



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

Análisis del modelado de la tecnología DWDM utilizado técnicas de compensación en comunicaciones ópticas mediante la validación del software OptiSystem

AUTOR:

Ing. Agreda Alejandro, Roger Hernán

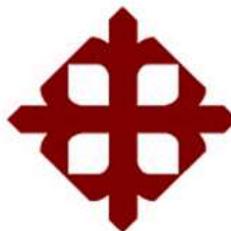
Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de
MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

16 de agosto del 2019



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster Agreda Alejandro, Roger Hernán como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES.

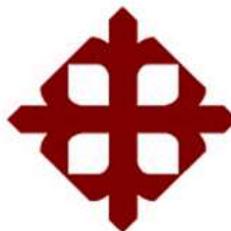
TUTOR

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DEL PROGRAMA

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, 16 de agosto del 2019



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Agreda Alejandro, Roger Hernán**

DECLARÓ QUE:

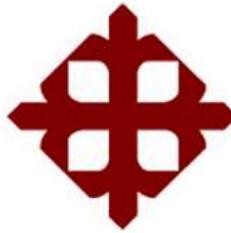
El trabajo de titulación “**Análisis del modelado de la tecnología DWDM utilizado técnicas de compensación en comunicaciones ópticas mediante la validación del software OptiSystem**”, previa a la obtención del grado Académico de **Magíster en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizó del contenido, veracidad y alcance científico del trabajo de titulación del Grado Académico en mención.

Guayaquil, 16 de agosto del 2019

EL AUTOR

Ing. Agreda Alejandro, Roger Hernán



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, Agreda Alejandro, Roger Hernán

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación de Maestría titulada: **“Análisis del modelado de la tecnología DWDM utilizado técnicas de compensación en comunicaciones ópticas mediante la validación del software OptiSystem”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 16 de agosto del 2019

EL AUTOR

Ing. Agreda Aleandro, Roger Hernán

REPORTE DE URKUND

The screenshot shows the URKUND interface. On the left, document details are displayed: **Documento:** [Agreda_Roger_Final.docx](#) (D54434957), **Presentado:** 2019-07-14 22:42 (-05:00), **Presentado por:** fernandopm23@hotmail.com, **Recibido:** edwin.palacios.ucsg@analysis.urkund.com, and **Mensaje:** Revisión Roger Agreda [Mostrar el mensaje completo](#). A yellow highlight indicates that 1% of the 23 pages consist of text from 1 source. On the right, a table lists sources with columns for 'Categoría' and 'Enlace/nombre de archivo'. The sources include 'ALBAN_Titulacion.docx', 'http://www.tdx.cat/handle/10803/284714', 'https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC...', 'https://www.fibraoptica hov.com/fibra-optica-simet...', 'https://doi.org/10.1109/ColComCon.2013.6564819', and 'http://www.tdx.cat/handle/10803/396408'. The bottom toolbar shows navigation icons, a warning for '2 Advertencias', and buttons for 'Reiniciar', 'Exportar', and 'Compartir'.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL SISTEMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA: Análisis del modelado de la tecnología DWDM utilizado técnicas de compensación en comunicaciones ópticas mediante la validación

del software OptiSystem

AUTOR: Ing. Agreda Alejandro, Roger Hernán

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de Magister en Telecomunicaciones

TUTOR: M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

3 de Julio del 2019

Dedicatoria

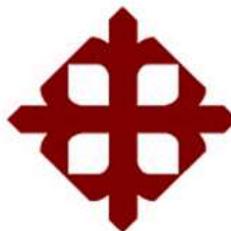
A Dios, por no soltarme de la mano en todo momento.
A mis hijas Domenica y Camila, por brindarme su amor y regalarme muchas
sonrisas que enriquecen el alma.
A mi esposa, por su amor entregado día a día y el aliento que me da para
seguir adelante.
A mis padres Hernán y Betty, que siempre están brindándome su apoyo
incondicional.

Agradecimientos

Agradecer a mi familia que formó parte de este proceso, que se sacrificó por mí, para poder culminar mis estudios que me permitieron cumplir con esta meta trazada.

A mis hermanos, por cumplir su rol arduamente y darme sus palabras de aliento para seguir adelante.

A mi tutor, por regalarme su tiempo y dedicación para poder culminar el proyecto.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO
TUTOR

f. _____

M. Sc. CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO
REVISOR

f. _____

M. Sc. ZAMORA CEDEÑO, NESTOR ARMANDO
REVISOR

f. _____

M. Sc. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESÚS
DIRECTOR DEL PROGRAMA

ÍNDICE GENERAL

Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas.....	XIV
Resumen.....	XV
Abstract	XVI
Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.	2
1.1. Introducción.	2
1.2. Antecedentes.	3
1.3. Definición del problema.....	4
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. Objetivo General:.....	4
1.4.2. Objetivos específicos:.....	4
1.5. Hipótesis.....	4
1.6. Metodología de investigación.	4
Capítulo 2: Fundamentos Teóricos de Redes Ópticas.....	6
2.1. Breve descripción de fibra óptica.	6
2.2. Sistemas ópticos.	7
2.2.1. Redes de larga distancia (WAN).....	8
2.2.2. Redes metropolitanas (MAN).	9
2.2.3. Redes de área local (LAN).....	11
2.3. Técnicas de transmisión en comunicaciones ópticas.	12
2.3.1. Multiplexación por división de tiempo (TDM)	13
2.3.2. Multiplexación por división de tiempo óptico (OTDM)	14
2.3.3. Electrónica (ETDM)	15
2.3.4. Multiplexación por división de longitud de onda (WDM)	17
2.3.4.1. Descripción general de WDM.....	18
2.3.4.2. Aplicaciones	19
2.3.5. Multiplexación por división de longitud de onda combinada con multiplexación por división de tiempo.	20
2.3.6. Acceso múltiple por división de códigos (CDMA).	20
2.4. Técnicas de modulación.	21
2.4.1. Modulación directa	21
2.4.1.1. Modulación de amplitud.....	21

2.4.1.2. Componentes utilizados.....	22
2.4.1.3. Limitaciones.....	22
2.4.2. Modulación externa.....	23
2.4.2.1. Principio de funcionamiento.....	23
2.4.2.2. Componentes utilizados.....	23
2.5. Detección óptica.....	24
2.5.1. Detección directa.....	24
2.5.2. Detector heterodino.....	25
2.5.3. La recepción homodina.....	26
2.5.4. Comparación entre detección directa y heterodina.....	26
2.5.5. El preamplificador.....	27
2.5.5.1. El amplificador de alta impedancia de entrada.....	27
2.5.5.2. Amplificador de transimpedancia.....	28
2.5.5.3. Comparación de las dos estructuras.....	29
Capítulo 3: Simulación y Resultados Obtenidos.....	30
3.1. Introducción.....	30
3.1.1 Comunicación de fibra óptica.....	30
3.1.2 Ventajas de sistemas de comunicación óptica.....	30
3.1.3 Obstáculos en sistemas de comunicación óptica.....	31
3.2. Análisis de la dispersión en la fibra óptica.....	31
3.3. Técnicas de compensación de la dispersión.....	31
3.3.1. Fibra de compensación de dispersión (DCF).....	31
3.3.2. Rejilla de Bragg de Fibra (FBG).....	32
3.4. Configuración de simulación del sistema DWDM.....	33
3.5. Resultados y discusión.....	36
Conclusiones.....	44
Recomendaciones.....	45
Bibliografía.....	46

Índice de Figuras

Capítulo 2:

Figura 2. 1: Arquitectura típica de la red de telecomunicaciones.....	7
Figura 2. 2: Red de estructuración metropolitana y red de acceso metropolitana.....	9
Figura 2. 3: Arquitectura de una red de área local.....	11
Figura 2. 4: Distribución del periodo en caso de multiplexación TDM.....	13
Figura 2. 5: Representación de la multiplexación TDM (4 canales a 1).	14
Figura 2. 6: Diagrama de bloques de la multiplexación OTDM.	14
Figura 2. 7: Distribución temporal de una red LAN.....	15
Figura 2. 8: Diagrama de bloques de la multiplexación ETDM.....	15
Figura 2. 9: Diagrama esquemático de la multiplexación ETDM utilizado en comunicaciones de fibra óptica.	16
Figura 2. 10: Multiplexación por división de tiempo en la jerarquía PDH.....	16
Figura 2. 11: Distribución de sub-bandas en el caso de multiplexación WDM.	17
Figura 2. 12: Transmisión óptica de datos realizada a través de cada frecuencia natural.	18
Figura 2. 13: Diagrama esquemático de la multiplexación WDM en comunicaciones de fibra óptica (con 3 longitudes de onda).	18
Figura 2. 14: Uso de WDM acoplado con amplificación óptica.	19
Figura 2. 15: Red local con distribución de longitud de onda.	20
Figura 2. 16: Sistema utilizando la técnica CDMA.....	21
Figura 2. 17: Modulación directa de un diodo láser.	22
Figura 2. 18: Diagrama de bloques de la modulación directa.....	22
Figura 2. 19: Sinóptico de la modulación externa.....	23
Figura 2. 20: Diagrama del fotodetector en detección directa.	25
Figura 2. 21: Diagrama del fotodetector en detección heterodina.	25
Figura 2. 22: Estructura de un amplificador con alta impedancia de entrada.	28

Figura 2. 23: Estructura de un amplificador de transimpedancia.	28
--	----

Capítulo 3:

Figura 3. 1: Principio de funcionamiento de la FBG.	33
Figura 3. 2: Configuración de simulación para el formato de modulación NRZ usando DCF y FBG como compensadores de dispersión.	35
Figura 3. 3: Configuración de simulación para el formato de modulación RZ utilizando DCF y FBG como compensadores de dispersión.....	35
Figura 3. 4: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 10 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación RZ para enlaces de 120 km usando fibra óptica monomodo.	37
Figura 3. 5: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 20 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación RZ para enlaces de 120 km usando fibra óptica monomodo.	37
Figura 3. 6: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 40 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación RZ para enlaces de 120 km usando fibra óptica monomodo.	38
Figura 3. 7: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 10 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación RZ para enlaces de 80 km usando fibra óptica monomodo.	39
Figura 3. 7: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 20 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación RZ para enlaces de 80 km usando fibra óptica monomodo.	39
Figura 3. 9: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 40 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación RZ para enlaces de 80 km usando fibra óptica monomodo.	40
Figura 3. 10: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 10 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación NRZ para enlaces de 120 km usando fibra óptica monomodo.....	41
Figura 3. 11: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 20 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación NRZ para enlaces de 120 km usando fibra óptica monomodo.....	41

Figura 3. 12: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 40 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación NRZ para enlaces de 120 km usando fibra óptica monomodo.....	42
Figura 3. 13: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 10 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación NRZ para enlaces de 80 km usando fibra óptica monomodo.....	42
Figura 3. 14: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 20 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación NRZ para enlaces de 80 km usando fibra óptica monomodo.....	43
Figura 3. 15: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 40 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación NRZ para enlaces de 80 km usando fibra óptica monomodo.....	43

Índice de Tablas

Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Parámetros de simulación.....	33
Tabla 3. 2: Parámetros de fibra en el sistema DWDM propuesto.	34
Tabla 3. 3: Resultados de simulación con formato de modulación RZ para 120 km y 80 km SMF	36
Tabla 3. 4: Resultados de simulación con formato de modulación NRZ para 120 km y 80 km SMF	40

Resumen

El presente trabajo de examen complejo trata de realizar el análisis del modelado de la tecnología DWDM utilizando técnicas de compensación en comunicaciones ópticas mediante la validación del software OptiSystem. En la primera parte, se describe las generalidades de la propuesta (introducción, antecedentes, definición del problema, objetivos, hipótesis y metodología) del examen complejo. La segunda parte, se realiza la descripción del marco teórico de los sistemas de comunicaciones por fibra óptica. La tercera parte, se realiza el diseño de los escenarios de simulación del sistema DWDM con diferentes técnicas de compensación, tales como DCF y FBG utilizando la plataforma de simulación OptiSystem. El trabajo analiza el rendimiento en términos del factor de calidad Q, de la tasa de error de bits (BER) y del diagrama de ojo. Finalmente, se encontró que el uso de FBG como elemento compensador de dispersión proporciona un mejor rendimiento del sistema en comparación con DCF.

Palabras claves: MULTIPLEXACIÓN, COMPENSACIÓN, TÉCNICAS, CALIDAD, BITS, DISPERSIÓN

Abstract

The present work of complex examination tries to perform the modeling analysis of the DWDM technology used compensation techniques in optical communications through the validation of the OptiSystem software. In the first part, the generalities of the proposal (introduction, background, definition of the problem, objectives, hypothesis and methodology) of the complex examination are described. The second part, the description of the theoretical framework of fiber optic communication systems is carried out. The third part is the design of the simulation scenarios of the DWDM system with different compensation techniques, such as DCF and FBG using the OptiSystem simulation platform. The work analyzes the performance in terms of the quality factor Q, the bit error rate (BER) and the eye diagram. Finally, it was found that the use of FBG as a dispersion compensating element provides a better performance of the system compared to DCF.

Keywords: MULTIPLEXATION, COMPENSATION, TECHNIQUES, QUALITY, BITS, DISPERSION

Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.

1.1. Introducción.

Cuando las señales ópticas se transmiten a través de los enlaces ópticos, diferentes componentes de longitud de onda de las señales experimentarán generalmente un tiempo de propagación diferente debido al hecho de que el medio de transporte tiene diferentes índices de refracción efectivos para diferentes longitudes de onda. En los últimos años, con el rápido crecimiento de las necesidades comerciales de Internet, las personas necesitan con urgencia más capacidad y sistemas de red. Por lo tanto, la demanda de la capacidad de transmisión y el ancho de banda son cada vez más desafiantes para los operadores y proveedores de servicios. En esta situación, la fibra óptica se está convirtiendo en el medio de entrega más favorable y en el papel más importante en la industria de la información, con su gran ancho de banda y un excelente rendimiento de transmisión. (M. Kaur, Saranga, & Bagga, 2015)

El rendimiento de cualquier sistema de comunicación está limitado por la relación señal/ruido (*Signal Noise Ratio, SNR*) de la señal recibida y el ancho de banda disponible. Esta limitación puede expresarse de manera más formal utilizando el concepto de capacidad del canal introducido en el marco de la teoría de la información.

La pérdida y la dispersión son el principal factor que afecta la comunicación por fibra óptica, ya que se desarrolla la alta capacidad. El amplificador de fibra dopado con erbio (EDFA), es el cambio gigantesco ocurrido en el sistema de comunicación de fibra óptica; la pérdida ya no es el factor principal para restringir la transmisión de fibra óptica. Dado que los EDFAs funcionan en la banda de onda de 1550 nm, el valor de dispersión de la fibra de monomodo (SMF) en esa banda de onda es muy grande, aproximadamente 15-20 ps/(nm*Km). (Na. Kaur, Kaur, & Kaur, 2014)

Con el fin de mejorar el rendimiento general del sistema y reducir lo más posible el rendimiento de transmisión influenciado por la dispersión, se

propusieron varias tecnologías de compensación de dispersión. Entre las diversas técnicas propuestas en la literatura, las que parecen ser prometedoras inmediatas para la compensación y el manejo de la dispersión podrían clasificarse en términos generales como: fibras compensadoras de la dispersión (DCF), rejillas de Bragg de fibra (FBG) y modo de alto orden (HOM) de fibra.

1.2. Antecedentes.

En la búsqueda de información relacionada a las técnicas de compensación DCF y FBG, se encontraron artículos científicos publicados en revistas académicas. A continuación, se describe un resumen de cada uno de los trabajos:

- El trabajo “Análisis de rendimiento de un sistema óptico que utiliza fibra de compensación de dispersión y rejilla de Bragg de fibra apodizada con chirrido lineal” realizado por (Joshi & Mehra, 2016). El artículo presenta una propuesta para analizar el rendimiento de un sistema óptico mediante el uso de fibra de compensación de dispersión (DCF) y rejilla de Bragg de fibra (FBG) apodizada lineal. Ambos sistemas tienen tres esquemas diferentes pre, post y simétrico. Varios parámetros utilizados para este análisis son la potencia de entrada, la distancia y la tasa de bits de entrada.
- El trabajo “Un método novedoso para combatir el desvanecimiento de la potencia inducida por la dispersión en la fibra de compensación de la dispersión” realizado por (Lebedev, Olmos, Iglesias, Forchhammer, & Monroy, 2013). Los autores investigaron experimentalmente el rendimiento de los enlaces de radio sobre fibra (RoF) de banda lateral doble (DSB) de 60 GHz que emplean fibra compensadora de dispersión (DCF). Transmitieron sin errores de señales de 3 Gbps a más de 1 m de distancia inalámbrica, con la finalidad de superar el desvanecimiento de la potencia de la señal de radio frecuencia (RF) inducida por la dispersión cromática, para lo cual propusieron el método para mejorar la relación de portadora a ruido (C/N) de RF mediante la introducción de un grado de sintonización de frecuencia de RF.

