



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE
SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES**

TEMA:

**Análisis del rendimiento de una red FTTH basada en la arquitectura
GPON-WDM utilizando el simulador OptiSystem**

AUTOR:

Zúñiga Guerrero, Iván Gerardo

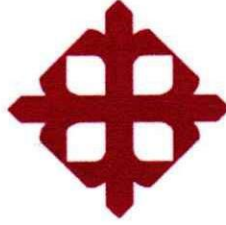
**Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

TUTOR:

Ph. D. Medina Moreira, Washington Adolfo

Guayaquil, Ecuador

15 de febrero del 2023



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente Trabajo de Titulación fue realizado en su totalidad por el Sr. **Zúñiga Guerrero, Iván Gerardo** como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR



Ph. D. Medina Moreira, Washington Adolfo

DIRECTOR DE CARRERA



M.Sc. Bonóñez Escobar, Celso Bayardo

Guayaquil, a los 15 días del mes de febrero del año 2023



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Zúñiga Guerrero, Iván Gerardo**

DECLARO QUE:

El trabajo de titulación, **Análisis del rendimiento de una red FTTH basada en la arquitectura GPON-WDM utilizando el simulador OptiSystem**, previo a la obtención del Título de **Ingeniero 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 responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 15 días del mes de febrero del año 2023

EL AUTOR

ZÚÑIGA GUERRERO, IVÁN GERARDO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

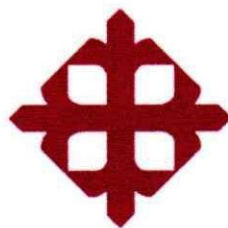
Yo, **Zúñiga Guerrero, Iván Gerardo**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Análisis del rendimiento de una red FTTH basada en la arquitectura GPON-WDM utilizando el simulador OptiSystem**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 15 días del mes de febrero del año 2023

EL AUTOR

ZÚÑIGA GUERRERO, IVÁN GERARDO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

REPORTE DE URKUND

Nombre del Alumno: Iván Gerardo Zúñiga Guerrero

Fecha de Reporte: Miércoles, 08 de febrero de 2023

Trabajo de Titulación: Análisis del rendimiento de una red FTTH basada en la arquitectura GPON-WDM utilizando el simulador OptiSystem

Original
by Urkund

Document Information

Analyzed document	Titulacion_Ivan_Zuniga_Final_L.docx (D158115296)
Submitted	2023-02-08 01:48:00
Submitted by	[redacted]
Submitter email	washington.medina@cu.ucsg.edu.ec
Similarity	3%
Analysis address	ema.moreno.ucsg@analysis.urkund.com

Sources included in the report

- Universidad Católica de Santiago de Guayaquil / TT Final HENRY PAUCAR.docx
- Document TT Final HENRY PAUCAR.docx (D18332276)

Ph. D. Medina Moreira, Washington Adolfo

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, Gerardo y Carmen, que han sido mi apoyo y mi modelo a seguir durante toda mi vida. Gracias por sus enseñanzas, valores y todo lo que han aportado para ser la persona que soy.

EL AUTOR

ZÚÑIGA GUERRERO, IVÁN GERARDO

AGRADECIMIENTOS

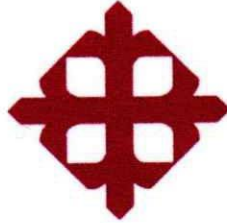
A mis Padres, a quienes les debo todo lo que soy y lo que seré.

A mi Tutor, Dr. Washington Medina Moreira, por su apoyo y guía durante todo el proceso de titulación.

Al Director de Carreras, Ing. Bayardo Bohórquez Escobar, por su gestión oportuna en la parte administrativa.

A todo el personal docente de la carrera de Telecomunicaciones, por haber contribuido en mi formación académica, en especial al Ing. Fernando Palacios Meléndez.

EL AUTOR
ZÚÑIGA GUERRERO, IVÁN GERARDO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



Ing. John Eloy Franco Rodríguez, Ph. D.

DECANO



Ing. Celso Bayardo Bohórquez Escobar, M. Sc.

COORDINADOR



Ing. Luis Orlando Philco Asqui, M. Sc.

OPONENTE

Índice General

Contenido

CAPÍTULO 1	2
1.1. Introducción	2
1.2. Antecedentes	3
1.3. Definición del Problema	4
1.4. Justificación del Problema	4
1.5. Objetivos del Problema de Investigación	4
1.6. Hipótesis	5
1.7. Metodología	5
CAPÍTULO 2	6
2.1. Definición de fibra óptica	6
2.2. Descripción de una fibra óptica	6
2.3. Condiciones de guiado de luz	7
2.4. Clasificación de los tipos de fibra óptica	7
2.5. El principio de la propagación y transmisión ópticas	10
2.6. Sistema de comunicación por fibra óptica	10
2.7. Descripción general de las redes FTTx	18
2.8. Descripción general de las redes ópticas pasivas	20
CAPÍTULO 3	24
3.1. Descripción general del software de simulación	24
3.2. Características técnicas y aplicaciones del software OptiSystem	25
3.3. Características generales sobre la calidad de la transmisión ...	26
3.4. Diseño de la propuesta del modelo de simulación de una red FTTH basado en la arquitectura GPON-WDM	28
3.5. Simulación y análisis de resultados obtenidos de la red FTTH basada en arquitectura GPON-WDM	33
3.6. Interpretación final de los resultados obtenidos	45
CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	47
4.2. Recomendaciones	47
Referencia	48

Índice de Figuras

CAPÍTULO 2

Figura 2. 1: Estructura básica de una fibra óptica	6
Figura 2. 2: Vista interna de la clasificación de una fibra monomodo y multimodo	7
Figura 2. 3: Detalle de fibra óptica monomodo.....	7
Figura 2. 4: Detalle de una fibra óptica multimodo por índice escalonado	8
Figura 2. 5: Detalle de una fibra óptica multimodo de índice gradual	9
Figura 2. 6: Arquitectura de un enlace óptico.....	10
Figura 2. 7: Diagrama del enlace óptico entre transmisor y receptor óptico	11
Figura 2. 8: Diagrama del funcionamiento entre un multiplexor y un demultiplexor en un enlace óptico.....	12
Figura 2. 9: Diagrama del funcionamiento de la técnica OFDM	13
Figura 2. 10: Diagrama del funcionamiento de la técnica OTDM	14
Figura 2. 11: Estructura interna de un fotodiodo PIN	16
Figura 2. 12: Arquitectura tecnológica FTTC	18
Figura 2. 13: Arquitectura tecnológica FTTN	18
Figura 2. 14: Arquitectura tecnológica FTTLA.....	19
Figura 2. 15: Arquitectura de una red óptica pasiva (PON).....	20
Figura 2. 16: Arquitectura de red P2P en redes ópticas activas.....	21
Figura 2. 17: Arquitectura de red P2M en redes ópticas pasivas	22

CAPÍTULO 3

Figura 3. 1: Representación de los dispositivos o componentes de la librería del software OptiSystem	23
Figura 3. 2: Representación de la interfaz gráfica de usuario (GIU) del simulador OptiSystem.....	24
Figura 3. 3: Representación de las propiedades de componentes (ejemplo CW Láser) que se pueden modificar sus parámetros	25
Figura 3. 4: Representación gráfica de un diagrama de ojo en el software OptiSystem	26
Figura 3. 5: Diseño en el software OptiSystem de la red FTTH sobre GPON usando la técnica WDM	28

Figura 3. 6: Representación del diseño de la red FTTH en el sentido descendente usando tecnología WDM	29
Figura 3. 7: Representación del bloque subsistema del acoplador óptico en la red FTTH propuesta	30
Figura 3. 8: Representación del bloque subsistema de usuarios finales para diferentes sectores.....	31
Figura 3. 9: Representación del bloque subsistema ONU en la red FTTH propuesta	32
Figura 3. 10: Representación de la ventana de configuración de parámetros en el software OptiSystem	33
Figura 3. 11: Resultado obtenido para la métrica del factor de calidad (factor Q) para un enlace óptico de 1 km	33
Figura 3. 12: Resultado de la señal del osciloscopio de la red FTTH con distancia de enlace 1 km.....	34
Figura 3. 13: Resultado obtenido del diagrama de ojo de la red FTTH con distancia del enlace de 1 km.....	34
Figura 3. 14: Resultado obtenido para la métrica del factor de calidad (factor Q) para un enlace óptico de 100 km	35
Figura 3. 15: Resultado de la señal del osciloscopio de la red FTTH con distancia de enlace 100 km.....	35
Figura 3. 16: Resultado obtenido del diagrama de ojo de la red FTTH con distancia del enlace de 100 km.....	36
Figura 3. 17: Resultado obtenido para la métrica del factor de calidad (factor Q) para un enlace óptico de 120 km	36
Figura 3. 18: Resultado de la señal del osciloscopio de la red FTTH con distancia de enlace 120 km.....	37
Figura 3. 19: Resultado obtenido del diagrama de ojo de la red FTTH con distancia del enlace de 120 km.....	38
Figura 3. 20: Incorporación de un amplificador óptico posterior a la fibra óptica bidireccional	38
Figura 3. 21: Resultado obtenido para la métrica del factor de calidad (factor Q) para un enlace óptico de 120 km usando amplificador óptico.....	39
Figura 3. 22: Resultado de la señal del osciloscopio de la red FTTH con distancia de enlace 120 km usando amplificador óptico	39

Figura 3. 23: Resultado obtenido del diagrama de ojo de la red FTTH con distancia del enlace de 120 km usando amplificador óptico	40
Figura 3. 24: Resultados obtenidos de los diagramas de ojo ante una variación de la distancia del enlace óptico (10, 40, 70 y 90 km)	41
Figura 3. 25: Resultados obtenidos de los diagramas de ojo ante una variación de la tasa de transmisión (1, 2.5, 5 y 10 Gbps)	42
Figura 3. 26: Resultados obtenidos de los diagramas de ojo ante una variación de la atenuación en la transmisión (0.1, 0.2, 0.4 y 0.5 dB/km).....	43
Figura 3. 27: Grafica comparativa del factor Q para enlaces ópticos con y sin amplificador óptico	44

Índice de Tablas

CAPÍTULO 3

Tabla 3. 1: Datos obtenidos de la variación entre la distancia y el factor Q sin amplificación	37
Tabla 3. 2: Datos obtenidos de la variación entre la distancia y el factor Q con amplificación óptica	40
Tabla 3. 3: Datos obtenidos de la variación entre la velocidad de transmisión y el factor Q.....	42
Tabla 3. 4: Datos obtenidos de la variación entre la atenuación y el factor Q	43

Resumen

Las tecnologías de acceso óptico están experimentando un desarrollo acelerado a la par de Internet y otros servicios de telecomunicación a escala mundial. En el presente documento se estudió la problemática de diseño y planificación de red óptica pasiva de alta capacidad (GPON), también denominada red de acceso. El tema de estudio se denomina <Análisis del rendimiento de una red FTTH basada en la arquitectura GPON-WDM utilizando el simulador OptiSystem=. La finalidad del presente trabajo fue diseñar y simular una red óptica GPON/WDM para analizar su rendimiento con respecto a la distancia de separación entre su nodo de distribución y el destino final. Esta necesidad está motivada por el incremento en la demanda de ancho de banda y las características dinámicas del tráfico actual. Mediante una simulación en tiempo real, se utilizó al software OptiSystem para evaluar el rendimiento de las redes consideradas. El presente trabajo se basó en la técnica WDM (multiplexación por división de longitud de onda); no obstante, existen diversas variantes de esta técnica; en las que los distintos usuarios que transmiten sus datos simultáneamente se multiplexan entre sí. Esta multiplexación entre los distintos usuarios se caracteriza por un espaciado entre los canales, lo que favorece al intercambio de grandes cantidades de información.

Palabras claves: MULTIPLEXACIÓN, REDES, ACCESO, FIBRA, SIMULACIÓN, ANCHO DE BANDA.

Abstract

Optical access technologies are experiencing rapid development alongside the Internet and other telecommunications services on a global scale. This document analyzed the structure of designing and planning a high-capacity passive optical network (GPON), also called an access network. This study is called <Performance analysis of an FTTH network based on the GPON-WDM architecture using the OptiSystem simulator=. The purpose was to design and simulate a GPON/WDM optical network and analyze its performance based on the distance between its distribution node and its final destination. It was developed because of the increasing demand for bandwidth and the dynamic characteristics of the current optical traffic. Through a real-time simulation, the OptiSystem software helped evaluate the performance of the selected scenarios. This work was based on the WDM (wavelength division multiplexing) technique; however, there are several variants of this technique; in which different users who transmit their data simultaneously get multiplexed. Multiplexing many users is determined by a spacing between the communication channels, which favors the exchange of large amounts of information.

Keywords: MULTIPLEXING, NETWORKS, ACCESS, FIBER, SIMULATION, BANDWIDTH.

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

1.1. Introducción.

En el pasado, la información que transmitían los sistemas digitales más rápidos era de 10 Mbps, utilizando como medio de transmisión el cable coaxial sin mayores complicaciones (Pahlavan & Krishnamurthy, 2021). En consecuencia al rápido desarrollo multimedia, surgieron nuevos servicios que requerían de una velocidad de transmisión muy alta, por lo que surgió una alternativa al cobre. Este nuevo medio de transmisión debía superar al cable coaxial y sus reconocidas desventajas tales como sus elevados niveles de pérdidas, las cortas distancias de propagación y las limitadas prestaciones que ofrecía. Es por esto que surge la fibra óptica como reemplazo del cable coaxial, hasta posicionarse como el medio de transmisión de datos ideal, más fiable y seguro en el mundo de las telecomunicaciones.

Últimamente, el vertiginoso desarrollo de Internet y el crecimiento de las aplicaciones de banda ancha, han generado una gran demanda del mismo en los sistemas de telecomunicaciones. Estimaciones recientes indican que cerca de 1 000 millones de personas tienen acceso directo al Internet fijo y móvil. A pesar de que los sistemas troncales han experimentado importantes avances tecnológicos en capacidad de transferencia de datos, la red de acceso de última milla, que da servicio a varios abonados, no ha crecido en la misma medida, lo que ha provocado un cuello de botella en la capacidad de transmisión. (Singhal & Singh, 2017)

La interconexión por fibra óptica es una forma de comunicación que utiliza señales digitales codificadas en luz, para transmitir datos entre diversos nodos conectados en una red FTTH (fibra hasta el hogar). Mediante el uso de cable de fibra óptica, y a través de la transmisión de luz, los nodos ópticos se comunican entre sí. La multiplexación WDM de una red óptica pasiva (PON) recopila información de varios canales emisores y la transmite al mismo destino. En una red óptica pasiva PON-WDM, se transmiten paquetes de datos a lo largo de diferentes trayectos de luz a múltiples destinos. La red

PON-WDM posibilita a los proveedores la implantación de redes convergentes y la consolidación de las redes de acceso existentes, pudiéndose incluso eliminar las oficinas centrales para reducir costes y aumentar el rendimiento. (Rani et al., 2016)

A los PON-WDM tradicionales según lo indicado por Parkash et al. (2015) se les asigna un par independiente de canales dedicados de subida y bajada a cada usuario para suministrar 1 Gbps simétricos o más. Además, gracias a la tecnología FTTH, la fibra óptica está siendo utilizada para conectar los hogares a lo largo de los próximos años, y con este medio de transmisión se conseguirá un cambio radical en el ámbito de las comunicaciones en todo el mundo.

De hecho, se utiliza Internet para transmitir programas televisivos, gestionar la interconexión de fábricas, empresas, bancos, y demás; así como para administrar las comunicaciones militares, supervisar las operaciones médicas o establecer conexiones por teléfono.

A la lista de los servicios tradicionales, cada vez se añaden más servicios que requieren un elevado ancho de banda, tales como el intercambio de contenidos, el almacenamiento en línea, la televisión de alta velocidad (TV 3D, TV HD), los juegos en línea o la telemedicina. (Toro Mejía, 2016)

1.2. Antecedentes.

El tráfico de datos que transportan las redes de telecomunicaciones aumenta de manera exponencial y, con la aparición de nuevos servicios asociados al desarrollo de la tecnología multimedia, han llevado a los proveedores de servicios de telecomunicaciones a diseñar sistemas de alta velocidad.

