583	2.224E-10	6.237	93.279
-23.237	-300.000	276.763	-73.360	-91.201	17.842	9.072E-13	7.047	93.279
-23.066	-300.000	276.934	-73.135	-92.027	18.893	1.984E-12	6.938	93.279
-22.997	-300.000	277.003	-73.072	-91.688	18.616	1.349E-12	6.991	93.279
-23.153	-142.058	118.905	-73.248	-91.032	17.784	9.417E-10	6.006	93.279

Tabla 4.40. Resultados de la multiplexación de 8 canales DWDM (SMF-28 a 10 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
<b>ch1 - ch8 (Xmin)</b>								
-18.359	-54.847	36.488	-63.690	-84.520	20.831	6.868E-12	6.761	69.438
-18.297	-191.001	172.705	-63.604	-84.715	21.110	5.803E-10	6.085	69.438
-18.447	-77.940	59.493	-63.779	-85.098	21.319	1.561E-09	5.925	69.438
-18.357	-73.915	55.557	-63.680	-84.661	20.981	3.185E-09	5.807	69.438
-18.621	-300.000	281.379	-63.968	-85.418	21.449	6.989E-12	6.758	69.438
-18.434	-187.991	169.557	-63.750	-84.846	21.096	2.313E-10	6.231	69.438
-18.370	-300.000	281.630	-63.683	-85.269	21.586	2.589E-12	6.901	69.438

-18.529	-77.642	59.113	-63.870	-85.082	21.213	2.325E-12	6.916	69.438
<b>ch1 - ch8 (Xpro)</b>								
-18.502	-54.989	36.487	-63.978	-84.552	20.574	1.589E-10	6.289	70.149
-18.439	-300.000	281.561	-63.891	-84.727	20.835	3.979E-10	6.146	70.149
-18.589	-78.079	59.490	-64.066	-85.114	21.048	3.414E-09	5.795	70.149
-18.498	-74.058	55.560	-63.966	-84.663	20.697	1.274E-08	5.570	70.149
-18.765	-300.000	281.236	-64.257	-85.419	21.163	2.225E-11	6.588	70.149
-18.576	-183.731	165.155	-64.038	-84.858	20.819	1.953E-09	5.888	70.149
-18.511	-181.970	163.459	-63.970	-85.250	21.280	4.282E-12	6.828	70.149
-18.672	-77.784	59.113	-64.157	-85.103	20.947	8.660E-12	6.727	70.149
<b>ch1 - ch8 (Xmax)</b>								
-18.644	-55.132	36.488	-64.265	-84.539	20.274	3.538E-09	5.789	70.859
-18.581	-300.000	281.419	-64.177	-84.740	20.563	1.631E-10	6.286	70.859
-18.732	-78.224	59.492	-64.355	-85.135	20.780	4.551E-10	6.124	70.859
-18.640	-74.198	55.559	-64.251	-84.663	20.412	3.654E-08	5.383	70.859
-18.905	-187.991	169.086	-64.541	-85.421	20.881	5.892E-11	6.442	70.859
-18.719	-184.085	165.366	-64.326	-84.862	20.537	4.219E-09	5.759	70.859
-18.655	-192.762	174.107	-64.258	-85.268	21.010	8.424E-11	6.387	70.859
-18.813	-77.923	59.110	-64.443	-85.149	20.706	2.868E-10	6.197	70.859

Tabla 4.41. Resultados de la multiplexación de 8 canales DWDM (MetroCor a 2.5 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
<b>ch1 - ch8 (Xmin = Xpro = Xmax)</b>								
-23.052	-111.265	88.214	-73.182	-90.725	17.543	6.557E-09	5.685	93.514
-22.975	-300.000	277.025	-73.092	-91.168	18.075	6.872E-10	6.058	93.514
-23.129	-142.015	118.886	-73.280	-91.304	18.025	2.051E-09	5.880	93.514
-23.048	-137.891	114.844	-73.173	-90.724	17.551	1.646E-09	5.916	93.514
-23.284	-185.512	162.228	-73.454	-91.139	17.686	2.407E-11	6.576	93.514
-23.115	-300.000	276.885	-73.233	-91.992	18.758	7.069E-13	7.083	93.514
-23.049	-193.998	170.948	-73.178	-91.591	18.413	2.056E-12	6.933	93.514
-23.199	-142.060	118.861	-73.342	-91.035	17.693	5.167E-11	6.462	93.514

Tabla 4.42. Resultados de la multiplexación 8 canales DWDM (MetroCor a 10 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
<b>ch1 - ch8 (Xmin)</b>								
-19.818	-56.249	36.431	-66.478	-84.496	18.018	1.456E-09	5.935	76.733
-19.758	-300.000	280.242	-66.374	-84.744	18.370	7.408E-11	6.407	76.733
-19.912	-79.470	59.557	-66.562	-85.107	18.545	6.192E-11	6.434	76.733
-19.826	-75.445	55.620	-66.450	-84.643	18.193	5.552E-12	6.791	76.733
-20.075	-187.685	167.611	-66.725	-85.443	18.718	2.033E-11	6.600	76.733
-19.889	-300.000	280.111	-66.520	-84.874	18.354	1.096E-11	6.691	76.733
-19.834	-181.224	161.390	-66.459	-85.339	18.880	3.054E-11	6.540	76.733
-19.993	-79.155	59.162	-66.645	-85.103	18.458	1.378E-12	6.989	76.733

ch1 - ch8 (Xpro)								
-19.894	-56.323	36.430	-66.628	-84.503	17.875	3.714E-09	5.780	77.107
-19.833	-300.000	280.168	-66.522	-84.744	18.222	1.215E-10	6.331	77.107
-19.987	-79.545	59.558	-66.712	-85.107	18.395	1.481E-10	6.300	77.107
-19.900	-75.520	55.619	-66.600	-84.644	18.043	1.272E-11	6.671	77.107
-20.149	-300.000	279.851	-66.875	-85.444	18.569	4.020E-11	6.498	77.107
-19.964	-187.643	167.679	-66.669	-84.876	18.206	2.591E-11	6.564	77.107
-19.908	-185.166	165.258	-66.607	-85.338	18.731	1.790E-10	6.271	77.107
-20.069	-79.229	59.161	-66.796	-85.114	18.318	1.181E-12	7.011	77.107
ch1 - ch8 (Xmax)								
-19.968	-56.396	36.428	-66.778	-84.505	17.728	5.746E-09	5.706	77.481
-19.907	-300.000	280.093	-66.672	-84.742	18.070	2.954E-10	6.192	77.481
-20.062	-79.619	59.557	-66.861	-85.101	18.240	3.747E-10	6.155	77.481
-19.975	-75.595	55.619	-66.750	-84.642	17.892	2.847E-11	6.552	77.481
-20.224	-300.000	279.776	-67.025	-85.441	18.416	7.886E-11	6.396	77.481
-20.039	-300.000	279.961	-66.820	-84.873	18.054	5.890E-11	6.441	77.481
-19.983	-300.000	280.017	-66.757	-85.344	18.588	5.606E-10	6.091	77.481
-20.143	-79.306	59.162	-66.946	-85.115	18.169	1.661E-12	6.963	77.481

#### 4.2.2.4 Dieciséis canales DWDM

Tabla 4.43. Resultados de la multiplexación de 16 canales DWDM (SMF-28 a 2.5 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
ch1 - ch16 (Xmin)								
-22.996	-111.393	88.397	-73.069	-90.729	17.660	2.355E-10	6.228	93.257
-22.928	-300.000	277.072	-72.999	-91.174	18.175	2.512E-10	6.218	93.257
-22.928	-300.000	277.072	-72.999	-91.174	18.175	2.512E-10	6.218	93.257
-22.985	-123.383	100.398	-73.050	-90.694	17.645	3.949E-11	6.502	93.257
-23.242	-191.582	168.340	-73.368	-91.159	17.791	2.133E-11	6.594	93.257
-23.063	-187.764	164.701	-73.128	-91.981	18.853	2.751E-11	6.556	93.257
-23.001	-300.000	276.999	-73.078	-91.677	18.599	1.601E-12	6.969	93.257
-23.155	-141.815	118.660	-73.253	-91.010	17.757	2.300E-11	6.583	93.257
-23.050	-140.812	117.761	-73.105	-90.860	17.755	5.222E-11	6.460	93.257
-23.057	-149.285	126.228	-73.117	-90.970	17.853	8.500E-13	7.057	93.257
-22.934	-187.713	164.779	-73.013	-90.659	17.646	3.023E-09	5.815	93.257
-23.001	-300.000	276.999	-73.081	-90.334	17.253	4.273E-11	6.491	93.257
-22.994	-138.878	115.884	-73.063	-91.675	18.612	3.682E-13	7.172	93.257
-22.919	-138.283	115.364	-72.981	-91.356	18.375	4.630E-11	6.478	93.257
-22.996	-189.483	166.487	-73.071	-91.037	17.966	2.587E-11	6.566	93.257
-22.999	-116.696	93.697	-73.065	-91.244	18.179	1.081E-10	6.349	93.257
ch1 - ch16 (Xpro)								
-22.999	-111.395	88.396	-73.075	-90.730	17.655	2.173E-10	6.241	93.268
-22.928	-300.000	277.072	-73.001	-91.174	18.174	2.447E-10	6.222	93.268