1.3. Definición del problema

Necesidad de analizar las técnicas de compensación DCF y FBG en redes de comunicaciones ópticas utilizando la tecnología DWDM mediante la validación del software OptiSystem.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General:

Analizar el modelado de la tecnología DWDM utilizando técnicas de compensación en comunicaciones ópticas mediante la validación del software OptiSystem

1.4.2. Objetivos específicos:

- ✓ Describir los fundamentos teóricos de sistemas de comunicaciones ópticas.
- ✓ Diseñar los escenarios de simulación de la red de comunicación óptica utilizando métodos de compensación DCF y FBG a través del simulador OptiSystem.
- ✓ Evaluar los resultados obtenidos de los escenarios de simulación propuestos en una red óptica DWDM usando las técnicas de compensación DCF y FBG.

1.5. Hipótesis

La técnica de compensación DCF resulta ser mejor que la compensación mediante FBG.

1.6. Metodología de investigación.

Los métodos de investigación incluyen todas aquellas técnicas/métodos que se adoptan para realizar investigaciones. Por lo tanto, las técnicas o métodos de investigación son los métodos que los investigadores adoptan para realizar los estudios de investigación. Por otro lado, la metodología de investigación es la forma en que los problemas de investigación se resuelven sistemáticamente. Es una ciencia de estudiar cómo se realiza la investigación científicamente.

En virtud de esto, el investigador se familiariza con los diversos pasos generalmente adoptados para estudiar un problema de investigación, junto con la lógica subyacente detrás de ellos. Por lo tanto, no solo es importante que el investigador conozca las técnicas/métodos de investigación, sino también el enfoque científico denominado metodología.

Hay dos enfoques principales para la investigación, a saber, enfoque cuantitativo y cualitativo. El enfoque cuantitativo implica la recopilación de datos cuantitativos, que se someten a un análisis cuantitativo riguroso de manera formal y rígida. Este enfoque incluye además los enfoques experimentales, inferenciales y de simulación para la investigación. Mientras tanto, el enfoque cualitativo utiliza el método de evaluación subjetiva de opiniones, comportamientos y actitudes.

En virtud de lo expuesto, el presente trabajo de examen complejo utiliza el enfoque cuantitativo mediante la recolección de datos que se obtienen durante la ejecución del modelado de red propuesto.

Capítulo 2: Fundamentos Teóricos de Redes Ópticas

El presente capítulo se van a describir los fundamentos teóricos de los sistemas de comunicaciones ópticas.

2.1. Breve descripción de fibra óptica.

La aparición de la fibra óptica ha revolucionado completamente el mundo de las telecomunicaciones. El diseño de sistemas de transmisión de muy alta capacidad era ahora posible. Además, el comercio a través de estos sistemas iba a ser cada vez más numeroso y la demanda de servicios cada vez más alta.

El resultado es una interrupción de las redes de telecomunicaciones anteriores y la necesidad de establecer nuevas estructuras. Este capítulo será una descripción sintética de la declinación de las estructuras de las redes de telecomunicaciones hasta los métodos de inscripción de los datos en la señal óptica mientras pasa por las diversas técnicas de "codificación" utilizadas. La presentación de estas generalidades tiene como objetivo proporcionar los elementos básicos, esenciales para facilitar la lectura de esta memoria.

La primera parte discutirá la jerarquía establecida entre las diferentes capas de las redes de telecomunicaciones ópticas actuales. Aunque el ancho de banda amplio de la fibra óptica puede transportar una gran cantidad de información, su uso óptimo está plagado de varios problemas, incluido el procesamiento electrónico antes de la modulación y después de la detección para velocidades de datos muy altas. Por esta razón, se han ideado diferentes técnicas de multiplexación o codificación para aumentar el número de canales en la fibra.

La transmisión de datos de fibra óptica requiere una conversión eléctrica óptica y óptica de la señal. Por lo tanto, este capítulo terminará con la descripción de los diferentes métodos utilizados para la modulación de la

señal en transmisión y la de las diversas técnicas de detección que pueden preverse.

2.2. Sistemas ópticos.

La culminación de muchos años de investigación básica para obtener, por un lado, fibras con atenuación compatibles con los requisitos de una red de telecomunicaciones, y por el otro, componentes y dispositivos suficientemente potentes y confiables, ha hecho posible los primeros sistemas de transmisión óptica desde los años 90. Ahora están atravesando el mundo, tanto en tierra como en el dominio submarino.

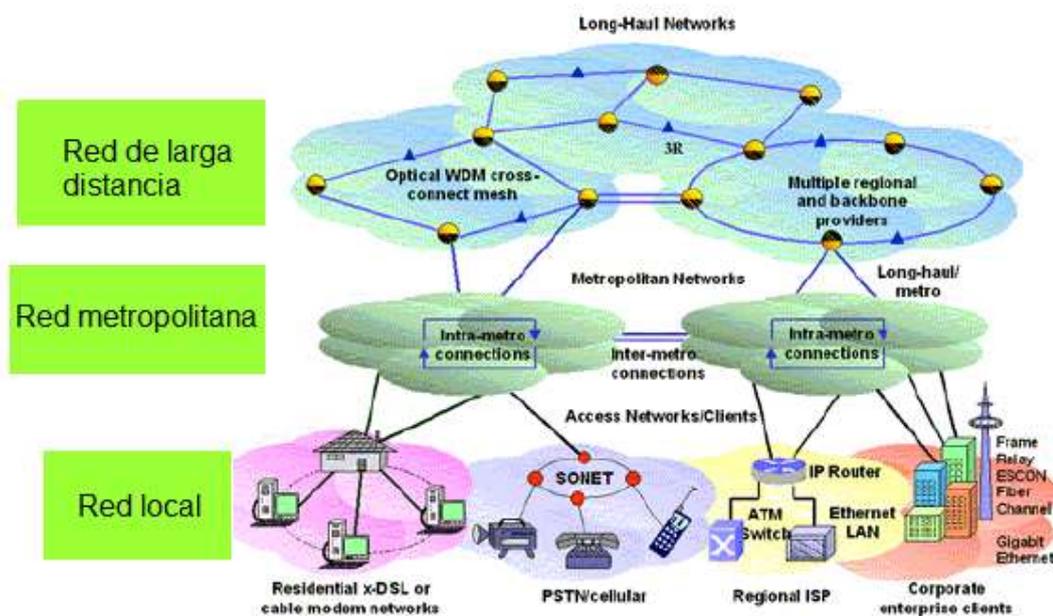


Figura 2. 1: Arquitectura típica de la red de telecomunicaciones.
Fuente: (Zheng, 2015)

Por ejemplo, la red desplegada en Ecuador está segmentada según las diferentes necesidades en términos de velocidad, ancho de banda, distancia de transmisión, etc. Hay tres categorías principales (véase la figura 2.1):

- Redes de larga distancia (*Wide Area Network, WAN*): estas son las redes desplegadas a nivel de un país o un continente y cuyos nodos son centros urbanos muy grandes.
- Redes de área metropolitana (*Metropolitan Area Network, MAN*): que corresponden a las redes establecidas en una gran ciudad que permiten conectar diferentes distritos, por ejemplo.

- Redes de área local (*Local Area Network, LAN*): también llamadas redes de distribución o redes de acceso, que representan el último enlace y terminan transmitiendo la información al suscriptor. Por lo tanto, son más cortos y menos codiciosos en capacidad.

Dependiendo de la naturaleza de la red en la que se encuentra, el sistema óptico puede diferir ligeramente. Por lo tanto, las siguientes secciones se presentan brevemente las características de estos tres niveles de la red.

2.2.1. Redes de larga distancia (WAN).

Esta parte de la red, a veces también llamada red estructurante, representa la capa superior de la red de telecomunicaciones. Se encuentra entre dos conmutadores de enrutamiento automático, cuya función es dirigir la información de una región a otra, desde el remitente hasta el área del destinatario. La transmisión de esta información ahora se realiza en fibra óptica a una longitud de onda de $1.55 \mu m$ y a una velocidad alta que continúa creciendo, inicialmente instalados entre 2.5 Gbps y 10 Gbps y en la actualidad a 40 Gbps, y muy pronto serán superados.

Esta capacidad no se podría lograr sin la introducción de fibras ópticas en los sistemas de comunicaciones modernos. Esto ha hecho posible ganar en velocidad y espacio entre los repetidores en comparación con los sistemas existentes, a saber, el cable coaxial (la distancia generalmente varía de 2 a 100 km). Además, el abandono de los regeneradores electro-ópticos (fotodetección, amplificación eléctrica, reconversión óptica) en favor de los amplificadores ópticos, desplegados cada cien kilómetros, hizo posible un salto en términos de capacidad de enlace.

Desde principios de la década de 1990, la amplificación óptica ha demostrado la capacidad de transmitir, sin repetidor, señales de 5 y 10 Gbps sobre distancias transoceánicas. El enlace de red de larga distancia ahora es todo óptico.

2.2.2. Redes metropolitanas (MAN).

Todavía llamada red intermedia, la red metropolitana está experimentando un verdadero auge. Desplegado entre el último PBX y un área más precisa (distrito, campus, pequeña ciudad, ...), tiene un entorno a menudo muy complejo y diverso. Fundamentalmente, se puede distinguir la estructuración metropolitana y las redes de acceso metropolitanas, tal como se muestra en la figura 2.2.

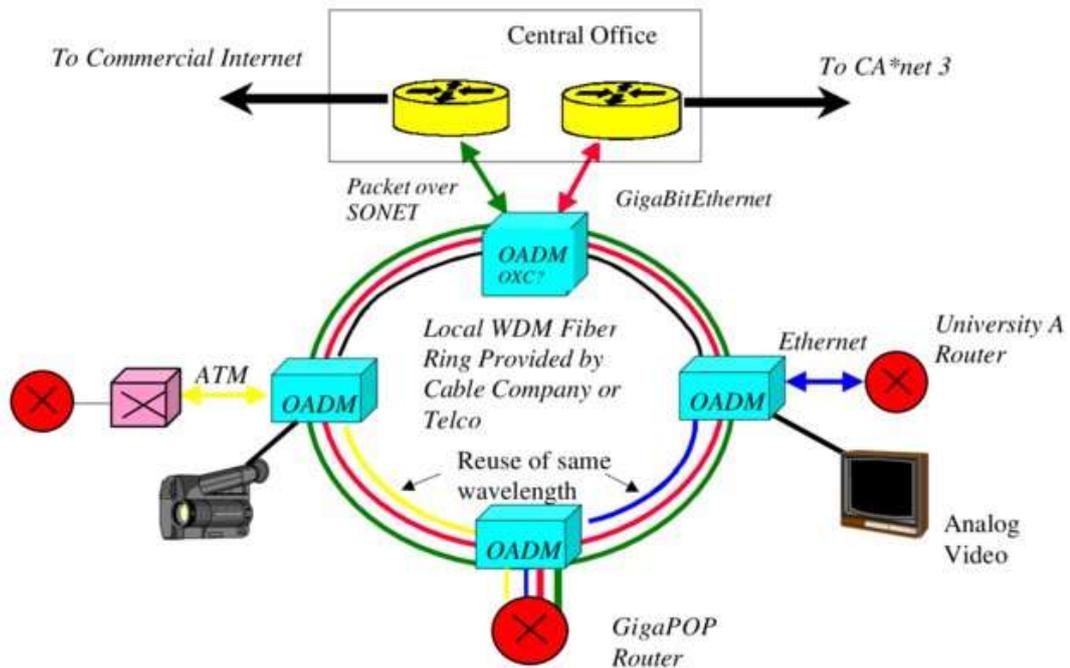


Figura 2. 2: Red de estructuración metropolitana y red de acceso metropolitana.
Fuente: (Chung, Coulter, Fitchett, Mokbel, & Arnaud, 2019)

Las redes metropolitanas estructurales generalmente consisten en anillos de 80 a 150 km de circunferencia con seis a ocho nudos. En contraste, las redes de acceso metropolitanas son anillos de 10 a 40 km de circunferencia con tres o cuatro nodos con sucursales a sitios remotos. Dependiendo de las redes o países, estos números pueden variar considerablemente. Por ejemplo, existen diferencias significativas entre las áreas densamente pobladas de Europa y Asia, donde las distancias serán más pequeñas, y en los Estados Unidos donde las aplicaciones metropolitanas son similares a las redes regionales reales.

Las topologías lógicas (perfiles de tráfico) de las redes metropolitanas difieren radicalmente de las redes de larga distancia. Los últimos

corresponden esencialmente a líneas troncales punto a punto, como máximo, uno o dos multiplexores de inserción de extracción óptica (OADM) para insertar y extraer tráfico en puntos intermedios.

Las redes metropolitanas introducen una infraestructura óptica con un alto grado de conectividad. Los anillos metropolitanos generalmente se caracterizan por el tráfico de malla con un cierto grado de concentración relacionado con la interconexión con la red de larga distancia. Los anillos de acceso, por el contrario, suelen recopilar el tráfico de varios nodos para enfocarse en un nodo compartido con una red metropolitana estructurante.

La complejidad de esta red no solo se refleja en el alto grado de conectividad. A diferencia de las redes de larga distancia, las redes metropolitanas deben admitir una amplia variedad de formatos, protocolos y velocidades de datos, incluida la jerarquía digital síncrona (SDH) o el tráfico de la red óptica síncrona (SONET) u otro tipo de tráfico. Para admitir esta diversidad, estas redes a menudo están equipadas con tarjetas transpondedores universales de múltiples velocidades, que aceptan cualquier velocidad de bits de 100 Mbps a 2.5 Gbps, que luego puede garantizar el tráfico de 10 Gbps sin modificaciones, y en total transparencia con respecto a todos los formatos y protocolos.

En estas redes intrínsecamente abiertas a cualquier tipo de señal, la multiplexación por división de longitud de onda (WDM), cuya descripción se realizará más adelante, encuentra una aplicación importante para combatir la congestión que puede proporcionar al tiempo que reduce el costo por servicio prestado. De la misma manera, los amplificadores ópticos son esenciales para estructurar aplicaciones de red de metro.

Las altas pérdidas en la fibra (debido a la interconexión de secciones cortas de fibra) y las pérdidas acumuladas asociadas con tránsitos ópticos en nodos sucesivos pueden requerir la amplificación de la señal óptica. El amplificador óptico en muchos casos puede representar una solución de menor costo en comparación con la regeneración óptica-eléctrica-óptica.

2.2.3. Redes de área local (LAN).

También se denomina distribución o red de acceso. Esta es la última parte de la red de telecomunicaciones, la que conecta al suscriptor y el último conmutador. Su longitud varía de 2 a 50 km y su capacidad es, en la mayoría, del mismo orden de magnitud que la de la red metropolitana.

Siempre está constituido por una porción de fibra óptica entre el conmutador y la terminación de la red óptica, seguida por una porción de conductor de metal que va al terminal del suscriptor. Sin embargo, se considera cada vez más en el futuro reducir la contribución de la electricidad para ir hacia la óptica, todo con el fin de aumentar el flujo disponible para el suscriptor.

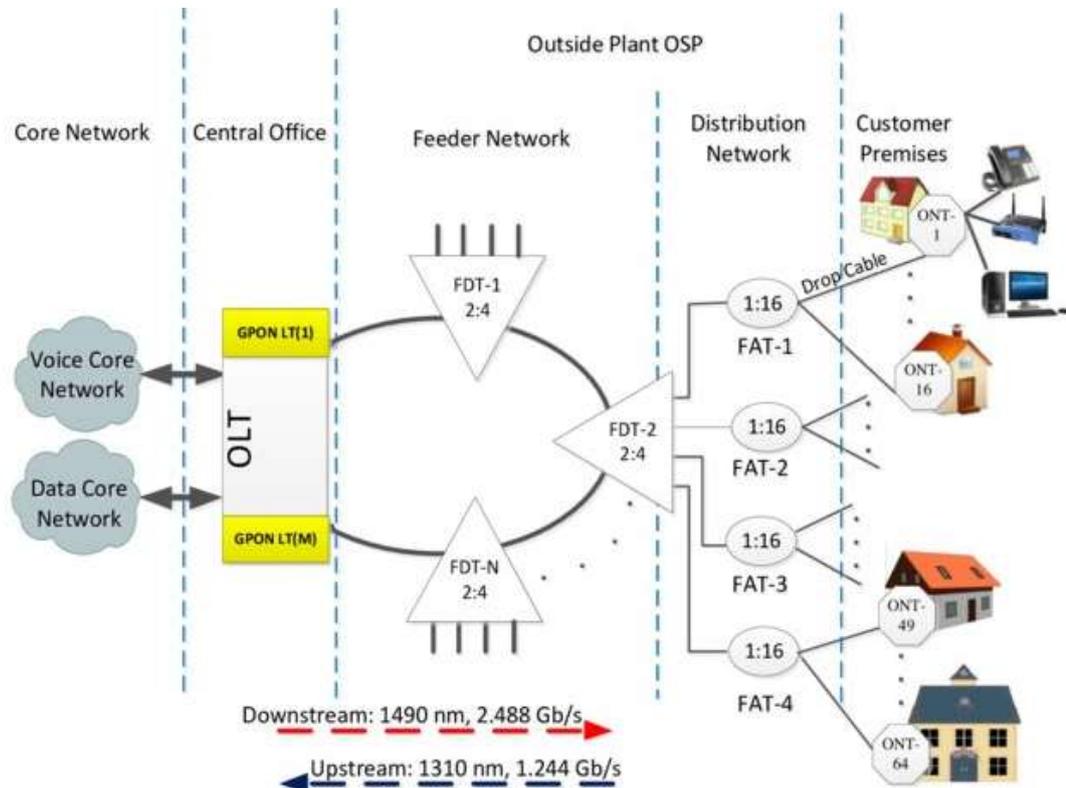


Figura 2. 3: Arquitectura de una red de área local.