Mediante el uso de la fibra óptica, las telecomunicaciones experimentan una gran expansión en el rendimiento, velocidad de transmisión y ancho de banda a los que el cobre no puede hacer frente ante la elevada demanda de velocidad de los nuevos servicios multimedia.

Según Róka (2022) la evolución de las redes ópticas pasivas se orienta hacia zonas geográficas más amplias, un mayor número de abonados y un mayor ancho de banda por abonado. Larsen et al. (2010) presenta un estudio comparativo de redes de acceso óptico activas y pasivas que utilizan la topología punto a multipunto (P2MP) sin ningún esquema de protección.

1.3. Definición del Problema.

En la revisión de trabajos de titulación de la carrera de telecomunicaciones se pudo constatar que se han realizado investigaciones referentes a sistemas de comunicaciones por fibra óptica sobre la arquitectura FTTH, pero no se ha analizado el esquema de multiplexación WDM sobre la red de acceso óptico. De acuerdo con esto surge la necesidad de realizar el análisis del rendimiento de una red FTTH basada en la arquitectura GPON-WDM utilizando el simulador OptiSystem.

1.4. Justificación del Problema.

Las redes WDM-PON se caracterizan por su escalabilidad, ya que en su infraestructura admiten un mayor número de longitudes de onda en la misma fibra óptica. Este tipo de red ofrece un mayor rendimiento ya que permite una alta transmisión de datos por canal, y menor consumo de energía sin pérdidas ópticas pasivas. Basado en esto, la demanda de flexibilidad en el ancho de banda y el número de usuarios, así como los componentes ópticos y los equipos, tienen que ser económicamente aceptables para los distintos tipos de arquitectura. De este modo, se estima que las WDM-PON multiplexadas por división de longitud de onda proporcionarán una mayor capacidad y flexibilidad para satisfacer los requisitos de una mayor velocidad binaria suministrada a cada usuario.

1.5. Objetivos del Problema de Investigación.

1.5.1. Objetivo General.

Evaluar el rendimiento de una red FTTH basada en la arquitectura GPON usando la técnica WDM sobre la plataforma de simulación OptiSystem.

1.5.2. Objetivos Específicos.

1. Revisar los fundamentos de fibra óptica y de redes ópticas pasivas.
2. Analizar la herramienta de simulación OptiSystem basado el modelado de sistemas de comunicaciones ópticas.
3. Diseñar el modelo de red FTTH basado en la arquitectura GPON mediante multiplexación WDM sobre la plataforma de simulación OptiSystem.
4. Evaluar el rendimiento de la red FTTH a través de los resultados obtenidos en cada uno de los escenarios de simulación implementados en el software OptiSystem.

1.6. Hipótesis.

Las investigaciones en el área de comunicaciones por fibra óptica en el ámbito real son de difícil acceso y mayormente las empresas resguardan mucho la información de sus diseños y de mediciones en sus redes. Mediante el uso de una plataforma que simula sistemas de comunicaciones ópticas como el caso de OptiSystem, se va a contribuir a la búsqueda de resultados que nos permitan evaluar el rendimiento de una red de manera virtual con casi los mismos resultados que se pueden dar en la parte real.

1.7. Metodología.

Para el estudio realizado se utilizó el enfoque Cuantitativo de tipo Experimental, debido a que se analizó los resultados obtenidos de los diferentes escenarios simulados en el software OptiSystem. De igual forma se aplicaron los 3 métodos esenciales para realizar un trabajo investigativo:

- Método Descriptivo: Revisión de fundamentos teóricos de fibra óptica y de la multiplexación por longitud de onda.
- Método Explorativo: Aplicación de la técnica WDM en una red GPON con arquitectura FTTH.
- Método Explicativo: Demostración del funcionamiento del sistema GPON-WDM en el software OptiSystem.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA SOBRE FIBRA ÓPTICA Y REDES FTTH

En el presente capítulo se describe las bases teóricas de las comunicaciones ópticas y de las arquitecturas de redes ópticas pasivas, que sirven como soporte teórico en el desarrollo del Capítulo 3 para analizar el rendimiento de FTTH basada en la arquitectura GPON-WDM.

2.1. Definición de fibra óptica.

La fibra óptica es un cable muy fino de plástico o vidrio, con el que se propaga la luz para transmitir a gran velocidad una gran cantidad de datos digitales a una distancia muy larga. Los proveedores de internet son los responsables de desplegar la red de fibra y brindar cobertura, así como son los encargados del mantenimiento y actualización de su infraestructura (Chan Garcia, 2020). Por ejemplo, en Ecuador las empresas que utilizan redes FTTH son: CNT EP, Claro TV, Netlife (Telconet), Punto Net, TV Cable, entre otras.

La capacidad de la fibra óptica para transmitir datos con gran rapidez hace posible el desarrollo de nuevas aplicaciones en muchos campos, entre ellos la televisión y la medicina, y recientemente se ha utilizado la fibra óptica en la iluminación (Chan Garcia, 2020). Además, ofrece una velocidad de datos mucho mayor que los tradicionales cables coaxiales. Por lo tanto, la fibra óptica es utilizada para:

1. Transmitir información digital.
2. Utilizar las variaciones de luminosidad en la generación de una señal binaria.

2.2. Descripción de una fibra óptica.

Un cable de fibra óptica (véase la Figura 2.1) está reforzado con hilos de plástico (por ejemplo el Kevlar), el cual lo hace más fuerte, garantizando que las fibras ópticas al doblarse no se dañen. El motivo por el que se habla de fibra óptica es que este cable es el encargado de transmitir la luz. Este haz de luz es guiado dentro del centro de la fibra, llamado núcleo (Toala Q., 2018).

- Núcleo: se trata de un componente mayoritariamente formado por silicio, pero enriquecido con otros elementos. La mayor parte de la energía de la luz guiada está confinada en este núcleo. El revestimiento óptico lo rodea para su protección.
- Revestimiento: suele estar hecho del mismo material que el núcleo, pero está protegido por un recubrimiento plástico. El núcleo posee un índice de refracción mayor que el del revestimiento. Esta característica es lo que permite que la señal luminosa se refleje internamente y sucesivamente dentro del núcleo de la fibra óptica.

Figura 2. 1:

Estructura básica de una fibra óptica



Fuente: Kapoor, (2010)

2.3. Condiciones de guiado de luz.

Un haz de luz transmitido por fibra requiere que se refleje sobre la interfaz núcleo/revestimiento de la misma, lo que requiere una conducción sobre el ángulo de incidencia del rayo en la cara de entrada de la fibra. Si el ángulo de incidencia no sobrepasa al ángulo crítico, el rayo es guiado hacia la fibra; pero si el ángulo incidente sobrepasa al ángulo crítico, el rayo no será guiado hacia la fibra (Kapoor, 2010).

2.4. Clasificación de los tipos de fibra óptica.

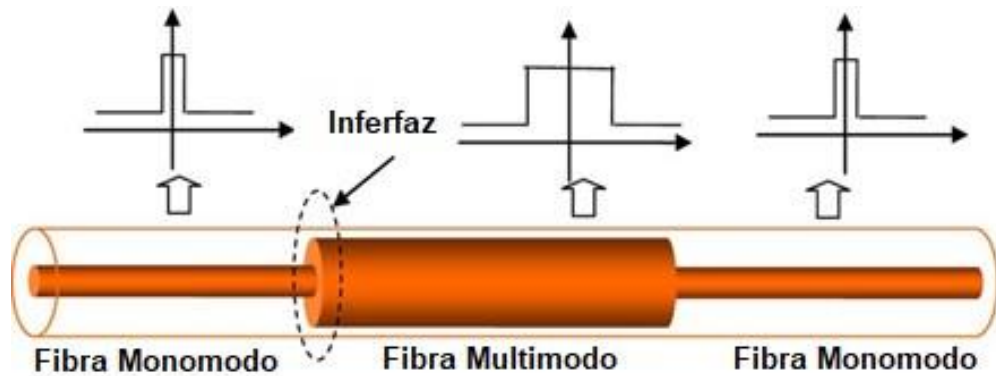
Según la longitud de onda utilizada y el diámetro del núcleo, existen dos tipos de fibras ópticas: (Toala Q., 2018)

1. Fibra óptica monomodo
2. Fibra óptica multimodo

La Figura 2.2 muestra la configuración esquemática de la estructura de fibra monomodo-multimodo, donde la propagación del pulso de luz cambiará de acuerdo al medio donde sea transmitida.

Figura 2. 2:

Vista interna de la clasificación de una fibra monomodo y multimodo



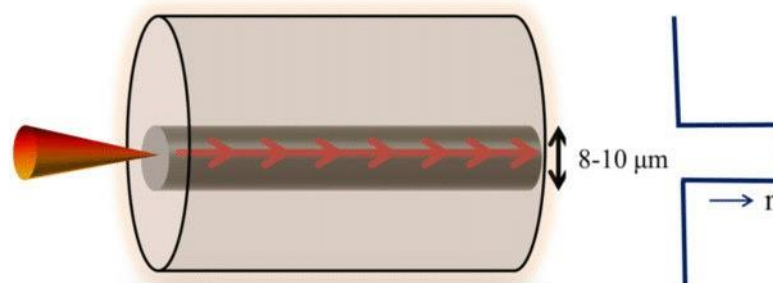
Fuente: Wang et al., (2008)

2.4.1. Fibra óptica monomodo.

La fibra óptica que transmite un solo rayo se llama fibra monomodo. Lo aplican principalmente los operadores para las largas distancias, redes WAN. La transmisión de datos se realiza mediante un láser, aunque el uso de este tipo es muy caro. Las fibras monomodo tienen un núcleo muy fino, del tamaño de un cabello. La atenuación para este tipo de fibra es prácticamente nula, por lo que es tan potente (Mondal, 2020). En la Figura 2.3 se muestra el detalle de una fibra óptica monomodo.

Figura 2. 3:

Detalle de fibra óptica monomodo



Fuente: Mondal, (2020)

2.4.2. Fibra óptica multimodo.

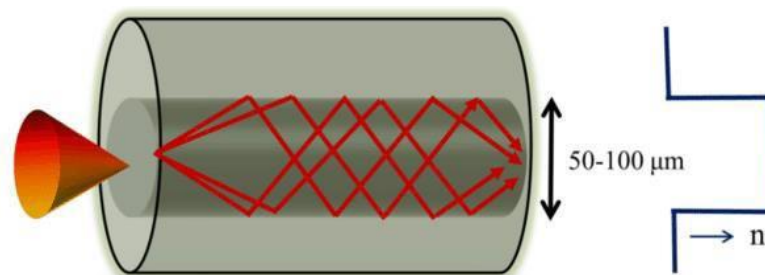
La fibra óptica que transmite varios rayos, con trayectorias diferentes, se llama fibra multimodo. El núcleo de la fibra multimodo es más grande que el de la fibra monomodo. La transmisión de datos suele realizarse mediante un LED, y se utiliza principalmente en redes de área local (LAN) donde la distancia no supera los dos kilómetros (Mondal, 2020). La fibra multimodo es la más barata, por lo que es el cable preferido y más utilizado por las empresas para enlaces ópticos de corta distancia. Este tipo de fibra multimodo se clasifican en dos:

- **Fibra óptica multimodo por índice escalonado.**

El tipo de fibra más común es la fibra multimodo de salto o de índice gradual, la cual es mayormente usada en las redes LAN. El haz de luz se emite dentro del núcleo de sílice de fibra, en donde los rayos de luz se propagan por reflexión interna total en un patrón de "dientes de sierra" (Mondal, 2020), tal como se muestra en la Figura 2.4. La fibra de salto de índice tiene un núcleo muy grande, causando que la atenuación en este tipo de fibra sea muy alta, como puede verse en la diferencia de los pulsos de entrada y salida.

Figura 2. 4:

Detalle de una fibra óptica multimodo por índice escalonado



Fuente: Mondal, (2020)

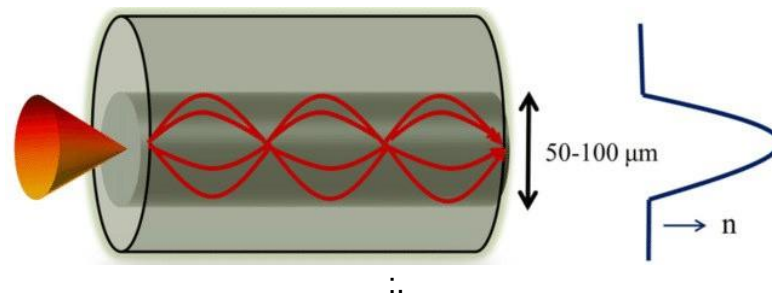
- **Fibra óptica multimodo por índice gradual.**

Este tipo de fibra también se la utiliza en las redes LAN. Se trata de una fibra multimodo, es decir, coexisten varios modos de propagación; pero en contraste con la fibra de índice de salto, existe una pequeña diferencia entre el índice de refracción del núcleo y del revestimiento. Sin embargo, dentro del

núcleo de las fibras de índice gradual existen varias capas de material con índices de refracción cada vez más altos. Estas diferentes capas de sílice con múltiples densidades influyen en la dirección de los rayos de luz, que tienen una forma elíptica, tal como se muestra en la Figura 2.5. La fibra de índice graduado tiene un tamaño de núcleo intermedio, y la atenuación en este tipo de fibra es menor que en las fibras de salto de índice (Mondal, 2020).

Figura 2. 5:

Detalle de una fibra óptica multimodo de índice gradual



Fuente: Mondal, (2020)

2.5. El principio de la propagación y transmisión ópticas.

La velocidad de la luz varía significativamente según las diferentes densidades de los materiales por los que viaja. Los rayos de luz transmitidos por el núcleo de la fibra, colisionan con la superficie de la misma pero manteniendo un ángulo de incidencia superior al ángulo crítico, asegurando que toda la luz se refleje en la fibra. Esto permite que la luz se propague a grandes distancias, reflejándose numerosas veces hasta su destino final. El núcleo de la fibra se recubre en su totalidad con una capa de vidrio, lo que permite reducir significativamente las pérdidas causadas por las impurezas de la superficie de la fibra. De esta forma, se garantiza que todas las reflexiones de la propagación sucedan en la capa núcleo-revestimiento (Mondal, 2020).

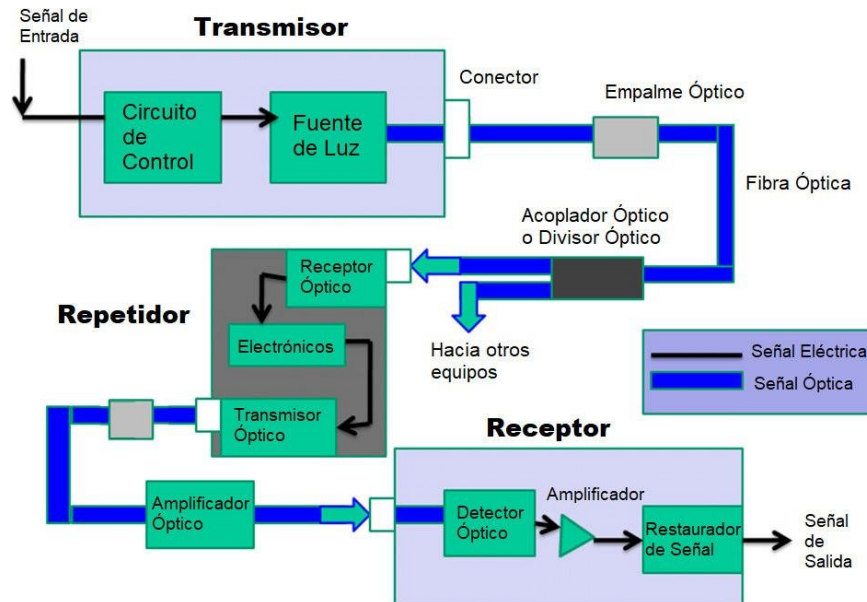
2.6. Sistema de comunicación por fibra óptica.

