

Pontificia Universidad
Católica del Ecuador

FACULTAD DE INGENIERÍA
COORDINACIÓN DE POSGRADO



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA**

Trabajo de Titulación como requisito previo para la obtención del título de
Magíster en Tecnologías de Información mención Gestión y Administración de TI

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED REGIONAL WDM DE 80
CANALES CON CAPACIDAD AGREGADA DE 40 Tb/S.**

Autor: Osorio Pazmiño Tatiana Yasmin, Ing

Director: Dr. Arévalo Bermeo German Vicente, PhD

Quito, 2023.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, Tatiana Osorio, declaro que los análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Además, autorizo a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador la publicación parcial o total de este trabajo de titulación y su reproducción sin fines de lucro.

Quito, 2023



Tatiana Yasmin Osorio Pazmiño
CI: 1719282731

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi carácter de Director (a) – Tutor (a) del Trabajo de Posgrado Titulado: “DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED REGIONAL WDM DE 80 CANALES CON CAPACIDAD AGREGADA DE 40 Tb/S”, presentado por el maestrante TATIANA YASMIN OSORIO PAZMIÑO, titular de la Cédula de Identidad N° 1719282731 para optar al Grado de Magíster en Educación mención gestión del aprendizaje mediado por TIC, considero que dicho Trabajo de Investigación reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la evaluación por parte de los Lectores – Evaluadores que se designen para tal fin por parte de las autoridades de la Facultad de Ciencias de la Educación.

En la ciudad de Quito, a los 24 días de Abril del 2023



Dr. Arévalo Bermeo German Vicente

C.I. 0103152500

garevalo893@puce.edu.ec

NRO TELEFONO: 0991572515

NOTA:

Se comunica que en el servicio de análisis Turnitin, el referido trabajo de titulación alcanzó el siguiente resultado: ... % índice de similitud con otras fuentes.

TURNITIN: INCLUIR HOJA DEL INFORME CON EL PORCENTAJE

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED REGIONAL WDM DE 80 CANALES CON CAPACIDAD AGREGADA DE 40 Tb/s

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%

INDICE DE SIMILITUD

10%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

ENCONTRAR COINCIDENCIAS CON TODAS LAS FUENTES (SOLO SE IMPRIMIRÁ LA FUENTE SELECCIONADA)

4%

★ 1library.co

Fuente de Internet

Excluir citas

Activo

Excluir bibliografía

Activo

Excluir coincidencias < 1%

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo, Tatiana Yasmin Osorio Pazmiño, portadora de la CI: 1719282731, declaro bajo juramento que el presente trabajo de titulación es de exclusiva responsabilidad de la autora, y que se respetó las diferentes fuentes de información tomadas, para ello se referencia bajo las citas correspondientes para evitar el plagio. Este trabajo de titulación es desarrollado en su totalidad por mi persona.



Tatiana Yasmin Osorio Pazmiño
CI: 1719282731

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.1. Formulación del problema	13
1.2. Objetivos de la Investigación	13
Objetivo General	13
Objetivos Específicos	13
1.3. Justificación de la Investigación	14
CAPÍTULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	15
2.1. Antecedentes de la Investigación	15
2.2. Bases Teóricas	15
2.2.1 WDM	15
2.2.1.1 Tasa de bit errados (BER)	20
2.2.1.2 Atenuación	20
2.2.1.3 Dispersión	20
2.2.1.4 Relación señal-ruido	21
2.2.2 Modulación Compleja	21
2.2.3 Modulación de amplitud en cuadratura (QAM)	23
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	27
3.1. Tipo de Investigación	27
3.2. Diseño de Investigación	27
3.3. Unidades de Estudio	27
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	27
3.5. Técnica de Análisis de Datos	27
3.6. Operacionalización de Variables	28
CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN DE LA PROPUESTA	29
4.1 Software OptiSystem v17.0	29
4.2 Matlab	29
4.3 Desarrollo de la simulación	29
4.3.1 Bloque de transmisión	30
4.3.2 Bloque de enlace de fibra	30
4.3.3 Bloque Receptor	31

CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	33
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	37
REFERENCIAS.....	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ventanas ópticas según la ITU-T – Fuente: (Lanchi, 2020).....	16
Tabla 2: Comparaciones entre CWDM y DWDM – Fuente: (CASTILLA, 2017).....	19
Tabla 3: Características de los formatos de modulación a 400 Gbps según lo discutido por Optical Internet Forum (OIF) – Fuente: (Keysight, 2019).	26
Tabla 4: Operacionalización de Variables – Fuente: Autor.	28
Tabla 5: Desempeño de red DP-16QAM a 100Km – Fuente: Autor.	33
Tabla 6:Desempeño de red DP-16QAM – Fuente: Autor.....	33
Tabla 7: Datos comparativos en la distancia de 80 hasta 100km equivalente al OOP - Fuente: Autor.	35

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1: Sistema WDM - Fuente: (RAMOS, 2005).	15
Figura 2: Esquema de multiplexación WDM – Fuente: (Lanchi, 2020).	16
Figura 3: Conversores de longitud de onda WDM – Fuente: (Lanchi, 2020).	17
Figura 4: Funcionamiento básico de un amplificador óptico – Fuente (Lanchi, 2020).	18
Figura 5: Sistema DWDM - Fuente: (RAMOS, 2005).	19
Figura 6: Espectro de la señal en la cuadrícula de la UIT Con OOK - Fuente: (Keysight, 2019).	21
Figura 7: Multiplexación por división de polarización – Fuente: (Keysight, 2019).	22
Figura 8: Aumento de la eficiencia espectral para una señal de datos de 100 Gbps mediante el uso de modulación compleja - Fuente: Autor.	23
Figura 9: Ilustración del ingreso de los canales de 500Gb/s en una grilla ITU de separación 100Ghz con el uso de pulse shaped dual polarization 16-QAM – Fuente: Autor.	23
Figura 10: Puntos de constelación de esquemas QAM distribuidos en una red cuadrada – Fuente: (Keysight, 2019).	24
Figura 11: Diagramas de constelación de 8-QAM y 16-QAM – Fuente: (Keysight, 2019).	24
Figura 12: Diagramas de constelación para esquemas APSK y formatos QAM – Fuente: (Keysight, 2019).	25
Figura 13: Bloque transmisor – Fuente: Autor.	30
Figura 14: Bloque enlace de fibra – Fuente: Autor.	31
Figura 15: Bloque Receptor – Fuente: Autor.	31
Figura 16: Diagrama completo para la red DWDM DP16-QAM – Fuente: Autor.	32
Figura 17: BER vs Potencia recibida – Fuente: Autor.	34
Figura 18: Penalidad de ruta óptica – Fuente: Autor.	35
Figura 19: Grafica del espectro óptico - Fuente: Autor.	36

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRIA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN MENCIÓN GESTIÓN
Y ADMINISTRACIÓN DE TI

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED REGIONAL WDM DE 80 CANALES CON
CAPACIDAD AGREGADA DE 40 Tb/S.**

Autor: Osorio Pazmiño Tatiana Yasmin, Ing

Director -Tutor: Dr. Arévalo Bermeo German Vicente, PhD

Fecha: ,2023

RESUMEN

El crecimiento y el acceso a la red global de Internet está avanzando a pasos agigantados, y la población mundial sin duda ha sido testigo de tremendos desarrollos tecnológicos en el campo de las telecomunicaciones y las redes de datos. El servicio de Internet actualmente es considerado un servicio esencial porque permite a cualquier empresa o usuario en cualquier parte del mundo acceder a una gran cantidad de información de todo tipo, también acerca a las personas que acceden a múltiples recursos de última generación como servicios; almacenamiento de datos, correo electrónico, chat, voz sobre protocolo de Internet (VoIP), transmisión, video chat, juegos en línea y más. Por lo tanto, es crucial para todas las empresas que trabajan bajo una gran demanda de crecimiento que las aplicaciones y productos que ellos imparten tengan una fluidez adecuada para evitar problemas con sus clientes, como la demanda ha ido en aumento también se requiere que a nivel regional exista mayor velocidad y ancho de banda para la transmisión de dicha información, actualmente es muy usada la técnica WDM ya que posee diferentes ventajas como mayor ancho de banda, distancias de cobertura más grandes, mayor adaptabilidad y escalabilidad en la red, desarrollo de aplicación de servicios con alta resolución, entre otras, por lo que este proyecto propone un diseño simulado de una red regional WDM de 80 canales con capacidad agregada de 40tb/s, así bajo los parámetros que en un sistema WDM se puede enviar por un una misma Fibra Óptica diversos canales y analizando los resultados obtenidos se observa que es altamente fiable hacer uso de dicho diseño en un ámbito de prueba físico.