-22.928	-300.000	277.072	-73.001	-91.174	18.174	2.447E-10	6.222	93.268
-22.988	-123.950	100.962	-73.057	-90.694	17.638	3.816E-11	6.508	93.268
-23.242	-300.000	276.758	-73.370	-91.159	17.790	1.977E-11	6.606	93.268
-23.068	-300.000	276.933	-73.137	-91.982	18.844	2.643E-11	6.562	93.268
-23.002	-300.000	276.998	-73.079	-91.677	18.598	1.631E-12	6.966	93.268
-23.155	-141.832	118.677	-73.254	-91.010	17.756	2.516E-11	6.569	93.268
-23.054	-140.791	117.737	-73.114	-90.860	17.747	5.573E-11	6.450	93.268
-23.060	-149.356	126.296	-73.123	-90.970	17.847	9.168E-13	7.047	93.268
-22.935	-300.000	277.065	-73.015	-90.659	17.644	2.973E-09	5.817	93.268
-23.004	-300.000	276.996	-73.087	-90.334	17.247	4.617E-11	6.479	93.268
-22.997	-138.887	115.890	-73.068	-91.675	18.607	3.682E-13	7.172	93.268
-22.920	-138.286	115.365	-72.982	-91.356	18.374	4.929E-11	6.469	93.268
-22.999	-300.000	277.002	-73.077	-91.037	17.960	2.695E-11	6.560	93.268
-23.001	-116.789	93.788	-73.070	-91.244	18.174	1.108E-10	6.345	93.268
<b>ch1 - ch16 (Xmax)</b>								
-23.003	-111.399	88.396	-73.082	-90.730	17.648	2.104E-10	6.246	93.279
-22.930	-198.269	175.339	-73.004	-91.174	18.170	2.614E-10	6.211	93.279
-22.930	-198.269	175.339	-73.004	-91.174	18.170	2.614E-10	6.211	93.279
-22.990	-124.016	101.026	-73.060	-90.694	17.635	4.033E-11	6.499	93.279
-23.244	-300.000	276.756	-73.372	-91.159	17.787	2.135E-11	6.594	93.279
-23.071	-300.000	276.929	-73.145	-91.982	18.837	2.831E-11	6.551	93.279
-23.005	-300.000	276.995	-73.085	-91.677	18.592	1.789E-12	6.953	93.279
-23.157	-141.862	118.705	-73.257	-91.010	17.753	2.376E-11	6.578	93.279
-23.056	-140.805	117.749	-73.118	-90.860	17.743	5.750E-11	6.446	93.279
-23.060	-149.343	126.282	-73.124	-90.970	17.846	8.704E-13	7.054	93.279
-22.936	-190.120	167.184	-73.017	-90.659	17.642	3.041E-09	5.814	93.279
-23.006	-300.000	276.994	-73.090	-90.334	17.244	4.454E-11	6.484	93.279
-22.999	-138.880	115.881	-73.072	-91.675	18.603	3.130E-13	7.195	93.279
-22.923	-138.290	115.367	-72.987	-91.356	18.369	5.629E-11	6.449	93.279
-23.002	-300.000	276.998	-73.083	-91.037	17.954	2.360E-11	6.579	93.279
-23.004	-116.816	93.811	-73.077	-91.244	18.167	1.198E-10	6.333	93.279

Tabla 4.44. Resultados de la multiplexación de 16 canales DWDM (SMF-28 a 10 Gbps).

ch1 - ch16 (Xmin)								
-18.363	-54.842	36.479	-63.698	-84.535	20.837	6.719E-11	6.422	69.438
-18.292	-300.000	281.708	-63.596	-84.760	21.164	2.377E-11	6.578	69.438
-18.450	-77.930	59.480	-63.783	-85.080	21.297	1.415E-13	7.302	69.438
-18.363	-73.949	55.585	-63.695	-84.697	21.002	6.239E-13	7.100	69.438
-18.615	-300.000	281.385	-63.959	-85.364	21.405	2.263E-12	6.918	69.438
-18.442	-300.000	281.558	-63.768	-84.870	21.102	4.570E-12	6.819	69.438
-18.361	-300.000	281.639	-63.667	-85.311	21.645	3.370E-14	7.493	69.438
-18.540	-77.658	59.119	-63.869	-85.151	21.282	7.311E-14	7.389	69.438
-18.421	-76.233	57.812	-63.720	-85.159	21.439	4.745E-12	6.813	69.438
-18.425	-83.528	65.103	-63.727	-84.472	20.744	1.259E-10	6.326	69.438

## DOCUMENTO FINAL DE TRABAJO DE GRADO

-18.283	-300.000	281.717	-63.577	-84.480	20.903	1.682E-08	5.521	69.438
-18.350	-181.623	163.273	-63.714	-84.569	20.855	1.227E-10	6.329	69.438
-18.356	-75.059	56.704	-63.688	-85.307	21.619	4.445E-10	6.128	69.438
-18.291	-74.631	56.340	-63.602	-85.354	21.753	7.790E-10	6.038	69.438
-18.368	-300.000	281.632	-63.697	-85.147	21.451	9.864E-10	6.000	69.438
-18.361	-83.259	64.898	-63.666	-84.776	21.110	1.393E-09	5.943	69.438
<b>ch1 - ch16 (Xpro)</b>								
-18.504	-54.986	36.482	-63.985	-84.517	20.532	4.294E-10	6.133	70.149
-18.437	-300.000	281.563	-63.890	-84.698	20.807	1.611E-10	6.287	70.149
-18.592	-78.041	59.448	-64.071	-85.074	21.003	7.278E-10	6.049	70.149
-18.502	-74.074	55.572	-63.975	-84.669	20.694	5.128E-09	5.726	70.149
-18.757	-300.000	281.243	-64.246	-85.378	21.132	5.590E-13	7.115	70.149
-18.582	-300.000	281.418	-64.052	-84.863	20.810	7.565E-11	6.404	70.149
-18.506	-300.000	281.494	-63.959	-85.304	21.346	1.721E-13	7.276	70.149
-18.678	-77.795	59.117	-64.150	-85.150	21.000	7.857E-13	7.067	70.149
-18.564	-76.379	57.815	-64.008	-85.159	21.151	4.025E-11	6.498	70.149
-18.573	-83.674	65.101	-64.026	-84.451	20.426	3.126E-10	6.184	70.149
-18.424	-300.000	281.576	-63.861	-84.473	20.612	3.262E-07	4.975	70.149
-18.490	-300.000	281.510	-63.996	-84.553	20.558	2.556E-10	6.214	70.149
-18.500	-75.200	56.700	-63.979	-85.310	21.330	1.409E-11	6.655	70.149
-18.435	-74.773	56.338	-63.892	-85.339	21.447	5.767E-12	6.786	70.149
-18.509	-300.000	281.491	-63.982	-85.147	21.165	1.366E-09	5.947	70.149
-18.501	-83.525	65.023	-63.950	-84.784	20.834	3.171E-11	6.535	70.149
<b>ch1 - ch16 (Xmax)</b>								
-18.645	-55.127	36.482	-64.270	-84.486	20.216	2.009E-10	6.253	70.859
-18.579	-300.000	281.421	-64.175	-84.691	20.516	3.816E-11	6.508	70.859
-18.735	-78.223	59.488	-64.359	-85.085	20.726	6.163E-11	6.435	70.859
-18.646	-74.222	55.575	-64.266	-84.639	20.373	1.544E-09	5.927	70.859
-18.896	-300.000	281.104	-64.527	-85.413	20.886	1.718E-11	6.626	70.859
-18.727	-184.981	166.254	-64.343	-84.885	20.542	1.821E-09	5.899	70.859
-18.648	-187.991	169.343	-64.246	-85.299	21.053	1.622E-11	6.634	70.859
-18.822	-77.935	59.114	-64.440	-85.148	20.708	6.816E-12	6.761	70.859
-18.706	-76.520	57.814	-64.296	-85.158	20.863	1.831E-10	6.266	70.859
-18.711	-83.813	65.102	-64.306	-84.452	20.146	9.551E-10	6.005	70.859
-18.567	-300.000	281.433	-64.148	-84.477	20.329	1.072E-07	5.186	70.859
-18.630	-300.000	281.370	-64.279	-84.569	20.290	1.599E-09	5.920	70.859
-18.642	-75.339	56.697	-64.265	-85.310	21.045	3.650E-11	6.514	70.859
-18.575	-74.921	56.346	-64.175	-85.354	21.179	3.979E-09	5.769	70.859
-18.652	-300.000	281.348	-64.270	-85.134	20.864	1.596E-09	5.921	70.859
-18.645	-83.503	64.859	-64.239	-84.788	20.549	1.361E-10	6.313	70.859

Tabla 4.45. Resultados de la multiplexación de 16 canales DWDM (MetroCor a 2.5 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
ch1 - ch16 (Xmin = Xpro = Xmax)								
-23.048	-109.318	86.270	-73.174	-90.742	17.568	5.782E-11	6.445	93.514
-22.977	-183.890	160.913	-73.095	-91.095	18.000	3.349E-10	6.173	93.514
-23.129	-105.471	82.342	-73.280	-91.363	18.083	1.577E-10	6.291	93.514
-23.047	-125.958	102.912	-73.171	-90.727	17.556	9.744E-10	6.002	93.514
-23.286	-205.440	182.154	-73.459	-91.183	17.724	7.277E-13	7.078	93.514
-23.114	-300.000	276.887	-73.230	-92.005	18.775	1.098E-13	7.336	93.514
-23.054	-188.666	165.612	-73.187	-91.657	18.470	3.424E-11	6.524	93.514
-23.202	-141.593	118.391	-73.348	-90.993	17.645	3.008E-11	6.543	93.514
-23.120	-140.749	117.630	-73.243	-90.885	17.643	7.645E-12	6.745	93.514
-23.120	-149.276	126.156	-73.243	-90.948	17.705	7.292E-10	6.048	93.514
-22.971	-192.961	169.990	-73.085	-90.670	17.585	1.065E-09	5.986	93.514
-23.046	-188.056	165.010	-73.170	-90.374	17.203	1.802E-10	6.270	93.514
-23.052	-138.904	115.852	-73.183	-91.677	18.494	4.262E-13	7.152	93.514
-22.984	-138.332	115.347	-73.113	-91.331	18.218	1.696E-09	5.911	93.514
-23.044	-186.125	163.081	-73.166	-90.970	17.804	8.652E-11	6.382	93.514
-23.043	-121.886	98.843	-73.156	-91.210	18.054	1.890E-10	6.262	93.514

Tabla 4.46. Resultados de la multiplexación 16 canales DWDM (MetroCor a 10 Gbps).