Un esquema de comunicación óptico comprende básicamente de las partes o segmentos: un transmisor (fuente de luz), un enlace óptico (fibra óptica) y un receptor (detector de luz). Actualmente los sistemas de interfaz e interconexión de redes, utilizan transceptores de fibra óptica en el diseño de sus sistemas.

2.6.1. Enlace óptico.

Es una conexión entre 2 puntos a través de la fibra óptica, y comprende de varios subconjuntos básicos (véase la Figura 2.6).

Figura 2. 6:
Arquitectura de un enlace óptico



Fuente: Miriampally, (2016)

2.6.2. Sistemas transmisores y receptores ópticos.

Se observa en la Figura 2.7 un diagrama de conexiones entre transmisores y receptores ópticos mediante un cable de fibra. A continuación, se describen brevemente los sistemas transmisores y receptores ópticos:

- **Transmisores ópticos.**

Un transmisor tiene dos funciones principales: la generación de una señal óptica y la modulación de esa señal con información. Una cualidad adicional muy útil de un transmisor óptico es su capacidad de ser sintonizable en frecuencia. De acuerdo con Donjuan L. (2008) las dos fuentes clásicas utilizadas en la fibra óptica son: (1) Led y (2) Láser.

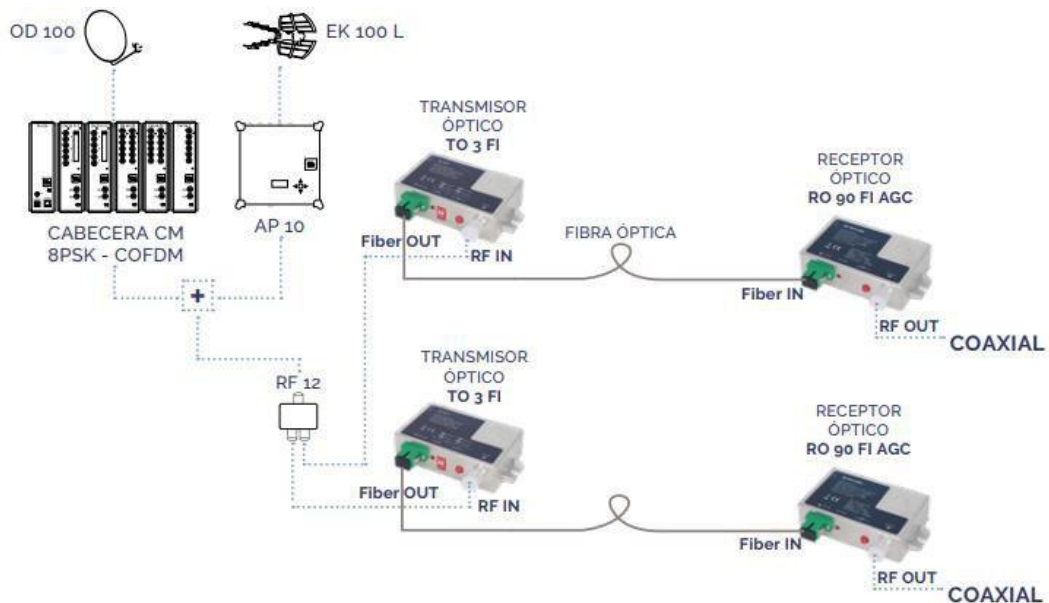
- **Receptores ópticos.**

La función de un receptor en un sistema de transmisión óptica es detectar y demodular una señal luminosa transmitida por una fibra. La

detección se produce al convertir la señal óptica en una señal eléctrica. A continuación, la demodulación suele realizarse mediante las técnicas habituales de los sistemas de transmisión eléctrica (ITS, 2019). Existen esencialmente dos tipos de componentes en el mercado: (1) fotodiodo y fotodiodo PIN, (2) diodos PIN, siendo estos los más populares y baratos.

Figura 2. 7:

Diagrama del enlace óptico entre transmisor y receptor óptico



Fuente: ITS, (2019)

2.6.3. Multiplexor y demultiplexor.

Existen 2 componentes indispensables para agrupar o desagrupar las señales en un sistema de comunicación óptico:

- **Multiplexor.**

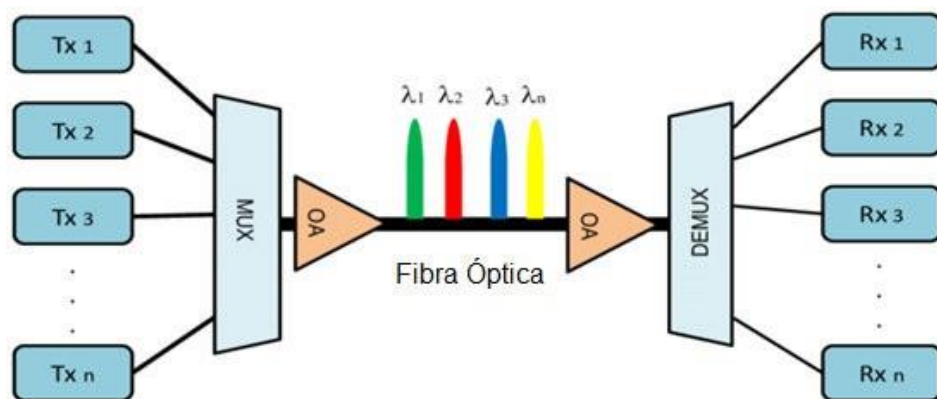
Un multiplexor es un sistema de red que combina diferentes tipos de red informática en el mismo medio de voz y transmisión. Puede transferir diferentes tipos de información simultáneamente en la misma conexión, debe combinar su información en una sola conexión, de esta operación se encarga el multiplexor que envía la señal a su destinatario (Granada-Torres et al., 2015). En la Figura 2.8 se observa el multiplexor (MUX) después de los transmisores (Tx) ópticos.

- **Demultiplexor.**

Es un sistema de red que realiza el proceso inverso al de un multiplexor. En cuanto la señal llega a su destino, separa la información que previamente se había combinado para luego hacerla utilizable de forma independiente (Granada-Torres et al., 2015). En la Figura 2.8 se observa el demultiplexor (DEMUX) antes de los receptores ópticos (Rx).

Figura 2. 8:

Diagrama del funcionamiento entre un multiplexor y un demultiplexor en un enlace óptico



Fuente: Granada-Torres et al., (2015)

2.6.4. Técnicas de multiplexación óptica.

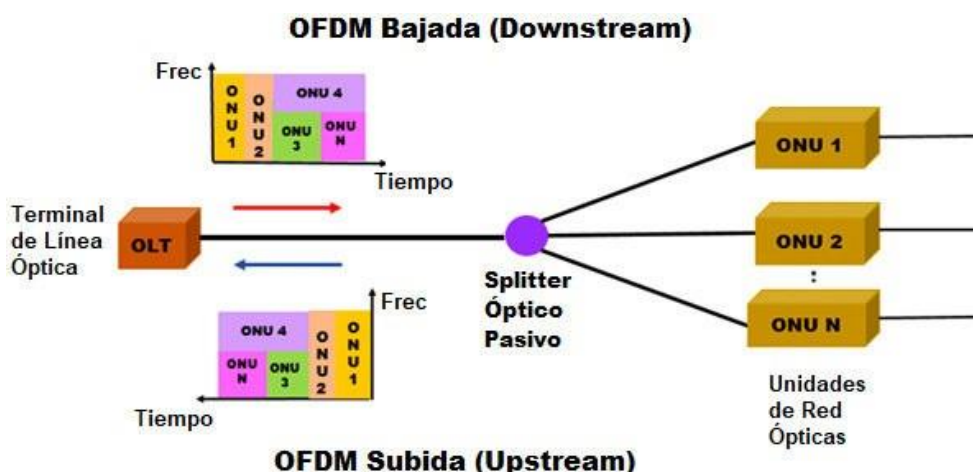
Existen dos técnicas principales de multiplexación que se emplean en un sistema de comunicación óptica:

- **Técnica OFDM.**

La multiplexación por división de frecuencias ortogonales (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM), es la técnica de modulación digital multiportadora, es decir, parte de una sola subportadora hacia múltiples subportadoras en el mismo canal, tal como se ilustra en la Figura 2.9.

Esta técnica se utiliza para transmitir un flujo de alta velocidad de bits en una sola portadora, OFDM utiliza un gran número de subportadoras ortogonales estrechamente espaciadas que son transmitidos en paralelo.

Figura 2. 9:
Diagrama del funcionamiento de la técnica OFDM



Fuente: Sharma et al., (2018)

Los espectros se superponen pero las señales son ortogonales, cada subportadora está definida por un tipo de modulación digital (QPSK, 16 QAM, 32 QAM, entre otras) a una tasa de símbolos más baja (Sharma et al., 2018). Las combinaciones de varias subportadoras permiten obtener velocidades de datos similares a las de las modulaciones de una sola portadora con anchos de banda equivalentes.

En OFDM se divide cada canal en varias subportadoras más estrechas. Todas las subportadoras tienen un número completo de ciclos de una onda sinusoidal cuya suma es cero después de la demodulación. De acuerdo con Sharma et al. (2018) las ventajas de OFDM son:

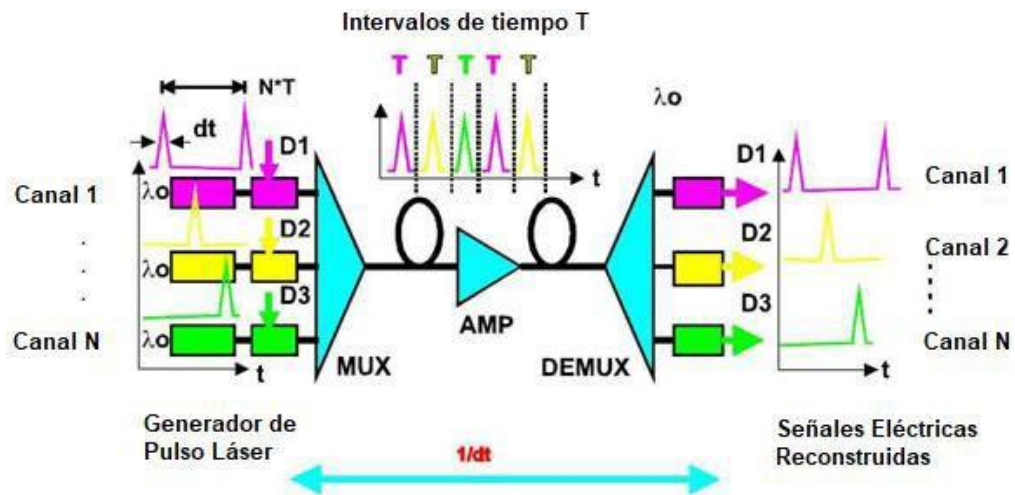
- La eficiencia espectral, también llamada eficiencia del ancho de banda. Esto significa que se pueden transmitir más datos y más rápido en presencia de ruido. Esta se indica en bits/s (bps) o HZ.
- Para un ancho de banda determinado, las distintas modulaciones ofrecen velocidades de datos máximas muy diferentes para una tasa de error de bits (Bits Error Rate, BER) y un nivel de ruido determinados.
- OFDM es la mejor modulación para conseguir la máxima capacidad de datos de un ancho de banda determinado. Se acerca al límite de Shannon de la capacidad del canal en bits/s (bps).

- **Técnica OTDM.**

La multiplexación óptica por división de tiempo (Optical Time Division Multiplexing, OTDM), es la técnica original de modulación que se utilizaba para los sistemas eléctricos. Sin embargo, este alcanzó rápidamente sus límites en cuanto se acercaron a velocidades de datos del orden de 10 Gbps, debido a las restricciones de sus componentes electrónicos (Sharma et al., 2018). El diagrama de la Figura 2.10 muestra el funcionamiento de la técnica OTDM.

Figura 2. 10:

Diagrama del funcionamiento de la técnica OTDM



Fuente: (Sharma et al., 2018)

Sharma et al. (2018) afirma que una cadena de transmisión de OTDM consta de los siguientes elementos:

- Una fuente óptica que genera el tren de pulsos ópticos que requiere el sistema OTDM.
- Un sistema de multiplexación que codifica los datos del usuario del dominio eléctrico al óptico antes de multiplexarlos.
- El sistema de demultiplexación que recupera los datos específicos del usuario antes de convertirlos de nuevo al dominio eléctrico.

2.6.5. Fuentes ópticas.

Wavelength (2022) considera que desde el inicio de las comunicaciones por fibra óptica, la elección de las fuentes ópticas se ha centrado en los

transmisores semiconductores; ya que, por su pequeño tamaño, son la fuente más adecuada y permiten una mayor eficacia de acoplamiento óptico con la fibra. Además, la necesidad de utilizar anchos de banda cada vez más amplios impone la elección de fuentes con espectros reducidos tales como fuentes de diodos láser y diodos emisores de luz (LD y LED respectivamente).

- **Diodo láser (LD).**

Un diodo láser (Laser Diode, LD) es un componente semiconductor similar a un LED, diseñado y utilizado para explotar los beneficios del efecto láser. Wavelength (2022) destaca sus principales características:

- Fuente coherente y monocromática.
- Espectro es limitado o estrecho.
- Patrón de radiación es directivo.
- Utilizado en sistemas de transmisión a largas distancias.

- **Diodo emisor de luz (LED).**

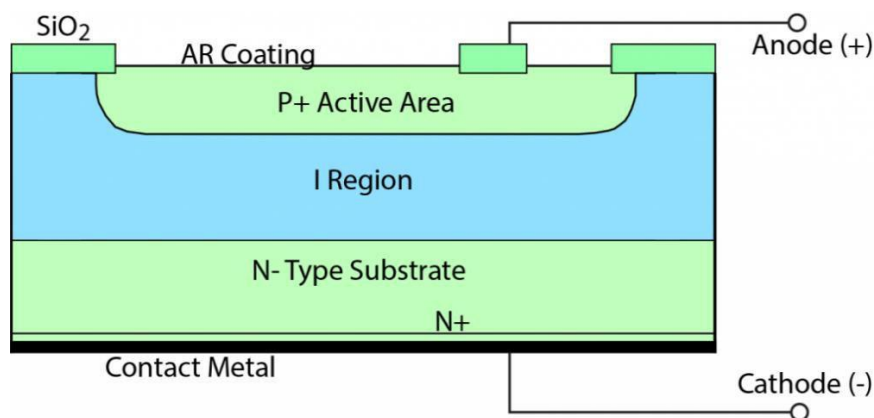
Un diodo emisor de luz (Light-Emitting Diode, LED) es un componente que emite directamente fotones en una heterounión directamente polarizada. Wavelength (2022) menciona las características de este dispositivo:

- Fuente policromática e incoherente.
- Espectro es bastante amplio.
- Patrón de radiación es menos directivo.
- Curva de potencia-corriente es bastante lineal.
- Utilizado en sistemas de transmisión con menor ancho de banda.

2.6.6. Fotodetector.

Un fotodetector o fotodiodo es un componente semiconductor con capacidad para detectar la radiación en el dominio óptico y transformarla en una señal eléctrica. Consiste en un cristal heterogéneo de estructura PN (materiales semiconductores de tipo P y N) colocado entre dos electrodos que están conectados a una fuente de tensión a través de una resistencia de carga R (Wavelength, 2022). La Figura 2.7 muestra la sección transversal interna del fotodiodo PIN.

Figura 2. 11:
Estructura interna de un fotodiodo PIN



Fuente: Wavelength, (2022)

El fotodiodo PIN es un dispositivo optoelectrónico que se emplea en diversas aplicaciones en el sector industrial. Se caracteriza por su unión compuesta entre una región intrínseca de P altamente dopada y otra región de N altamente dopada. Del mismo modo, el fotodiodo PIN tiene una eficiencia cuántica (conversión de fotones en electrones) mucho mayor que el fotodiodo PN, manteniendo simultáneamente tiempos de respuesta muy rápidos Wavelength, (2022).