Palabras clave: Fibra Óptica, WDM, VoIP, velocidad, Ancho de Banda, cobertura, escalabilidad.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRIA EN TECNOLIGÍAS DE LA INFORMACIÓN MENCIÓN GESTIÓN
Y ADMINISTRACIÓN DE TI

**DESIGN AND SIMULATION OF A WDM REGIONAL NETWORK OF 80
CHANNELS WITH AGGREGATE CAPACITY OF 40 Tb/S**

Autor: Osorio Pazmiño Tatiana Yasmin, Ing

Director -Tutor: Dr. Arévalo Bermeo German Vicente, PhD

Fecha: ,2023

ABSTRACT

The growth and access to the global Internet network is advancing by leaps and bounds, and the world's population has undoubtedly witnessed tremendous technological developments in the field of telecommunications and data networks. Internet service is now considered an essential service because it allows any business or user anywhere in the world to access a wealth of information of all kinds, it also brings people closer to accessing multiple state-of-the-art resources such as services; data storage, email, chat, Voice over Internet Protocol (VoIP), broadcasting, video chat, online gaming and more. Therefore, it is crucial for all companies working under a high demand for growth that the applications and products they deliver have adequate fluidity to avoid problems with their customers, as the demand has been increasing is also required at the regional level there is greater speed and bandwidth for the transmission of such information, is currently widely used the WDM technique as it has different advantages such as greater bandwidth, larger coverage distances, greater adaptability and scalability in the network, development of application of services with high resolution, among others, so this project proposes a simulated design of a regional WDM network of 80 channels with an aggregate capacity of 40tb/s, so under the parameters that in a WDM system can be sent by the same optical fiber several channels and analyzing the results obtained is observed that it is highly reliable to use this design in a physical test environment..

Keywords: Fiber Optics, WDM, VoIP, speed, bandwidth, coverage, scalability.

INTRODUCCIÓN

Con el desarrollo social que vive nuestro planeta, también la tecnología se ha visto afectada por este proceso, por lo que desde hace varios años se utiliza la Fibra Óptica para la transmisión de información sin contar con sus diversas ventajas, en especial el Ancho de Banda (AB) que ofrece, hasta la actualidad no hay otro medio que lo pueda reemplazar.

Las empresas con renombres a nivel mundial y nacional trabajan bajo una demanda de crecimiento vertiginoso en las diferentes “aplicaciones como internet, (VoIp), video en alta definición (HD), la televisión de alta definición (HDTV), necesitan un mayor ancho de banda, basadas en fibra óptica que permiten dar solución a las necesidades de sus usuarios” (LAM, 2007).

La tecnología PON implementa su servicio a través de diferentes técnicas de multiplexación, tales como WDM, TDM, o el híbrido WDM/TDM. La Técnica WDM (multiplexación por división de longitud de onda) posee ventajas como un mayor ancho de banda, mayores distancias de cobertura, alta adaptabilidad de redes, mayor nivel de escalabilidad, aplicación de servicios de alta resolución, como podemos ver son ventajas importantes, sin embargo, esta técnica posee limitaciones que son sus altos costos (LAM, 2007).

En un sistema WDM se puede enviar por una misma Fibra Óptica diversos canales (longitudes de onda) ópticos con capacidad y longitud de onda específicos, estos canales se agrupan en un multiplexor y se separan en un demultiplexor. “Una evolución de los sistemas WDM tradicionales es DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), donde según la especificación de ITU-T (International Telecommunications Union–Telecommunications), se puede transportar hasta 160 canales ópticos en las bandas ópticas C y L, y con capacidades de 10Gbps, 40Gbps, 100Gbps, 400Gbps y hasta 1Tbps” (Lanchi, 2020). Con las ventajas y posibilidades que presenta las redes antes mencionadas, el siguiente proyecto de tesis tiene como finalidad presentar un diseño simulado de una red regional de 80 canales ópticos con una capacidad agregada de 40Tb/s. Para llevar a cabo la comunicación del transmisor y receptor por medio de la fibra óptica la red propuesta utilizará diferentes elementos como moduladores, codificadores, amplificadores, decodificadores, foto receptores, entre otros, adicional para la elaboración de este estudio se usará el software de simulación “OptiSystem”, este software es una herramienta que permite la simulación con una interfaz muy amigable.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Formulación del problema

Con el paso de tiempo el uso de alta velocidad y grandes anchos de banda por parte de los diferentes usuarios han planteado que los proveedores de servicios de telecomunicaciones se vean obligados a una mejora continua de sus redes de transmisión, por ello en los últimos años la implementación de sistemas WDM ha ido en aumento ya que tiene la ventaja de reutilizar y transmitir por grandes tramos sin necesidad de regenerar la fibra y puede adquirir velocidades de transmisión altas.

En nuestro país las diferentes empresas de telecomunicaciones actualmente están utilizando redes de última generación como GPON / XGPON, 4G LTE, IPTV cuyos servicios van evolucionando progresivamente con la tecnología, esto va generando un alto tráfico en la red MPLS. Los clientes corporativos usan ancho de banda dedicado y los enlaces metropolitanos GE se están migrando a 10GE. Esto lleva a que los enlaces en los switches del core o enlaces de backbones cuenten con capacidades de decenas de Gbps para soportar el tráfico masivo y corporativo, esto conlleva que la red de transmisión este en constante evolución. “DWDM conciernen a sistemas de 80 canales de 10Gbps, el aumento de las necesidades de flujo por redes exige a los empresas a usar toda su capacidad, saturando el espectro de la banda C, por lo que es posible emplear la L, según Huawei un sistema de 88 lambdas aumenta 10% comparado con el de 80 y los gastos crecerían 20%, además el alcance disminuye un 15%, los proveedores concuerdan que el uso de bandas más grandes no es la solución, es mejor desarrollar la velocidad de la lambda de 10Gbps a 40Gbps, 100Gbps, 400Gbps o 1Tbps” (Lanchi, 2020). Por lo que se debe buscar nuevas técnicas para el diseño de redes regionales WDM con un incremento de canales y a su vez el aumento de la velocidad de transmisión.

1.2. Objetivos de la Investigación

Objetivo General

- Diseño y simulación de una red regional WDM de 80 canales con capacidad agregada de 40 Tb/s.

Objetivos Específicos

- Analizar el estado de arte de las redes ópticas que trabajen con WDM.
- Diseñar una red óptica regional WDM de 80 canales con una capacidad agregada de 40Tb/S.
- Simular la red óptica regional WDM de 80 canales con una capacidad agregada de 40Tb/S.
- Analizar el rendimiento basado en los resultados obtenidos de la red óptica regional WDM.

1.3. Justificación de la Investigación

Según el informe de Cisco Visual Networking Index (VNI) indica que en el año 2022 se moverá más tráfico a través de redes que en los primeros 32 años de existencia del internet, en este tiempo se ha generado más de 4,7 zettabytes de tráfico IP. En 2022 esta cifra quedaría sobrepasada: se calcula que se moverán 396 exabytes al mes, lo que en un año son 4,752 zettabytes. De media global, cada usuario moverá 85 GB al mes. Para llegar a esta cantidad, Cisco estima que el tráfico en internet crecerá a un ritmo del 26% anual entre 2017 y 2022 (Index, 2020).

Bajo estos parámetros se comprueba que el uso de internet y las redes sigue creciendo de manera inimaginable lo que provoca que los proveedores de internet se basen en transformar las redes y administrar mejoras para la administración y transmisión del tráfico y con una buena calidad de servicio y arquitecturas más robustas.

“La capacidad de la red actual DWDM es de 10Gbps y 40Gbps, sin embargo, el crecimiento de ancho de banda ha conllevado a las redes metropolitanas con enlaces en el orden de 1Gbps, sean migrados a enlaces de 10Gbps ocupando un canal óptico por cada enlace; lo antes indicado obliga al crecimiento consecuente de la capacidad de transporte del Core de la red, es por eso que nace la eminente necesidad de desplegar una red de transmisión con mayores capacidades de ancho de banda, que permita levantar enlaces de 100GE y 400GE (Giga Ethernet) entre equipos de conmutación de capa 2 y 3, lo cual es posible con el despliegue de una red DWDM con canales de 100Gbps y 400Gbps” (Lanchi, 2020).

El diseño y la simulación planteados en este trabajo de investigación servirían como un prototipo para futuros trabajos de campo técnico, en conjunto con las características referenciales de los equipos que sean tomados para el despliegue de la red regional WDM de 80 canales con capacidad agregada de 40 Tb/s.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Antecedentes de la Investigación

Con el paso del tiempo, el desarrollo de nuevas tecnologías, formas de comunicación a nivel mundial, la demanda de enlaces de alta velocidad ha ido incrementando dejando a un lado las estadísticas de crecimiento de la red en cada país. Actualmente los proveedores de Internet son los encargados en la distribución de servicios de banda ancha a alta velocidad; por la alta demanda sobre estos servicios, la garantía de efectividad, seguridad y facilidad de implementación se propone el diseño de una red óptica regional WDM de 80 canales con una capacidad agregada de 40Tb/s, la cual se espera que haga frente a las nuevas exigencias de los usuarios y siendo una posible solución a los problemas de transporte y carga de los clientes que requieren altas velocidades para su operación.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1 WDM

La multiplexación por división de longitud de onda (WDM) es una tecnología que hace posible utilizar todas las propiedades y ventajas de las fibras ópticas para una demultiplexación rápida y de alta potencia de diferentes longitudes de onda o canales en el rango de frecuencia operativo. Cada canal o longitud de onda viaja a través de la fibra y puede tener varias velocidades de transmisión, diferentes tipos de tráfico y servicios.