Fuente: (M.AI-Quzwini, 2014)

Dependiendo de la ubicación de la terminación óptica (véase la figura 2.3), son posibles diferentes configuraciones:

- *Fibra al hogar/oficina (Fiber To The Home/Fiber To The Office, FTTH/FTTO):* la terminación de la red óptica, que es específica para

un suscriptor determinado, se implementa en sus instalaciones. La fibra va a su casa u oficina, y el extremo de cobre es muy corto.

- Fibra al edificio (*Fiber to the Building, FTTB*): la terminación de la red óptica se ubica al pie del edificio o en una sala técnica que generalmente se encuentra en el sótano, en un gabinete o en un cojinete de ductos. Es compartido por varios suscriptores que están conectados a él por enlaces de cable de cobre.
- Fibra a la acera/gabinete (*Fiber To The Curb/Fiber To The Cabinet, FTTC / FTTCab*): la terminación de la red óptica se encuentra en una cámara subterránea, en un gabinete en la vía pública, en un centro de telecomunicaciones o en un poste. Según el caso, se prevé reutilizar la red de terminales de cobre existente o implementar una distribución de terminales por radio.

2.3. Técnicas de transmisión en comunicaciones ópticas.

Las fibras ópticas tienen, en la ventana espectral generalmente utilizada, una banda utilizable muy grande (aproximadamente 15 THz alrededor de la longitud de onda de 1.55 μm). Teóricamente, las tasas que pueden transmitirse son por lo tanto extremadamente altas. Esto es aún más interesante porque hoy en día el número y el tamaño de la información intercambiada es cada vez más importante. Sin embargo, en la actualidad, el procesamiento electrónico de las señales eléctricas antes de la modulación y después de la detección no alcanza tales frecuencias.

Esta es la razón por la que se han ideado varias soluciones para aprovechar las capacidades de fibra óptica y, por lo tanto, aumentar la transferencia de información en el mismo canal. En la mayoría de los casos, el principio sigue siendo el mismo: usar N señales a la tasa D equivalente en términos de capacidad a una señal a la tasa $N \cdot D$, actualmente inalcanzable. Esto se denomina multiplexación, y los flujos transportados ahora serían más grandes.

La señal concentrada de flujos de diversos orígenes se llama señal multiplexada. Para preservar la integridad de cada señal en el canal, la

multiplexación se introduce, entre las señales, una separación temporal, espacial o de frecuencia.

2.3.1. Multiplexación por división de tiempo (TDM)

La multiplexación por división de tiempo (*Time Division Multiplexing, TDM*) consiste en asignar el ancho de banda completo a un solo usuario por un corto tiempo, a su vez para cada usuario, tal como se muestra en la figura 2.4. La asignación de este ancho de banda se realiza dividiendo el eje de tiempo en períodos de duración fija, y cada usuario solo transmitirá durante uno de estos períodos fijos de acuerdo a la figura 2.5. Un intervalo de tiempo fijo (Π) se asigna sucesivamente a una fuente.

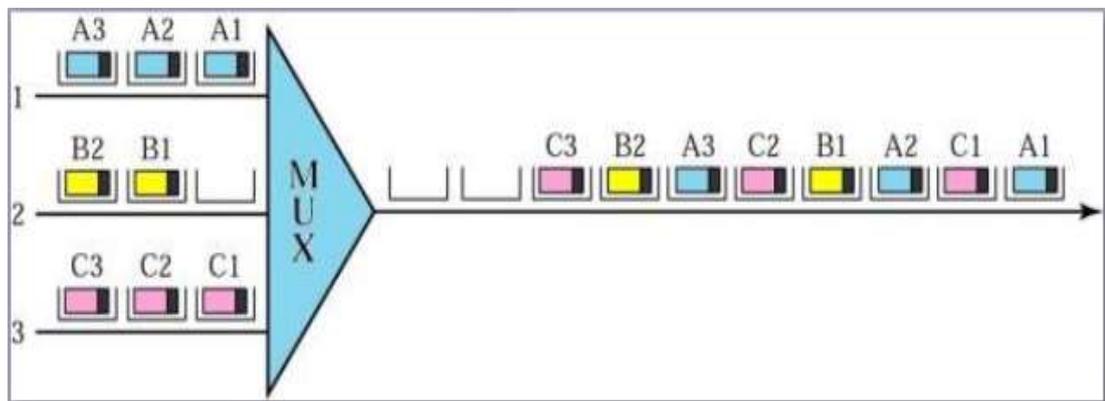


Figura 2. 4: Distribución del periodo en caso de multiplexación TDM.

Fuente: (Forouzan, 2012)

La multiplexación TDM permite que múltiples canales de comunicación de baja velocidad se agrupen en un solo canal de mayor velocidad (por ejemplo, diseñando una velocidad de 40 Gbps, a partir de cuatro secuencias de 10 Gbps).

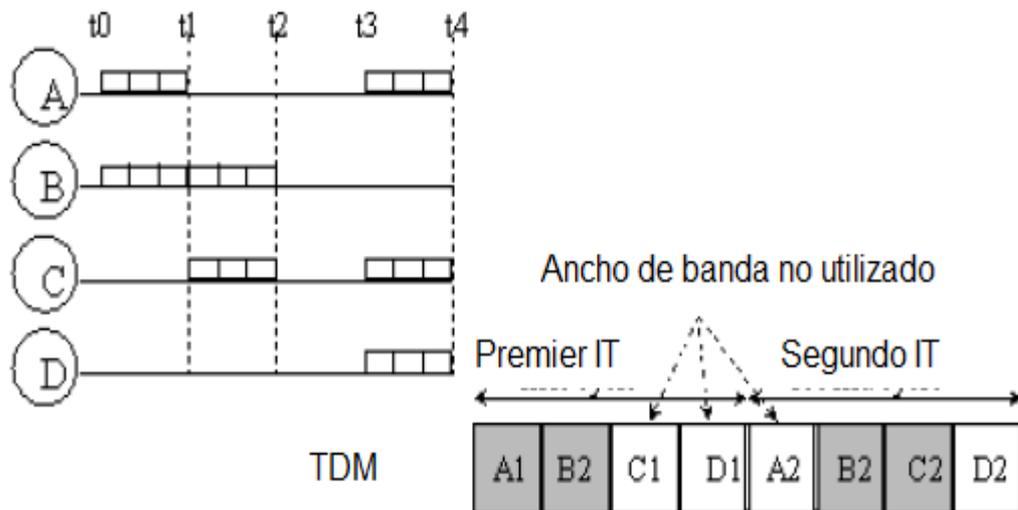


Figura 2. 5: Representación de la multiplexación TDM (4 canales a 1).
Fuente: (Forouzan, 2012)

2.3.2. Multiplexación por división de tiempo óptico (OTDM)

La multiplexación por división de tiempo se puede realizar ópticamente llamada “Multiplexación por división de tiempo óptica” (*Optical Time Division Multiplexing, OTDM*). El transmisor consta de N fuentes ópticas paralelas moduladas a la velocidad D_b bits/s (véase la figura 2.6). Esta técnica requiere que las señales ópticas se codifiquen como retorno a cero (*Return to Zero, RZ*) para que los pulsos codificados tengan ahora una duración inferior a T_b/N y la multiplexación óptica pueda realizarse sin recuperación óptica.

Por ejemplo, se puede obtener una señal modulada a 40 Gbps multiplexando las salidas codificadas RZ de 4 moduladores ópticos controlados por trenes de 10 Gbps.

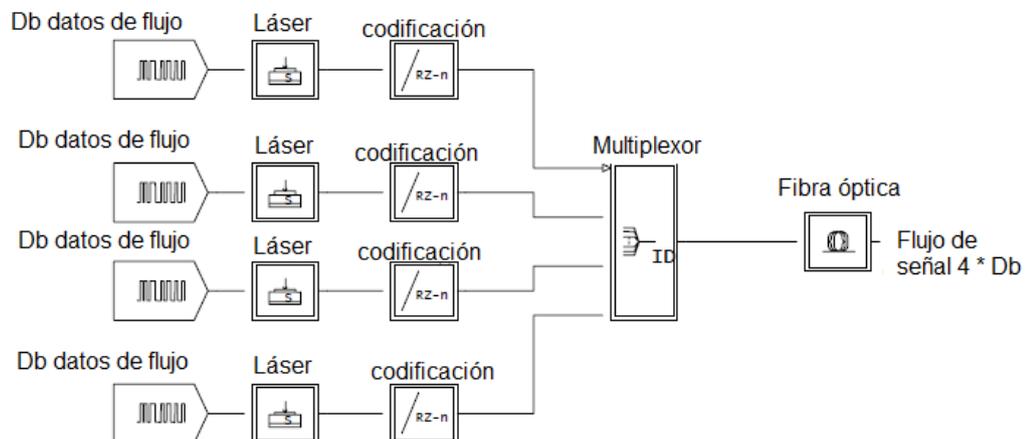


Figura 2. 6: Diagrama de bloques de la multiplexación OTDM.
Fuente: (Yazdani, 2016)

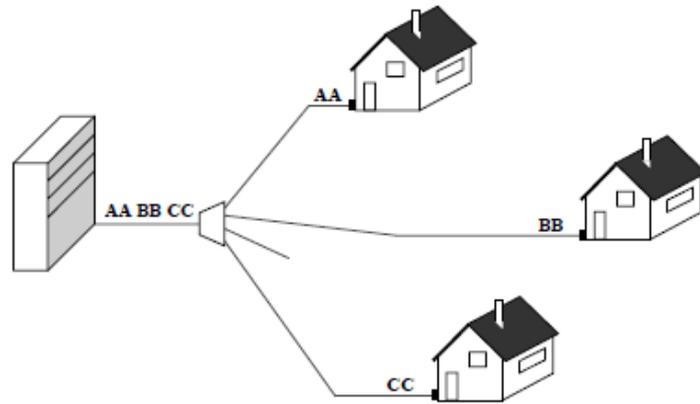


Figura 2. 7: Distribución temporal de una red LAN.
Fuente: (Yazdani, 2016)

La multiplexación por división de tiempo no se utiliza únicamente para aumentar las tasas de bits transmitidas. También proporciona una técnica de acceso utilizable en redes locales. El tiempo se comparte entre los diferentes usuarios: cada uno de ellos tiene un intervalo de tiempo para transmitir. Las diferentes señales se "ensamblan" para ser transmitidas en una sola portadora óptica, tal como se muestra en la figura 2.7.

2.3.3. Electrónica (ETDM)

OTDM tiene su equivalente en electrónica, ETDM (Electronic Time Division Multiplexing). En el caso de ETDM, la codificación RZ y el "ensamblaje" de los datos se realizan eléctricamente, tal como se muestra en la figura 2.8.

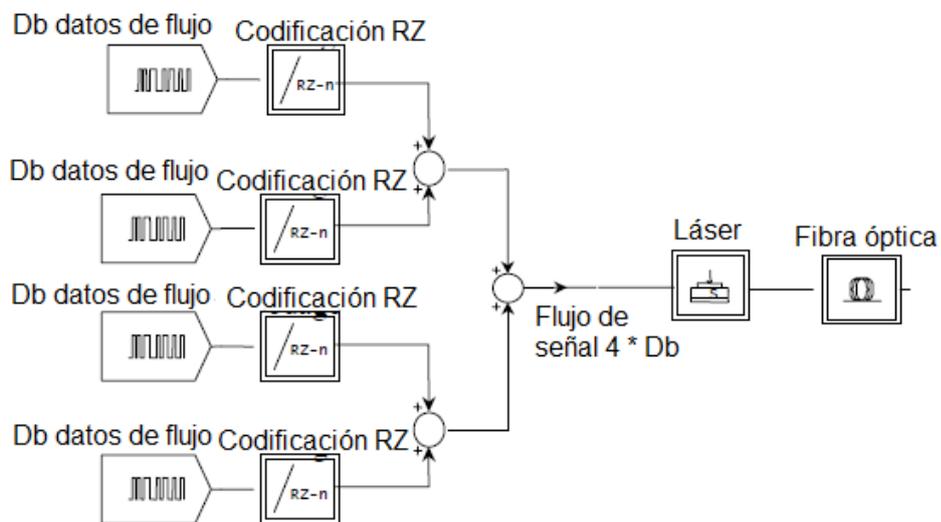


Figura 2. 8: Diagrama de bloques de la multiplexación ETDM.
Fuente: (Nadal R., 2014)

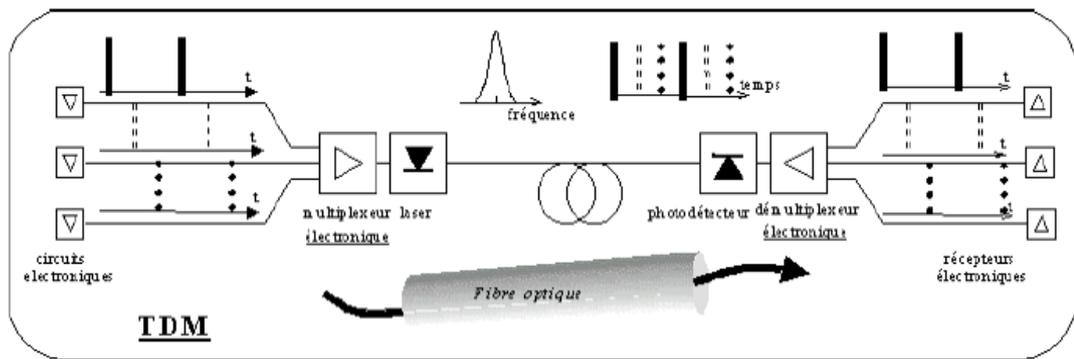


Figura 2. 9: Diagrama esquemático de la multiplexación ETDM utilizado en comunicaciones de fibra óptica.

Fuente: (Nadal R., 2014)

La alta velocidad de bits obtenida se utiliza para modular la corriente de polarización de un diodo láser y solo se emite una señal de luz. Este paso se muestra esquemáticamente en la figura 2.9 por la presencia de tres circuitos electrónicos y un multiplexor electrónico (circuito rápido).

Este tipo de multiplexación por división de tiempo se puede encontrar en los canales T1 en los Estados Unidos, que incluye 24 canales a 64 Kbps en un canal a 1.544 Mbps o en los canales E1 en Europa que agrupan 30 canales analógicos en un canal a 2.048 Mbps. Los canales T1 o E1 se pueden multiplexar juntos para formar canales de mayor velocidad (véase la figura 2.10). Esta jerarquía de flujos se denomina jerarquía digital plesiócrona (Plesiochronous Digital Hierarchy, PDH).

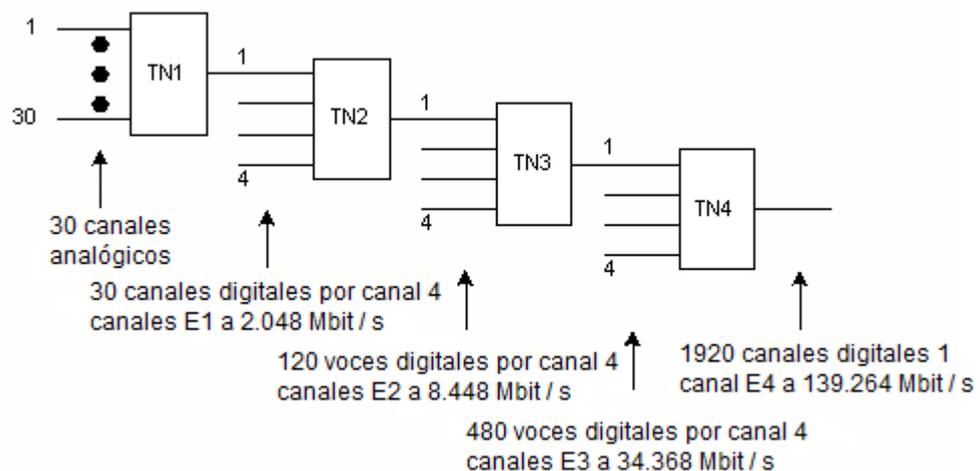


Figura 2. 10: Multiplexación por división de tiempo en la jerarquía PDH.