2.6.7. Propiedades de la fibra óptica.

La capacidad de la fibra óptica tiene unos parámetros que se establecen a través del tipo de fibra. Algunos de los parámetros más importantes son:

- **Apertura numérica.**

Con la apertura numérica (AN) que tiene una fibra óptica es posible caracterizar al cono de aceptación en el caso que los rayos de luz en este cono sean dirigidos por reflexión interna total de la fibra; de no ser así, el rayo no será guiado. Cuando se trata de fibras monomodo conviene el empleo de una fuente láser, dado también que la AN es pequeña; mientras que, en el caso de las fibras de índice graduado, en las que el índice varía a lo largo de un diámetro, la AN es entonces máxima en el eje de la fibra y se anula en el perímetro del núcleo (Wavelength, 2022).

- **Atenuación.**

La atenuación la podemos definir como la tasa de variación entre la potencia óptica transmitida con respecto a la potencia recibida, expresada por la fórmula:

$$A(dB) = 10 \log \frac{P_e}{P_s}$$

Donde, P_e es la potencia luminosa recibida, y P_s es la potencia luminosa en el origen. Wavelength (2022) describe que la atenuación provoca una pérdida de energía de la señal transmitida, entre las principales causas son:

- Las propiedades intrínsecas de los materiales utilizados: dispersión, absorción.
- Defectos de fabricación: impurezas, defectos geométricos.
- Incumplimiento de las normas de ingeniería: curvas demasiado grandes.

2.7. Descripción general de las redes FTTx.

Mazzenga et al. (2017) plantea que la fibra hasta el punto X comprende una tecnología o conjunto de arquitecturas de comunicación que sirven para acceder a Internet y otros servicios asociados a través de redes ópticas. Dicha tecnología, nace como competencia a las redes sobre cobre denominadas XDSL. Los sistemas FTTx se clasifican básicamente entre dos categorías:

- Redes de comunicación ópticas hasta el punto de distribución.
- Redes de comunicación ópticas pasivas.

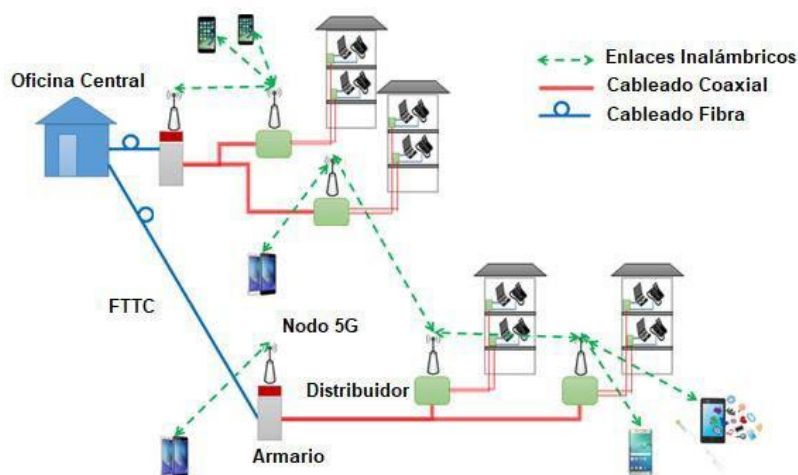
2.7.1. Redes de comunicación ópticas hasta el punto de distribución.

La fibra óptica se despliega hasta el punto de distribución, es decir, hasta el punto de conexión de los enlaces de los abonados o de los aparatos públicos. Se realiza mediante una nueva tecnología (FTTC, FTTN, FTTLA) que utiliza cables ADSL o redes de microondas.

- **Fibra hasta el armario 3 FTTC.**

La fibra hasta la acera o armario (Fiber To The Curb, FTTC), es una tecnología utilizada para el acceso a Internet que llega al subdistribuidor del operador situado a menos de 300 metros del edificio (Mazzenga et al., 2017).

Figura 2. 12:
Arquitectura tecnológica FTTC

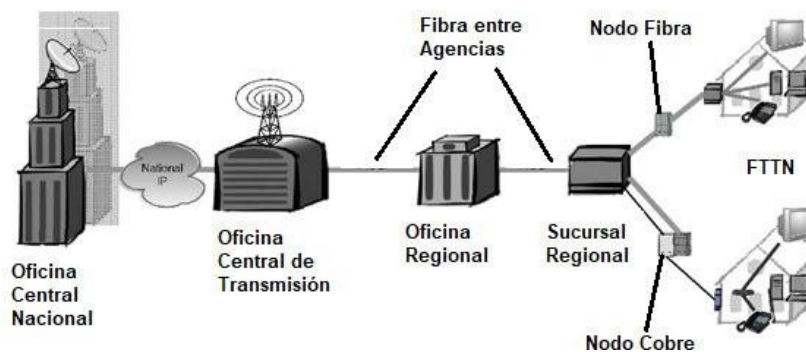


Fuente: Mazzenga et al., (2017)

- **Fibra hasta el nodo 3 FTTN.**

La fibra hasta el nodo (Fiber To The Node, FTTN), es una tecnología utilizada para el acceso a Internet desplegada en una zona, donde la fibra llega a un subdistribuidor que da servicio a un grupo de usuarios a más de 300m de distancia. La conexión de los abonados se realiza a través de una red de cobre o por un enlace de radio inalámbrico (Esfandiari, 2006).

Figura 2. 13:
Arquitectura tecnológica FTTN



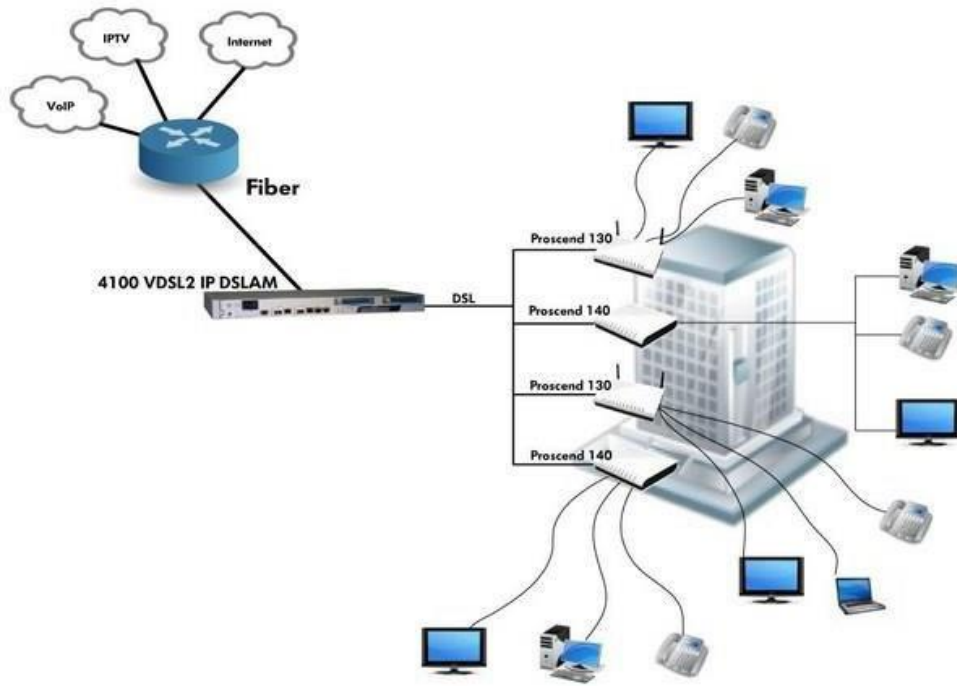
Fuente: Esfandiari, (2006)

- **Fibra hasta el último amplificador 3 FTTLA.**

La fibra hasta el último amplificador (Fiber To The Last Active, FTTLA), es una tecnología en donde se sustituye el cable coaxial con fibra óptica hasta el último componente activo o amplificador, que se encuentra a cientos de

metros de las viviendas. Se utiliza cable coaxial en la última milla para las conexiones con los usuarios (Esfandiari, 2006).

Figura 2. 14:
Arquitectura tecnológica FTTLA



Fuente: Esfandiari, (2006)

2.7.2. Redes de comunicación ópticas pasivas.

La fibra óptica se despliega desde su único punto de origen hasta múltiples puntos finales, por medio de divisores ópticos pasivos que encapsulan los datos y distribuyen la señal de manera uniforme. Este esquema es conocido como red óptica pasiva (PON) debido a la ausencia de alimentación de la fibra y en los componentes divisores, sólo requiere de suministro eléctrico en los puntos de origen y destino. Actualmente el esquema PON es el más utilizado por los operadores para sus redes de acceso por sus bajos costos operativos y de mantenimiento (Straullu et al., 2015).

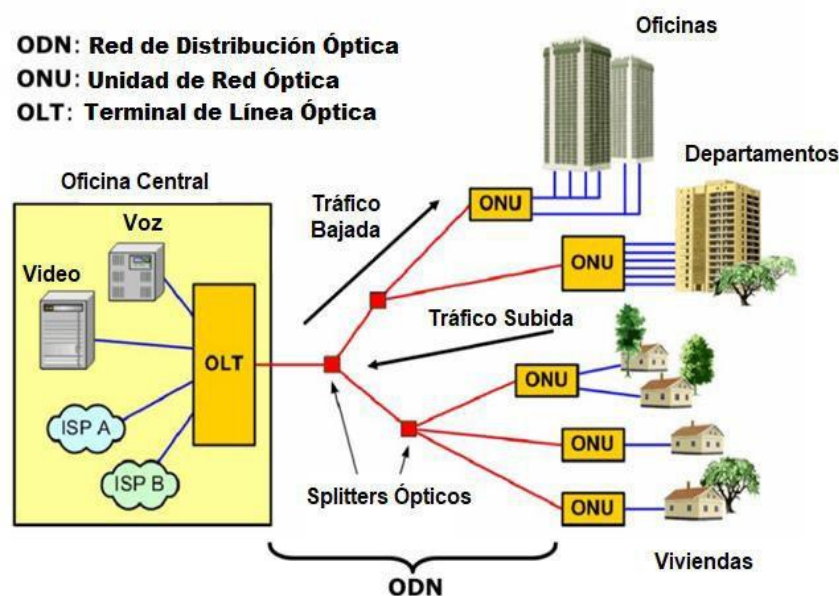
2.8. Descripción general de las redes ópticas pasivas.

En el 2015, Straullu et al. representa un esquema arquitectónico de una red óptica pasiva (PON) y se basa en los siguientes elementos esenciales:

- Terminal de enlace óptico (OLT): elemento activo ubicado en la oficina central o proveedor.
- Terminal de red óptica (ONT): interlocutor directo del OLT, situado en cada vivienda.
- Acoplador óptico (divisor): se denomina acoplador al componente integrado en la línea que realiza la función de divisor o concentrador de la transmisión. Es un dispositivo pasivo que no precisa alimentación eléctrica y que opera en función de la propagación de la luz dentro de la fibra. Los acopladores permiten combinar las señales ópticas por agregación en sentido ascendente y dividir la señal óptica procedente de la OLT en sentido descendente.
- Unidad de red óptica (ONU): es un dispositivo del tipo ONT, sólo que, compartido por varios usuarios, y que se utiliza en el caso de que la fibra no penetre hasta el abonado (caso de las FTTC). Las transmisiones entre la ONU y los abonados se realizan a través de pares de cobre, como en la tecnología xDSL.

Figura 2. 15:

Arquitectura de una red óptica pasiva (PON)



Fuente: Straullu et al., (2015)

Yu et al. (2020) refiere que para el despliegue de la infraestructura FTTH, se utilizan comúnmente dos arquitecturas:

- Arquitectura activa, también llamada Punto a Punto (P2P)

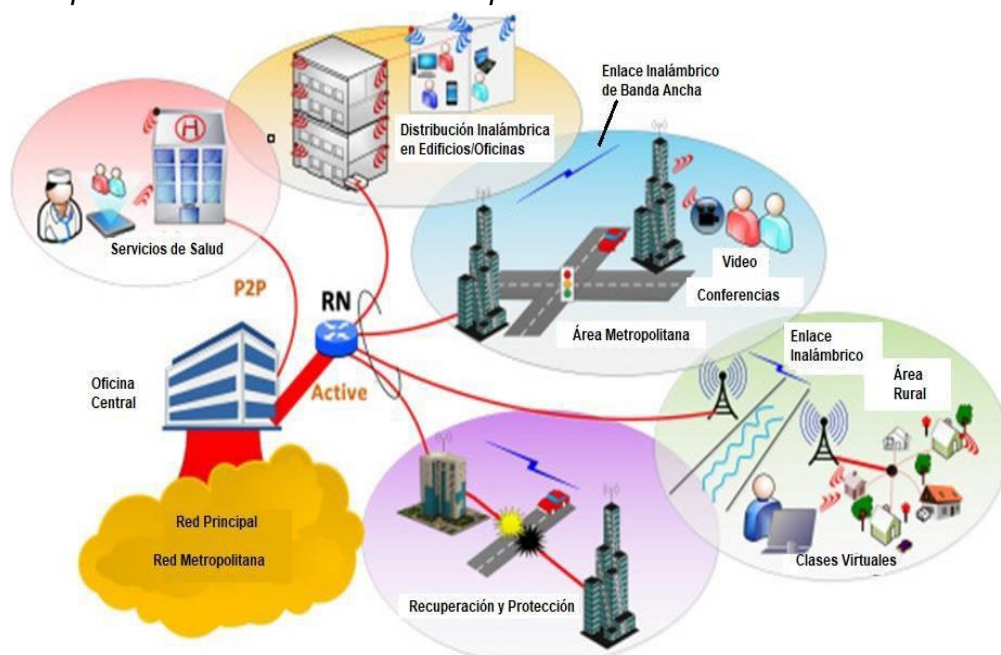
- Arquitectura pasiva, también se denomina comúnmente red óptica pasiva (PON) o punto a multipunto (P2M).

La arquitectura de despliegue dependerá del tipo de servicios que se vayan a prestar, del coste de la infraestructura, de la infraestructura actual y de los planes futuros de migración a nuevas tecnologías. Esto lo determina el proveedor de acuerdo a su propio análisis costo-beneficio. Por ello, se analiza brevemente las ventajas e inconvenientes de cada tipo de arquitectura (Yu et al., 2020).

2.8.1. Tecnología de redes ópticas activas (Punto a Punto/P2P).

En la Figura 2.16 se representa la arquitectura punto a punto de la red de acceso óptico, en la que a cada abonado se le asigna una fibra óptica procedente de la central.

Figura 2. 16:
Arquitectura de red P2P en redes ópticas activas



Fuente: Yu et al., (2020)

Es decir, que pueden tener 32 o 64 fibras y utilizar 64 transceptores (Tx y Rx). A esta arquitectura también se denomina "Home Run". Mediante N fibras ópticas, se conectan las OLT a la central con N cantidad de ONUs situados en los abonados. El punto de distribución RN es simplemente un

punto de conexión de fibra a fibra entre las troncales de transporte y distribución. La primera ventaja de la arquitectura punto a punto es la posibilidad de aumentar el rendimiento por usuario, ya que no se comparten recursos de hardware en términos de fibra óptica y del transceptor óptico en la OLT (Yu et al., 2020).

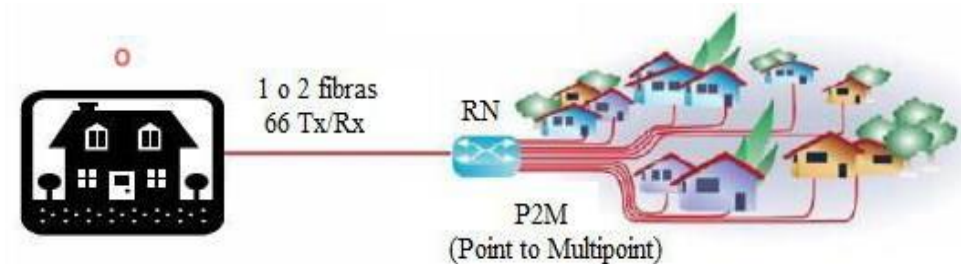
Puesto que no se comparten recursos de hardware, se evitan las complejidades asociadas a las distintas técnicas multiplexadoras (en tiempo o longitud de onda). La cobertura puede incrementarse debido a la ausencia de dispositivos ópticos que atenúen la señal en la red. Por otra parte, la seguridad de los datos de los usuarios está garantizada gracias a que la comunicación entre cada abonado y la OLT es independiente de un usuario a otro. Así mismo, el hecho de que cada abonado esté conectado en una interfaz óptica a la OLT permite un óptimo aprovechamiento de los equipos y facilita la gestión de la red (Straullu et al., 2015).