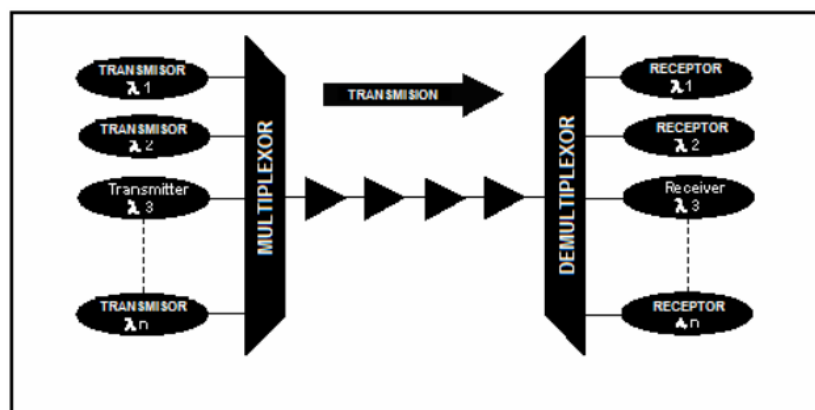


Figura 1: Sistema WDM - Fuente: (RAMOS, 2005).

Para DWDM la principal ventaja es que es posible aumentar efectivamente el número de pliegues de banda ancha de fibra óptica. Las vastas redes de fibra existentes en todo el mundo podrían duplicar su capacidad de colector sin requerir nuevas fibras largas, un proceso costoso.

Además, el número y la frecuencia de las ondas que pueden necesitar los regeneradores ópticos están estandarizados por la ITU con espaciamiento entre longitudes de onda de 100 GHz o 200 GHz, esto en un intervalo de las bandas de 1500 a 1600 nm. La longitud de onda utilizada es de suma importancia, no solo para la interoperabilidad, sino también para evitar interferencias destructivas entre señales ópticas.

Los sistemas WDM fueron diseñados para trabajar en la ventana de 1310nm y 1550nm, en la figura 2 se aprecia un sistema general de esta tecnología (Lanchi, 2020).

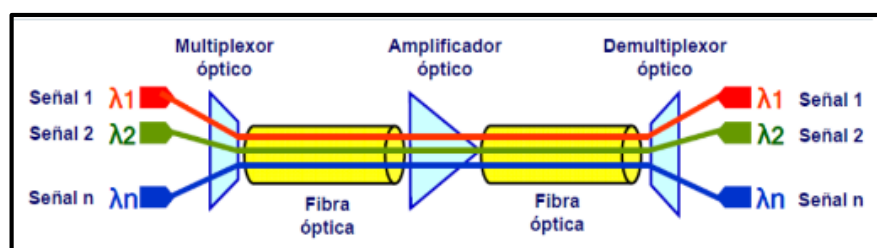


Figura 2: Esquema de multiplexación WDM – Fuente: (Lanchi, 2020).

Band	State	Range (nm)	Bandwidth (nm)
O	Original	1260 – 1360	100
E	Extend	1360 – 1460	100
S	Short wavelength	1460 – 1525	65
C	Conventional wavelength	1525 – 1565	40
L	Long wavelength	1565 – 1625	60
U	Ultra long wavelength	1625 – 1675	50

Tabla 1: Ventanas ópticas según la ITU-T – Fuente: (Lanchi, 2020).

“Usando las bandas C y L se pueden transmitir 160 longitudes de onda, pero se necesitarían dos arreglos de sistemas ópticos (mux/demux/amplifier), esto aumentaría considerablemente los costos de implementar un sistema DWDM y no sería competitivo para las empresas proveedoras de equipos, quienes consideran que una banda más grande como la L no es la dirección de la evolución actual, es más importante aumentar la velocidad de la única longitud de onda (10G/40G/100G/400G/1T)” (Lanchi, 2020).

Los principales componentes de un sistema WDM tradicional se detallan a continuación.

- **Componentes pasivos:** Estos dispositivos permiten combinar señales ópticas entre los cuales se puede mencionar combinadores, splitters, acopladores, filtros, atenuadores,

multiplexores y demultiplexores.

- **Convertidores de longitud de onda:** La conversión de longitud de onda es una de las fases principales del sistema de transmisión, debido a que permite sintonizar las señales ópticas de diferentes clientes a una determinada longitud de onda dentro de la ventana de operación de la red de transmisión, estos convertidores posibilitan que la red sea operada con mayor flexibilidad. Por otro lado, es fácil, a través de la configuración se pueden bloquear y enrutar longitudes de onda en nodos ópticos WDM para que se puedan utilizar los recursos del sistema de transmisión. Los métodos más comunes de conversión de longitud de onda se basan en convertidores electroópticos, en los que se captura una señal óptica para su posterior conversión en una señal eléctrica y se vuelve a convertir en una señal óptica de una longitud de onda específica utilizando un láser o un modulador externo. En la Figura3 se observa los elementos de conversores de componente óptico.

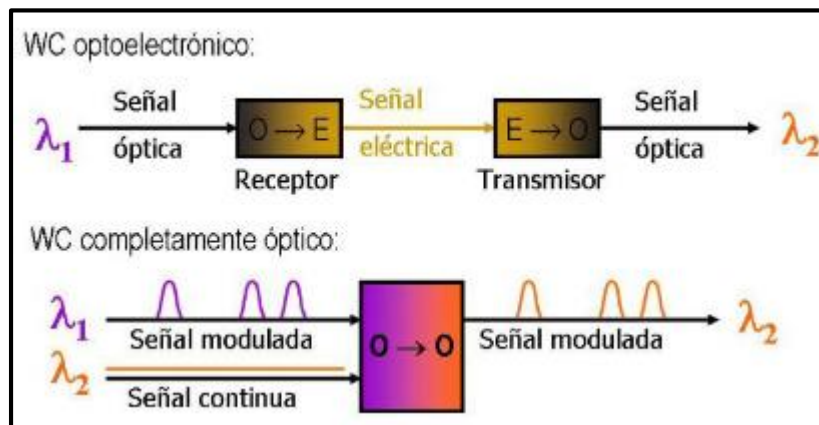


Figura 3: Conversores de longitud de onda WDM – Fuente: (Lanchi, 2020).

- **Transmisores:** En las redes ópticas se utilizan dos tipos de fuentes de luz que son: LED y diodos láser de inyección (ILD), por otro lado, en los sistemas WDM, la fuente de luz debe producir una señal estable en una longitud de onda estándar. “El transmisor WDM consta de una matriz de ILD, cada uno está configurado en una longitud de onda específica, y estos dispositivos pertenecen a una fuente de luz coherente de emisión estimulada con espejos semi-reflejantes que forman una cavidad resonante para realizar retroalimentación óptica y elementos selectivos. Entre los ILD más conocidos se puede mencionar a los VCSEL (Vertical Cavity Surface -Emitting Laser), los DFB (Distribute Feedback Laser) y los FP (Fabry Perot)” (Lanchi, 2020).

- **Receptores:** Consisten en detectores ópticos que convierten la luz en señales eléctricas digitales para su posterior procesamiento por los equipos correspondientes de la red de datos. “Los fotodetectores más utilizados en comunicaciones ópticas son los fotodiodos, y la detección puede ser directa (incoherente) o coherente” (Lanchi, 2020).

Los sistemas de comunicación coherentes fueron desarrollados para lograr mayores velocidades de transmisión en los canales ópticos, esto significa velocidades superiores a 40 Gbps. “En los sistemas coherentes se tiene en el transmisor adicional al laser, moduladores de amplitud, fase y frecuencia, debido a las mejores prestaciones en la actualidad se utilizan las modulaciones: QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) y DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) con las cuales se puede tener canales ópticos de 100 Gbps y en el receptor la detección coherente consiste en aplicar a la señal óptica de llegada una onda generada por un oscilador local para recuperar la información transmitida” (Lanchi, 2020).

- **Amplificadores ópticos:** Dispositivos que amplifica una señal entrante a un mayor nivel de potencia de salida (dominio óptico sin convertirlo al dominio eléctrico). Los amplificadores ópticos son similares en física a los láseres, carecen de retroalimentación, se requiere una señal de bombeo para inyectar energía en la región activa del amplificador, que es atraída por los electrones, lo que aumenta su nivel de energía y provoca la inversión de la polarización. Cuando los fotones de la señal de luz de entrada alcanzan los electrones, caen a un nivel de energía más bajo, donde se crean nuevos fotones. Este proceso se denomina emisión estimulada, y de esta forma se amplifica la señal.



Figura 4: Funcionamiento básico de un amplificador óptico – Fuente (Lanchi, 2020).

Básicamente, según la separación entre canales, existen tres tipos de sistemas WDM con dos ventajas y desventajas bien diferenciadas, que detallaremos en los siguientes apartados.

- CWDM (Coarse Wavelength División Multiplexing), la separación entre canales es ancha. Sus características son: capacidades de transmisión bajas con hasta 8/16 canales y bajo coste en los dispositivos ya que los láseres requieren menos exactitud (CASTILLA, 2017).
- DWDM (Dense Wavelength División Multiplexing): la separación entre canales es menor. Sus características son: grandes capacidades de transmisión y muy larga distancia, con un gran número de canales o longitudes de onda de trabajo y el coste elevado por la precisión y exactitud de los dispositivos como láseres de transmisión, foto detectores, amplificadores, etc (CASTILLA, 2017).
- UDWDM (Ultra Dense Wavelength División Multiplexing): En este tipo de sistemas el espaciado entre canales es todavía menor que en DWDM permitiendo un número mayor de λ (CASTILLA, 2017).

