

**IMPACTO DE LA FIBRA ÓPTICA SOBRE
EL DESEMPEÑO DE UNA RED WDM A 10Gb/s**



**Silvana Lorena Criollo Obando
Fabián Rodrigo Lasso Rodríguez**

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
GNTT – Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones
Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de Comunicaciones
Popayán, diciembre 2014**

**IMPACTO DE LA FIBRA ÓPTICA SOBRE
EL DESEMPEÑO DE UNA RED WDM A 10Gb/s**



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

**Silvana Lorena Criollo Obando
Fabián Rodrigo Lasso Rodríguez**

Director: Mag. Alejandro Toledo Tovar

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Telecomunicaciones

GNTT – Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones

Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de Comunicaciones

Popayán, diciembre 2014

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|---|-------------|
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1 REDES DWDM A 10Gb/s Y CARACTERIZACIÓN DE DIFERENTES FIBRAS ÓPTICAS..... | 2 |
| 1.1 <i>Redes WDM.....</i> | <i>2</i> |
| 1.1.1 Topologías en redes DWDM..... | 4 |
| 1.1.2 Componentes de las redes DWDM..... | 5 |
| 1.1.3 Formatos de modulación | 8 |
| 1.2 <i>Monitoreo de desempeño óptico.....</i> | <i>9</i> |
| 1.2.1 Modelo de Referencia OPM..... | 9 |
| 1.2.2 Degradaciones Ópticas | 10 |
| 1.2.3 Parámetros de desempeño óptico | 19 |
| 1.2.4 Relación entre degradaciones ópticas y Parámetros de monitoreo óptico .. | 23 |
| 1.2.5 Técnicas de monitoreo óptico | 24 |
| 1.3 <i>Caracterización de las Fibras Ópticas.....</i> | <i>24</i> |
| 1.3.1 Generalidades | 24 |
| 1.3.2 Fibras Ópticas Monomodo..... | 28 |
| 2 METODOLOGÍA Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN..... | 37 |
| 2.1 <i>Herramienta de simulación</i> | <i>37</i> |
| 2.2 <i>Metodología de simulación</i> | <i>38</i> |
| 2.2.1 Generación del escenario de simulación | 38 |
| 2.2.2 Identificación de los Parámetros Técnicos del Escenario de Simulación | 40 |
| 2.2.3 Ejecución de la simulación..... | 42 |
| 2.2.4 Análisis de los resultados de simulación..... | 43 |
| 3 ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA FIBRA ÓPTICA SOBRE EL DESEMPEÑO DE UNA RED WDM A 10Gb/s | 44 |
| 3.1 <i>Escenario de simulación.....</i> | <i>44</i> |
| 3.2 <i>Caso de estudio 1, fibra óptica SMF-28.....</i> | <i>45</i> |
| 3.2.1 Distancia máxima alcanzable | 45 |
| 3.2.2 Análisis de la atenuación | 48 |
| 3.2.3 Análisis de la dispersión cromática | 51 |
| 3.2.4 Análisis de la PMD..... | 55 |
| 3.3 <i>Caso de estudio 2, fibra óptica SMF-28e+.....</i> | <i>57</i> |
| 3.3.1 Distancia máxima alcanzable | 57 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.3.2 | Análisis de la atenuación | 59 |
| 3.3.3 | Análisis de la dispersión cromática | 61 |
| 3.3.4 | Análisis de la PMD..... | 65 |
| 3.4 | <i>Caso de estudio 3, fibra óptica LEAF</i> | 67 |
| 3.4.1 | Distancia máxima alcanzable | 67 |
| 3.4.2 | Análisis de la atenuación | 69 |
| 3.4.3 | Análisis de la dispersión cromática | 71 |
| 3.4.4 | Análisis de la PMD..... | 75 |
| 3.5 | <i>Caso de estudio 4, fibra óptica DeepLight™</i> | 76 |
| 3.5.1 | Distancia máxima alcanzable | 76 |
| 3.5.2 | Análisis de la atenuación | 78 |
| 3.5.3 | Análisis de la dispersión cromática | 81 |
| 3.5.4 | Análisis de la PMD..... | 82 |
| 4 | ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LAS FIBRAS ÓPTICAS SMF-28, SMF-28e+, LEAF Y DeepLight™ SOBRE UNA RED WDM A 10Gb/s | 85 |
| 4.1 | <i>Distancia máxima alcanzada</i> | 85 |
| 4.2 | <i>Análisis de la atenuación</i> | 86 |
| 4.3 | <i>Análisis de la dispersión cromática</i> | 89 |
| 4.3.1 | Cálculo de la CD acumulada en la red..... | 92 |
| 4.3.2 | Efecto de la compensación de la CD en la red | 93 |
| 4.4 | <i>Análisis de la PMD</i> | 94 |
| 5 | CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS | 98 |
| 5.1 | <i>Conclusiones</i> | 98 |
| 5.2 | <i>Recomendaciones</i> | 99 |
| 5.3 | <i>Trabajos futuros</i> | 99 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 100 |
| | ÍNDICE DE FIGURAS | V |
| | ÍNDICE DE TABLAS | XI |
| | ACRÓNIMOS | XV |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|------|
| CAPÍTULO I | |
| Figura 1.1 Sistema DWDM uni-direccional de 32 canales [12]..... | 4 |
| Figura 1.2 Sistema DWDM bi-direccional de 32 canales [12]..... | 4 |
| Figura 1.3 Modulador indirecto [9]..... | 6 |
| Figura 1.4 Esquema de un sistema DWDM [1] | 8 |
| Figura 1.5 Niveles del modelo de referencia OPM [17] | 9 |
| Figura 1.6 Degradaciones presentes en una red WDM [17]..... | 10 |
| Figura 1.7 Efectos lineales en una red WDM [7]. | 11 |
| Figura 1.8 Representación gráfica de la PMD [21]..... | 12 |
| Figura 1.9 Coeficiente de PMD _{máximo permitido} Vs distancia [23] | 12 |
| Figura 1.10 Efecto de la CD en los pulsos de la señal óptica [21]..... | 13 |
| Figura 1.11 CD en función de la longitud de onda para fibras monomodo [7] | 13 |
| Figura 1.12 (a) Configuración y (b) Mapa de dispersión de la técnica de post-compensación óptica para la CD [6] | 15 |
| Figura 1.13 (a) Configuración y (b) Mapa de dispersión de la técnica de pre-compensación óptica para la CD [6] | 16 |
| Figura 1.14 (a) Configuración y (b) Mapa de dispersión de la técnica de compensación simétrica para la CD [6] | 16 |
| Figura 1.15 Generación de nuevas frecuencias debido a FWM [22] | 18 |
| Figura 1.16 Relación entre la función de densidad de probabilidad y el factor Q [25]..... | 19 |
| Figura 1.17 Relación entre la función de densidad de probabilidad y la BER [26]..... | 20 |
| Figura 1.18 Cálculo matemático de la BER en función del factor Q [18] | 21 |
| Figura 1.19 Relación OSNR Vs DGD para diferentes formatos de modulación [18]..... | 21 |
| Figura 1.20 Niveles de OSNR para transmisiones WDM con múltiples etapas [7]. | 22 |
| Figura 1.21 Superposición de unos y ceros que generan el diagrama del ojo [29]..... | 23 |
| Figura 1.22 Efectos de Jitter, ruido y niveles medios de las señales [29]..... | 23 |
| Figura 1.23 Estructura de la fibra óptica [33]..... | 25 |
| Figura 1.24 Principio de reflexión [31]..... | 26 |
| Figura 1.25 Refracción de la luz [31]..... | 26 |
| Figura 1.26 Fibras ópticas monomodo y sus nombres comerciales | 35 |

CAPÍTULO II

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Escenario de simulación y casos de estudio | 39 |
| Figura 2.2 Escenario de simulación | 39 |
| Figura 2.7 Diagrama de flujo de la simulación | 43 |

CAPÍTULO III

| | |
|--|----|
| Figura 3.1 Modelo simplificado de red DWDM con formato de modulación NRZ-OOK | 44 |
| Figura 3.2 Diagrama del ojo (a) y Espectro óptico (b) de la señal en el receptor back to back..... | 45 |
| Figura 3.3 Distancia máxima alcanzable para la red con la fibra óptica SMF-28..... | 46 |
| Figura 3.4 Espectro en el receptor con una potencia de transmisión de 15dBm | 47 |
| Figura 3.5 Diagrama del ojo sin degradaciones ópticas con la fibra óptica SMF-28..... | 47 |
| Figura 3.6 Diagrama del ojo tras un tramo de 87Km de fibra óptica SMF-28 | 47 |
| Figura 3.7 Factor Q vs distancia de transmisión para la red con fibra óptica SMF-28 | 48 |
| Figura 3.8 BER vs distancia de transmisión para la red con fibra óptica SMF-28..... | 48 |
| Figura 3.9 Espectro óptico en recepción a una distancia máxima de 87Km con un potencia promedio de recepción por canal del orden de los -16dBm para la fibra óptica SMF-28 | 48 |
| Figura 3.10 Potencia de transmisión vs distancia para la red con fibra óptica SMF-28 | 49 |
| Figura 3.11 Diagrama del ojo para 87 Km de SMF-28 en presencia de todas las degradaciones ópticas..... | 50 |
| Figura 3.12 Diagrama del ojo para 87Km sin atenuación de la fibra SMF28 | 50 |
| Figura 3.13 Diagrama del ojo para 87Km solo con atenuación de la fibra SMF28 | 50 |
| Figura 3.14 Diagrama del ojo para 87 Km de SMF-28 en presencia de todas las degradaciones ópticas..... | 51 |
| Figura 3.15 Diagrama del ojo para 87Km sin CD de la fibra SMF-28 | 52 |
| Figura 3.16 Diagrama del ojo para 87Km solo con CD de la fibra SMF-28 | 52 |
| Figura 3.17 Diagrama del ojo sin compensación de CD de la fibra SMF-28..... | 54 |
| Figura 3.18 Diagrama del ojo con post-compensación al 75% de CD de la fibra SMF-28 | 54 |
| Figura 3.19 Diagrama del ojo con pre-compensación al 75% de CD de la fibra SMF-28 . | 54 |
| Figura 3.20 Diagrama del ojo con compensación simétrica al 75% de CD de la fibra SMF-28 | 54 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.21 Diagrama del ojo para 87 Km de SMF-28 en presencia de todas las degradaciones ópticas | 55 |
| Figura 3.22 Diagrama del ojo para 87Km sin PMD de la fibra SMF-28 | 55 |
| Figura 3.23 Diagrama del ojo para 87Km solo con PMD de la fibra SMF-28..... | 55 |
| Figura 3.24 Diagrama del ojo para 87Km solo con PMD=6.5ps/√Km de la fibra óptica SMF-28..... | 56 |
| Figura 3.25 Distancia máxima alcanzable para la red con la fibra óptica SMF-28e+..... | 57 |
| Figura 3.26 Espectro en el receptor con una potencia de transmisión de 15dBm | 58 |
| Figura 3.27 Diagrama del ojo sin degradaciones ópticas con la fibra óptica SMF-28e+ ... | 58 |
| Figura 3.28 Diagrama del ojo tras un tramo de 87Km de fibra óptica SMF-28e+ | 58 |
| Figura 3.29 Factor Q vs distancia de transmisión para la red con fibra óptica SMF-28e+ | 58 |
| Figura 3.30 BER vs distancia de transmisión para la red con fibra óptica SMF-28e+..... | 58 |
| Figura 3.31 Espectro óptico en recepción a una distancia máxima de 87Km con una potencia promedio | 59 |
| Figura 3.32 Diagrama del ojo para 87 Km de SMF-28e+ en presencia de todas las degradaciones ópticas | 60 |
| Figura 3.33 Diagrama del ojo para 87Km sin atenuación de la fibra SMF-28e+ | 60 |
| Figura 3.34 Diagrama del ojo para 87Km solo con atenuación de la fibra SMF-28e+ | 60 |
| Figura 3.35 Potencia de transmisión vs distancia para la red con fibra óptica SMF-28e+ | 61 |
| Figura 3.36 Diagrama del ojo para 87 Km de SMF-28e+ en presencia de todas las degradaciones ópticas | 62 |
| Figura 3.37 Diagrama del ojo para 87Km sin CD de la fibra SMF-28e+ | 62 |
| Figura 3.38 Diagrama del ojo para 87Km solo con CD de la fibra SMF-28e+ | 62 |
| Figura 3.39 Diagrama del ojo sin compensación de CD de la fibra SMF-28e+..... | 64 |
| Figura 3.40 Diagrama del ojo con post-compensación al 75% de CD de la fibra SMF-28e+ | 64 |
| Figura 3.41 Diagrama del ojo con pre-compensación al 75% de CD de la fibra SMF-28e+ | 64 |
| Figura 3.42 Diagrama del ojo con compensación simétrica al 75% de CD de la fibra SMF-28e+ | 64 |
| Figura 3.43 Diagrama del ojo para 87 Km de SMF-28e+ en presencia de todas las degradaciones ópticas | 65 |
| Figura 3.44 Diagrama del ojo para 87Km sin PMD de la fibra SMF-28e+ | 65 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.45 Diagrama del ojo para 87Km solo con PMD de la fibra SMF-28e+..... | 65 |
| Figura 3.46 Diagrama del ojo para 87Km solo con $PMD=6.5ps/\sqrt{Km}$ de la fibra óptica SMF-28..... | 66 |
| Figura 3.47 Distancia máxima alcanzable para la red con la fibra óptica LEAF..... | 67 |
| Figura 3.48 Diagrama del ojo sin degradaciones ópticas con la fibra óptica LEAF..... | 68 |
| Figura 3.49 Diagrama del ojo tras un tramo de 114Km de fibra óptica LEAF..... | 68 |
| Figura 3.50 Factor Q vs distancia de transmisión para la red con fibra óptica LEAF..... | 68 |
| Figura 3.51 BER vs distancia de transmisión para la red con fibra óptica LEAF..... | 68 |
| Figura 3.52 Espectro óptico en recepción a una distancia máxima de 114Km con un potencia promedio de recepción por canal del orden de los -21dBm para la fibra óptica LEAF..... | 68 |
| Figura 3.53 Potencia de transmisión vs distancia para la red con fibra óptica LEAF..... | 70 |
| Figura 3.54 Diagrama del ojo para 114Km de LEAF en presencia de todas las degradaciones ópticas..... | 70 |
| Figura 3.55 Diagrama del ojo para 114Km sin atenuación de la fibra LEAF..... | 70 |
| Figura 3.56 Diagrama del ojo para 114Km solo con atenuación de la fibra LEAF..... | 70 |
| Figura 3.57 Diagrama del ojo para 114Km de LEAF en presencia de todas las degradaciones ópticas..... | 71 |
| Figura 3.58 Diagrama del ojo para 114Km sin CD de la fibra LEAF..... | 72 |
| Figura 3.59 Diagrama del ojo para 114Km solo con CD de la fibra LEAF..... | 72 |
| Figura 3.60 Diagrama del ojo sin compensación de CD de la fibra LEAF..... | 74 |
| Figura 3.61 Diagrama del ojo con post-compensación al 75% de CD de la fibra LEAF.... | 74 |
| Figura 3.62 Diagrama del ojo con pre-compensación al 75% de CD de la fibra LEAF.... | 74 |
| Figura 3.63 Diagrama del ojo con compensación simétrica al 75% de CD de la fibra LEAF..... | 74 |
| Figura 3.64 Diagrama del ojo para 114Km de LEAF en presencia de todas las degradaciones ópticas..... | 75 |
| Figura 3.65 Diagrama del ojo para 114Km sin PMD de la fibra LEAF..... | 75 |
| Figura 3.66 Diagrama del ojo para 114Km solo con PMD de la fibra LEAF..... | 75 |
| Figura 3.67 Diagrama del ojo para 87Km solo con $PMD=6.5ps/\sqrt{Km}$ de la fibra óptica LEAF..... | 76 |
| Figura 3.68 Distancia máxima alcanzable para la red con la fibra óptica DeepLight™..... | 77 |
| Figura 3.69 Diagrama del ojo sin degradaciones ópticas con la fibra óptica DeepLight™ | 77 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.70 Diagrama del ojo tras un tramo de 93Km de fibra óptica DeepLight™ | 77 |
| Figura 3.71 Factor Q vs distancia de transmisión para la red con fibra óptica DeepLight™ | 78 |
| Figura 3.72 BER vs distancia de transmisión para la red con fibra óptica DeepLight™ | 78 |
| Figura 3.73 Espectro óptico en Recepción a una distancia máxima de 93Km con un potencia promedio de recepción por Canal del orden de los -21dBm para la fibra óptica DeepLight™ | 78 |
| Figura 3.74 Potencia de transmisión vs distancia para la red con fibra óptica DeepLight™ | 79 |
| Figura 3.75 Diagrama del ojo para 93Km de DeepLight™ en presencia de todas las degradaciones ópticas | 80 |
| Figura 3.76 Diagrama del ojo para 93Km sin atenuación de la fibra DeepLight™ | 80 |
| Figura 3.77 Diagrama del ojo para 93Km solo con atenuación de la fibra DeepLight™ | 80 |
| Figura 3.78 Diagrama del ojo para 93Km de DeepLight™ en presencia de todas las degradaciones ópticas | 81 |
| Figura 3.79 Diagrama del ojo para 93Km sin CD de la fibra DeepLight™ | 81 |
| Figura 3.80 Diagrama del ojo para 93Km solo con CD de la fibra DeepLight™ | 81 |
| Figura 3.81 Diagrama del ojo para 93Km de DeepLight™ en presencia de todas las degradaciones ópticas | 83 |
| Figura 3.82 Diagrama del ojo para 93Km sin PMD de la fibra DeepLight™ | 83 |
| Figura 3.83 Diagrama del ojo para 93Km solo con PMD de la fibra DeepLight™ | 83 |
| Figura 3.84 Diagrama del ojo para 87Km solo con PMD=6.5ps/√Km de la fibra óptica LEAF | 84 |

CAPÍTULO IV

| | |
|---|----|
| Figura 4.1 Distancia máxima de las diferentes fibras para una BER=10 ⁻¹⁵ | 85 |
| Figura 4.2 Distancia máxima de las diferentes fibras para una BER=10 ⁻¹² | 85 |
| Figura 4.3 Distancia máxima de las diferentes fibras para una BER=10 ⁻⁶ | 85 |
| Figura 4.4 Distancias máximas en presencia de todas las degradaciones | 87 |
| Figura 4.5 Distancias máximas únicamente con atenuación | 87 |
| Figura 4.6 Diagrama del ojo en presencia de todas las degradaciones con la fibra SMF-28 | 87 |
| Figura 4.7 Diagrama del ojo solo con atenuación de la fibra SMF-28 | 87 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.8 Diagrama del ojo en presencia de todas las degradaciones con la SMF-28e+ | 87 |
| Figura 4.9 Diagrama del ojo solo con atenuación de la fibra SMF-28e+ | 87 |
| Figura 4.10 Diagrama del ojo en presencia de todas las degradaciones con la fibra LEAF | 88 |
| Figura 4.11 Diagrama del ojo solo con atenuación de la fibra LEAF | 88 |
| Figura 4.12 Diagrama del ojo en presencia de todas las degradaciones con la fibra DeepLight™ | 88 |
| Figura 4.13 Diagrama del ojo solo con atenuación de la fibra DeepLight™ | 88 |
| Figura 4.14 Diagrama del ojo para 87Km sin CD de la fibra SMF-28 | 89 |
| Figura 4.15 Diagrama del ojo para 87Km solo con CD de la fibra SMF-28 | 89 |
| Figura 4.16 Diagrama del ojo para 87Km sin CD de la fibra SMF-28e+ | 90 |
| Figura 4.17 Diagrama del ojo para 87Km solo con CD de la fibra SMF-28e+ | 90 |
| Figura 4.18 Diagrama del ojo para 87Km sin CD de la fibra LEAF..... | 90 |
| Figura 4.19 Diagrama del ojo para 87Km solo con CD de la fibra LEAF | 90 |
| Figura 4.20 Diagrama del ojo para 87Km sin CD de la fibra DeepLight™ | 90 |
| Figura 4.21 Diagrama del ojo para 87Km solo con CD de la fibra DeepLight™ | 90 |
| Figura 4.22 Diagrama del ojo fibra tipo SMF-28..... | 93 |
| Figura 4.23 Diagrama del ojo fibra SMF-28e+ | 93 |
| Figura 4.24 Diagrama del ojo fibra tipo LEAF | 94 |
| Figura 4.25 Diagrama del ojo fibra DeepLight™ únicamente con amplificador EDFA de 0dBm | 94 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|--|------|
| CAPÍTULO I | |
| Tabla 1.1 Parámetros típicos de un sistema DWDM [7] | 3 |
| Tabla 1.2 Tolerancia máxima a la PMD en función de la velocidad de transmisión [23]... | 12 |
| Tabla 1.3 Porcentaje de potencia de salida en función de la pérdida en dB [24]..... | 17 |
| Tabla 1.4 Frecuencia de ocurrencia de degradaciones ópticas en un sistema DWDM [25] | 19 |
| Tabla 1.5 Degradaciones óptica y parámetros de monitoreo óptico [25] | 23 |
| Tabla 1.6 Parámetros de la ITU-T G.652 | 29 |
| Tabla 1.7 Aplicaciones estándares G.652..... | 30 |
| Tabla 1.8 Parámetros de la ITU-T G.653.A..... | 31 |
| Tabla 1.9 Parámetros de la ITU-T G.653.B..... | 31 |
| Tabla 1.10 Parámetros de la ITU-T G.654 | 32 |
| Tabla 1.11 Parámetros de la ITU-T G.655.C..... | 33 |
| Tabla 1.12 Parámetros de la ITU-T G.655.D..... | 33 |
| Tabla 1.13 Parámetros de la ITU-T G.655.E..... | 34 |
| CAPÍTULO II | |
| Tabla 2.1 Especificaciones ópticas de las fibras SMF-28 y SMF-28e+ | 40 |
| Tabla 2.2 Especificaciones ópticas de las fibras LEAF y DeepLight™ | 40 |
| Tabla 2.3 Parámetros técnicos de las tarjetas STM-64 Equipo OSN3500 [7]..... | 41 |
| Tabla 2.4 Características y parámetros del escenario de simulación | 42 |
| CAPÍTULO III | |
| Tabla 3.1 Máximas distancias obtenidas en presencia de todas las degradaciones ópticas de la fibra óptica SMF-28..... | 49 |
| Tabla 3.2 Máximas distancias obtenidas en presencia solo de la atenuación de la fibra óptica SMF-28 | 49 |
| Tabla 3.3 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de la atenuación de la fibra SMF28..... | 50 |

| | |
|--|----|
| Tabla 3.4 Parámetros de monitoreo para la red en presencia y ausencia de CD de la fibra SMF-28..... | 52 |
| Tabla 3.5 Parámetros de monitoreo óptico en un tramo de 87Km de SMF-28 para diferentes longitudes de DCF con post-compensación | 53 |
| Tabla 3.6 Parámetros de monitoreo óptico en un tramo de 87Km de SMF-28 para diferentes longitudes de DCF con pre-compensación..... | 53 |
| Tabla 3.7 Parámetros de monitoreo óptico en un tramo de 87Km de SMF-28 para diferentes longitudes de DCF con compensación simétrica | 54 |
| Tabla 3.8 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de PMD de la fibra óptica SMF-28..... | 56 |
| Tabla 3.9 Parámetros de monitoreo para diferentes valores de PMD de la fibra óptica SMF-28..... | 56 |
| Tabla 3.10 Máximas distancias obtenidas en presencia de todas las degradaciones ópticas de la fibra óptica SMF-28e+..... | 59 |
| Tabla 3.11 Máximas distancias obtenidas en presencia solo de la atenuación de la fibra SMF-28e+..... | 59 |
| Tabla 3.12 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de la atenuación de la fibra SMF-28e+..... | 60 |
| Tabla 3.13 Parámetros de monitoreo para la red en presencia y ausencia de CD de la fibra SMF-28e+..... | 62 |
| Tabla 3.14 Parámetros de monitoreo óptico en un tramo de 87Km de SMF-28e+ para diferentes longitudes de DCF con post-compensación | 63 |
| Tabla 3.15 Parámetros de monitoreo óptico en un tramo de 87Km de SMF-28e+ para diferentes longitudes de DCF con pre-compensación..... | 64 |
| Tabla 3.16 Parámetros de monitoreo óptico en un tramo de 87Km de SMF-28e+ para diferentes longitudes de DCF con compensación simétrica | 64 |
| Tabla 3.17 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de la PMD de la fibra óptica SMF-28e+..... | 66 |
| Tabla 3.18 Parámetros de monitoreo para diferentes valores de PMD de la fibra óptica SMF-28e+..... | 66 |
| Tabla 3.19 Máximas distancias obtenidas en presencia de todas las degradaciones ópticas de la fibra óptica LEAF | 69 |

| | |
|---|----|
| Tabla 3.20 Máximas distancias obtenidas en presencia solo de la atenuación de la fibra óptica LEAF..... | 69 |
| Tabla 3.21 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de la atenuación de la fibra LEAF | 71 |
| Tabla 3.22 Parámetros de monitoreo para la red en presencia y ausencia de CD de la fibra LEAF..... | 72 |
| Tabla 3.23 Parámetros de monitoreo óptico en un tramo de 114Km de LEAF para diferentes longitudes de DCF con post-compensación | 73 |
| Tabla 3.24 Parámetros de monitoreo óptico en un tramo de 114Km de LEAF para diferentes longitudes de DCF con pre-compensación..... | 73 |
| Tabla 3.25 Parámetros de monitoreo óptico en un tramo de 114Km de LEAF para diferentes longitudes de DCF con compensación simétrica | 73 |
| Tabla 3.26 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de la PMD de la fibra óptica LEAF | 75 |
| Tabla 3.27 Parámetros de monitoreo para diferentes valores de PMD de la fibra óptica LEAF | 76 |
| Tabla 3.28 Máximas distancias obtenidas en presencia de todas las degradaciones ópticas de la fibra óptica DeepLight™ | 79 |
| Tabla 3.29 Máximas distancias obtenidas en presencia solo de la atenuación de la fibra óptica DeepLight™ | 79 |
| Tabla 3.30 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de la atenuación de la fibra DeepLight™ | 80 |
| Tabla 3.31 Parámetros de monitoreo para la red en presencia y ausencia de CD de la fibra DeepLight™ | 82 |
| Tabla 3.32 Parámetros de monitoreo óptico con un amplificador EDFA y fibra óptica DeepLight™ | 82 |
| Tabla 3.33 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de la PMD de la fibra óptica DeepLight™ | 83 |
| Tabla 3.34 Parámetros de monitoreo para diferentes valores de PMD de la fibra óptica LEAF | 83 |

CAPÍTULO IV

| | |
|---|----|
| Tabla 4.1 Distancias máximas de las fibras ópticas para una potencia de 5dBm y una BER de 10^{-12} | 86 |
| Tabla 4.2 Parámetros de monitoreo óptico para las diferentes fibras ópticas para un enlace de 87km, en presencia de todas las degradaciones ópticas | 88 |
| Tabla 4.3 Parámetros de monitoreo óptico para las diferentes fibras ópticas para un enlace de 87km, en presencia únicamente de la atenuación | 89 |
| Tabla 4.4 Parámetros de monitoreo óptico para las diferentes fibras ópticas para un enlace de 87km, sin CD..... | 91 |
| Tabla 4.5 Parámetros de monitoreo óptico para las diferentes fibras ópticas para un enlace de 87km, en presencia únicamente de la CD | 91 |
| Tabla 4.6 Parámetros de monitoreo óptico para una red de 87km con post compensación al 75% | 93 |
| Tabla 4.7 Parámetros de monitoreo óptico para una distancia de 87km con todas las degradaciones | 94 |
| Tabla 4.8 Parámetros de monitoreo óptico para una distancia de 87km y PMD de 0ps/ $\sqrt{\text{km}}$ | 94 |
| Tabla 4.9 Parámetros de monitoreo óptico para una distancia de 87Km únicamente con PMD de 0.1ps/ $\sqrt{\text{km}}$ | 95 |
| Tabla 4.10 Parámetros de monitoreo óptico para una distancia de 87Km únicamente con PMD de 5ps/ $\sqrt{\text{km}}$ | 95 |
| Tabla 4.11 Parámetros de monitoreo óptico para una distancia de 87Km únicamente con PMD de 6 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ | 95 |
| Tabla 4.12 Parámetros de monitoreo óptico para una distancia de 87Km únicamente con PMD de 7ps/ $\sqrt{\text{km}}$ | 96 |
| Tabla 4.13 Análisis comparativo de las fibras ópticas sobre el desempeño de una red DWDM a 10Gb/s..... | 97 |

ACRÓNIMOS

| | |
|--------------|---|
| APD | <i>Avalanche Photodiode</i> , Fotodiodo de Avalancha. |
| ASK | <i>Amplitude Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Amplitud. |
| BER | <i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit. |
| CD | <i>Chromatic Dispersion</i> , Dispersión cromática. |
| CSF | Cutoff Shifted Fiber, Fibra con Corte Desplazado. |
| DCF | <i>Dispersion Compensating Fibers</i> , Fibras Compensadoras de Dispersión. |
| DGD | <i>Differential Group Delay</i> , Retardo Diferencial de Grupo. |
| DPSK | <i>Differential Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial. |
| DQPSK | <i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase por Cuadratura Diferencial. |
| DSF | <i>Dispersion-Shifted Fiber</i> , Fibra de Dispersión Desplazada. |
| DWDM | <i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División en Longitud de Onda Densa. |
| EDFA | <i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> , Amplificador de Fibra Dopada con Erbio. |
| erfc | <i>Complementary Error Function</i> , Función de Error Complementaria. |
| FSK | <i>Frequency Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento en Frecuencia. |
| FWM | <i>Four Wave Mixing</i> , Mezcla de Cuatro Ondas. |
| GOF | <i>Glass Optical Fibers</i> , Fibras Ópticas de Vidrio. |
| ISI | <i>Intersymbol Interference</i> , Interferencia Intersimbólica. |
| MAN | <i>Metropolitan Area Network</i> , Red de Área Metropolitana. |
| MMF | <i>Multi Mode Optical Fibers</i> , Fibras Ópticas Multi Modo. |
| LAN | <i>Local Area Network</i> , Rede de Area Local. |
| NA | Numerical Aperture, Apertura Numérica. |
| NRZ | <i>Non Return to Zero</i> , No Retorno a Cero. |

| | |
|--------------|---|
| NZDSF | <i>Non Zero Dispersion Shifted Fiber</i> , Fibra Óptica de Dispersión Desplazada No Nula. |
| OOK | <i>On Off Keying</i> , Presencia o Ausencia de Señal. |
| OPM | <i>Optical Performance Monitoring</i> , Monitoreo del Desempeño Óptico. |
| PIN | <i>Positive Intrinsic Negative Photodiode</i> , Fotodiodo Positivo Intrínseco Negativo. |
| PMD | <i>Polarization Mode Dispersion</i> , Dispersión por Modo de Polarización. |
| PoISK | <i>Polarization Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de polarización. |
| PSK | <i>Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de fase. |
| OSNR | <i>Optical Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido Óptica. |
| QoS | <i>Quality of Service</i> , Calidad del Servicio. |
| RZ | <i>Return to Zero</i> , Retorno a Cero. |
| SAN | <i>Storage Area Network</i> , Red de Área de Almacenamiento. |
| SMF | <i>Single Monomodo Fiber</i> , Fibra Monomodo. |
| SPT | <i>Spectral Propagation Technique</i> , Técnica de Propagación Espectral. |
| VBS | <i>Variable Bandwidth Simulation</i> , Técnica de Ancho de Banda Variable. |
| WAN | <i>Wide Area Network</i> , Red de Área Amplia. |
| WDM | <i>Wavelength Division Multiplexin</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda. |

INTRODUCCIÓN

Las redes actuales con Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*), frente a la demanda de un alto ancho de banda se ven obligadas a migrar a velocidades de 10Gb/s o más, pero hacer estos cambios no es sencillo ya que al incrementar la velocidad de transmisión empiezan a surgir serios inconvenientes en las señales transmitidas, haciéndolas más susceptibles a degradaciones ópticas. Para mitigar estas degradaciones es importante al momento del diseño de una red no solo aspectos como el formato de modulación si no también el tipo de fibra con el que se realizará en enlace.

Por tal razón el presente trabajo está orientado a la investigación de cómo el uso de una u otro tipo de fibra óptica influye en el desempeño de una red WDM y de este modo constituirse en una base confiable para todo aquel que desee diseñar una red WDM a 10Gb/s.

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

- 1. Redes DWDM a 10Gb/s y caracterización de diferentes fibras ópticas:** es una descripción teórica de las principales características y parámetros de una red WDM, se muestra como se realiza el monitoreo óptico y finalmente se describen los tipos de fibra óptica monomodo.
- 2. Metodología y escenarios de simulación:** se define la metodología, los escenarios de simulación y se establece como herramienta OptSim® de Rsoft .
- 3. Análisis del impacto de la fibra óptica sobre el desempeño de una red WDM a 10Gb/s:** se realiza el análisis enfocado a la evaluación del desempeño de la red WDM frente a las degradaciones introducidas por la fibra óptica.
- 4. Análisis comparativo del desempeño de las fibras ópticas SMF-28, SMF-28e+, LEAF Y DeepLight™ en una red WDM a 10Gb/s:** se presenta la comparación de las fibras ópticas para determinar cuál presenta mejor desempeño en una red WDM a 10Gb/s.
- 5. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros:** se presenta una serie de conclusiones, recomendaciones y perspectivas a futuro, obtenidas durante el desarrollo del trabajo de grado.

1 REDES DWDM A 10Gb/s Y CARACTERIZACIÓN DE DIFERENTES FIBRAS ÓPTICAS

En telecomunicaciones, la tecnología que organiza dos o más señales ópticas de diferentes longitudes de onda en un mismo canal, se denomina WDM, la cual permite una mayor eficiencia del ancho de banda con el que cuentan las fibras ópticas, logrando velocidades de transmisión de datos a 2.5Gb/s, sin embargo debido al incremento de los usuarios y al auge de aplicaciones que requieren gran ancho de banda, los operadores se ven obligados a migrar a sistemas con velocidades de 10Gb/s, 40Gb/s y 100Gb/s, pero hacer estos cambios no es sencillo ya que al incrementar las velocidades empiezan a surgir inconvenientes en las señales transmitidas, tales como: efectos lineales y no lineales.

Para mitigar estos efectos se emplean diferentes técnicas y así se soluciona en gran parte este inconveniente, sin embargo muchas veces es necesario cambiar tendidos de fibra óptica debido a su desgaste, ampliar cobertura geográfica, entre otros, siendo ésta la oportunidad de emplear fibras que presenten mejor comportamiento a las nuevas velocidades de transmisión de datos. Por tal razón el presente trabajo de grado realizó un estudio que permite a los operadores seleccionar la fibra más adecuada en una red WDM.

Para el desarrollo del presente capítulo, inicialmente se realiza una breve introducción a WDM, para posteriormente profundizar en las redes DWDM en aspectos como topologías, componentes y formatos de modulación. También se detalla el procedimiento para realizar el monitoreo del desempeño óptico y finalmente se realiza la caracterización de los tipos de fibra óptica.

1.1 Redes WDM

WDM es una tecnología que permiten multiplexar diferentes longitudes de onda sobre una fibra óptica, de este modo se transmiten múltiples señales beneficiando a los nuevos sistemas de comunicación que requieren de altos anchos de banda, para soportar la actual demanda de servicios de Internet que cada vez son más robustos y complejos [1] [2].

Según las recomendaciones G.694.2 [3] y G.694.1 [4] de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunication Union*) los sistemas WDM se clasifican en: WDM Denso (DWDM, *Dense Wavelength División Multiplexing*) y en WDM Amplio (CWDM, *Coarse Wavelength División Multiplexing*).

CWDM presenta bajo costo de implementación, bajo consumo de potencia, bajo requerimiento en el espaciamiento de los canales. La separación de longitudes de onda es de 20nm permitiéndole transmitir hasta 18 longitudes de onda a través de una única fibra óptica, pero tiene grandes limitaciones como su baja capacidad, poco rango de

operación (1.271nm a 1.611nm) y distancia de transmisión pequeñas, por lo que se emplean para redes empresariales o redes metropolitanas de corto alcance.

Por otro lado con DWDM se mejoran las limitaciones presentadas con CWDM ya que brinda un espaciamento entre longitudes de onda menor permitiendo aumentar su capacidad de transporte, los espaciamentos típicos entre canales son de 0.4nm (50GHz), 0.8nm (100GHz) y 1.6nm (200GHz) [4]. DWDM es flexible a la hora de expandir y desarrollar redes de mayor velocidad (10Gb/s, 40Gb/s y 100Gb/s) y eficiencia, razón por la cual se convierte en la tecnología más usada actualmente en los sistemas y redes WDM [5][6][7][8]. Por ello el presente trabajo de grado se desarrolló en una red DWDM, siendo necesaria su profundización.

En redes DWDM de 10Gb/s el espaciamento típico de canales es de 100GHz [7], por lo cual se utilizará este espaciamento para el presente trabajo.

Los sistemas de transmisión por fibra óptica típicamente utilizan 3 ventanas de operación, la primera ventana de operación va desde los 800nm a 900 nm. La segunda ventana va desde los 1200nm a 1300nm. La tercera ventana desde los 1500nm a 1600nm, comprende parte de la banda L y S y toda la banda C. El estándar ITU G.694.1 recomienda las bandas L y C para los sistemas DWDM, sin embargo debido a la atenuación de la fibra óptica la banda C es la más usada, esta banda comprende la región que va desde los 1530nm a los 1565nm [6][9][10].

En los sistemas DWDM se pueden encontrar diferentes tipos de redes como: Red de Área Metropolitana (MAN, *Metropolitan Area Network*), Red de Área Amplia (WAN, *Wide Area Network*), Red de Área de Almacenamiento (SAN, *Storage Area Network*) y las Redes de Área Local (LAN, *Local Area Network*) [6][11].

De acuerdo a la distancia del enlace, capacidad del canal, espaciamento entre canales, ventana de operación, entre otros, la topología de red más adecuada para el presente trabajo es la red MAN. Finalmente en la Tabla 1.1 se pueden apreciar algunos parámetros típicos de un sistema DWDM.

| CARACTERÍSTICAS | DWDM MAN / WAN | DWDM Long Haul |
|----------------------------|-------------------|-------------------|
| Espaciamento entre Canales | 0.8nm (100GHz) | 0.4nm (50GHz) |
| Bandas Utilizadas | C, L | C, L, S |
| Canales por Fibra | 32 – 80 | 80 – 160 |
| Capacidad por Canal | 10Gb/s | 10Gb/s – 40Gb/s |
| Distancias Típicas | Cientos de Km | Miles de Km |
| Potencia de Transmisión | 0dBm -7dBm | 0dBm -7dBm |
| Costos | Medio | Alto |

Tabla 1.1 Parámetros típicos de un sistema DWDM [7]

Los sistemas DWDM pueden mantener una comunicación en dos modos de transmisión unidireccional y bidireccional, tal como se describen a continuación:

- ✓ Transmisión unidireccional: solo se permite la transmisión en un sentido, por ello se requiere recurrir a sistemas en anillo o con doble fibra para conseguir comunicación completa.
- ✓ Transmisión bidireccional: permite enviar y recibir una señal a través de una sola fibra óptica pero con diferentes longitudes de onda, reduciendo a la mitad el número de canales para transmitir.

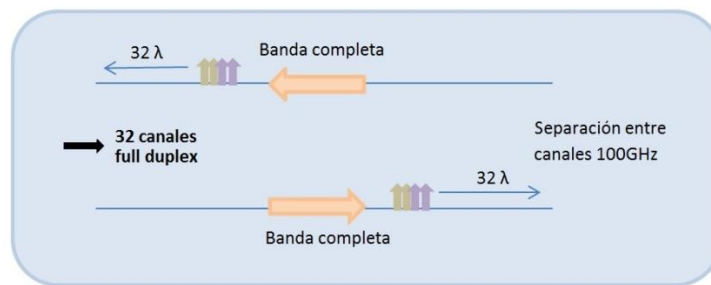


Figura 1.1 Sistema DWDM uni-direccional de 32 canales [12]

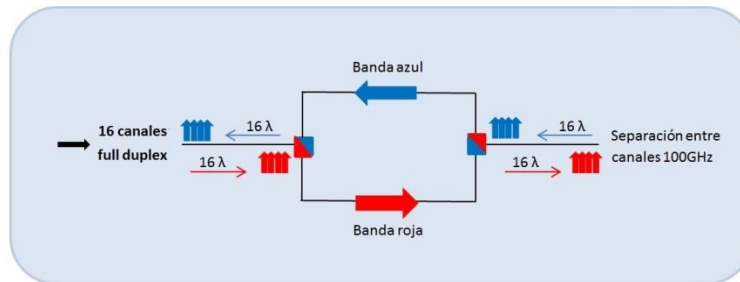


Figura 1.2 Sistema DWDM bi-direccional de 32 canales [12]

1.1.1 Topologías en redes DWDM

La topología es la forma en la que están diseñadas las redes. Para el diseño de sistemas WDM se debe tener en cuenta factores como: distancia, tipo de aplicación, protocolo, utilización, estructura de acceso, topología de redes anteriores, entre otros. Actualmente las topologías más usadas son las punto-a-punto y en anillo. En redes WAN por ejemplo la topología punto-a-punto es la más usada para interconectar puntos de empresas y la topología en anillo para interconectar oficinas, a continuación se hará una descripción de algunas topologías existentes [11][12][13].

- ✓ **Topología en anillo:** en esta topología las estaciones están interconectadas entre sí, formando un anillo, de tal modo que cada una de estas esté conectada directamente a dos estaciones. Cuando se envían datos estos

viajan de estación a estación en una sola dirección de tal manera que pasen por todas las estaciones, hasta llegar a su destino. La principal falla en esta estructura es que cualquier falencia en la vía de comunicación deja incomunicada la red en su totalidad [13].

- ✓ **Topología en estrella:** la topología en estrella consiste en interconectar todas las estaciones a un servidor de red el cual se encarga de controlar los mensajes de acuerdo a la prioridad, para su respectiva distribución. Una de las ventajas de esta topología es que una falla en uno de las terminales no afecta el comportamiento general de la red, sin embargo una falla en el servidor principal afectara a toda la red [13].
- ✓ **Topología en malla:** en esta topología todas las estaciones estas interconectadas entre sí, de tal manera que los datos pueden llegar a su destino por distintos caminos. La principal ventaja de esta estructura es que ofrece una redundancia y fiabilidad superior ya que no requieren de un servidor principal y son autoenrutadas. Estas redes son costosas de implementar, por la cantidad de cableado que requieren, por esta razón es más viable su aplicabilidad a sistemas inalámbricos, a pesar de los inconvenientes que estos presentan [13].
- ✓ **Topología punto a punto:** esta topología se usa para interconectar únicamente dos nodos de red. Cada dispositivo puede tomar el papel de esclavo o de maestro, dependiendo de quién necesite transmitir o recibir datos [11][13]. Las características principales de esta topología son:
 - Facilidad de instalación y operación.
 - El costo del cableado depende del número de enlaces entre las estaciones.
 - La conexión de los nodos se puede realizar con uno o varios sistemas de transmisión, los cuales pueden trabajar en paralelo a diferentes velocidades.