PARÁMETROS DE MEDIDA								
PRxo (dBm)	No (dBm)	OSNR (dB)	PRxe (dBm)	Ne (dBm)	ESNR (dB)	BER	Q	X (km)
ch1 - ch16 (Xmin)								
-19.817	-56.230	36.413	-66.473	-84.530	18.057	2.207E-10	6.238	76.733
-19.754	-192.762	173.008	-66.365	-84.750	18.385	1.863E-10	6.265	76.733
-19.915	-77.853	57.938	-66.567	-85.092	18.525	1.617E-11	6.635	76.733
-19.827	-75.440	55.614	-66.451	-84.675	18.224	3.130E-10	6.183	76.733
-20.081	-300.000	279.919	-66.738	-85.466	18.729	9.427E-14	7.357	76.733
-19.890	-182.215	162.325	-66.521	-84.884	18.363	1.157E-10	6.338	76.733
-19.828	-300.000	280.172	-66.447	-85.336	18.889	6.982E-13	7.084	76.733
-19.996	-79.131	59.135	-66.637	-85.098	18.461	1.555E-13	7.284	76.733
-19.894	-77.729	57.836	-66.519	-85.138	18.619	4.244E-12	6.830	76.733
-19.882	-84.889	65.007	-66.491	-84.482	17.991	7.109E-10	6.052	76.733
-19.763	-300.000	280.237	-66.387	-84.461	18.074	6.011E-11	6.439	76.733
-19.813	-300.000	280.187	-66.465	-84.604	18.139	4.076E-09	5.765	76.733
-19.810	-76.558	56.747	-66.454	-85.297	18.843	2.756E-12	6.891	76.733
-19.753	-76.177	56.424	-66.369	-85.347	18.978	1.806E-14	7.574	76.733
-19.825	-300.000	280.175	-66.448	-85.119	18.671	2.936E-11	6.547	76.733
-19.819	-85.826	66.007	-66.439	-84.816	18.377	6.876E-10	6.058	76.733
ch1 - ch16 (Xpro)								
-19.888	-56.304	36.417	-66.615	-84.518	17.904	2.275E-09	5.862	77.107
-19.837	-300.000	280.163	-66.531	-84.756	18.225	1.534E-10	6.295	77.107
-19.985	-77.882	57.897	-66.708	-85.095	18.387	8.195E-13	7.062	77.107

-19.898	-75.512	55.614	-66.595	-84.685	18.090	2.116E-10	6.245	77.107
-20.157	-300.000	279.843	-66.888	-85.462	18.574	1.399E-13	7.304	77.107
-19.965	-300.000	280.035	-66.671	-84.887	18.216	1.412E-10	6.306	77.107
-19.907	-300.000	280.093	-66.605	-85.335	18.729	2.637E-12	6.898	77.107
-20.071	-79.206	59.134	-66.788	-85.099	18.311	3.308E-13	7.182	77.107
-19.968	-77.805	57.836	-66.668	-85.141	18.472	8.094E-12	6.736	77.107
-19.957	-84.963	65.006	-66.640	-84.479	17.839	1.204E-09	5.967	77.107
-19.834	-187.479	167.646	-66.529	-84.459	17.931	2.775E-10	6.203	77.107
-19.889	-182.655	162.766	-66.617	-84.601	17.984	7.866E-09	5.652	77.107
-19.890	-76.630	56.740	-66.613	-85.306	18.693	1.641E-12	6.965	77.107
-19.823	-76.250	56.427	-66.510	-85.342	18.832	3.956E-14	7.471	77.107
-19.900	-300.000	280.100	-66.598	-85.128	18.530	3.508E-12	6.857	77.107
-19.894	-85.772	65.878	-66.589	-84.813	18.224	2.422E-09	5.852	77.107
<b>ch1 - ch16 (Xmax)</b>								
-19.963	-56.377	36.413	-66.767	-84.519	17.752	1.267E-09	5.959	77.481
-19.909	-300.000	280.091	-66.675	-84.754	18.079	1.633E-09	5.918	77.481
-20.065	-77.967	57.902	-66.868	-85.104	18.236	5.518E-13	7.117	77.481
-19.978	-75.580	55.602	-66.755	-84.695	17.940	1.241E-10	6.328	77.481
-20.230	-300.000	279.770	-67.034	-85.454	18.420	4.339E-13	7.150	77.481
-20.036	-300.000	279.964	-66.814	-84.888	18.074	1.516E-10	6.294	77.481
-19.977	-190.332	170.355	-66.746	-85.331	18.585	7.530E-12	6.747	77.481
-20.146	-79.284	59.138	-66.936	-85.097	18.161	7.820E-13	7.063	77.481
-20.042	-77.878	57.836	-66.816	-85.143	18.327	1.621E-11	6.635	77.481
-20.029	-85.036	65.007	-66.785	-84.477	17.692	2.069E-09	5.878	77.481
-19.910	-300.000	280.090	-66.680	-84.457	17.777	1.865E-09	5.896	77.481
-19.964	-300.000	280.036	-66.767	-84.605	17.838	7.955E-09	5.651	77.481
-19.969	-76.708	56.739	-66.770	-85.314	18.544	1.798E-13	7.270	77.481
-19.901	-76.324	56.424	-66.666	-85.341	18.675	3.067E-13	7.197	77.481
-19.972	-300.000	280.028	-66.743	-85.131	18.388	4.174E-12	6.832	77.481
-19.969	-85.857	65.888	-66.739	-84.806	18.066	2.848E-09	5.825	77.481

En concordancia con los resultados obtenidos en las tablas 4.15 – 4. 46, al realizar el monitoreo del OCh cuando se varía la distancia de transmisión, se determinó el desempeño de la red a través de los resultados del factor Q. A manera de conclusiones generales con respecto a los escenarios de simulación con multiplexación WDM, se puede decir que:

- Todas las conclusiones obtenidas en los escenarios sin multiplexación WDM son aplicables a los escenarios con multiplexación WDM, ya que se están trabajando solamente los siguientes parámetros: BER, Factor Q, Dispersión Cromática y Atenuación.
- Cuando se multiplexa, el desempeño de la red no es ampliamente modificado al incidir la dispersión cromática y atenuación en comparación con el canal simple. Este caso se trabajó con espaciamiento entre canales suficiente y con multiplexores y demultiplexores ideales parametrizados de tal forma que la diafonía fuese nula.

- Si el caso no fuese de condiciones ideales (no esta dentro del alcance del presente trabajo de grado), entonces el proceso de multiplexación afectaría directamente a la diafonía (incrementándola y por ende degradando el desempeño de sistema en la medida que el numero de canales aumente y/o el espaciamiento entre ellos se reduzca); así, es posible afirmar que dicho proceso no afecta directamente a la dispersión cromática (que depende de la velocidad de transmisión, tipo de fibra, de la longitud de onda y distancia de transmisión junto con la constante de dispersión) ni a la atenuación (que depende del tipo de fibra, de la longitud de onda, y de la distancia de transmisión junto con la constante de atenuación)
- Es importante considerar que cuando se obtuvieron las distancias de referencia para el canal simple, lo que se hizo fue un barrido entre las mismas para escoger la distancia máxima y mínima y por ende sacar un promedio; luego, al comparar cada distancia obtenida de cada canal particular ( $X_{ch_j}$ ), se tiene lo siguiente:

$X = \{ X_{min}; X_{pro}; X_{m\acute{a}x} \}$ :

Si,

- $X \leq X_{ch_j} \Rightarrow Q_j \geq 6$  (Desempeño bueno).
- $X = X_{ch_j} \Rightarrow Q_j = 6$  (Desempeño mínimo aceptable).
- $X \geq X_{ch} \Rightarrow Q_j < 6$  (Desempeño pobre).

#### 4.3 CRITERIOS BASADOS EN OPM PARA EL MONITOREO DEL CANAL ÓPTICO EN UNA RED METROPOLITANA WDM

Es necesario definir criterios, basados en el Monitoreo de Desempeño Óptico (OPM), con el fin realizar el monitoreo adecuado del canal óptico y analizar la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana WDM característica.

A continuación, se definen de manera general los criterios para el monitoreo del canal óptico, los cuales están basados en OPM y corresponden a las consideraciones técnicas y tecnológicas para el monitoreo adecuado de una red metropolitana WDM. Los criterios teóricos se dividen en dos categorías: conceptos teóricos sobre OPM y las recomendaciones de la ITU-Serie G (Sistemas y Medios de Transmisión, Sistemas y Redes Digitales) en el contexto de una red metropolitana con tecnología WDM.

Estos criterios se encuentran implícitos en el capítulo 2 del presente trabajo de grado y en los resultados obtenidos a través de investigación y desarrollos anteriores. Por otra parte, las consideraciones se obtienen a través del análisis de resultados de la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana WDM característica, a través de los escenarios de simulación realizados en OptiSystem 6.0. Además, sirven de referencia (en ningún momento pretenden ser absolutos) y son aplicables a cualquier tipo de red metropolitana que cumpla con las condiciones que se establecieron en la simulación.

Para lo anterior, es importante recordar que:

- El trabajo de grado sigue los lineamientos de trabajos publicados en institutos reconocidos como el IEEE, en donde primero se debe tener como referencia los resultados de una simulación, que desde luego son confiables por utilizar herramientas software muy potentes, para poder llevar a cabo dichos resultados a la realidad, realizando los respectivos ajustes. La definición de los criterios para el monitoreo del canal óptico no queda en un segundo nivel, ya que es uno de los temas centrales del trabajo de grado, y además no es poco confiable porque a través de una base teórica y usando una herramienta de simulación se pueden definir tales criterios para ser posteriormente probados y usados en la realidad (aspecto que puede ser desarrollado en futuros trabajos de grado).
- La definición de una red metropolitana WDM característica es un aporte significativo como lo son los criterios para el monitoreo del canal óptico y la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de dicha red. Esta red se refiere a un esquema de red (modelo o abstracción de la realidad) propuesto en un entorno de simulación apropiado para el desarrollo del trabajo de grado. Lo que se va a validar es la incidencia de los parámetros en el desempeño de la red metropolitana WDM característica.
- Los trabajos consultados durante el proceso investigativo indican que se debe partir de una base teórica y referenciar otros trabajos relacionados con el tema. Cualquier trabajo propone una temática a desarrollar, y algunos utilizan una herramienta software de simulación para validar los resultados en concordancia con los fundamentos teóricos. De acuerdo a lo descrito se postulan las conclusiones del trabajo. Además, los pasos anteriores son necesarios antes de llevar una implementación a la realidad.