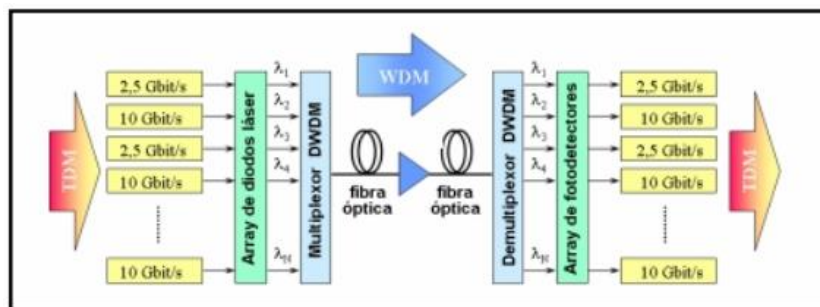


Figura 5: Sistema DWDM - Fuente: (RAMOS, 2005).

Aplicación/parámetro	CWDM	DWDM	DWDM
	acceso/MAN	MAN/WAN	largo alcance
Canales de fibra	16	32-80	80-160
Espectro utilizado	O, E, S, C, L	C, L	C, L, S
Espaciado entre canales	20 nm (2500 GHz)	0,8 nm (100 GHz)	0,4 nm (50 GHz)
Capacidad por canal	2,5 Gbit/s	10-40 Gbit/s	10-40 Gbit/s
Capacidad de la fibra	20-40 Gbit/s	100-1000 Gbit/s	>1 Tbit/s
Tipo de láser	uncooled DFB (láser de realimentación distribuida)	cooled DFB	cooled DFB
Distancia	hasta 80 km	cientos de km	miles de km
Coste	Bajo	Medio	Alto
Amplificación óptica	ninguna	EDFA	EDFA, Raman

Tabla 2: Comparaciones entre CWDM y DWDM – Fuente: (CASTILLA, 2017).

El diseño de un sistema óptico WDM debe garantizar el nivel de potencia requerido y determinado en el receptor, se debe diseñar el sistema de tal forma que el proceso de dispersión

no altere significativamente la señal y se mantenga la calidad de la señal dada por la tasa del Bit Error Rate (BER). Otro factor que se debe tomar en cuenta es la potencia de la señal que decrece exponencialmente con la distancia y el balance de tiempos que permiten establecer cuál sería el tiempo de subida del sistema y se relaciona con su velocidad de respuesta para un BER dado.

2.2.1.1 Tasa de bit errados (BER)

La tasa de bits errados (BER) es igual a la tasa de bits errados en un total de bits transmitidos. “Para las redes DWDM la ITU-T recomienda un valor de 10^{-12} , sin embargo, los fabricantes recomiendan un valor de 10^{-15} , un bit errado en 10^{15} bits enviados” (Lanchi, 2020).

2.2.1.2 Atenuación

La atenuación es la disminución de la fuerza de la señal óptica, es inversamente proporcional a la longitud de onda, se expresa en dB/Km y puede ser causada por pérdidas propias en la fabricación y manipulación de la fibra (intrínsecas) y por otro lado se da por el uso de los conectores, empalmes o fusiones, curvatura de instalación, distancia, entre otros (extrínsecas). Para las redes DWDM es recomendado el uso de la fibra G.652 y G.655, además de la pérdida del enlace de fibra óptica entre equipos DWDM en diferentes centrales, se deben tener en cuenta las pérdidas de inserción de los elementos del modelo de esta tecnología. (Lanchi, 2020).

2.2.1.3 Dispersión

Es el tiempo de propagación de la señal que provoca un fenómeno donde las ondas de diferentes frecuencias se dispersan al atravesar un material provocando que las velocidades de frecuencia de la onda lleguen al receptor en tiempos desiguales produciendo pulsos más grandes. Hay dos tipos dispersión:

Dispersión cromática: Paso de una señal a lo largo del tiempo como resultado de diferentes velocidades de los rayos de luz.

Dispersión modal: Paso de una señal a lo largo del tiempo debido a los diferentes modos de propagación en una fibra.

2.2.1.4 Relación señal-ruido (SNR)

Es la relación que existe entre la potencia de salida de la señal transmitida y la potencia del ruido que la destruye. En general, la relación señal/ruido debe ser de al menos 25 dBm. Valores por debajo de 25dBm degradan el rendimiento y la velocidad.

2.2.2 Modulación Compleja

Actualmente la construcción de nuevos centros de datos en todo el mundo está en auge, las CPU y RAM actuales garantizan una latencia tan baja que mapear grandes volúmenes de datos distribuidos en varios servidores en fracciones de segundo no es un problema. El crecimiento explosivo del volumen de datos se ha convertido en un gran desafío y para evitar cuellos de botella en el futuro cercano, se debe mejorar la eficiencia de la tasa de bits en cada etapa de la transmisión de datos.

La transmisión de datos ópticos comenzó como su contraparte electrónica, con un esquema de codificación digital más simple y, por lo tanto, más económico: retorno a cero (RZ) o sin retorno a cero (NRZ), codificación de encendido/apagado (OOK). Idealmente, la señal es una secuencia rectangular de 1 (encendido) y 0 (apagado). Pero cuando las tasas de transferencia alcanzan los 40 Gbps, el concepto llega a un límite. Debido a las altas velocidades de reloj de 40 y 100 Gbps, el ancho de banda ocupado por la señal OOK se vuelve mayor que el de un canal ITU de 50 GHz. Como se muestra en la Figura 6, el esparcidor de canales comienza a superponerse a su canal adyacente y el filtro de longitud de onda da forma a la señal, lo que provoca diafonía y degradación de la información de modulación.

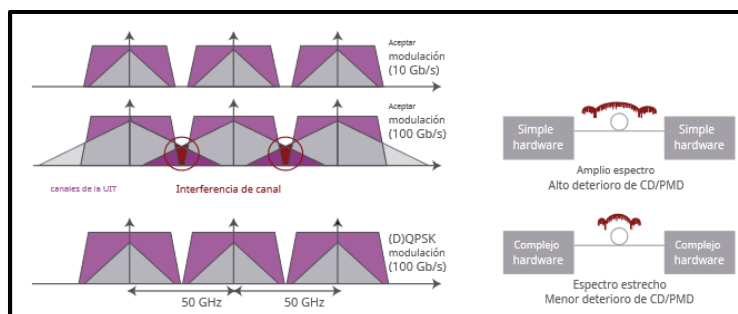


Figura 6: Espectro de la señal en la cuadrícula de la UIT Con OOK - Fuente: (Keysight, 2019).

Existe la necesidad de pasar de OOK a esquemas de modulación más complejos, como la modulación por desplazamiento de fase en cuadratura diferencial (DQPSK) para lograr una

transmisión de alta velocidad. La modulación compleja reduce el ancho de banda requerido, dependiendo de la velocidad del reloj del símbolo, y permite que se transmitan velocidades de datos más altas en el plan de canales de la UIT de 50 GHz.

Estos nuevos conceptos también admiten la compensación de la dispersión cromática (CD) y la dispersión del modo de polarización (PMD) mediante el procesamiento de señales digitales combinado con detección coherente, proporcionando así información completa del campo de luz. La dispersión es un efecto causado por el hecho de que las ondas de luz viajan a diferentes velocidades dependiendo de su frecuencia y polarización, lo que, si no se compensa, puede provocar un ensanchamiento del pulso, lo que degrada la calidad de la señal. La dispersión cromática es especialmente un problema para tramos largos de fibra. Los esquemas de modulación complejos mejoran la eficiencia espectral al codificar información utilizando todos los parámetros de la onda de luz: amplitud y frecuencia o fase.

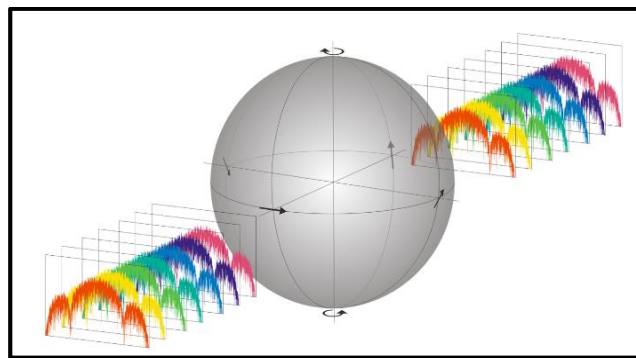


Figura 7: Multiplexación por división de polarización – Fuente: (Keysight, 2019).

El uso de detección coherente significa que la modulación óptica compleja se libera de la necesidad de compensadores PMD o fibras compensadoras de dispersión y del aumento de pérdida y latencia que inducen estos elementos, adicional los esquemas de modulación complejos se pueden combinar con otros métodos de transmisión para transmitir una señal de datos de manera más eficiente a través de un enlace de fibra. Por ejemplo, en la figura 4 se puede observar que en la multiplexación por división de polarización (PDM), una segunda señal de onda de luz, que se polariza ortogonalmente a la primera, transporta información independiente y se transmite por la misma fibra, eso es como agregar un segundo canal y duplicar la velocidad de transmisión sin necesidad de una segunda fibra.

En la Figura 8 se visualiza una idea de cómo la combinación de estas diferentes técnicas puede mejorar la eficiencia espectral. Para transmitir a 500Gb/s con OOK se necesitaría un ancho de

banda de 1THz en lo cual es imposible ingresar 80 canales con una separación de 100GHz con dicho AB. En el siguiente nivel usando modulación 16-QAM se tiene una reducción con factor de 4 desde OOK con lo cual la transmisión usaría un AB de 250GHz. En el tercer nivel se tiene una mejora usando Dual Polarization 16-QAM con una reducción del AB a la mitad 125GHz. En última instancia, se podrían reducir más con el uso de Pulse Shaping (performed de los pulsos) con lo cual el AB llegaría a 100 GHz para poder transmitir el valor deseado.