Estas redes presentan velocidades de canales ultra rápidos (10Gb/s a 40Gb/s), alta confiabilidad de la señal e integridad, la distancia entre el transmisor y el receptor puede ser de cientos de kilómetros, con un número de amplificadores típicamente menor a 10 [11][13]. Por estas razones es la topología que se utilizará en el presente trabajo de grado.

1.1.2 Componentes de las redes DWDM

El estudio de los componentes de la red se realiza en el transmisor, medio de transmisión y el receptor.

1.1.2.1 Transmisor

En el transmisor se encuentran todos los dispositivos electrónicos necesarios para lograr la correcta transmisión de la información por medio de la fibra óptica. Los componentes generales de este módulo son los siguientes [6][10][11][13]:

- ✓ Codificador: es el encargado de transformar la señal eléctrica en señal óptica en forma de secuencia de bits, para que la información pueda ser transmitida a través de la fibra óptica.
- ✓ Modulador: es un dispositivo electrónico que varía la forma de la onda de una señal, de acuerdo a una técnica de modulación específica, para posteriormente ser enviada a través de un canal. Existen dos tipos de moduladores, modulador directo y modulador indirecto.
 - Modulación directa: es la modulación más sencilla, en la cual se controla directamente la alimentación del Diodo Emisor de Luz (LED, *Light-Emitting Diode*) o láser. Esta modulación es utilizada para velocidades inferiores a 2.5Gb/s.
 - Modulación indirecta: hace uso de un dispositivo propio de modulación, que se encarga de modular la luz emitida por el láser, este bloquea o deja pasar la luz según la corriente que se le aplique, la Figura 1.3 muestra el esquema de un modulador indirecto

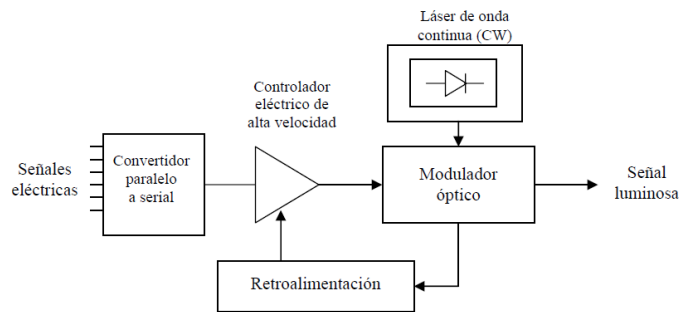


Figura 1.3 Modulador indirecto [9].

Dentro de los moduladores indirectos se encuentra el *modulador con Interferómetro de Mach Zenher (MZI, Mach Zenher Interferometer)*, su longitud de onda va de los 1530nm a 1610nm y opera a 10Gb/s.

Las redes WDM con velocidades a 10Gb/s o superior emplean la modulación externa puesto que la modulación directa genera frecuencias chirp y limita la velocidad del láser.

- ✓ Fuente de luz: en comunicaciones ópticas existen dos tipos de fuentes de luz, por foto diodos y láser de inyección o diodo láser. Los sistemas WDM que

manejan altas velocidades usan la fuente de luz láser, en esta se puede encontrar los sintonizables y los de onda continua. Los de onda continua son ampliamente utilizados en sistemas WDM, manejan altas velocidades, tienen mayor vida útil, por lo que este será usado para el desarrollo del presente trabajo de grado [9][6][10].

1.1.2.2 Medio de transmisión

El medio de transmisión para los sistemas WDM básicamente es la fibra óptica, esto debido a sus bajas pérdidas, manejo de altas velocidades, ancho de banda, etc. Los enlaces de fibra óptica suelen cubrir grandes distancias por lo cual se hace necesario implementar amplificadores y así suplir las pérdidas [6]. Existen distintas clasificaciones de la fibra óptica de acuerdo a los siguientes criterios:

- ✓ Según el modo de propagación.
- ✓ Según el índice de refracción.
- ✓ Según los materiales de fabricación.

Para el presente trabajo de grado se tiene en cuenta la clasificación según el modo de propagación, puesto que este factor influye directamente en el tipo de fibra óptica a seleccionar. De este modo según el modo de propagación se tienen dos tipos:

- ✓ Fibras Multimodo: definidas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones en la Recomendación UIT-T G.651.1 se caracterizan por propagar varios modos simultáneamente, presentan un núcleo con diámetro grande de $50\mu\text{m}$ o $62,5\mu\text{m}$ y revestimiento de $125\mu\text{m}$, se emplean para distancias cortas ya que sus múltiples reflexiones causan dispersión, por lo que no son aptas para sistemas DWDM [12].
- ✓ Fibras Monomodo: definidas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones en las recomendaciones UIT-T G.650.1 e UIT-T G.650.2, se caracterizan por propagar un solo modo, presentan un núcleo pequeño de $9\mu\text{m}$, permite alcanzar grandes distancias y tasas de transmisión elevadas por lo que las hace adecuadas para los sistemas DWDM [13]. Por lo tanto serán objeto de estudio en la sección 1.3.2.

1.1.2.3 Receptor

El receptor es el encargado de recuperar la señal transmitida, convirtiendo el flujo de fotones incidentes en flujo de electrones, después esta corriente es amplificada y procesada. Este proceso se hace por medio de fotodiodos, los usuales para la recepción son: Fotodiodo Positivo Intrínseco Negativo (PIN, *Positive Intrinsic Negative Photodiode*). y Fotodiodo de Avalancha (APD, *Avalanche Photodiode*). Para el presente trabajo de grado se usará el fotodiodo PIN ya que este es de fácil fabricación, bajo ruido, presenta

buena estabilidad frente a la temperatura y es menos costoso que los APD [6][10]. En la Figura 1.4 se puede apreciar el esquema básico de un sistema WDM constituido por el transmisor, canal óptico, el receptor y algunos componentes de estos.

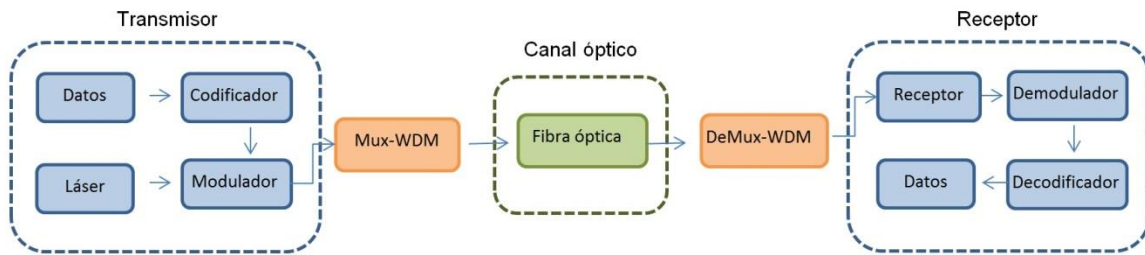


Figura 1.4 Esquema de un sistema DWDM [1]

1.1.3 Formatos de modulación

Para transmitir una señal a través de la fibra óptica es necesario adaptarla, mediante un proceso de modulación, esto se hace modificando algunos parámetros de la onda que contiene la información, en función de la señal portadora [11]. En la portadora es posible modificar parámetros como: frecuencia, fase, amplitud y la polarización. De acuerdo a esto se tiene los siguientes tipos de modulación: Modulación por Desplazamiento de Amplitud (ASK, *Amplitude Shift Keying*), Modulación por Desplazamiento en Frecuencia (FSK, *Frequency Shift Keying*), Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK, *Phase Shift Keying*) y Modulación por Desplazamiento de Polarización (PolSK, *Polarization Shift Keying*) [11][14][15].

Las modulaciones ASK y PSK son las de mayor uso en las redes WDM, la primera también conocida como modulación de Presencia o Ausencia de Señal (OOK, *On Off Keying*), se caracteriza por presentar fácil implementación, reducido costo y baja complejidad, sin embargo su baja tolerancia a algunas degradaciones ópticas como la dispersión cromática han hecho que en la actualidad para redes más robustas se opte por implementar modulaciones como la PSK cuya variación Modulación por Desplazamiento de Fase por Cuadratura Diferencial (DQPSK, *Differential Quadrature Phase Shift Keying*), al presentar una mayor tolerancia a la dispersión cromática y a los efectos no lineales, permite a las redes alcanzar mayores distancias y mejoría en la estabilidad del receptor [11].

Para el presente trabajo de grado se empleara OOK, puesto que se requiere la implementación de un formato de modulación con baja tolerancia a las degradaciones ópticas, de este modo se garantiza que es la fibra óptica la que influye en el desempeño de la red WDM.

El formato de modulación OOK se puede implementar con codificación con Retorno a Cero (RZ, *Return to Zero*) o con codificaciones Sin Retorno a Cero (NRZ, *Non Return to Zero*). Las señales ópticas con RZ son más tolerantes a las degradaciones no lineales,

comparadas con las señales de tipo NRZ, sin embargo NRZ debido a que no es sensible al ruido de fase, requiere un bajo ancho de banda eléctrico y una configuración simple en el transmisor y receptor, convirtiéndolo en el formato de modulación dominante en los sistemas de comunicaciones ópticos, por lo cual será usado en el presente trabajo [7].

1.2 Monitoreo de desempeño óptico

El monitoreo de desempeño óptico (OPM, *Optical Performance Monitoring*) se refiere a la supervisión de la calidad de la señal a nivel físico, lo cual posibilita un buen funcionamiento de la red en el dominio óptico, ya que se reduce significativamente el margen de errores de las redes WDM [17]. Por consiguiente, este trabajo de grado adapta OPM para realizar el análisis del efecto de la fibra óptica sobre el desempeño de una red WDM frente a degradaciones ópticas.

OPM brinda las herramientas necesarias para responder de una manera secuencial interrogantes del trabajo de grado tales como: ¿Qué se va a medir? (Rta:/ Degradaciones ópticas), ¿Cómo se va a medir? (Rta:/ Parámetros de monitoreo), ¿Cómo se leen los resultados? (Rta:/ Técnicas de monitoreo), lo que permite que el estudio se aborde de una manera concisa y segura, más adelante se desarrollaran a profundidad lo mencionado anteriormente.

1.2.1 Modelo de Referencia OPM

El modelo de referencia OPM está compuesto por tres niveles: nivel de monitoreo de transporte, nivel de monitoreo de la calidad de la señal y nivel de monitoreo de protocolo [17].



Figura 1.5 Niveles del modelo de referencia OPM [17]

- ✓ Nivel de monitoreo de transporte: se refiere al monitoreo del canal óptico, en este nivel se seleccionan las características del dominio óptico necesarias para el transporte y gestión del canal a nivel de la capa WDM. Para el nivel de monitoreo de transporte se utilizan medidas como: registro de longitud de onda, medidas en tiempo real de la presencia del canal, niveles de potencia y la Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR, *Optical Signal to Noise Ratio*) espectral.

- ✓ Nivel de monitoreo de la calidad de la señal: se realiza sobre una longitud de onda específica a la cual se efectúan medidas sensitivas de transición de señal. Algunas de las características que se pueden analizar en este nivel son: factor Q, estadísticas del diagrama del ojo así como la distorsión que ocurre en este debido a la dispersión y a los efectos no lineales.
- ✓ Nivel de monitoreo del protocolo: involucra el monitoreo de la información del protocolo de datos y el monitoreo de desempeño del protocolo.

En el presente trabajo de grado no se centra en el monitoreo de la información del protocolo de datos, por ello solo se tendrán en cuenta algunos parámetros contemplados en los niveles de monitoreo de transporte y monitoreo de calidad de la señal tales como: tasa de error de bit, el factor Q y diagrama del ojo.

1.2.2 Degradaciones Ópticas

Son factores que afectan considerablemente el desempeño de una red óptica. OPM establece que las degradaciones a considerar en la fibra son: pérdidas, Dispersión Cromática (CD, *Chromatic Dispersion*), Dispersión por Modo Polarización (PMD, *Polarization Mode Dispersion*), Automodulación de Fase (SPM, *Self Phase Modulation*), Modulación de Fase Cruzada (XPM, *Cross-Phase Modulation*), Mezcla de Cuatro Ondas (FWM, *Four Wave Mixing*) tal como se muestra en la Figura 1.6 [17].

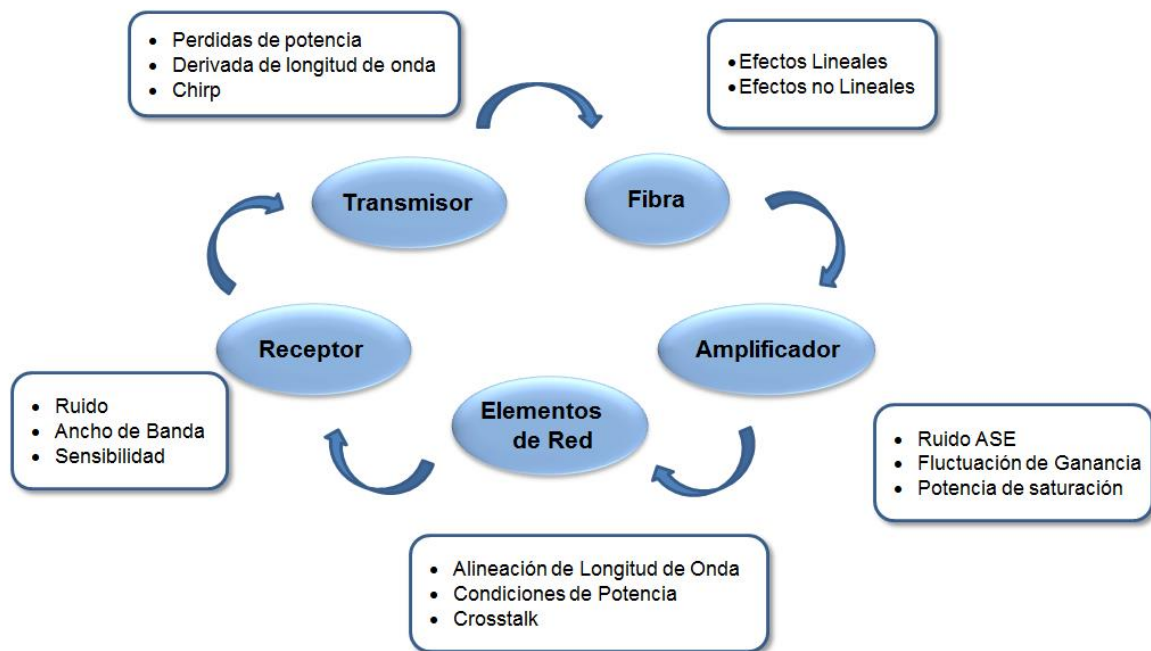


Figura 1.6 Degradaciones presentes en una red WDM [17]

Las degradaciones presentes en la fibra óptica se clasifican en dos grupos: efectos lineales y efectos no lineales, los cuales se explican a continuación.

1.2.2.1 Efectos Lineales

En los efectos lineales se agrupan todas las degradaciones ópticas que no dependen de la potencia de transmisión tales como: la CD, PMD y las pérdidas que pueden ser causadas por la atenuación y el ruido [7].

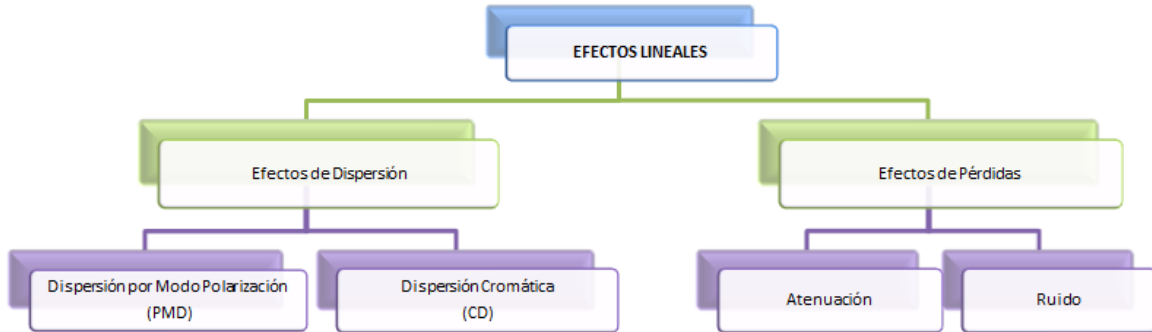


Figura 1.7 Efectos lineales en una red WDM [7].

- ✓ **Dispersión por Modo de Polarización:** la PMD genera un ensanchamiento en los pulsos ópticos que se transmiten por la fibra, ocasionando interferencia entre símbolos y con esto un aumento de la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*) que finalmente se traduce en errores de la señal recibida [18][19][20]. La dispersión por modo polarización es uno de los mayores limitantes en los sistemas de transmisión por fibra óptica de alta velocidad (>10Gb/s) y está presente únicamente en fibras ópticas monomodo [21].

En las fibras monomodo ideales, las dos componentes del único modo de propagación están polarizadas perpendicularmente entre sí, como se puede apreciar en la Figura 1.8, sin embargo por las asimetrías de su núcleo estas componentes se propagan con velocidades de grupo diferentes ocasionando que no lleguen al extremo de la fibra al mismo tiempo [22][23].

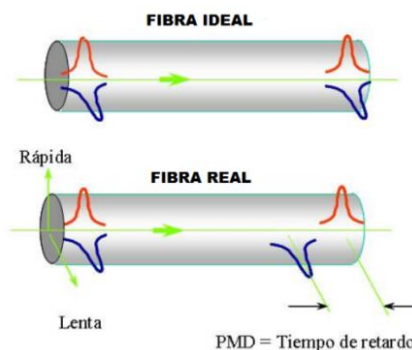


Figura 1.8 Representación gráfica de la PMD [21]

A la diferencia de velocidades de grupo se le conoce también como Retardo Diferencial de Grupo (DGD, *Diferencial Group Delay*) sus unidades de medida están dadas en ps. Ya que por su naturaleza la PMD es difícil de calcular entonces el DGD se convierte en la opción de medida de PMD dando como resultado un coeficiente de dispersión de modo de polarización ($PMD_{coef-MAX}$) cuya unidad se expresa en ps/ \sqrt{km} . Los valores máximos de tolerancia para diferentes tasas de transmisión se pueden apreciar en la Tabla 1.2 [23].

| VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN (Gb/s) | PMD _{MAX} (ps) |
|---------------------------------|-------------------------|
| 2.5 | 40 |
| 10 | 10 |
| 40 | 2.5 |

Tabla 1.2 Tolerancia máxima a la PMD en función de la velocidad de transmisión [23]

En la Tabla 1.2 se puede apreciar que la PMD presenta una relación estrecha con la velocidad de transmisión lo que sugiere que los sistemas a 10Gb/s y 40Gb/s son más susceptibles a este efecto lineal. En la Figura 1.9 se observa que a medida que aumenta la distancia y la velocidad de transmisión, el coeficiente de PMD máximo permitido disminuirá. Es así como para un enlace de 400km a 2.5Gb/s, la $PMD_{coef-MAX}$ permitido será de 2ps/ \sqrt{km} , para 10Gb/s será de 0,5ps/ \sqrt{km} y a 40Gb/s de 0,125ps/ \sqrt{km} [23].

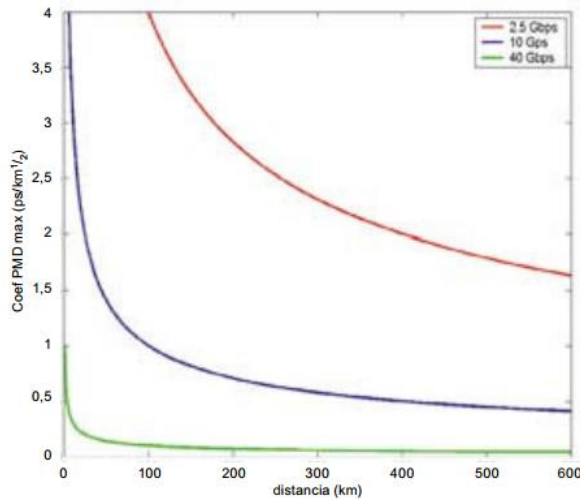


Figura 1.9 Coeficiente de PMD_{máximo permitido} Vs distancia [23]

- ✓ **Dispersión Cromática:** esta dispersión se presenta en las fibras monomodo y es el retardo o deformación espectral de los pulsos ópticos a medida que se propagan a través de la fibra, dando como resultado que estos lleguen en distintos tiempos al receptor. Si estos tiempos son demasiado altos ocasionarán una

superposición de los símbolos, lo que genera errores en la decodificación [6][7][10].



Figura 1.10 Efecto de la CD en los pulsos de la señal óptica [21]

Existe una estrecha relación entre la CD y la tasa de transmisión, convirtiendo a la dispersión cromática en un gran limitante en las comunicaciones ópticas de altas velocidades, matemáticamente dicha relación se representa así [6]:

$$BR < \frac{1}{4\Delta t} \quad (1.1)$$

Dónde:

BR = tasa de transmisión

Δt = máxima dispersión cromática permitida

La máxima dispersión cromática permitida se calcula a partir de la ecuación

$$\Delta t = D(\lambda)l\Delta\lambda \quad (1.2)$$

Dónde:

$D(\lambda)$ = CD de la fibra óptica (ps/nm x Km)

l = longitud de la fibra (Km)

$\Delta\lambda$ = longitud de onda (nm)

Por otro lado la CD muestra una dependencia con la longitud de onda, ya que a mayor longitud de onda, mayor es el tiempo de tránsito a través de la fibra, lo que genera mayor degradación en la señal, esto se evidencia claramente en la Figura 1.11.

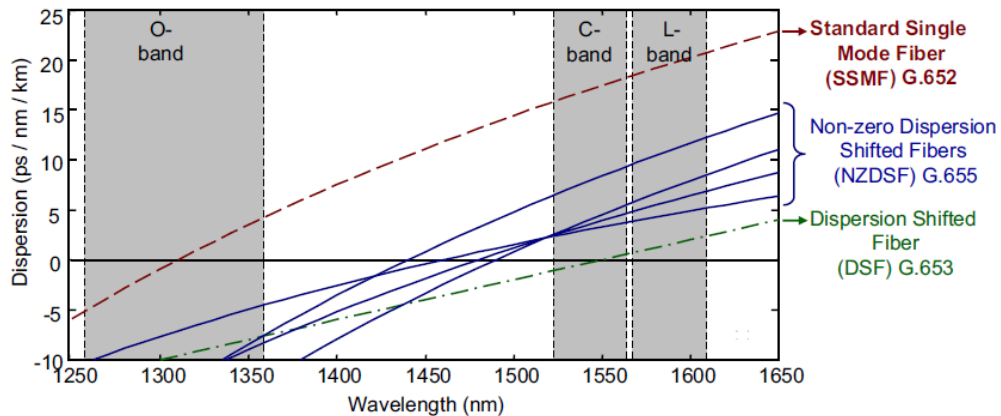


Figura 1.11 CD en función de la longitud de onda para fibras monomodo [7]

Dado el grado de degradación que puede causar la dispersión cromática y más si se trabaja a velocidades de transmisión de 10Gb/s o superior, es necesaria su compensación la cual puede realizarse por medio de: Fibra de Bragg Grating (FBG, *Fiber Bragg Grating*), Compensación Electrónica de la Dispersión (EDC, *Electronic Dispersion Compensation*) y Fibras Compensadoras de Dispersión (DCF, *Dispersion Compensation Fiber*). A continuación se describe brevemente cada uno de estos métodos [10][19].

- **FBG:** es un tramo de fibra, con índices de refracción no uniformes, que hacen que los haces de luz viajen a diferentes velocidades, permitiendo que las longitudes de onda más lentas puedan alcanzar a las más rápidas; esto se conoce como el efecto Bragg.
- **EDC:** emplea el procesamiento digital de señales y la ecualización electrónica para: eliminar la CD residual acumulada al final del enlace, que las diferentes técnicas de compensación no suprimieron totalmente; reducir las deficiencias lineales del canal causadas por los filtros ópticos y simplificar el despliegue y reconfiguración de la red WDM, ya que cada canal optimiza su propia dispersión cromática.
- **Fibras Compensadoras de Dispersión:** son el tipo de compensador más empleado en los enlaces ópticos y se caracterizan por tener una dispersión elevada de signo contrario a la fibra a compensar, sus valores oscilan entre -100ps/nm/Km y -200ps/nm/Km (siendo el primero el de mayor uso comercial), lo que genera una pendiente negativa efectiva para compensar la dispersión positiva de la fibra de transmisión en las bandas C y L [6].

Para calcular el tamaño de la longitud de la DCF y compensar el efecto de la Dispersión Cromática en el enlace, se aplica la ecuación (1.3).

$$D_1 l_1 + D_2 l_2 = 0 \quad (1.3)$$

Dónde:

$$D_1 = CD \text{ de la fibra óptica (ps/nm} \times \text{Km)}$$

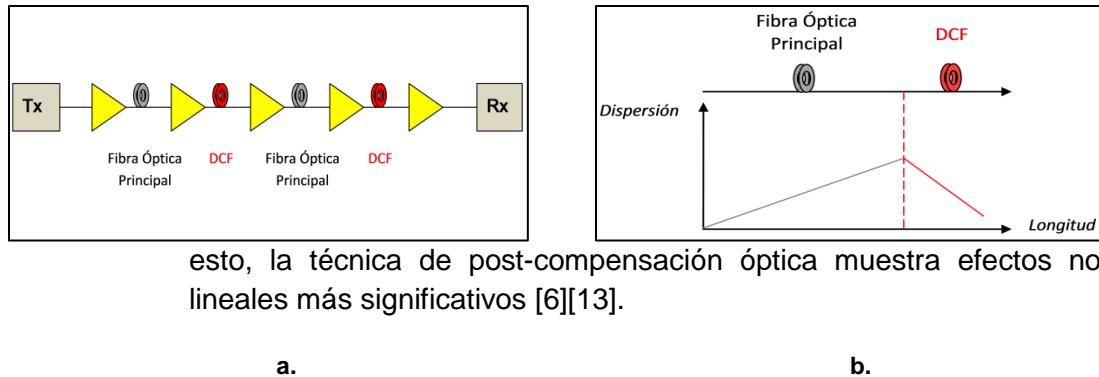
$$l_1 = \text{longitud del tramo de fibra (Km)}$$

$$D_2 = CD \text{ de la DCF (ps/nm} \times \text{Km)}$$

$$l_2 = \text{longitud de la DCF (Km)}$$

Dependiendo del lugar en donde se ubique la DCF en el trayecto principal del enlace se habla de tres técnicas de compensación óptica, que son:

- **Técnica de post-compensación óptica:** el tramo de DCF se coloca después del tramo de la fibra óptica (ver Figura 1.12). Al final de dicho tramo la CD es máxima, al introducir la DCF en este punto se contrarresta la CD acumulada por todo el trayecto del enlace. Sin embargo con esta técnica los pulsos son ensanchados y presentan un decremento en el nivel de la potencia, siendo dicho nivel más bajo que en el caso de la técnica de pre-compensación óptica; debido a

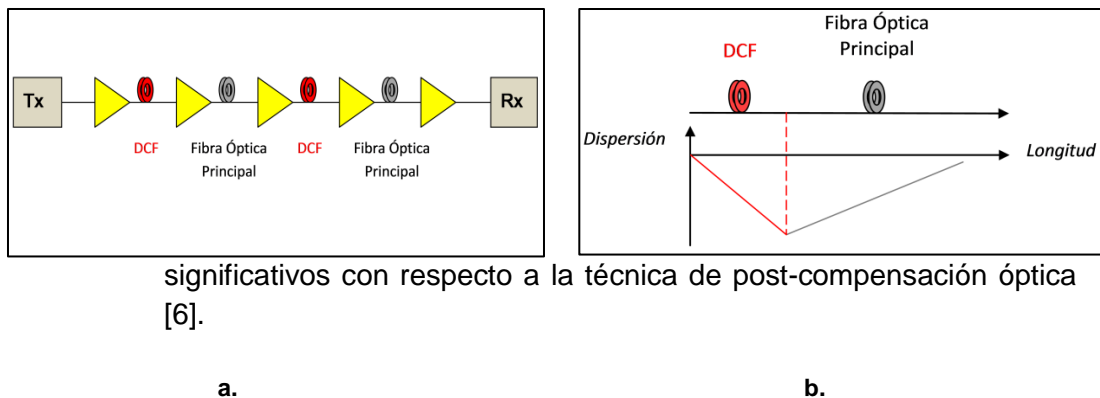


esto, la técnica de post-compensación óptica muestra efectos no lineales más significativos [6][13].

Figura 1.12 (a) Configuración y (b) Mapa de dispersión de la técnica de post-compensación óptica para la CD [6]

- **Técnica de pre-compensación óptica:** el tramo de DCF se coloca antes del tramo de la fibra óptica (ver Figura 1.13), de tal manera que se introduce una gran dispersión negativa al inicio del trayecto que compensara la dispersión positiva de la fibra óptica que se va acumulando a lo largo del tramo, así al final del trayecto se tendrá una dispersión residual considerablemente pequeña [6][13].

Esta técnica conduce a una compresión del pulso; además de presentar un decremento en el nivel de potencia, siendo el nivel de potencia de la señal a la entrada de la DCF más alto que en el caso de la técnica de post-compensación óptica. Por esta razón, la técnica de pre-compensación óptica presenta efectos no lineales menos



significativos con respecto a la técnica de post-compensación óptica [6].

Figura 1.13 (a) Configuración y (b) Mapa de dispersión de la técnica de pre-compensación óptica para la CD [6]

- **Técnica de compensación simétrica:** esta técnica de compensación consiste en colocar dos tramos de DCFs. El primer tramo de DCF se ubica después de la fibra óptica de transmisión y antes de la etapa de amplificación, el segundo tramo de DCF se coloca antes de la fibra óptica de transmisión y después de la etapa amplificadora (ver Figura 1.14). Este esquema se caracteriza por presentar un mejor rendimiento en sistemas de altas velocidades comparado con los otros dos esquemas pero presenta mayor costo de implementación [6].

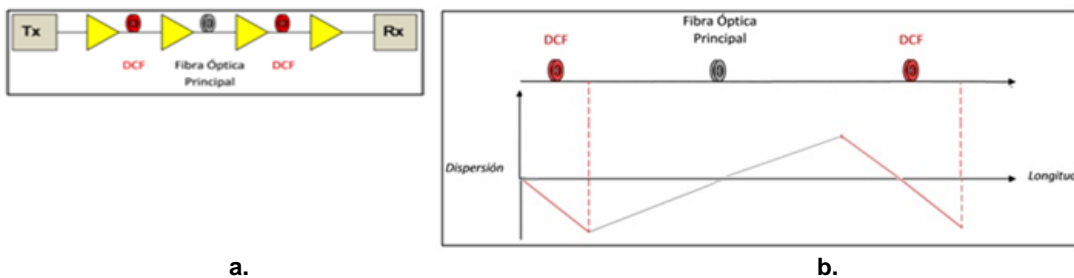


Figura 1.14 (a) Configuración y (b) Mapa de dispersión de la técnica de compensación simétrica para la CD [6]

Cuando se emplea DCF en la red se genera pérdidas de potencia, por lo tanto se recomienda introducir un Amplificador de Fibra Dopada con Erblio (EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifier*) para contrarrestar dicho efecto.

- ✓ **Atenuación:** se llama atenuación a la pérdida de potencia causada por la propagación de un haz de luz sobre un tramo de fibra óptica, generando efectos adversos en el ancho de banda y en la velocidad de transmisión de la información, convirtiéndose en un limitante al momento de calcular la distancia de un enlace [24]. En general la pérdida total de potencia en un cable de fibra es:

$$A_{(dB)} = 10 \log \frac{P_{sal}}{P_{ent}} \quad (1.4)$$

Dónde:

$A_{(dB)}$ = atenuación

P_{sal} = potencia de salida del cable (watts)

P_{ent} = potencia de entrada del cable (watts)

Un cable con pérdida de 3dB reduce la potencia de salida a 50% de la potencia de entrada, la Tabla 1.3 muestra la potencia de salida como porcentaje de la potencia de entrada a distintos valores de pérdidas.

| PÉRDIDA (dB) | REDUCCIÓN DE LA POTENCIA DE SALIDA (%) |
|--------------|--|
| 1 | 79 |
| 3 | 50 |
| 6 | 25 |
| 9 | 12.5 |
| 10 | 10 |
| 13 | 5 |
| 20 | 1 |

Tabla 1.3 Porcentaje de potencia de salida en función de la pérdida en dB [24]

Sin embargo a pesar que la atenuación total se expresa en dB, los fabricantes de las fibras ópticas proveen dicho valor en dB por unidad de longitud, de este modo la potencia en recepción se puede expresar en función de la potencia de transmisión, distancia del enlace y atenuación del cable de fibra, así:

$$P_{(dBm)} = P_{ent} - Al \quad (1.5)$$

Dónde:

P = potencia de recepción (dBm)

P_{ent} = potencia de transmisión (dBm)

A = atenuación en el cable (dB/Km)

l = distancia del enlace (km)

- ✓ **Ruido:** Las fibras ópticas son inmunes al ruido, porque la luz externa no puede ingresar a la fibra, por ello no hay necesidad de aislar los cables de fibra óptica de los cables eléctricos. El ruido introducido a las redes ópticas es causado por los extremos del transmisor y el receptor en donde se habla de ruido cuántico el cual es el resultado de la conversión del sistema fotónico al sistema eléctrico. Por ello se recomienda blindarlos adecuadamente con el fin de introducir la información a la fibra de forma correcta.

1.2.2.2 Efectos no Lineales

Los efectos no lineales de la fibra óptica producen interferencia, distorsión y atenuación adicional sobre las señales que se propagan, que conduce finalmente a degradaciones en el sistema. Estos fenómenos se pueden clasificar en efectos lineales intracanal y efectos lineales intercanal.

- ✓ **Automodulación de Fase (SPM, Self Phase Modulation):** la SPM es un efecto no lineal que limita el desempeño de las redes ópticas a altas velocidades. Se produce debido a que el índice de refracción de la fibra tiene una componente dependiente de la intensidad. Este índice genera un desplazamiento de fase proporcional a la intensidad del pulso, lo cual ocasiona que las diferentes partes del pulso sufran desplazamientos de fase [7].

- ✓ **Modulación de Fase Cruzada (XPM, Cross-phase Modulation):** la XPM se produce cuando se transmiten dos o más frecuencias simultáneamente en una fibra, ya que sus campos se interfieren entre sí, de tal forma que la potencia de un canal puede afectar a la fase del otro, provocando un ensanchamiento de pulsos cruzados. Este efecto no lineal es de mayor consideración en sistemas WDM con más de 10 canales y redes ópticas que emplean fibras estándar con espaciamientos por canal de 25GHz [7].
- ✓ **Mezcla de Cuatro Ondas (FWM, Four Wave Mixing):** la FWM es un efecto no lineal que origina nuevas frecuencias a partir de la interacción que se presenta cuando dos o más longitudes de onda se co-propagan en la misma fibra [7], como puede observarse en la Figura 1.15.

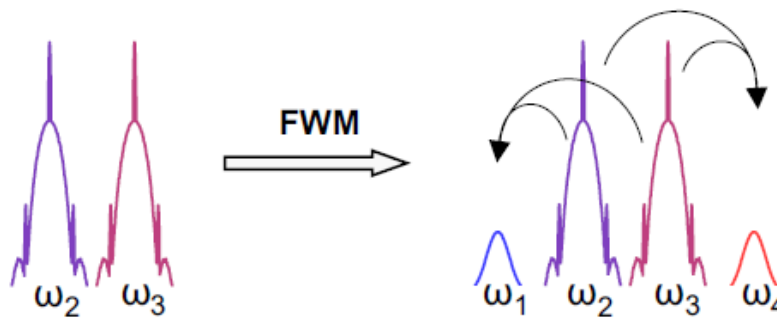


Figura 1.15 Generación de nuevas frecuencias debido a FWM [22]

Todas estas degradaciones tienen impacto en la degradación de la señal óptica pero no en la misma medida en los sistemas DWDM [25], en la Tabla 1.4 se muestra cuál es su nivel de ocurrencia:

| VARIACIÓN DE LA DEGRADACIÓN | FRECUENCIA DE OCURRENCIA | DESCRIPCIÓN |
|---|--------------------------|--|
| 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 (CD) | 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 |
|------------------------------------|------|-------------------|

Tabla 1.4 Frecuencia de ocurrencia de degradaciones ópticas en un sistema DWDM [25]

1.2.3 Parámetros de desempeño óptico

Los parámetros de desempeño óptico (OPP, *Optical Performance Parameter*) son los factores que permiten realizar las mediciones de las degradaciones ópticas, la recomendación ITU-T G.697 [25] define los parámetros de desempeño óptico para sistemas DWDM, a continuación se realiza una descripción de los considerados para el desarrollo del presente trabajo de grado.

1.2.3.1 Factor Q

El factor Q se define como la relación señal a ruido eléctrico en la entrada de un circuito de decisión de un receptor de señal digital, muestra todas las degradaciones causadas por los defectos ópticos y eléctricos sobre un punto de la red óptica, y suele expresarse en unidades de tensión o corriente así [18][11][26]:

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

Donde $\mu_{1,0}$ son los niveles lógicos y $\sigma_{1,0}$ la distribución de ruido Gaussiano en torno a los niveles "1" y "0", en la Figura 1.16 se puede ver claramente la relación entre la función de densidad de probabilidad y el factor Q.

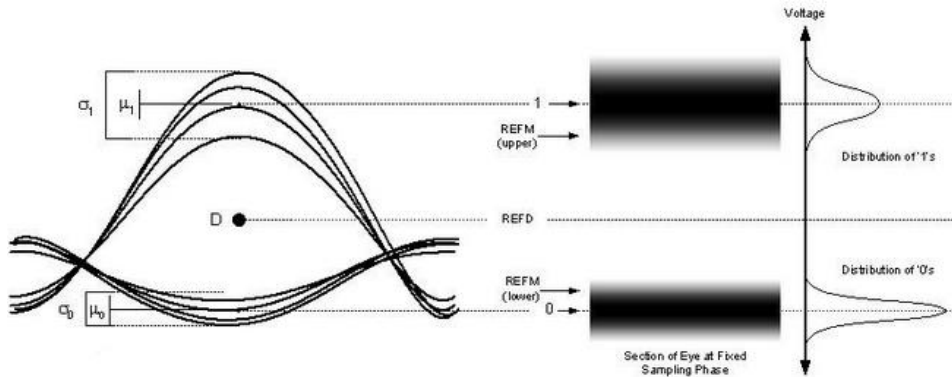


Figura 1.16 Relación entre la función de densidad de probabilidad y el factor Q [25]

Si no es posible la medida de la BER, el factor Q es una alternativa para evaluar la calidad de funcionamiento de la red. La ITU-T recomienda un valor de $Q=7,03$ para los sistemas ópticos de 10Gb/s [18].

1.2.3.2 BER

La BER es el parámetro más empleado para medir el desempeño del sistema, representa el número esperado de bits errados respecto a los transmitidos medidos en recepción [25]. La ITU-T establece para el diseño de los sistemas ópticos de 10Gb/s un valor de

BER de 10^{-12} [18]. El ruido, la atenuación y los efectos no lineales producen un aumento considerable de la BER, sin embargo se pueden contrarrestar reduciendo las pérdidas de la fibra, empleando amplificadores de fibra, aumentando la potencia de transmisión y compensando la dispersión en el enlace [17]. Matemáticamente la BER se expresa en unidades de tensión así [26]:

$$BER = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu - \mu_0}{\sqrt{2} \sigma_0} \right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_1 - \mu}{\sqrt{2} \sigma_1} \right) \quad (1.7)$$

Donde $\mu_{1,0}$ son los niveles medios de tensión y $\sigma_{1,0}$ la distribución de ruido Gaussiano en torno a los niveles "1" y "0", en la Figura 1.17 se puede ver claramente la relación entre la función de densidad de probabilidad y la BER.

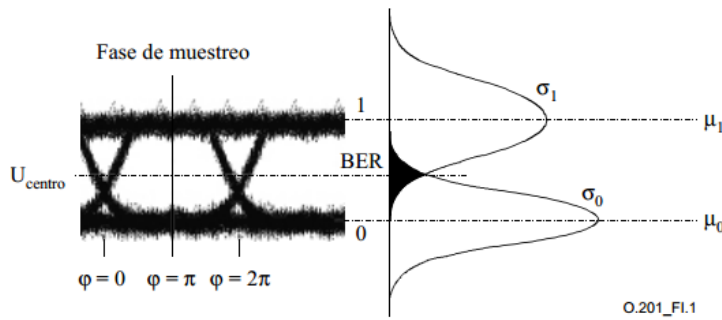


Figura 1.17 Relación entre la función de densidad de probabilidad y la BER [26]

Por lo anterior se ve claramente que existe una relación entre el factor Q y la BER, de tal manera que se puede obtener un valor aproximado de BER como lo muestra la ecuación (1.8).