#### 4.3.1 Criterios Teóricos

Todos los aspectos que se mencionan a continuación pertenecen a un conjunto de criterios que se encuentran enmarcados de manera implícita dentro de los capítulos 2 y 4 de este trabajo de grado. Es así como todo lo relacionado con OPM (es un modelo de referencia), BER( debe ser menor que 10<sup>-9</sup>), Factor Q (mayor a 6), ESNR (mayor a 17 dB), diafonía (asegurar eficiente espaciamiento entre canales y considerar buen diseño de los demultiplexores), filtros ópticos (cuyo ancho de banda es cuatro veces la velocidad de transmisión), espaciamientos CWDM y DWDM; no linealidades, dispersión, atenuación, etc. ya se encuentran mencionados durante el monitoreo del OCh, el cual se debe hacer tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.

#### 4.3.2 Criterios Obtenidos a partir de la Simulación

- **Para una transmisión CWDM sobre una fibra de tipo MetroCor con una velocidad de transmisión de 2.5 Gbps.**

Un criterio a tener en cuenta es que la potencia óptica en recepción no debe ser menor a -23 dBm esto es equivalente a no tener valores menores a -73 dBm de potencia eléctrica (PIN) en recepción, independientemente de la longitud de onda con la que se este transmitiendo.

Un valor muy importante es el de la relación señal a ruido eléctrica el cual no debe ser menor a 17,8 dB, este valor es independiente de la longitud de onda (criterio para asegurar buen desempeño).

- **Para una transmisión CWDM sobre una fibra de tipo MetroCor con una velocidad de transmisión de 10 Gbps.**

Para esta velocidad la potencia en recepción óptica y eléctrica no es un valor que garantice una óptima transmisión, como se ve en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 (para la ventana de 1310 nm la potencia es mayor que la de la ventana de 1550 nm y sin embargo la distancia alcanzada en 1550 nm con una menor potencia es mayor en comparación con la de 1310 nm) y el comportamiento depende del número de canales multiplexados, de la longitud de onda con la que se está transmitiendo; por tanto para este caso se debe hacer un análisis más minucioso, observar el diagrama del ojo y su apertura ya que éste reúne el comportamiento de todos los parámetros de medición y arroja el valor de la BER directamente; sin embargo, se puede decir que con un valor mínimo de -17,2 dBm de potencia óptica y un -61,5 dBm de potencia eléctrica en recepción y una ESNR no menor a 23,3 dB garantizan que los datos lleguen de manera adecuada, independiente de la longitud de onda con la que se está transmitiendo.

- **Para una transmisión CWDM sobre una fibra de tipo SMF-28 con una velocidad de transmisión de 2.5 Gbps.**

De la misma manera que para MetroCor en SMF-28 se debe tener en cuenta que la potencia óptica en recepción no debe ser menor a -22,5 dBm esto es equivalente a no tener valores menores a -72,4 dBm de potencia eléctrica (PIN) en recepción y la ESNR no debe ser menor a 18,3 dB, independientemente de la longitud de onda con la que se está transmitiendo.

- **Para una transmisión CWDM sobre una fibra de tipo SMF-28 con una velocidad de transmisión de 10 Gbps.**

Para esta velocidad la potencia en recepción óptica y eléctrica no es un valor que garantice una óptima transmisión, como se ve en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3., (para la ventana de 1310 nm la potencia es mayor que la de la ventana de 1550 nm y sin embargo la distancia alcanzada en 1550 nm con una menor potencia es mayor en comparación con la de 1310 nm) y el comportamiento depende del número de canales multiplexados, de la longitud de onda con la que se está transmitiendo, por tanto para este caso se debe hacer un análisis más minucioso, observar el diagrama del ojo y su apertura ya que éste reúne el comportamiento de todos los parámetros de medición y arroja el valor de la BER directamente, sin embargo se puede decir que con un valor mínimo de 19,3 dBm de potencia óptica y un -72,4 dBm de potencia eléctrica en recepción y una ESNR no menor a 18,3 dB garantizan que los datos lleguen de manera adecuada independiente de la longitud de onda con la que se está transmitiendo.

- **Para una transmisión DWDM sobre una fibra de tipo MetroCor con una velocidad de transmisión de 2.5 Gbps.**

Debido a la cercanía entre las longitudes de onda el manejo de la potencia es casi idéntico y el valor mínimo en la potencia óptica en recepción para lograr una buena transmisión es de -23,04 dBm y 73,17 dBm de potencia de recepción eléctrica con una ESNR no menor a 17,6 dB; estos valores no dependen de la longitud de onda y el número de canales multiplexados.

- **Para una transmisión DWDM sobre una fibra de tipo MetroCor con una velocidad de transmisión de 10 Gbps.**

De igual manera en este caso la velocidad de transmisión al ser mayor compromete la transmisión en la ventana de 1310 nm de tal forma que tener una mayor potencia óptica en recepción no garantiza que la transmisión va a ser buena, mientras en la de la ventana de 1550 nm se tiene una potencia óptica en recepción menor y se logran mejores resultados.

Para garantizar un óptimo comportamiento en la transmisión independiente de la longitud de onda de transmisión y la cantidad de canales multiplexados, se debe tener en recepción un valor mínimo en potencia óptica de -19,9 dBm y de potencia eléctrica de -66,6 dBm y una ESNR no menor a 18,07 dB.

- **Para una transmisión DWDM sobre una fibra de tipo SMF-28 con una velocidad de transmisión de 2.5 Gbps.**

Para garantizar un óptimo comportamiento en la transmisión independiente de la longitud de onda y la cantidad de canales multiplexados, se debe tener en recepción un valor mínimo de potencia óptica de -22,5 dBm y de potencia eléctrica de -73 dBm y una ESNR mayor a 17,6 dB.

- **Para una transmisión DWDM sobre una fibra de tipo SMF-28 con una velocidad de transmisión de 10 Gbps.**

Para garantizar un óptimo comportamiento en la transmisión independiente de la longitud de onda y la cantidad de canales multiplexados, sin dejar de lado la velocidad con la que se esta transmitiendo, ya que para velocidades altas, como se observa en las tablas, el hecho de tener una potencia mayor no garantiza que los datos en recepción se encuentren en óptimas condiciones (debido a la ISI y a los efectos no lineales). Se debe tener en recepción un valor mínimo en potencia óptica de -18 dBm, de potencia eléctrica de -64 dBm y una ESNR superior a 20 dB.

#### **4.3.3 Técnicas Utilizadas para Atenuar las Degradaciones.**

##### **4.3.3.1 Igualación de ganancia dinámica**

Aunque no se utilizó en la simulación por estar fuera del contexto de trabajo, es importante resaltar que según [60], *“A fin de compensar la desviación de ganancia introducida por una larga cadena de amplificadores, se puede utilizar un OSA o un controlador de potencia óptica y filtros de aislamiento de ganancia ajustables integrados, que permiten lograr una buena igualación en todos los canales de la señal agregada de DWDM”*

##### **4.3.3.2 Codificación de línea (formato de modulación)**

En el diseño e implementación de la simulación se empleó el formato de modulación NRZ debido a que tiene mejor eficiencia espectral en comparación con el RZ que emplea un mayor ancho de banda. Además, como el contexto de trabajo es una red metropolitana, RZ no es adecuado por que éste es más apropiado para grandes distancias y altas velocidades de transmisión [60], [61].

#### 4.3.3.3 Número de canales ópticos y su separación

En el desarrollo de la simulación se operó con 2, 4, 8 y 16 canales, espaciados 20 nm para CWDM en todo el espectro, y 0.8 nm para DWDM en la ventana de 1150 nm. Un aspecto clave para resaltar es el hecho de que el número máximo de canales DWDM cuyo desempeño es aceptable disminuye con el aumento de la longitud del enlace y/o la disminución de la separación del canal óptico, debido al efecto de la no linealidad óptica cada vez mayor cuando la velocidad de transmisión esta sobre los 10 Gbps [60].

#### 4.3.3.4 Tipos de fibra

Dentro del diseño de la simulación se usaron tres tipos de fibra óptica, en concordancia con la información proporcionada en las recomendaciones ITU-T G. 652, G. 653, y G. 655, y en la pagina web del proveedor *Corning*. De esta manera, para el caso de un canal simple (sin multiplexación), se emplearon las fibras SMF-28, DSF, y MetroCor, y para el caso de multiplexación WDM, solamente se trabajó con los dos tipos de fibra apropiados para tal fin (SMF-28 y MetroCor). Lo anterior se debe a que en ciertas circunstancias, los distintos tipos de fibra, pueden tener sus ventajas e inconvenientes entre sí. A manera de ilustración, la dispersión cromática de la fibra SMF-28 (G.652) es mayor que la de las fibras DSF (G.653) y MetroCor (G.655), y por lo tanto si se opera por encima de los 10 Gbps se podrían introducir los efectos no lineales; lo contrario ocurre en la ventana de 1310 nm, donde ésta presenta menor dispersión cromática que la DSF y MetroCor [60].

#### 4.3.3.5 Mezcla de diferentes tipos de fibras en un tramo

Aunque no se utilizó en la simulación por estar fuera del contexto de trabajo, es importante resaltar que según [60], *“Una técnica que se puede utilizar para atenuar los efectos de la no linealidad óptica es mezclar expresamente en un mismo tramo fibras con diferentes características. Por ejemplo, un tramo que contiene a la vez fibras con dispersión positiva y negativa tendrá un alto valor de dispersión local (conveniente para reducir los efectos de la transmodulación de fase (XPM) y de la mezcla de cuatro ondas (FWM)) y una baja dispersión neta (lo cual reduce las necesidades de compensación de dispersión) “*.