Fuente: (Coimbra Gutiérrez, 2019)

Esta técnica, sin embargo, tiene una desventaja en el caso de la PDH. El acceso o la inserción de información en un canal E4 requieren demultiplexar todo el tren digital. De manera similar, las tecnologías de redes ópticas sincronizadas (*Synchronous Optical NETWORKS, SONET*) y la jerarquía digital síncrona (*Synchronous Digital Hierarchy, SDH*) son utilizadas como técnicas de transporte en las redes telefónicas de grandes operadores utilizando la multiplexación de tiempo para ensamblar varias líneas en una sola línea de mayor velocidad. Además de la multiplexación de tiempo, hay otros métodos para concentrar N señales en un solo canal.

2.3.4. Multiplexación por división de longitud de onda (WDM)

La multiplexación por división de longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexing, WDM*) consiste en enviar en una sola fibra N portadoras ópticas a diferentes longitudes de onda, cada una de las cuales transmite una velocidad binaria Db. Ya no es el eje de tiempo que se divide en períodos para cada usuario, sino el ancho de banda. Y cada sub-banda se asigna a un canal, tal como se muestra en la figura 2.11. Por lo tanto, se pueden hacer varias transmisiones simultáneamente, cada una en una banda de frecuencia particular (véase la figura 2.12).

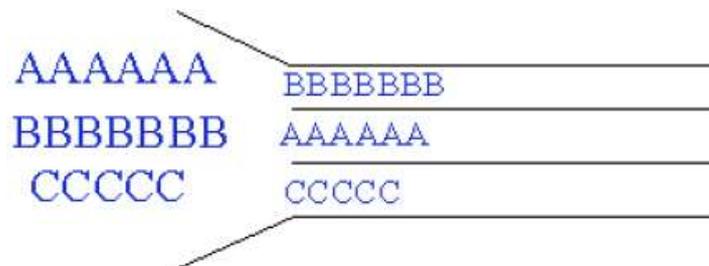


Figura 2. 11: Distribución de sub-bandas en el caso de multiplexación WDM.
Fuente: (Coimbra Gutiérrez, 2019)

Este proceso también se conoce como multiplexación por división de frecuencia (*Frequency Division Multiplexing, FDM*). Estos dos términos cubren la misma noción, pero generalmente, se habla de multiplexación de longitud de onda cuando la separación entre dos canales es relativamente grande (típicamente más de 1 nm), mientras que si se habla de multiplexación de frecuencia cuando esto ocurre la brecha es relativamente pequeña.

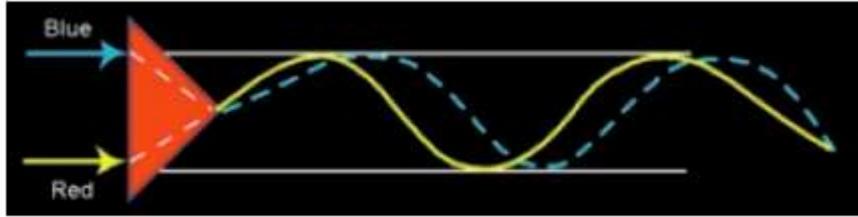


Figura 2. 12: Transmisión óptica de datos realizada a través de cada frecuencia natural.

Fuente: (Coimbra Gutiérrez, 2019)

2.3.4.1. Descripción general de WDM.

El uso de la multiplexación WDM requiere un conjunto de diodos láser que emitan a diferentes longitudes de onda, pero lo suficientemente cerca (cerca de 1550 nm), y un multiplexor/demultiplexor óptico para combinar/separar el conjunto de señales ópticas en la fibra (Dávila & Jiménez, 2014). La figura 2.13 muestra un ejemplo de un enlace utilizando la multiplexación WDM.

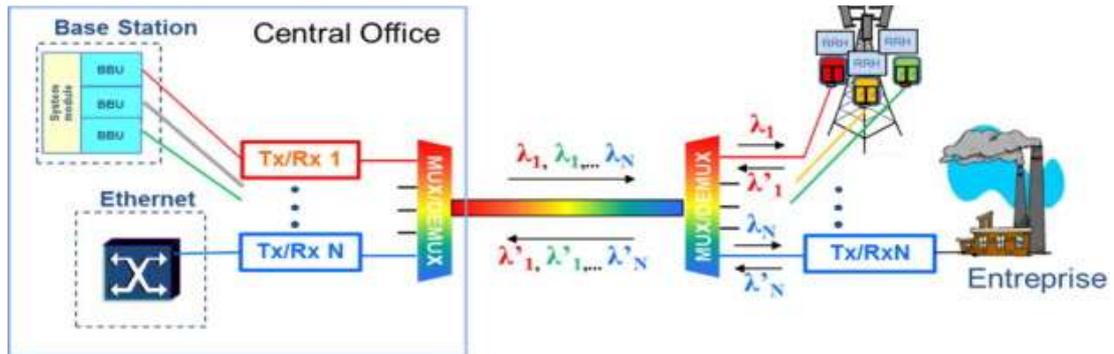


Figura 2. 13: Diagrama esquemático de la multiplexación WDM en comunicaciones de fibra óptica (con 3 longitudes de onda).

Fuente: (Saliou et al., 2015)

Para garantizar una buena calidad de transmisión del multiplexor en la fibra, es importante determinar el espacio mínimo a respetar entre las longitudes de onda emitidas por cada una de las fuentes. Esta cantidad depende de varias cosas: calidad de la fibra, calidad del multiplexor/demultiplexor, longitud de transmisión, calidad de las fuentes, velocidad de datos de cada fuente. La fibra óptica luego lleva una velocidad digital igual a $N \cdot Db$, este último se define a menudo como la capacidad del sistema.

La arquitectura WDM-PON se propone como una alternativa para NG-PON, pudiendo ofrecer un mayor ancho de banda (10 Gbps). WDM-PON asigna una longitud de onda a cada unidad de red óptica (ONU), lo que proporciona un gran ancho de banda. Además, cada ONU opera en una sola velocidad de transmisión, en lugar de la tasa de bits total de WDM. (Villarreal, Cárdenas, & Botía, 2013)

2.3.4.2. Aplicaciones

El principal interés del WDM es permitir el transporte de velocidades de datos muy importantes en la misma fibra, para varios usuarios. Existen sistemas a 4*10 Gbps, 16*10 Gbps y 40 Gbps por longitud de onda. Pero el verdadero punto de partida para el desarrollo de los sistemas de transmisión WDM fue cuando se asoció con la amplificación óptica (véase la figura 2.14). De hecho, la aparición de los amplificadores de fibra dopados con erbio (*Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA*) permitió la amplificación simultánea de todos los canales N de un multiplexor, sin distorsión de la señal útil.

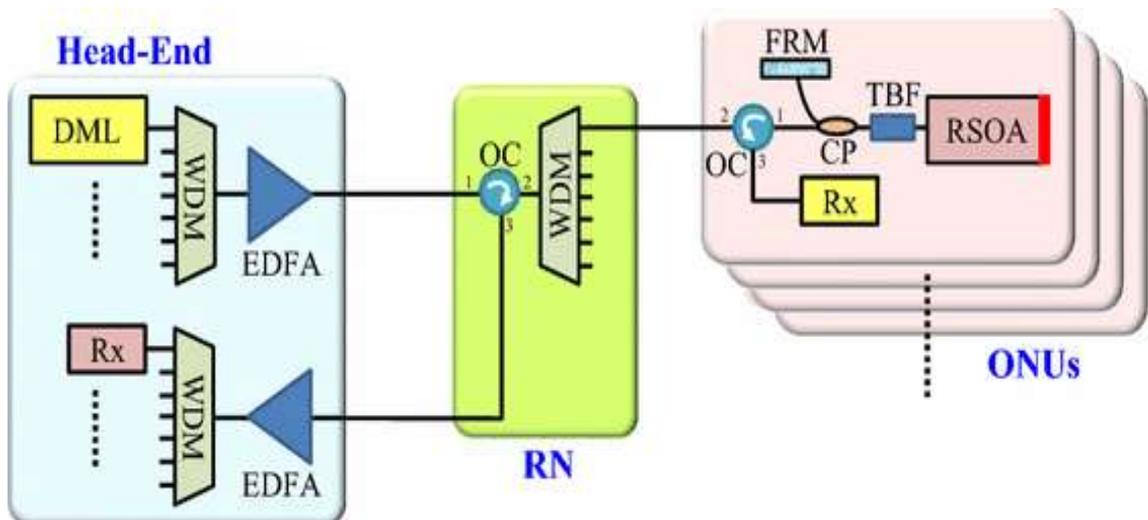


Figura 2. 14: Uso de WDM acoplado con amplificación óptica.
Fuente: (Yeh, Chow, Sung, & Wu, 2016)

Enviar N canales en una fibra óptica en lugar de N fibras se convirtió en una ventaja económica indiscutible. Si, hace poco tiempo, el espaciado entre canales era del orden de 1 nm, ahora se utiliza el término DWDM (Dense WDM). De hecho, con la aparición en el mercado de láseres sintonizables de muy buena calidad, el espaciado entre las longitudes de onda se pudo reducir gradualmente, y se redujo a 0,8 nm o 0,4 nm.

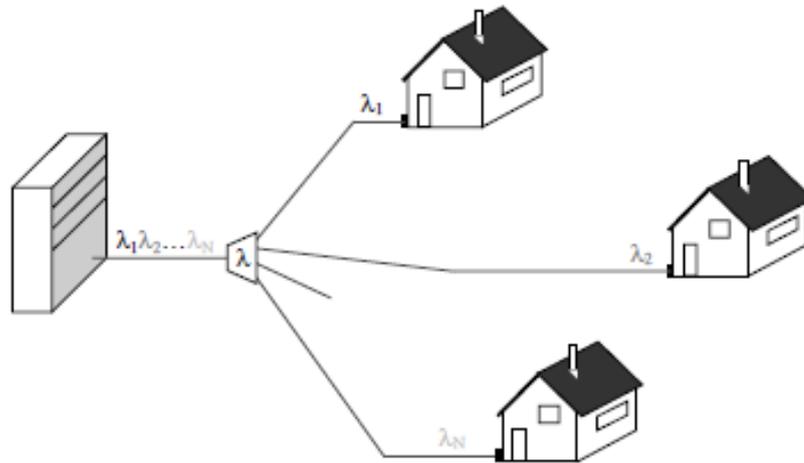


Figura 2. 15: Red local con distribución de longitud de onda.

Fuente: (Yazdani, 2016)

Una segunda aplicación de WDM concierne a las redes locales. A cada abonado se le asigna una longitud de onda, es decir, un "color", como se muestra en la figura 2.15. Este método tiene la ventaja de permitir una evolución continua de la red mediante la adición de nuevos servicios o nuevos suscriptores simplemente insertando una nueva longitud de onda.

2.3.5. Multiplexación por división de longitud de onda combinada con multiplexación por división de tiempo.

Cabe señalar que nada impide que cada señal de modulación de un diodo láser proveniente de un paso de multiplexación por división de tiempo en el dominio electrónico se multiplexe con otras señales en otras longitudes de onda. Asociar a TDM y WDM es la situación más común. En este caso, después de la demultiplexación óptica y la fotodetección, una etapa de demultiplexación en el tiempo permite la reproducción de las señales de tiempo de "baja tasa de bits". Aunque existen otras técnicas de multiplexación.

2.3.6. Acceso múltiple por división de códigos (CDMA).

Por ejemplo, se puede mencionar el acceso múltiple por división de códigos (*Code Division Multiple Access, CDMA*), basado en la asignación de un código a cada estación o usuario. Cada bit correspondiente al 1 se reemplaza por una secuencia de M ranuras, diferentes para cada usuario y definidas como la firma (el código) del mismo. Por lo tanto, se puede enviar

una gran cantidad de mensajes en la misma línea de transmisión, tal como se muestra en la figura 2.16. El destinatario con la "tecla" correcta podrá decodificar la señal que se le envía de toda la información transmitida.

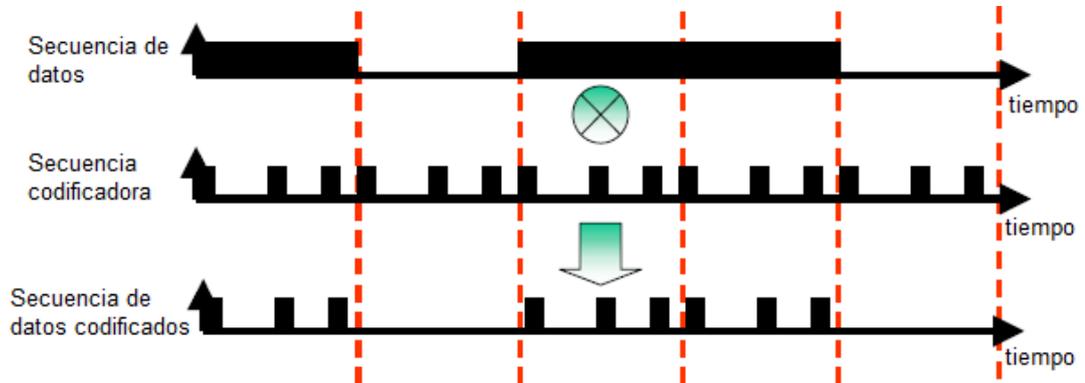


Figura 2. 16: Sistema utilizando la técnica CDMA.
Elaborado por: Autor

2.4. Técnicas de modulación.

Para transmitir información en sistemas ópticos digitales, deben estar impresos en la señal que se enviará en la fibra, esto se conoce como modulación. Para ello, es necesario convertir los datos eléctricos en datos ópticos, para lo cual, existen principalmente dos técnicas: la modulación directa y la modulación externa. Los detalles de estas 2 configuraciones se dan en este párrafo.

2.4.1. Modulación directa

2.4.1.1. Modulación de amplitud

Una de las principales ventajas del uso de láseres semiconductores para los sistemas de telecomunicaciones de fibra óptica es que se pueden modular fácilmente: la modulación de la corriente a través de ellos conduce directamente a la modulación de la intensidad de la corriente. Emite luz Esta técnica se llama modulación directa. Por lo tanto, es suficiente registrar los datos en la fuente de alimentación del láser.

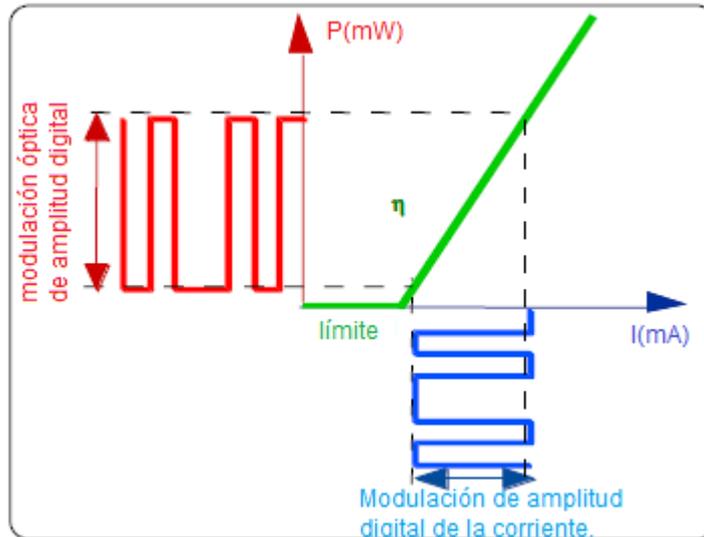


Figura 2. 17: Modulación directa de un diodo láser.
Fuente: (Forouzan, 2012)

2.4.1.2. Componentes utilizados.

Esta solución de modulación directa requiere relativamente pocos componentes. Aparte de la fuente óptica, el láser, solo se necesitan un generador de corriente y un controlador, tal como se muestra en la figura 2.18. La primera transmitirá a una velocidad dada una secuencia de datos, la expresión de la información que debe transmitirse.

La función del controlador es controlar la fuente óptica a las potencias emitidas (ajustando los valores de la corriente de la fuente de alimentación). Para eso, cambia y transforma los niveles de la corriente proveniente del generador.

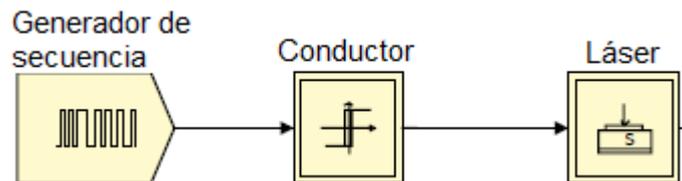


Figura 2. 18: Diagrama de bloques de la modulación directa.
Fuente: (Forouzan, 2012)

2.4.1.3. Limitaciones.

La modulación directa tiene muchas ventajas, en particular el bajo costo de implementación. Pero también tiene limitaciones, es decir, los láseres son a menudo la causa. Su tiempo de reacción, las oscilaciones, el

ruido creado significan que la modulación directa genera para las tasas altas y muy altas cierta degradación en la señal óptica modulada. Para esto, la modulación externa es un remedio.

2.4.2. Modulación externa

2.4.2.1. Principio de funcionamiento.

La modulación externa consiste en escribir los datos eléctricos en una señal óptica continua. Se obtiene modulando directamente el haz de luz en la salida del láser y ya no la corriente de suministro en la entrada del láser. Por lo tanto, los defectos de la modulación directa que son responsabilidad del láser ya no estarán presentes en la señal óptica.