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (1.8)$$

Para resolver la ecuación (1.8) dado su nivel de complejidad que comprende la función de error complementaria (erfc, *Complementary Error Function*), se emplean las siguientes aproximaciones matemáticas [18]:

$$BER \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Q^2}{2}} \quad (1.9)$$

$$BER \approx \frac{e^{-\frac{Q^2}{2}}}{\sqrt{2\pi} \left(\left(1 - \frac{1}{\pi}\right) Q + \frac{\sqrt{Q^2 + 2\pi}}{\pi} \right)} \quad (1.10)$$

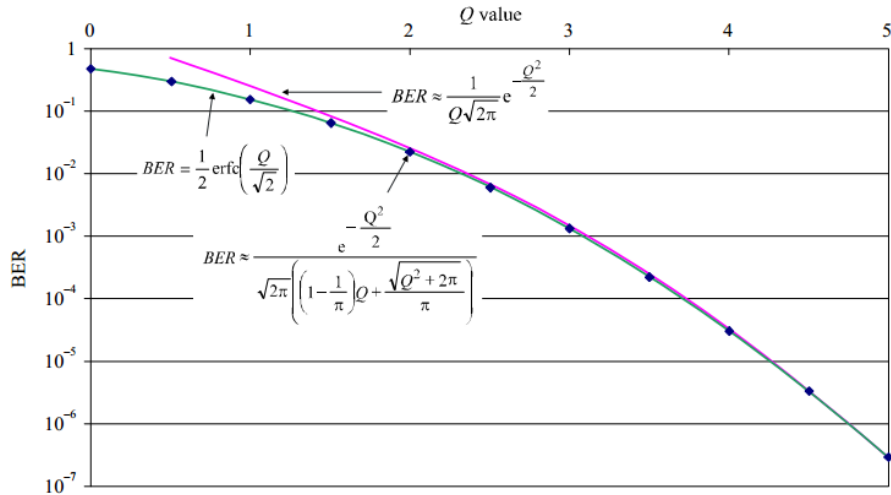


Figura 1.18 Cálculo matemático de la BER en función del factor Q [18]

1.2.3.3 OSNR

La OSNR es de gran importancia ya que muestra la degradación de la señal óptica frente a fenómenos de atenuación o dispersión, teóricamente la OSNR corresponde a la medida de la relación de la potencia de la señal con respecto a la potencia de ruido en un canal óptico [27]. Los factores que afectan principalmente la OSNR son: Formato de modulación, velocidad de transmisión, potencia a la salida de los amplificadores, dispersión en la fibra óptica, ancho de banda y el espaciamiento entre canales [28].

Por ejemplo, la Figura 1.19 corresponde a las medidas realizadas de la OSNR en función del DGD para diferentes formatos de modulación en un sistema con velocidad de 43Gb/s y una BER de 10^{-4} . De ella se puede inferir que es recomendable el uso de formatos de modulación de menor complejidad puesto que son los que mayor OSNR presentan.

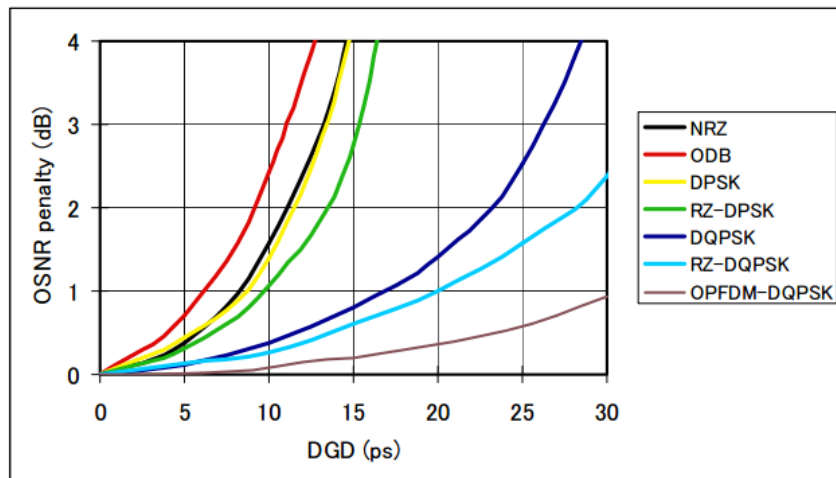


Figura 1.19 Relación OSNR Vs DGD para diferentes formatos de modulación [18]

La OSNR en función del ancho de banda se puede expresar como [18]:

$$OSNR = 10\log \frac{P_i}{N_i} + 10\log \frac{B_m}{B_r} \quad (1.11)$$

Donde P_i es la potencia óptica de la señal, B_m es el ancho de banda, N_i es el valor promedio de la potencia de ruido medido en el ancho de banda B_m y B_r es el ancho de banda óptico de referencia típicamente seleccionado para 0.1nm.

La compensación de la OSNR es casi imposible para sistemas WDM multicanal, dado que cada etapa de amplificación involucra un incremento en los niveles de ruido con respecto a la potencia del canal (ver Figura 1.20). Los diseños basados en la OSNR, desean mantener una relación BER específica al final de las etapas de los enlaces, es decir en el receptor [7].

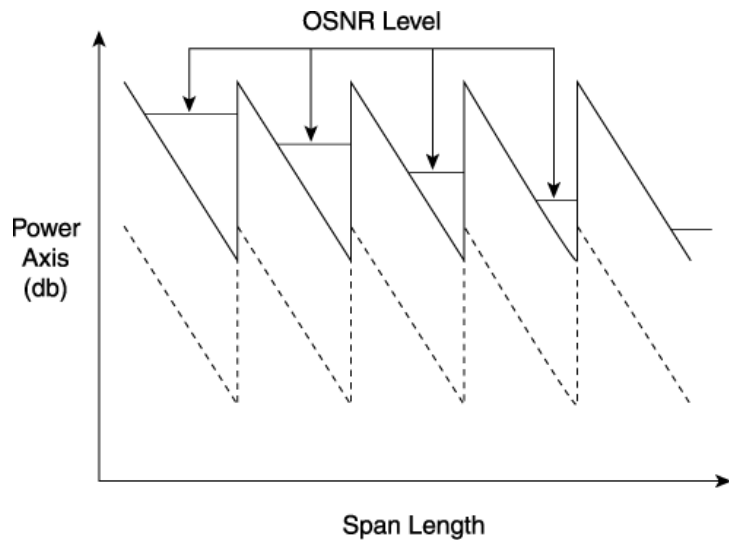


Figura 1.20 Niveles de OSNR para transmisiones WDM con múltiples etapas [7].

La ITU-T recomienda una OSNR de 10dB a 30dB para sistemas DWDM con una potencia de transmisión por canal $\geq 25\text{dBm}$ y una separación $\geq 100\text{GHz}$ entre canales, siempre y cuando se tenga una configuración de ruido significativa, de lo contrario la OSNR debe encontrarse dentro del rango de 0dB a 42dB [25].

1.2.3.4 Diagrama del ojo

El diagrama del ojo es un diagrama compuesto por varias secuencias de unos y ceros superpuestos el uno sobre el otro tal como se muestra en la Figura 1.21. Aunque es una técnica cualitativa permite obtener algunos datos como la BER, el factor Q, desfases, niveles de potencia, niveles de ruido, Interferencia Intersimbólica (ISI, *Intersymbol Interference*), que lo convierten en una herramienta muy útil para medir la calidad de una señal [29].

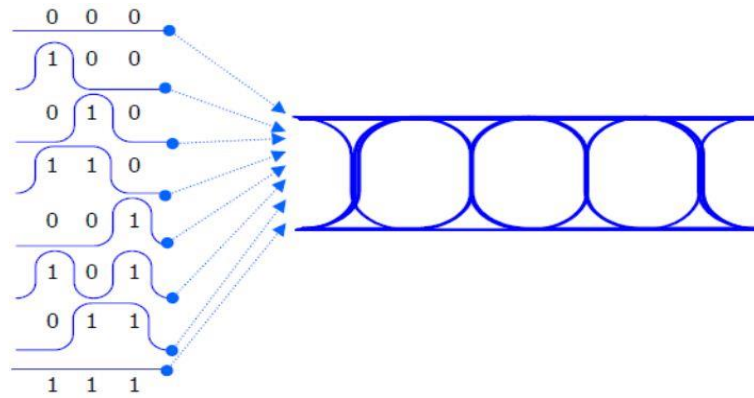


Figura 1.21 Superposición de unos y ceros que generan el diagrama del ojo [29]

En la Figura 1.22 el eje X o eje de tiempo muestra el efecto producido por el Jitter y el sincronismo sobre la señal; mientras que en el eje Y se observa como los fenómenos de atenuación, interferencia intersimbólica y el margen del ruido inciden en la amplitud de la señal.

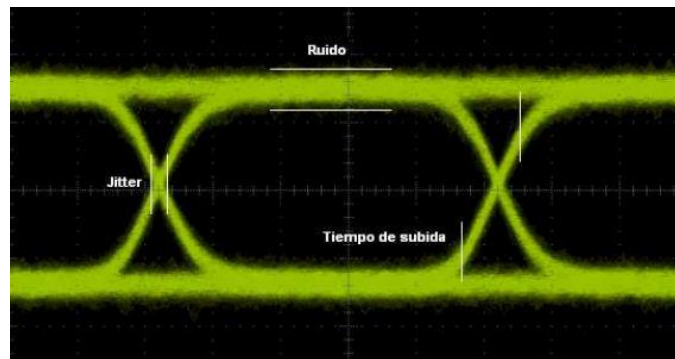


Figura 1.22 Efectos de Jitter, ruido y niveles medios de las señales [29]

1.2.4 Relación entre degradaciones ópticas y Parámetros de monitoreo óptico

Existe una relación estrecha entre las degradaciones ópticas y los parámetros de monitoreo óptico con lo cual se puede inferir que cada degradación óptica generada en el sistema tiene un impacto directo en un parámetro de monitoreo [25], esta se sintetizan en la Tabla 1.5.

| Degradación Óptica | Parámetro de Monitoreo Óptico |
|----------------------|--------------------------------|
| Dispersión Cromática | Longitud de onda de cada canal |
| PMD | Ber, Factor Q |
| Diafonía | OSNR |
| Atenuación | Potencia por el canal DWDM |

Tabla 1.5 Degradaciones óptica y parámetros de monitoreo óptico [25]

1.2.5 Técnicas de monitoreo óptico

Al igual que la recomendación ITU-T G.697, OPM plantea dos técnicas para facilitar la visualización del comportamiento de la red frente a variaciones de un determinado parámetro:

- OPM – Dominio del tiempo: los métodos que analizan el comportamiento de la señal óptica en el dominio del tiempo tienden a estar más cerca de la medida de la BER y el factor Q, estos métodos son sensibles al ruido y a la distorsión. Monitorean la red utilizando: Procesamiento digital de la señal de datos eléctrica recibida, histogramas de amplitud, distribuciones de potencia y muestreo asíncrono.
- OPM – Dominio de la frecuencia: estos métodos se caracterizan por analizar las características espectrales de la señal óptica, emplean técnicas basadas en promedios para monitorear los cambios en la potencia del pulso de radio frecuencia o del canal espectral haciéndolos insensibles a la distorsión.

1.3 Caracterización de las Fibras Ópticas

A partir de los estudios [12] y [13] se concluye que la fibra más adecuada para ser implementada en los sistemas DWDM, es la fibra monomodo, pero antes de profundizar en dicha fibra es importante realizar una breve introducción a las generalidades de la fibra óptica para posteriormente caracterizar la fibra monomodo y obtener así una base teórica que permitirá la escogencia de las fibras que se emplearán para el presente trabajo de grado.

1.3.1 Generalidades

La fibra óptica es un medio de transmisión utilizado para enviar gran cantidad de información, esta se compone por filamentos transparentes ya sean de vidrio o materiales plásticos. Para enviar datos a través de la fibra óptica se utilizan haces de luz, las cuales viajan grandes distancias a través de ella. En telecomunicaciones la fibra óptica es el medio de transmisión más usado gracias a su adaptabilidad a condiciones geográficas, inmunidad al ruido, a las interferencias electromagnéticas, gran capacidad para transportar datos, entre otros [30][31][32][33][34]. La fibra óptica está compuesta por tres partes (ver Figura 1.23):

- ✓ Núcleo (core, n_1): es la parte interna de la fibra óptica compuesto por material dieléctrico de vidrio de sílice, plástico o cuarzo fundido. Se dopa para ajustar el índice de refracción.

- ✓ Revestimiento (Cladding, n_2): envuelve al núcleo, es fabricado con materiales similares al núcleo pero con un índice de reflexión menor que el del núcleo para que se genere reflexión total interna.
- ✓ Camisa o Cubierta: protege al revestimiento y al núcleo, generalmente fabricada en plástico.

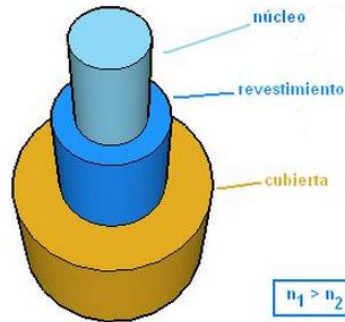


Figura 1.23 Estructura de la fibra óptica [33]

Las propiedades de la fibra óptica se pueden clasificar en 4 grandes grupos: propiedades ópticas, propiedades de transmisión, propiedades físicas, propiedades geométricas, las cuales se explican a continuación.

- ✓ **Propiedades ópticas:** se refieren al índice de refracción, reflexión y Apertura Numérica (NA, *Numerical Aperture*).
- **Índice de refracción y reflexión:** cuando un rayo de luz incide sobre la superficie de separación de dos materiales una parte de esta se refleja, la cantidad de luz reflejada depende de los índices de refracción de los dos materiales, la cual está descrita cuantitativamente por la ley de Snell [31][34]. Cuando un rayo de luz se refleja sobre una superficie la proporción de luz reflejada está en función del ángulo α que forma el rayo de luz incidente con la perpendicular a la superficie de separación de los medios. El rayo de luz reflejado presenta un ángulo de reflexión α_2 el cual se forma con la perpendicular a la superficie, ver Figura 1.24 [31][34].

Cuando un rayo de luz incide con un ángulo α sobre una superficie de mayor densidad la dirección de propagación de este se quiebra y su trayectoria continúa en la segunda sustancia con un ángulo β de refracción, cuando se habla de densidad se considera menos densa a aquella sustancia que posee menor velocidad de propagación de la luz [34].

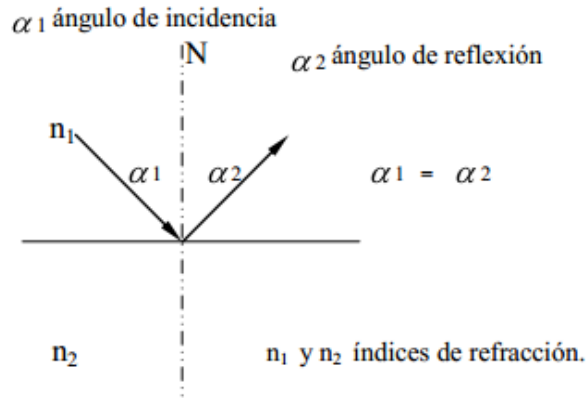


Figura 1.24 Principio de reflexión [31]

La ecuación 1.13 describe la ley de Snell de refracción en donde el seno de α es el ángulo de incidencia y el seno de β es el ángulo de refracción constante e igual a la relación de las velocidades de la luz c_1 / c_2 en ambas sustancias [31].

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} \quad (1.12)$$

La Figura 1.25 muestra dos sustancias con diferentes índices de refracción n_1 y n_2 , con $n_1 > n_2$ en donde se observa el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción [31].

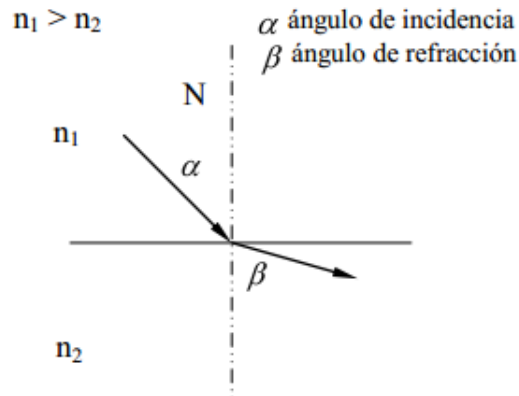


Figura 1.25 Refracción de la luz [31]

- **Apertura numérica (NA):** la apertura numérica se refiere a la cantidad de luz que puede ser guiada a través de la fibra óptica. Entre mayor sea la apertura numérica, mayor va a ser la cantidad de luz que puede ser guiada a través del núcleo de la fibra [33].

- Una NA grande conduce más luz, pero reduce el ancho de banda. Una NA baja aumenta el ancho de banda.
 - Una NA alta facilita la inyección de luz en la fibra óptica.
 - Una NA grande permite una dispersión modal mayor ya que permite más modos en la que la luz puede viajar. Un NA menor disminuye la dispersión limitando el número de modos.
- ✓ **Propiedades de Transmisión:** las principales características de la transmisión de las fibras ópticas son: atenuación (ver página 16), ancho de banda, diámetro, campo modal y longitud de onda de corte.
- **Ancho de banda:** el ancho de banda determina la capacidad de transmisión de información a través de la fibra óptica en un periodo de tiempo dado. Se mide en: bits por segundo (bits/s), kilobits por segundo (kbps), megabits por segundo (Mbps) o algún otro múltiplo. La capacidad viene limitada por el ensanchamiento de los pulsos al transmitirse a lo largo de la fibra [33]. El ensanchamiento se da básicamente por:
 - **Dispersión intermodal:** es causada por la interferencia de los rayos de luz que se desplazan a través de la fibra a diferentes tiempos y trayectorias, esta tiene lugar solo en fibras multimodo y se puede reducir utilizando fibras monomodo de índice escalón y fibras de índice gradual.
 - **Dispersión intramodal:** cuando las diferentes longitudes de onda de la luz se propagan a distintas velocidades a través de la fibra óptica se habla de dispersión intramodal del material; cuando existe una variación en el ángulo del rayo y el eje de la fibra, debido a cambios en la longitud de onda, se habla de dispersión intramodal de la guía de onda.
 - **Diámetro de campo modal:** este diámetro corresponde al diámetro efectivo ocupado por la luz al propagarse por la fibra óptica, el cual incluye al núcleo y una pequeña parte del revestimiento.
 - **Longitud de onda de corte:** la fibra óptica no transmite un único rayo para las diferentes longitudes de onda, sino que a partir de determinada longitud se comporta como monomodo, y por debajo de ese valor se comporta como multimodo. Se llama longitud de onda de corte a la longitud de onda en la que se produce la separación de monomodo a multimodo.
- ✓ **Propiedades Físicas:**
- **Módulo de Young:** es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la fuerza y dirección con que se le aplique una fuerza. En fibra óptica se define como la fuerza por unidad de área, que produce un

alargamiento de esta, donde su valor aproximado es de 700 Kilopond por milímetro cuadrado (700Kp/mm^2). El Hp es una unidad de fuerza, equivalente a la fuerza con que la tierra atrae una masa de un kilogramo, $1\text{Kp}=9.8\text{Nw}$.

- **Carga de rotura:** es la fuerza mínima por unidad de área capaz de romper la fibra óptica, donde su valor es de aproximadamente 400Kp/mm^2 .
 - **Alargamiento en el punto de rotura:** es del 5% la carga de tracción aplicada durante 1 segundo a toda la longitud de la fibra óptica
 - **Coefficiente de dilatación:** es el alargamiento que sufre la fibra óptica por cada grado de temperatura. Para la fibra óptica su valor es de $0,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$. Para un tramo de 2000 metros de fibra óptica esta sufrirá un alargamiento de 50mm, al pasar de 20°C a 70°C .
- ✓ **Propiedades Geométricas:** entre las características geométricas de la fibra óptica se pueden encontrar [32]:
- Diámetro del revestimiento.
 - Diámetro del núcleo.
 - Concentricidad núcleo-revestimiento.
 - Circularidad del núcleo.
 - No circularidad del revestimiento.

1.3.2 Fibras Ópticas Monomodo

Son las fibras ópticas más empleadas en el mercado por sus propiedades ya que permiten alcanzar grandes distancias y transmitir elevadas tasas de bits. La recomendación ITU-T G.650.1 define las características de estas fibras. Existen varios tipos de fibras ópticas monomodo de las que se pueden destacar: Fibra Monomodo Estándar (SMF, *Single Mode Fiber*), Fibra de Dispersión Desplazada (DSF, *Dispersion Shifted Fiber*), Fibra con Corte Desplazado (CSF, *Cutoff Shifted Fiber*) y Fibra de Dispersión Desplazada no Nula (NZDSF, *Non Zero Dispersion Shifted Fiber*). A continuación se realiza una descripción más detallada de cada una de ellas.

1.3.2.1 Fibra Monomodo Estándar

La SMF está definida por la recomendación UIT-T G.652, se optimizó inicialmente para su uso en la región de 1310nm de longitud de onda en donde la dispersión cromática es nula, siendo adecuada para CWDM. Sin embargo también puede ser utilizada en la región de 1550nm pero la dispersión cromática se convierte en un factor altamente degradante. La recomendación G.652 presenta cuatro variantes: G.652.A, G.652.B, G.652.C y G.652.D, cuyos parámetros se describen a continuación [35].

| ATRIBUTO DE LA FIBRA | DETALLE | G.652.A | G.652.B | G.652.C | G.652.D |
|--|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| DIÁMETRO DE CAMPO MODAL | Longitud de onda | 1310nm | 1310nm | 1310nm | 1310nm |
| | Rango de valores nominales | 8.6µm – 9.5µm | 8.6µm – 9.5µm | 8.6µm – 9.5µm | 8.6µm – 9.5µm |
| | Tolerancia | ±0.6µm | ±0.6µm | ±0.6µm | ±0.6µm |
| DIÁMETRO DE REVESTIMIENTO | Nominal | 125µm | 125µm | 125µm | 125µm |
| | Tolerancia | ±1µm | ±1µm | ±1µm | ±1µm |
| COEFICIENTE DE CD | λ_{0min} | 1300nm | 1300nm | 1300nm | 1300nm |
| | λ_{0max} | 1324nm | 1324nm | 1324nm | 1324nm |
| | S_{0max} | 0.092 ps/(nm ² x km) | 0.092 ps/(nm ² x km) | 0.092 ps/(nm ² x km) | 0.092 ps/(nm ² x km) |
| COEFICIENTES DE ATENUACIÓN EN ENLACES CONCATENADOS | 1260nm – 1360nm | 0.5dB/Km | 0.5dB/Km | 0.5dB/Km | 0.5dB/Km |
| | 1530nm – 1565nm | 0.275dB/Km | 0.275dB/Km | 0.275dB/Km | 0.275dB/Km |
| | 1565nm – 1625nm | 0.35dB/Km | 0.35dB/Km | 0.35dB/Km | 0.35dB/Km |
| COEFICIENTE DE CD EN ENLACES CONCATENADOS | D_{1550} | 17ps/nm x Km | 17ps/nm x Km | 17ps/nm x Km | 17ps/nm x Km |
| | S_{1550} | 0.056 ps/(nm ² x km) | 0.056 ps/(nm ² x km) | 0.056 ps/(nm ² x km) | 0.056 ps/(nm ² x km) |
| ATRIBUTO DEL CABLE | DETALLE | G.652.A | G.652.B | G.652.C | G.652.D |
| COEFICIENTE DE ATENUACIÓN | Máximo a 1310nm | 0.5dB/Km | 0.4dB/Km | - | - |
| | Máximo a 1550nm | 0.4dB/Km | 0.35dB/Km | 0.3dB/Km | 0.3dB/Km |
| | Máximo a 1625nm | - | 0.4dB/Km | - | - |
| | Máximo a 1310nm-1625nm | - | - | 0.4dB/Km | 0.4dB/Km |
| | Máximo a 1383nm±3nm | - | - | 0.4dB/Km | 0.4dB/Km |
| COEFICIENTE DE PMD | M | 20 cables | 20 cables | 20 cables | 20 cables |
| | Q | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 0.01% |
| | Máximo PMD _Q | 0.5ps/km ^{1/2} | 0.20ps/km ^{1/2} | 0.5ps/km ^{1/2} | 0.20ps/km ^{1/2} |

Tabla 1.6 Parámetros de la ITU-T G.652

En la Tabla 1.6 se evidencia que los coeficientes de atenuación y de PMD se convierten en los factores diferenciadores, permitiendo que las fibras ópticas fabricadas bajo el estándar G.652 sean aptas para trabajar en ciertas longitudes de onda ó grandes distancias; gracias a su alta adaptabilidad se convierten hoy en día en las de mayor comercialización. Esto se ve reflejado en la variedad de sistemas ópticos que las emplean para desplegar sus aplicaciones, algunas descritas en la Tabla 1.7.

| ESTÁNDAR | APLICACIONES |
|----------|--------------|
|----------|--------------|

| | |
|----------------|--|
| G.652.A | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Interfaces ópticas para equipos y sistemas relacionados con la jerarquía digital síncrona de hasta STM-16. ✓ Interfaces ópticas para los sistemas monocanal STM-16 y otros sistemas de la jerarquía digital síncrona con amplificadores ópticos. ✓ Interfaces ópticas para sistemas STM-256 de conexión local de 10Gb/s hasta 40Km (Ethernet). |
| G.652.B | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Interfaces ópticas para los sistemas monocanal STM-64 y otros sistemas de la jerarquía digital síncrona con amplificadores ópticos. ✓ Interfaces ópticas para sistemas multicanales STM-64 con amplificadores ópticos. ✓ Interfaces ópticas para sistemas STM-256 de conexión local. ✓ Interfaces ópticas para sistemas multicanales con amplificadores ópticos. ✓ Interfaces ópticas para sistemas STM-256 de conexión local. |
| G.652.C | ✓ Soporta las mismas aplicaciones del G.652.A, pero permite transmisiones en la región comprendida entre 1360nm a 1530nm. |
| G.652.D | ✓ Soporta las mismas aplicaciones del G.652.B, pero permite transmisiones en la región comprendida entre 1360nm a 1530nm. |

Tabla 1.7 Aplicaciones estándares G.652

En cuanto a los efectos lineales los cálculos matemáticos frente a la atenuación se realizan igual que la sección anterior y la PMD se mide en función del DGD, pero cuando se trabaja en la ventana de los 1550nm la CD para estas fibras se puede caracterizar mediante una relación lineal con la longitud de onda así:

$$D_{link}(\lambda) = l_{link}[D_{1550} + S_{1550}(\lambda - 1550)] \quad (1.13)$$

Dónde:

$$D_{link}(\lambda) = CD \text{ total para el enlace (ps/nm)}$$

$$l_{link} = longitud \text{ del tramo de fibra (Km)}$$

$$D_{1550} = coeficiente \text{ de dispersion cromática}$$

$$S_{1550} = pendiente \text{ de dispersion cromática}$$

$$\lambda = longitud \text{ de onda del canal(nm)}$$

1.3.2.2 Fibra de Dispersión Desplazada

La recomendación UIT-T G.653 define los parámetros para una DSF, fabricada para tener dispersión cromática nula en la tercera ventana lo cual incrementa su sensibilidad a fenómenos no lineales como FWM lo que imposibilita su uso en sistemas DWDM [36]. La recomendación G.653 presenta variantes: G.653.A y G.653.B, cuyos parámetros se describen a continuación.

| ATRIBUTO DE LA FIBRA | DETALLE | G.653.A |
|----------------------------------|-----------------------------------|---------------|
| DIÁMETRO DE CAMPO MODAL | <i>Longitud de onda</i> | 1550nm |
| | <i>Rango de valores nominales</i> | 7.8µm – 8.5µm |
| | <i>Tolerancia</i> | ±0.8µm |
| DIÁMETRO DE REVESTIMIENTO | <i>Nominal</i> | 125µm |
| | <i>Tolerancia</i> | ±1µm |
| COEFICIENTE DE CD | λ_{min} | 1525nm |
| | λ_{max} | 1575nm |

| | | |
|---|-------------------------------|------------------------------|
| | $D_{m\acute{a}x}$ | 3.5 ps/(nmxKm) |
| | λ_{0min} | 1500nm |
| | λ_{0max} | 1600nm |
| | S_{0max} | 0.085ps/nm ² x km |
| COEFICIENTES DE ATENUACIÓN EN ENLACES CONCATENADOS | 1550 nm | 0.275dB/Km |
| | 1625 nm | TBD |
| COEFICIENTE DE CD EN ENLACES CONCATENADOS | λ_{1550} | 1500nm |
| | S_{1550} | 0.07ps/nm ² x Km |
| ATRIBUTO DEL CABLE | DETALLE | G.653.A |
| COEFICIENTE DE ATENUACIÓN | <i>Máximo a 1550nm</i> | 0.35dB/Km |
| COEFICIENTE DE PMD | M | 20 cables |
| | Q | 0.01% |
| | <i>Máximo PMD_Q</i> | 0.5ps/km ^{1/2} |

Tabla 1.8 Parámetros de la ITU-T G.653.A

| ATRIBUTO DE LA FIBRA | DETALLE | G.653.B |
|---|---|----------------------------------|
| DIÁMETRO DE CAMPO MODAL | <i>Longitud de onda</i> | 1550nm |
| | <i>Rango de valores nominales</i> | 7.8μm – 8.5μm |
| | <i>Tolerancia</i> | ±0.6μm |
| DIÁMETRO DE REVESTIMIENTO | <i>Nominal</i> | 125μm |
| | <i>Tolerancia</i> | ±1μm |
| COEFICIENTE DE CD ps/(nmxKm) | $D_{min}(\lambda): 1460-1525\text{ nm}$ | $0.085 * (\lambda - 1525) - 3.5$ |
| | $D_{min}(\lambda): 1525-1625\text{ nm}$ | $3.5/75 * (\lambda - 1600)$ |
| | $D_{min}(\lambda): 1460-1575\text{ nm}$ | $3.5/75 * (\lambda - 1500)$ |
| | $D_{min}(\lambda): 1575-1625\text{ nm}$ | $0.085 * (\lambda - 1575) + 3.5$ |
| COEFICIENTES DE ATENUACIÓN EN ENLACES CONCATENADOS | 1550nm | 0.275dB/Km |
| | 1625nm | TBD |
| COEFICIENTE DE CD EN ENLACES CONCATENADOS | λ_{1550} | 1500nm |
| | S_{1550} | 0.07ps/nm ² x Km |
| ATRIBUTO DEL CABLE | DETALLE | G.653.B |
| COEFICIENTE DE ATENUACIÓN | <i>Máximo a 1550nm</i> | 0.35dB/Km |
| COEFICIENTE DE PMD | M | 20 cables |
| | Q | 0.01% |
| | <i>Máximo PMD_Q</i> | 0.20ps/km ^{1/2} |

Tabla 1.9 Parámetros de la ITU-T G.653.B

1.3.2.3 Fibra con Corte Desplazado

Está definida por la ITU-T G.654, es una fibra estándar especial del monomodo, optimizada para operar en la región de 1500nm a 1600nm. Esta fibra tiene una baja pérdida en la banda de 1550nm. La baja pérdida se logra mediante el uso de un núcleo de sílice puro, por ello son caras en la fabricación, pueden soportar mayores niveles de potencia y tiene un núcleo más grande (9.5μm a 10.5μm) y tienen una alta dispersión

cromática en 1550nm ($20\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$ a $22\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$) [37]. Esta fibra ha sido diseñada para aplicaciones de larga distancia bajo el mar.

| ATRIBUTO DE LA FIBRA | DETALLE | G.654.A | G.654.B | G.654.C | G.654.D |
|--|----------------------------|--|--|--|---|
| DIÁMETRO DE CAMPO MODAL | Longitud de onda | 1550nm | 1550nm | 1550nm | 1550nm |
| | Rango de valores nominales | 9.5 μm – 10.5 μm | 9.5 μm – 10.5 μm | 9.5 μm – 10.5 μm | 11.5 μm – 15.0 μm |
| | Tolerancia | $\pm 0.7\mu\text{m}$ | $\pm 0.7\mu\text{m}$ | $\pm 0.7\mu\text{m}$ | $\pm 0.7\mu\text{m}$ |
| DIÁMETRO DE REVESTIMIENTO | Nominal | 125 μm | 125 μm | 125 μm | 125 μm |
| | Tolerancia | $\pm 1\mu\text{m}$ | $\pm 1\mu\text{m}$ | $\pm 1\mu\text{m}$ | $\pm 1\mu\text{m}$ |
| COEFICIENTE DE CD | $D_{1550\text{max}}$ | 20 ps/nmxKm | 22 ps/nmxKm | 20 ps/nmxKm | 23ps/nmxKm |
| | $S_{1550\text{max}}$ | 0.070 ps/(nm ² x km) | 0.070 ps/(nm ² x km) | 0.070 ps/(nm ² x km) | 0.070 ps/(nm ² x km) |
| COEFICIENTES DE ATENUACIÓN EN ENLACES CONCATENADOS | 1550nm | 0.25dB/Km | 0.25dB/Km | 0.25dB/Km | 0.25dB/Km |
| ATRIBUTO DEL CABLE | DETALLE | G.654.A | G.654.B | G.654.C | G.654.D |
| COEFICIENTE DE ATENUACIÓN | Máximo a 1550nm | 0.22dB/Km | 0.22dB/Km | 0.22dB/Km | 0.20dB/Km |
| COEFICIENTE DE PMD | M | 20 cables | 20 cables | 20 cables | 20 cables |
| | Q | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 0.01% |
| | Máximo PMD _Q | 0.5ps/km ^{1/2} | 0.20ps/km ^{1/2} | 0.20ps/km ^{1/2} | 0.20ps/km ^{1/2} |

Tabla 1.10 Parámetros de la ITU-T G.654

1.3.2.4 Fibra de Dispersión Desplazada no Nula

Definida por la ITU-T G.655, resuelve los problemas presentados por la DSF; presenta un valor de dispersión próximo a cero para contrarrestar los efectos no lineales mediante la dispersión cromática. Son utilizadas en sistemas DWDM [38].

| ATRIBUTO DE LA FIBRA | DETALLE | G.655.A | G.655.B | G.655.C |
|---------------------------|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| DIÁMETRO DE CAMPO MODAL | Longitud de onda | 1550nm | 1550nm | 1550nm |
| | Rango de valores nominales | 8 μm – 11 μm | 8 μm – 11 μm | 8 μm – 11 μm |
| | Tolerancia | $\pm 0.7\mu\text{m}$ | $\pm 0.7\mu\text{m}$ | $\pm 0.7\mu\text{m}$ |
| DIÁMETRO DE REVESTIMIENTO | Nominal | 125 μm | 125 μm | 125 μm |
| | Tolerancia | $\pm 1\mu\text{m}$ | $\pm 1\mu\text{m}$ | $\pm 1\mu\text{m}$ |

| | | | | |
|---|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| COEFICIENTE DE CD: 1530nm - 1565nm | λ_{min} y λ_{max} | 1530 nm y 1565 nm | 1530 nm y 1565 nm | 1530 nm y 1565 nm |
| | D_{min} | 0.1 ps/nmxKm | 1.0 ps/nmxKm | 1.0 ps/nmxKm |
| | D_{max} | 6.0 ps/nmxKm | 10 ps/nmxKm | 10 ps/nmxKm |
| | <i>Signo</i> | Positivo o Negativo | Positivo o Negativo | Positivo o Negativo |
| | $D_{max} - D_{min}$ | - | ≤ 5 ps/nmxKm | ≤ 5 ps/nmxKm |
| COEFICIENTES DE ATENUACIÓN EN ENLACES CONCATENADOS | 1530 nm – 1565 nm | 0.275dB/Km | 0.275dB/Km | 0.275dB/Km |
| | 1565 nm – 1625 nm | 0.35dB/Km | 0.35dB/Km | 0.35dB/Km |
| ATRIBUTO DEL CABLE | DETALLE | G.655.A | G.655.B | G.655.C |
| COEFICIENTE DE ATENUACIÓN | Máximo a 1550nm | 0.35dB/Km | 0.35 dB/Km | 0.35 dB/Km |
| | Máximo a 1625nm | - | 0.4 dB/Km | 0.4 dB/Km |
| COEFICIENTE DE PMD | <i>M</i> | 20 cables | 20 cables | 20 cables |
| | <i>Q</i> | 0.01% | 0.01% | 0.01% |
| | Máximo PMD_Q | 0.5 ps/km ^{1/2} | 0.5 ps/km ^{1/2} | 0.20 ps/km ^{1/2} |

Tabla 1.11 Parámetros de la ITU-T G.655.C

| ATRIBUTO DE LA FIBRA | DETALLE | G.655.D |
|---|-----------------------------------|-------------------------------------|
| DIÁMETRO DE CAMPO MODAL | <i>Longitud de onda</i> | 1550nm |
| | <i>Rango de valores nominales</i> | 8 μ m – 11 μ m |
| | <i>Tolerancia</i> | $\pm 0.6\mu$ m |
| DIÁMETRO DE REVESTIMIENTO | <i>Nominal</i> | 125 μ m |
| | <i>Tolerancia</i> | $\pm 1\mu$ m |
| COEFICIENTE DE CD ps/(nmxKm) | $D_{min}(\lambda)$: 1460-1550 nm | $7/90 * (\lambda - 1460) - 4.2$ |
| | $D_{min}(\lambda)$: 1550-1625 nm | $2.97/75 * (\lambda - 1550) + 2.8$ |
| | $D_{min}(\lambda)$: 1460-1550 nm | $2.91/90 * (\lambda - 1460) + 3.29$ |
| | $D_{min}(\lambda)$: 1550-1625 nm | $5.06/75 * (\lambda - 1550) + 6.2$ |
| COEFICIENTES DE ATENUACIÓN EN ENLACES CONCATENADOS | 1530 nm – 1565 nm | 0.275dB/Km |
| | 1565 nm – 1625 nm | 0.35dB/Km |
| ATRIBUTO DEL CABLE | DETALLE | G.655.D |
| COEFICIENTE DE ATENUACIÓN | Máximo a 1550nm | 0.35dB/Km |
| | Máximo a 1625nm | 0.4dB/Km |
| COEFICIENTE DE PMD | <i>M</i> | 20 cables |
| | <i>Q</i> | 0.01% |
| | Máximo PMD_Q | 0.20ps/km ^{1/2} |

Tabla 1.12 Parámetros de la ITU-T G.655.D

| ATRIBUTO DE LA FIBRA | DETALLE | G.655.D |
|----------------------|---------|---------|
|----------------------|---------|---------|

| | | |
|---|---|---------------------------|
| DIÁMETRO DE CAMPO MODAL | <i>Longitud de onda</i> | 1550nm |
| | <i>Rango de valores nominales</i> | 8μm – 11μm |
| | <i>Tolerancia</i> | ±0.6μm |
| DIÁMETRO DE REVESTIMIENTO | <i>Nominal</i> | 125μm |
| | <i>Tolerancia</i> | ±1μm |
| COEFICIENTE DE CD ps/(nmxKm) | <i>D_{min}(λ): 1460-1550 nm</i> | 5.42/90 * (λ -1460)+0.64 |
| | <i>D_{min}(λ): 1550-1625 nm</i> | 3.30/75*(λ -1550)+6.06 |
| | <i>D_{min}(λ): 1460-1550 nm</i> | 4.65/90*(λ -1460)+4.66 |
| | <i>D_{min}(λ): 1550-1625 nm</i> | 4.12/75*(λ -1550) + 9.31 |
| COEFICIENTES DE ATENUACIÓN EN ENLACES CONCATENADOS | <i>1530 nm – 1565 nm</i> | 0.275dB/Km |
| | <i>1565 nm – 1625 nm</i> | 0.35dB/Km |
| ATRIBUTO DEL CABLE | DETALLE | G.655.D |
| COEFICIENTE DE ATENUACIÓN | <i>Máximo a 1550nm</i> | 0.35dB/Km |
| | <i>Máximo a 1625nm</i> | 0.4dB/Km |
| COEFICIENTE DE PMD | <i>M</i> | 20 cables |
| | <i>Q</i> | 0.01% |
| | <i>Máximo PMD_Q</i> | 0.20ps/km ^{1/2} |

Tabla 1.13 Parámetros de la ITU-T G.655.E

Cuando estas fibras se emplean para transmitir en la región de 1550nm la dispersión cromática se puede calcular en términos del coeficiente de dispersión cromático típico y del coeficiente de la pendiente de la dispersión a 1550nm como se muestra en la fórmula (1.14). En la Figura 1.26 se encuentran sintetizados los diferentes tipos de fibra óptica monomodo y algunos nombres comerciales dados por los fabricantes tales como Corning, Lucent, Pirelli, Sumitomo y Alcatel.

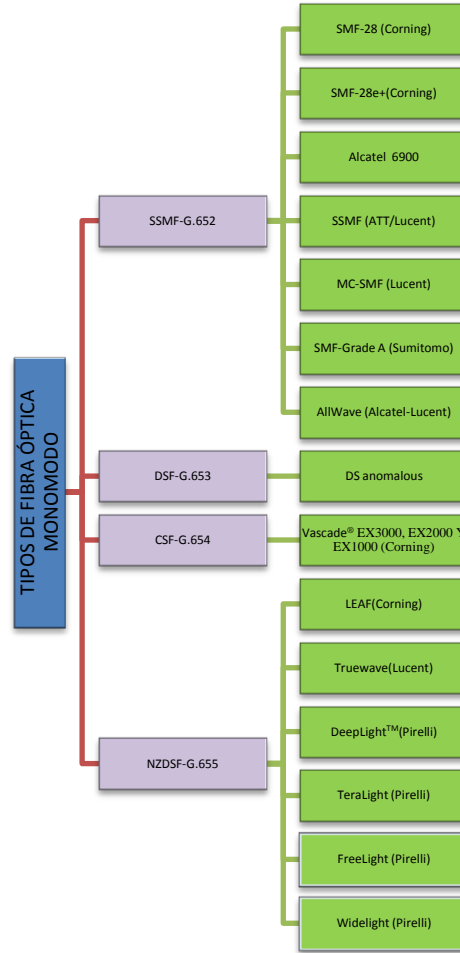


Figura 1.26 Fibras ópticas monomodo y sus nombres comerciales

En conclusión, el presente capítulo se constituye como base teórica para el diseño de la red WDM y para caracterizar las fibras ópticas con las que se va a trabajar, por lo tanto, a manera de resumen, se tiene que:

- ✓ DWDM mejora las limitaciones presentadas con CWDM y brinda un espaciamiento entre longitudes de onda menor permitiendo aumentar su capacidad de transporte, además por ser flexible a la hora de expandir y desarrollar redes de mayor velocidad y eficiencia se convierte en la tecnología más usada actualmente en los sistemas y redes WDM.
- ✓ En redes DWDM de 10Gb/s el espaciamiento típico de canales es de 100GHz.
- ✓ Las fibras ópticas monomodo por su modo de propagación permiten alcanzar grandes distancias haciéndolas adecuadas para su empleo en sistemas o redes DWDM.

- ✓ Las redes WDM con velocidades a 10Gb/s emplean la modulación externa (como el modulador con Interferómetro de Mach Zenher), puesto que la modulación directa genera frecuencias chirp y limita la velocidad del láser.
- ✓ El formato de modulación NRZ-OOK presenta fácil implementación, reducido costo, baja complejidad y baja tolerancia a las degradaciones ópticas; convirtiéndolo en el formato adecuado para el presente trabajo. De este modo se garantiza que es la fibra óptica la que está influyendo en el desempeño de la red WDM.
- ✓ La transmisión a 10Gb/s es altamente afectada por la dispersión del enlace, lo cual se refleja directamente la longitud total del sistema, por ello si se desea alcanzar una mayor distancia es necesario realizar compensación de la dispersión.
- ✓ Las DCF son las de mayor uso comercial para compensar la CD y emplea técnicas tales como: pre-compensación, pos-compensación o compensación simétrica
- ✓ El índice de dispersión negativo de la DCF es uno de los parámetros más importantes ya que permite contrarrestar la dispersión total acumulada en el enlace por la fibra, el valor comercial más usual es de -100ps/nm/Km.
- ✓ Se emplean amplificadores EDFA para contrarrestar los efectos de pérdida de potencia generados por la introducción de DCFs en la red.
- ✓ Las potencias de transmisión altas en los sistemas de 10Gb/s excitan los efectos no lineales como son la XPM, FWM y la SPM convirtiéndose así en un factor determinante en la eficiencia de los sistemas de comunicaciones ópticas.
- ✓ En la fibra óptica la atenuación, CD y PMD son parámetros intrínsecos, por esta razón no se pueden variar.
- ✓ De acuerdo a las especificaciones técnicas descritas por los estándares G.652.D y G.655 estos tipos de fibra óptica son las óptimas para redes DWDM.