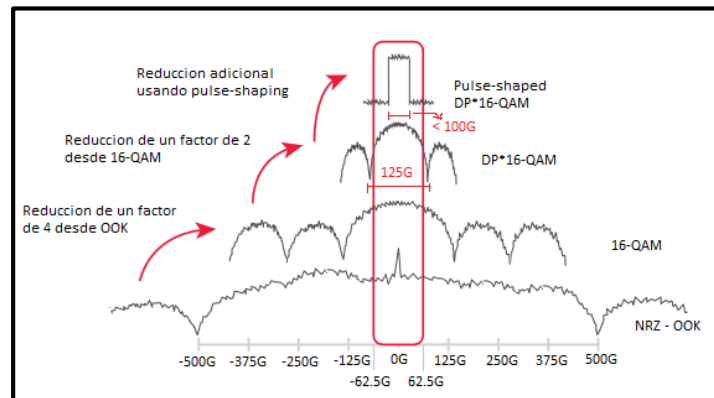


Figura 8: Aumento de la eficiencia espectral para una señal de datos de 100 Gbps mediante el uso de modulación compleja
- Fuente: Autor.

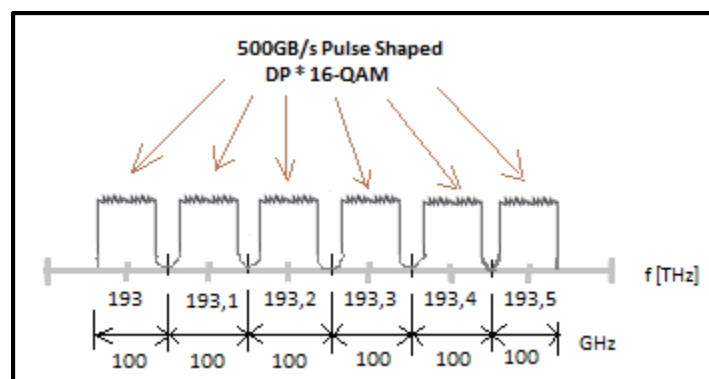


Figura 9: Ilustración del ingreso de los canales de 500Gb/s en una grilla ITU de separación 100Ghz con el uso de pulse shaped dual polirization 16-QAM – Fuente: Autor.

2.2.3 Modulación de amplitud en cuadratura (QAM)

El uso de esquemas de modulación QAM se logra a medida que las velocidades de datos alcanzan los 400 Gbps en adelante. La modulación y demodulación de señales QAM es más compleja y, por lo tanto, más costosa que otros formatos. Por otro lado, los puntos de constelación QAM de orden superior están más separados que los esquemas PSK puros como BPSK o 8-PSK. Esto los hace menos susceptibles al ruido y la distorsión, lo que reduce la BER.

En el esquema $2n$ -QAM, los puntos de $2n$ -constelaciones representan una serie de n bits,

generalmente distribuidos en una cuadrícula (Figura 10). El orden más bajo de QAM, es 2-QAM que codifica solo 1 bit por símbolo. La amplitud es constante y existe una diferencia de fase de π entre los dos puntos de la constelación correspondientes a 1 y 0. Entonces, 2-QAM y BPSK son en realidad el mismo esquema. Asimismo, el concepto de 4-QAM puede ser diferente de QPSK, pero el diagrama de constelación resultante es el mismo, aquí solo hay una amplitud y la diferencia de fase de los cuatro puntos de la constelación es $\pi/2$. En 8-QAM, hay dos amplitudes posibles y cuatro fases que difieren en $\pi/2$, que definen un punto de constelación que representa una serie de 3 bits.

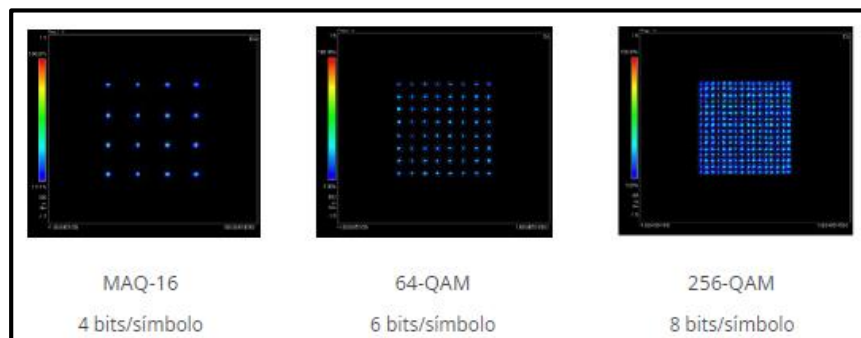


Figura 10: Puntos de constelación de esquemas QAM distribuidos en una red cuadrada – Fuente: (Keysight, 2019).

Al igual que con todos los demás esquemas $2n$ -QAM donde n es impar, es difícil distribuir los puntos de la constelación en una cuadrícula (Figura 11). Esto tiene un impacto negativo en el rendimiento de BER; por lo tanto, estos esquemas 8-QAM juegan un papel menor en la práctica. En su lugar, generalmente se prefiere 16-QAM debido a su doble eficiencia espectral y BER ligeramente superior.



Figura 11: Diagramas de constelación de 8-QAM y 16-QAM – Fuente: (Keysight, 2019).

En el esquema 16-QAM, 4 bits están representados por un símbolo. Los 16 puntos de la constelación están dispuestos en una cuadrícula (ver Figura 11). Por lo general, están codificados en Gray; solo un bit cambia de valor desde un punto de la constelación a cada punto

adyacente. De esta forma, si un punto de medición se asigna incorrectamente a un punto adyacente debido al ruido, los errores de bit resultantes se reducen al mínimo: 1 bit de error.

La manipulación de amplitud y cambio de fase en APSK, como su nombre lo indica, se modulan tanto la amplitud como la fase. Se diferencia de QAM en que los puntos de la constelación están dispuestos en círculos concéntricos en el plano I/Q. El concepto se introdujo para los sistemas de satélite en los que los amplificadores de potencia de RF muestran un comportamiento no lineal. Por lo tanto, se necesitaba un esquema tolerante a la amplificación no lineal.

Al comparar los diagramas de constelación de 16-QAM y 16-APSK (Figura 12), en 16-QAM hay tres amplitudes mientras que 16-APSK tiene solo dos. Entonces, en 32-QAM, hay cinco amplitudes frente a tres en 32-APSK, también se debe tener en cuenta que los anillos QAM están espaciados de manera desigual, lo que hace que sea aún más difícil compensar las no linealidades.

En fibra óptica, APSK también se puede emplear en escenarios de ruido no lineal y para mejorar la tolerancia frente a características de fibra no lineal. Sin embargo, para velocidades de 400 Gbps y superiores, se prefiere 16-QAM debido a su implementación más sencilla y su mejor rendimiento óptico de relación señal-ruido debido a la mayor distancia entre los puntos de la constelación.

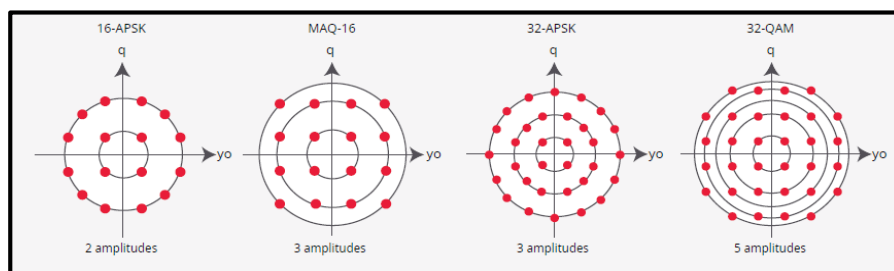


Figura 12: Diagramas de constelación para esquemas APSK y formatos QAM – Fuente: (Keysight, 2019).

La siguiente tabla se detalla las características de los formatos de modulación discutidos por el Foro de Internet Óptico (OIF) para 400 Gbps para señales multiplexadas sin polarización. Si también se aplica PDM, el resultado es la mitad del espacio entre canales o el doble de la eficiencia espectral. Las implementaciones multiportadora ahora pueden agregar canales en función de una granularidad de cuadrícula de 6,25 GHz y un ancho igual a un múltiplo entero

de 12,5 GHz, denominado "cuadrícula flexible". La Unión Telegráfica Internacional (UIT) ha definido esta red flexible que permite canales escalables, que posibilita aumentar más la eficiencia espectral.

MODULACION	CODIFICACION	VELOCIDAD DE SIMBOLO	NUMERO DE CARRIERS	CANAL	EFICIENCIA ESPECTRAL	MAXIMO ALCANZAR
64-QAM	6 bits/símbolo	42,7 GBd	1	50 GHz	8	~ 100 kilómetros
16-QAM	4 bits/símbolo	64 GBd	1	75 GHz/ 100 GHz	5.3/4	
16-QAM	4 bits/símbolo	32 GBd	2	75 GHz/ 100 GHz	5.3/4	< 1.000 kilómetros
16-QAM	4 bits/símbolo	64 GBd	1	75 GHz/ 100 GHz	5.3/4	
8-QAM	3 bits/símbolo	42,7 GBd	2	75 GHz/ 100 GHz	5.3/4	> 1.000 kilómetros
QPSK	2 bits/símbolo	64 GBd	2	150 GHz	2.7	
QPSK	2 bits/símbolo	32 GBd	4	150 GHz	2.7	

Tabla 3: Características de los formatos de modulación a 400 Gbps según lo discutido por Optical Internet Forum (OIF) – Fuente: (Keysight, 2019).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo de Investigación

Se trabajará en base a la investigación científica y los análisis de los resultados obtenidos se realizará de forma cuantitativa ya que se realizarían diversos cálculos y comparaciones que son necesarios para los enlaces ópticos como recuperar pérdidas de potencia, recuperación de atenuación, longitudes, entre otros, que permiten caracterizar el enlace de transporte a diseñarse.