2.4.2.2. Componentes utilizados.

La modulación se realiza en una onda pura y constante y por un componente indispensable: el modulador externa. Esto se controla mediante una tensión externa $v(t)$, modulada y representativa de la información a transmitir. Esta tensión aplicada al modulador tiene la propiedad de modificar el factor de transmisión en la intensidad de salida. La señal óptica continua emitida por el láser alimentado por una corriente constante está, por lo tanto, un poco degradada.

Al pasar por el modulador, se somete a modificaciones del factor de transmisión y la señal de salida se modula de acuerdo con $v(t)$. Un controlador suele estar presente entre los datos y el modulador para establecer los niveles de $v(t)$ y elegir los cambios del factor de transmisión.

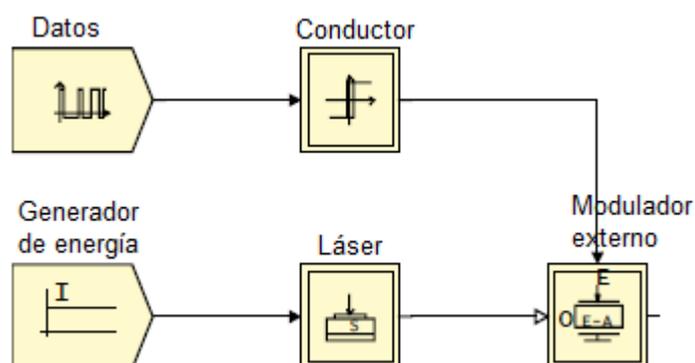


Figura 2. 19: Sinóptico de la modulación externa.

Fuente: (Forouzan, 2012)

La modulación directa, más simple y menos costosa todavía se usa ampliamente si los datos se transmiten a una velocidad de unos pocos Gbps, dependiendo de la calidad del láser. Pero más allá de 5 Gbps, la modulación externa es esencial para mantener una buena calidad de transmisión. Sin embargo, los moduladores no son perfectos y pueden causar defectos, pero su impacto es menos importante.

2.5. Detección óptica.

Así como hay varios métodos para escribir información en la señal de luz, hay diferentes técnicas para recuperarla. Sin embargo, el fotodetector sigue siendo necesario para convertir la señal óptica en eléctrica. Para simplificar, se podría compararlo con un contador de fotones y un generador de electrones. El primer método de detección se llama directa. Consiste en la conversión, gracias a un fotodiodo, de las fluctuaciones de la energía óptica que transportan información en las fluctuaciones de la corriente eléctrica. Se discutirán otros métodos llamados coherentes (detecciones heterodinos y homodinos), en las cuales la portadora óptica se modula en amplitud, fase o frecuencia y se demodula en un detector que realiza una función de mezcla.

2.5.1. Detección directa

Para extraer la señal de que la amplitud modula una onda, puede enderezarse o, más generalmente, pasarla a un dispositivo no lineal, como un diodo. A continuación, se emite una señal de baja frecuencia, la señal de modulación y los armónicos. Los armónicos se pueden eliminar mediante el filtrado, ya que la frecuencia de la onda portadora es muy grande frente a la frecuencia máxima del espectro de la señal de modulación. Este método es convencionalmente llamado detección directa.

La figura 2.20 muestra la composición del bloque denominado fotodetector. El detector no es "ideal", es decir, de ancho de banda infinito. De hecho, la resistencia de carga y la capacitancia de unión del fotodiodo forman un filtro pasa bajo. El detector puede realizarse mediante un diodo PIN o un fotodiodo de avalancha (PDA). El principio de funcionamiento se

mantiene sin cambios. El efecto del fenómeno de la avalancha de hecho provoca, por un lado, el aumento del nivel de la señal y, por otro lado, un aumento en la potencia del ruido de disparo.

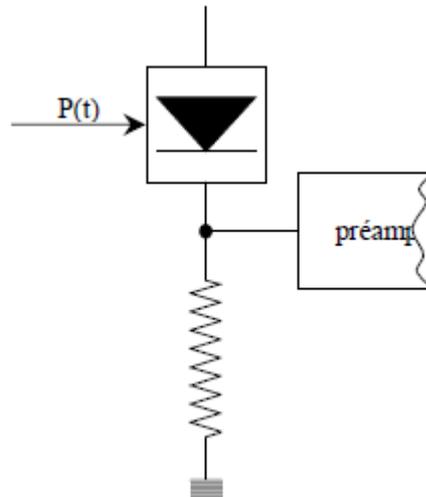


Figura 2. 20: Diagrama del fotodetector en detección directa.
Elaborado por: Autor.

2.5.2. Detector heterodino.

La técnica de detección directa fue históricamente la primera utilizada en los receptores de radio. Desde la década de 1930, se ha visto una recepción heterodina. La señal recibida y una señal de un oscilador local se acoplan para lograr una combinación lineal de las señales presentes en sus dos entradas. Una de las dos salidas ataca al fotomixer. La señal detectada se filtra en un filtro centrado alrededor de la frecuencia intermedia. La figura 2.21 muestra el diagrama esquemático del mezclador heterodino, que constituye el bloque de detección.

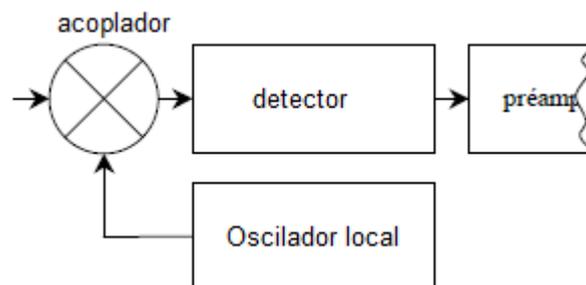


Figura 2. 21: Diagrama del fotodetector en detección heterodina.
Elaborado por: Autor.

La mayor restricción está en la estabilidad de la fuente. De hecho, el oscilador local no emite una señal sinusoidal pura porque se ve afectado por la amplitud y el ruido de fase que dan como resultado la modulación parásita de la señal de frecuencia intermedia.

2.5.3. La recepción homodina.

En el análisis desarrollado hasta ahora, se ha asumido que la frecuencia intermedia es distinta de cero. Sin embargo, también se puede imaginar el uso de un oscilador local que se encuentre en la misma frecuencia que la señal recibida y sincronizada en fase con su portadora. Esto se llama recepción homodina, un caso especial de recepción heterodina.

La recepción homodina aporta una ganancia de 3 dB en comparación con la recepción heterodina. Por otro lado, impone restricciones muy fuertes en la pureza espectral de los osciladores, lo que hace que sea mucho más difícil de implementar. Además, es más fácil hacer subconjuntos (filtro, amplificador) alrededor de una frecuencia intermedia que en banda base.

2.5.4. Comparación entre detección directa y heterodina.

La recepción heterodina tiene muchas ventajas sobre la detección directa. En primer lugar, ofrece una mayor ganancia en la sensibilidad del receptor. Luego, ofrece la posibilidad de utilizar modulación de fase o frecuencia, lo que no permite la detección directa. Además, la recepción heterodina permite poner las portadoras moduladas en la banda de frecuencia para formar un sistema multicanal.

De este modo, se puede extraer el múltiplex de banda ancha transmitido por la fibra óptica, el canal deseado, seleccionando la frecuencia correspondiente en el oscilador local. Por todas estas razones, desde finales de la década de 1970, se han desarrollado investigaciones sobre sistemas coherentes.

Pero la aparición de amplificadores de fibra dopada a fines de la década de 1980 cambió radicalmente la situación, haciendo posible obtener en la detección directa una sensibilidad equivalente a la de la recepción heterodina. El filtrado óptico también se está volviendo más eficiente y la ventaja de la recepción heterodina en términos de densidad de canal no está demostrada. Además, la estructura del receptor heterodino es más compleja que en la detección directa.

En óptica, actualmente no hay receptores coherentes integrados, incluidos el oscilador local, el mezclador y el circuito de frecuencia intermedia, y este aspecto técnico constituye un factor adicional en detrimento de la técnica coherente. Hoy en día, la combinación del preamplificador óptico con la detección directa de diodo PIN encuentra su aplicación en la estructuración y redes metropolitanas. Un receptor de diodo PIN con un preamplificador óptico es, en particular en el caso de altas tasas de datos, mucho más eficiente que un receptor con un diodo de avalancha que tiene un producto de banda de ganancia limitada.

2.5.5. El preamplificador

Para superar la modesta sensibilidad del fotodiodo PIN, el fotorreceptor suele ir acompañado de un preamplificador. Para minimizar el ruido y la distorsión en las señales, estos dos bloques a menudo se combinan en una sola caja. Las estructuras de estos preamplificadores son de dos familias.

2.5.5.1. El amplificador de alta impedancia de entrada.

El amplificador de entrada de alta impedancia tiene una estructura sin realimentación, con un amplificador operacional de hasta unos pocos MHz o un transistor de efecto de campo, tal como se muestra en la figura 2.22. Si la resistencia a la polarización R_p es fuerte, estas estructuras son muy sensibles y con poco ruido.

Desafortunadamente, aparece una constante de tiempo, por lo tanto, un efecto de integración de señal más allá de la frecuencia de corte. Para

superar este bajo ancho de banda, el amplificador debe tener una dinámica muy fuerte y ser seguido por un ecualizador, la realización es difícil porque la constante de tiempo no es reproducible.

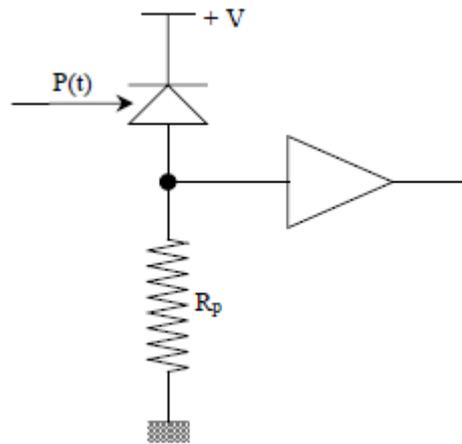


Figura 2. 22: Estructura de un amplificador con alta impedancia de entrada.
Elaborado por: Autor.

2.5.5.2. Amplificador de transimpedancia

El amplificador de transimpedancia tiene una estructura de realimentación R_c (véase la figura 2.23). Si la ganancia de la cadena de amplificación es grande, se tiene una ganancia plana y reproducible en un ancho de banda amplio. La constante de tiempo se divide por la tasa de retroalimentación. Por otro lado, la resistencia R_c aporta un suplemento de ruido.

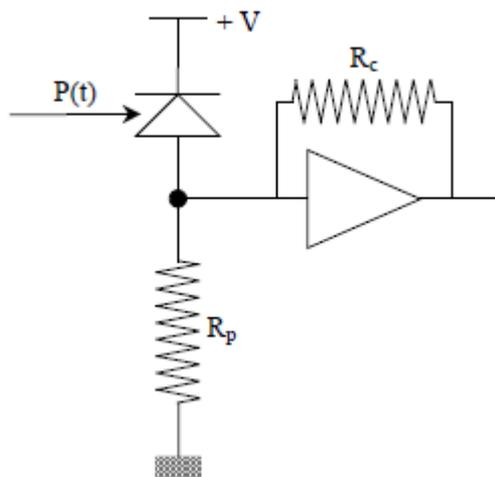


Figura 2. 23: Estructura de un amplificador de transimpedancia.
Elaborado por: Autor.

2.5.5.3. Comparación de las dos estructuras.

Por debajo de una cierta frecuencia (del orden de 50 MHz), la estructura de alta impedancia es menos ruidosa. Más allá de esto, se utiliza un amplificador de transimpedancia con transistores bipolares, que es menos ruidoso y tiene un gran ancho de banda. Por encima de los 500 MHz, esta solución está limitada por problemas de estabilidad y utiliza transistores de efecto de campo GaAs o InP, integrados si es posible con el fotodiodo.

Capítulo 3: Simulación y Resultados Obtenidos.

3.1. Introducción

Esta sección trata brevemente al sistema de comunicación por fibra óptica, así como sus ventajas y desventajas.

3.1.1 Comunicación de fibra óptica

La comunicación por fibra óptica es un método para transmitir información de un lugar a otro mediante el envío de pulsos de luz a través de una fibra óptica. La luz forma una onda portadora electromagnética que se modula para transportar información. Las frecuencias de la portadora óptica suelen ser de 200 THz, en contraste con las frecuencias de la portadora de microondas (1 GHz).

Los sistemas de comunicación óptica tienen el potencial de transportar información a velocidades de bits de 1 Tbps. El uso y la demanda de fibra óptica ha crecido enormemente y hay muchas aplicaciones de fibra óptica. Las aplicaciones de telecomunicaciones están muy extendidas, desde redes globales hasta computadoras de escritorio. Esto implica la transmisión de voz, datos o video a distancias de menos de un metro a cientos de kilómetros, varios diseños de cables.

3.1.2 Ventajas de sistemas de comunicación óptica

A continuación, se enuncian las ventajas de utilizar sistemas de comunicaciones ópticos:

- a. Ancho de banda de gran potencial.
- b. Tamaño y peso pequeño.
- c. Aislamiento eléctrico.
- d. Inmunidad a la interferencia y la diafonía.
- e. Seguridad de la señal
- f. Baja pérdida de transmisión
- g. Robustez y flexibilidad
- h. Confiabilidad del sistema y facilidad de mantenimiento.
- i. Bajo costo potencial

3.1.3 Obstáculos en sistemas de comunicación óptica.

En la actualidad existen 3 obstáculos en los sistemas de comunicación óptica:

- a. Atenuación
- b. Dispersión
- c. No linealidad

3.2. Análisis de la dispersión en la fibra óptica.

La dispersión se define como la propagación del pulso en una fibra óptica. Cuando un pulso de luz se propaga a través de una fibra, elementos como la apertura numérica (NA), el diámetro del núcleo, el perfil de índice de refracción, la longitud de onda (λ) y el ancho de la línea del láser hacen que el pulso se amplíe. La dispersión aumenta a lo largo de la longitud de la fibra. El efecto general de la dispersión en el rendimiento de un sistema de fibra óptica se conoce como interferencia entre símbolos (ISI).

La interferencia entre símbolos se produce cuando la propagación del pulso causada por la dispersión hace que los pulsos de salida de un sistema se superpongan, lo que conduce además a la degradación de la señal. La dispersión se divide generalmente en tres categorías: dispersión modal, dispersión cromática y dispersión en modo de polarización.

3.3. Técnicas de compensación de la dispersión.

Existen varios métodos para la compensación de dispersión, a saber, fibra de compensación de dispersión (*Dispersion Compensating Fiber, DCF*), filtrado óptico, rejilla de Bragg de fibra (*Fiber Bragg Grating, FBG*), conjugación de fase óptica, compensación de dispersión eléctrica, filtros digitales, etc. Cada técnica tiene sus propias ventajas y desventajas. Las técnicas más utilizadas son DCF y FBG.

3.3.1. Fibra de compensación de dispersión (DCF)

DCF es un bucle de fibra que tiene una dispersión negativa igual a la dispersión de la fibra transmisora. Puede insertarse al principio (técnicas de compensación previa) o al final (técnicas de compensación posterior) entre

dos amplificadores ópticos. En la compensación simétrica, el DCF se inserta antes y después de la fibra de modo estándar.

La dispersión positiva de la fibra de modo estándar en las bandas C y L se puede compensar utilizando fibra compensadora de la dispersión que tenga valores altos de dispersión negativa desde -70 a -90 ps/nm·km. Un módulo DCF debe tener una baja pérdida de inserción, una baja dispersión del modo de polarización y una baja no linealidad óptica. Al colocar un DCF con dispersión negativa después de una fibra óptica monomodo (*Single Mode Fiber, SMF*) con dispersión positiva, la dispersión neta será cero según:

$$D_{SMF} \times L_{SMF} = -D_{DCF} \times L_{DCF}$$

Donde D y L son la dispersión y la longitud del segmento de fibra óptica respectivamente.

3.3.2. Rejilla de Bragg de Fibra (FBG)

Una de las técnicas más avanzadas y más utilizadas en los métodos de compensación de dispersión es la FBG. FBG es una pieza de fibra óptica con la variación periódica del índice de refracción a lo largo del eje de la fibra. Esta red de fase actúa como un filtro de rechazo de banda que refleja las longitudes de onda que satisfacen la condición de Bragg y que transmiten las demás longitudes de onda.

La longitud de onda reflejada cambia con el periodo de rejilla. Por lo tanto, FBG es un filtro muy simple y de bajo costo para la selección de longitud de onda que mejora la calidad y reduce los costos en redes ópticas. La ecuación que relaciona la periodicidad de la red, la longitud de onda de Bragg y el índice de refracción efectivo del medio de transmisión viene dada por:

$$\lambda_B = 2n\Lambda$$

Esta ecuación, λ_B , n y Λ son la longitud de onda de Bragg, el índice de refracción del núcleo y el período de rejilla, respectivamente. La figura 3.1

muestra el esquemático de funcionalidad de la rejilla de Bragg en fibras ópticas.