Una vez estudiada la teoría acerca de las redes DWDM, el monitoreo de desempeño óptico y las fibras ópticas monomodo, en el siguiente capítulo se procede a definir los principales parámetros de diseño, parámetros de monitoreo y las fibras ópticas para la red DWDM.

2 METODOLOGÍA Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Partiendo de la base teórica presentada en el capítulo anterior, a continuación se presenta la definición de la metodología de simulación, la cual permitirá generar y evaluar mediante un escenario de simulación y diferentes casos de estudio, el desempeño de una red WDM con diferentes tipos de fibras ópticas, empleando como herramienta de simulación OptSim® de All Optics Designs.

2.1 Herramienta de simulación

En la actualidad existe gran variedad de software para la simulación de redes ópticas, sin embargo OptSim® de All Optics Designs permite el diseño y evaluación de redes ópticas brindando a sus usuarios una interface gráfica de medición flexible que actúa como un conjunto de instrumentos virtuales de laboratorio. Debido a la robustez de este software en los últimos años se ha empleado en distintos trabajos de grado y en la electiva “Sistemas de comunicación por fibra óptica” del Departamento de Telecomunicaciones, además la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca provee a los estudiantes su licencia para la elaboración de sus trabajos de grado. Por tal motivo se utilizara para el desarrollo del presente trabajo de grado [11].

La herramienta de simulación define dos modos de simulación dependiendo del tipo de resultados que se deseen:

- ✓ Modo Bloque: es una técnica de simulación tradicional, en la cual la secuencia de entrada se evalúa por bloque hasta el punto de salida.
- ✓ Modo Muestra: se implementa muestra a muestra, de tal forma que la señal de datos pasa entre componentes y representa una muestra única en cada instante de tiempo. Este modo provee dos tipos de simulación:
 - Técnica de Propagación Espectral (SPT, *Spectral Propagation Technique*): las señales se propagan en la red como espectro de potencia, teniendo en cuenta las pérdidas de los componentes y el ruido. Además es posible evaluar en cualquier punto de la red, los espectros, niveles de potencia y la relación señal a ruido óptica (OSNR).
 - Técnica de Ancho de Banda Variable (VBS, *Variable Bandwidth Simulation*): las señales se propagan como muestras en el dominio del tiempo sobre un ancho de banda variable. Si se simula en la opción “VBS Full” se tendrán en cuenta todos los efectos de las fibras tanto lineales como no lineales por otro lado al simular con la opción “VBS Linear Fiber” se considerará únicamente los efectos lineales y si se requiere simular el efecto de la atenuación se escoge la opción “VBS Loss Only Fiber”.

Con lo mencionado anteriormente para el presente trabajo se utiliza el modo muestra de simulación, con la técnica VBS, ya que se adapta a plenitud con los requerimientos de los escenarios de simulación para posteriormente obtener los resultados de los diferentes parámetros a estudiar de manera conjunta.

2.2 Metodología de simulación

Para determinar el efecto de la fibra óptica sobre el desempeño de una red DWDM a 10Gb/s se adapta de [39][40] una metodología de simulación, la cual permite por medio de un conjunto de etapas cumplir con los objetivos propuestos del presente trabajo de grado. Las etapas definidas para desarrollar metodológicamente la simulación y su respectivo análisis son:

- ✓ Generación de un escenario de simulación y casos de estudio.
- ✓ Identificación de los parámetros técnicos del escenario de simulación.
- ✓ Ejecución de la simulación.
- ✓ Análisis de los resultados de simulación.

2.2.1 Generación del escenario de simulación

Para determinar el efecto de la fibra óptica sobre el desempeño de una red DWDM a 10Gb/s, se genera un escenario base de simulación con modulación NRZ- OOK, a partir de él se desglosan varios casos de estudio. En cada caso de estudio se varia el tipo de fibra y se observa cómo afectan el desempeño óptico de la red los efectos lineales (atenuación, CD y PMD), ver Figura 2.1.

En cuanto a la selección de las fibras ópticas para cada caso de estudio se tiene en cuenta lo desarrollado en la sección 1.3.2, dando como resultado el empleo de cuatro fibras:

- ✓ Dos SMF: SMF-28 y SMF-28e+
- ✓ Dos NZ-DSF: LEAF y DeepLight™

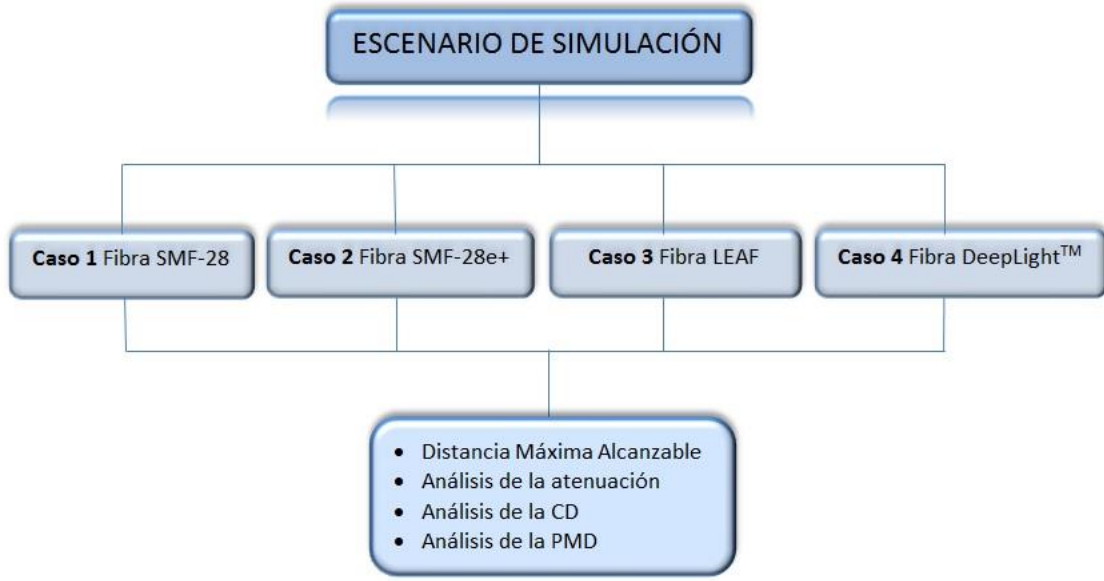


Figura 2.1 Escenario de simulación y casos de estudio

2.2.1.1 Escenario de simulación

El escenario de simulación DWDM presenta una topología punto a punto y está compuesto por: un transmisor, el medio de transmisión y el receptor. La Figura 2.2 muestra el esquema básico de referencia para la simulación, en él se puede apreciar unos parámetros fijos y variables, definidos como resultado del análisis teórico realizado en el capítulo 1.

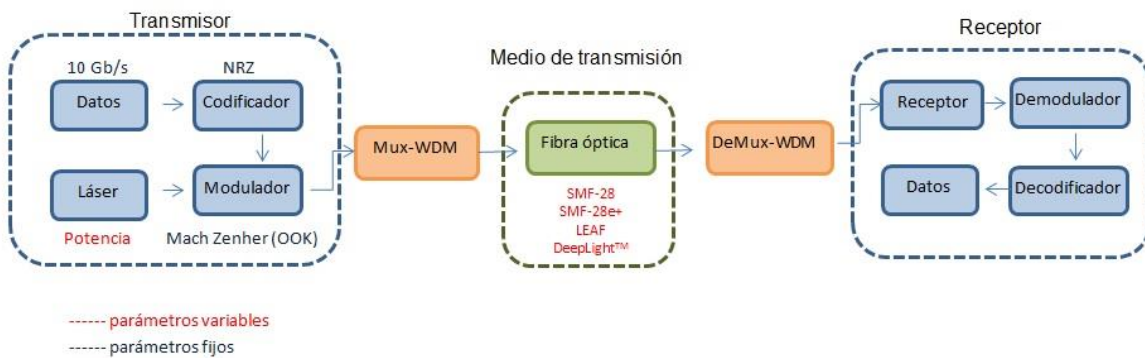


Figura 2.2 Escenario de simulación

- Parámetros fijos: velocidad de transmisión de 10Gb/s, codificación NRZ, modulación OOK y número de canales.
- Parámetros variables: Medio de transmisión (variación de fibras, SMF-28 (Corning), SMF-28e+ (Corning), LEAF (Corning), DeepLight™ (Pirelli)), potencia de transmisión.

2.2.2 Identificación de los Parámetros Técnicos del Escenario de Simulación

La identificación de los parámetros técnicos del escenario de simulación de la red DWDM se realiza con base a lo desarrollado en la sección 1.1, de acuerdo a ello estos son:

- ✓ Tecnología DWDM unidireccional.
- ✓ Topología punto a punto para simplificar el esquema de la red.
- ✓ Se requiere un formato de modulación con baja tolerancia a las degradaciones ópticas para garantizar que es que es la fibra óptica la que está influyendo en el desempeño de la red WDM, por lo tanto se empleará el formato de modulación NRZ-OOK.
- ✓ Las fibras ópticas empleadas son SMF28, SMF28_e, LEAF y DeepLight™ en la Tabla 2.1 y Tabla 2.2 se realiza una descripción de sus especificaciones ópticas más significativas.

| ATRIBUTO (valores para $\lambda=1550\text{nm}$) | TIPO DE FIBRA | |
|--|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | SMF-28 | SMF-28e+ |
| Diámetro del campo modal | $10.4\mu\text{m} \pm 0.5\mu\text{m}$ | $10.4\mu\text{m} \pm 0.5\mu\text{m}$ |
| Diámetro del revestimiento | $242\mu\text{m} \pm 5\mu\text{m}$ | $242\mu\text{m} \pm 5\mu\text{m}$ |
| Atenuación (dB/Km) | ≤ 0.18 | $0.19 - 0.20$ |
| Dispersión (ps/(nm x km)) | ≤ 18.0 | ≤ 18.0 |
| PMD(ps/km ^{1/2}) Valor de diseño para enlace | ≤ 0.04 | ≤ 0.06 |
| PMD(ps/km ^{1/2}) Máximo de fibra individual | ≤ 0.1 | ≤ 0.1 |

Tabla 2.1 Especificaciones ópticas de las fibras SMF-28 y SMF-28e+

| ATRIBUTO (valores para $\lambda=1550\text{nm}$) | TIPO DE FIBRA | |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | LEAF | DeepLight™ |
| Diámetro del campo modal | $9.6\mu\text{m} \pm 0.4\mu\text{m}$ | $9.3\mu\text{m} \pm 0.3\mu\text{m}$ |
| Diámetro del revestimiento | $242\mu\text{m} \pm 5\mu\text{m}$ | $245\mu\text{m} \pm 5\mu\text{m}$ |
| Atenuación (dB/Km) | ≤ 0.19 | ≤ 0.23 |
| Dispersión (ps/(nm x km)) | $2.0 - 5.5$ | $-3.4 - -1.0$ |
| PMD(ps/km ^{1/2}) Valor de diseño para enlace | ≤ 0.04 | NA |
| PMD(ps/km ^{1/2}) Máximo de fibra individual | ≤ 0.1 | ≤ 0.1 |

Tabla 2.2 Especificaciones ópticas de las fibras LEAF y DeepLight™

- ✓ Velocidad de transmisión a 10Gb/s.
- ✓ En cuanto a los valores para la potencia de transmisión y sensibilidad del receptor se tiene en cuenta el equipo OSN3500 con tarjeta STM-64 cuyo fabricante es HUAWEI, puesto que estos son los de mayor uso entre los operadores colombianos [7][11], en la Tabla 2.3 se muestran dichas especificaciones.

| PARÁMETRO | DESCRIPCIÓN | | | |
|-----------------|-------------|------------|------|-----------|
| Velocidad de Tx | SF64 | 10.709Gb/s | SL64 | 9.953Gb/s |

| Capacidad de Procesamiento | 1xSTM-64 servicio estándar o concatenado | | | | |
|---|--|---------|----------|----------|---------|
| Patrón de código de Línea | NRZ | | | | |
| Tipo de Módulo Óptico | I-64.1 | S-64.2b | L- 64.2b | Le- 64.2 | Ls-64.2 |
| Longitud de Onda [nm] | 1310 | 1550 | 1550 | 1550 | 1550 |
| Distancia de Tx [Km] | 0-2 | 2-40 | 30-70 | 30-70 | 80 |
| Potencia de Operación [dBm] | -6 a 1 | -1 a 2 | 10 a 14 | 1 a 4 | 3 a 5 |
| Sensibilidad en Rx [dBm] | -11 | -14 | -14 | -19.5 | -21 |
| Máxima Tolerancia de Dispersión [ps/nm] | 6.6 | 800 | 1600 | 1200 | 1600 |

Tabla 2.3 Parámetros técnicos de las tarjetas STM-64 Equipo OSN3500 [7]

- ✓ Tal como se mencionó en la sección 1.1. el espaciamiento entre canales es de 100GHz, este alto espaciamiento reduce al máximo los efectos no lineales como la XPM sobre la red [7], favoreciendo el estudio de los efectos lineales.
- ✓ La asignación de frecuencias tendrá en cuenta la recomendación G.694.1 [4], de este modo para una separación de 100GHz las frecuencias en THz se definen así: $193,1 + n \times 0,1$, donde n es un entero positivo o negativo incluido el cero (0).
- ✓ El número de canales es cuatro, cuyas frecuencias y longitud de onda asignadas acorde a la recomendación ITU-T G.494.1 respectivamente son:
 - Canal 1: 195.2THz - 1535.82nm
 - Canal 2: 195.3THz - 1535.04nm
 - Canal 3: 195.4THz - 1534.25nm
 - Canal 4: 195.5THz - 1533.47nm
- ✓ Como la red opera a una velocidad de 10Gb/s es conveniente compensar la CD, para ello se empleara una DCF con dispersión -100ps/nm/Km.
- ✓ Al introducir la DCF se presentan perdidas de potencia las cuales se contrarrestaran introduciendo un amplificador EDFA con una potencia de operación pequeña para no excitar los efectos no lineales.

Los parámetros técnicos más importantes del escenario de simulación se pueden apreciar en forma resumida en la Tabla 2.4.

| PARÁMETRO | VALORES |
|----------------------------------|--------------------------------------|
| CARACTERÍSTICAS GENERALES | |
| Tecnología de Red | DWDM unidireccional |
| Velocidad del Sistema | 10Gb/s |
| Banda | Banda C (1530 - 1565 nm) |
| Ventana | Tercera ventana |
| Estándares Empleados | G.697- G.652- G.655 |
| Tipos de Fibra | SMF-28 - SMF-28e+ - LEAF- DeepLight™ |

| | |
|--|---|
| Número de canales implementados | 4 canales |
| Espaciamiento entre canales | 100GHz (0.8 nm) |
| CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR | |
| Formato de modulación | NRZ-OOK |
| Tipo de modulación | Indirecta con Mach-Zenhder |
| Potencia de Tx del Láser | 3 dBm – 5dBm |
| Filtros ópticos en el Tx | Filtros Bessel |
| Frecuencias centrales nominales | Según recomendación ITU-T G.694.1 |
| CARACTERÍSTICAS DEL RECEPTOR | |
| Sensibilidad del receptor | -21dBm |
| BER (ITU G.Sup39) | 10^{-12} |
| Factor Q (ITU G.Sup39) | 8.5695dB |
| Filtros de Recepción ópticos | Filtro eléctrico tipo Bessel y filtro óptico Cos Rizado |
| CARACTERÍSTICAS DEL DISPOSITIVO DE AMPLIFICACION (EDFA) | |
| Potencia de operación | 0dBm |
| CARACTERÍSTICAS DEL DISPOSITIVO DE COMPENSACION (DCF) | |
| Coefficiente de dispersión negativo | -100ps/(nm x Km) |
| Atenuación | 0.55dB/Km |

Tabla 2.4 Características y parámetros del escenario de simulación

2.2.3 Ejecución de la simulación

Los diferentes casos de estudio descritos en la sección 2.2.1 se implementan en la herramienta OptSim® de All Optics Designs, para cada simulación se fija un tiempo de 70ns y 128 muestras, esto con el fin de obtener unos resultados adecuados y evitar tiempos de simulación muy extensos. Posteriormente una vez finalizada la simulación, la herramienta muestra las gráficas correspondientes al diagrama del ojo y arroja los valores del factor Q, BER, potencia de recepción y OSNR.

El algoritmo que contiene los pasos para una simulación correcta se encuentra en la Figura 2.7, los resultados y el respectivo análisis de estos se desarrollan en los capítulos tres y cuatro.

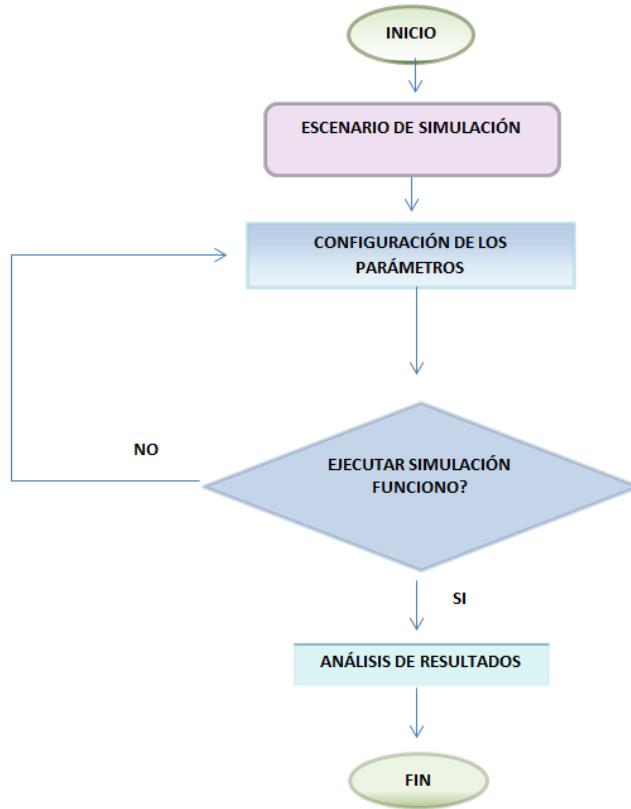


Figura 2.3 Diagrama de flujo de la simulación

2.2.4 Análisis de los resultados de simulación

Para los diferentes casos de estudio se va a analizar: la máxima distancia alcanzada por el enlace, efectos lineales y los parámetros de desempeño, tales como: factor Q, BER, OSNR y diagrama del ojo. Se debe tener en cuenta el cumplimiento de los parámetros objetivos contemplados por la recomendación ITU G.Sup39.

En el presente capítulo, se determinó adaptar una metodología de simulación para que sea acorde al proyecto de investigación y de este modo se garantice no solo que los resultados sean adecuados para cada caso de simulación, sino que también contribuyan al cumplimiento de los objetivos planteados.

Por otra parte se realizó una descripción de la herramienta de simulación OptSim® de All Optics Designs, de ello se puede inferir que es robusta, flexible y con una interfaz gráfica amigable. Se decide trabajar con el modo muestra de simulación ya que se pueden analizar efectos lineales, no lineales y la atenuación introducida por la fibra de manera independiente.

3 ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA FIBRA ÓPTICA SOBRE EL DESEMPEÑO DE UNA RED WDM A 10Gb/s

El presente capítulo muestra el análisis de los resultados obtenidos enfocados a la evaluación del desempeño de la red DWDM, frente a las degradaciones introducidas por la fibra óptica tales como: atenuación, PMD y CD. Se tiene como parámetro objetivo de diseño para la red una BER de 10^{-12} y un factor Q de 7.04, valores recomendados por la ITU-T.

3.1 Escenario de simulación

En el capítulo 2 se estableció que el escenario de simulación se implementa con la herramienta OptSim y corresponde a una red DWDM, con cuatro longitudes de onda, velocidad de transmisión de 10Gb/s y formato de modulación NRZ-OOK (ver Figura 3.1). Para cada caso de estudio el transmisor y receptor serán los mismos, la variación estará dada por el tipo de fibra empleada como medio de transmisión.

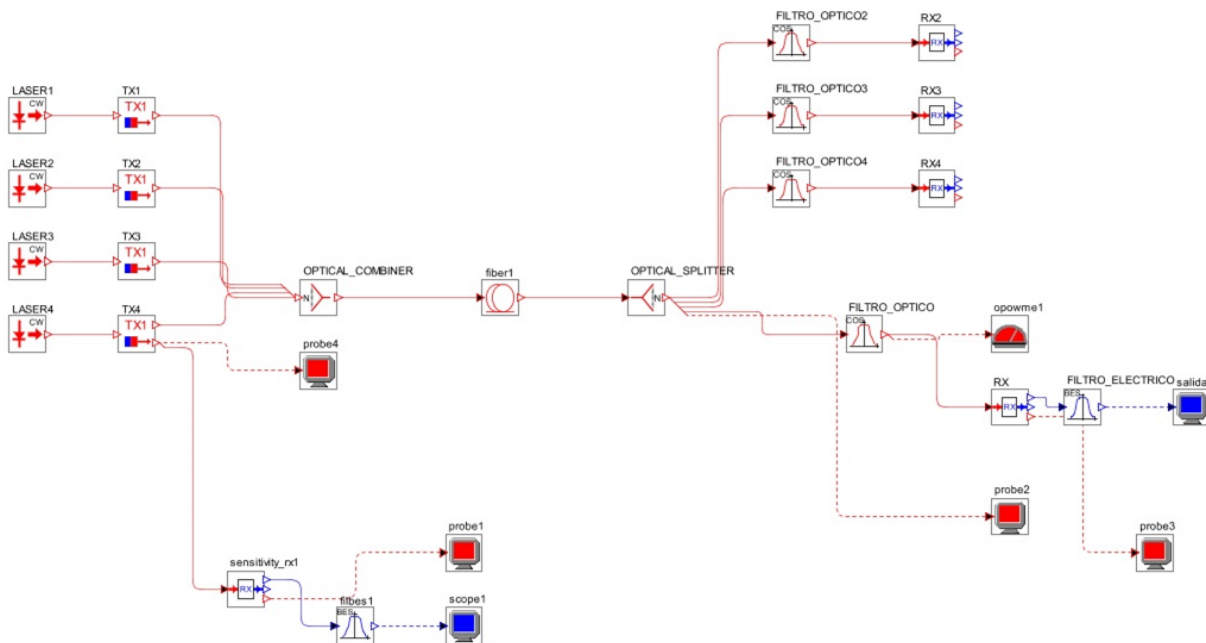


Figura 3.1 Modelo simplificado de red DWDM con formato de modulación NRZ-OOK

Cada componente de la red DWDM se ajusta de acuerdo a los parámetros técnicos descritos en la Tabla 2.4. Como se mencionó en el capítulo dos se escogió el formato de modulación NRZ-OOK por ser el menos robusto y eficiente para transmitir a 10Gb/s, garantizando que el estudio se centre en el impacto de la fibra óptica sobre la red; su implementación requiere en el transmisor:

- ✓ Un láser de onda continua lorentziano.

- ✓ Un modulador externo Mach-Zenher (MZM, *Mach-Zenher Modulator*).
- ✓ Un generador de datos.
- ✓ Un driver NRZ rectangular.

Mientras que en el receptor se compone de:

- ✓ Un filtro óptico coseno.
- ✓ Un receptor tipo PIN.
- ✓ Un filtro eléctrico Bessel.

Posteriormente se procede a comprobar si la señal transmitida se modulo correctamente, para ello se realiza una recepción Back-to-Back, la cual consiste en conectar directamente el transmisor y el receptor. La Figura 3.2 a y b, muestran el diagrama del ojo y el espectro óptico alrededor de los 195.5THz, de la señal modulada en NRZ-OOK, que ratifican la correcta modulación al no presentar ninguna degradación.

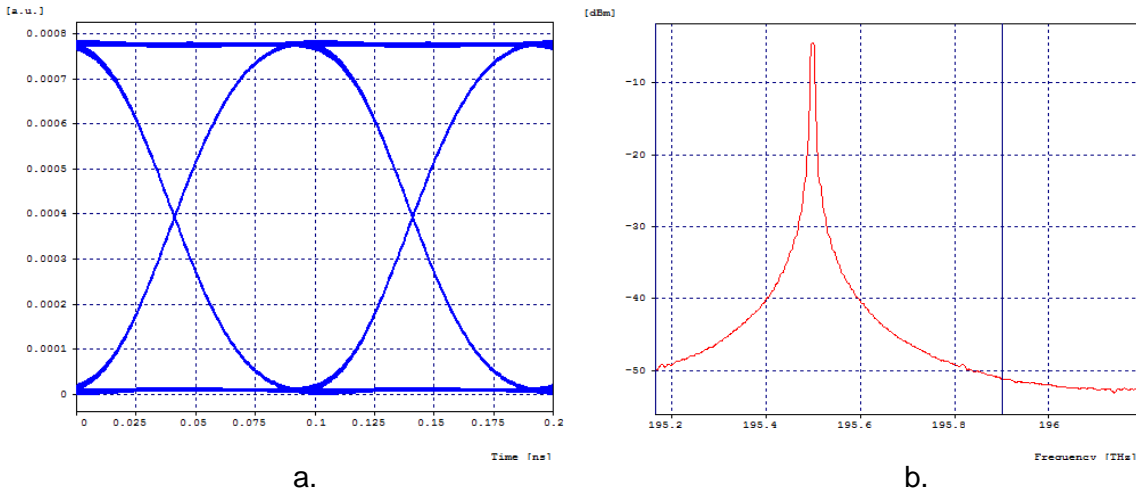


Figura 3.2 Diagrama del ojo (a) y Espectro óptico (b) de la señal en el receptor back to back

Garantizada la correcta modulación de la señal, se procede a introducir la fibra óptica SMF-28 para el caso 1, SMF-28e+ para el caso 2, LEAF para el caso 3 y la DeepLight™ para el caso 4.

3.2 Caso de estudio 1, fibra óptica SMF-28

Al escenario de simulación se introduce la fibra óptica SMF-28 configurada con los parámetros preestablecidos por su fabricante CORNING dados en la Tabla 2.1; de este modo se procede a realizar los respectivos análisis.

3.2.1 Distancia máxima alcanzable

Es muy importante realizar el estudio de la distancia máxima alcanzable en la red, puesto que este valor es el punto de referencia para los posteriores análisis. Para obtenerlo, la

red se simula en el modo VBS Full lo cual implica que se tienen en cuenta todas las degradaciones ópticas tales como: atenuación, ruido, PMD, CD y efectos no lineales.

A continuación la potencia de transmisión se varía entre -5dBm a 30dBm y posteriormente las distancias que cumplan con el parámetro objetivo de la ITU-T son registradas.

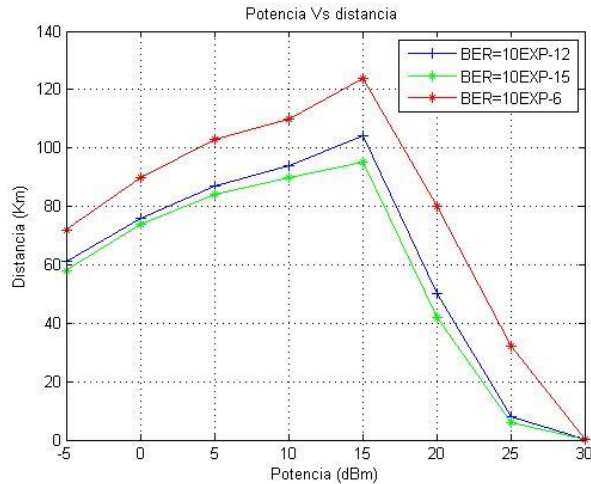


Figura 3.3 Distancia máxima alcanzable para la red con la fibra óptica SMF-28

Se observa de la Figura 3.3 que la máxima distancia se obtiene al operar con una potencia de 15dBm, una red con un calidad aceptable de transmisión ($BER=10^{-6}$) lograría una distancia de 124Km, para un operador de telecomunicaciones que maneja unos factores de calidad más altos ($BER=10^{-15}$) alcanzaría una distancia de 95Km, sin embargo acorde a lo recomendado por la ITU-T ($BER=10^{-12}$) la red lograría un enlace de 104Km.

El cambio abrupto que se presenta a partir de los 15dBm es causado por los efectos no lineales que suelen introducirse en estos sistemas ópticos al trabajar con potencias altas [7][11], generando canales no deseados en la red lo cual se evidencia en la Figura 3.4. Por tal razón los láser operan a potencias bajas, para reducir dichos efectos y birrefringencias; es así que a pesar que la distancia máxima se obtiene con 15dBm se decidió trabajar con 5dBm evitando lo mencionado anteriormente y también para que el diseño de la red sea lo más cercano a los valores de potencia de los láser comerciales tal como lo es el del dispositivo Huawei OSN 3500 cuya potencia máxima de transmisión es de 5dBm.

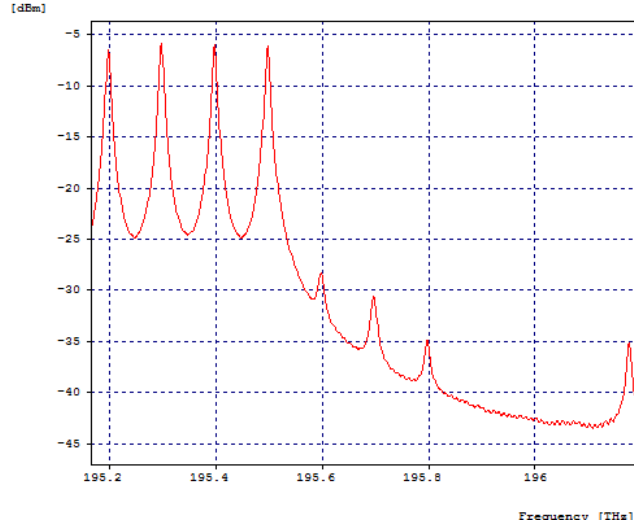


Figura 3.4 Espectro en el receptor con una potencia de transmisión de 15dBm

Desde la Figura 3.5 hasta la Figura 3.9 se muestran los parámetros de monitoreo óptico para una potencia de transmisión de 5dBm con la que se alcanza una distancia máxima de 87Km.

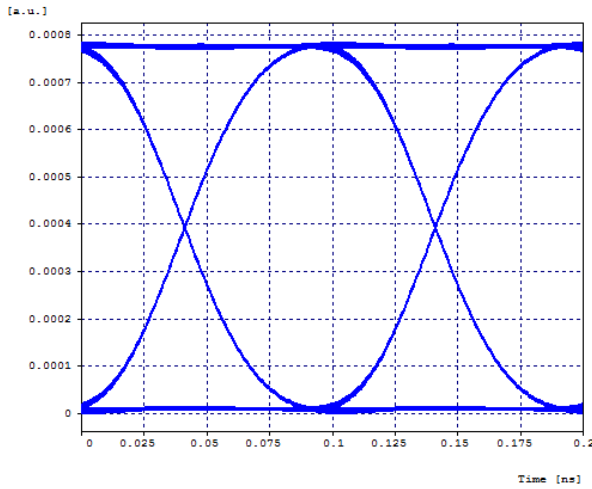


Figura 3.5 Diagrama del ojo sin degradaciones ópticas con la fibra óptica SMF-28

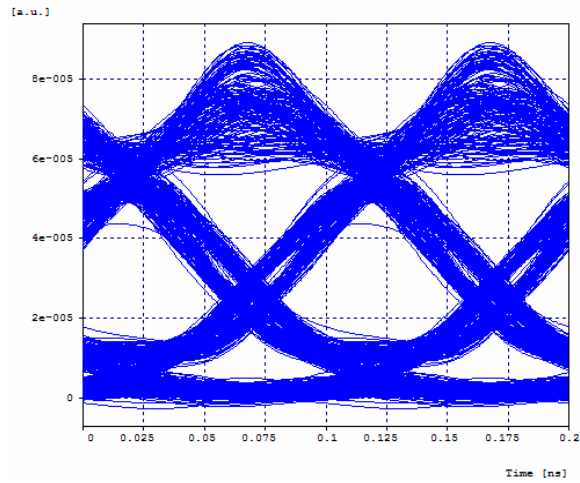


Figura 3.6 Diagrama del ojo tras un tramo de 87Km de fibra óptica SMF-28

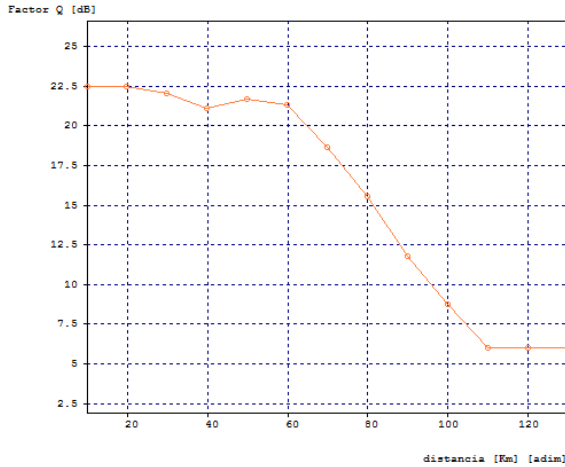


Figura 3.7 Factor Q vs distancia de transmisión para la red con fibra óptica SMF-28

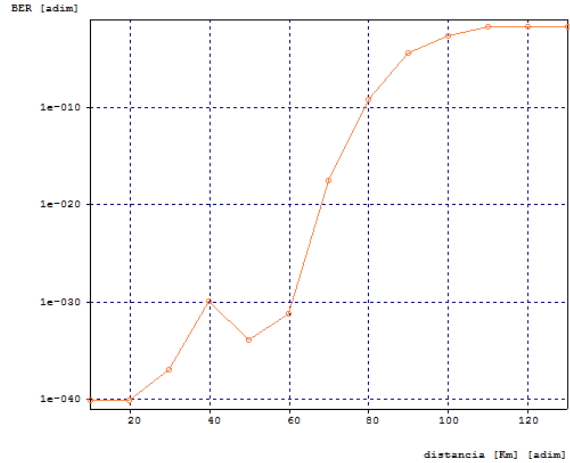


Figura 3.8 BER vs distancia de transmisión para la red con fibra óptica SMF-28

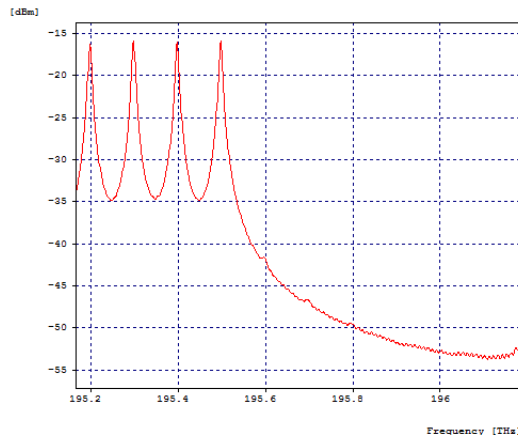


Figura 3.9 Espectro óptico en recepción a una distancia máxima de 87Km con un potencia promedio de recepción por canal del orden de los -16dBm para la fibra óptica SMF-28

3.2.2 Análisis de la atenuación

La atenuación es un parámetro intrínseco de la fibra, que está directamente relacionada con la distancia del enlace, la fibra óptica SMF-28 por si sola introduce una atenuación menor o igual a $0,18\text{dB/Km}$. por lo tanto al variar la distancia desde los 40Km hasta 87Km se genera un rango de atenuación de 7.2dB hasta 15.66dB .

Para el análisis de la atenuación se comparan las distancias máximas obtenidas en presencia de todas las degradaciones ópticas (ver Tabla 3.1) con las distancias máximas obtenidas teniendo en cuenta solo las pérdidas de la fibra (ver Tabla 3.2), para las potencias de -5dBm , 5dBm , 15dBm , 30dBm , puesto que estas corresponden respectivamente a: potencia de transmisión mínima de simulación, potencia de transmisión óptima, potencia de transmisión con la que se obtiene la máxima distancia y la potencia con que se obtuvo los peores parámetros de calidad.

| POTENCIA (dBm) | DISTANCIA (Km) | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{in} (dB) | OSNR _{out} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|----------------|----------------|---------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| -5 | 61 | 16.9074 | 6.153×10^{-12} | 30.9893 | 18.6758 | -21.3792 |
| 5 | 87 | 16.6581 | 5.9929×10^{-12} | 30.9893 | 18.5794 | -16.2173 |
| 15 | 104 | 16.6785 | 4.6408×10^{-12} | 30.9893 | 18.7579 | -9.2056 |
| 30 | 0.4 | 16.8101 | 7.3104×10^{-12} | 30.9893 | 18.4462 | 25.0521 |

Tabla 3.1 Máximas distancias obtenidas en presencia de todas las degradaciones ópticas de la fibra óptica SMF-28

| POTENCIA (dBm) | DISTANCIA (Km) | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{in} (dB) | OSNR _{out} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|----------------|----------------|---------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| -5 | 66 | 17.1226 | 1.0094×10^{-12} | 30.9893 | 18.6463 | -22.0290 |
| 5 | 122 | 16.936 | 2.5447×10^{-12} | 30.9893 | 18.6413 | -22.1090 |
| 15 | 178 | 16.8049 | 6.204×10^{-12} | 30.9893 | 18.6414 | -22.1890 |
| 30 | 261 | 16.9241 | 3.1896×10^{-12} | 30.9893 | 18.6413 | -22.1290 |

Tabla 3.2 Máximas distancias obtenidas en presencia solo de la atenuación de la fibra óptica SMF-28

Si solamente la atenuación estuviese presente en la red se puede decir que la potencia es directamente proporcional a la distancia del enlace, sin embargo cuando se introducen las demás degradaciones ópticas esta linealidad se pierde, lo cual se refleja claramente en la Tabla 3.1 y la Tabla 3.2 en donde al transmitir con 30dBm se pasa de 0.4Km con todas las degradaciones a 261Km de distancia cuando solo está presente la atenuación de la fibra (ver Figura 3.10).

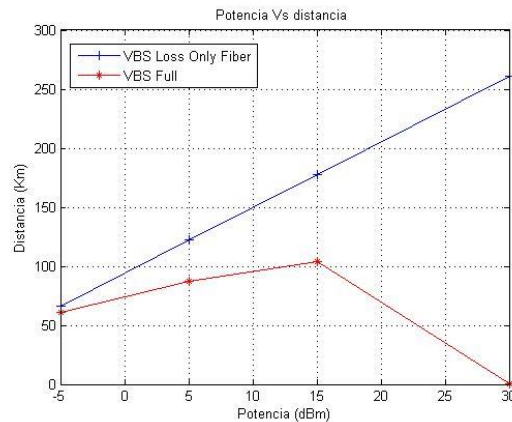


Figura 3.10 Potencia de transmisión vs distancia para la red con fibra óptica SMF-28

Ahora para observar más de cerca la atenuación se deja fija la distancia máxima (87km) con una potencia de 5dBm y se observa como la red se comporta en presencia y ausencia de la atenuación, la Figura 3.11, Figura 3.12, Figura 3.13 y la Tabla 3.3 muestran dichos resultados.

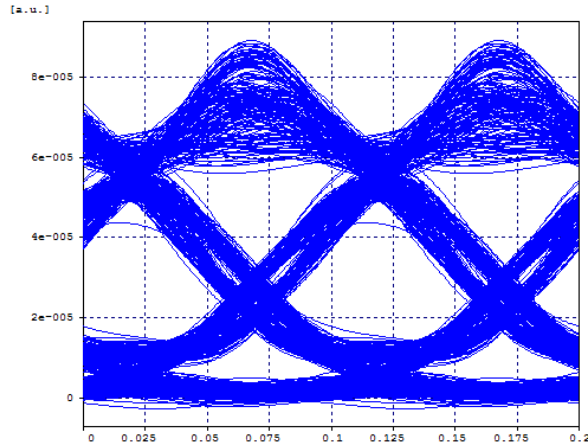


Figura 3.11 Diagrama del ojo para 87 Km de SMF-28 en presencia de todas las degradaciones ópticas

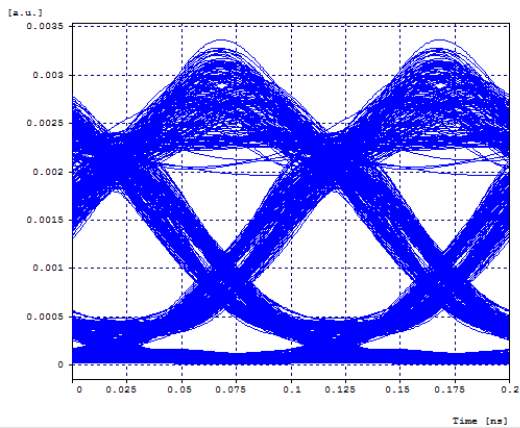


Figura 3.12 Diagrama del ojo para 87Km sin atenuación de la fibra SMF28

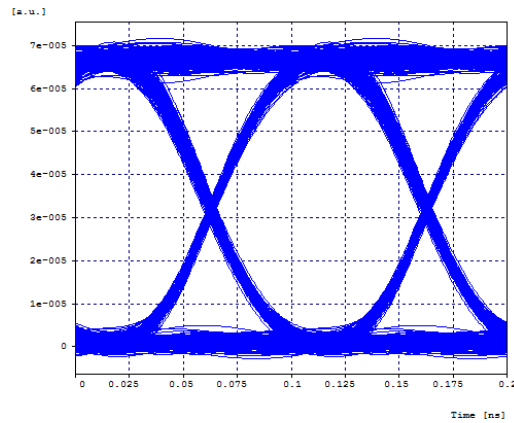


Figura 3.13 Diagrama del ojo para 87Km solo con atenuación de la fibra SMF28

| SIMULACIÓN | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{OUT} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|-----------------------------|---------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Con todas las degradaciones | 16.6581 | 5.9929×10^{-12} | 18.5794 | -16.2173 |
| Sin Atenuación | 17.8704 | 7.2867×10^{-12} | 18.6222 | -0.5370 |
| Solo con Atenuación | 29.0188 | 1×10^{-40} | 18.6413 | -15.8090 |

Tabla 3.3 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de la atenuación de la fibra SMF28

De la Tabla 3.3 se observa que la ausencia de atenuación en la red mejora levemente la BER y el factor Q, la potencia en recepción se ve afectada notablemente cuando se ejecuta la red con y sin atenuación, pasando de -16.2173dBm con todas las degradaciones a -0.5370dBm solo con atenuación, lo que quiere decir que la atenuación limita la potencia que se recibe en el receptor.