Para terminar, es preciso notar los siguientes aspectos:

- Con respecto al coeficiente de atenuación ( $\alpha$ ), el mejoramiento del factor de agua (OH) con el tiempo es evidente, debido a la evolución en la ingeniería de los diseños de las fibras ópticas; es así que según [61], para una fibra estándar se tiene que en promedio  $\alpha$  es de 0.7 dB/km para el año 1990, 0.5 dB/km para el año 2000, y de 0.35 dB/km para el año 2003.
- En los sistemas prácticos del mundo real es preciso tener en cuenta numerosos efectos que limitan la distancia de transmisión, reduciendo el máximo alcance. Sin embargo, es importante utilizar herramientas potentes de simulación que permitan obtener valores de referencia sobre el máximo alcance en condiciones ideales [60].
- Según [61], *“Es imposible seleccionar un único valor para la máxima potencia óptica de entrada que permita obtener un factor Q mayor que 7. Esta restricción máxima de entrada puede utilizarse para identificar la región de mejor calidad de funcionamiento del sistema y puede determinarse por medio de simulaciones preliminares con los parámetros del sistema deseados (tipos de fibra, compensación de la dispersión, separación entre amplificadores, y separación entre canales) ”*.

Finalmente, después de haber analizado la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana WDM y definido algunos criterios para el monitoreo del canal óptico, a continuación se procede a puntualizar las conclusiones, recomendaciones y perspectivas o trabajo futuro.

## CAPÍTULO 5.

### CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS (TRABAJO FUTURO)

En este trabajo de grado se alcanzaron los objetivos propuestos permitiendo alcanzar un conocimiento más amplio sobre el monitoreo de desempeño óptico y la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica. Tras un proceso investigativo, se definieron criterios para el monitoreo del canal óptico, y se analizaron y evaluaron diferentes escenarios de simulación para determinar la incidencia de tales parámetros en el desempeño de la red metro WDM.

Mediante la investigación sobre cómo realizar un adecuado monitoreo del canal óptico y la verificación a través de la simulación de una red metropolitana WDM característica, se realizó la validación de la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de este tipo de redes.

Además de las conclusiones que se muestran en el capítulo 4, a continuación se muestran las conclusiones generales respecto al trabajo en sí, al monitoreo del canal óptico y a la simulación, continuando con las recomendaciones y las perspectivas (trabajos futuros).

Se definieron criterios para el monitoreo del canal óptico y la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana WDM. Mediante la simulación de una red metropolitana WDM característica, se validó la incidencia de dichos parámetros en el desempeño de la misma, con el fin de brindar a los estudiantes, docentes, empresas de telecomunicaciones, proveedores y operadores de red, un conjunto de criterios bien definidos para el monitoreo adecuado de estas redes.

Este trabajo de grado es de gran utilidad para los proveedores y operadores de red, debido a las ventajas que ofrece la realización de un adecuado monitoreo del canal óptico con el fin de obtener un mejor desempeño de las redes metropolitanas WDM, y de esta manera lograr una mejor percepción de calidad de servicio de los usuarios.

Este trabajo de grado permite generar nuevos procesos de investigación y desarrollo en el área de las comunicaciones ópticas, campo en el cual, el país se encuentra rezagado, debido a la carencia de equipos adecuados y de proyectos enfocados en estas temáticas.

Con este trabajo de grado se logró obtener un amplio conocimiento de la tecnología WDM y del monitoreo del canal óptico con alta proyección en las comunicaciones ópticas, y los resultados obtenidos son de gran importancia en el campo investigativo de la línea de comunicaciones ópticas del GNTT; a su vez, este estudio es útil para posteriores proyectos que deseen aplicar estas temáticas en nuevas soluciones dentro del campo óptico, y sirve de referencia para temas tratados en cursos y asignaturas del programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones que traten con temáticas relacionadas.

A través de la realización de este trabajo de grado se obtuvieron valiosos aportes en el entorno social, académico e investigativo (área de metodología, modelamiento y simulación con herramientas de sistemas ópticos).

Este trabajo de grado se constituye en una guía factible de ser adoptada por los operadores de este tipo de redes, teniendo en cuenta que el OPM avanzado o el monitoreo de la calidad de la señal, que mide la SNR por canal, ha sido adoptado en los laboratorios como una técnica de monitoreo de nueva generación.

Finalmente, mediante la utilización de la herramienta software (OptiSystem 6.0), se analizó y se evaluó la eficiencia y efectividad de la solución al problema planteado (monitoreo del canal óptico e incidencia de los parámetros mencionados en el desempeño de la red) a través de la simulación de una Red Metropolitana WDM característica.

## 5.1 RESPECTO AL TRABAJO

Este trabajo de grado definió lo importante que es llevar un monitoreo óptico adecuado para garantizar el óptimo funcionamiento de una red. Además, se adquirieron habilidades y destrezas en cuanto al proceso de trabajo en equipo y cumplimiento de las fases del trabajo. También permitió interactuar con personas que tienen dominio sobre diferentes áreas de las telecomunicaciones, logrando consolidar los fundamentos del trabajo. La participación como ponentes en el “VI Congreso Internacional Electrónica y Tecnologías de Avanzada” realizado en la Universidad de Pamplona, Pamplona (Norte de Santander), en marzo de 2008, afianzó el proceso de formación en el área de investigación.

Se aprendió día a día de los errores, a ser perseverante, a saber que “esfuerzo no es lo mismo que resultados”, a ser buenos investigadores (curiosidad por resolver cada duda), y a seleccionar y descartar lo que no es pertinente con el propósito de llegar al punto indicado.

## 5.2 RESPECTO AL MONITOREO DEL CANAL ÓPTICO Y A LA SIMULACIÓN

Los resultados obtenidos de la investigación teórica se puntualizan a continuación:

- Las causas principales de la distorsión en la forma de onda óptica son: efecto chirp, dispersión de la fibra, pérdidas de la fibra (atenuación), y efectos no lineales.
- Es muy importante precisar que a velocidades de 10 Gbps, el mejoramiento en el desempeño de la transmisión sobre la fibra MetroCor en relación con la fibra SMF-28 será más pronunciado que a velocidades de 2.5 Gbps.
- Cuando se utilizan láser modulados externamente (EA-DFB y MZ) a 10 Gbps para un solo canal, también se encuentra una mejora en el desempeño (en términos de máximo alcance sin compensación de dispersión) del sistema utilizando una fibra con dispersión negativa (MetroCor) que una con dispersión positiva (SMF-28). Además, aumentar el espaciamiento entre los canales significa solamente un mejoramiento pequeño en cuanto al máximo alcance logrado. Es importante decir que la fibra MetroCor se comporta mejor que la SMF-28 en las bandas C y L para distancias superiores a 50 Km (el desempeño esta en función de las longitudes de onda).
- Para una BER dada, el receptor tiene una mejor sensibilidad (más pequeña) usando una fibra MetroCor que una SMF-28; y consecuentemente para una sensibilidad de receptor dada, se obtiene un peor desempeño (BER más grande) usando una fibra SMF-28 que una MetroCor. Además, se debe tener en cuenta que al aumentar la velocidad de transmisión de datos, la sensibilidad del receptor empeora.

El análisis de los resultados de la simulación para el canal simple se presenta a continuación:

- La fibra SMF-28 presenta un mejor comportamiento cuando están presentes la atenuación y la dispersión cromática en 1310 nm a 2.5 Gbps y a 10 Gbps comparada con la fibra MetroCor. Lo anterior es debido a que a 2,5 Gbps la dispersión cromática no afecta tanto la señal como a 10 Gbps, donde la fibra MetroCor presenta mejor desempeño en cuanto a la máxima distancia alcanzada sin compensación de dispersión para un factor  $Q=6$ .
- La fibra DSF es la que peor desempeño presenta, debido a que su dispersión "cero" es no deseada por que habilita el efecto de las no linealidades; además para 2.5 Gbps y 10 Gbps se alcanzaron las menores distancias para un factor  $Q=6$  en comparación con los otros dos tipos de fibra.
- La fibra MetroCor no se diseñó para operar en 1310 nm; por su parte, la fibra DSF tampoco se optimizó en esa ventana. A pesar de lo anterior, se hicieron las pruebas correspondientes a nivel de simulación que permitieron obtener resultados en cuanto al desempeño de la red.
- Se comprobó que la ventana de 1550 nm presenta un mejor desempeño que la ventana de 1310 nm en cuanto a la máxima distancia alcanzada para un factor  $Q=6$ , para los tres tipos de fibra empleadas (SMF-28, DSF, MetroCor) y para las velocidades de 2.5 y 10 Gbps, debido a que en dicha ventana la constante de atenuación es menor.
- Se comprobó que las distancias alcanzadas a menor velocidad de transmisión de datos son siempre mayores, para las condiciones del sistema establecidas (factor  $Q=6$ ), por que la dispersión cromática es proporcional al cuadrado de la velocidad de transmisión de datos, y por lo tanto los pulsos se ven más afectados por la ISI degradando el desempeño del sistema.
- En términos de desempeño de la red, la fibra MetroCor es la que mejor se comporta, seguida de la fibra estándar, y en el último lugar se encuentra la fibra DSF, de acuerdo a los resultados obtenidos sobre las máximas distancias alcanzadas con cada fibra.
- Los efectos de la atenuación y de la dispersión cromática se ven reflejados en función de la longitud de onda, por eso los valores obtenidos van cambiando de acuerdo a cómo cambien las degradaciones ópticas mencionadas.

El resumen del análisis de los resultados de la simulación para multiplexación permite afirmar que el desempeño de la red en cuanto a la incidencia de la dispersión cromática y atenuación no se modifica en gran medida con respecto al canal simple.