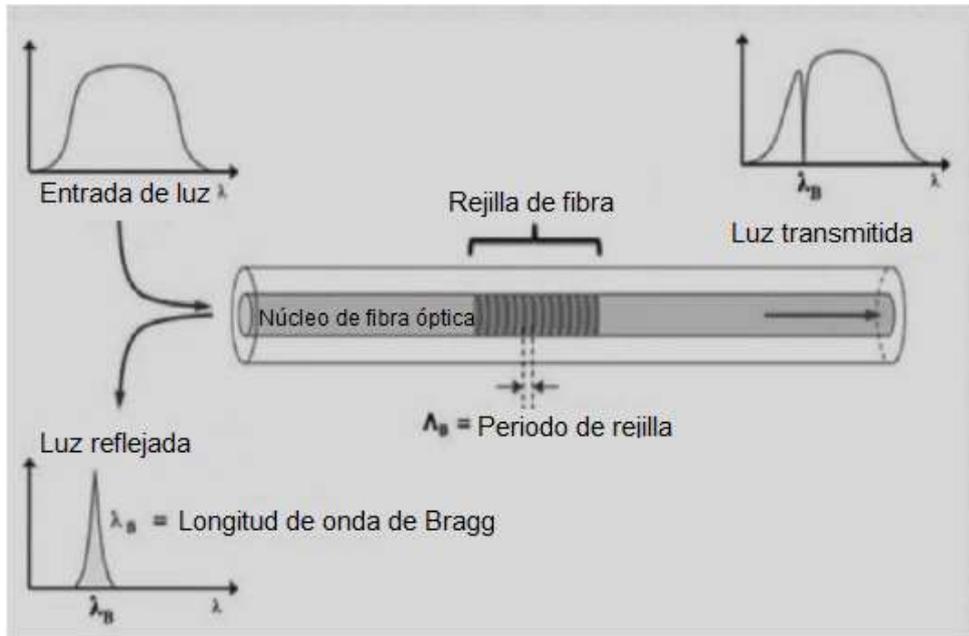


Figura 3. 1: Principio de funcionamiento de la FBG.

Elaborado por: Autor

3.4. Configuración de simulación del sistema DWDM.

El sistema DWDM de 32 canales que utiliza DCF y FBG como técnicas de compensación de dispersión está diseñado y simulado en el software de simulación OptiSystem (Versión 7). Los parámetros de la tabla 3.1 se utilizan para el sistema propuesto y la tabla 3.2 describe los parámetros de la fibra en el mismo.

Tabla 3. 1: Parámetros de simulación

Parámetros	Valor
Tasas de datos	10, 20, 40 Gbps
Longitud de la secuencia	128 bits
Muestras por bits	64
Frecuencia de láser C/W	193.4 THz
Longitud de onda de referencia	1550 nm
Potencia de entrada C/W	10 dBm
Modulador de relación de extinción	30 dB
Espaciado de canales	100 GHz
Capacidad	32x40 Gbps, 32x20 Gbps, 32x10 Gbps

Elaborado por: Autor

Tabla 3. 2: Parámetros de fibra en el sistema DWDM propuesto.

Parámetros	SMF	DCF
Longitud (km)	120	24
Longitud (km)	80	16
Atenuación (dB/km)	0.2	0.5
Dispersión (ps/nm/km)	17	-85
Pendiente de dispersión (ps/nm ² /km)	0.075	-0.3
Retardo diferencial de grupo (ps/km)	0.2	0.2
Coefficiente de PMD (ps/nm)	0.5	0.5

Elaborado por: Autor

La figura 3.2 muestra la configuración de simulación para los compensadores de dispersión combinados DCF y FBG con formato de modulación de no retorno a cero (NRZ) y la figura 3.3 muestra la configuración de la simulación con formato de modulación de retorno a cero (RZ). El sistema funciona con la comunicación óptica básica que consiste en un transmisor, un enlace de transmisión y un receptor a diferentes velocidades (10, 20, 40 Gbps). El sistema transmite información utilizando una onda portadora óptica de transmisor a receptor a través de fibra óptica. Cada sección del transmisor consta de un generador de secuencias de bits, un generador de impulsos NRZ o RZ, un láser de onda continua (CW) y un modulador Mach-Zehnder (M-Z).

El multiplexor óptico que tiene 32 puertos de entrada se utiliza para combinar las señales y las transmisiones a través del enlace de fibra óptica monomodo. Para el compensador de dispersión, se utilizan DCF y FBG. Después de la compensación de la dispersión, la señal pasará a través del amplificador óptico que está representado por el amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA).

Se requiere una amplificación óptica para superar la pérdida de fibra y también para amplificar la señal antes de que la reciba el fotodetector PIN en la parte del receptor. El canal óptico consta de 120 km de fibra monomodo

(SMF) y 24 km de DCF. También se analiza el sistema para 80 km de SMF y 16 km de DCF. El efecto combinado del esquema de compensación de dispersión DCF y FBG se utiliza para compensar la dispersión positiva acumulada en la longitud de la fibra monomodo.

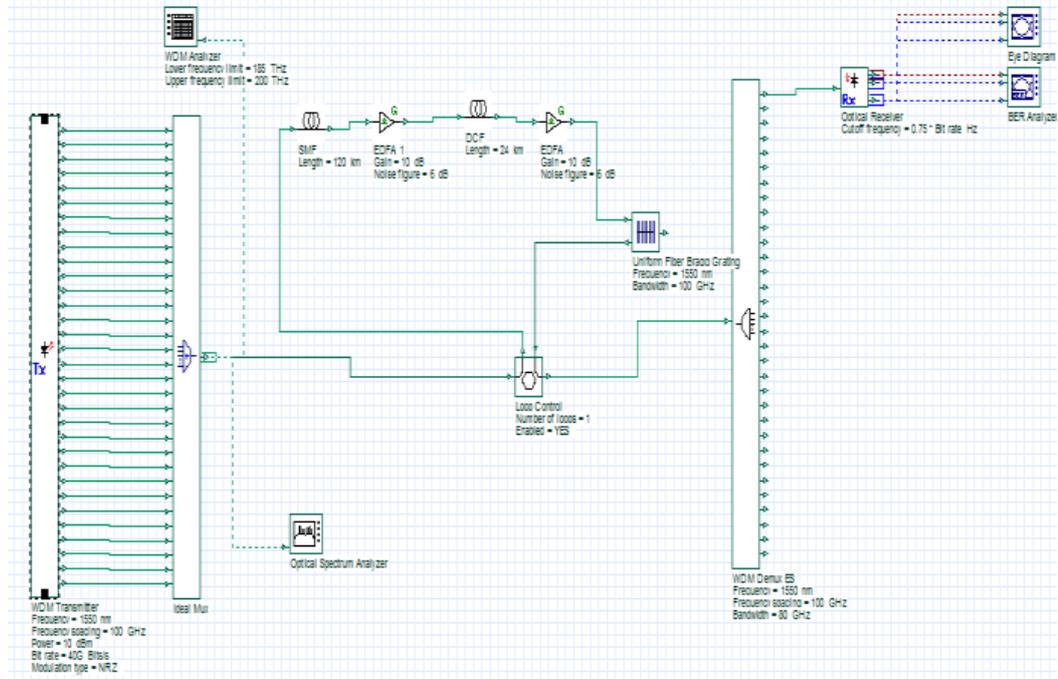


Figura 3. 2: Configuración de simulación para el formato de modulación NRZ usando DCF y FBG como compensadores de dispersión.

Elaborado por: Autor.

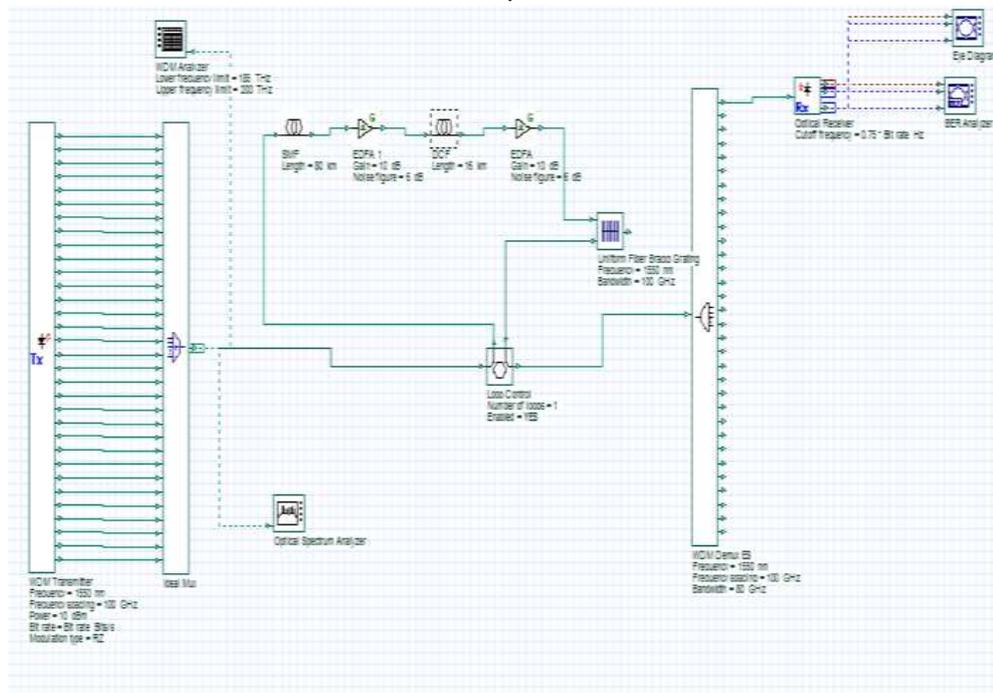


Figura 3. 3: Configuración de simulación para el formato de modulación RZ utilizando DCF y FBG como compensadores de dispersión

Elaborado por: Autor.

3.5. Resultados y discusión.

La simulación se lleva a cabo para evaluar el rendimiento de la técnica de compensación de dispersión utilizando DCF y FBG en un sistema DWDM de 32 canales a diferentes velocidades de datos (10 Gbps, 20 Gbps y 40 Gbps). El rendimiento a diferentes velocidades de datos se investiga en términos de tasa de error de bits (BER) y el factor de calidad Q (dB) utilizando formatos de modulación NRZ y RZ.

La tabla 3.3 muestra los resultados de la simulación del sistema propuesto en OptiSystem empleando el formato de modulación de retorno a cero (ZR) utilizando fibra óptica monomodo para enlaces de 80 y 120 km, respectivamente.

Tabla 3. 3: Resultados de simulación con formato de modulación RZ para 120 km y 80 km SMF

Longitud SMF	Longitud DCF	Velocidad de bits	Q factor	BER mínimo
120 km	24 km	10 Gbps	36.093	9.91086e-286
120 km	24 km	20 Gbps	24.2101	5.57302e-130
120 km	24 km	40 Gbps	9.00217	7.37089e-020
80 km	16 km	10 Gbps	53.9142	0
80 km	16 km	20 Gbps	56.9276	0
80 km	16 km	40 Gbps	10.9222	3.01707e-028

Elaborado por: Autor.

Las figuras 3.4, 3.5 y 3.6 muestran las métricas del factor de calidad Q y de la tasa de error de bits (VER) a diferentes velocidades de bits (10 Gbps, 20 Gbps y 40 Gbps) utilizando el formato de modulación de retorno a cero (RZ) para enlaces de 120 km mediante fibra óptica monomodo. De la figura 3.4, se ha observado que para enlaces de 120 km usando fibra monomodo con velocidad de 10 Gbps, el factor de calidad Q es máximo y la BER es mínima con relación a las velocidades de 20 Gbps y 40 Gbps. Por lo tanto, al utilizar la unidad de compensación de dispersión, es decir, DCF y FBG, el valor del factor de calidad Q ha aumentado.

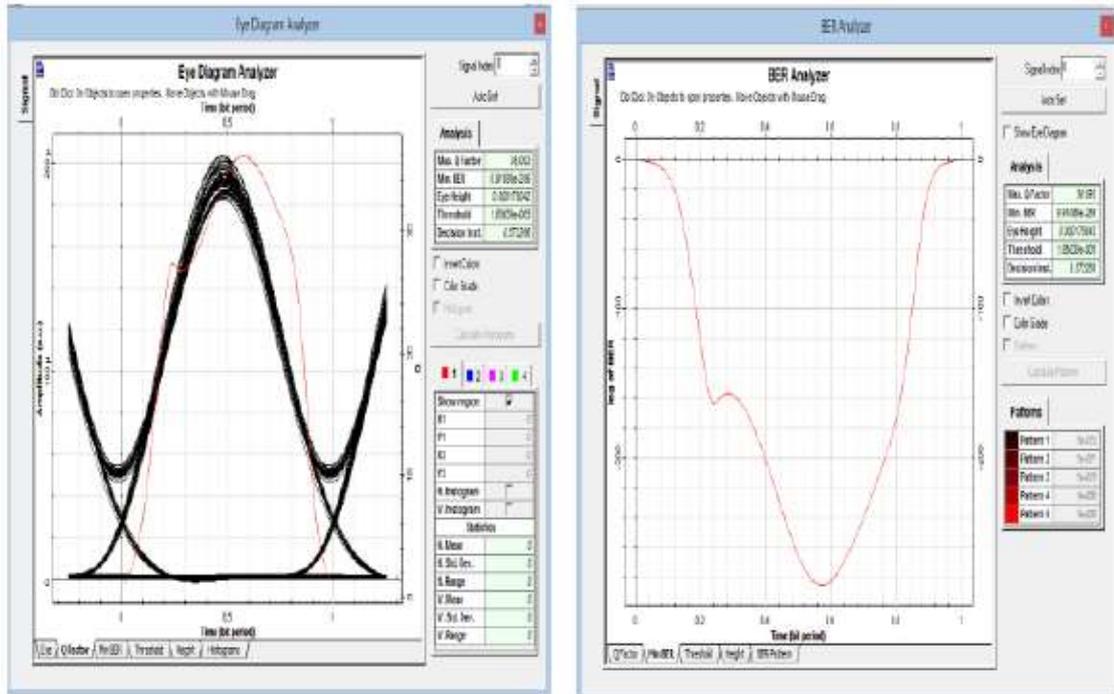


Figura 3. 4: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 10 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación RZ para enlaces de 120 km usando fibra óptica monomodo.
Elaborado por: Autor.

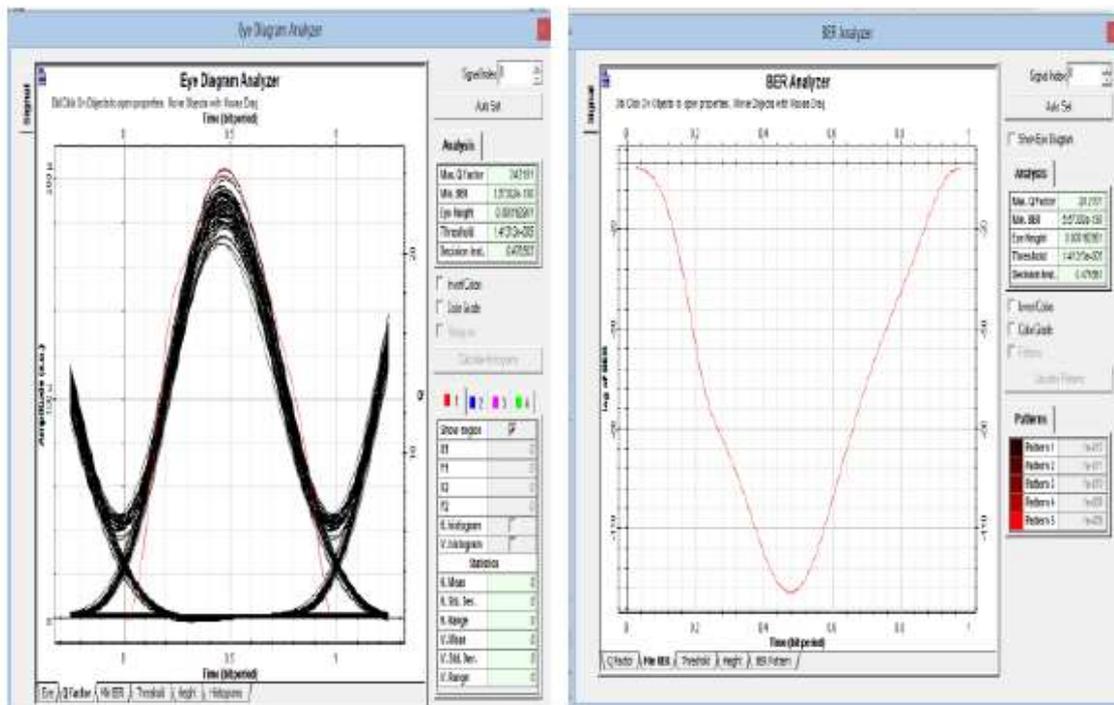


Figura 3. 5: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 20 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación RZ para enlaces de 120 km usando fibra óptica monomodo.
Elaborado por: Autor.