3.2. Diseño de Investigación

Para el diseño del trabajo de titulación se utilizará la investigación con un enfoque experimental manipulando la variable independiente en busca que la variable dependiente llegue a un nivel adecuado para que la transmisión sea óptima. Con esto realizar el análisis de los resultados obtenidos desde Matlab y Optsim.

3.3. Unidades de Estudio

La unidad de estudio definida es el desempeño de una red regional WDM de 80 canales con capacidad agregada de 40 Tb/s.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se utilizará instrumentos de software de Optsim para la recolección de datos y a su vez para la simulación del enlace, adicional se realizará una simulación entre Matlab y OptSim para obtener las gráficas de análisis.

3.5. Técnica de Análisis de Datos

Para la recolección de datos se utilizará los instrumentos de medición que tiene el software de simulación Optsim para medir la potencia recibida (se usará un medidor de potencia óptica) y para determinar el BER se empleará una instancia de simulación entre OptSim y Matlab.

3.6. Operacionalización de Variables

Variable	Definición	Dimensiones	Escala
Distancia del enlace	Espacio lineal que existe entre el extremo A hacia el extremo B.	Longitud de Fibra	80 -100km
Bit error rate	Numero de bits recibidos incorrectamente con relación al total de bits enviados en un intervalo de tiempo específico.	Diagrama del ojo	1x10 e-19 1x10 e-3
Atenuación	Reducción de potencia en la señal óptica transmitida	Atenuación de potencia	0 a 20 dBm
Potencia Optica	Se refiere a la potencia óptica de entrada de la fuente de luz en el extremo de recepción del módulo óptico.	Potencia recibida	0 dB a -25 dB

Tabla 4: Operacionalización de Variables – Fuente: Autor.

CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN DE LA PROPUESTA

Para el desarrollo y simulación de la red se utilizó el software Optisystem y Matlab.

4.1 Software OptiSystem v17.0

OptiSystem es un software de diseño que permite simular diseños de fibra óptica con determinadas características, con el que se puede planificar, realizar pruebas de ensayo y error, y simular enlaces ópticos en la capa de transporte de las redes modernas. Es un programa con una interfaz gráfica similar a las herramientas de Matlab que permite la simulación de sistemas amortiguados, subamortiguados y sobreamortiguados entre otros sistemas analógicos y digitales. El simulador permite mezclar diferentes números de ondas, se pueden observar fenómenos como la modulación cruzada de fase y también permite implementar nuevas tecnologías, como diferentes códigos ópticos de acceso múltiple, además de brindar un entorno muy confiable para realizar desde diseños básicos hasta los más complejos y simular enlaces ópticos en la capa física de varias redes ópticas (Alvaro, 2019).

4.2 Matlab

MATLAB es una plataforma de programación diseñada específicamente para que ingenieros y científicos analicen y diseñen sistemas y productos. Utiliza un lenguaje basado en matrices que expresa las matemáticas computacionales de la forma más natural. Combina un entorno de escritorio simplificado para procesos iterativos de análisis y diseño con lenguajes de programación (C/C++, Java, .NET, Python, SQL) que expresan directamente matrices y matrices matemáticas, gráficos para visualizar datos y para crear gráficos personalizados. Las aplicaciones combinan herramientas para ajuste de curvas, clasificación de datos, análisis de señales, ajuste de sistemas de control y muchas otras tareas.

4.3 Desarrollo de la simulación

Para la descripción de la simulación se dividió en bloques, a continuación, se ira explicando cada parte de la simulación, en este caso se realiza una muestra de 3 canales como ejemplo para nuestro diagrama base.

4.3.1 Bloque de transmisión

En la figura 13 se observa los componentes usados para la parte del transmisor, el cual se constituye de una bifurcación Fork 1Xn (replicar la señal); en este caso para fines de análisis se divide en tres señales, también tiene 3 transmisores ópticos 16-QAM, uno por cada señal los cuales se conectan a un multiplexador (WDM Mux) 3 a 1 para llevar la información hacia el enlace de fibra.

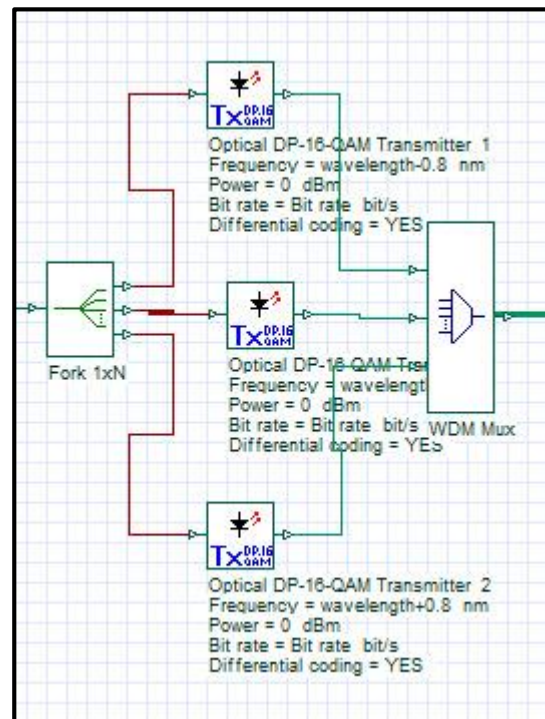


Figura 13: Bloque transmisor – Fuente: Autor.

4.3.2 Bloque de enlace de fibra

El WDM Multiplexor 3 a 1 se conecta a un amplificador óptico con una ganancia de 20dB y de ahí se conecta hacia una fibra óptica cuyos componentes son: longitud: 100km, pérdida por atenuación de 0.2db/Km, dispersión de 16.75ps/nm/Km, esto se conecta aun atenuador óptico en el cual se ira simulando valores de pérdida en la fibra, se conecta a otro amplificador óptico de 20dB y un filtro óptico gaussiano con el cual se recuperará el canal central, esto lo podemos observar en la Figura 14. Adicional se utiliza un WDM analyzer, analizador de espectro óptico, optical power meter y el espectro óptico obtenido con el cambio de atenuación en la fibra.

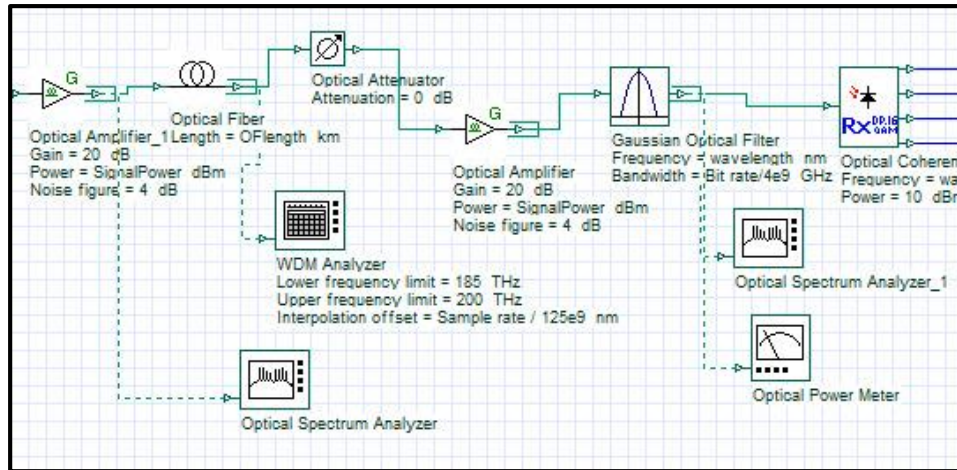


Figura 14: Bloque enlace de fibra – Fuente: Autor.

4.3.3 Bloque Receptor

Luego del filtro óptico gaussiano conectamos un receptor óptico 16-QAM, de ahí usamos un Universal DSP para realizar una compensación de dispersión y no linealidades en la señal recibida; como parámetros de configuración es la polarización dual y modulación 16-QAM, a estas salidas colocamos unos diagramas de constelación para poder visualizar la representación de la señal digital modulada obtenida a continuación se coloca un componente de decisión para que procese los canales recibidos y normalice las amplitudes de cada canal en la cuadratura transformando los símbolos en bits, también colocamos unos decodificadores QAM para generar dos señales de salida las cuales van hacia un convertidor paralelo a serie para obtener una sola señal transformando los bits en seriales.