Por otro lado, la respuesta de los parámetros cuando se inyecta tráfico en el canal permite concluir que de ellos depende directamente la calidad de la señal, puesto que para una determinada longitud de onda la dispersión de la fibra tiene un comportamiento diferente, viéndose afectada la señal transmitida de forma distinta, y como se pudo observar el aumento de potencia no garantiza un mejoramiento en la señal; por el contrario, se puede ver más comprometida atenuando su valor en el trayecto de transmisión debido a los efectos no lineales. La velocidad de igual forma juega un papel importante dentro de la transmisión ya que al aumentarla se debe tener más cuidado al momento de transmitir los datos porque se hacen más vulnerables a los errores (por ejemplo se presenta ISI), y cuando sucede un error, el número de bits comprometido es mayor que para una menor velocidad de transmisión de datos, haciendo que su corrección y recuperación sea más compleja.

Entre las consideraciones que se deben tener en cuenta para el monitoreo adecuado del canal óptico están:

1. Se debe hacer un estudio de la cantidad de tráfico que va a existir en la red (promedio), las distancias entre nodos (longitud de la fibra), con el fin de seleccionar el tipo de fibra, porque según los resultados obtenidos de la simulación, las fibras tienen un comportamiento diferente dependiendo de las distancias. La fibra de tipo MetroCor tiene un mejor comportamiento en las condiciones donde las distancias a cubrir son mayores; lo anterior gracias al manejo de la dispersión que ese tipo de

fibra hace al aprovechar la dispersión negativa, mientras que en cortas distancias su comportamiento es muy parecido al de la fibra estándar SMF-28.

2. Es muy importante observar que todas las conexiones y empalmes estén bien realizados, por que se constituyen en factores de gran incidencia en las pérdidas de la señal.
3. Es de vital importancia observar el comportamiento de los parámetros de la señal, en su transcurso hacia el equipo de recepción como por ejemplo la potencia (en este caso de estudio), ver cuanto se atenúa la señal y ver cuales son las causas más importantes de estas perdidas, para resolver este problema.

Por último, para llevar a cabo un buen monitoreo de la calidad de la señal, se recomienda usar la BER y la ESNR como parámetros de medición. El comportamiento de estos parámetros se puede observar por medio del diagrama del ojo, el cual permite observar el estado de la señal en un momento dado, con el fin de analizar la incidencia de degradaciones ópticas como la atenuación y la dispersión cromática.

### 5.3 RECOMENDACIONES

Al hacer una simulación en primera instancia se deben realizar pruebas en concordancia con la teoría con el fin de definir cuales son aplicables para el cumplimiento de los objetivos, recordando que en un proceso investigativo se puede concluir que un camino no es el adecuado.

Se recomienda utilizar los ejemplos que están en el CD para un mejor estudio del monitoreo del canal óptico OCM, usando la herramienta OptiPerformer.

### 5.4 PERSPECTIVAS (TRABAJOS FUTUROS)

Este trabajo de grado sirve como referencia para futuros trabajos de grado o proyectos que busquen definir criterios para el monitoreo del canal óptico en una red metropolitana WDM real. Este trabajo de grado es importante ya que es un punto de partida con proyección a la investigación (futuro inmediato, destacándose la diafonía y las no linealidades, en una red MAN u otra red), a la implementación a nivel de laboratorio (pruebas), y finalmente a la implementación a nivel de laboratorio (futuro lejano).

A futuro es necesario analizar otras alternativas para el monitoreo del canal óptico (criterios), como por ejemplo, extendiendo el área de una red (WAN o backbone), para operar con otros elementos ópticos como amplificadores, regeneradores, etc.

Además, analizar la incidencia de otro tipo de degradaciones ópticas como la diafonía óptica (crosstalk), la dispersión por modo de polarización (PMD), y los efectos no lineales (SPM, XPM y FWM) tanto en redes MAN como WAN.

En cuánto a costos, falta analizar la relación costo/beneficio para comparar el desempeño de cada fibra con su precio, y por ende conseguir el óptimo valor de dicha relación, con el fin de tomar la mejor decisión al aplicar este concepto en un proyecto real.

A continuación, se sugieren algunos posibles trabajos futuros en relación con OPM:

- OPM puede ser usado para realizar nuevos métodos de gestión de tráfico. La alta capacidad y prioridad de tráfico pueden ser sincronizadas dinámicamente para canales ópticos de alto desempeño.

- Las interacciones entre OPM y sistemas de gestión de elementos de red y red se convierten en inconvenientes críticos. Se originan interrogantes relacionados con la información que debería pasar alrededor de la red con el fin de mantener una gestión escalable de red, por ejemplo, OPM en el Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet (IETF, *Internet Engineering Task Force*).
- Profundizar en otros deterioros de transmisión notables en WDM:
  - Ruido de amplificador.
  - Distorsión y transientes de amplificador.
  - Dispersión por modo de polarización
  - No linealidades y crosstalk
  - Jitter timing
  - Efectos de polarización
  - Efectos de interferencia – MPI
  - Transferencia RIN del láser de bombeo
  - Distorsión de filtro óptico
  - Crosstalk lineal

---

**BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Grote Walter, Henry Cristian, Olivares Ricardo, Saavedra Fideromo, "Desarrollo de una red experimental IP/WDM", Red Óptica Reuna, Santiago de Chile, 2002. Documento PDF disponible en: <http://www.senacitel.cl/downloads/senacitel2000/ID051.PDF>
- [2] Salazar Jorge, Mora Liz, "Criterios para el Diseño de una Red de Paquetes IP sobre una Red Óptica DWDM (IPoDWDM)", Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, 2003.
- [3] Hugo Zamora Farias, "Multiplexación por Longitud de Onda en Redes Troncales de Fibra Óptica" Universidad Técnica Del Estado (USACH). Documento PDF disponible en: <http://www.senacitel.cl/downloads/senacitel2000/ID051.PDF>
- [4] Rajiv Ramaswami, Cisco Systems. Optical Networking Technologies, "What Worked and What Didn't", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 44, No. 9, September 2006, pp. 132-139.
- [5] Departamento de Electrónica, "Evolución de las Comunicaciones". Documento en línea disponible en: <http://www.elo.utfsm.cl/~ipd481/Memorias/Memoria%204/Cap%EDtulo%201%20-%20INTRODUCCION.doc>
- [6] Siemens, "Redes Ópticas". Página Web disponible en: [http://www.siemens.com.mx/IC/EN/t\\_nav221.html](http://www.siemens.com.mx/IC/EN/t_nav221.html)
- [7] Comunicaciones World, "Redes Metropolitanas Multiservicio. Nuevas oportunidades, aplicaciones y servicios", Mayo 2002. Documento PDF disponible en: [www.idg.es/comunicaciones/pdf/21%20Esp%20Soluzion.pdf](http://www.idg.es/comunicaciones/pdf/21%20Esp%20Soluzion.pdf)
- [8] ITU-T Rec. E.800, "Terms and Definitions Related to Quality of Service and Network Performance including Dependability", Agosto, 1993.
- [9] Pabón Diana, Sánchez Alexandra, "Definición de Criterios de Diseño para redes OVPN con Calidad de Servicio (QoS) bajo el estándar DiffServ soportado por el protocolo GMPLS", Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, 2005.
- [10] Ricardo Martínez, Carolina Pinart, *Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC) et al.*, "Challenges and Requirements for Introducing Impairment-Awareness into the Management and Control Planes of ASON/GMPLS WDM Networks", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 44, No. 12, December 2006, pp. 76-85.
- [11] Pablo Calatayud, Manuel López-Amo, David Benito, Alayn Loayssa y María José Erro Jose Javier Astrain, "Diseño de una red óptica MAN WDM transparente basada en un protocolo round robin síncrono con reservas", 2001. Documento PDF disponible en: [http://w3.iec.csic.es/ursi/articulos\\_villaviciosaodon\\_2001/articulos/31.pdf](http://w3.iec.csic.es/ursi/articulos_villaviciosaodon_2001/articulos/31.pdf)

- 
- [12] Huawei Technologies, "Redes Ópticas DWDM". Página Web disponible en:  
<http://www.huawei.com>
- [13] Cisco Systems, Inc., "Introduction to DWDM for Metropolitan Networks", 2000. Documento PDF disponible en:  
<http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/product/mels/dwdm/dwdm.pdf>
- [14] Recomendación ITU-T G.697, "Supervisión óptica para sistemas de multiplexación por división en longitud de onda densa", Junio, 2004.
- [15] Carolina Pinart, Abdelhafid Amrani, Gabriel Junyent, "Monitorización de servicios en redes ópticas inteligentes y transparentes". Documento PDF disponible en:  
<http://www.ctc.es/resources/doc/071130-11-pinart-tel-id2004-42875.pdf>
- [16] D. C. Kilper, *et al.*, "Optical Performance Monitoring", *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 22, No. 1, January 2004, pp. 294-304.
- [17] Fawaz, W., *et al.*; "Service Level Agreement and Provisioning in Optical Networks", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 42, No. 1, January 2004, pp. 36-43.
- [18] Pinart, C.; Junyent, G.; "On implementing a management plane for service provisioning in IP over reconfigurable WDM networks", *Proc. ONDM 2004*, Gante, 2-4 Febrero 2004, pp. 465-480.
- [19] Muñoz, R.; Pinart, C.; Martínez, R.; Amrani, A.; Junyent, G.; "An experimental ASON based on OADM rings and a GMPLS control plane", *Journal of Fiber and Integrated Optics*, Vol. 23, No. 2-3, Marzo-Junio 2004, pp. 67-84.
- [20] Muñoz, R.; Pinart, C.; Martínez, R.; Sorribes, J.; Junyent, G.; "Experimental demonstration of two new GMPLS lightpath setup proposals for soft-permanent connections over a unidirectional OADM ring implemented on EMPIRICO testbed", *III Workshop MPLS Networks*. Girona, 25- 26 Marzo 2004.
- [21] Recomendación ITU-T G.872, "Arquitectura de las Redes de Transporte Ópticas", Noviembre 2001.
- [22] Kazuhide Nakajima and Masaharu Ohashi, "A Study on the Relationship Between DWDM Transmission Performance and Chromatic Dispersion", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 14, No. 9, September 2002, pp. 1276-1278.
- [23] Andina Link Virtual, "Curso de Fibra Óptica. Universidad de las Américas - Puebla". Página Web disponible en:  
[http://www.andinalink.com/es/educational/work\\_shops\\_bb/fibra\\_optica/propiedadesfo.asp](http://www.andinalink.com/es/educational/work_shops_bb/fibra_optica/propiedadesfo.asp)
- [24] J. H. Lee, H. Y. Choi, S. K. Shin, and Y. C. Chung, *Fellow, IEEE*, "A Review of the Polarization-Nulling Technique for Monitoring Optical-Signal-to-Noise Ratio in Dynamic WDM Networks", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 24, No. 11, November 2006, pp. 4162-4171.
- [25] Cisco Systems, Inc., "WDM Network Design: Introduction to Optical Design", 2007. Página Web disponible en:  
<http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=30886&rl=1>