De lo anterior se puede decir que la atenuación introducida por la fibra SMF-28 en un enlace de 87Km bajo una potencia de 5dBm no se constituye como una degradación que afecte significativamente el desempeño de la red, ya que al simular solo con atenuación los valores de BER y factor Q son muy altos y al simular sin atenuación estos valores caen considerablemente, por lo tanto la atenuación si afecta la red, pero existen otros factores que son los que realmente limitan los parámetros de desempeño óptico, estos factores serán analizados posteriormente.

3.2.3 Análisis de la dispersión cromática

Para determinar el efecto de la dispersión cromática se configura la red con una potencia de 5dBm y una distancia de 87Km, que corresponde a la máxima distancia alcanzada por la red en presencia de todas las degradaciones ópticas.

Posteriormente se realizan los siguientes análisis:

- ✓ Se determina el desempeño de la red sin CD y solo con CD.
- ✓ Se calcula la CD acumulada en la red.
- ✓ Se observa que produce la compensación de la CD en la red.

3.2.3.1 Desempeño de la red sin CD y solo con CD

Al probar el comportamiento de la red en presencia o ausencia de CD en la fibra óptica se podrá determinar cuál es su impacto en el desempeño de la red. La Figura 3.14, Figura 3.15, Figura 3.16 y la Tabla 3.4 muestran el diagrama de ojo, BER, factor Q y jitter en: presencia de todas las degradaciones ópticas, ausencia de la CD y presencia solo de la CD respectivamente.

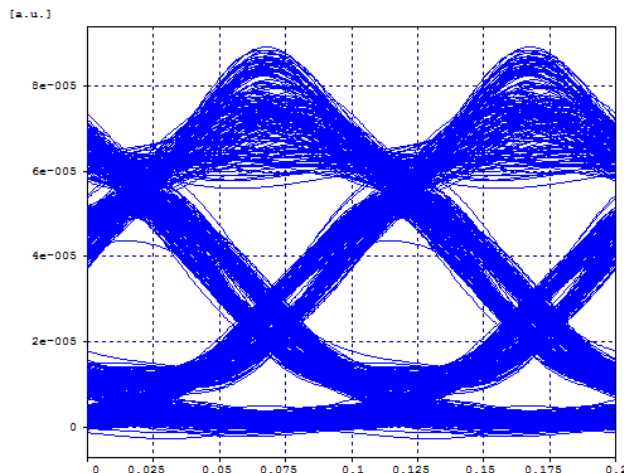


Figura 3.14 Diagrama del ojo para 87 Km de SMF-28 en presencia de todas las degradaciones ópticas

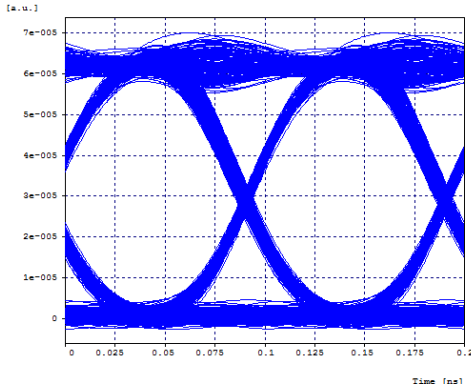


Figura 3.15 Diagrama del ojo para 87Km sin CD de la fibra SMF-28

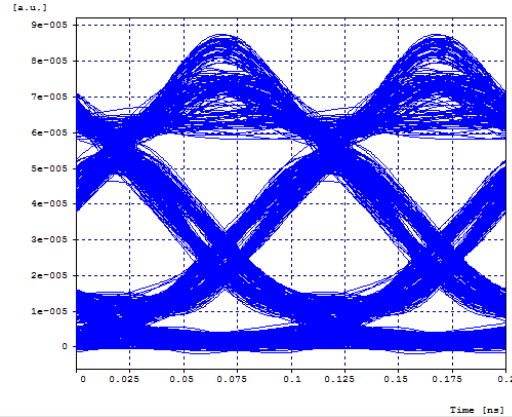


Figura 3.16 Diagrama del ojo para 87Km solo con CD de la fibra SMF-28

| SIMULACIÓN | FACTOR Q (dB) | BER | Jitter (ns) |
|-----------------------------|---------------|--------------------------|-------------|
| Con todas las degradaciones | 16.6581 | 5.9929×10^{-12} | 0.0277601 |
| Sin CD | 27.7191 | 1×10^{-40} | 0.0199466 |
| Solo Con CD | 16.2581 | 7.5164×10^{-11} | 0.0275024 |

Tabla 3.4 Parámetros de monitoreo para la red en presencia y ausencia de CD de la fibra SMF-28

De los resultados obtenidos se puede concluir que el desempeño de la red se encuentra altamente afectado por la presencia de la CD. Cuando la red está en presencia de todas las degradaciones y cuando esta solo con CD los valores del factor Q son muy parecidos, solo difieren en 0.3994dB, la BER tiene el mismo comportamiento y sus valores son muy similares. Al ejecutar la simulación únicamente con la dispersión cromática los valores del factor Q y la BER son muy similares a cuando la red esta con todas las degradaciones, lo que indica que la CD es uno de los factores más importantes a la hora de evaluar el desempeño de la red, por ello es necesario realizar compensación de la dispersión cromática.

3.2.3.2 Cálculo de la CD acumulada en la red

Antes de realizar la compensación de la CD es necesario determinar la dispersión cromática acumulada en la red y así determinar el porcentaje adecuado de compensación. El cálculo de la CD acumulada se realiza matemáticamente, como se mostró en la ecuación 1.14, donde se asocia la máxima longitud alcanzada (87km) para un span de fibra óptica y la CD de la fibra (18ps/nm*Km) así:

$$D_{link}(\lambda) = 87km \left[\frac{18ps}{nm * km} + \frac{0.056ps}{nm^2 * km} (1536.6022nm - 1550nm) \right] = 1500.75ps/nm$$

Dando como resultado una CD acumulada en la red de 1500.75ps/nm.

3.2.3.3 Efecto de la compensación de la CD en la red

Los sistemas de comunicaciones ópticos de alta velocidad tienen como limitante la CD, por ello es necesaria su compensación, las DCFs son uno de los métodos más utilizados y efectivos para mitigar esta degradación, por lo tanto serán empleadas para realizar la compensación.

Con el fin de determinar los efectos de compensar la dispersión cromática para la distancia máxima alcanzada (87km) con una potencia de 5dBm, se simula en modo VBS Full y se emplean las técnicas de post compensación, pre compensación y compensación simétrica.

Las diferentes técnicas de compensación se realizan al 100%, 75%, 50% y 25%, entonces para un tramo de 87Km de fibra se requiere: 15.66Km de DCF para compensar el 100% la CD, 11.74 Km de DCF para compensar 75% la CD, 7.83Km de DCF para compensar 50% la CD, 3.91Km de DCF para compensar en 25% la CD y 0Km para no realizar la compensación. Los valores medidos del factor Q, BER, Jitter, OSNR y potencia en recepción para diferentes porcentajes de compensación se pueden ver desde la Tabla 3.5 hasta la Tabla 3.7.

| LONGITUD DCF (Km) | FACTOR Q (dB) | BER | Jitter (ns) | OSNR _{in} (dB) | OSNR _{out} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|-------------------|---------------|--------------------------|-------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 0 | 17.1113 | 4.3398x10 ⁻¹³ | 0.027801 | 30.9893 | 32.2860 | -7.2214 |
| 3.91 | 22.2795 | 3.5167x10 ⁻³⁷ | 0.024678 | 30.9893 | 32.5993 | -9.2825 |
| 7.83 | 22.9228 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.016042 | 30.9893 | 32.4364 | -11.4482 |
| 11.74 | 27.1583 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.017267 | 30.9893 | 32.4908 | -13.6031 |
| 15.66 | 26.9214 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.019693 | 30.9893 | 32.5226 | -15.7640 |

Tabla 3.5 Parámetros de monitoreo óptico en un tramo de 87Km de SMF-28 para diferentes longitudes de DCF con post-compensación

| LONGITUD DCF (Km) | FACTOR Q (dB) | BER | Jitter (ns) | OSNR _{in} (dB) | OSNR _{out} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|-------------------|---------------|--------------------------|-------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 0 | 17.1113 | 4.3398x10 ⁻¹³ | 0.02780 | 30.9893 | 32.2860 | -7.2214 |
| 3.91 | 22.8949 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.02508 | 30.9893 | 32.5993 | -9.2825 |
| 7.83 | 22.4897 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.01636 | 30.9893 | 32.4364 | -11.4482 |
| 11.74 | 25.3294 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.01745 | 30.9893 | 32.4908 | -13.6031 |
| 15.66 | 27.3900 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.01843 | 30.9893 | 32.5226 | -15.7640 |

Tabla 3.6 Parámetros de monitoreo óptico en un tramo de 87Km de SMF-28 para diferentes longitudes de DCF con pre-compensación

| LONGITUD DCF (Km) | FACTOR Q (dB) | BER | Jitter (ns) | OSNR _{in} (dB) | OSNR _{out} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|-------------------|---------------|--------------------------|-------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 0 | 17.1113 | 4.3398×10^{-13} | 0.02780 | 30.9893 | 32.2860 | -7.2214 |
| 3.91 | 22.5454 | 3.5167×10^{-37} | 0.02457 | 30.9893 | 32.5993 | -9.2825 |
| 7.83 | 22.7454 | 1×10^{-40} | 0.01539 | 30.9893 | 32.4364 | -11.4482 |
| 11.74 | 26.2501 | 1×10^{-40} | 0.01693 | 30.9893 | 32.4908 | -13.6031 |
| 15.66 | 27.6541 | 1×10^{-40} | 0.01643 | 30.9893 | 32.5226 | -15.7640 |

Tabla 3.7 Parámetros de monitoreo óptico en un tramo de 87Km de SMF-28 para diferentes longitudes de DCF con compensación simétrica

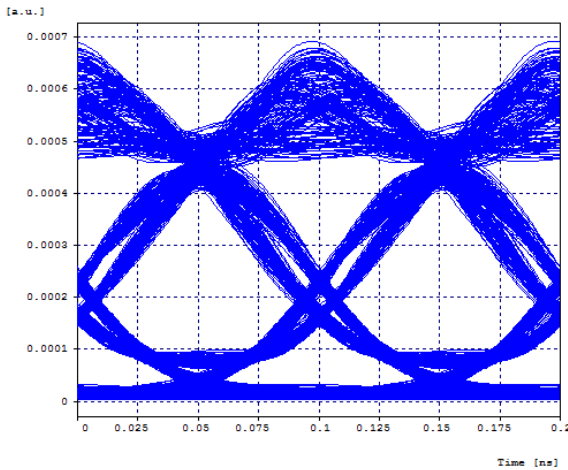


Figura 3.17 Diagrama del ojo sin compensación de CD de la fibra SMF-28

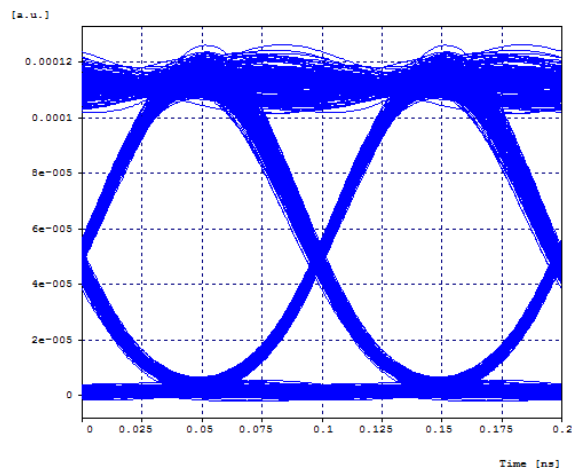


Figura 3.18 Diagrama del ojo con post-compensación al 75% de CD de la fibra SMF-28

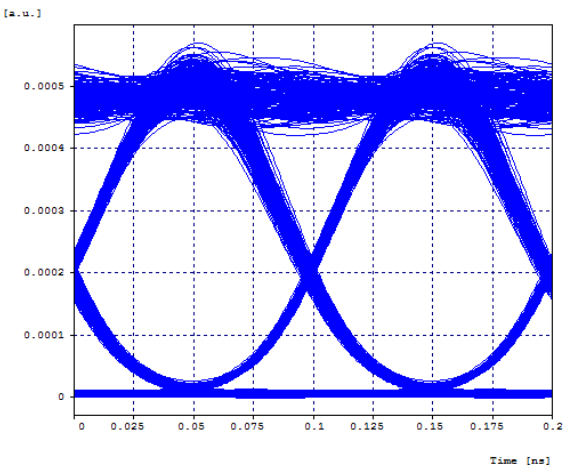


Figura 3.19 Diagrama del ojo con pre-compensación al 75% de CD de la fibra SMF-28

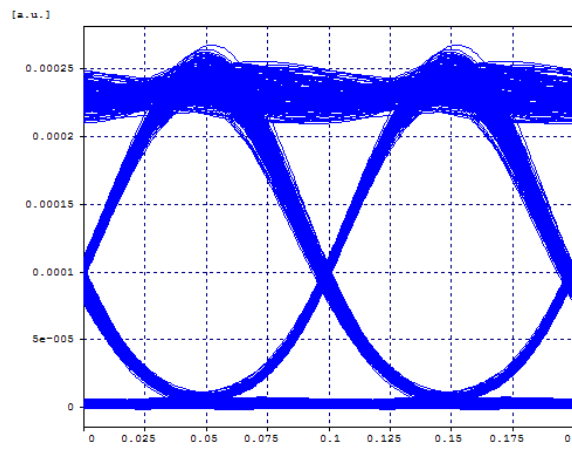


Figura 3.20 Diagrama del ojo con compensación simétrica al 75% de CD de la fibra SMF-28

El efecto de realizar compensación de dispersión cromática radica en que mejoran el factor Q, la BER y Jitter, lo cual se ve reflejado en las anteriores tablas. Sin embargo el uso de DCFs implica un costo adicional, de este modo, aunque compensar el 100% arroja buenos resultados, es posible tener una mejora en el desempeño de la red con un

porcentaje de compensación menor (75%), lo cual implica una reducción en costos de implementación.

Por otro lado las diferentes técnicas de compensación presentan un comportamiento similar (ver Figura 3.18 Figura 3.19 y Figura 3.20), sin embargo cuando se compensa al 75% se obtienen mejores resultados con post compensación, pasando de un factor Q de 16.6581dB (sin compensar CD) a 27.1583dB y una BER de 5.9929×10^{-12} (sin compensar CD) a 1×10^{-40} , además la red aumenta la longitud del enlace de 87Km a 98.74Km.

3.2.4 Análisis de la PMD

Para determinar el impacto de la PMD en un enlace de 87Km con una potencia de transmisión de 5dBm, se tiene en cuenta el valor típico de PMD introducido por la fibra SMF-28 que es de 0. 1ps/√Km, posteriormente se comparan los parámetros de monitoreo obtenidos en presencia de todas las degradaciones ópticas con los parámetros de monitoreo de la red en ausencia de PMD y la red solo con la degradación PMD.

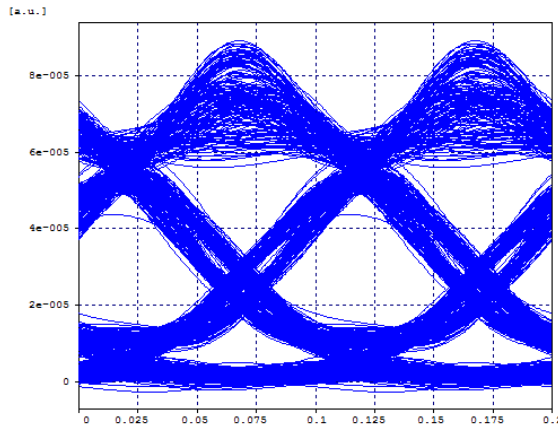


Figura 3.21 Diagrama del ojo para 87 Km de SMF-28 en presencia de todas las degradaciones ópticas

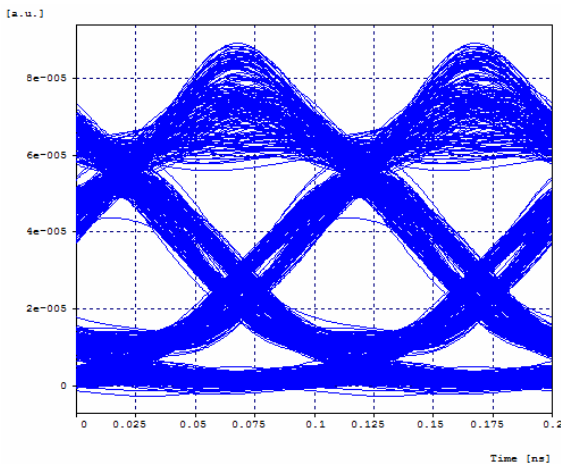


Figura 3.22 Diagrama del ojo para 87Km sin PMD de la fibra SMF-28

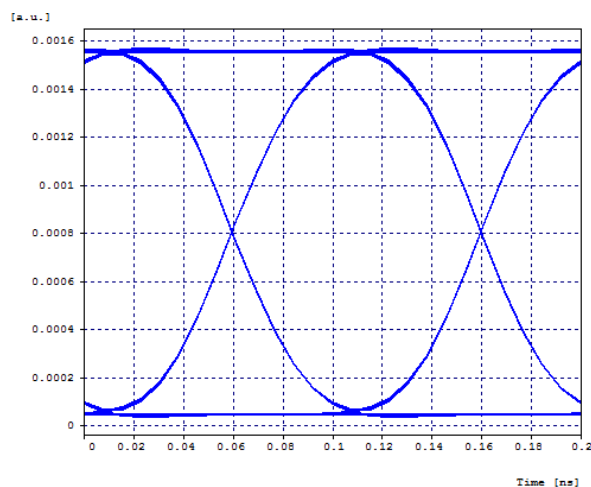


Figura 3.23 Diagrama del ojo para 87Km solo con PMD de la fibra SMF-28

| SIMULACIÓN | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{OUT} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|-----------------------------|---------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Con todas las degradaciones | 16.6581 | 5.9929×10^{-12} | 18.5794 | -16.2173 |
| Sin PMD | 16.6581 | 5.9929×10^{-12} | 18.5794 | -16.2173 |
| Solo con PMD | 37.5282 | 1×10^{-40} | 24.474 | -1.5209 |

Tabla 3.8 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de PMD de la fibra óptica SMF-28

Al comparar la Figura 3.21 con la Figura 3.22 las cuales muestran el diagrama del ojo en presencia y ausencia de PMD, se puede considerar que son prácticamente iguales, de hecho la Tabla 3.8 comprueba dicha afirmación ya que no existe cambio en los valores de los parámetros como factor Q, BER, OSNR_{out} y la P_{Rx}. Esto se debe a que la fibra óptica introduce un valor de PMD muy pequeño ($0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$), por lo tanto se procede a variar los valores de PMD para establecer la máxima tolerancia a esta.

| VALOR DE PMD (ps/ $\sqrt{\text{Km}}$) | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{OUT} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|--|---------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 5 | 21.4284 | 1.0165×10^{-31} | 24.4718 | -1.5795 |
| 6 | 18.0425 | 7.5721×10^{-16} | 24.4540 | -1.6855 |
| 6.5 | 17.7199 | 2.0198×10^{-14} | 24.4638 | -1.6222 |
| 7 | 14.4042 | 7.9241×10^{-8} | 24.4815 | -1.5419 |

Tabla 3.9 Parámetros de monitoreo para diferentes valores de PMD de la fibra óptica SMF-28

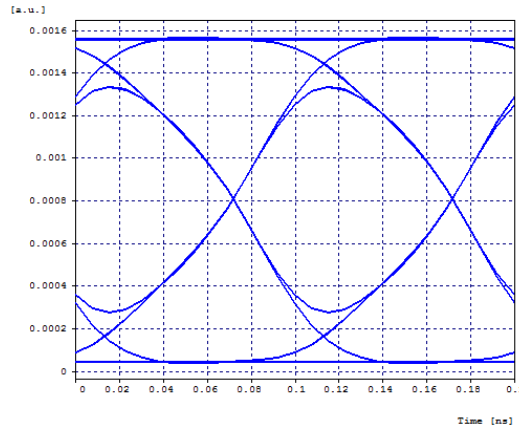


Figura 3.24 Diagrama del ojo para 87Km solo con PMD=6.5ps/ $\sqrt{\text{Km}}$ de la fibra óptica SMF-28

Para una red DWDM de 87 Km con una potencia de 5dBm, a 10Gb/s y fibra óptica SMF-28, la PMD es una degradación de bajo o nulo impacto en el desempeño de la red, ya que esta es muy baja ($0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$). Con una PMD mucho más alta, alrededor de los $6.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$ el factor Q y la BER se empiezan a degradar significativamente, afectando el desempeño de la red, por lo tanto se puede concluir que la red es altamente tolerable a los efectos de la PMD.

3.3 Caso de estudio 2, fibra óptica SMF-28e+

Al escenario de simulación se introduce la fibra óptica SMF-28e+ configurada con los parámetros preestablecidos por su fabricante CORNING dados en la Tabla 2.1, de este modo se procede a realizar los respectivos análisis.

3.3.1 Distancia máxima alcanzable

Conforme a lo realizado en el caso de estudio 1, la potencia de transmisión varía entre -5dBm, 0dBm, 5dBm, 10dBm, 15dBm, y 30dBm. Por otro lado la simulación se ejecuta teniendo en cuenta la atenuación, ruido, PMD, CD y efectos no lineales.

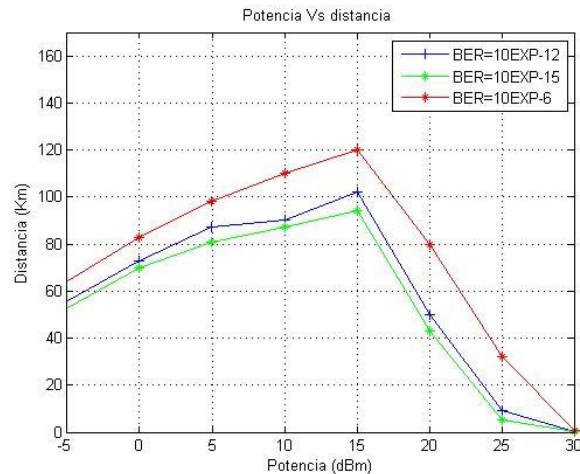


Figura 3.25 Distancia máxima alcanzable para la red con la fibra óptica SMF-28e+

De la Figura 3.25 se tiene que para una potencia de 15dBm una red con una calidad aceptable de transmisión ($BER=10^{-6}$) lograría una distancia de 120 Km, para un operador de telecomunicaciones que maneja unos factores de calidad más altos ($BER=10^{-15}$) alcanzaría una distancia de 94 Km, sin embargo acorde a lo recomendado por la ITU-T ($BER=10^{-12}$) la red obtendría un enlace de 102Km.

Es notorio un cambio abrupto a partir de los 15dBm, teóricamente podría ser causado por los efectos no lineales que se introducen en las redes cuando se trabaja con potencias altas [7][11], generando canales no deseados en la red lo cual se evidencia en la Figura 3.26. Por ello se decide trabajar de ahora en adelante con una potencia de 5dBm para atenuar dichos efectos.

Acorde a los parámetros de calidad establecidos por la ITU para una potencia de transmisión de 5dBm se alcanza una distancia de 87Km, desde la Figura 3.27 hasta la Figura 3.31 se muestran los parámetros de monitoreo óptico para esta distancia.

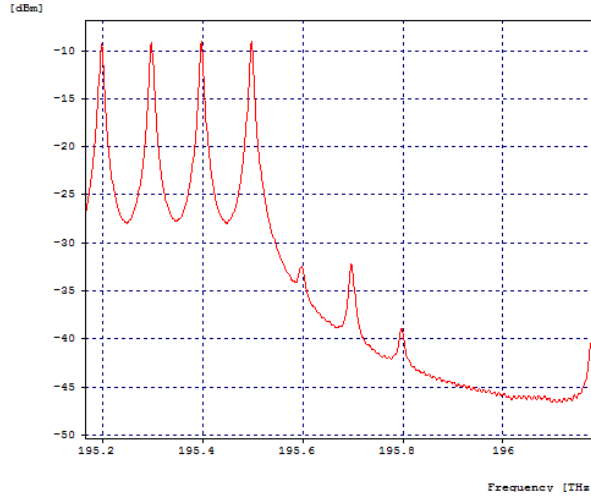


Figura 3.26 Espectro en el receptor con una potencia de transmisión de 15dBm

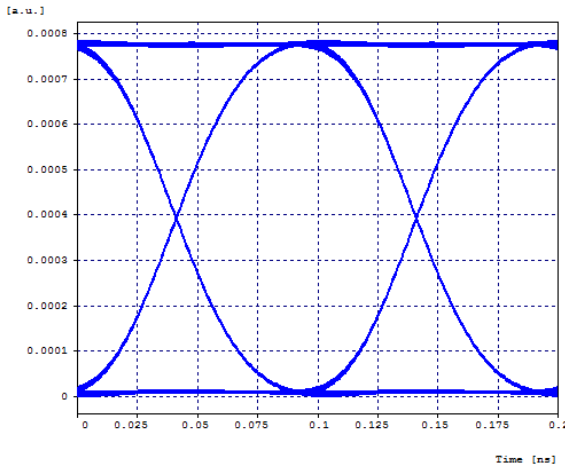


Figura 3.27 Diagrama del ojo sin degradaciones ópticas con la fibra óptica SMF-28e+

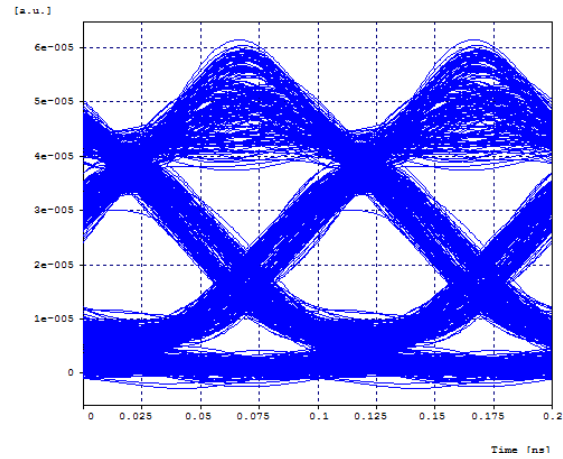


Figura 3.28 Diagrama del ojo tras un tramo de 87Km de fibra óptica SMF-28e+

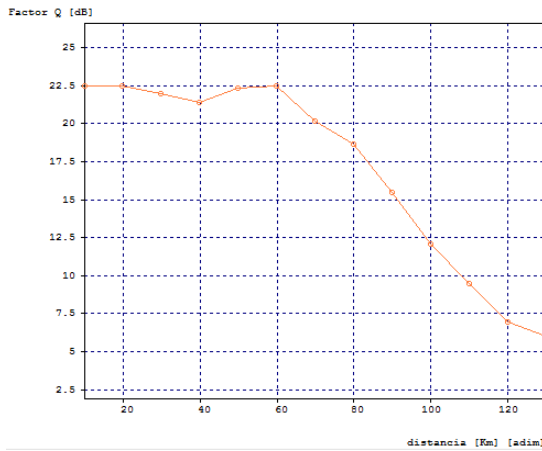


Figura 3.29 Factor Q vs distancia de transmisión para la red con fibra óptica SMF-28e+

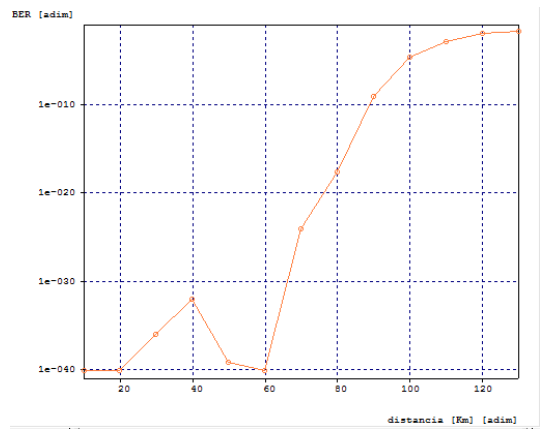


Figura 3.30 BER vs distancia de transmisión para la red con fibra óptica SMF-28e+

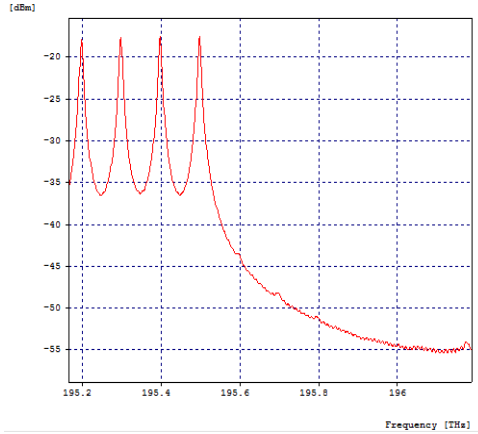


Figura 3.31 Espectro óptico en recepción a una distancia máxima de 87Km con una potencia promedio de recepción por canal del orden de los -17dBm para la fibra óptica SMF-28e+

3.3.2 Análisis de la atenuación

Para determinar el efecto de la atenuación, se procede a variar la distancia del enlace puesto que la fibra óptica SMF-28e+ por si sola introduce una atenuación menor o igual a 0.20dB/Km , por lo tanto al variar la distancia desde los 40Km hasta 87Km se genera un rango de atenuación de 8dB hasta 17.4dB . De este modo se comparan las distancias máximas obtenidas en presencia de todas las degradaciones ópticas (ver Tabla 3.10) con las distancias máximas obtenidas teniendo en cuenta solo las pérdidas por atenuación de la fibra, para las potencias de -5dBm , 5dBm , 15dBm y 30dBm , (ver Tabla 3.11).

| POTENCIA (dBm) | DISTANCIA (Km) | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{in} (dB) | OSNR _{out} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|----------------|----------------|---------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| -5 | 56 | 17.1696 | 2.77×10^{-13} | 30.9893 | 18.6877 | -21.5142 |
| 5 | 87 | 16.5606 | 8.4764×10^{-12} | 30.9893 | 18.5882 | -17.8831 |
| 15 | 102 | 16.9904 | 5.0742×10^{-12} | 30.9893 | 18.5564 | -10.9232 |
| 30 | 0.4 | 16.8201 | 7.0798×10^{-12} | 30.9893 | 18.4478 | 25.0458 |

Tabla 3.10 Máximas distancias obtenidas en presencia de todas las degradaciones ópticas de la fibra óptica SMF-28e+

| POTENCIA (dBm) | DISTANCIA (Km) | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{in} (dB) | OSNR _{out} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|----------------|----------------|---------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| -5 | 60 | 16.8843 | 3.9898×10^{-12} | 30.9893 | 18.6413 | -22.1490 |
| 5 | 110 | 16.8843 | 3.9898×10^{-12} | 30.9893 | 18.6413 | -22.1490 |
| 15 | 160 | 16.8843 | 3.9898×10^{-12} | 30.9893 | 18.6413 | -22.1490 |
| 30 | 235 | 16.8843 | 3.9898×10^{-12} | 30.9893 | 18.6413 | -22.1490 |

Tabla 3.11 Máximas distancias obtenidas en presencia solo de la atenuación de la fibra SMF-28e+

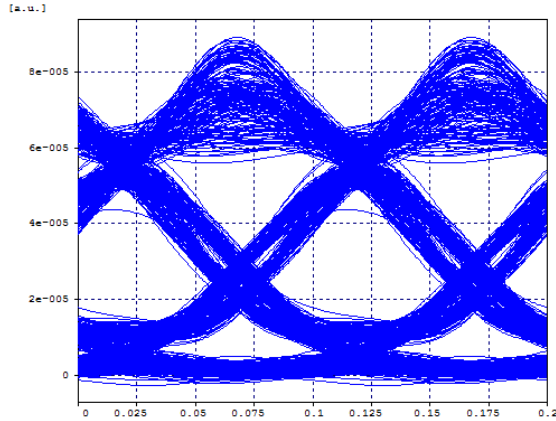


Figura 3.32 Diagrama del ojo para 87 Km de SMF-28e+ en presencia de todas las degradaciones ópticas

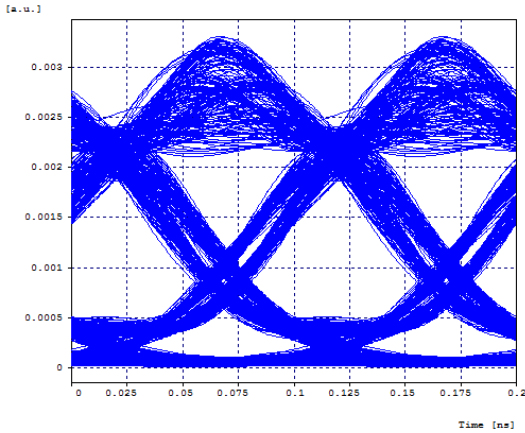


Figura 3.33 Diagrama del ojo para 87Km sin atenuación de la fibra SMF-28e+

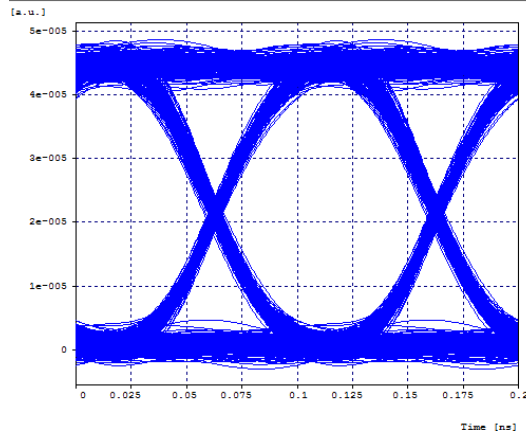


Figura 3.34 Diagrama del ojo para 87Km solo con atenuación de la fibra SMF-28e+

| SIMULACIÓN | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR | Potencia Rx |
|-----------------------------|---------------|--------------------------|---------|-------------|
| Con todas las degradaciones | 16.5606 | 8.4764×10^{-12} | 18.5882 | -17.8831 |
| Sin Atenuación | 18.3690dB | 2.6573×10^{-16} | 18.6010 | -0.4613 |
| Solo con Atenuación | 25.8342dB | 1×10^{-40} | 18.6413 | -17.5490 |

Tabla 3.12 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de la atenuación de la fibra SMF-28e+

De la tabla 3.12 se observa que la ausencia de atenuación en la red mejora levemente la BER y el factor Q, la potencia en recepción aumenta cuando se ejecuta la simulación sin atenuación, pasando de -16.2173dBm con todas las degradaciones a -0.5370dBm sin atenuación, lo que quiere decir que la atenuación limita la potencia que se recibe en el receptor.

Cuando la atenuación es la única degradación presente en la red se observa una linealidad entre la potencia de transmisión y la distancia del enlace, sin embargo cuando se introducen las demás degradaciones ópticas esta linealidad se pierde (ver Figura 3.35), lo cual se refleja claramente en la Tabla 3.10 y la Tabla 3.11, en donde al transmitir con

una potencia de 30dBm y todas las degradaciones solo se alcanza 0.4Km, mientras que con esa misma potencia, pero solo en presencia de la atenuación, se logra una distancia de 235Km.

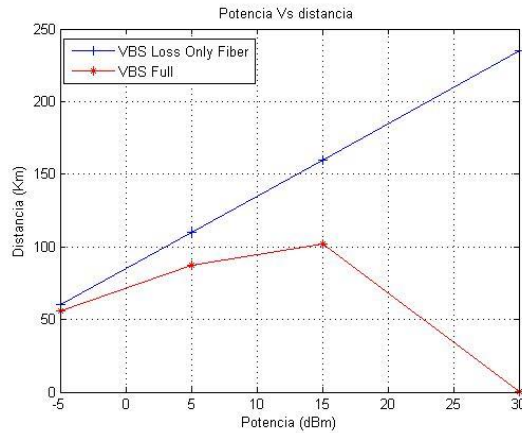


Figura 3.35 Potencia de transmisión vs distancia para la red con fibra óptica SMF-28e+

De lo anterior se puede decir que la atenuación introducida por la fibra SMF-28e+ en un enlace de 87Km bajo una potencia de 5dBm no se constituye como una degradación que afecte significativamente el desempeño de la red, ya que al simular solo con atenuación los valores de BER y factor Q son muy altos y al simular sin atenuación, pero con las demás degradaciones estos valores caen considerablemente, por lo tanto la atenuación si afecta la red, pero existen otros factores que son los que realmente limitan los parámetros de desempeño óptico para esta fibra, estos factores serán analizados posteriormente.

3.3.3 Análisis de la dispersión cromática

Para determinar el efecto de la dispersión cromática se configura la red con una potencia de 5dBm y una distancia de 87Km, que corresponde a la máxima distancia alcanzada por la red en presencia de todas las degradaciones ópticas.

Posteriormente se realizan los siguientes análisis:

- ✓ Se determina el desempeño de la red sin CD y solo con CD.
- ✓ Se calcula la CD acumulada en la red.
- ✓ Se observa que produce la compensación de la CD en la red.

3.3.3.1 Desempeño de la red sin CD y solo con CD

Al probar el comportamiento de la red cuando hay presencia o ausencia de CD en la fibra óptica se podrá determinar cuál es su impacto en el desempeño de la red. La Figura 3.36, Figura 3.37, Figura 3.38 y la Tabla 3.13 muestran el diagrama de ojo, BER, factor Q y jitter en: presencia de todas las degradaciones ópticas, ausencia de la CD y presencia solo de la CD respectivamente.

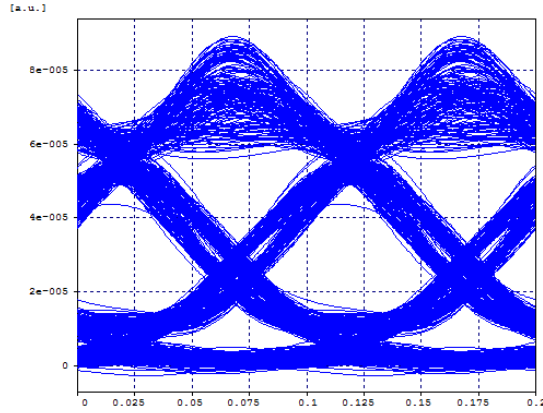


Figura 3.36 Diagrama del ojo para 87 Km de SMF-28e+ en presencia de todas las degradaciones ópticas

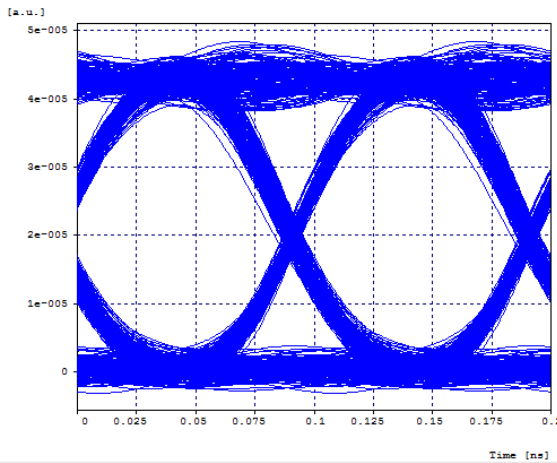


Figura 3.37 Diagrama del ojo para 87Km sin CD de la fibra SMF-28e+

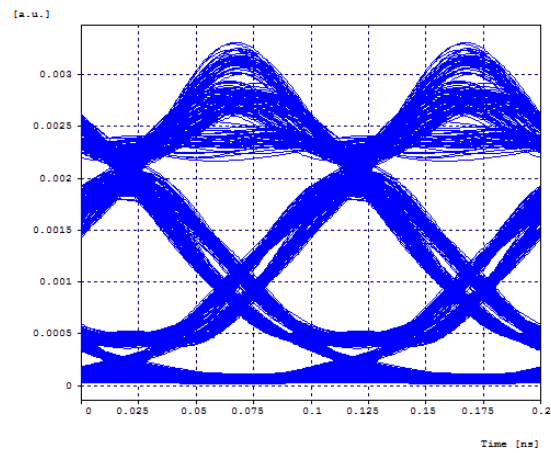


Figura 3.38 Diagrama del ojo para 87Km solo con CD de la fibra SMF-28e+

| SIMULACIÓN | FACTOR Q (dB) | BER | Jitter (ns) |
|-----------------------------|---------------|--------------------------|-------------|
| Con todas las degradaciones | 16.5606 | 8.4764×10^{-12} | 0.0277242 |
| Sin CD | 24.7827 | 1×10^{-40} | 0.0203804 |
| Solo Con CD | 16.8193 | 3.9866×10^{-12} | 0.027759 |

Tabla 3.13 Parámetros de monitoreo para la red en presencia y ausencia de CD de la fibra SMF-28e+

Es evidente que la CD introducida por la fibra SMF-28e+ afecta el desempeño de la red; cuando la red está en presencia de todas las degradaciones y cuando esta solo con CD los valores del factor Q son muy parecidos, solo difieren en 0.26dB, La BER tiene el mismo comportamiento y sus valores son muy similares. Al ejecutar la simulación únicamente con la dispersión cromática los valores del factor Q y la BER son muy similares a cuando la red esta con todas las degradaciones, lo que indica que la CD es uno de los factores más importantes a la hora de evaluar el desempeño de la red, por ello es necesario realizar compensación de la dispersión cromática.

3.3.3.2 Cálculo de la CD acumulada en la red

Antes de realizar la compensación de la CD es necesario determinar la dispersión cromática acumulada en la red y así calcular el porcentaje adecuado de compensación. El cálculo de la CD acumulada se realiza matemáticamente, como se mostró en la ecuación 1.14, donde se asocia la máxima longitud alcanzada (87km) para un span de fibra óptica y la CD de la fibra (18ps/nm*Km) así:

$$D_{link}(\lambda) = 87km \left[\frac{18ps}{nm} * km + \frac{0.056ps}{nm^2} * km(1536.6022nm - 1550nm) \right] \\ = 1500.75ps/nm$$

Dando como resultado una CD acumulada en la red de 1500.75ps/nm.

3.3.3.3 Efecto de la compensación de la CD en la red

Para realizar la compensación de la CD para la distancia máxima alcanzada (87km) con una potencia de 5dBm, se emplea una DCF configurada con los parámetros de la Tabla 2.4, además se emplean las técnicas de post compensación, pre compensación y compensación simétrica.