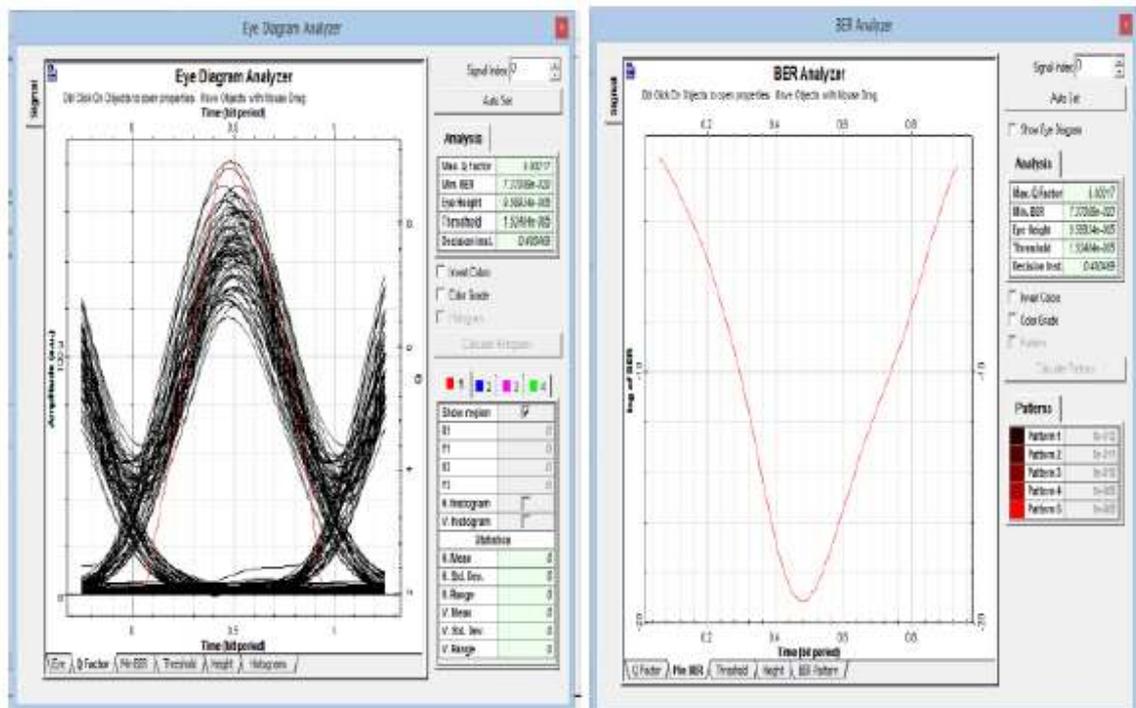


Figura 3. 6: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 40 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación RZ para enlaces de 120 km usando fibra óptica monomodo.
Elaborado por: Autor.

Las figuras 3.7, 3.8 y 3.9 muestran las métricas del factor de calidad Q y de la tasa de error de bits (BER) a diferentes velocidades de bits (10 Gbps, 20 Gbps y 40 Gbps) utilizando el formato de modulación de retorno a cero (RZ) para enlaces de 80 km mediante fibra óptica monomodo.

En las figuras 3.7 y 3.8, se puede observar que el factor de calidad Q es máximo y la BER es 0 a velocidades de datos de 10 Gbps y 20 Gbps, respectivamente para enlaces de 80 km utilizando fibra monomodo. En consecuencia, el factor de calidad Q es inversamente proporcional a la longitud de la fibra óptica monomodo. A diferencia de la figura 3.9 que tiene un diagrama de ojo en condiciones normales, pero no eficientes en relación a las figuras 3.7 y 3.8.

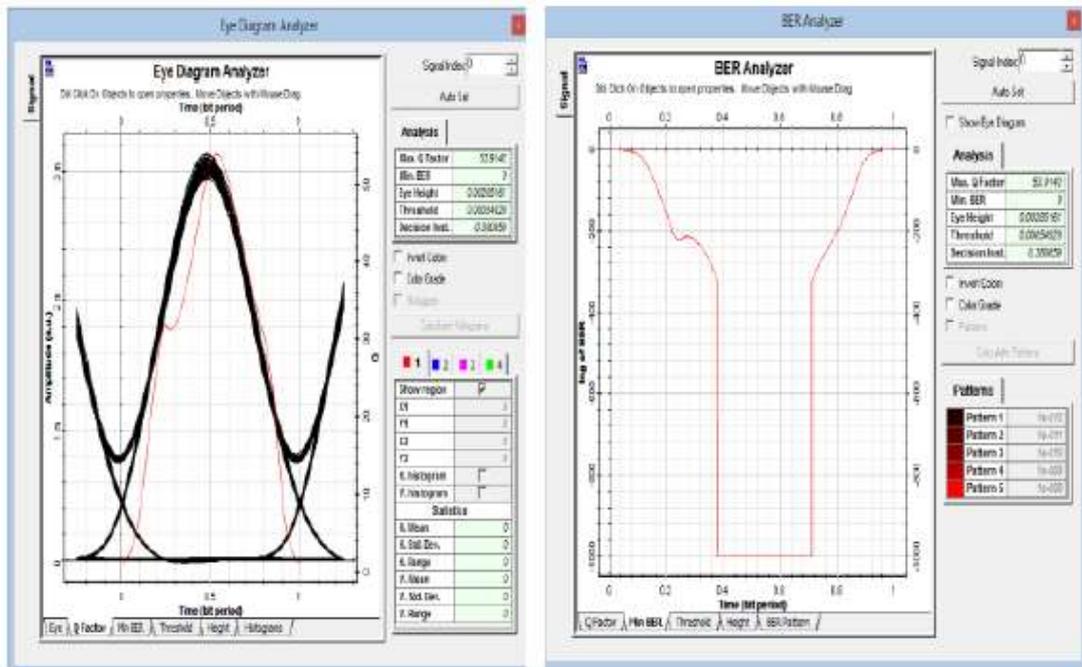


Figura 3. 7: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 10 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación RZ para enlaces de 80 km usando fibra óptica monomodo.

Elaborado por: Autor.

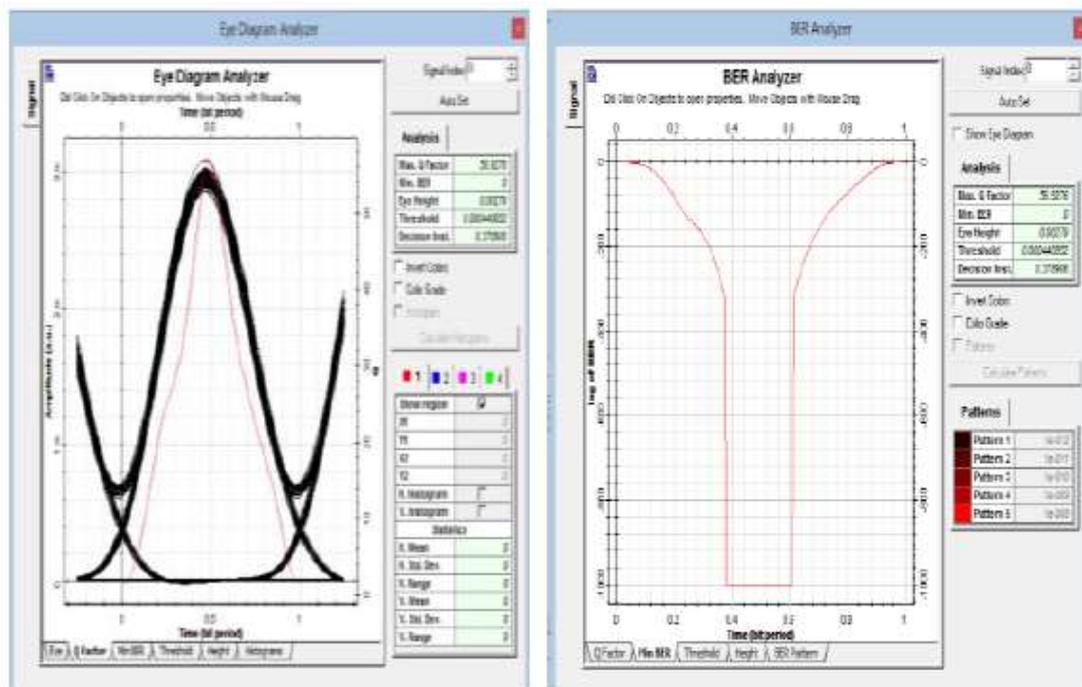


Figura 3. 8: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 20 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación RZ para enlaces de 80 km usando fibra óptica monomodo.

Elaborado por: Autor.

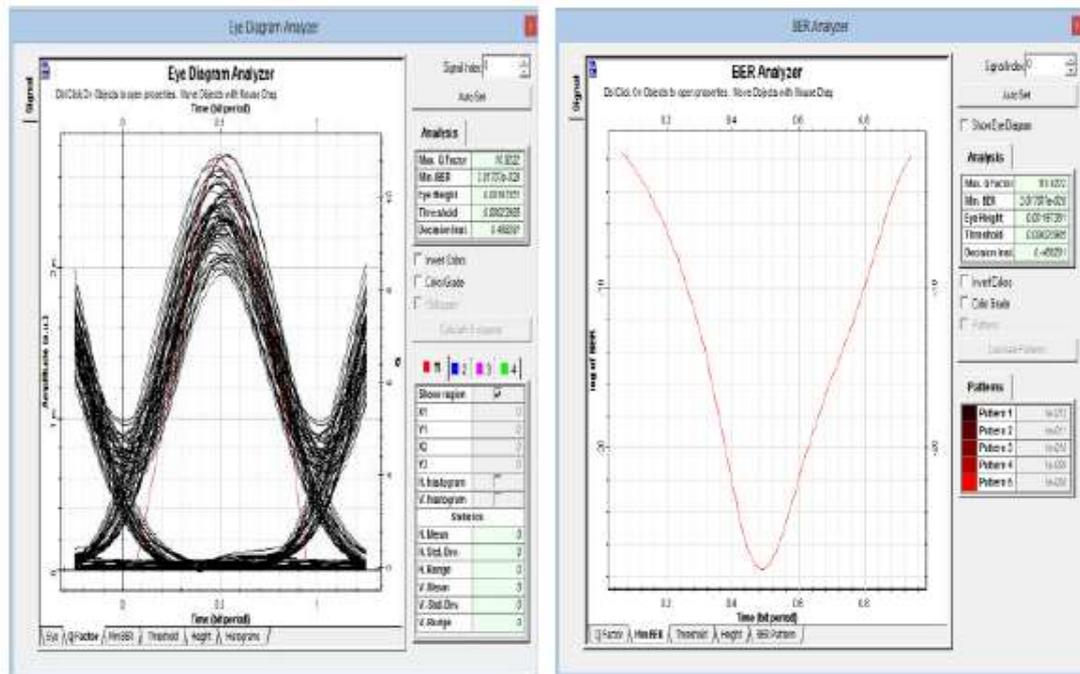


Figura 3. 9: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 40 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación RZ para enlaces de 80 km usando fibra óptica monomodo.

Elaborado por: Autor.

La tabla 3.4 muestra los resultados de simulación del sistema propuesto en OptiSystem empleando el formato de modulación no retorno a cero (NZR) utilizando fibra monomodo para enlaces de 80 y 120 km, respectivamente.

Tabla 3. 4: Resultados de simulación con formato de modulación NRZ para 120 km y 80 km SMF

Longitud SMF	Longitud DCF	Velocidad de bits	Q factor	BER mínimo
120 km	24 km	10 Gbps	24.3422	2.27963e-131
120 km	24 km	20 Gbps	23.3453	5.40369e-121
120 km	24 km	40 Gbps	14.1067	1.34036e-045
80 km	16 km	10 Gbps	21.243	1.22524e-100
80 km	16 km	20 Gbps	24.4025	6.46113e-132
80 km	16 km	40 Gbps	13.0402	2.86537e-039

Elaborado por: Autor.

En las figuras 3.10, 3.11 y 3.12 se muestran los resultados obtenidos del analizador de diagramas de ojo y la tasa de error de bits (BER). La figura 3.10 muestra el factor de calidad Q como máximo a una velocidad de 10

Gbps para enlace de 120 km de longitud de fibra y también muestra la gráfica del analizador de la tasa de error de bits (BER), que es mínimo a 10 Gbps.

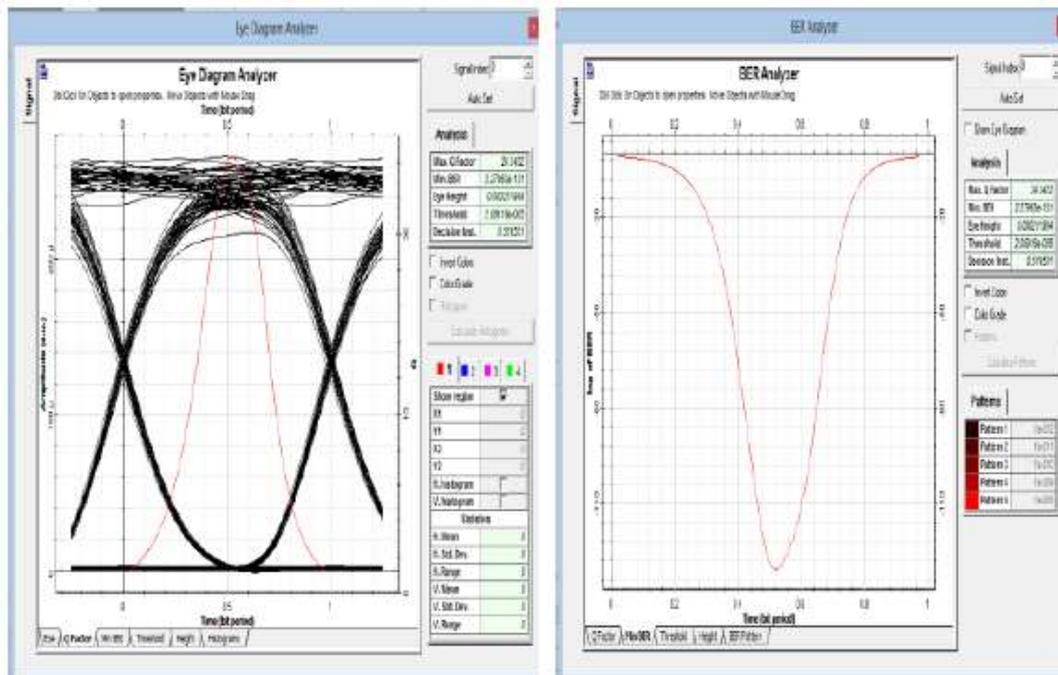


Figura 3. 10: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 10 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación NRZ para enlaces de 120 km usando fibra óptica monomodo.

Elaborado por: Autor.

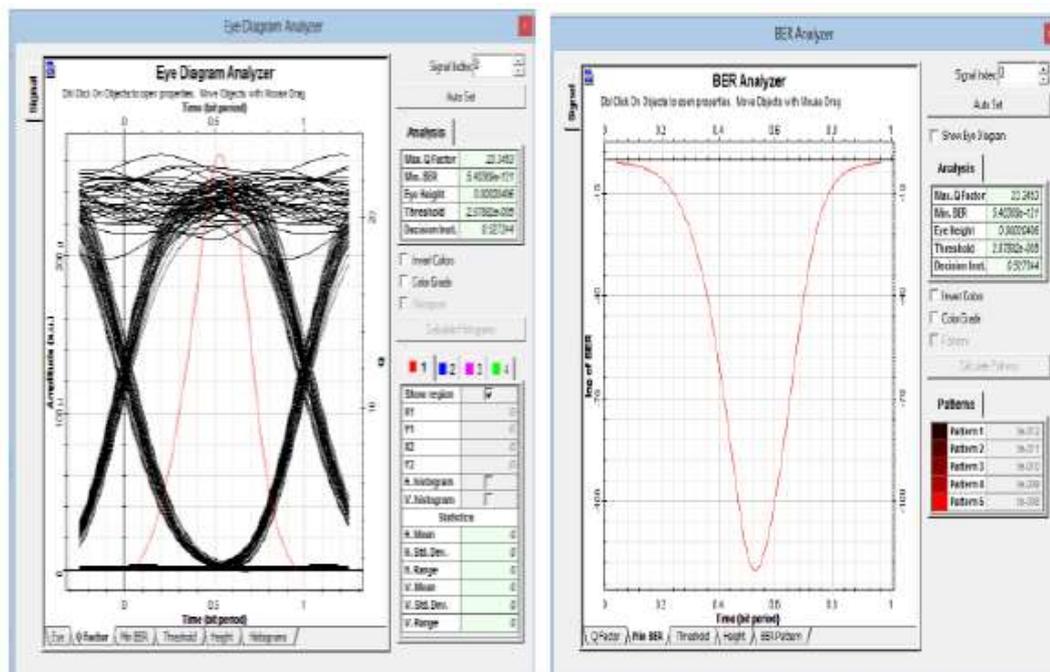


Figura 3. 11: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 20 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación NRZ para enlaces de 120 km usando fibra óptica monomodo.

Elaborado por: Autor.