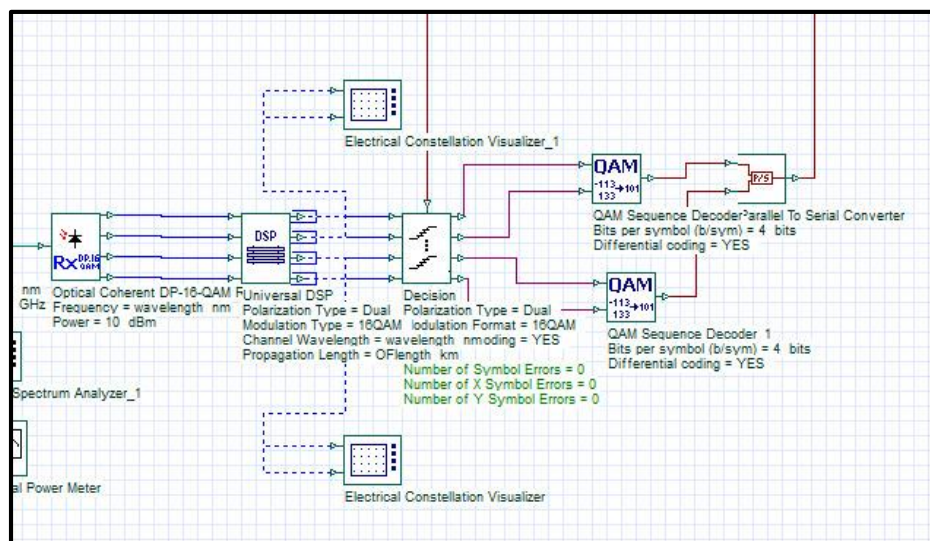


Figura 15: Bloque Receptor – Fuente: Autor.

Como parte final con el VER test se realiza una comparación entre los bits recibidos y los bits enviados, tomando en cuenta que transmite los bits que alimenta a los transmisores. Con esta comparación se obtiene el valor final del Bitrate.

En la figura 16 se observa el diagrama final con el que se realizó el estudio para este trabajo.

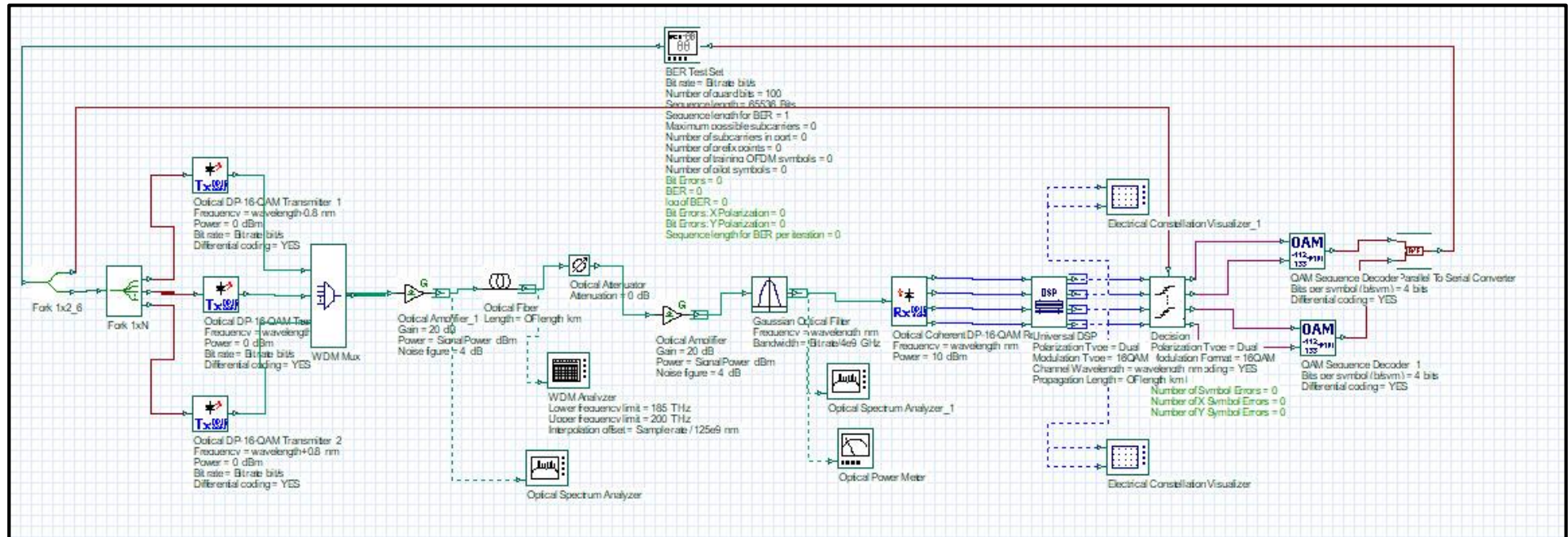


Figura 16: Diagrama completo para la red DWDM DP16-QAM – Fuente: Autor.

CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se realiza el análisis de los datos obtenidos mediante el atenuador óptico colocado en el diagrama se simuló distintas atenuaciones para verificar como funciona nuestro sistema. Para la comparación se realiza mediciones con 100km y 80km, las gráficas se las realizo en el programa Matlab.

En las siguientes tablas se detallan los valores de potencia recibidos y los valores del BER óptimos que se obtuvieron tanto para una distancia de 80km y una de 100km

DESEMPEÑO RED DP-16QAM 500 Gb/s 100km	
Prx (dBm)	BER
-5.405	5.00E-05
-5.729	3.00E-05
-6.727	9.00E-06
-7.719	3.00E-04
-8.708	7.70E-04
-9.675	1.80E-03
-10.648	2.80E-03
-11.634	7.50E-03
-12.597	1.00E-02

Tabla 5: Desempeño de red DP-16QAM a 100Km – Fuente: Autor.

DESEMPEÑO RED DP-16QAM 500 Gb/s 80km:	
Prx (dBm)	BER
-10.7	3.00E-05
-11.7	9.00E-05
-12.7	1.20E-04
-13.7	5.20E-04
-14.65	1.40E-03
-15.63	4.00E-03
-16.6	7.80E-03
-17.55	1.55E-02

Tabla 6: Desempeño de red DP-16QAM – Fuente: Autor.

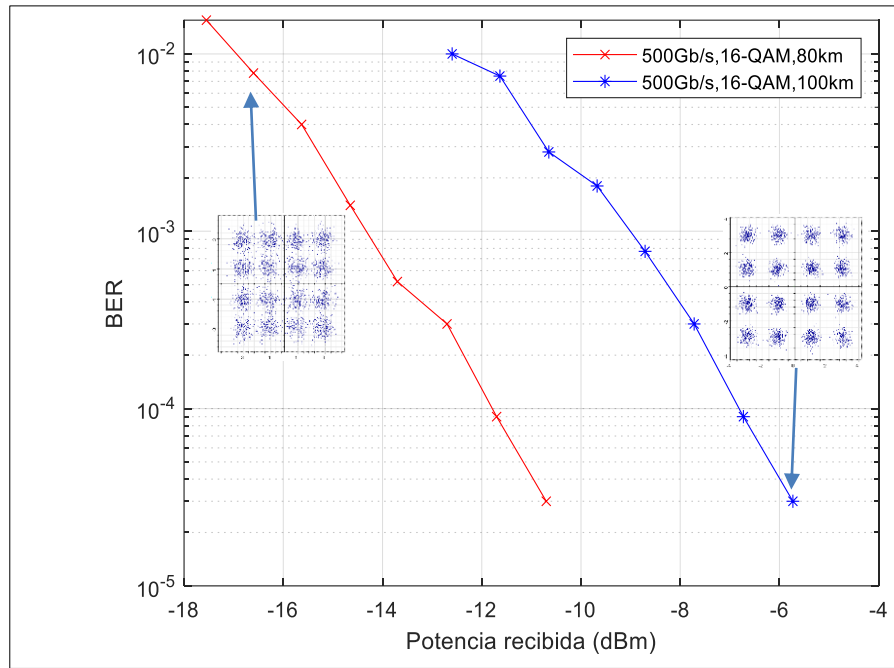


Figura 17: BER vs Potencia recibida – Fuente: Autor.

En la Figura 17, puede observarse el BER vs potencia recibida para uno de los canales de 500 Gb/s con modulación DP 16-QAM (el operante a una longitud de onda de 1550 nm). Se puede apreciar que existen una gran penalidad al aumentar la longitud del enlace de 80 a 100km, lo cual puede evidenciarse en el hecho de que la potencia necesaria para lograr un BER de $1e-3$ (valor mínimo para realizar una recuperación de errores a través de FEC), para un enlace de 80km es de -14,5 dBm, mientras que para un enlace de 100 km se tiene que garantizar una potencia en el receptor de -9dBm, lo cual significa una penalidad de 5,5 dB. Esta penalidad puede significar una importante y significativa complejidad sin mencionar los costos adicionales para lograr ese gran incremento de potencia en la red. En la gráfica se acota el aspecto de los diagramas de constelación para cuando el BER está en el orden de $3e-2$ y $3e-5$.

En la tabla 7 se detalla los valores obtenidos entre el BER-longitud y el BER-atenuacion equivalente para el rango de distancia entre los 80 a 100km, con esto se podrá obtener el valor de la penalidad de ruta.

DESEMPEÑO RED DP-16QAM 500 Gb/s 80km OPP		
long (km)	BER- Att.equiv	BER-long
80	3.00E-05	3.00E-05
85	1.20E-04	9.00E-05
90	7.30E-04	1.20E-04
95	3.00E-03	5.20E-04
100	5.50E-03	1.40E-03

Tabla 7: Datos comparativos en la distancia de 80 hasta 100km equivalente al OOP - Fuente: Autor.