Las diferentes técnicas de compensación se realizan al 100%, 75%, 50% y 25%, entonces para un tramo de 87Km de fibra se requiere: 15.66Km de DCF para compensar el 100% la CD, 11.74 Km de DCF para compensar 75% la CD, 7.83Km de DCF para compensar 50% la CD, 3.91Km de DCF para compensar en 25% la CD y 0Km para no realizar la compensación. Los valores medidos del factor Q, BER, Jitter, OSNR y potencia en recepción para diferentes porcentajes de compensación se pueden ver desde la Tabla 3.14 hasta la Tabla 3.16.

| LONGITUD DCF (Km) | FACTOR Q (dB) | BER | Jitter (ns) | OSNR _{in} (dB) | OSNR _{out} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|-------------------|---------------|--------------------------|-------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 0 | 17.4099 | 1.0553x10 ⁻¹³ | 0.0278 | 30.9893 | 32.2873 | -7.2451 |
| 3.91 | 22.8233 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.024373 | 30.9893 | 32.5895 | -9.3315 |
| 7.83 | 22.9538 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.0161195 | 30.9893 | 32.4327 | -11.5141 |
| 11.74 | 26.8238 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.0180302 | 30.9893 | 32.4810 | -13.6284 |
| 15.66 | 27.1674 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.0203124 | 30.9893 | 32.5016 | -15.8314 |

Tabla 3.14 Parámetros de monitoreo óptico en un tramo de 87Km de SMF-28e+ para diferentes longitudes de DCF con post-compensación

| LONGITUD DCF (Km) | FACTOR Q (dB) | BER | Jitter (ns) | OSNR _{in} (dB) | OSNR _{out} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|-------------------|---------------|--------------------------|-------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 0 | 17.4099 | 1.0553x10 ⁻¹³ | 0.02788 | 30.9893 | 32.2873 | -7.2451 |

| | | | | | | |
|-------|---------|---------------------|----------|---------|---------|---------|
| 3.91 | 22.9260 | 1×10^{-40} | 0.025166 | 30.9893 | 32.5878 | -7.1051 |
| 7.83 | 22.4664 | 1×10^{-40} | 0.016564 | 30.9893 | 32.4148 | -7.2036 |
| 11.74 | 25.3504 | 1×10^{-40} | 0.016671 | 30.9893 | 32.4242 | -7.3595 |
| 15.66 | 26.2750 | 1×10^{-40} | 0.018826 | 30.9893 | 32.4554 | -7.2837 |

Tabla 3.15 Parámetros de monitoreo óptico en un tramo de 87Km de SMF-28e+ para diferentes longitudes de DCF con pre-compensación

| LONGITUD DCF (Km) | FACTOR Q (dB) | BER | Jitter (ns) | OSNR _{in} (dB) | OSNR _{out} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|-------------------|---------------|--------------------------|-------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 0 | 17.4099 | 1.0553×10^{-13} | 0.0278 | 30.9893 | 32.2873 | -7.2451 |
| 3.91 | 22.0817 | 1.580×10^{-36} | 0.02436 | 30.9893 | 32.5746 | -8.3347 |
| 7.83 | 23.1156 | 1×10^{-40} | 0.01540 | 30.9893 | 32.4309 | -9.3061 |
| 11.74 | 26.1317 | 1×10^{-40} | 0.016042 | 30.9893 | 32.4629 | -10.5020 |
| 15.66 | 27.6783 | 1×10^{-40} | 0.01837 | 30.9893 | 32.4758 | -11.5224 |

Tabla 3.16 Parámetros de monitoreo óptico en un tramo de 87Km de SMF-28e+ para diferentes longitudes de DCF con compensación simétrica

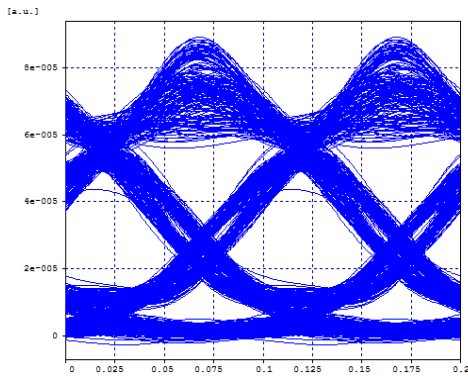


Figura 3.39 Diagrama del ojo sin compensación de CD de la fibra SMF-28e+

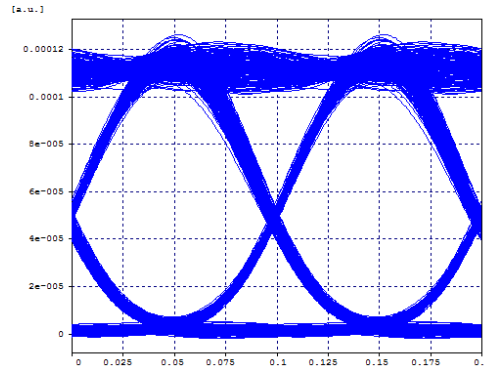


Figura 3.40 Diagrama del ojo con post-compensación al 75% de CD de la fibra SMF-28e+

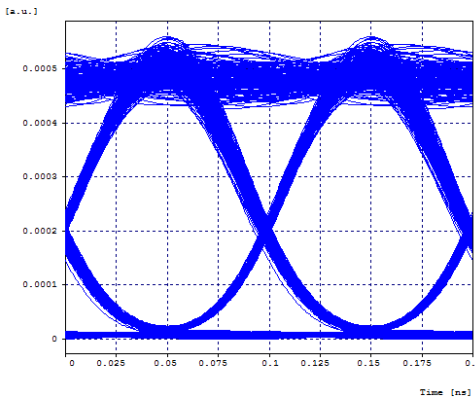


Figura 3.41 Diagrama del ojo con pre-compensación al 75% de CD de la fibra SMF-28e+

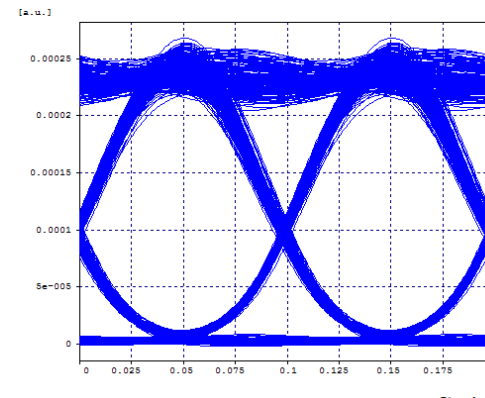


Figura 3.42 Diagrama del ojo con compensación simétrica al 75% de CD de la fibra SMF-28e+

De las anteriores tablas se observa que al realizar compensación de la CD mejora el factor Q, la BER y el jitter. Sin embargo el uso de DCFs implica un costo adicional, es así que basta con compensar el 75% de la CD para obtener buenos resultados como puede apreciarse de la Figura 3.40 a la Figura 3.42.

Por otro lado las diferentes técnicas de compensación presentan un comportamiento similar (ver Figura 3.18 Figura 3.19 y Figura 3.20), sin embargo cuando se compensa al 75% se obtienen mejores resultados con post compensación, pasando de un factor Q de 16.6581dB (sin compensar CD) a 27.1583dB y una BER de 5.9929×10^{-12} (sin compensar CD) a 1×10^{-40} , además la red aumenta la longitud del enlace de 87Km a 98.74Km.

3.3.4 Análisis de la PMD

El valor de PMD introducido por la fibra SMF-28e+ es de 0.1ps/√Km, para analizar el impacto de la PMD para un enlace de 87Km se comparan los parámetros de monitoreo obtenidos en presencia de todas las degradaciones ópticas con los parámetros de monitoreo de la red con ausencia de PMD y la red solo con la degradación PMD.

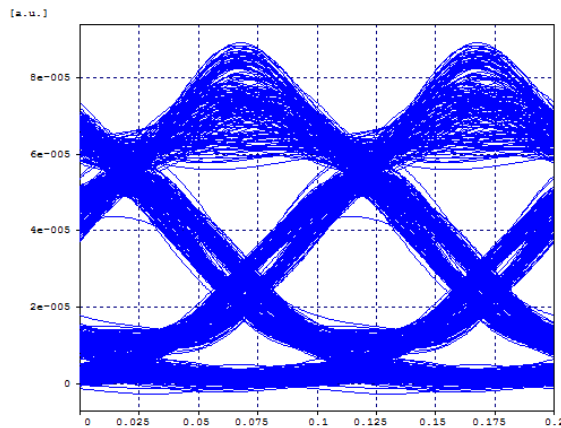


Figura 3.43 Diagrama del ojo para 87 Km de SMF-28e+ en presencia de todas las degradaciones ópticas

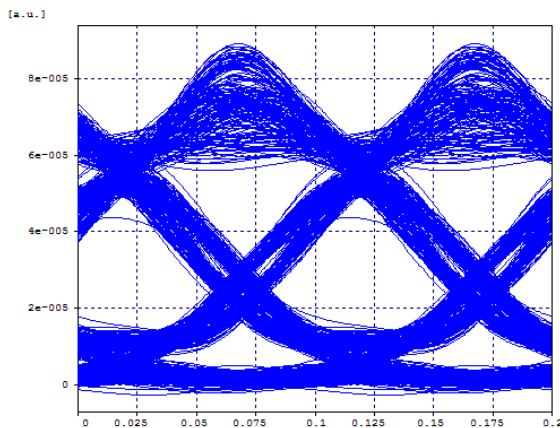


Figura 3.44 Diagrama del ojo para 87Km sin PMD de la fibra SMF-28e+

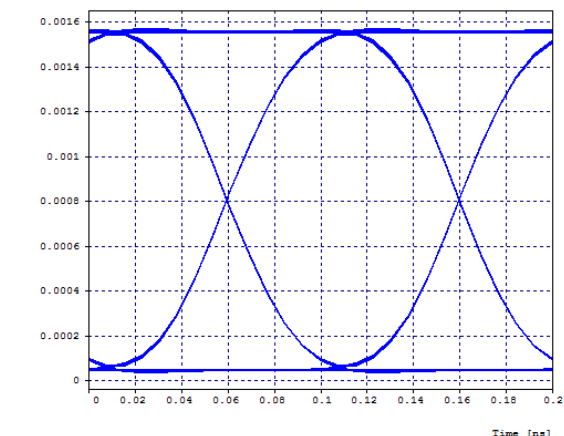


Figura 3.45 Diagrama del ojo para 87Km solo con PMD de la fibra SMF-28e+

Al comparar la Figura 3.43 con la Figura 3.44, las cuales muestran el diagrama del ojo en presencia y ausencia de PMD, se puede observar que no existen cambios, la Tabla 3.17 comprueba dicha afirmación. Esto se debe a que la fibra óptica introduce un valor de PMD muy pequeño ($0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$), por lo tanto se procede a variar los valores de PMD para establecer la máxima tolerancia a esta.

| SIMULACIÓN | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{OUT} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|-----------------------------|---------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Con todas las degradaciones | 16.5606 | 8.4764×10^{-12} | 18.5882 | -17.8831 |
| Sin PMD | 16.5606 | 8.4764×10^{-12} | 18.5882 | -17.8831 |
| Solo con PMD | 37.5280 | 1×10^{-40} | 24.4742 | -1.5209 |

Tabla 3.17 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de la PMD de la fibra óptica SMF-28e+

| VALOR DE PMD ($\text{ps}/\sqrt{\text{Km}}$) | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{OUT} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|---|---------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 5 | 21.4284 | 1.0173×10^{-31} | 24.4718 | -1.5795 |
| 6 | 18.0425 | 7.5748×10^{-16} | 24.4540 | -1.6855 |
| 6.5 | 17.7200 | 2.0195×10^{-14} | 24.4636 | -1.6222 |
| 7 | 14.4042 | 7.9252×10^{-8} | 24.4815 | -1.5419 |

Tabla 3.18 Parámetros de monitoreo para diferentes valores de PMD de la fibra óptica SMF-28e+

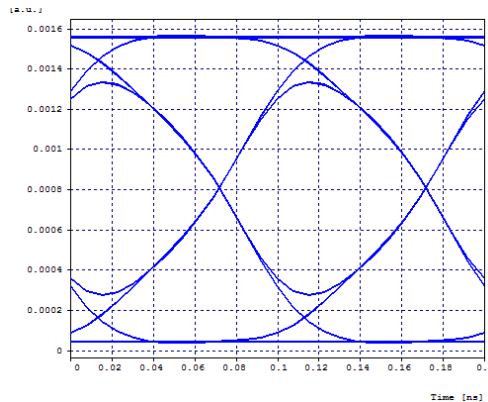


Figura 3.46 Diagrama del ojo para 87Km solo con PMD=6.5ps/√Km de la fibra óptica SMF-28

Para una red DWDM de 87 Km con una potencia de 5dBm, a 10Gb/s y fibra óptica SMF-28, la PMD es una degradación de bajo o nulo impacto en el desempeño de la red, ya que esta es muy baja ($0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$). Con una PMD mucho más alta, alrededor de los $6.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$ el factor Q y la BER se empiezan a degradar significativamente, afectando el desempeño de la red, por lo tanto se puede concluir que la red es altamente tolerable a los efectos de la PMD.

3.4 Caso de estudio 3, fibra óptica LEAF

Al escenario de simulación se introduce la fibra óptica LEAF configurada con los parámetros preestablecidos por su fabricante CORNING dados en la Tabla 2.1, de este modo se procede a realizar los respectivos análisis.

3.4.1 Distancia máxima alcanzable

De acuerdo a lo realizado en los anteriores casos de estudio, la potencia de transmisión varía entre -5dBm, 0dBm, 5dBm, 10dBm, 15dBm, y 30dBm. Por otro lado la simulación se ejecuta teniendo en cuenta todas las degradaciones ópticas.

En la Figura 3.47, se muestran los valores de las distancias máximas alcanzadas para las distintas potencias de un enlace punto a punto de fibra LEAF, que cumplen con los parámetros de calidad objetivo ($BER=10^{-12}$ y factor $Q=7,04dB$). Adicional a ello se muestra como se comportaría la red con una calidad aceptable de transmisión ($BER=10^{-6}$) y también se considera los estándares de calidad manejados por los operadores de telecomunicaciones colombianos que manejan una BER de 10^{-15} .

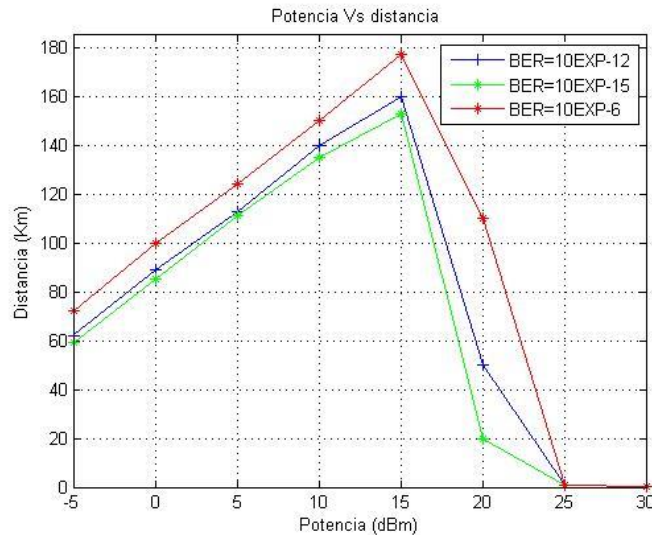


Figura 3.47 Distancia máxima alcanzable para la red con la fibra óptica LEAF

Si se transmite con una potencia de 15dBm una red con una calidad aceptable de transmisión lograría una distancia de 177Km, para un operador de telecomunicaciones que maneja unos factores de calidad más altos alcanzaría una distancia de 154Km, sin embargo acorde a lo recomendado por la ITU-T ($BER=10^{-12}$) la red obtendría un enlace de 160Km.

Para evitar la introducción de efectos no lineales al igual que los casos anteriores se trabaja con una potencia de 5dBm con la cual se alcanza una distancia máxima de 114Km

y una BER de 3.1053×10^{-12} , los parámetros de monitoreo óptico obtenidos se muestran desde la Figura 3.48 hasta la Figura 3.52.

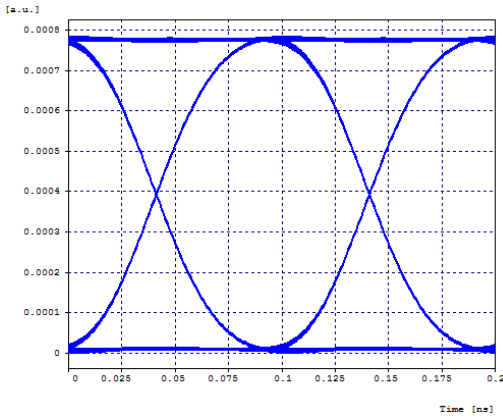


Figura 3.48 Diagrama del ojo sin degradaciones ópticas con la fibra óptica LEAF

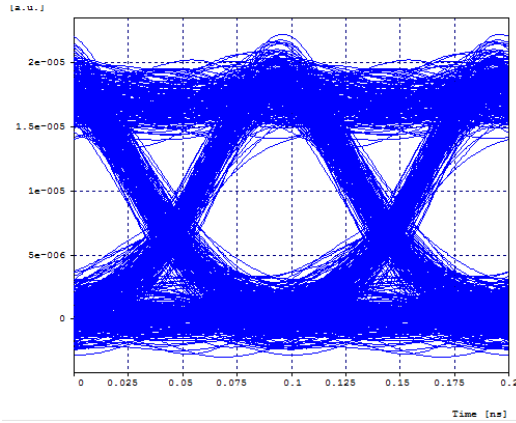


Figura 3.49 Diagrama del ojo tras un tramo de 114Km de fibra óptica LEAF

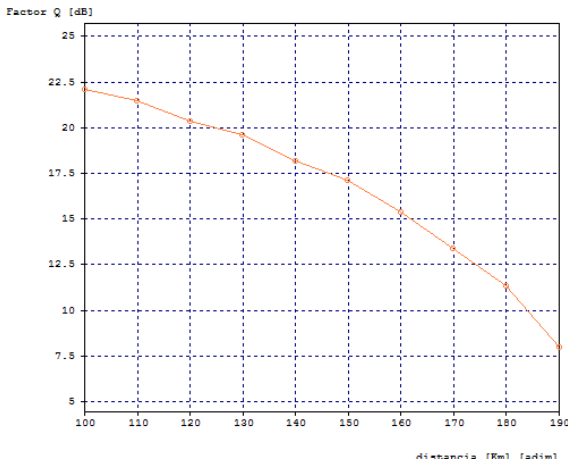


Figura 3.50 Factor Q vs distancia de transmisión para la red con fibra óptica LEAF

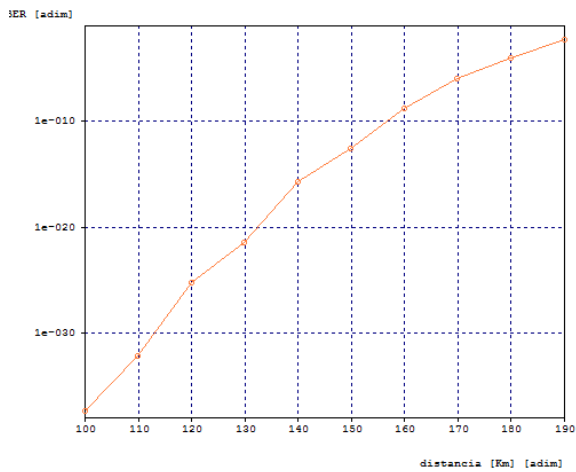


Figura 3.51 BER vs distancia de transmisión para la red con fibra óptica LEAF

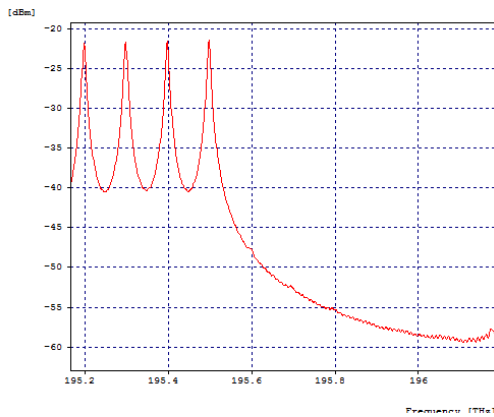


Figura 3.52 Espectro óptico en recepción a una distancia máxima de 114Km con un potencia promedio de recepción por canal del orden de los -21dBm para la fibra óptica LEAF

3.4.2 Análisis de la atenuación

Para determinar el efecto de la atenuación introducida por la fibra óptica LEAF que por sí sola introduce unas pérdidas menores o iguales a 0,19dB/Km en la red, se procederá a analizar los parámetros de monitoreo óptico de manera similar a los anteriores casos de estudio.

De este modo se comparan las distancias máximas obtenidas en presencia de todas las degradaciones ópticas (ver Tabla 3.19), con las distancias máximas obtenidas teniendo en cuenta solo las pérdidas de la fibra (ver Tabla 3.20), para las potencias de -5dBm, 5dBm, 15dBm y 30dBm.

| POTENCIA (dBm) | DISTANCIA (Km) | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{in} (dB) | OSNR _{out} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|----------------|----------------|---------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| -5 | 62 | 17.1441 | 2.2348×10^{-12} | 30.9893 | 18.6570 | -21.9724 |
| 5 | 114 | 16.7574 | 3.1053×10^{-12} | 30.9893 | 18.6618 | -21.8206 |
| 15 | 160 | 16.6773 | 9.4629×10^{-12} | 30.9893 | 18.2343 | -20.9130 |
| 30 | 0.2 | 20.2931 | 1.9016×10^{-25} | 30.9893 | 18.5795 | 24.8535 |

Tabla 3.19 Máximas distancias obtenidas en presencia de todas las degradaciones ópticas de la fibra óptica LEAF

| POTENCIA (dBm) | DISTANCIA (Km) | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{in} (dB) | OSNR _{out} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|----------------|----------------|---------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| -5 | 63 | 16.9439 | 2.8497×10^{-12} | 30.9893 | 18.6413 | -22.1190 |
| 5 | 116 | 16.8049 | 6.2048×10^{-12} | 30.9893 | 18.6413 | -21.1890 |
| 15 | 168 | 17.0432 | 1.6095×10^{-12} | 30.9893 | 18.6414 | -22.0690 |
| 30 | 247 | 17.0233 | 1.8062×10^{-12} | 30.9893 | 18.6413 | -22.0790 |

Tabla 3.20 Máximas distancias obtenidas en presencia solo de la atenuación de la fibra óptica LEAF

Con ayuda de la información suministrada en la Tabla 3.19 y la Tabla 3.20, se establece una relación entre la potencia de transmisión y la atenuación introducida por la fibra, de este modo si no existiera otra degradación aparte de la atenuación, la potencia es directamente proporcional a la distancia del enlace, sin embargo cuando se introducen las demás degradaciones ópticas esta linealidad se pierde (ver Figura 3.51), por ejemplo cuando se transmite con una potencia de 30dBm con todas las degradaciones ópticas solo se alcanza 0.2Km mientras que con esa misma potencia pero solo en presencia de la atenuación se logra una distancia de 247Km.

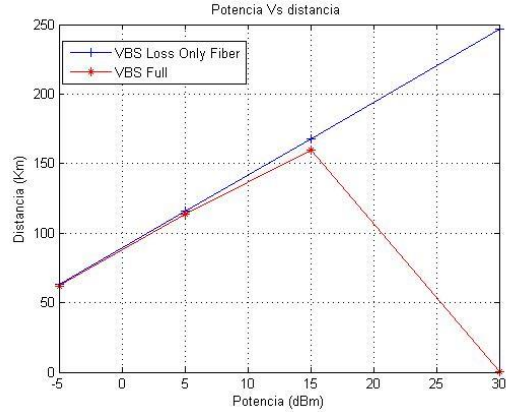


Figura 3.53 Potencia de transmisión vs distancia para la red con fibra óptica LEAF

Por otra parte cuando se mantienen la distancia y potencia de transmisión fija; y se observa la red en presencia y ausencia de la atenuación, es claro que el desempeño de la red se ve seriamente afectado por la atenuación introducida por la fibra LEAF. Por ejemplo para una distancia de 87km y una potencia de 5dBm (ver Figura 3.52, Figura 3.53, Figura 3.54y la Tabla 3.21), cuando se suprime la atenuación de la fibra el factor Q pasa de 16,76 dB a 24. 88dB y la BER pasa de 3.1053×10^{-12} a 1×10^{-40} .

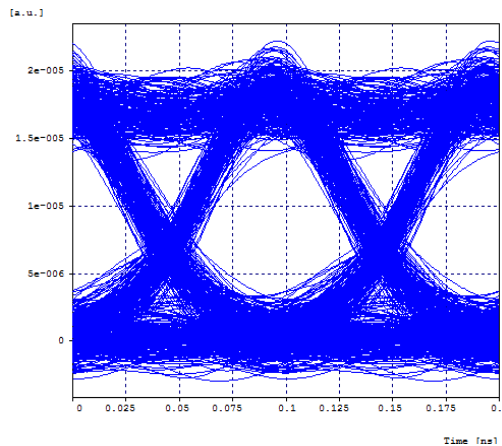


Figura 3.54 Diagrama del ojo para 114Km de LEAF en presencia de todas las degradaciones ópticas

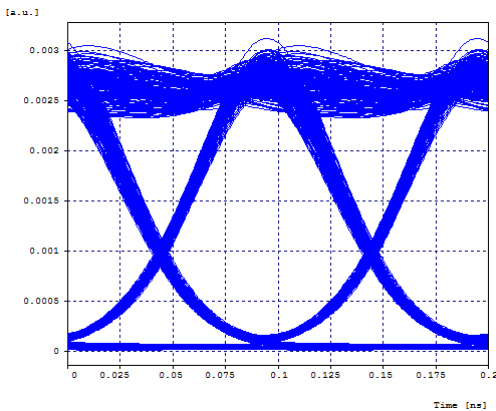


Figura 3.55 Diagrama del ojo para 114Km sin atenuación de la fibra LEAF

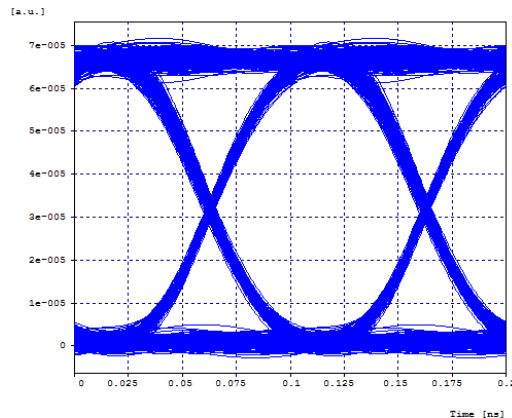


Figura 3.56 Diagrama del ojo para 114Km solo con atenuación de la fibra LEAF

| SIMULACIÓN | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{OUT} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|-----------------------------|---------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Con todas las degradaciones | 16.7574 | 3.1053×10^{-12} | 18.6614 | -21.8206 |
| Sin Atenuación | 24.8818 | 1×10^{-40} | 18.7434 | -0.0420 |
| Solo con Atenuación | 17.5589 | 6.6965×10^{-14} | 18.6413 | -21.8090 |

Tabla 3.21 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de la atenuación de la fibra LEAF

Finalmente se puede concluir que la atenuación introducida por la fibra LEAF se constituye como una degradación de alto impacto en el desempeño de la red.

3.4.3 Análisis de la dispersión cromática

Para determinar el efecto de la dispersión cromática se configura la red con una potencia de 5dBm y una distancia de 114Km, que corresponde a la máxima distancia alcanzada por la red en presencia de todas las degradaciones ópticas.

Posteriormente se realizan los siguientes análisis:

- ✓ Se determina el desempeño de la red sin CD y solo con CD.
- ✓ Se calcula la CD acumulada en la red.
- ✓ Se observa que produce la compensación de la CD en la red.

3.4.3.1 Desempeño de la red sin CD y solo con CD

Las redes a 10Gb/s son muy sensibles a la CD por ello al observar el comportamiento de la red en presencia o ausencia de CD en la fibra óptica LEAF se podrá determinar cuál es su impacto en el desempeño de la red. La Figura 3.55, Figura 3.56, Figura 3.57 y la Tabla 3.22, muestran el diagrama de ojo, BER, factor Q y jitter en: presencia de todas las degradaciones ópticas, ausencia de la CD y presencia solo de la CD respectivamente.

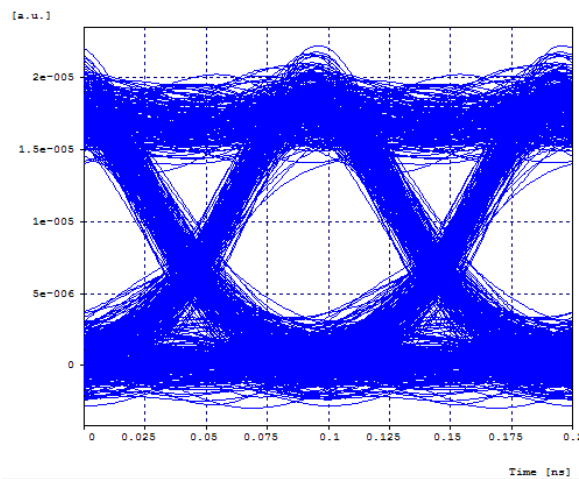


Figura 3.57 Diagrama del ojo para 114Km de LEAF en presencia de todas las degradaciones ópticas

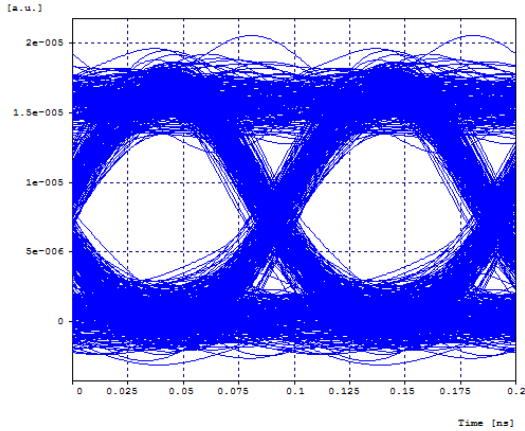


Figura 3.58 Diagrama del ojo para 114Km sin CD de la fibra LEAF

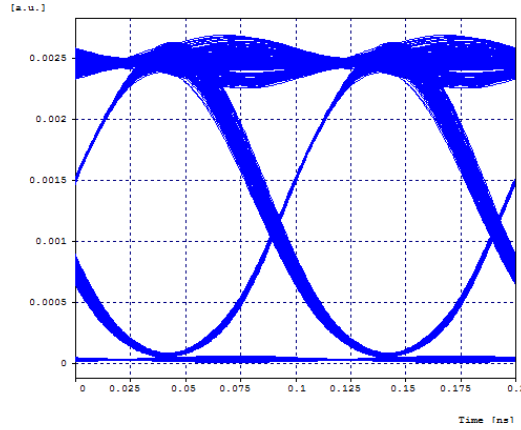


Figura 3.59 Diagrama del ojo para 114Km solo con CD de la fibra LEAF

| SIMULACIÓN | FACTOR Q (dB) | BER | Jitter (ns) |
|-----------------------------|---------------|--------------------------|-------------|
| Con todas las degradaciones | 16.7574 | 3.1053×10^{-12} | 0.0269824 |
| Sin CD | 17.1979 | 2.2411×10^{-13} | 0.0189788 |
| Solo Con CD | 31.8947 | 1×10^{-40} | 0.0180675 |

Tabla 3.22 Parámetros de monitoreo para la red en presencia y ausencia de CD de la fibra LEAF

La CD introducida por la fibra LEAF no afecta sustancialmente el desempeño de la red, de la Tabla 3.22 se observa como el factor Q y la BER permanecen con valores próximos en presencia de todas las degradaciones y al suprimir la CD. Por lo tanto se puede concluir que este tipo de fibra presenta alta tolerancia a la CD y por ello el desempeño de la red es bueno frente a este fenómeno, sin embargo es necesario evaluar cómo se comporta la red cuando se realiza compensación de CD y así concluir si es o no necesario realizarla.

3.4.3.2 Cálculo de la CD acumulada en la red

Antes de realizar la compensación de la CD es necesario determinar la dispersión cromática acumulada en la red y así determinar el porcentaje adecuado de compensación. El cálculo de la CD acumulada se realiza matemáticamente, como se mostró en la ecuación 1.14, donde se asocia la máxima longitud alcanzada (114km) para un span de fibra óptica y la CD de la fibra (5.5ps/nm*Km) así:

$$D_{link}(\lambda) = 114km \left[\frac{5.5ps}{nm * km} + \frac{0.056ps}{nm^2 * km} (1536.6022nm - 1550nm) \right] = 470.42ps/nm$$

Dando como resultado una CD acumulada en la red de 470.42ps/nm.

3.4.3.3 Efecto de la compensación de la CD en la red

Ya que se determinó que la fibra óptica LEAF tiene una alta tolerancia a la CD, se procede a realizar la compensación de esta con el fin de determinar si es o no necesario

realizar dicho proceso, al igual que en los casos de estudio anteriores se emplea una DCF para realizar post compensación, pre compensación y compensación simétrica (al 100, 75, 50 y 25%), entonces para un tramo de 114Km de fibra LEAF se requiere: 6.27Km de DCF para compensar el 100% la CD, 4.70 Km de DCF para compensar 75% la CD, 3.135Km de DCF para compensar 50% la CD, 1.56Km de fibra DCF para compensar en 25% la CD y 0Km para no realizar la compensación.

Los valores medidos del factor Q, BER, Jitter, OSNR y potencia en recepción para diferentes porcentajes de compensación se pueden ver desde la Tabla 3.23 hasta la Tabla 3.25.

| LONGITUD DCF (Km) | FACTOR Q (dB) | BER | Jitter (ns) | OSNR _{in} (dB) | OSNR _{out} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|-------------------|---------------|---------------------|-------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 0 | 23.7218 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.016004 | 30.9893 | 32.3812 | -7.2334 |
| 1.56 | 26.7550 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.0163598 | 30.9893 | 32.4590 | -8.0666 |
| 3.13 | 30.6642 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.0192735 | 30.9893 | 32.5530 | -8.9046 |
| 4.70 | 30.8065 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.0206863 | 30.9893 | 32.4855 | -9.7940 |
| 6.27 | 28.2529 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.0188113 | 30.9893 | 32.2419 | -10.7108 |

Tabla 3.23 Parámetros de monitoreo óptico en un tramo de 114Km de LEAF para diferentes longitudes de DCF con post-compensación

| LONGITUD DCF (Km) | FACTOR Q (dB) | BER | Jitter (ns) | OSNR _{in} (dB) | OSNR _{out} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|-------------------|---------------|---------------------|-------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 0 | 23.7218 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.016004 | 30.9893 | 32.3812 | -7.2334 |
| 1.56 | 24.9945 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.0158114 | 30.9893 | 32.4164 | -7.3506 |
| 3.13 | 28.6869 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.0187902 | 30.9893 | 32.5265 | -7.3347 |
| 4.70 | 29.4759 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.0180996 | 30.9893 | 32.4419 | -7.3257 |
| 6.27 | 26.5101 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.01646 | 30.9893 | 32.2127 | -7.3251 |

Tabla 3.24 Parámetros de monitoreo óptico en un tramo de 114Km de LEAF para diferentes longitudes de DCF con pre-compensación

| LONGITUD DCF (Km) | FACTOR Q (dB) | BER | Jitter (ns) | OSNR _{in} (dB) | OSNR _{out} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|-------------------|---------------|---------------------|-------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 0 | 23.7218 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.016004 | 30.9893 | 32.3812 | -7.2334 |
| 1.56 | 26.2852 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.0164035 | 30.9893 | 32.4255 | -7.7660 |
| 3.13 | 28.4406 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.018447 | 30.9893 | 32.5266 | -8.2022 |
| 4.70 | 29.6267 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.0211668 | 30.9893 | 32.4562 | -8.5099 |
| 6.27 | 26.9150 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.0176608 | 30.9893 | 32.1921 | -9.1608 |

Tabla 3.25 Parámetros de monitoreo óptico en un tramo de 114Km de LEAF para diferentes longitudes de DCF con compensación simétrica

Las diferentes técnicas de compensación presentan un comportamiento similar (ver Figura 3.59 Figura 3.60 y Figura 3.61), sin embargo cuando se compensa al 75% se obtienen mejores resultados con post compensación, pasando de un factor Q de 16.8049dB (sin compensar CD) a 30.8065dB y una BER de 6.2048×10^{-12} (sin compensar CD) a 1×10^{-40} , además la red aumenta la longitud del enlace de 114Km a 118.7Km.

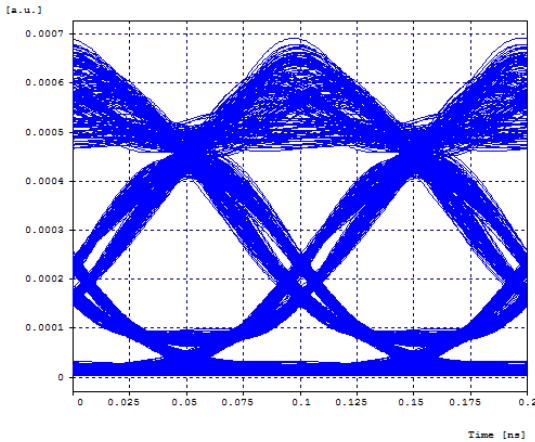


Figura 3.60 Diagrama del ojo sin compensación de CD de la fibra LEAF

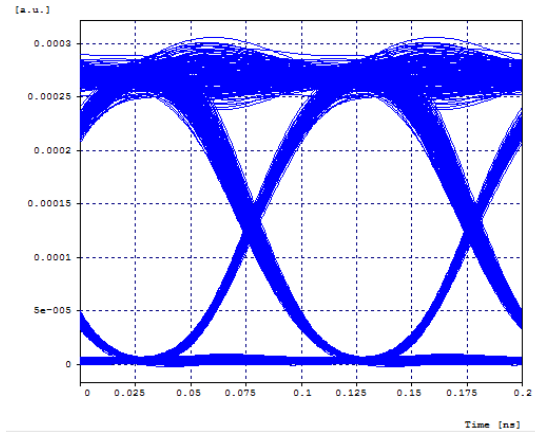


Figura 3.61 Diagrama del ojo con post-compensación al 75% de CD de la fibra LEAF

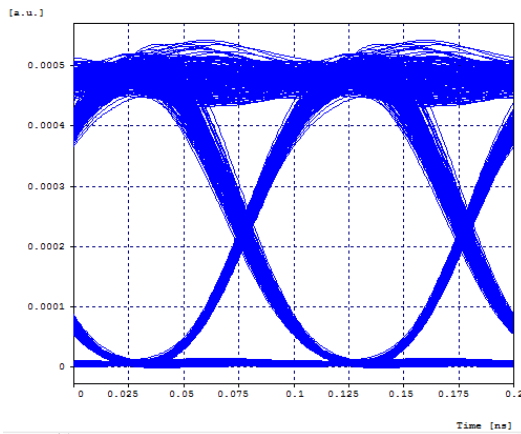


Figura 3.62 Diagrama del ojo con pre-compensación al 75% de CD de la fibra LEAF

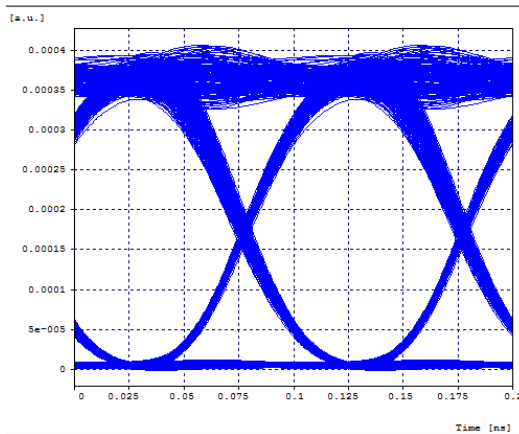


Figura 3.63 Diagrama del ojo con compensación simétrica al 75% de CD de la fibra LEAF

De los resultados obtenidos se ve claramente que la compensación de la CD mejora el desempeño de la red, sin embargo estos cambios no son explícitamente debidos al tramo de DCF, sino al amplificador tipo EDFA de 0dBm, ya que al observar los datos de las anteriores tablas se puede ver que en presencia del amplificador sin tramo de DCF los valores del factor Q es del orden de los 23dB y la BER de 1×10^{-40} , mientras que sin amplificador estos valores caen a 16.7574dB y 3.1053×10^{-12} respectivamente.

Por lo tanto cuando en una red DWDM de 114Km se emplea fibra LEAF no es necesario realizar compensación de la CD, sin embargo al implementarle un amplificador tipo EDFA de 0dBm a la red los parámetros de calidad presentan una gran mejoría, debido a que este suple la fragilidad de la fibra a la atenuación.

3.4.4 Análisis de la PMD

Para determinar el impacto de la PMD introducido por la fibra LEAF cuyo valor típico es de 0.1ps/√Km a una distancia de 114Km, se comparan los parámetros de monitoreo obtenidos en presencia de todas las degradaciones ópticas con los parámetros de monitoreo de la red en ausencia de PMD y la red solo con la degradación PMD.