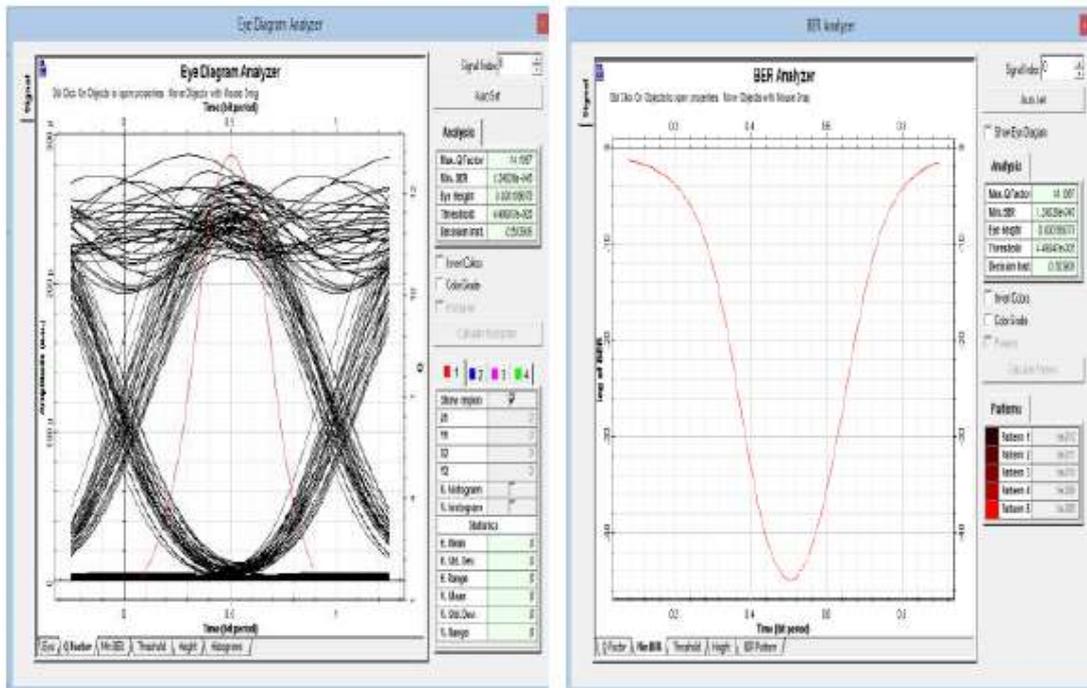


Figura 3. 12: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 40 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación NRZ para enlaces de 120 km usando fibra óptica monomodo.
Elaborado por: Autor.

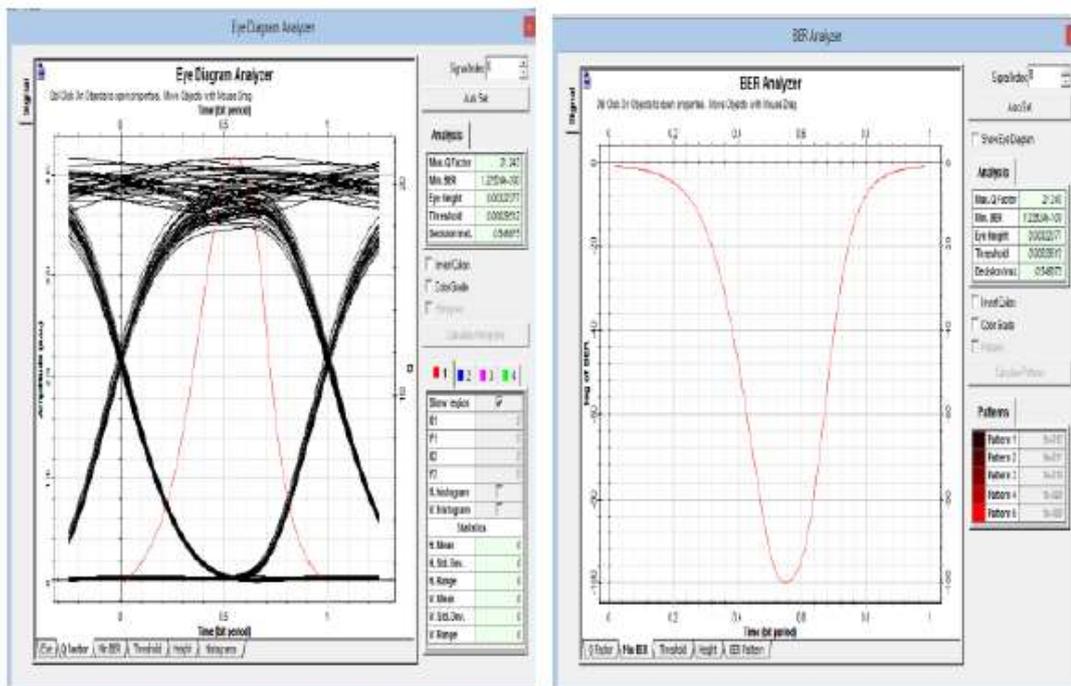


Figura 3. 13: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 10 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación NRZ para enlaces de 80 km usando fibra óptica monomodo.
Elaborado por: Autor.

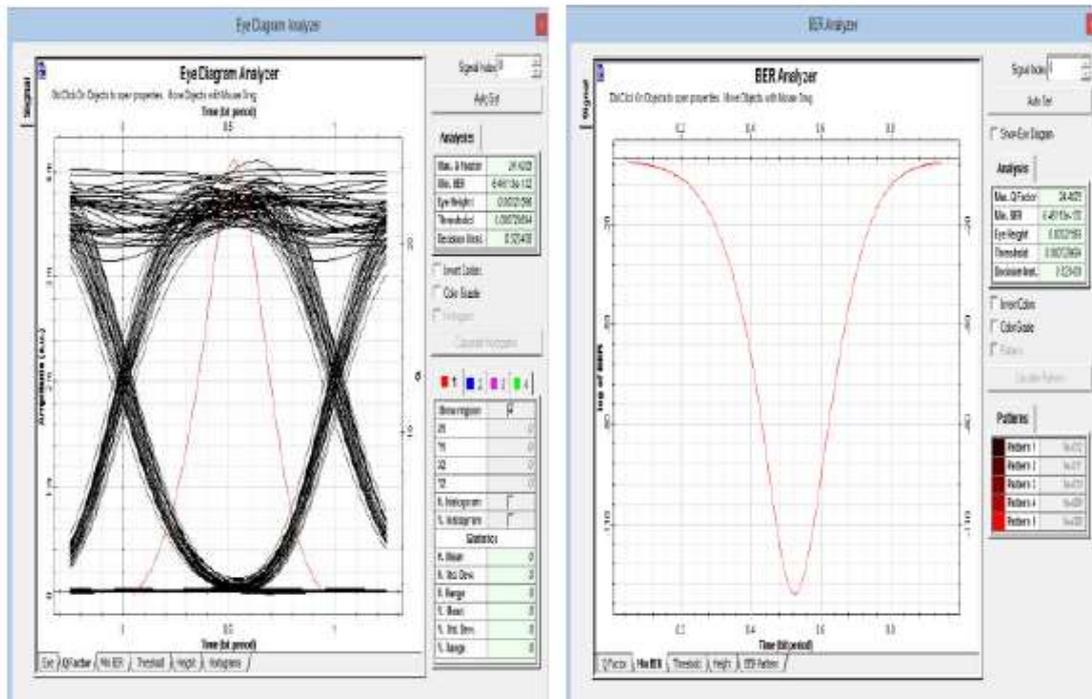


Figura 3. 14: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 20 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación NRZ para enlaces de 80 km usando fibra óptica monomodo.
Elaborado por: Autor.

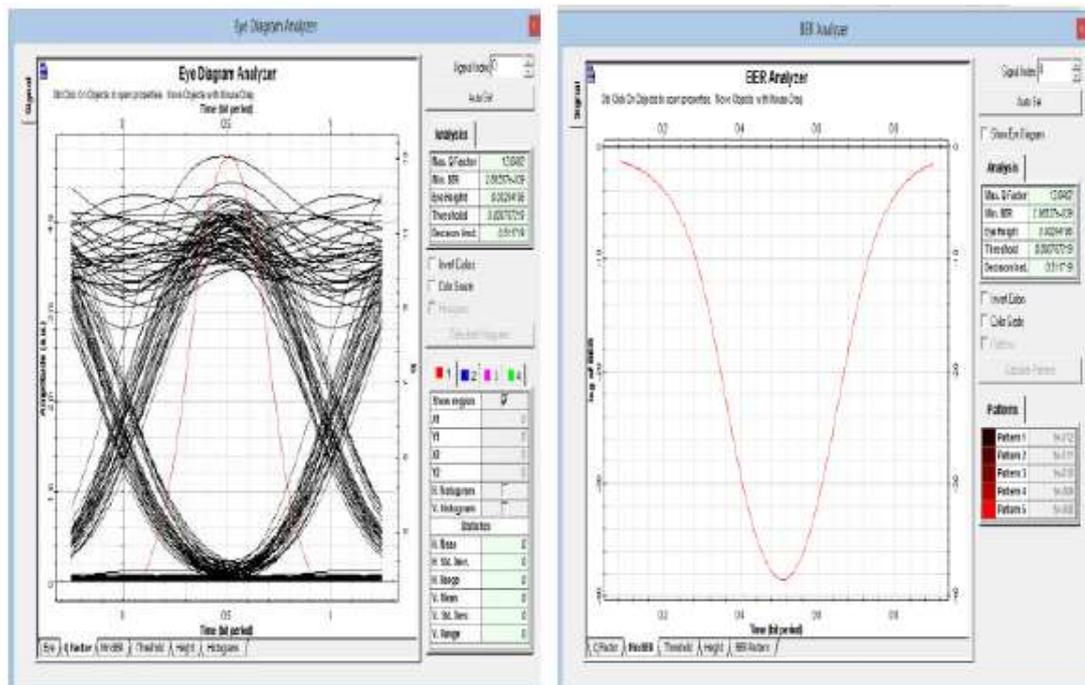


Figura 3. 15: Gráficas del factor Q (diagrama de ojo) y análisis de BER con velocidad de 40 Gbps con 32 canales empleando formato de modulación NRZ para enlaces de 80 km usando fibra óptica monomodo.
Elaborado por: Autor.

Conclusiones

En esta investigación, el rendimiento de las técnicas de compensación posterior a la dispersión utilizando fibra compensadora de dispersión (DCF) y fibra Bragg Grating (FBG) en un sistema DWDM de 32 canales a diferentes velocidades de bits (10 Gbps, 20 Gbps y 40 Gbps) es evaluado.

La separación de canales de 100 GHz se utiliza en este sistema con la frecuencia central de 193,4 THz. El rendimiento del sistema simulado se ha investigado en términos de BER y del factor Q. A partir de los resultados de la simulación, se ha observado que el formato de modulación RZ es más eficiente para los sistemas gestionados por dispersión de transmisión a larga distancia, alta velocidad de bits, en DWDM.

El rendimiento del sistema en términos del factor Q y BER muestra que el formato de modulación RZ ofrece mejores resultados que el formato de modulación NRZ. Por lo tanto, los resultados de la simulación muestran que los sistemas DWDM tienen buen rendimiento, baja tasa de error de bits y aprovechan al máximo la alta velocidad, si las fibras compensadoras de dispersión DCF y FBG se incorporan en el sistema como la técnica de compensación de dispersión.

Recomendaciones

De acuerdo al desarrollo del trabajo del examen complejo, se realizan las siguientes recomendaciones:

1. Diseñar escenarios de simulación de sistemas DWDM utilizando multiplexores ópticos Add-Drop.
2. Análisis comparativo de amplificadores híbridos a 40 Gbps en sistemas de comunicación óptica DWDM.

Bibliografía

- Chung, T. W., Coulter, J., Fitchett, J., Mokbel, S., & Arnaud, B. (2019). Architectural and Engineering Issues for Building an Optical Internet. Recuperado el 14 de junio de 2019, de ResearchGate website: https://www.researchgate.net/publication/2333884_Architectural_and_Engineering_Issues_for_Building_an_Optical_Internet/citations
- Coimbra Gutiérrez, E. (2019). Redes y Sistemas de Telecomunicaciones. Recuperado el 14 de junio de 2019, de Coimbraweb website: <http://www.coimbraweb.com/linkcursos.html>
- Dávila, A. O., & Jiménez, M. S. (2014). Simulación de un enlace óptico WDM (Wavelength Division Multiplexing) utilizando POFs (Polymer Optical Fiber) en el espectro de luz visible. *Maskana*, 5, 49–59.
- Forouzan, B. A. (2012). Transmisión de datos y redes de comunicaciones. Madrid: McGraw-Hill.
- Joshi, V., & Mehra, R. (2016). Performance Analysis of an Optical System Using Dispersion Compensation Fiber & Linearly Chirped Apodized Fiber Bragg Grating. *Open Physics Journal*, 3(1), 114–121.
- Kaur, M., Saranga, H., & Bagga, P. (2015). Dispersion Compensation with Dispersion Compensating Fibers (DCF). *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 4(2), 354–356.
- Kaur, Na., Kaur, R., & Kaur, G. (2014). Use of Dispersion Compensating Fiber in Optical Transmission Network for Triangular Modulation Format. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, 1(4), 27–31.

- Lebedev, A., Olmos, J., Iglesias, M., Forchhammer, S., & Monroy, I. (2013). A novel method for combating dispersion induced power fading in dispersion compensating fiber. *Optics Express*, 21(11), 13617.
- M.Al-Quzwini, M. (2014). Design and Implementation of a Fiber to the Home FTTH Access Network based on GPON. *International Journal of Computer Applications*, 92(6), 30–42. <https://doi.org/10.5120/16015-5050>
- Nadal R., L. (2014). Design and implementation of low complexity adaptive optical OFDM systems for software-defined transmission in elastic optical networks (Ph.D. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya). Recuperado de <http://www.tdx.cat/handle/10803/284714>
- Saliou, F., Simon, G., Chanclou, P., Pizzinat, A., Lin, H., Zhou, E., & Xu, Z. (2015). WDM PONs based on colorless technology. *Optical Fiber Technology*, 26, 126–134. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2015.08.002>
- Villarreal, G. D., Cárdenas, A. M., & Botía, J. F. (2013). Performance of WDM-PON system based on optical frequency comb generation. 2013 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ColComCon.2013.6564819>
- Yazdani, A. (2016). Contributions to optimal detection in OTDM and OCDMA optical receivers (Ph.D. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya). Recuperado de <http://www.tdx.cat/handle/10803/398408>
- Yeh, C. H., Chow, C. W., Sung, J. Y., & Wu, Y. F. (2016). Use of RSOA-transmitter for OFDM colorless WDM-PON communication. *Optical and Quantum Electronics*, 48(4), 256.
- Zheng, X. (2015). Metropolitan Area Network architecture design for Optical Flow switching (Thesis, Massachusetts Institute of Technology).

Recuperado de <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/99798>



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT

Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Agreda Alejandro, Roger Hernán** con C.C: 110388796-2 autor del trabajo de titulación: Análisis del modelado de la tecnología DWDM utilizado técnicas de compensación en comunicaciones ópticas mediante la validación del software OptiSystem, previo a la obtención del título de **Magister en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 16 de agosto del 2019

f. _____

Nombre: **Agreda Alejandro, Roger Hernán**

C.C: 110388796-2

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Análisis del modelado de la tecnología DWDM utilizando técnicas de compensación en comunicaciones ópticas mediante la validación del software OptiSystem.		
AUTOR(ES)	Ing. Agreda Alejandro, Roger Hernán		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	MSc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio; MSc. Zamora Cedeño, Néstor / MSc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Sistema de Posgrado		
PROGRAMA:	Maestría en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	16 de Agosto del 2019	No. DE PÁGINAS:	48
ÁREAS TEMÁTICAS:	Fundamentos de comunicaciones, Sistemas de Transmisión Ópticos		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	MULTIPLEXACIÓN, COMPENSACIÓN, TÉCNICAS, CALIDAD, BITS, DISPERSIÓN		
RESUMEN/ABSTRACT:			
<p>El presente trabajo de examen complejo trata de realizar el análisis del modelado de la tecnología DWDM utilizando técnicas de compensación en comunicaciones ópticas mediante la validación del software OptiSystem. En la primera parte, se describe las generalidades de la propuesta (introducción, antecedentes, definición del problema, objetivos, hipótesis y metodología) del examen complejo. La segunda parte, se realiza la descripción del marco teórico de los sistemas de comunicaciones por fibra óptica. La tercera parte, se realiza el diseño de los escenarios de simulación del sistema DWDM con diferentes técnicas de compensación, tales como DCF y FBG utilizando la plataforma de simulación OptiSystem. El trabajo analiza el rendimiento en términos del factor de calidad Q, de la tasa de error de bits (BER) y del diagrama de ojo. Finalmente, se encontró que el uso de FBG como elemento compensador de dispersión proporciona un mejor rendimiento del sistema en comparación con DCF.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono:	E-mail: rhagreda@gmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Manuel Romero Paz		
	Teléfono: 0994606932		
	E-mail: mromeropaz@yahoo.com		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			