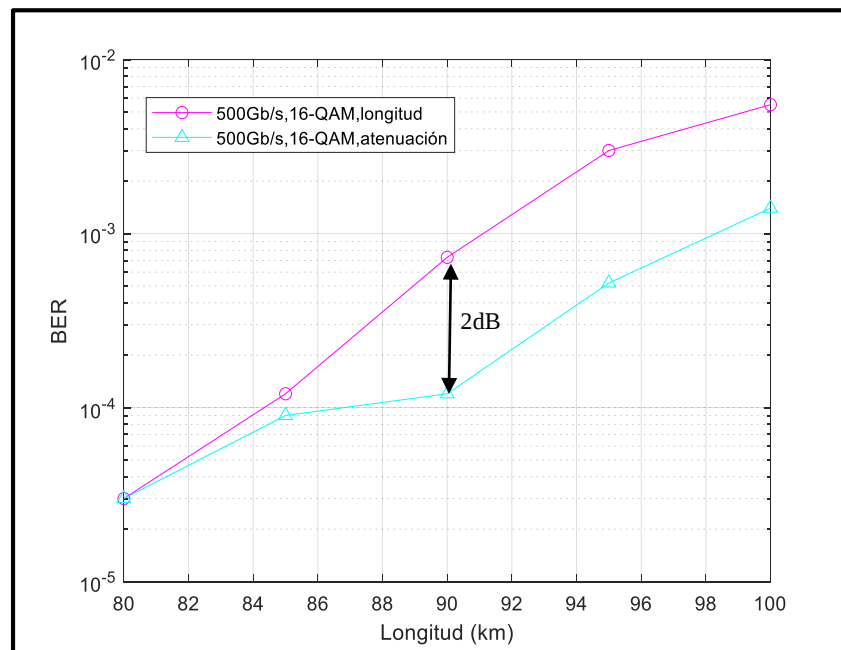


Figura 18: Penalidad de ruta óptica – Fuente: Autor.

La Figura 18 detalla la penalidad de ruta óptica (Optical Path Penalty - OPP) para un canal 500 Gb/s transmitido con modulación DP 16-QAM. La OPP mide la diferencia en el BER (que puede luego evaluarse en términos de la penalidad en dB) al aumentar la fibra con respecto a un incremento equivalente solamente en atenuación (tómese en cuenta que no es lo mismo introducir atenuación por aumento de fibra que a través de un atenuador óptico variable). Nótese que la penalidad equivalente en dB bordea los 2 dB a partir de un incremento de 10 km adicionales, misma que es particularmente alta y se debe a la vulnerabilidad que tiene la modulación 16-QAM al aumento de longitud en la fibra óptica. Es así que el aumento de la longitud del enlace a 100km representa una penalidad total aún mayor (considerando los demás factores además de la OPP), como pudo evidenciarse en la figura anterior.

Luego de realizar las comparaciones con los datos obtenidos en la Figura19 se observa los canales a 500 Gb/s obtenidos en el optical spectrum analyzer (OptiSystem), Los canales se colocan sin problema unos junto a otros con una separación de 100 GHz, gracias al uso de la modulación DP 16-QAM.

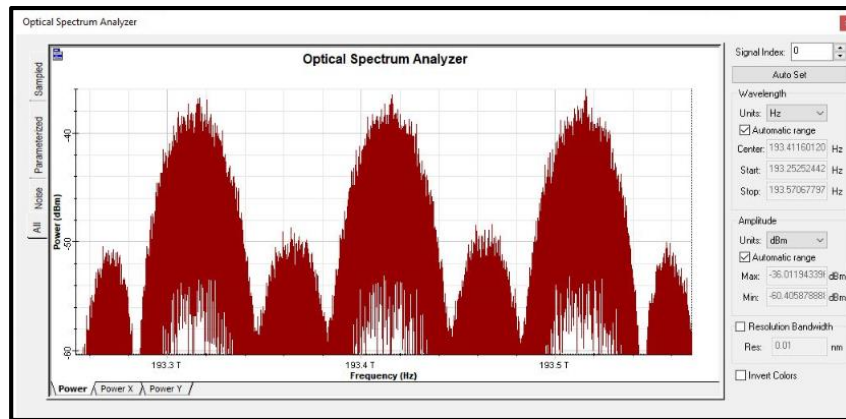


Figura 19: Grafica del espectro óptico - Fuente: Autor.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Las redes WDM están diseñadas para proporcionar canales ópticos con gran ancho de banda mediante el uso de técnicas de modulación combinadas y diversos sistemas de multiplexación flexibles para optimizar el espectro óptico y, lo que es más importante, permitir la expansión de canales para diferentes velocidades ópticas.
- Mediante la descripción teórica se logró comprender el funcionamiento de las redes WDM y a su vez las ventajas al utilizar la modulación QAM por sus diversas características y su uso adecuado en redes que usan velocidades mayores a los 400Gbps logrando que sean menos susceptibles al ruido y la distorsión, lo que reduce el valor del BER.
- La finalidad de este trabajo fue el diseño y simulación de una red regional WDM de 80 canales con capacidad agregada de 40Tb, para lo cual se utilizó la modulación 16-QAM y doble polarización para lograr transmitir a 500Gbps (aproximadamente) con una separación de 100Ghz por cada canal, cumpliendo con los objetivos propuestos.
- Mediante los resultados obtenidos se puede apreciar que existen una gran penalidad al aumentar la longitud del enlace de 80 a 100km, lo cual puede evidenciarse en el hecho de que la potencia necesaria para lograr un BER de $1e-3$ para un enlace de 80km es de -14,5 dBm, mientras que para un enlace de 100 km se tiene que garantizar una potencia en el receptor de -9dBm, lo cual significa una penalidad de 5,5 dB, provocando una importante complejidad sin mencionar los costos adicionales.

Recomendaciones

- Antes de diseñar una red DWDM, se debe realizar un estudio sobre la infraestructura establecida, analizar sus características y verificar la capacidad que soportan las fibras ópticas en tecnología WDM y los tipos de modulación existentes para entender el alcance que se espera obtener.
- El sistema al ser diseño y análisis debe ser un sistema de gestión centralizado remoto, adecuado para la implementación, configuración, operación y mantenimiento de todos los equipos en un ambiente de prueba.
- Para sacar el máximo partido al simulador y poder interpretar los resultados, es recomendable conocer todas las características ya sea del software y cada equipo que se utilizara adicional los efectos que se producen en la transmisión para poder prevenir las pérdidas y atenuaciones descritas de cada elemento.
- A la hora de configurar los equipos del sistema se debe tener cuidado ya que un error puede provocar problemas en el enlace, por lo que el resultado no será el esperado.

REFERENCIAS

- Alvaro, V. (2019). *Tutorial OPTISYSTEM*. Obtenido de ACADEMIA PREMIUM:
https://www.academia.edu/40450408/Gu%C3%ADa_1_OPTISYSTEM
- CASTILLA, S. (Septiembre de 2017). *Planificación y diseño de redes ópticas WDM*. Obtenido de Archivo digital UPM: https://oa.upm.es/49901/1/PFC_SERGIO_CASTILLA_IBEAS.pdf
- CISCO. (2018). *Cisco prove mas trafico IP en los proximos cinco años que en toda la historia del internet*. Obtenido de Cisco Visual Networking Index (VNI): <https://news-blogs.cisco.com/emear/es/2018/11/27/cisco-preve-mas-trafico-ip-en-los-proximos-cinco-anos-que-en-toda-la-historia-de-internet/>
- Di, C., & Xi, C. (Mayo de 2022). *Higher-Order Modulation vs Faster-Than-Nyquist PAM-4 for Datacenter IM-DD Optics: An AIR Comparison Under Practical Bandwidth Limits*. Obtenido de JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY:
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9769899>
- Index, C. V. (Marzo de 2020). *Cisco*. Obtenido de
<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
- Keysight. (Marzo de 2019). *Everything You Need to Know About Complex Optical Modulation*. Obtenido de www.keysight.com:
<https://www.keysight.com/us/en/search.html/Everything+You+Need+to+Know+About+Complex+Optical+Modulation>
- LAM, C. F. (2007). *Passive Optical Networks*. En C. F. LAM, *Passive Optical Networks* (pág. 72. 73). San Diego California: Academic Press in an imprint of Elsevier. Obtenido de
https://www.academia.edu/39339208/Passive_Optical_Networks
- Lanchi, L. E. (Septiembre de 2020). *Diseño de una red de transporte DWDM con longitudes de onda de 400Gbps*. Obtenido de Repositorio UCSG:
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/15058/1/T-UCSG-POS-MTEL-173.pdf>
- Lin, S., Chang, W., Jiangbing, D., Chenyu, L., Wenjia, Z., Ke, X., . . . Zuyuan, H. (Abril de 2019). *Dyadic Probabilistic Shaping of PAM-4 and PAM-8 for Cost-Effective VCSEL-MMF Optical Interconnection*. Obtenido de IEEE Photonics Journal:
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8667637>
- MathWorks. (2023). *Matlab*. Obtenido de MathWorks:
<https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- RAMOS, B. H. (2005). *Diseño de un enlace WDM sobre la red troncal de Fibra Óptica*. Obtenido de Repositorio ESPE: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/87/T-ESPE-027546.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- ROMERO, L. F. (Julio de 2016). *ANALIZAR EL RENDIMIENTO DE LOS RECEPTORES EN UNA RED TDM/WDM PON*. Obtenido de Repositorio UPS:
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13696/1/UPS%20-%20ST002857.pdf>