2.8.2. Tecnología de redes ópticas pasivas (Punto a Multipunto/P2M).

En esta arquitectura, también conocida como red óptica pasiva (PON), una sola fibra óptica que va entre el punto de distribución RN y la OLT se comparte entre varios abonados. De esta forma, la central envía información para varios abonados en una sola transmisión. Luego, por medio de un filtrado, cada ONT de usuario recibe los datos que le corresponden (Booz, 2018). En la Figura 2.17, se muestra que la agregación del tráfico de varios abonados se realiza mediante un equipo Ethernet activo situado en el RN.

Figura 2. 17:

Arquitectura de red P2M en redes ópticas pasivas



Fuente: Booz, (2018)

CAPÍTULO 3

DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

En este capítulo se presentó la propuesta de simulación del rendimiento de una red FTTH basada en la arquitectura GPON-WDM utilizando la herramienta de simulación OptiSystem. Se describió brevemente el software de simulación OptiSystem, y después se diseñó el enlace óptico usando la arquitectura ya mencionada para el análisis de resultados del rendimiento de la red.

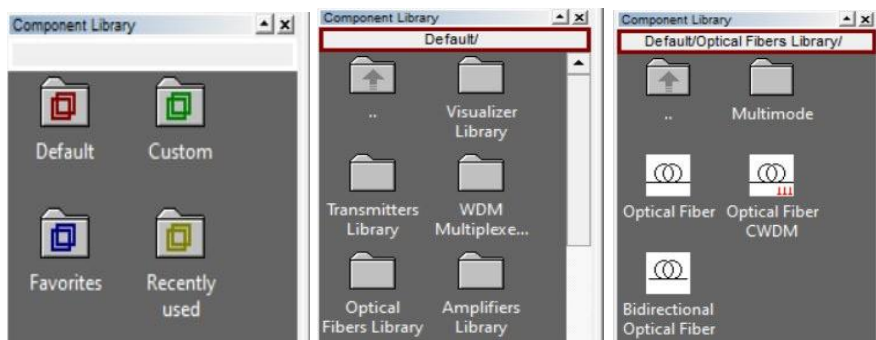
3.1. Descripción general del software de simulación.

Durante el desarrollo del trabajo, se optó por un innovador software de simulación de los sistemas de comunicaciones ópticos que permite diseñar, probar y optimizar técnicamente cualquier tipo de enlace óptico que se encuentre en la capa física para una amplia gama de redes ópticas. Concretamente, se trató del simulador OptiSystem, que está basado exclusivamente en el modelado realista de las redes de comunicaciones por fibra óptica.

Este software posee una extensa librería de dispositivos activos y pasivos que incluyen parámetros realistas de los sistemas ópticos, estas capacidades pueden ampliarse fácilmente con la adición de dispositivos y pueden vincularse a una amplia gama de herramientas (véase la Figura 3.1).

Figura 3. 1:

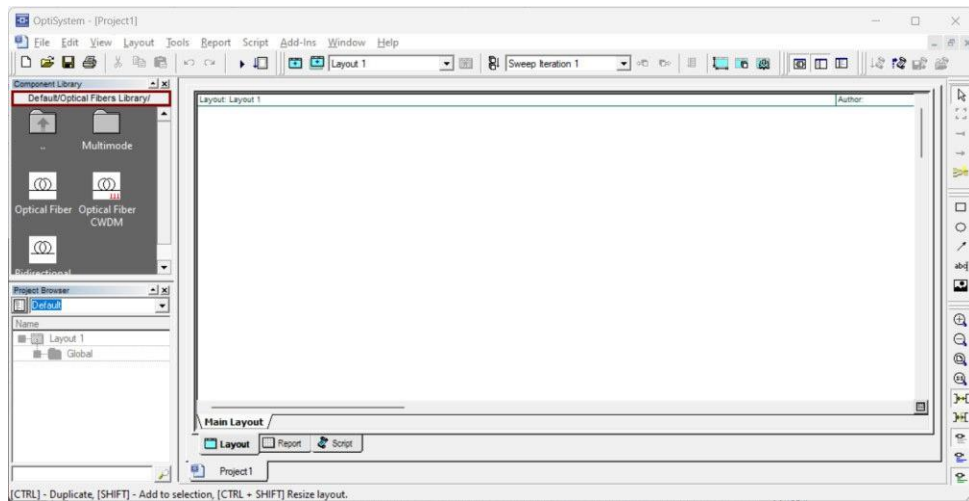
Representación de los dispositivos o componentes de la librería del software OptiSystem



Elaborado por: Autor

El software OptiSystem tiene la capacidad de brindar una completa interfaz gráfica de usuario (GUI) que permite controlar la disposición óptica de los dispositivos, los modelos y las presentaciones gráficas dependiendo de las necesidades de simulación (véase la Figura 3.2).

Figura 3. 2:
Representación de la interfaz gráfica de usuario (GIU) del simulador OptiSystem



Elaborado por: Autor

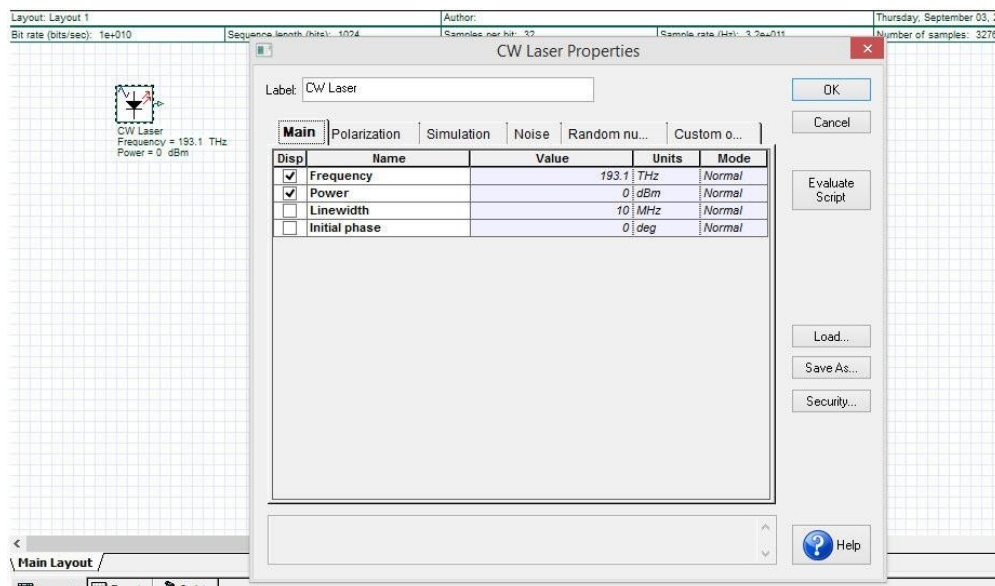
3.2. Características técnicas y aplicaciones del software OptiSystem.

A continuación, se mencionan algunas de las principales características del programa:

1. Los componentes virtuales de la librería tienen la capacidad de representar el mismo efecto y comportamiento que los componentes reales, en relación con la precisión y la eficacia seleccionadas.
2. La librería de componentes permite que se puedan registrar parámetros de medición de dispositivos reales, y además se integra con equipos de prueba y medición de diferentes proveedores, tal como se observa en la Figura 3.3.
3. Las herramientas avanzadas de visualización permiten generar señal de sonido, diagramas de ojos, estado de polarización, patrones de constelación y mucho más.
4. Es también posible conectar un número arbitrario de visualizaciones en el monitor al mismo puerto.
5. Se puede obtener el estado general y cálculo del flujo de datos.

Figura 3. 3:

Representación de las propiedades de componentes (ejemplo CW Láser) que se pueden modificar sus parámetros



Elaborado por: Autor

Entre las diversas aplicaciones que se pueden desarrollar en el software OptiSystem se mencionan las más utilizadas:

1. El diseño del sistema de comunicación óptica del componente a nivel de capa física.
2. Diseño de redes ópticas pasivas (PON) y TDM/WDM.
3. Diseño de anillo SONET/SDH.
4. Diseño de transmisores y amplificadores de canal.

3.3. Características generales sobre la calidad de la transmisión.

Considerando todos los procesos de degradación que puede experimentar la señal durante su transmisión a través de la fibra óptica, fue necesario establecer criterios para estimar el nivel de calidad de una transmisión. Así, en la realidad, dichos criterios de evaluación se realizaron después de la detección de la señal y fueron utilizados principalmente para comprobar el rendimiento obtenido en las nuevas transmisiones.

- **Diagrama de ojo.**

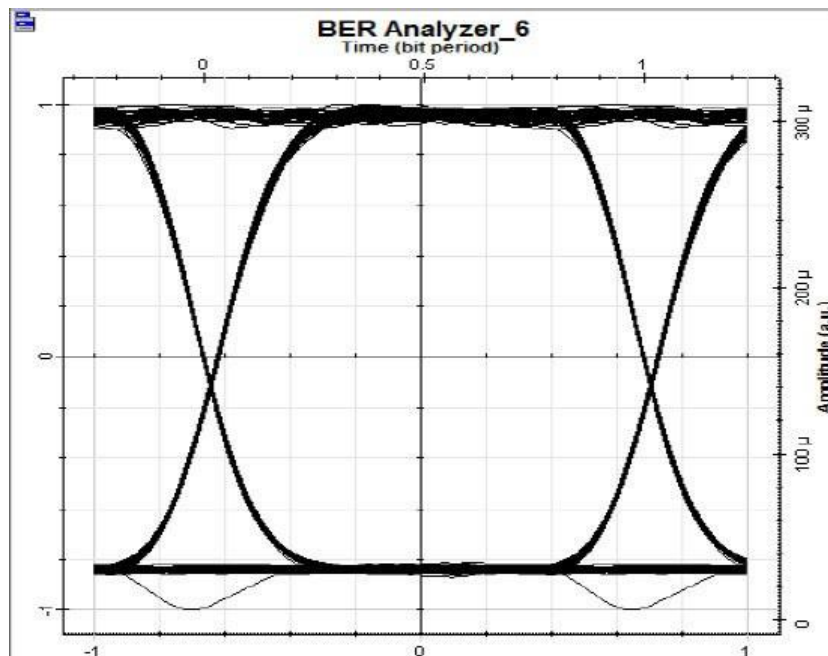
El diagrama de ojo representa la superposición sincrónica de todo el símbolo binario de la secuencia transmitida para estimar la calidad de una

señal de forma visual, tal como se muestra en la Figura 3.4. El diagrama de ojo se caracteriza por:

1. El ensanchamiento temporal de los pulsos de la señal debido a la dispersión cromática causada por la interferencia entre los símbolos.
2. Fluctuación temporal causada por la dispersión y el acoplamiento entre los pulsos y el ruido de transmisión amplificado.
3. En el enlace, el ruido de amplitud que resulta de la acumulación de ruido de transmisión amplificado en la señal a lo largo de su trayectoria.

Figura 3. 4:

Representación gráfica de un diagrama de ojo en el software OptiSystem



Elaborado por: Autor

- **Factor de calidad de la amplitud o factor Q.**

Para la evaluación de la calidad de la transmisión se utilizó otro criterio, denominado factor de calidad (Q), que se obtiene a partir de las estadísticas de ruido (medias y desviaciones estándar) de los niveles "1" y "0" de la señal a detectar. Se trata de un parámetro que permitió estimar la tasa de error de bits sin tener que contar errores, sino simplemente considerando la amplitud media de los bits "1" y "0" y el valor de su desviación estándar \tilde{A}_1 y \tilde{A}_0 . Este factor se define por:

$$\hat{y} = \frac{I_1 2 I_0}{\sigma_1 + \sigma_2}$$

Donde, I_1 y I_0 son los valores promedio de los niveles "1" y "0" respectivamente, $\tilde{\sigma}_1$ y $\tilde{\sigma}_0$ la desviación estándar del ruido sobre la señal de los símbolos "1" y "0".

- **Tasa de error de bits.**

Aunque el diagrama de ojo es el método para medir gráficamente la calidad de una señal digital de manera visual, hay que señalar que el criterio que permite cuantificar óptimamente esta calidad de transmisión es la tasa de error de bits (BER), la cual corresponde a la probabilidad que se tome un fallo en un dato binario. Y se define de la siguiente manera:

$$BER = \frac{N_{ed}}{N_{Btx}}$$

Donde, N_{ed} es la cantidad de errores detectados en la transmisión de datos, y N_{Btx} es la cantidad de bits transmitidos.

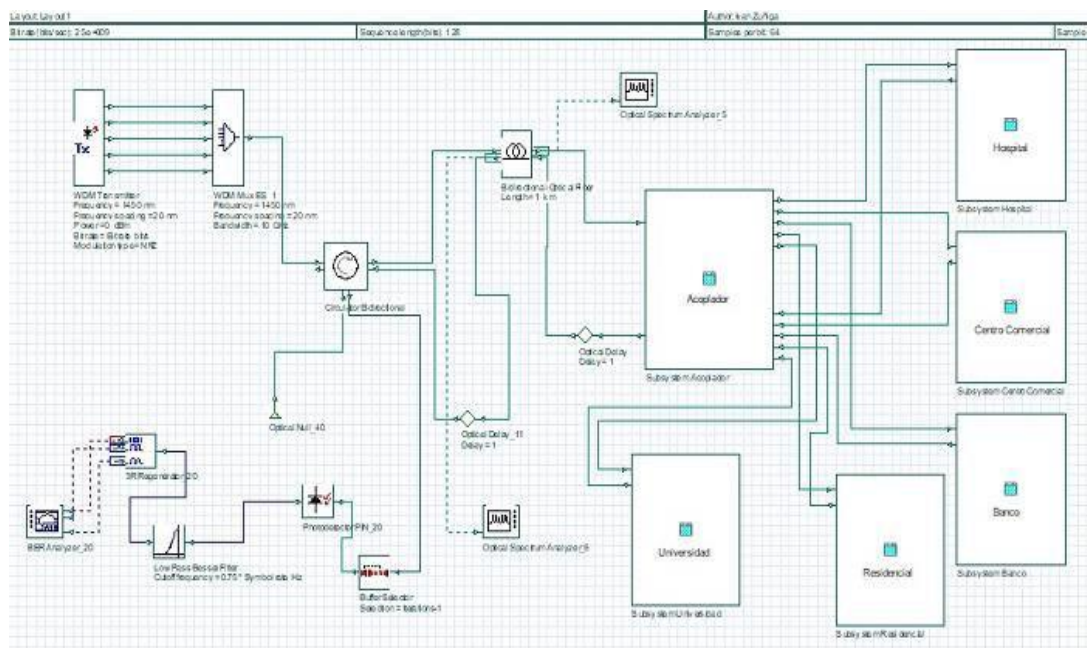
3.4. Diseño de la propuesta del modelo de simulación de una red FTTH basado en la arquitectura GPON-WDM.

El proyecto desarrollado consistió en proveer de fibra óptica a determinadas zonas o sectores ubicados a diferentes distancias, entre ellos: hospitales, zonas residenciales, bancos, centros comerciales y centros universitarios. El diseño de la red óptica consistió de fibra FTTH usando la arquitectura de GPON y mediante la multiplexación WDM.

En la Figura 3.5 se presentó el esquema de la red FTTH utilizando la arquitectura GPON-WDM. Se pueden observar diferentes componentes ópticos que se utilizaron en el modelo de simulación de la red FTTH a través de canales ascendentes y descendentes mediante fibra óptica bidireccional. Además, se pueden observar subsistemas (bloques) que fueron creados para minimizar el diseño de la red y que serán explicados en detalle en las siguientes secciones del presente apartado.

Figura 3. 5:

Diseño en el software OptiSystem de la red FTTH sobre GPON usando la técnica WDM



Elaborado por: Autor

Las etapas del diseño planteado fueron descritas en las secciones siguientes, las mismas que son: canal de transmisión descendente (Sección 3.4.1), acoplamiento óptico (Sección 3.4.2) y bloques (5 subsistemas diseñados para proveer de servicio de FTTH) de unidad de red óptica (ONU) en la Sección 3.4.3.