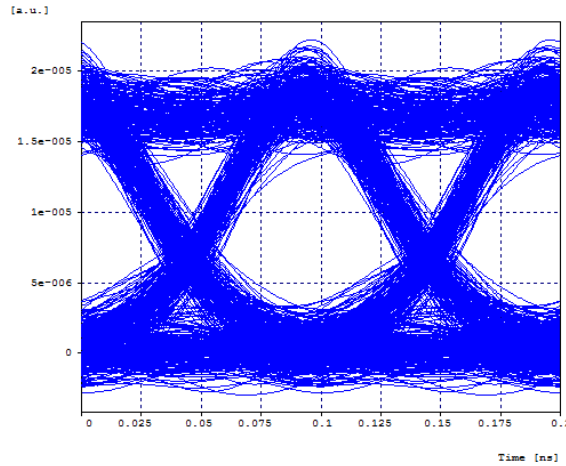


Figura 3.64 Diagrama del ojo para 114Km de LEAF en presencia de todas las degradaciones ópticas

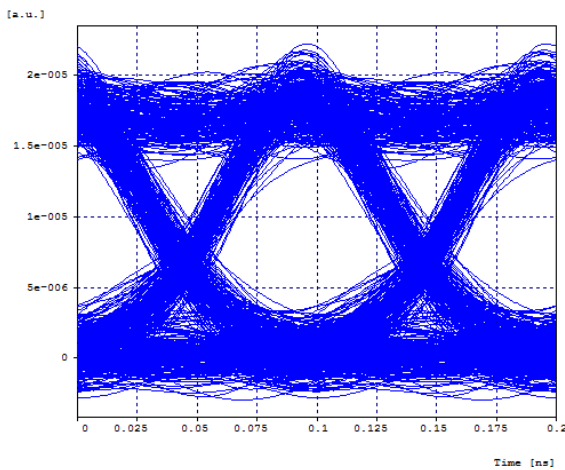


Figura 3.65 Diagrama del ojo para 114Km sin PMD de la fibra LEAF

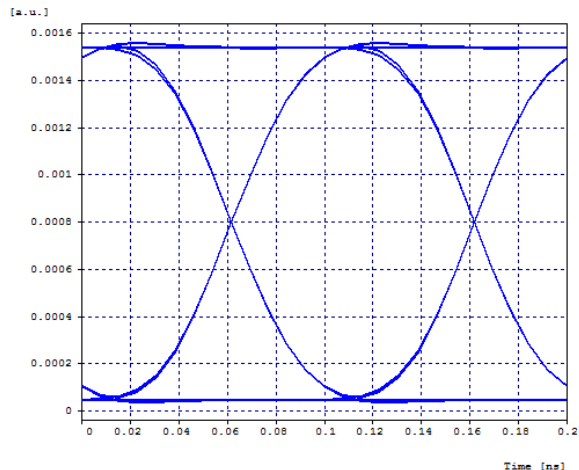


Figura 3.66 Diagrama del ojo para 114Km solo con PMD de la fibra LEAF

| SIMULACIÓN | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{OUT} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|-----------------------------|---------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Con todas las degradaciones | 16.7574 | 3.1053×10^{-12} | 18.6614 | -21.8206 |
| Sin PMD | 16.7574 | 3.1053×10^{-12} | 18.6614 | -21.8206 |
| Solo con PMD | 37.4787 | 1×10^{-40} | 24.4745 | -1.5180 |

Tabla 3.26 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de la PMD de la fibra óptica LEAF

Al comparar la Figura 3.62 con la Figura 3.63, las cuales muestran el diagrama del ojo en presencia y ausencia de PMD, se observa que son iguales, la Tabla 3.26 comprueba

dicha afirmación. Esto se debe a que la fibra óptica introduce un valor de PMD muy pequeño ($0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$), por lo tanto se procede a variar los valores de PMD para establecer la máxima tolerancia.

| VALOR DE PMD (ps/ $\sqrt{\text{Km}}$) | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{OUT} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|---|---------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 5 | 21.4314 | 9.3812×10^{-32} | 24.4719 | -1.5794 |
| 6.5 | 17.7148 | 2.0898×10^{-14} | 24.4636 | -1.6249 |
| 7 | 14.3981 | 8.0526×10^{-8} | 24.4817 | -1.5408 |

Tabla 3.27 Parámetros de monitoreo para diferentes valores de PMD de la fibra óptica LEAF

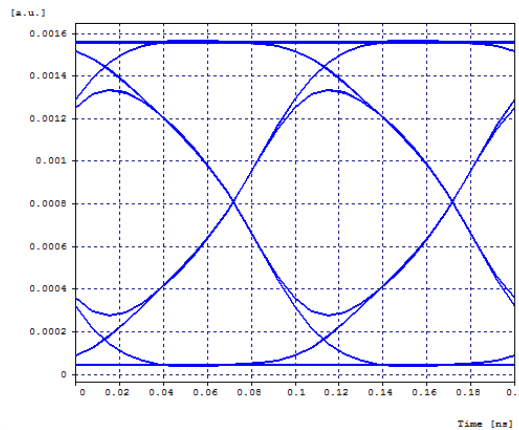


Figura 3.67 Diagrama del ojo para 87Km solo con PMD=6.5ps/ $\sqrt{\text{Km}}$ de la fibra óptica LEAF

Para una red DWDM de 117 Km con una potencia de 5dBm, a 10Gb/s y fibra óptica LEAF, la PMD es una degradación de bajo o nulo impacto en el desempeño de la red, ya que esta es muy baja ($0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$). Con una PMD mucho más alta, alrededor de los $6.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$ el factor Q y la BER se empiezan a degradar significativamente, afectando el desempeño de la red, por lo tanto se puede concluir que la red es altamente tolerable a los efectos de la PMD.

3.5 Caso de estudio 4, fibra óptica DeepLight™

Al escenario de simulación se introduce la fibra óptica DeepLight™ configurada con los parámetros preestablecidos por su fabricante Pirrelli dados en la Tabla 2.1, de este modo se procede a realizar los respectivos análisis.

3.5.1 Distancia máxima alcanzable

Para realizar el análisis de la distancia máxima alcanzable se procede a variar la potencia de transmisión entre -5dBm, 0dBm, 5dBm, 10dBm, 15dBm, y 30dBm. Se deben tener en cuenta para simular todas las degradaciones ópticas como atenuación, ruido, PMD, CD y efectos no lineales.

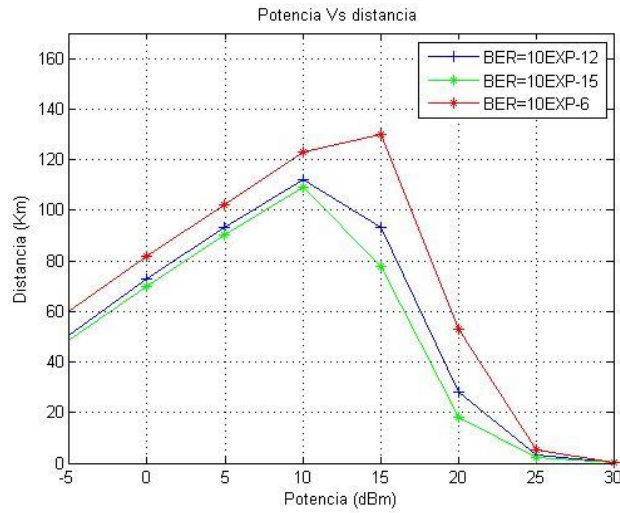


Figura 3.68 Distancia máxima alcanzable para la red con la fibra óptica DeepLight™

Teniendo en cuenta el parámetro de diseño de la ITU-T de la Figura 3.68, para una BER de 10^{-12} la máxima distancia se obtiene con una potencia de transmisión de 10dBm alcanzando un enlace de 112km, un operador de telecomunicaciones que maneja unos factores de calidad altos (BER= 10^{-15}) se alcanzaría una distancia de 109Km y una red con una calidad aceptable de transmisión (BER= 10^{-6}) la distancia máxima es de 130Km.

Al igual que los anteriores casos de estudio para evitar la introducción de efectos no lineales se trabaja con una potencia de 5dBm con la cual se alcanza una distancia máxima de 93Km, los parámetros de monitoreo óptico obtenidos se muestran desde la Figura 3.69 hasta la Figura 3.73.

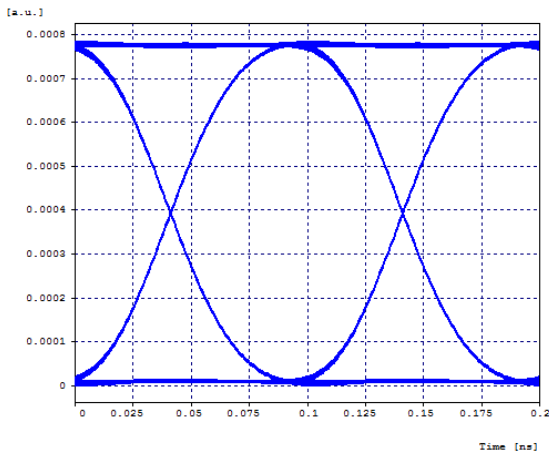


Figura 3.69 Diagrama del ojo sin degradaciones ópticas con la fibra óptica DeepLight™

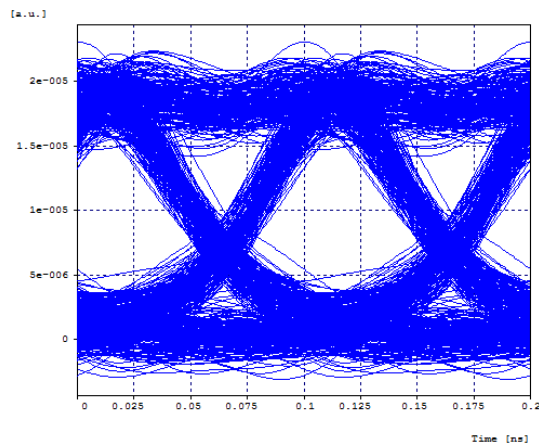


Figura 3.70 Diagrama del ojo tras un tramo de 93Km de fibra óptica DeepLight™

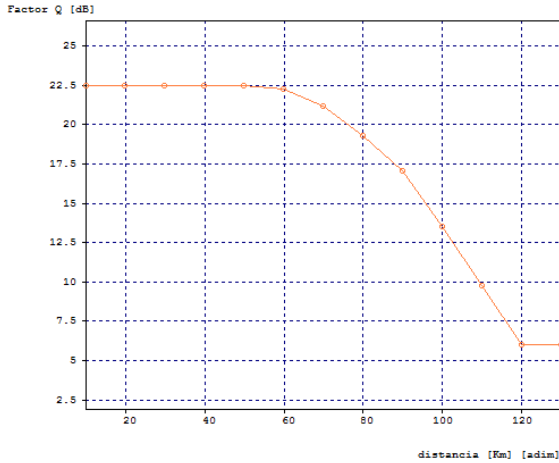


Figura 3.71 Factor Q vs distancia de transmisión para la red con fibra óptica DeepLight™

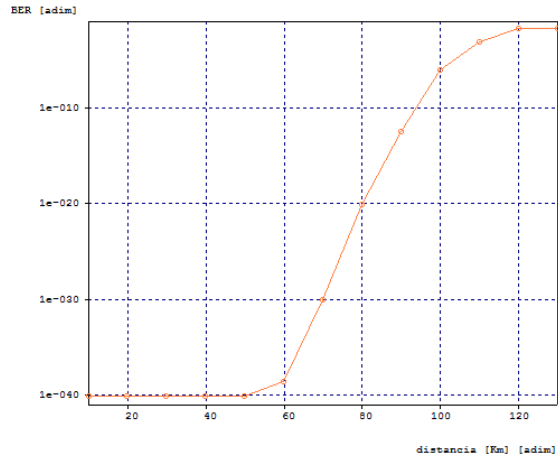


Figura 3.72 BER vs distancia de transmisión para la red con fibra óptica DeepLight™

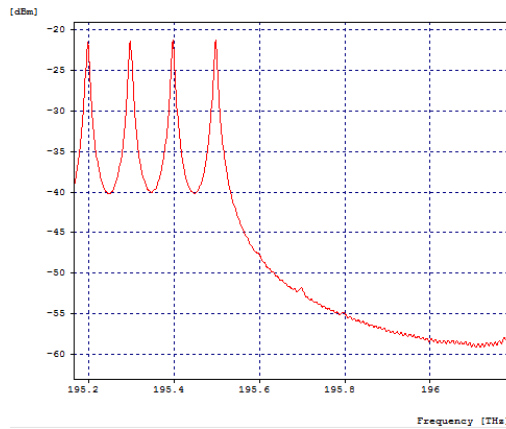


Figura 3.73 Espectro óptico en Recepción a una distancia máxima de 93Km con un potencia promedio de recepción por Canal del orden de los -21dBm para la fibra óptica DeepLight™

3.5.2 Análisis de la atenuación

La fibra óptica DeepLight™ por si sola introduce una atenuación menor o igual a 0.23dB/Km, por lo tanto al variar la distancia desde los 40Km hasta 93Km se genera un rango de atenuación de 9.2dB hasta 21.39dB.

Para el análisis de la atenuación se comparan las distancias máximas obtenidas en presencia de todas las degradaciones ópticas (ver Tabla 3.28) con las distancias máximas obtenidas teniendo en cuenta solo las pérdidas de la fibra (ver Tabla 3.29), para las potencias de -5dBm, 5dBm, 15dBm y 30dBm.

| POTENCIA (dBm) | DISTANCIA (Km) | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{in} (dB) | OSNR _{out} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|----------------|----------------|---------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| -5 | 51 | 17.0546 | 9.5082x10 ⁻¹³ | 30.9893 | 18.5454 | -21.9695 |
| 5 | 93 | 16.8014 | 6.9922x10 ⁻¹² | 30.9893 | 18.7033 | -21.4706 |

| | | | | | | |
|----|-----|---------|--------------------------|---------|---------|----------|
| 10 | 112 | 16.9923 | 8.0619×10^{-13} | 30.9893 | 18.6172 | -20.9277 |
| 15 | 93 | 16.9904 | 5.0742×10^{-12} | 30.9893 | 18.6172 | -20.9277 |
| 30 | 0.1 | 19.8202 | 5.9160×10^{-23} | 30.9893 | 19.2443 | 25.4668 |

Tabla 3.28 Máximas distancias obtenidas en presencia de todas las degradaciones ópticas de la fibra óptica DeepLight™

| POTENCIA (dBm) | DISTANCIA (Km) | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{in} (dB) | OSNR _{out} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|----------------|----------------|---------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| -5 | 52 | 16.9638 | 2.5447×10^{-12} | 30.9893 | 18.6413 | -22.1090 |
| 5 | 96 | 16.7254 | 9.5723×10^{-12} | 30.9893 | 18.6413 | -22.2290 |
| 10 | 117 | 17.0630 | 1.4335×10^{-12} | 30.9893 | 18.6413 | -22.0590 |
| 15 | 139 | 16.9439 | 2.8497×10^{-12} | 30.9893 | 18.6413 | -22.1190 |
| 30 | 204 | 17.0432 | 1.6095×10^{-12} | 30.9893 | 18.6413 | -22.0690 |

Tabla 3.29 Máximas distancias obtenidas en presencia solo de la atenuación de la fibra óptica DeepLight™

Si solamente la atenuación estuviese presente en la red se puede decir que la potencia es directamente proporcional a la distancia del enlace, sin embargo cuando se introducen las demás degradaciones ópticas esta linealidad se pierde, lo cual se refleja claramente en la Tabla 3.28 y la Tabla 3.29, en donde al transmitir con 30dBm se pasa de 0.1Km con todas las degradaciones a 204Km de distancia cuando solo está presente la atenuación de la fibra (ver Figura 3.74).

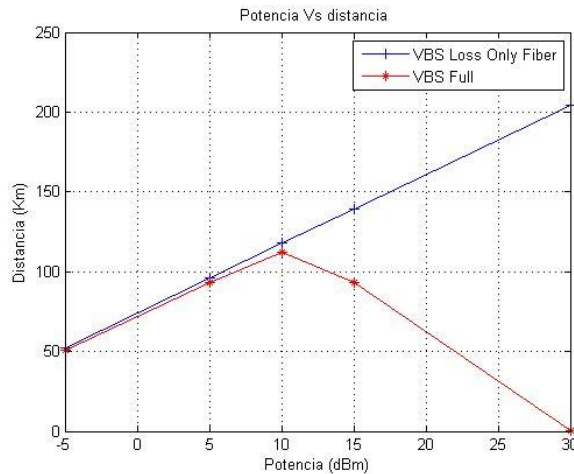


Figura 3.74 Potencia de transmisión vs distancia para la red con fibra óptica DeepLight™

Ahora para observar más de cerca la atenuación se deja fija la distancia máxima (93km) con una potencia de 5dBm y se observa como la red se comporta en presencia y ausencia de la atenuación, la Figura 3.75, Figura 3.76, Figura 3.77 y la Tabla 3.30 muestran dichos resultados.

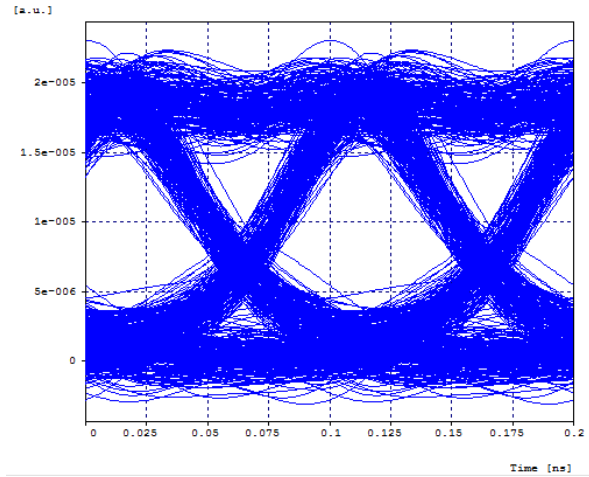


Figura 3.75 Diagrama del ojo para 93Km de DeepLight™ en presencia de todas las degradaciones ópticas

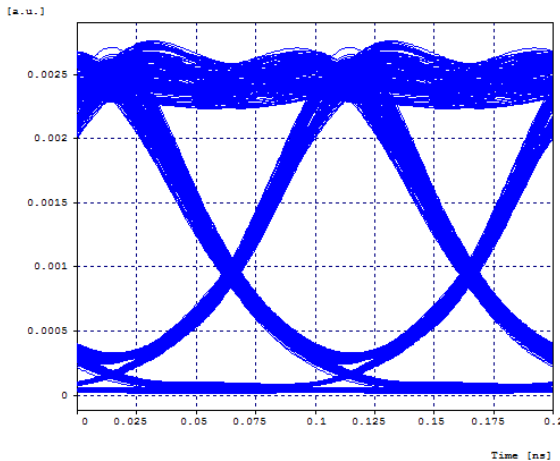


Figura 3.76 Diagrama del ojo para 93Km sin atenuación de la fibra DeepLight™

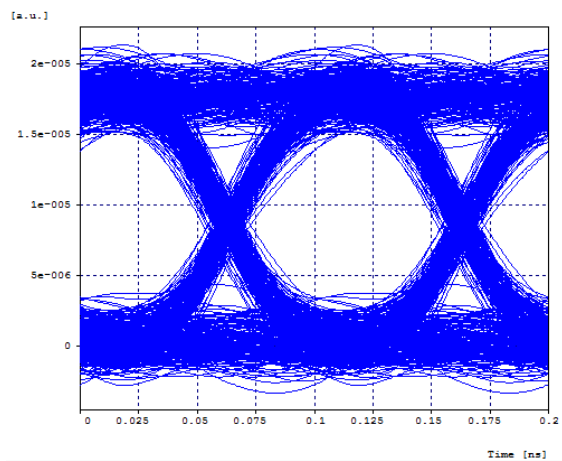


Figura 3.77 Diagrama del ojo para 93Km solo con atenuación de la fibra DeepLight™

| SIMULACIÓN | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{OUT} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|-----------------------------|---------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Con todas las degradaciones | 16.8014 | 6.9922×10^{-12} | 18.7033 | -21.4706 |
| Sin Atenuación | 23.1412 | 1×10^{-40} | 18.5141 | -0.2674 |
| Solo con Atenuación | 18.0939 | 1.5865×10^{-15} | 32.5514 | -21.5508 |

Tabla 3.30 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de la atenuación de la fibra DeepLight™

De la Tabla 3.30 es claro que el desempeño de la red se ve seriamente afectado por la atenuación introducida por la fibra DeepLight™, cuando se suprime la atenuación de la fibra el factor Q pasa de 16,8 dB a 23.14dB y la BER pasa de 6.99×10^{-12} a 1×10^{-40} .

Por lo tanto se puede concluir que la atenuación introducida por la fibra DeepLight™ se constituye como una degradación significativa en el desempeño de la red.

3.5.3 Análisis de la dispersión cromática

Para determinar el efecto de la dispersión cromática se configura la red con una potencia de 5dBm y una distancia de 93Km, que corresponde a la máxima distancia alcanzada por la red en presencia de todas las degradaciones ópticas.

Posteriormente se realizan los siguientes análisis:

- ✓ Se determina el desempeño de la red sin CD y solo con CD.
- ✓ Se calcula la CD acumulada en la red.
- ✓ Se observa que produce la compensación de la CD en la red.

3.5.3.1 Desempeño de la red sin CD y solo con CD

Al igual que los casos de estudio anteriores se prueba el comportamiento de la red en presencia o ausencia de CD en la fibra óptica DeepLight™, y así se determinara cuál es su impacto en el desempeño de la red. La muestran el diagrama de ojo, BER, factor Q y jitter en: presencia de todas las degradaciones ópticas, ausencia de la CD y presencia solo de la CD respectivamente.

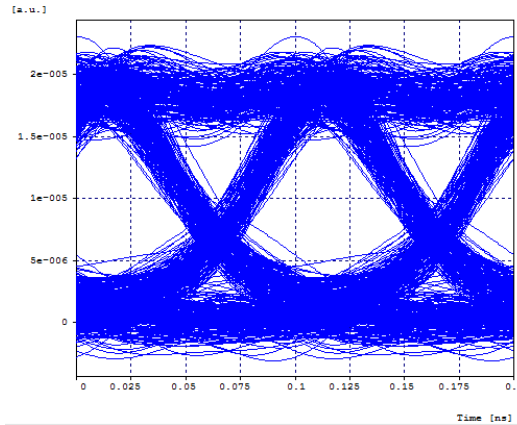


Figura 3.78 Diagrama del ojo para 93Km de DeepLight™ en presencia de todas las degradaciones ópticas

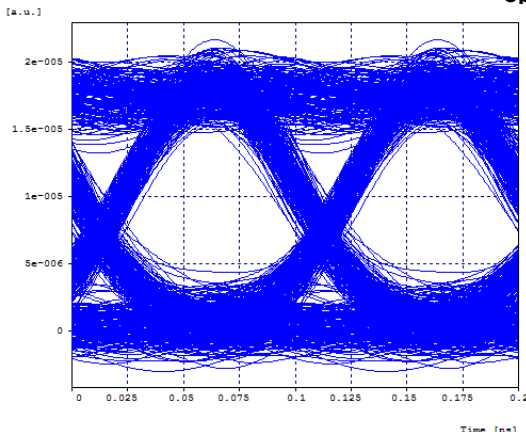


Figura 3.79 Diagrama del ojo para 93Km sin CD de la fibra DeepLight™

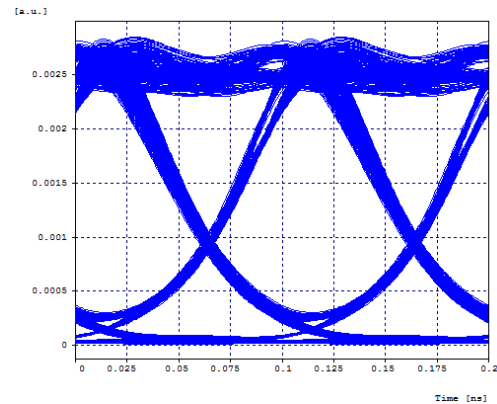


Figura 3.80 Diagrama del ojo para 93Km solo con CD de la fibra DeepLight™

| SIMULACIÓN | FACTOR Q (dB) | BER | Jitter (ns) |
|-----------------------------|---------------|--------------------------|-------------|
| Con todas las degradaciones | 16.8014 | 6.9922×10^{-12} | 0.0256284 |
| Sin CD | 17.3629 | 3.0216×10^{-13} | 0.0192289 |
| Solo Con CD | 23.0328 | 1×10^{-40} | 0.0168845 |

Tabla 3.31 Parámetros de monitoreo para la red en presencia y ausencia de CD de la fibra DeepLight™

La CD introducida por la fibra DeepLight™ no afecta sustancialmente el desempeño de la red, de la Tabla 3.31 se observa como el factor Q y la BER permanecen con valores próximos en presencia de todas las degradaciones y suprimiendo la CD. Por lo tanto se puede concluir que este tipo de fibra presenta alta tolerancia a la CD y por ello el desempeño de la red es bueno frente a este fenómeno.

3.5.3.2 Cálculo de la CD acumulada en la red

Para determinar la CD acumulada en la red, se realiza matemáticamente como se mostró en la ecuación 1.14 se asocia la máxima longitud alcanzada (93km) para un span de fibra óptica y la CD de la fibra (-3.4ps/nm*Km) así:

$$D_{link}(\lambda) = 93km \left[\frac{-3.4ps}{nm * km} + \frac{0.056ps}{nm^2 * km} (1536.6022nm - 1550nm) \right] \\ = -237.2375ps/nm$$

Por lo tanto la máxima CD acumulada en la red de -237.2375ps/nm.

3.5.3.3 Efecto de la compensación de la CD en la red

Debido a que la dispersión cromática acumulada en la red es baja, no es necesario realizar la compensación, ya que de hacerlo se aumentarían otros tipos de efectos. Si se desea mejorar los parámetros de calidad se recomienda mitigar la atenuación, para ello se introduce un amplificador tipo EDFA con una potencia de 0dBm (ver Tabla 3.32)

| FACTOR Q (dB) | BER | Jitter (ns) | OSNR _{in} (dB) | OSNR _{out} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|---------------|--------------------------|-------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 22.1993 | 6.0143×10^{-38} | 0.0170531 | 30.9893 | 32.5615 | -7.1243 |

Tabla 3.32 Parámetros de monitoreo óptico con un amplificador EDFA y fibra óptica DeepLight™

3.5.4 Análisis de la PMD

Para determinar el impacto de la PMD introducido por la fibra DeepLight™ cuyo valor típico es de 0.1ps/√Km a una distancia de 93Km, se comparan los parámetros de monitoreo obtenidos en presencia de todas las degradaciones ópticas con los parámetros de monitoreo de la red en ausencia de PMD y la red solo con la degradación PMD.

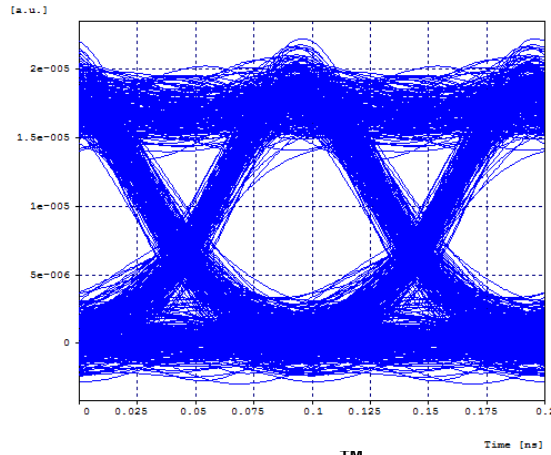


Figura 3.81 Diagrama del ojo para 93Km de DeepLight™ en presencia de todas las degradaciones ópticas

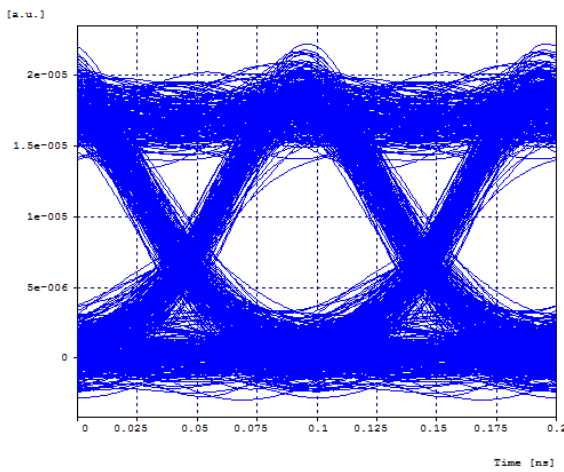


Figura 3.82 Diagrama del ojo para 93Km sin PMD de la fibra DeepLight™

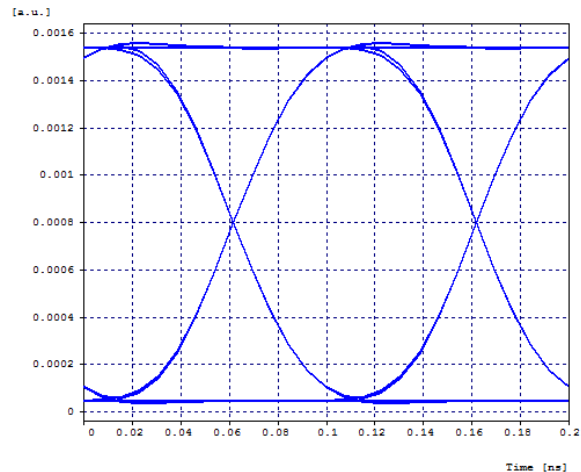


Figura 3.83 Diagrama del ojo para 93Km solo con PMD de la fibra DeepLight™

| SIMULACIÓN | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{OUT} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|-----------------------------|---------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Con todas las degradaciones | 16.7574 | 3.1053×10^{-12} | 18.6614 | -21.8206 |
| Sin PMD | 16.7574 | 3.1053×10^{-12} | 18.6614 | -21.8206 |
| Solo con PMD | 32.1909 | 1×10^{-40} | 18.5928 | -0.2099 |

Tabla 3.33 Parámetros de monitoreo en presencia y ausencia de la PMD de la fibra óptica DeepLight™

| VALOR DE PMD (ps/√Km) | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{OUT} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|-----------------------|---------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 5 | 19.3808 | 4.1627×10^{-20} | 24.4514 | -1.6757 |
| 6.5 | 17.3480 | 2.4205×10^{-13} | 24.4591 | -1.5848 |
| 6 | 14.8722 | 2.3434×10^{-8} | 24.4796 | -1.5289 |

Tabla 3.34 Parámetros de monitoreo para diferentes valores de PMD de la fibra óptica LEAF

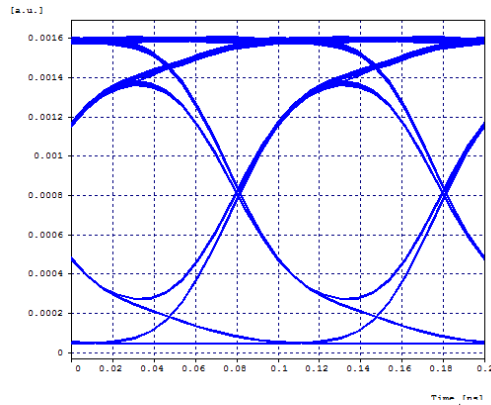


Figura 3.84 Diagrama del ojo para 87Km solo con $PMD=6.5ps/\sqrt{Km}$ de la fibra óptica LEAF

Como se puede observar en la Figura 3.81, Figura 3.82 y Tabla 3.33, los parámetros de monitoreo óptico no cambian de manera significativa, se requiere una variación de la PMD en la fibra en la fibra (ver Figura 3.84 y

Tabla 3.34) para que el factor Q y la BER se degraden significativamente. Por lo tanto se puede concluir que la red es altamente tolerante ante el efecto lineal PMD.

4 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LAS FIBRAS ÓPTICAS SMF-28, SMF-28e+, LEAF Y DeepLight™ SOBRE UNA RED WDM A 10Gb/s

Una vez realizado el análisis del impacto de las fibras SMF-28, SMF-28e+, LEAF y DeepLight™ sobre el desempeño de la red DWDM, se procede a compararlas para determinar cuál presenta mejor desempeño frente a las degradaciones ópticas (atenuación, CD y PMD); para dicho propósito se configura la red con una potencia de 5dBm y una distancia de 87Km.

4.1 Distancia máxima alcanzada

De la figura 4.1 a la figura 4.3 se pueden observar las distancias obtenidas con las diferentes fibras ópticas, para un rango de potencias de -5dBm a 30dBm.

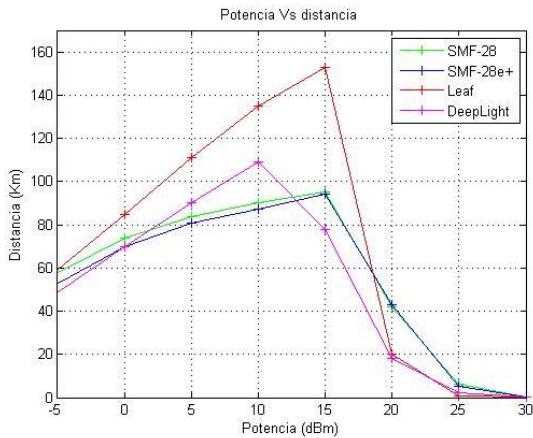


Figura 4.1 Distancia máxima de las diferentes fibras para una BER=10⁻¹⁵

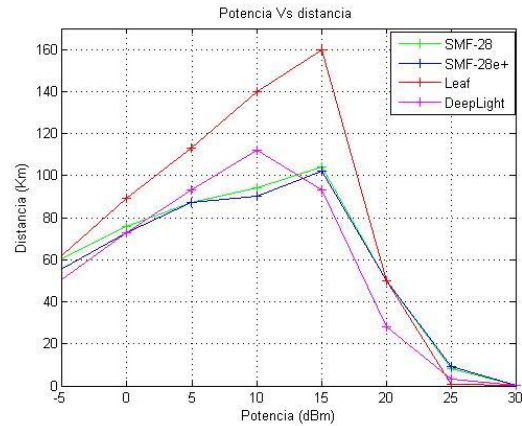


Figura 4.2 Distancia máxima de las diferentes fibras para una BER=10⁻¹²

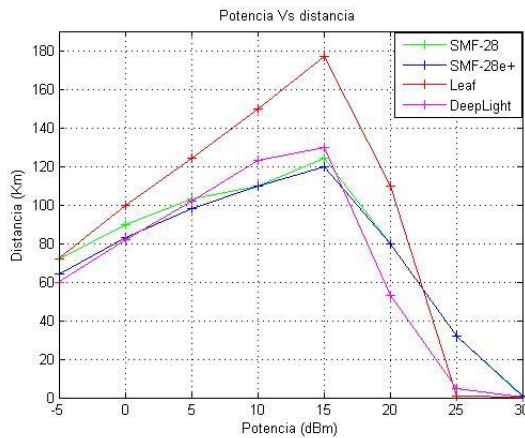


Figura 4.3 Distancia máxima de las diferentes fibras para una BER=10⁻⁶

En todas las fibras ópticas a medida que se incrementa la potencia de transmisión la distancia del enlace también aumenta, sin embargo para una BER de 10⁻¹² se presentan dos disminuciones abruptas en la distancia del enlace, la primera ocurre cuando se

emplea la fibra DeepLight™ y se transmite con potencias superiores a 10dBm; posteriormente la segunda se genera cuando se transmite con una potencia superior a 15dBm y se emplean las fibras SMF-28, SMF-28e+ y LEAF para el enlace. Lo cual quiere decir que no todas las fibras ópticas se comportan igual a diferentes valores de potencias, siendo necesario prestar mayor atención a este parámetro de diseño.

Por otro lado de las gráficas anteriores se observa que para diferentes valores de BER la fibra LEAF es la que mayor distancia alcanza, seguida por las fibras DeepLight™, SMF-28 y la SMF-28e+, las últimas alcanzan distancias máximas muy similares debido a que sus valores de atenuación, CD y PMD son muy próximos. En la Tabla 4.1 se puede apreciar los parámetros de monitoreo óptico para las diferentes fibras ópticas con sus máximas distancias que cumplen con una BER=10⁻¹² (se resalta en amarillo los parámetros de la fibra LEAF).

| Fibra óptica | Distancia (Km) | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{OUT} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|--------------|----------------|----------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| SMF-28 | 87 | 16.6581 | 5.9929x10 ⁻¹² | 18.5794 | -16.2173 |
| SMF-28e+ | 87 | 16.5606 | 8.4764x10 ⁻¹² | 18.5882 | -17.8831 |
| LEAF | 114 | 16.7574 | 3.1053x10⁻¹² | 18.6618 | -21.8206 |
| DeepLight™ | 93 | 16.8014 | 6.9922x10 ⁻¹² | 18.7033 | -21.4706 |

Tabla 4.1 Distancias máximas de las fibras ópticas para una potencia de 5dBm y una BER de 10⁻¹²

Se puede concluir que las fibras NZ-DSF (LEAF y DeepLight™) presentan mejor comportamiento frente a las fibras SMF (SMF-28 y SMF-28e+), de este modo para una potencia de transmisión de 5dBm y una BER de 10⁻¹² la fibra óptica LEAF alcanza una distancia máxima de 114Km, 27Km por encima de las fibras SMF-28 y SMF-28e+ cuyas distancias son de 87Km. La fibra óptica DeepLight™ logra un enlace de 93Km, 6Km mas que las fibras SMF-28, SMF-28e+ y 21Km menos que la tipo LEAF.

4.2 Análisis de la atenuación

Cada fibra óptica introduce una atenuación a la red de: 0.18dB/km para la SMF-28, 0.19dB/km para la LEAF, 0.20dB/km para la fibra SMF-28e+ y 0.23dB/Km para la fibra DeepLight™. Al igual que en el capítulo anterior se procede a comparar la red en presencia y ausencia de la atenuación, con los diferentes tipos de fibra óptica.

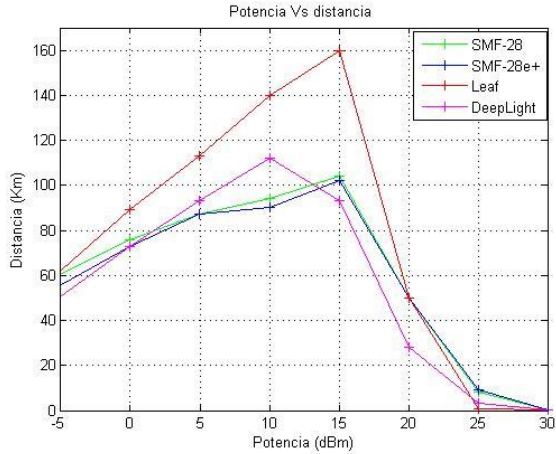


Figura 4.4 Distancias máximas en presencia de todas las degradaciones

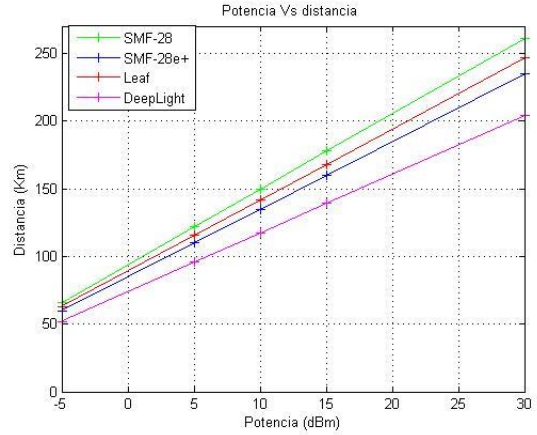


Figura 4.5 Distancias máximas únicamente con atenuación

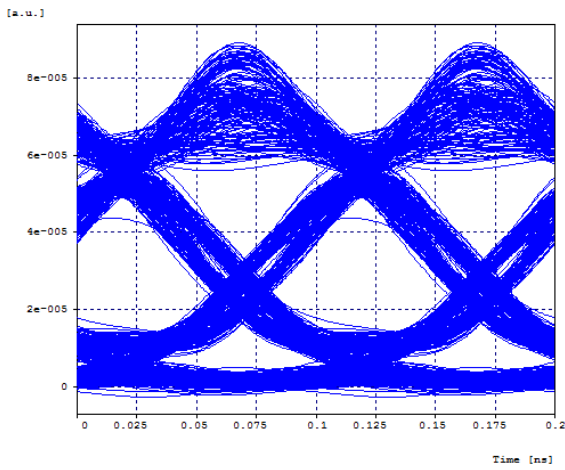


Figura 4.6 Diagrama del ojo en presencia de todas las degradaciones con la fibra SMF-28

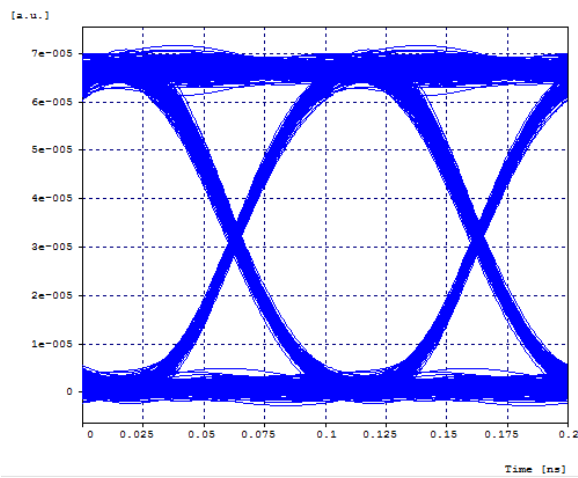


Figura 4.7 Diagrama del ojo solo con atenuación de la fibra SMF-28

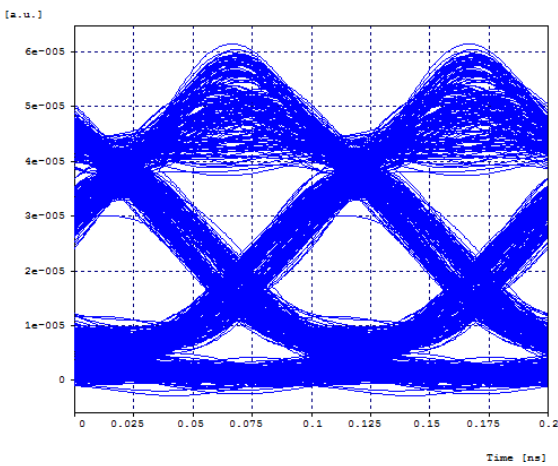


Figura 4.8 Diagrama del ojo en presencia de todas las degradaciones con la SMF-28e+

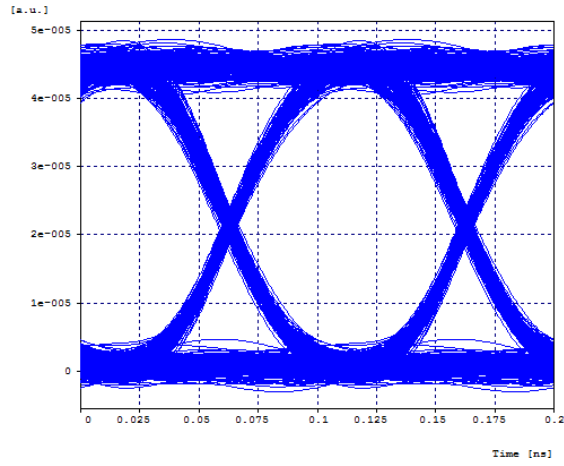


Figura 4.9 Diagrama del ojo solo con atenuación de la fibra SMF-28e+

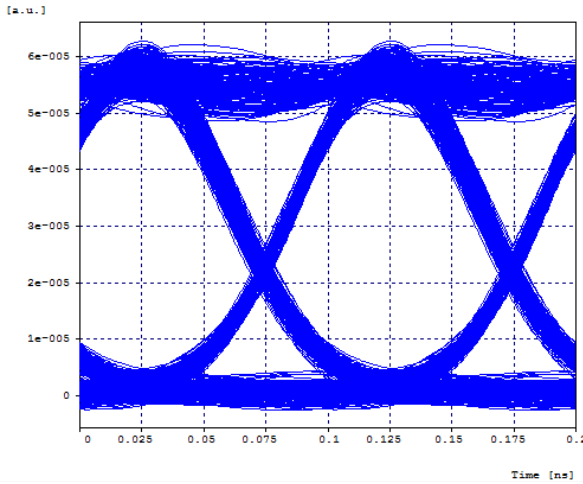


Figura 4.10 Diagrama del ojo en presencia de todas las degradaciones con la fibra LEAF

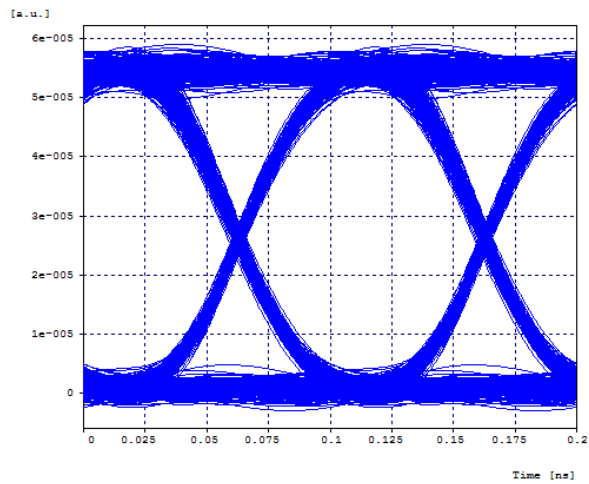


Figura 4.11 Diagrama del ojo solo con atenuación de la fibra LEAF

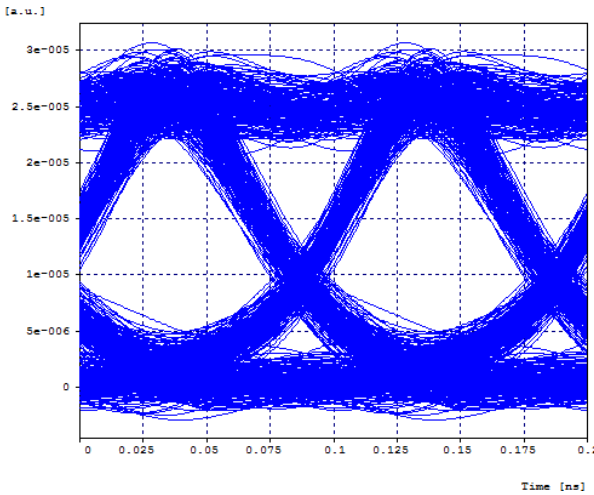


Figura 4.12 Diagrama del ojo en presencia de todas las degradaciones con la fibra DeepLight™

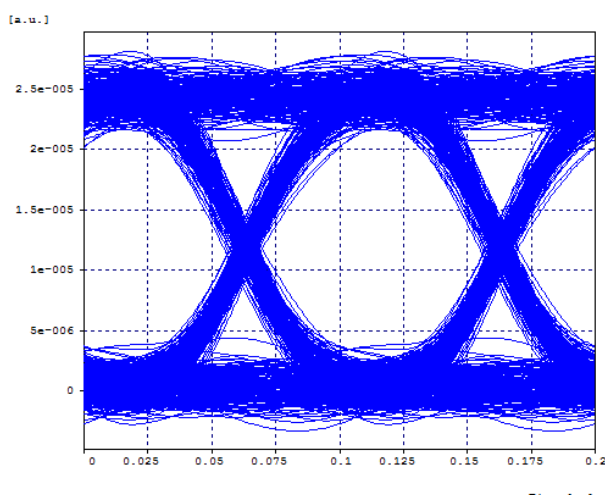


Figura 4.13 Diagrama del ojo solo con atenuación de la fibra DeepLight™

| Fibra óptica | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{OUT} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|--------------|---------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| SMF-28 | 16.7581 | 5.9929×10^{-12} | 18.5794 | -16.2173 |
| SMF-28e+ | 16.5606 | 8.4764×10^{-12} | 18.5882 | -17.8831 |
| LEAF | 23.8863 | 1×10^{-40} | 18.5990 | -16.7538 |
| DeepLight™ | 18.2599 | 9.8347×10^{-16} | 18.7271 | -20.0841 |

Tabla 4.2 Parámetros de monitoreo óptico para las diferentes fibras ópticas para un enlace de 87km, en presencia de todas las degradaciones ópticas

| Fibra óptica | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{OUT} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|--------------|---------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| SMF-28 | 29.0188 | 1×10^{-40} | 18.6413 | -15.8090 |
| SMF-28e+ | 25.8342 | 1×10^{-40} | 18.6413 | -17.5490 |
| LEAF | 27.4495 | 1×10^{-40} | 18.6413 | -16.6790 |
| DeepLight™ | 20.8113 | 7.4185×10^{-28} | 18.6413 | -20.1590 |

Tabla 4.3 Parámetros de monitoreo óptico para las diferentes fibras ópticas para un enlace de 87km, en presencia únicamente de la atenuación

Al comparar el desempeño de las fibras frente a la atenuación, se observa de la Tabla 4.3 que la fibra que presenta mayor tolerancia a la atenuación es la SMF-28 seguida por la LEAF, SMF-28e+ y DeepLight™, debido a que su índice de atenuación es menor que las demás fibras. Por otro lado la fibra DeepLight™ es la que peor comportamiento presenta, es causado porque presenta un índice de atenuación alto de 0.23dB/Km.