- [26] LuminentOIC, "OSNR and Sensitivity in Long Reach Transceivers". Documento PDF disponible en: [http://www.luminentoi.com/products/app\\_notes/files/OSNR\\_Sensitivity\\_101.pdf](http://www.luminentoi.com/products/app_notes/files/OSNR_Sensitivity_101.pdf)
- [27] Circadiant Systems Inc., "BER vs. OSNR", Febrero 2003. Documento PDF disponible en: <http://www.circadiant.com/resources/techbriefs/pdf/tb007.pdf>
- [28] Cisco Systems, Inc., "WDM Network Design: OSNR and Dispersion-Based Design", 2007. Página Web disponible en: <http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=30886&seqNum=8&rl=1>
- [29] Maxim Integrated Products, "Optical Signal-to-Noise Ratio and the Q-Factor in Fiber-Optic Communication Systems", *MAXIM High-Frequency/Fiber Communications Group*, Febrero 2002. Documento PDF disponible en: <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/4hfan902.pdf>
- [30] JDS Uniphase Corporation, "Sistema de Monitoreo para Redes de Fibra Óptica", 2005. Documento PDF disponible en: [http://www.jdsu.com/sea/technical\\_resources/product\\_documents/brochure/onms\\_br\\_fop\\_tm\\_sp\\_1105.pdf](http://www.jdsu.com/sea/technical_resources/product_documents/brochure/onms_br_fop_tm_sp_1105.pdf)
- [31] Padtec Optical components and systems S.A., "Características de la Plataforma MetroPad®", Marzo 2004. Documento PDF disponible en: [http://www.padtec.com.br/docs/esp/metropad\\_caracteristicas\\_esp.pdf](http://www.padtec.com.br/docs/esp/metropad_caracteristicas_esp.pdf)
- [32] Esther Gómez, Departamento de Marketing Fibernet, "Sistemas de comunicaciones con fibra óptica", *BOLETIC* Junio 2004. Documento PDF disponible en: <http://www.fibernet.es/pdf/mono11.pdf>
- [33] Maria de las Nieves Lorenzo González, "Influencia del Ruido Gaussiano Correlacionado en la sincronización de Sistemas Caóticos", julio 2000. Documento PDF disponible en: [http://descargas.cervantesvirtual.com/servlet/SirveObras/57961630323574941976613/005411\\_4.pdf](http://descargas.cervantesvirtual.com/servlet/SirveObras/57961630323574941976613/005411_4.pdf)
- [34] Amrani A., Roldan J., Junyent G., "Optical Monitoring System for Scalable All-Optical Networks", *Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, 1997. LEOS apos;97 10th Annual Meeting. Conference Proceedings., IEEE*, Vol. 2, November 1997, pp. 270 – 271.
- [35] Dorren, H.J.S.; Van de Bergh, M.P.H.; Van der Tol, J.J.G.M., "Monitoring Optical WDM- Networks by using Statistical Methods", *Communications, 1999. APCC/OECC apos;99. Fifth Asia-Pacific Conference on ... and Fourth Optoelectronics and communications Conference*, Vol. 1, 1999, pp. 303-305.
- [36] A. Ritcher, W. Fischler, H. Bock, R. Bach and W. Grupp, "Optical Performance Monitoring in Transparent and Configurable DWDM Networks", *IEE Proc.-Optoelectron.*, Vol. 149, No. 1, February 2002, pp. 1-5.
- [37] D. C. Kilper and Weingartner, "Monitoring Optical Network Performance Degradation Due to Amplifier Noise", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, No. 5, May 2003, pp. 1171-1178.
- [38] J. Yang, M. Y. Jeon, J. Cao, Z. Pan and S.J.B. Yoo, "Performance Monitoring in Transparent Optical Networks using Self-Monitoring Optical-Labels", *Electronics Letters*, Vol. 40, No. 21, October 2004.

- [39] Carmen Mas Macucha, Ioannis Tomkos, "Optimal Monitoring Equipment Placement for Fault and Attack Location in Transparent Optical Networks", N. Mitrou *et al.* (Eds.): NETWORKING 2004, LNCS 3042, 2004, pp. 1395-1400.
- [40] Chien-Hung Yeh, Chien-Chung Lee, Sien Chi, "Optical Monitoring Technique Based on Scanning the Gain Profiles of Erbium-Doped Fiber Amplifiers for WDM Networks", *Optics Communications*, Volume 241, Issues 4-6, November 2004, pp. 333-338. Documento PDF disponible en: <http://www.sciencedirect.com/>
- [41] Richard Habel, Kim Roberts, Alan Solheim, James Harley, "Optical Domain Performance Monitoring", Nortel Networks, 1285 Baseline Road, Ottawa, Ontario, Canada, K2C 0A7.
- [42] Daniel R. Seligman, CA, Inc., "How Not to Build a Performance Monitoring Agent", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 45, No. 4, April 2007, pp. 138-142.
- [43] C. Muñoz, J. Muñoz, "Metodología para la Simulación de Equipos de Telecomunicaciones", Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, 1995.
- [44] B. Vega, J. Ramos, "Análisis y Evaluación de Disciplinas de Servicio en Redes de Paquetes", Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, 2006.
- [45] VPIsystems®, "Expert Solutions for Photonic Design Automation", Documento PDF disponible en: <http://www.VPIphotonics.com>
- [46] VPIsystems, Inc, VPItransmissionMaker™ WDM. Página Web disponible en: <http://www.vpi-photonics.com/TMWDM.php>
- [47] System Design Software, Optiwave Systems Inc. Página Web disponible en: <http://www.optiwave.us>
- [48] Optiwave Systems Inc., OptiSystem 6.0. Página Web disponible en: <http://www.optiwave.com/site/products/system.html>
- [49] Rsoft, OptSim 4.6. Página Web disponible en: [http://www.rsoftdesign.com/products/system\\_simulation/OptSim/](http://www.rsoftdesign.com/products/system_simulation/OptSim/)
- [50] I. Tomkos *et al.*, "Demonstration of Negative Dispersion Fibers for DWDM Metropolitan Area Networks", *IEEE Journal On Selected Topics In Quantum Electronics*, Vol. 7, No. 3, May/June 2003, pp. 439 - 460.
- [51] I. Tomkos *et al.*, "10 – Gb/s Transmission of 1.55 –  $\mu$ m Directly Modulated Signal over 100 Km of Negative Dispersion Fiber", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vo.13. No.7, Julio 2001, pp 735- 737.
- [52] Emilio José Gualda Manzano, Tesis Doctoral, "Optimización de las Prestaciones de Enlaces Ópticos Submarinos de Gran Capacidad y Larga Distancia Mediante el Control de La Dispersión", Escola Tècnica Superior D'enginyeria de Telecomunicació de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, 2005. Documento PDF disponible en: <http://www.icfo.es/images/publications/T05-001.pdf>

- [53] Recomendación ITU-T G.694.2, "Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda: Plan de multiplexación por división aproximada de longitud de onda", Diciembre de 2003.
- [54] Recomendación ITU-T G.694.1, "Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda: Plan de frecuencias con multiplexación por división de longitud de onda densa", Junio de 2002.
- [55] José Antonio Dinamarca Ossa, "Análisis de Diagrama de Ojo", Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Electrónica, Teoría de Comunicaciones Digitales, Valparaíso (Chile), 2002. Documento PDF disponible en:  
<http://www.elo.utfsm.cl/~elo341/material/DiagOjos.pdf>
- [56] José A. Martín Pereda, "Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones", PEARSON Educación S.A. Madrid, España 2004.
- [57] Carlos Eduardo Pérez Valenzuela, Tesis Doctoral, "FORMATS DE MODULATION POIR LES TELECOMMUNICATIONS OPTIQUES" l'ecole Nationale Superifure de Telecommunications de Bretagne, 2006.
- [58] Maria Carmen España Boquera,"COMUNICACIONES OPTICAS CONCEPTOS ESENCIALES Y EJERCICIOS", Díaz Santos S.A. Madrid España 2005.
- [59] Recomendación ITU-T O.201, "Especificaciones de los Aparatos de Medida", Julio 2003.
- [60] Recomendación ITU-T G.696.1, "Aplicaciones de la multiplexación por división en longitud de onda densa en el intradominio longitudinalmente compatibles", Julio de 2005.
- [61] Suplemento 39 a las Recs ITU-T de la serie G, "Consideraciones sobre Diseño e Ingeniería de Sistemas Ópticos", Febrero, 2006.
- [62] Tektronix, Inc., "Análisis de "jitter" mediante métodos espectrales", Mayo 2006. Documento PDF disponible en:  
<http://www.afc-ingenieros.com/NotasTecn/Osciloscopios/AnalisisJitter.pdf>
- [63] TAKAHASHI (H.), ODA (K), TOBA (H.): Impact of crosstalking in an arrayed-waveguide multiplexor on N xN optical interconnection, *j., Lighwave Technol.*, Vol.14, No. 6, pp1097-1105, 1996.
- [64] LIU (F.), RASMUSEEN (C.J.), PEDERSEN (R.J.S.): Experimental verification of a new model describing the influence of incomplete signal extinction ratio on the sensitivity degradation due to multiple interferometric crosstalk, *Photonics Technology letters*, Vol. 11, No. 1 pp.137-139, 1999.