3.4.1. Diseño de red FTTH en sentido descendente.

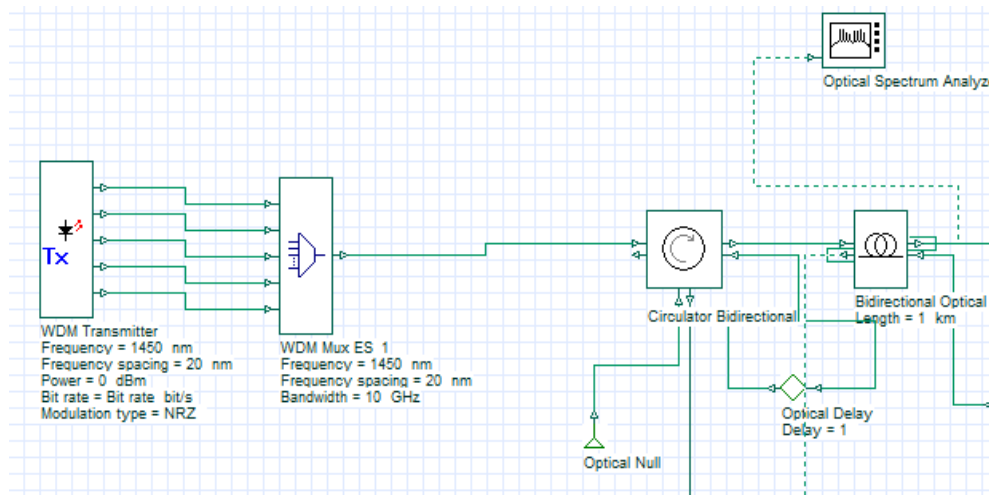
En la Figura 3.6 se puede ver como el enlace descendente de la red está compuesto por:

- Transmisor óptico: se eligió un transmisor WDM (multiplexador por división de longitud de onda) que está compuesto por un módulo cuyo transmisor suele ser un diodo láser, con una frecuencia de 1450 nm, una separación de 20 nm y un modulador de no retorno a cero (NRZ).
- Multiplexor óptico: se eligió uno del tipo WDM (multiplexador por división de longitud de onda) que tiene por función multiplexar con los parámetros: 1 450 nm por longitud de onda, una separación de 20 nm y con 10 GHz como ancho de banda.

- Circulador bidireccional: es un componente de tres puertos diseñado para que cada haz de luz entrante salga por el siguiente puerto, y así pueda transmitir luz desde una fibra hasta otra.
- Optical Null: su función es generar una señal óptica nula para no dejar suelto un puerto del circulador bidireccional.
- Retardo o desfase óptico: es el que se encarga de generar retardos en la señal óptica. El retardo se añade enviando señales nulas al puerto de salida. Así, este retrasa los pasos de transferencia de datos en el puerto de entrada del componente al puerto de salida según el número de pasos configurado en el componente.
- Fibra óptica (línea de transmisión): se escogió una fibra óptica monomodo (SMF) bidireccional de longitud 1 km con una atenuación de 0.2 dB/km, que de acuerdo a la recomendación (ITU-T G.656, 2010) debe ser máximo de 0.4 dB/km para las frecuencias de hasta 1 490 nm.

Figura 3. 6:

Representación del diseño de la red FTTH en el sentido descendente usando tecnología WDM



Elaborado por: Autor

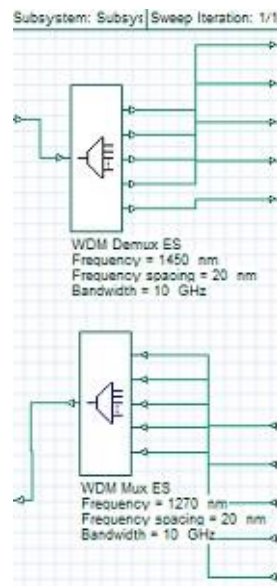
3.4.2. Diseño del acoplador óptico.

Se trata de un dispositivo pasivo situado a lo largo del trayecto y cuya finalidad principal es distribuir los flujos de transmisión en sentido descendente y combinarlos en sentido ascendente. Así, por ejemplo, estos

acopladores incluyen un multiplexor/demultiplexor óptico con longitudes de onda de 1 450 nm (WDM-Demux para el canal de transmisión descendente) y 1 270 nm (WDM-Mux para el canal de transmisión ascendente), además con una separación de 20 nm por señal y un ancho de banda de 10 GHz respectivamente.

Figura 3. 7:

Representación del bloque subsistema del acoplador óptico en la red FTTH propuesta



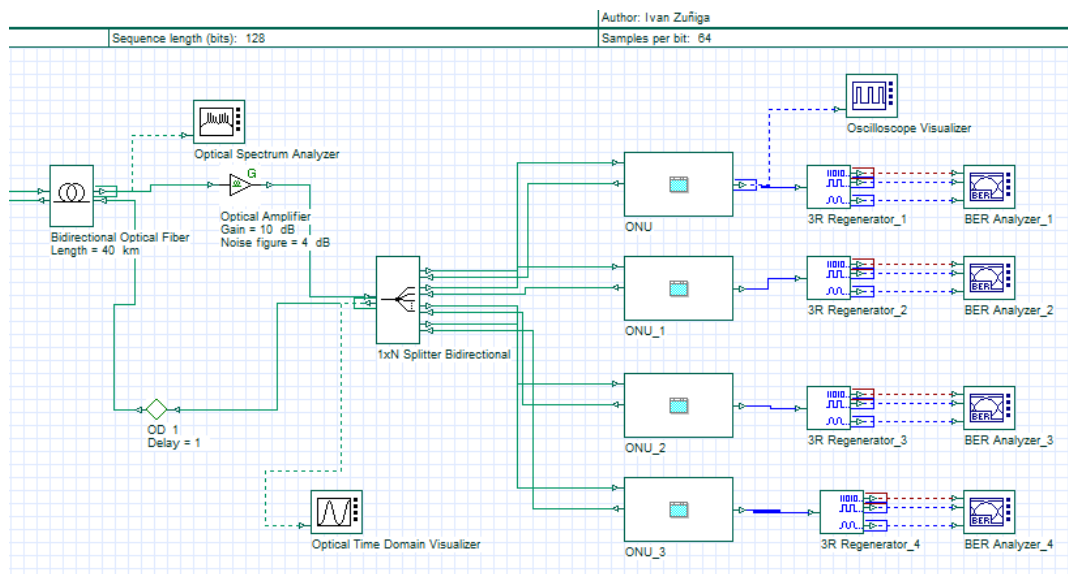
Elaborado por: Autor

3.4.3. Diseño de los módulos de usuario final.

En el presente trabajo de titulación se suministró fibra óptica a 5 zonas o sectores con diferentes distancias con respecto al nodo integrador (acoplador). Los clientes o usuarios finales se definen respectivamente como: hospital (ubicado a 10 km), centro comercial (ubicado a 40 km), banco (ubicado a 70 km), zona residencial (ubicada a 90 km) y universidad (ubicada a 120 km).

En la Figura 3.8 se presentan los componentes de cada uno de estos bloques en la que se incluye el subsistema que identifican a una unidad de red óptica (ONU) que actúa como un puerto óptico Ethernet para acceder a internet.

Figura 3. 8:
Representación del bloque subsistema de usuarios finales para diferentes sectores

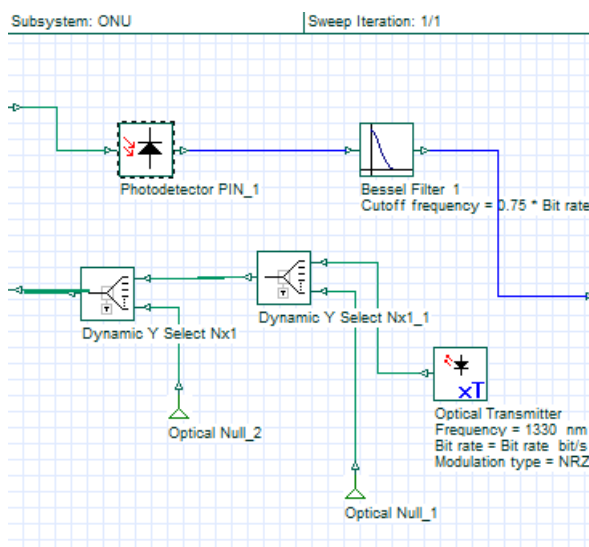


Elaborado por: Autor

Todos estos módulos fueron creados con los mismos componentes y entre ellos se encuentran:

- Divisor bidireccional: este componente es un divisor y unificador de potencia que tiene una cantidad arbitraria de puertos de entrada. Para la simulación se han colocado 5 puertos.
- Regenerador de señal: de tipo 3R para poder transformar la señal degradada a su forma original.
- Analizador de tasa de error de bits: utilizado para hacer una evaluación del rendimiento del sistema, y permite hacer una comparativa sobre los bits enviados en relación con los bits recibidos, con lo cual se puede visualizar el diagrama de ojo.
- Subsistema del ONU: el cliente o abonado de un servicio FTTH estará caracterizado por una ONU (Unidad de Red Óptica), que se compone de la parte transmisora y receptora, en la cual aparecen componentes tales como el fotodetector y el filtro de Bessel, tal como se observa en la Figura 3.9. A cada ONU le correspondió una unidad repetidora que se encargó de las funciones de regeneración, remodelación y resincronización de la señal.

Figura 3. 9:
Representación del bloque subsistema ONU en la red FTTH propuesta



Elaborado por: Autor

En la parte destinada como receptor se incluyó:

- Un amplificador óptico: encargado de la amplificación de las señales luminosas con una ganancia de 10 dB y una tasa de ruido de 4 dB.
- Un receptor óptico: fotodiodo PIN, encargado de la transformación de la señal óptica a eléctrica, y que permite adaptarse a la decisión del umbral en relación con los paquetes de datos recibidos.
- Un filtro pasa bajo: que es del tipo Bessel y se encarga de extraer la información pertinente a partir de una frecuencia de corte expresada por $0.75 \cdot \text{velocidad de símbolos}$.

En la parte correspondiente a la transmisión se incluyó:

- Transmisor óptico: se trata de una versión monocanal del transmisor WDM, con una frecuencia de 1 330 nm y un modulador NRZ.
- Dynamic Y-Select: es un switch dinámico que permite controlar los diferentes valores de atenuación y de fase.

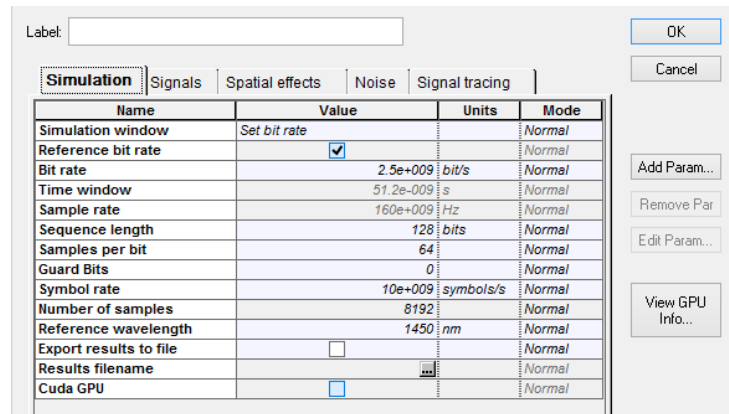
3.5. Simulación y análisis de resultados obtenidos de la red FTTH basada en arquitectura GPON-WDM.

En esta sección del proyecto se simuló y se visualizó los resultados obtenidos tales como el factor Q y el diagrama de ojo a medida que se

modificó la distancia de la fibra con el fin de observar las diferencias. A continuación, la Figura 3.10 muestra los parámetros de la red FTTH.

Figura 3. 10:

Representación de la ventana de configuración de parámetros en el software OptiSystem



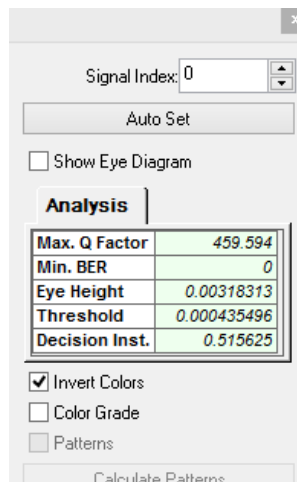
Elaborado por: Autor

3.5.1. Influencia de la distancia del enlace óptico en el rendimiento del factor Q.

Se pudo observar en la Figura 3.11 como el factor de calidad Q está en su valor máximo en la recepción, hecho que también estuvo reflejado en la Figura 3.13 por medio del diagrama de ojo, donde se aprecia que el ojo se encuentra muy abierto, con lo cual puede concluirse que la señal se ha transmitido de forma óptima para un enlace óptico de 1 km.

Figura 3. 11:

Resultado obtenido para la métrica del factor de calidad (factor Q) para un enlace óptico de 1 km

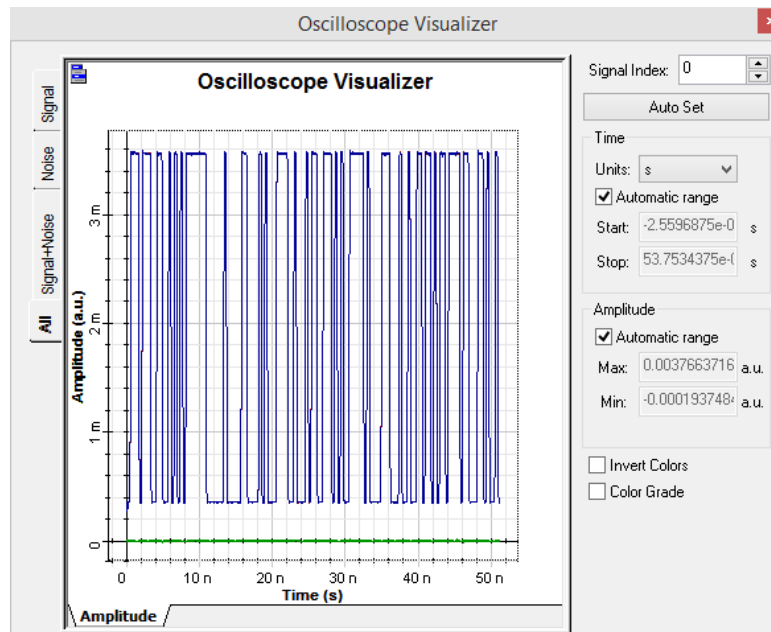


Elaborado por: Autor

Otra forma de medir la calidad de la señal transmitida es por medio del osciloscopio. En la Figura 3.12 se pudo apreciar una gráfica estable y sin distorsiones, lo que implica una alta calidad en la señal.