4.3 Análisis de la dispersión cromática

Cada fibra óptica presenta una dispersión de: 18ps/(nm x km) para las fibras SMF-28 y SMF-28e+, 5.5ps/(nm x km) para la fibra LEAF y -3.4ps/(nm x km) para la fibra DeepLight™. Al igual que en el capítulo anterior se procede a comparar los parámetros de monitoreo obtenidos al simular la red en presencia de todas las degradaciones (Figura 4.6) con la red sin CD (Figura 4.14, Figura 4.16, Figura 4.18, Figura 4.20 y Tabla 4.5) y solo CD (Figura 4.15, Figura 4.17, Figura 4.19, Figura 4.21 y Tabla 4.6).

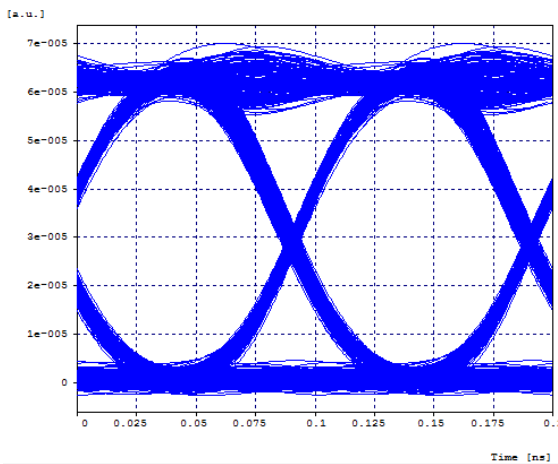


Figura 4.14 Diagrama del ojo para 87Km sin CD de la fibra SMF-28

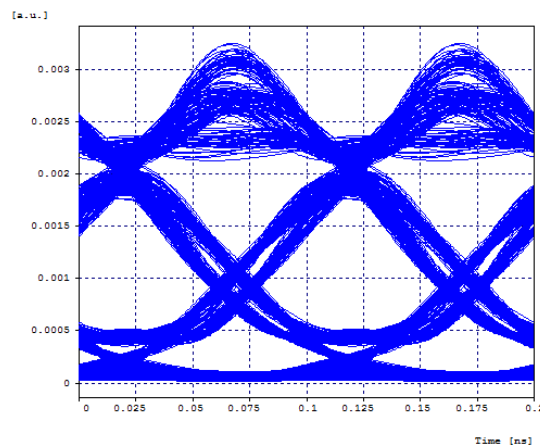


Figura 4.15 Diagrama del ojo para 87Km solo con CD de la fibra SMF-28

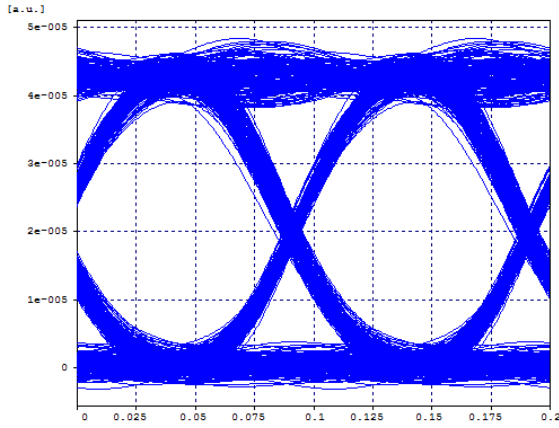


Figura 4.16 Diagrama del ojo para 87Km sin CD de la fibra SMF-28e+

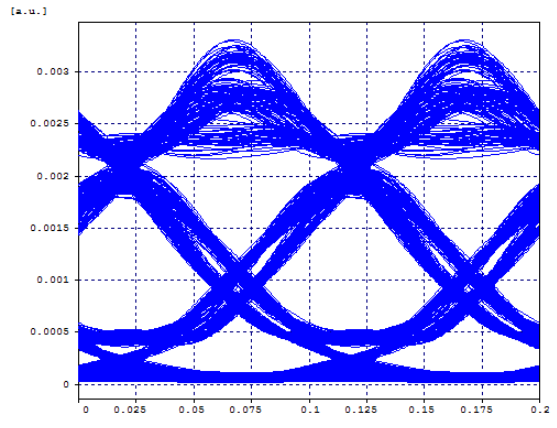


Figura 4.17 Diagrama del ojo para 87Km solo con CD de la fibra SMF-28e+

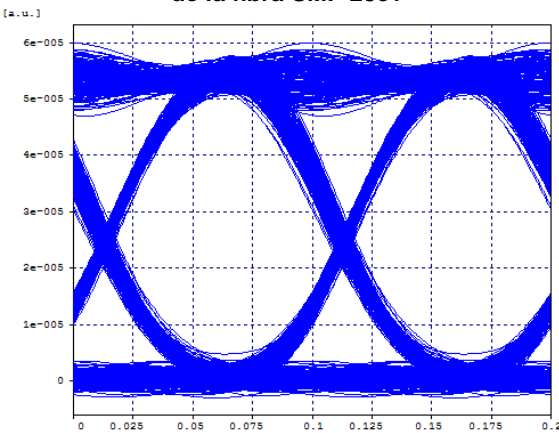


Figura 4.18 Diagrama del ojo para 87Km sin CD de la fibra LEAF

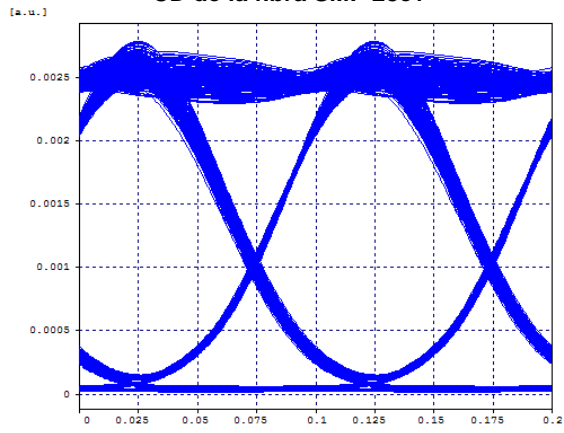


Figura 4.19 Diagrama del ojo para 87Km solo con CD de la fibra LEAF

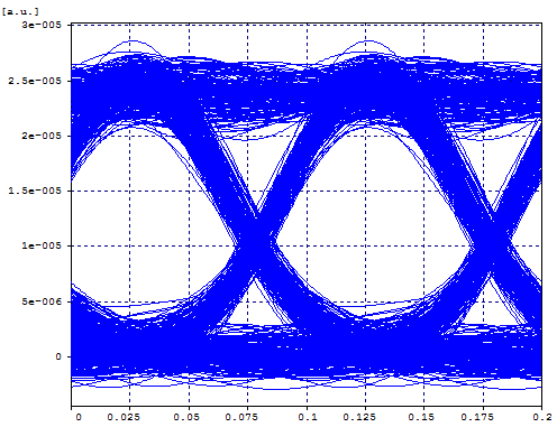


Figura 4.20 Diagrama del ojo para 87Km sin CD de la fibra DeepLight™

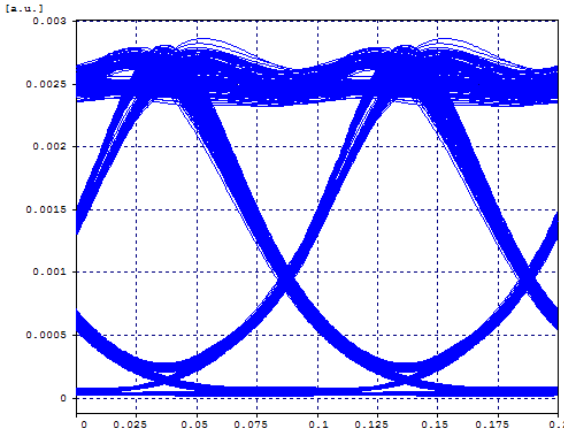


Figura 4.21 Diagrama del ojo para 87Km solo con CD de la fibra DeepLight™

| FIBRA ÓPTICA | FACTOR Q (dB) | BER | Jitter (ns) |
|--------------|----------------|---------------------------------------|-----------------|
| SMF-28 | 27.7191 | 1×10^{-40} | 0.0199466 |
| SMF-28e+ | 24.7827 | 1×10^{-40} | 0.0203804 |
| LEAF | 26.5947 | 1×10^{-40} | 0.190903 |
| DeepLight™ | 19.6248 | 9.8347×10^{-16} | 0.0169452 |

Tabla 4.4 Parámetros de monitoreo óptico para las diferentes fibras ópticas para un enlace de 87km, sin CD

| FIBRA ÓPTICA | FACTOR Q (dB) | BER | Jitter (ns) |
|--------------|----------------|---------------------------------------|------------------|
| SMF-28 | 16.8193 | 3.9869×10^{-12} | 0.027759 |
| SMF-28e+ | 16.8193 | 3.9866×10^{-12} | 0.027759 |
| LEAF | 26.2958 | 1×10^{-40} | 0.0154406 |
| DeepLight™ | 23.4455 | 1×10^{-40} | 0.0158102 |

Tabla 4.5 Parámetros de monitoreo óptico para las diferentes fibras ópticas para un enlace de 87km, en presencia únicamente de la CD

Al comparar los valores obtenidos de la fibra óptica SMf-28 en presencia y ausencia de la CD, se puede notar que esta degradación es un factor determinante en los parámetros de monitoreo como la BER y el factor Q. De este modo cuando se suprime la CD estos mejoran pasando de tener una BER de 5.9929×10^{-12} a una de 1×10^{-40} y un factor Q de 16.7581dB a uno de 27.7191dB. Cuando se realiza este mismo procedimiento a la fibra SMF-28e+ ocurre lo mismo, sin CD la BER pasa de 8.4764×10^{-12} a una de 1×10^{-40} y un factor Q de 16.5606dB a 24.7827dB. Por lo tanto se puede inferir que estas fibras son altamente susceptibles a la CD, haciendo que se deteriore considerablemente el desempeño de la red.

Mientras que en la fibra LEAF la presencia y ausencia de la CD genera cambios mínimos en el factor Q y la BER, ya que se pasa de un factor Q de 23.8863dB a uno de 26.5947dB y la BER permanece constante (1×10^{-40}). Al realizar el mismo análisis a la fibra DeepLight™ se puede ver que se comporta de manera similar pasando de un factor Q de 18.2599dB a uno de 19.6248dB y una BER constante de 9.8347×10^{-16} . De este modo se demuestra la alta tolerancia que presentan dichas fibras a esta degradación óptica.

De lo anterior se puede concluir que las fibras ópticas SMF (SMF-28 y SMF-28e+) presentan baja tolerancia a la CD por lo tanto las redes cableadas con dichas fibras requieren de técnicas de compensación de CD para mejorar su desempeño, mientras que las fibras ópticas NZ-DSF (LEAF y DeepLight™) son altamente tolerantes a la CD por ello se deja al criterio del diseñador si compensa o no la CD, ya que esto implica el uso de más dispositivos, incrementando el costo y la complejidad de la red.

4.3.1 Cálculo de la CD acumulada en la red

Con este cálculo matemático se establece cuál fibra óptica presenta mayor acumulación de CD para un enlace de 87Km.

- ✓ Fibra SMF-28

$$D_{link}(\lambda) = 87km \left[\frac{18ps}{nm} * km + \frac{0.056ps}{nm^2} * km(1536.6022nm - 1550nm) \right]$$

$$= 1500.7259ps/nm$$

La CD acumulada en la red es de 1500.7259ps/nm.

- ✓ Fibra SMF-28e+

$$D_{link}(\lambda) = 87km \left[\frac{18ps}{nm} * km + \frac{0.056ps}{nm^2} * km(1536.6022nm - 1550nm) \right]$$

$$= 1500.7259ps/nm$$

La CD acumulada en la red es de 1500.7259ps/nm.

- ✓ Fibra LEAF

$$D_{link}(\lambda) = 87km \left[\frac{5.5ps}{nm} * km + \frac{0.056ps}{nm^2} * km(1536.6022nm - 1550nm) \right]$$

$$= 359.0074ps/nm$$

La CD acumulada en la red es de 359.0074ps/nm.

- ✓ Fibra DeepLight™

$$D_{link}(\lambda) = 87km \left[\frac{-3.4ps}{nm} * km + \frac{0.056ps}{nm^2} * km(1536.6022nm - 1550nm) \right]$$

$$= -231.9072ps/nm$$

La CD acumulada en la red es de -231.9072ps/nm.

Las fibras SMF-28 y SMF-28e+ presentan igual CD acumulada (1500.7259ps/nm), lo que las hace igual de susceptibles a este efecto.

La fibra óptica LEAF presenta una CD acumulada baja (359.0074ps/nm), lo que la hace tolerable a este efecto.

La fibra óptica DeepLight™ presenta una CD acumulada negativa de -231.9072ps/nm lo que la hace robusta frente a este efecto.

4.3.2 Efecto de la compensación de la CD en la red

Debido a que las diferentes técnicas de compensación no presentan grandes diferencias entre sí, se optó por analizar las fibras ópticas utilizando post compensación al 75%, ya que este porcentaje de compensación es el que mejor resultados presenta.

La siguiente tabla muestra los parámetros de monitoreo óptico para las fibras ópticas con una distancia de 87km y post compensación al 75%, la fibra DeepLight™ no se compenso ya que la CD no es un factor crítico, solo se utilizó un amplificador tipo EDFA de 0dBm para mejorar sus parámetros de desempeño.

| Fibra | FACTOR Q (dB) | BER | Jitter (ns) | OSNR _{in} (dB) | OSNR _{out} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|------------|---------------|--------------------------|-------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| SMF-28 | 27.1583 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.017267 | 30.9893 | 32.4908 | -13.6031 |
| SMF-28e+ | 26.8238 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.0180302 | 30.9893 | 32.4810 | -13.6284 |
| LEAF | 32.6388 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 0.0205895 | 30.9893 | 32.4180 | -9.1949 |
| DeepLight™ | 22.1993 | 6.0143x10 ⁻³⁸ | 0.0170531 | 30.9893 | 32.5615 | -7.1243 |

Tabla 4.6 Parámetros de monitoreo óptico para una red de 87km con post compensación al 75%

De la figura 4.22 a la figura 4.24 se pueden apreciar los diagramas de ojo de las fibras ópticas compensadas al 75%.

La figura 4.25 muestra el diagrama del ojo de la fibra óptica DeepLight™ con un amplificador EDFA de 0dBm y una distancia de 87Km.

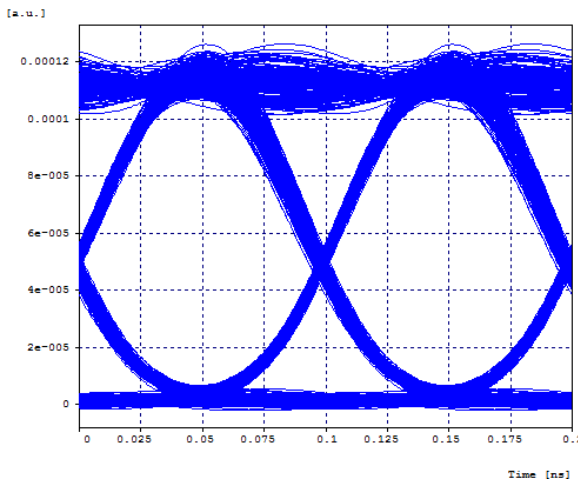


Figura 4.22 Diagrama del ojo fibra tipo SMF-28

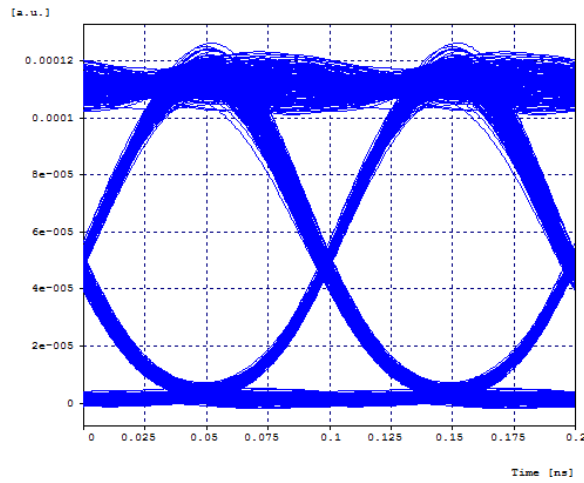


Figura 4.23 Diagrama del ojo fibra SMF-28e+

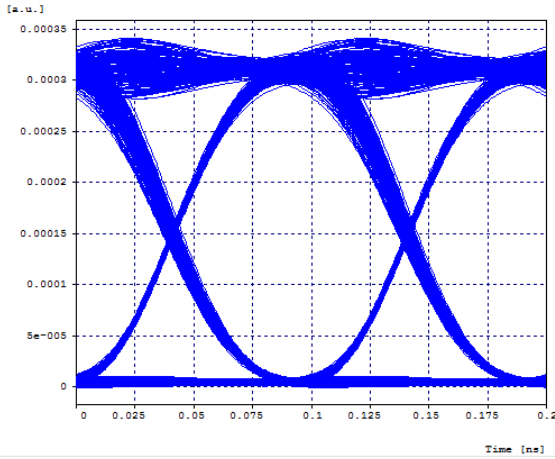


Figura 4.24 Diagrama del ojo fibra tipo LEAF

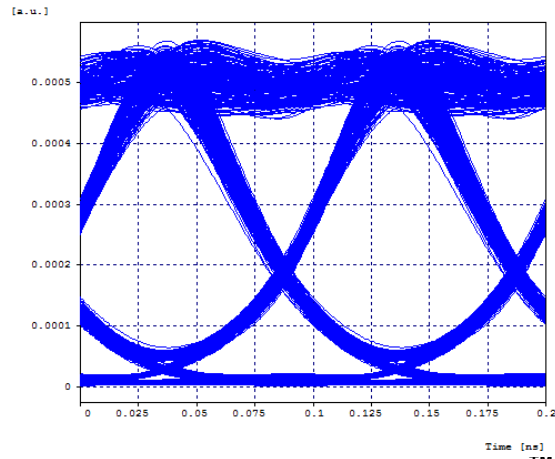


Figura 4.25 Diagrama del ojo fibra DeepLight™ únicamente con amplificador EDFA de 0dBm

Al utilizar la técnica de post compensación en las fibras ópticas se logra mejorar considerablemente los parámetros de monitoreo óptico, en la fibra LEAF se compensa la CD a pensar de que esta es altamente tolerable a este efecto, logrando así mejorar sus parámetros, pero más que por la compensación esta mejora se da es por el amplificador tipo EDFA, que soluciona su susceptibilidad a la atenuación. Al utilizar el amplificador tipo EDFA en la fibra DeepLight™ esta mejora sus parámetros de monitoreo óptico ya que su principal falencia es la atenuación.

4.4 Análisis de la PMD

Para este análisis se compara el desempeño de la red en presencia y ausencia de PMD, los resultados se encuentran en la Tabla 4.7 y tabla 4.8.

| Fibra óptica | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{OUT} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|--------------|---------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| SMF-28 | 16.6581 | 5.9929×10^{-12} | 18.5794 | -16.2173 |
| SMF-28e+ | 16.5606 | 8.4764×10^{-12} | 18.5882 | -17.8831 |
| LEAF | 23.8863 | 1×10^{-40} | 0.0161966 | 23.8863 |
| DeepLight™ | 18.2599 | 9.8347×10^{-16} | 0.01794 | 18.2599 |

Tabla 4.7 Parámetros de monitoreo óptico para una distancia de 87km con todas las degradaciones

| Fibra óptica | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{OUT} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|--------------|---------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| SMF-28 | 16.6581 | 5.9929×10^{-12} | 18.5794 | -16.2173 |
| SMF-28e+ | 16.5606 | 8.4764×10^{-12} | 18.5882 | -17.8831 |
| LEAF | 23.8863 | 1×10^{-40} | 0.0161966 | 23.8863 |
| DeepLight™ | 18.2599 | 9.8347×10^{-16} | 0.01794 | 18.2599 |

Tabla 4.8 Parámetros de monitoreo óptico para una distancia de 87km y PMD de 0ps/√km

Al comparar las dos tablas anteriores se puede ver que los valores obtenidos de los parámetros de monitoreo óptico son iguales, por lo tanto se puede decir que las diferentes fibras ópticas presentan un buen comportamiento frente a la PMD y esta no afecta a la red.

La Tabla 4.9 muestra el desempeño de las fibras ópticas con una PMD de 0.1ps/√Km, de esta se puede concluir que la PMD no se considera como una degradación de alto impacto, ya que el valor introducido es pequeño. Por tal razón se procederá a variar el valor de la PMD (ver Tabla 4.10, Tabla 4.11 y Tabla 4.12) para establecer la máxima tolerancia de la red a esta degradación.

| Fibra óptica | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{OUT} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|--------------|---------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|
| SMF-28 | 37.5282 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 24.4742 | -1.5209 |
| SMF-28e+ | 37.5280 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 24.4742 | -1.5209 |
| LEAF | 37.4787 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 24.4745 | -1.5180 |
| DeepLight™ | 34.2181 | 1x10 ⁻⁴⁰ | 24.4533 | -1.6466 |

Tabla 4.9 Parámetros de monitoreo óptico para una distancia de 87Km únicamente con PMD de 0.1ps/√km

| Fibra óptica | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{OUT} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|--------------|---------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| SMF-28 | 21.4284 | 1.0165x10 ⁻³¹ | 24.4718 | -1.5795 |
| SMF-28e+ | 21.4284 | 1.0173x10 ⁻³¹ | 24.4718 | -1.5795 |
| LEAF | 21.4314 | 9.3812x10 ⁻³² | 24.4719 | -1.5794 |
| DeepLight™ | 20.3727 | 2.0430x10 ⁻²⁵ | 24.4608 | -1.6170 |

Tabla 4.10 Parámetros de monitoreo óptico para una distancia de 87Km únicamente con PMD de 5ps/√km

| Fibra óptica | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{OUT} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|--------------|---------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| SMF-28 | 18.0425 | 7.5721x10 ⁻¹⁶ | 24.4540 | -1.6855 |
| SMF-28e+ | 18.0425 | 7.5748x10 ⁻¹⁶ | 24.4540 | -1.6855 |
| LEAF | 18.0357 | 8.007x10 ⁻¹⁶ | 24.4541 | -1.6846 |
| DeepLight™ | 17.3049 | 2.2710x10 ⁻¹³ | 24.4554 | -1.6373 |

Tabla 4.11 Parámetros de monitoreo óptico para una distancia de 87Km únicamente con PMD de 6 ps/√km

| Fibra óptica | FACTOR Q (dB) | BER | OSNR _{OUT} (dB) | P _{Rx} (dBm) |
|--------------|---------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| SMF-28 | 14.4042 | 7.9241x10 ⁻⁸ | 24.4815 | -1.5419 |
| SMF-28e+ | 14.4042 | 7.9252x10 ⁻⁸ | 24.4815 | -1.5419 |
| LEAF | 14.3981 | 8.0526x10 ⁻⁸ | 24.4817 | -1.5408 |
| DeepLight™ | 13.7362 | 5.8252x10 ⁻⁷ | 24.4731 | -1.5630 |

Tabla 4.12 Parámetros de monitoreo óptico para una distancia de 87Km únicamente con PMD de 7ps/√km

En las Tabla 4.10, Tabla 4.11 y Tabla 4.12 se puede ver que para una PMD mayor o igual 5ps/km los parámetros de monitoreo óptico empiezan a caer considerablemente, tal que si este valor se sigue aumentando la red no cumplirá con los parámetros de monitoreo óptico establecidos como referencia.

Finalmente, de los resultados conseguidos en los casos de estudio se genera la Tabla 4.13 donde se resumen los resultados obtenidos sobre el desempeño de las fibras frente a degradaciones ópticas en una red DWDM a 10Gb/s, donde se hace referencia a su nivel de tolerancia siendo:

- ✓ Muy Alto: hace referencia a niveles de tolerancia donde las degradaciones no son considerables para la fibra óptica.
- ✓ Alto: hace referencia a niveles de tolerancia donde las degradaciones son mínimas para la fibra óptica.
- ✓ Medio: hace referencia a niveles de tolerancia donde las degradaciones son poco considerables para la fibra óptica.
- ✓ Bajo: hace referencia a niveles de tolerancia donde las degradaciones son considerables para la fibra óptica.
- ✓ Muy Bajo: hace referencia a niveles de tolerancia donde las degradaciones afectan de manera significativa la fibra óptica.

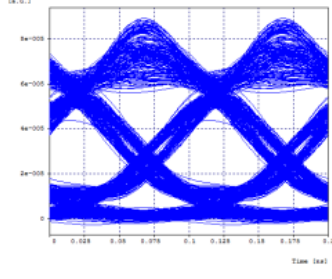
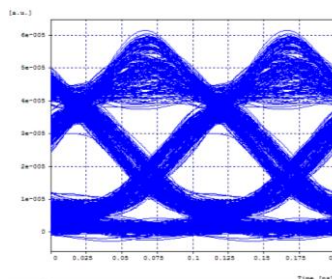
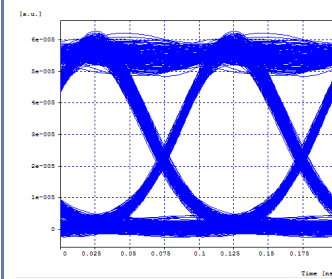
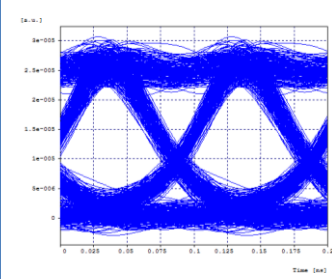
| Ventaja ■ Desventaja ■ | SMF-28 | SMF-28e+ | LEAF | DeepLight™ |
|---|---|--|---|---|
| <i>Dispersión cromática acumulada para una distancia de 87Km</i> | 1500.7259ps/nm | 1500.7259ps/nm | 359.0074ps/nm | -231.907ps/nm |
| <i>Atenuación para una distancia de 87Km</i> | 15.66dB | 17.4dB | 16.53dB | 20.01dB |
| <i>Distancia máxima alcanzada para una potencia de 5dBm y una BER de 10⁻¹²</i> | 87Km | 87Km | 114Km | 93Km |
| <i>Diagrama del ojo para 87Km, con todas las degradaciones ópticas</i> |  |  |  |  |
| <i>Tolerancia a la Atenuación</i> | Alta | Alta | Media | Baja |
| <i>Tolerancia a la CD</i> | Baja | Baja | Alta | Alta |
| <i>Tolerancia a la PMD</i> | Muy alta | Muy alta | Muy alta | Muy alta |

Tabla 4.13 Análisis comparativo de las fibras ópticas sobre el desempeño de una red DWDM a 10Gb/s.

5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros de la realización de este trabajo de grado. Las conclusiones se basan en los diferentes objetivos, ejecución y análisis de las simulaciones. Las recomendaciones se dan de acuerdo a las degradaciones ópticas de las fibras en la red WDM.

5.1 Conclusiones

- ✓ Se evidencia el óptimo desempeño de la fibra óptica tipo LEAF en una red WDM, ya que a pesar de introducir una atenuación de 0.19dB/km su baja CD 5.5ps/(nm x km) la hace altamente tolerante a la CD permitiendo enlaces de alrededor de 114Km.
- ✓ La fibra DeepLight™ al presentar una atenuación alta de 0.23dB/Km la hace más susceptible a este efecto, sin embargo su índice de dispersión pequeño compensa dicha susceptibilidad permitiendo alcanzar enlaces de 93Km en una red WDM.
- ✓ Se demostró que la implementación de un amplificador tipo EDFA permite disminuir el efecto de la atenuación en la red, lo cual se observó en el análisis de la atenuación en la red con la fibra DeepLight™ en donde dicha implementación permitió el mejoramiento del factor Q y la BER.
- ✓ Los resultados mostraron que las fibras ópticas tipo NZ-DSF (LEAF, DeepLight™) gracias a sus índices de dispersión pequeños y por ende su baja acumulación de CD en el enlace, presentan una mayor tolerancia a la dispersión cromática demostrando mejor desempeño frente a la CD en comparación a las fibras SMF (SMF-28 y SMF-28e+).
- ✓ Se comprobó que la dispersión cromática es la degradación óptica que más afecta a las fibras SMF-28 y SMF-28e+, ya que por sí solas introducen a la red 18ps/(nm x km) que se considera un valor alto de dispersión. Por ello compensar la CD es fundamental para mejorar el desempeño de estas fibras.
- ✓ Al ser muy pequeños los valores de la PMD establecidos por los fabricantes de las fibras ópticas, hacen que este fenómeno no afecte el desempeño de la red a pesar que se transmite a 10Gb/s.
- ✓ En las redes ópticas la potencia de transmisión no es directamente proporcional a la distancia del enlace, ya que es generalizado que para todas las fibras la existencia de un punto máximo de potencia, a partir del cual se presenta una disminución en la distancia del enlace evidencia dicha afirmación. Esto se produce ya que a potencias altas se excitan los efectos no lineales afectando los parámetros de desempeño como el factor Q y la BER.

5.2 Recomendaciones

- ✓ De acuerdo a las pruebas realizadas en el desarrollo del presente trabajo se recomienda transmitir a potencias bajas, del orden de los 5dBm.
- ✓ De acuerdo a las pruebas realizadas se recomienda ejecutar las simulaciones con un número de muestras igual a 128 y tiempo de simulación de 70ns.
- ✓ Tener definida una metodología de simulación permite estructurar adecuadamente los escenarios y así garantizar la obtención de unos resultados claros y acorde a los objetivos planteados.
- ✓ Se recomienda implementar escenarios de simulación de tipo incremental, y así ir ajustando los valores para cada parámetro, permitiendo obtener una solución adecuada al diseño de la red.
- ✓ Antes de iniciar cualquier proceso de simulación es recomendable conocer a fondo la teoría para obtener resultados acordes a los objetivos planteados.

5.3 Trabajos futuros

Mediante el cumplimiento de los objetivos del trabajo de grado, se identificaron nuevas investigaciones concernientes al análisis del impacto de la fibra óptica sobre el desempeño de una red WDM a 10Gb/s. Estas son:

- ✓ Analizar el impacto de las fibras ópticas monomodo sobre el desempeño de una red DWDM a 40Gb/s y 100Gb/s.
- ✓ Analizar el impacto de las fibras ópticas monomodo NZ-DSF sobre el desempeño de una red DWDM a 10Gb/s, 40Gb/s y 100Gb/s. para diferentes formatos de modulación.
- ✓ Analizar el impacto de las fibras ópticas monomodo SMF sobre el desempeño de una red DWDM a 10Gb/s, 40Gb/s y 100Gb/s. para diferentes formatos de modulación.
- ✓ Estudiar el impacto de las diferentes técnicas de compensación cromática con fibras monomodo en una red DWDM 40Gb/s y 100Gb/s.
- ✓ Realizar una investigación profunda en cuanto a los mecanismos de amplificación en redes DWDM empleando para el enlace fibras SMF y NZ-DSF.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. G. López Perafán; A. Toledo Tovar; H. Ordóñez, J. P. Agredo, "Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM", Revista Facultad de Ingeniería, UPTC, Vol. 20, No. 31, pp. 22-35, 2011.
- [2] A. F. Escallón, J. R. Barrios, "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", Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Agosto, 2010.
- [3] *Spectral grids for WDM applications: CWDM Wavelength grid. G.694.2*, ITU-T, 2003.
- [4] *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. G.694.1*, ITU-T, 2012.
- [5] Millan, R. J., "WDM Corrige las limitaciones de la fibra," *Redes & Telecom*, vol. 201, Abril 2006 2006.
- [6] K. J. Hoyos Hormiga, J. S. Velez Giraldo "Impacto de las Propiedades de una Fibra Compensadora de Dispersion (DCF) en el Diseño de un Sistema WDM", Pregrado, Universidad del Cauca, 2013
- [7] J. F. Grijalba, G. A. Gomez, "Análisis del Desempeño de Formatos de Modulación en Comunicaciones Ópticas Sobre Redes WDM", Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Agosto, 2010.
- [8] J. Rahn, S. Kumar, M. Mitchell, H. Sun, "Super-channels: DWDM Transmission Beyond 100Gb/s", Photonics Conference (IPC), IEEE, 2012.
- [9] Chomycz, B., *Planning fiber optics networks*: McGraw-Hill Professional, 2009.
- [10] J.P. Agredo, H.J. Ordoñez, "Análisis del desempeño de redes WDM frente a variaciones en los parámetros de transmisión y su incidencia en los efectos no lineales" Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, 2010.
- [11] C. Ararat, E. Paz, "Análisis del desempeño de los formatos (RZ-NRZ)/DQPSK a 10 Y 40Gb/s en una Red Metropolitana DWDM" Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, 2013.

- [12] Orozco, H. F. B. and Trujillo, W. D. J., "Multiplexación por división de longitud de Onda-WDM Una nueva alternativa para comunicaciones ópticas". Revista Investigaciones, Universidad del Quindío, Vol. 18, pp. 49-58, 2008.
- [13] D. Melo, J. Ruiz, "Análisis de Desempeño de Diferentes Técnicas de Compensación Ópticas y Electrónicas para la Dispersión Cromática en Redes WDM" ", Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, 2011.
- [14] F. Ramos Pascual. *Moduladores ópticos DPSK* [En Línea]. <http://www.conelectronica.com/fibra-optica/redes-opticas/272-moduladores-opticos-dpsk> [Consultado Diciembre 15 del 2014].
- [15] S. Zhang. "Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System", M. S. thesis, The University of Kansas, 2005.
- [16] P. J. Winzer, R-J. Essiambre, "*Advanced Optical Modulation Formats*", Proceedings of the IEEE Vol. 94, No. 5, pp. 952-985, Mayo. 2006.
- [17] C.K. Chan. "Optical Performance Monitoring, Advanced Techniques for Next-Generation Photonic Networks". The Chinese University of Hong Kong, China, ed, 2010.
- [18] "Optical system design and engineering considerations", G.Suppl39, ITU-T, 2012
- [19] Thyagarajan, K., *et al.*, "Effects of Nonlinearity and Polarization Mode Dispersion on High Bit-rate Fiber-optic Communication Links," 2004.
- [20] Inc., C. S., "Optical DWDM Fundamentals," ed, 2007.
- [21] E.Mena, R. Mendoza, "Diseño de una red WDM para andinatel S.A. en la provincial de Tungurahua". Trabajo de Grado para obtener el título de Ingeniero en Electronica y Telecomunicaciones, Departamento de Ingeniería Electronica, Escuela politecnica nacional, Quito, septiembre 2009.
- [22] D. van den Borne, "Robust Optical Transmission Systems – Modulation and Equalization", Tesis doctoral, 2008
- [23] A. Leyva, M. Tarifeño, R. Olivares, "Efectos de la dispersión por modo de polarización (PMD) en la propagación de pulsos a través de fibras ópticas", Revista chilena de ingeniería, vol 15 N° 3, octubre 2007, pp. 336-343.
- [24] L.Hinojosa, "Temas Selectos de Fibra Óptica". Trabajo de Grado para obtener el título de Ingeniero en Electronica y Telecomunicaciones, Departamento de

- Ingeniería Electronica, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Mexico 2007.
- [25] “Supervisión óptica para sistemas de multiplexación por división en longitud de onda densa”, G.697, ITU-T, 2012.
- [26] “Equipo de prueba del factor Q para evaluar la calidad de transmisión de los canales ópticos”, O.201, ITU-T, 2003.
- [27] D. Knipp, T. Chakma, “Optical Signal to Noise Ratio (OSNR)”, International University Bremen, Spring, 2005
- [28] G. Fabio, “Análisis del OSNR de configuraciones de enlaces de Fibra Optica”, Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Informática, Universidad Autónoma de Madrid, Noviembre, 2009.
- [29] J. A. Dinamarca, “Análisis del Diagrama del Ojo”, Reporte técnico, Universidad Técnica Federico Santa María, 2002.
- [30] Inc., C. S., "Optical DWDM Fundamentals," ed, 2007.
- [31] R. Serway, J. Jewett, “Física para ciencias e ingenierías” Volumen I, Sexta edición, Ed Thomson, 2005.
- [32] J. Albella, J. Jimenez, J. Martinez “ Optoelectronica y Comunicación Optica”, Consejo superior de investigaciones científicas, Madrid, 1988.
- [33] H. Gomez, F. Cuellar, “Temas Selectos de Fibra Óptica”, Trabajo de Grado para obtener el título de Ingeniero en Electronica y Telecomunicaciones, Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Mexico 2007.
- [34] J. Oliva, J. Salvado, C. Penados, “Transmisión en fibra óptica”, Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero en Electronica, informática y Ciencias de la Computación, Universidad Francisco Marroquín, Guatemala 2001.
- [35] “Características de las fibras y cables ópticos monomodo”, ITU-T Rec. G.652, noviembre, 2009.
- [36] “Características de los cables y fibras ópticas monomodo con dispersión desplazada”, ITU-T Rec. G.653, julio, 2010.
- [37] “Características de los cables de fibra óptica monomodo con corte desplazado”, ITU-T Rec. G.654, octubre, 2012.

- [38] "Características de fibras y cables ópticos monomodo con dispersión desplazada no nula", ITU-T Rec. G.655, noviembre, 2009.

- [39] Ulgen, O. M., *et al.*, "SIMULATION METHODOLOGY--A PRACTITIONER'S PERSPECTIVE," ed: Michigan Simulation User Group, Technical Committee on Simulation Methodology. <http://www.pmc corp. com/>, Dearborn, 2000.

- [40] Catalunya, U. P. d., "OPNET: Manual de Usuario," ed, 2004.