## GLOSARIO

**Absorción:** Cantidad de atenuación óptica en la fibra generada por la transformación de potencia óptica en calor.

**Ancho de banda óptico:** En redes ópticas, es el rango de frecuencias dentro del cual una fibra óptica o un dispositivo terminal pueden transmitir datos o información.

**APS:** Mecanismo de conmutación que enruta el tráfico de las líneas principales a las líneas de protección para protegerlo de fallos o cortes de fibra.

**Atenuación:** Decremento en la potencia de la señal a lo largo de una fibra óptica. Es causada por una combinación de absorción y dispersión y es expresada usualmente en decibeles por kilómetro (dB/km).

**Banda Ancha:** Método de transmisión de datos en el cual múltiples señales comparten el ancho de banda de una portadora de alta frecuencia.

**BER:** Cantidad de bits transmitidos que son recibidos incorrectamente.

**Canal:** Ruta de comunicación o la señal enviada sobre la ruta. En WDM/DWDM, un canal es asignado para especificar una longitud de onda.

**Capacidad:** Medida de la cantidad de información que un elemento de telecomunicaciones puede transportar o procesar. Puede ser expresada en bits por segundo (bps), o como el número de conexiones establecidas.

**Demultiplexor:** Módulo que separa dos o más señales que fueron combinadas por un equipo multiplexor compatible.

**DFB:** Diodo Láser de inyección construido con un enrejado de reflexión Bragg fuera de la región activa para suprimir los múltiples modos longitudinales y mejorar un solo modo longitudinal.

**Diodo láser:** Dispositivo semiconductor que emite luz coherente cuando es estimulado.

**Dispersión:** Ensanchamiento en el dominio del tiempo de una señal de luz causada por señales de luz viajando a diferentes velocidades a través de una fibra óptica. Puede ser causada por efectos modales o cromáticos.

**Dispersión cromática:** Propiedad de la fibra óptica por la cual las longitudes de onda en una fibra óptica viajan a diferentes velocidades y llegan a diferentes tiempos, resultando en una degradación de la señal recibida.

**Dispersión material:** Dispersión resultante de las diferentes velocidades de cada longitud de onda en una fibra.

**Dispersión modal:** Dispersión causada por las diferentes distancias de tránsito de los diferentes modos de propagación, que resultan en tiempos de llegada diferentes.

**Dispersión Rayleigh:** Dispersión de luz que resulta de pequeñas heterogeneidades en la densidad o composición del material.

**DSF:** Tipo de fibra monomodo diseñada para tener dispersión cero en la región de 1550 nm. Trabaja pobremente para aplicaciones DWDM debido a sus altas no linealidades en el punto de dispersión cero.

**EDFA:** Dispositivo utilizado para amplificar señales ópticas. Estos, a diferencia de los regeneradores, no convierten la señal a formato eléctrico antes de amplificarla. En un EDFA las fibras son dopadas con erbio, el cual puede amplificar la luz en la región de 1550 nm cuando es bombeado un láser externo.

**ESCON:** Arquitectura de Conexión de Sistemas Empresariales. Desarrollada por IBM.

**Espaciamiento de canal óptico:** Separación, usualmente expresada como una frecuencia, entre longitudes de onda de canales adyacentes WDM/DWDM.

**Fiber Channel:** Estándar que define canales de comunicación de computadores sobre fibra óptica a velocidades entre 132 y 1062.5 Mbps., sobre distancias de hasta 10 km.

**Fibra monomodo:** Fibra óptica de núcleo pequeño a través del cual solamente puede propagarse un modo.

**Fibra oscura:** Fibra óptica inactiva. Típicamente cuando la fibra es instalada parte de esta no es utilizada y permanece en reserva para uso futuro.

**Fotodetector:** Transductor optoelectrónico tal como un fotodiodo PIN o un fotodiodo de avalancha.

**Fotodiodo:** Dispositivo semiconductor que convierte luz en corriente eléctrica.

**FSO:** Transmisión de información codificada en luz punto a punto para cortas distancias a través de espejos utilizando el espacio libre como medio de transmisión.

**FWM:** Efecto no lineal que ocurre en los sistemas DWDM cuando múltiples longitudes de onda se mezclan para formar nuevas longitudes de onda. Este efecto es más predominante cerca al punto de dispersión cero y a espaciamentos pequeños de longitudes de onda.

**GMPLS:** Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo Generalizado. Conjunto de estándares de la IETF diseñados para permitir a los flujos de paquetes ser conmutados con base en etiquetas en vez de la dirección de destino. GMPLS está basado en el concepto de enrutamiento al extremo y conmutación en el núcleo, independientemente del protocolo.

**Jitter:** Variaciones en el tiempo, pequeñas y rápidas, de una señal o forma de onda debido a ruido, cambios en las características de los componentes, voltajes, sincronización, etc.

**Lambda:** Canal de datos en sistemas WDM/DWDM asignados a una longitud de onda específica. Lambda y longitud de onda son términos intercambiables.

**Láser:** Originalmente era un acrónimo para Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. El láser es una fuente que produce luz coherente casi monocromática.

**Latencia:** Lapso necesario para que un paquete de información viaje desde la fuente hasta su destino.

**Longitud de onda:** Distancia entre puntos de fase correspondiente de dos ciclos consecutivos de una onda. En los sistemas DWDM, longitud de onda es un término intercambiable con lambda.

**Longitud de onda central:** Longitud de onda medida en el punto central de la potencia óptica efectiva de un láser.

**MPLS:** Conjunto de estándares de la IETF diseñados para permitir a los flujos de paquetes ser conmutados con base en etiquetas en vez de la dirección de destino. MPLS está basado en el concepto de enrutamiento al extremo y conmutación en el núcleo.

**Multiplexor:** Módulo que combina dos o más señales en una sola para ser transportada sobre una línea o fibra.

**MUX:** Ver Multiplexor.

**NDSF:** Tipo de fibra monomodo diseñada para tener dispersión cero en la región de 1310 nm.

**No linealidad:** Desviación de la linealidad en un circuito electrónico, dispositivo electro-óptico, o fibra, que genera componentes no deseados en una señal.

**Núcleo:** Porción central conductora de luz de una fibra óptica. Tiene un índice de refracción más alto que el revestimiento.

**NZDSF:** Tipo de fibra monomodo con dispersión modificada que tiene el punto de dispersión cero cerca de la ventana de 1550 nm pero fuera de la actual ventana usada para la transmisión de señales. Está diseñada para maximizar el ancho de banda óptico mientras disminuyen las no linealidades de la fibra.

**OA:** Dispositivo que amplifica una señal óptica sin convertirla a formato eléctrico, como por ejemplo un amplificador EDFA.

**OADM:** Multiplexor utilizado en redes ópticas que puede insertar o extraer longitudes de onda de una señal óptica sin necesidad de convertirla a formato electrónico.

**OOK:** Método de modulación de amplitud frecuentemente utilizado en comunicaciones ópticas, por el que un "1" lógico se codifica por la presencia de luz en el intervalo de bit correspondiente, mientras que un "0" lógico está representado por la ausencia de luz en dicho intervalo de bit.

**OTDR:** Instrumento usado en diseño y diagnóstico que localiza fallas o infiere atenuaciones en las redes ópticas.

**Pérdidas de Inserción:** Pérdida de potencia que resulta de la inserción de un componente, tal como un conector o emplame en un trayecto anteriormente continuo.

**PMD:** Propiedad inherente del medio óptico, causado por la diferencia en las velocidades de propagación de la luz en los estados ortogonales principales de polarización del medio de transmisión.

**Presupuesto de pérdidas:** Cantidad de atenuación total permitida en un sistema.

**Presupuesto de pérdidas en enlace óptico:** Rango de pérdidas ópticas sobre el cual una fibra óptica operará y cumplirá todas las especificaciones, expresado en forma relativa a la potencia de salida del transmisor.

**Rango Dinámico:** Se refiere al rango de potencias de operación comprendido entre una potencia máxima y una mínima.

**Refracción:** Cambio de dirección de un frente de onda cuando este pasa a través de un límite entre dos medios diferentes.

**Regenerador:** Dispositivo que regenera las señales ópticas al convertir pulsos ópticos en eléctricos, limpiando la señal eléctrica para eliminar el ruido, y convirtiéndola nuevamente a pulsos eléctricos a la salida; también es llamado repetidor regenerativo.

**Rejilla ITU:** Designación estándar de longitudes de onda hecha por la ITU para los láser. Está basada en un espaciamiento de 100 GHz. de frecuencia óptica con una frecuencia central de 193.1 THz. (1552.52 nm.).

**SDH:** Estándar europeo que define unas velocidades y formatos para la transmisión de señales ópticas sobre fibra.

**SONET:** Interfaz estándar desarrollada por Bellcore y ampliamente utilizada por la industria de telecomunicaciones para transporte sincrónico de alta velocidad sobre fibra óptica.

**Sensitividad:** Mínima potencia aceptable en la recepción para poder recuperar la señal.

**Soliton:** Forma particular del pulso óptico y con altos niveles de potencia que toma partido de las no linealidades en la fibra con el fin de solucionar los efectos de ensanchamiento del pulso de la dispersión de velocidad de grupo, a velocidades de transmisión de datos superiores a 10 Gbps.

**Transparencia de protocolo:** Habilidad de un sistema para transportar información sin estar conciente de protocolos de nivel más alto.

**Transponder:** En un sistema DWDM, módulo que recibe una señal de entrada y la convierte en una longitud de onda para ser ópticamente multiplexada con otras.

**WDM:** Transmisión de dos o más señales sobre (en forma relativa) longitudes de onda ampliamente espaciadas, típicamente 850 y 1310 nm o 1533 y 1577 nm, en una sola fibra.