Figura 3. 12:

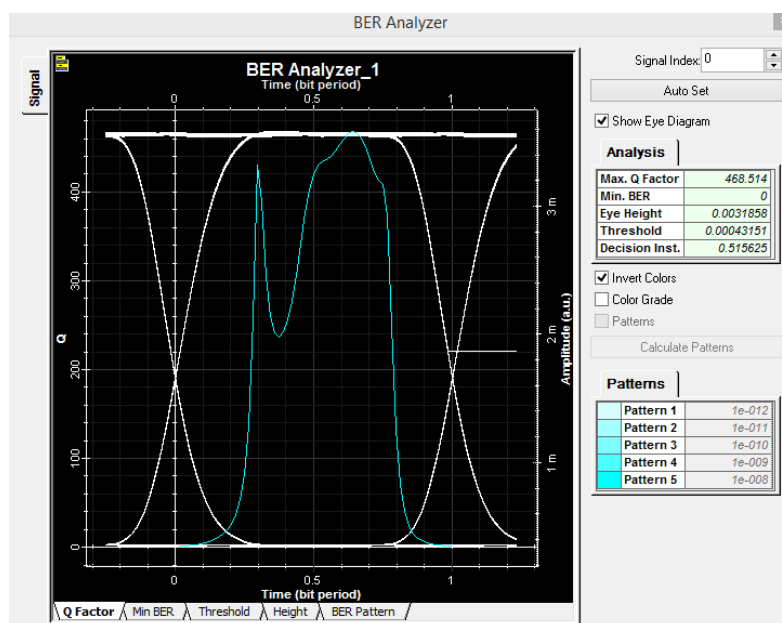
Resultado de la señal del osciloscopio de la red FTTH con distancia de enlace 1 km



Elaborado por: Autor

Figura 3. 13:

Resultado obtenido del diagrama de ojo de la red FTTH con distancia del enlace de 1 km

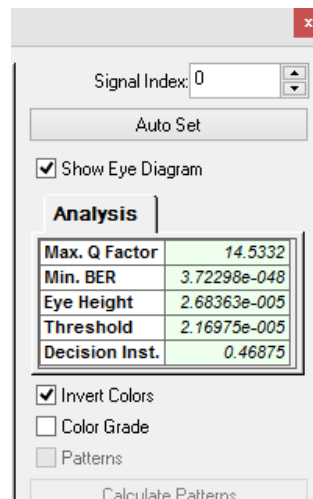


Elaborado por: Autor

Sin embargo, al modificar la distancia del enlace de la fibra de 1 km a 100 km (véase la Figura 3.14) se evidenció una disminución del factor Q, lo que provocó una ligera degradación de la señal cuando se recibió, tal y como se aprecia en el osciloscopio de la Figura 3.15 y en el respectivo diagrama de ojo de la Figura 3.16.

Figura 3. 14:

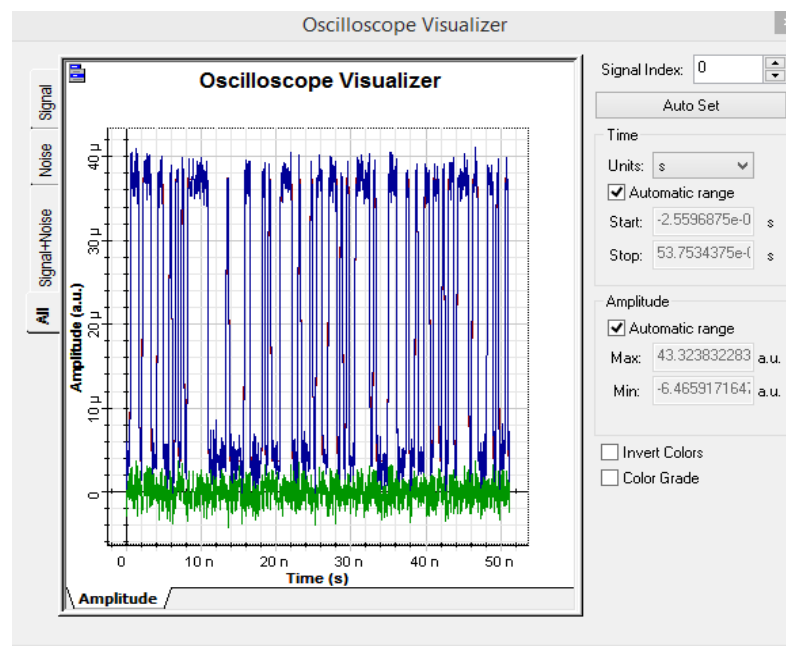
Resultado obtenido para la métrica del factor de calidad (factor Q) para un enlace óptico de 100 km



Elaborado por: Autor

Figura 3. 15:

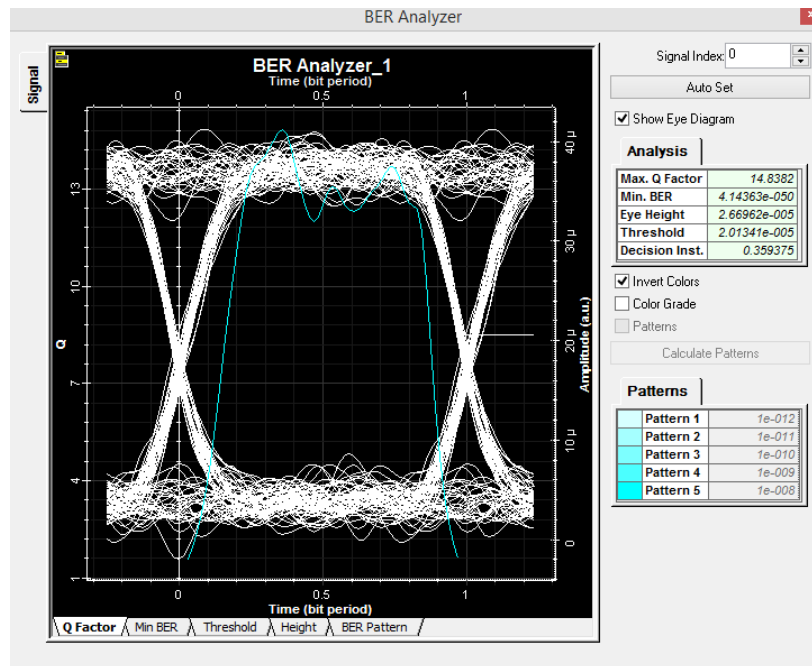
Resultado de la señal del osciloscopio de la red FTTH con distancia de enlace 100 km



Elaborado por: Autor

Figura 3. 16:

Resultado obtenido del diagrama de ojo de la red FTTH con distancia del enlace de 100 km

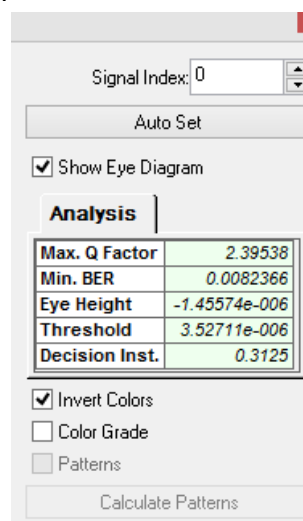


Elaborado por: Autor

En esta ocasión se cambió la longitud de la fibra al máximo de distancia para interpretar la señal de salida. En la Figura 3.17, se simuló el caso de una fibra de 120 km y se puede observar que el factor Q disminuyó notablemente (tiende a aproximarse a cero).

Figura 3. 17:

Resultado obtenido para la métrica del factor de calidad (factor Q) para un enlace óptico de 120 km

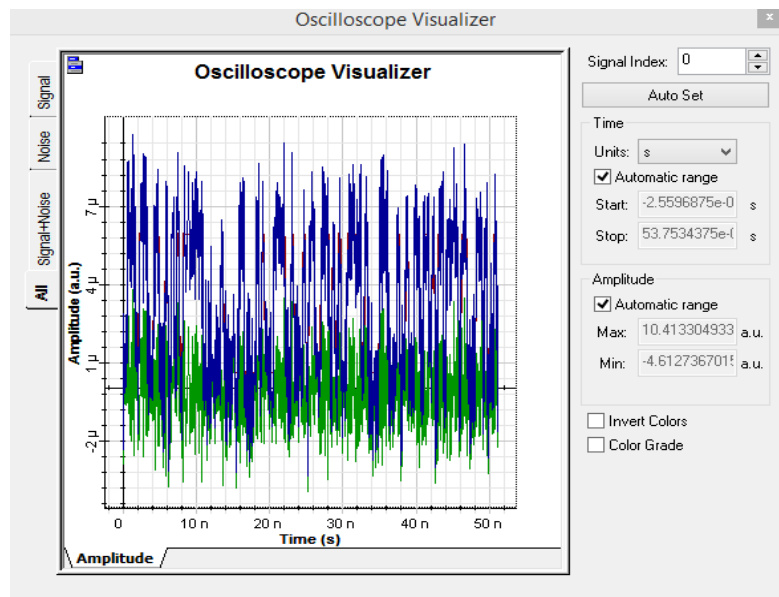


Elaborado por: Autor

En la Figura 3.18 se muestra que la señal estuvo completamente distorsionada (pérdida de señal), y su diagrama de ojo (véase la Figura 3.19) muestra un ojo cerrado, lo que indica una mala transmisión. A cierta distancia, la atenuación y la distorsión hicieron imposible recuperar la señal transmitida.

Figura 3. 18:

Resultado de la señal del osciloscopio de la red FTTH con distancia de enlace 120 km



Elaborado por: Autor

En la Tabla 3.1 se presentó un consolidado de los datos obtenidos de la variación de la distancia con respecto al factor de calidad Q (sin amplificador óptico), según los siguientes parámetros de simulación: velocidad de transmisión de 2.5 Gbps y una atenuación de 0.2 dB/km.

Tabla 3. 1:

Datos obtenidos de la variación entre la distancia y el factor Q sin amplificación

Distancia (km)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Factor Q	208.8	181.8	99.8	72.4	49.5	39.2	37.1	29.7	17.7	14.8	6.9	2.4

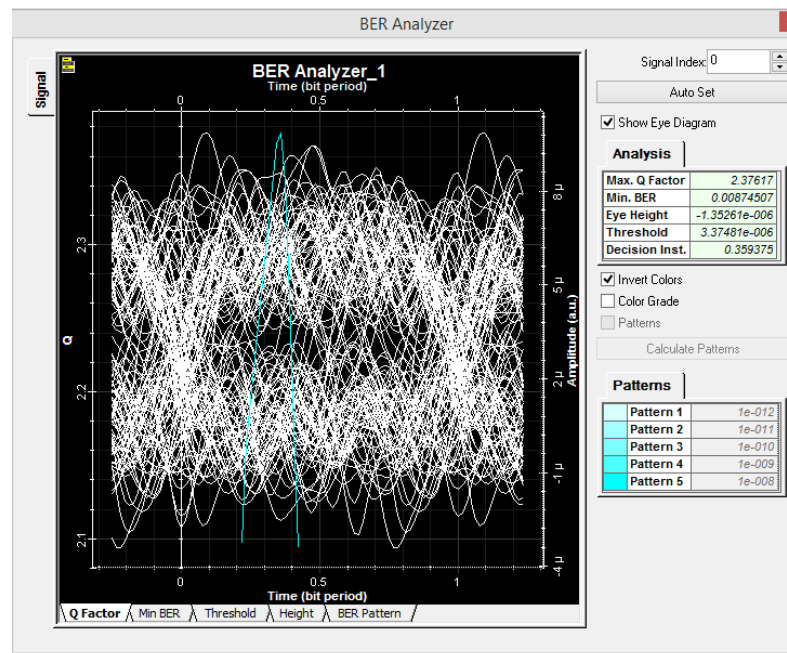
Elaborado por: Autor

Cuando se presentaron distorsiones en la recepción de información (destino), se debió realizar una calibración del lado del receptor que según

con la recomendación (ITU-T O.201, 2003). El objetivo de esta calibración fue eliminar la influencia de las desviaciones del ancho de banda eléctrico con respecto a los valores nominales. La calibración se realizó con un factor $\gamma = 7$, correspondiente a una $BER = 10^{-12}$.

Figura 3. 19:

Resultado obtenido del diagrama de ojo de la red FTTH con distancia del enlace de 120 km

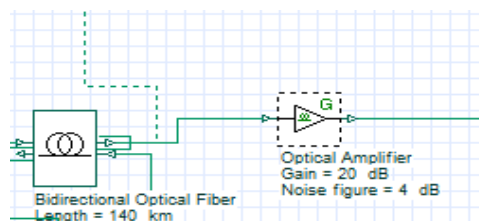


Elaborado por: Autor

En la Figura 3.19 se observó la señal completamente distorsionada para enlaces superiores a 100 km. Con la finalidad que esta señal distorsionada fuera regenerada y recuperada, fue necesario incorporar un amplificador óptico en la zona de salida de la fibra, tal y como se detalla en la Figura 3.20.

Figura 3. 20:

Incorporación de un amplificador óptico posterior a la fibra óptica bidireccional

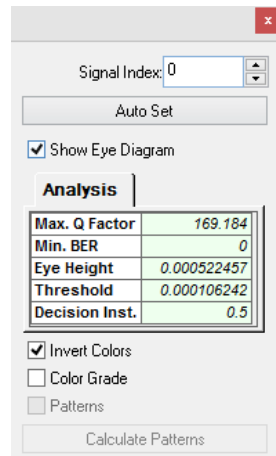


Elaborado por: Autor

Como se observa en la Figura 3.21, en el caso de una fibra de 120 km (señal amplificada) se pudo comprobar que el factor Q presentó un buen valor, y al visualizar la señal en la recepción (véase la Figura 3.22), resultó que la señal no sufrió una distorsión significativa.

Figura 3. 21:

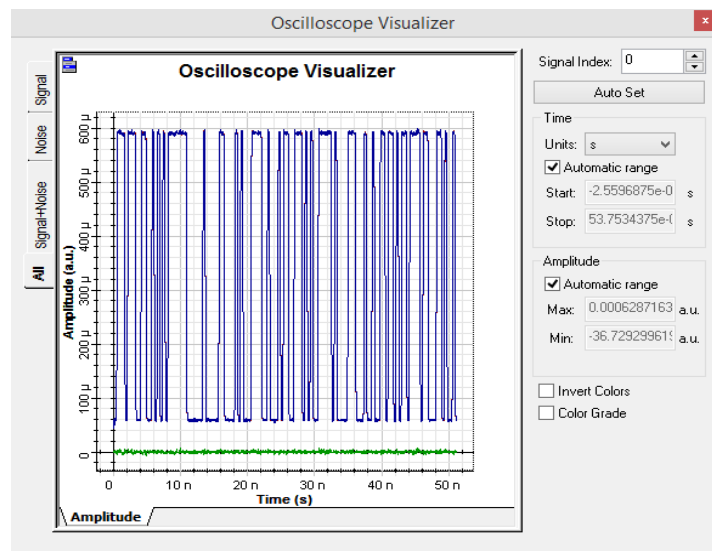
Resultado obtenido para la métrica del factor de calidad (factor Q) para un enlace óptico de 120 km usando amplificador óptico



Elaborado por: Autor

Figura 3. 22:

Resultado de la señal del osciloscopio de la red FTTH con distancia de enlace 120 km usando amplificador óptico



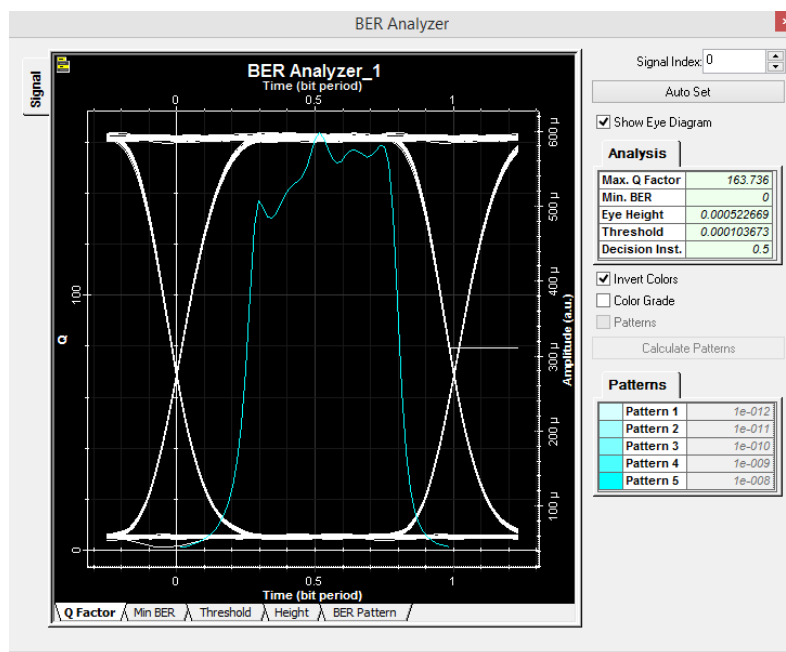
Elaborado por: Autor

La Figura 3.23 muestra un diagrama de ojo abierto y sin fluctuaciones, hecho que confirma con claridad que la señal se ha transmitido correctamente.

El amplificador óptico contribuye a la regeneración de las señales fuertemente atenuadas mediante su amplificación.

Figura 3. 23:

Resultado obtenido del diagrama de ojo de la red FTTH con distancia del enlace de 120 km usando amplificador óptico



Elaborado por: Autor

En la Tabla 3.2 se presentó un consolidado de los datos obtenidos de la variación de la distancia con respecto al factor de calidad Q (con amplificación óptica), según los siguientes parámetros de simulación: velocidad de transmisión de 2.5 Gbps y una atenuación de 0.2 dB/km.

Tabla 3. 2:

Datos obtenidos de la variación entre la distancia y el factor Q con amplificación óptica

Distancia (km)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Factor Q	378.8	344.5	319.3	299.4	283.2	267.1	253.7	233.6	221.7	198.8	185.5	179.4

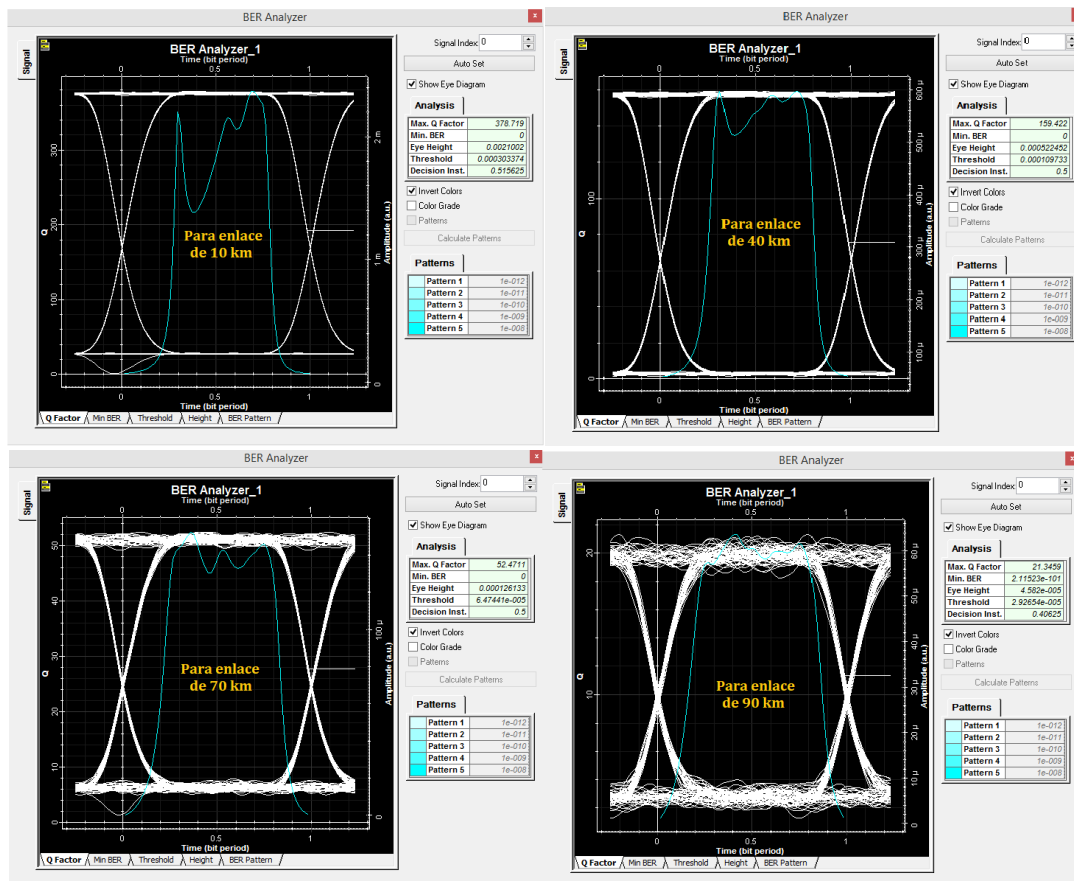
Elaborado por: Autor

A partir de la Tabla 3.2 se determina que conforme se incrementó la distancia del enlace óptico, el factor de calidad (factor Q) disminuyó

progresivamente. De acuerdo con los diagramas mostrados en la Figura 3.24, el diagrama de ojo experimentó una leve degradación causada por el aumento de la distancia (jitter de amplitud). A mayor calidad de transmisión, más se abrió el ojo; y a menor calidad de transmisión, más se cerró el ojo.

Figura 3. 24:

Resultados obtenidos de los diagramas de ojo ante una variación de la distancia del enlace óptico (10, 40, 70 y 90 km)



Elaborado por: Autor

3.5.2. Influencia de la velocidad de transmisión en el rendimiento del factor Q.

Con la finalidad de evaluar la influencia de la tasa de transmisión en el factor Q, se realizó otra simulación basada en los siguientes parámetros: distancia de 50 km y una atenuación de 0.2 dB/km. Los datos obtenidos de la velocidad versus el factor de calidad (factor Q) se detallaron en la Tabla 3.3, donde se evidenció que el factor Q fue casi constante hasta un valor de 2.5 Gbps, a partir del cual disminuyó exponencialmente.

Tabla 3. 3:

Datos obtenidos de la variación entre la velocidad de transmisión y el factor Q

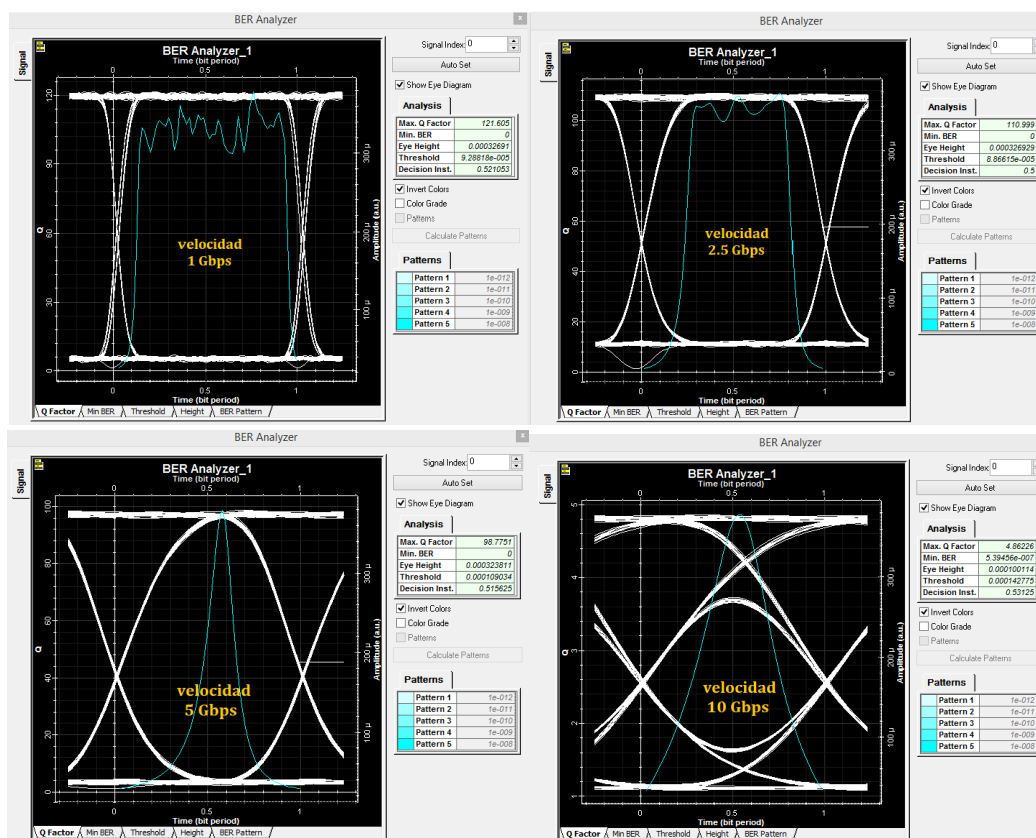
Velocidad (Gbps)	0.5	1.0	2.0	2.5	5	7.5	10
Factor Q	122.6	121.6	114	111	95.7	58.1	4.8

Elaborado por: Autor

En los diagramas de ojo en la Figura 3.25, para velocidades de 1 Gbps a 5 Gbps se notó una buena apertura del ojo y calidad de la señal. Sin embargo, a una velocidad de 10 Gbps se evidenció una señal de mala calidad.

Figura 3. 25:

Resultados obtenidos de los diagramas de ojo ante una variación de la tasa de transmisión (1, 2.5, 5 y 10 Gbps)



Elaborado por: Autor

3.5.3. Influencia de la atenuación de la transmisión en el rendimiento del factor Q.

Los resultados obtenidos de la variación de la atenuación sobre el factor Q se mostraron en la Tabla 3.4. Para este escenario los parámetros de

simulación del sistema propuesto fueron los siguientes: velocidad de transmisión de 2.5 Gbps y una distancia del enlace de 50 km. De acuerdo a la Tabla 3.4, se evidenció que, a mayor atenuación de la señal, mayor será la disminución del factor de calidad Q.

Tabla 3. 4:

Datos obtenidos de la variación entre la atenuación y el factor Q

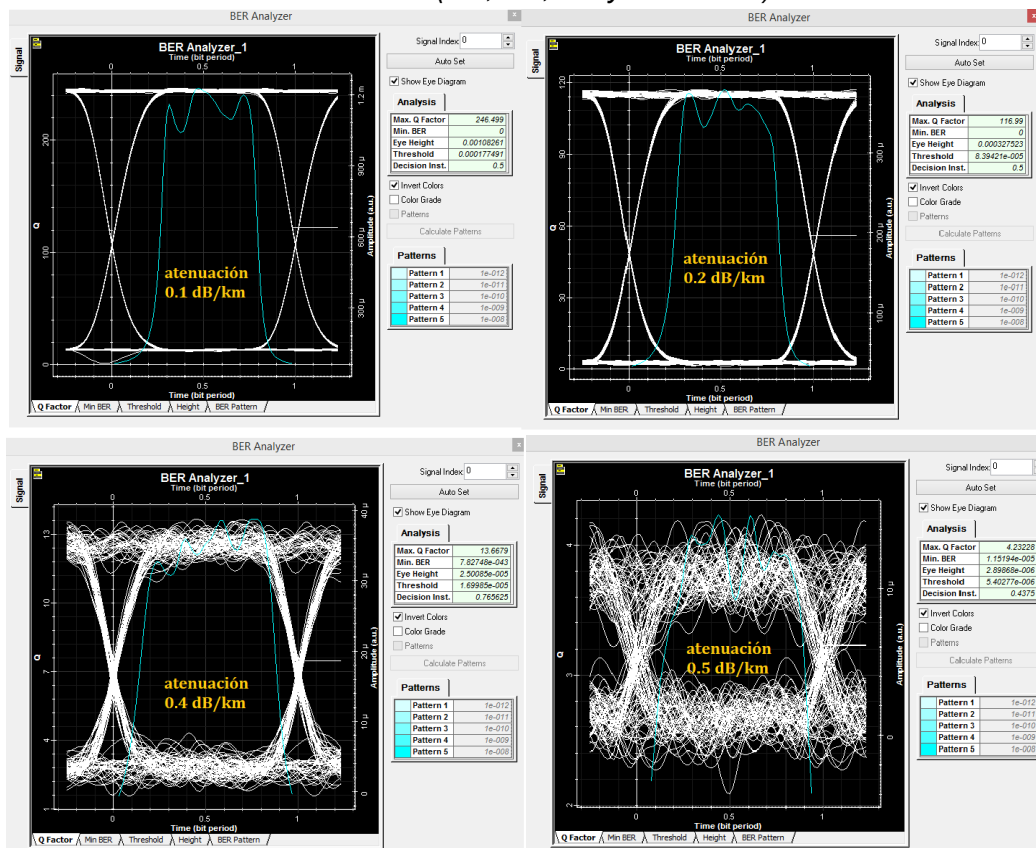
Atenuación (dB/km)	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5
Factor Q	246.5	167.7	117	75.4	43.6	13.6	4.2

Elaborado por: Autor

Según los diagramas de ojo (ver Figura 3.26) se pudo evidenciar que ante el incremento de la atenuación, el ojo tendió a cerrarse y viceversa. En definitiva, el impacto de la atenuación en la transmisión fue considerable, debido a que la señal transmitida en el receptor disminuyó.

Figura 3. 26:

Resultados obtenidos de los diagramas de ojo ante una variación de la atenuación en la transmisión (0.1, 0.2, 0.4 y 0.5 dB/km)



Elaborado por: Autor

3.6. Interpretación final de los resultados obtenidos.

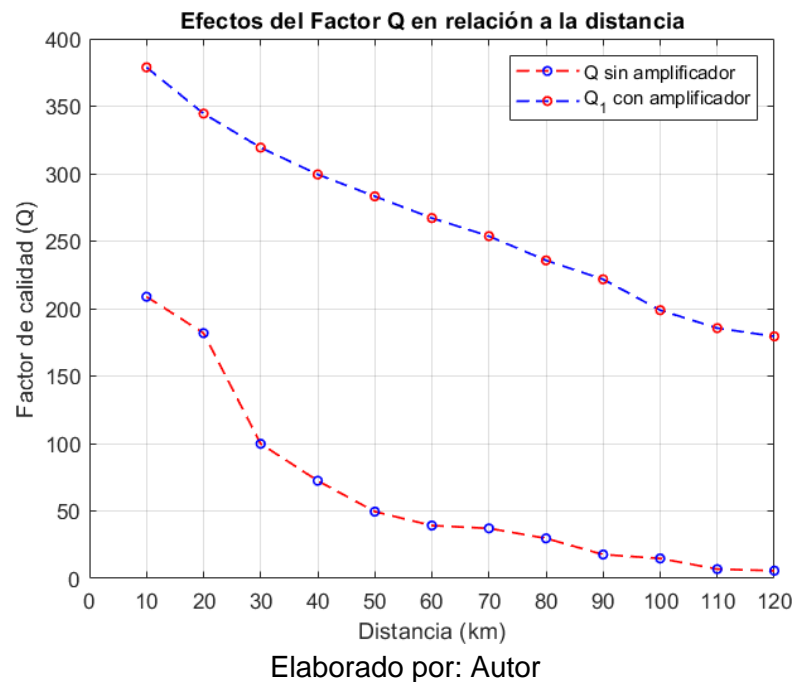
Durante este Capítulo se ha estudiado el rendimiento de transmisión del sistema GPON, basado en WDM (multiplexor por división de longitud de onda), mediante la influencia de parámetros como la longitud de la fibra, la velocidad de enlace y la atenuación intrínseca de la fibra.

La tasa del BER y el factor Q permitieron evaluar la calidad de la transmisión en toda la red óptica, así como en sus enlaces ascendentes y descendentes, respetando los valores utilizados en las infraestructuras ópticas de acuerdo a las recomendaciones y normas vigentes.

A continuación, la Figura 3.27 muestra la comparación del factor Q antes y después de incorporar un amplificador óptico para el escenario donde la distancia del enlace era variable. Se observó que al añadir el amplificador, el factor Q se incrementó notablemente y de forma satisfactoria inclusive a distancias mayores de 100 km.

Figura 3. 27:

Grafica comparativa del factor Q para enlaces ópticos con y sin amplificador óptico



En todos los escenarios simulados fue evidente como la distancia afectó directamente al enlace óptico, por lo que se debió asegurar que la señal no se degrade por debajo de su valor mínimo recomendado. Conforme a la recomendación (ITU-T O.201, 2003), se estableció como valor mínimo un factor $\gamma = 7$ desde su transmisión hasta su recepción.

En base a los resultados de las simulaciones realizadas en este Capítulo para las diferentes arquitecturas GPON-WDM consideradas, se puede establecer que en la instalación de un enlace óptico de muy alta velocidad sería necesario tomar en consideración la tecnología, la arquitectura, la distancia, la atenuación, las longitudes de onda y la tasa de bits.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones.

- Los fundamentos teóricos de los sistemas de comunicaciones ópticos fueron de gran utilidad para poder determinar la funcionalidad de las redes GPON y de la tecnología FTTH, aplicadas a la prestación de múltiples servicios sobre fibra óptica. También se analizaron las distintas partes de una red de acceso FTTH, tales como el OLT, ONU, divisor óptico (splitter) y las diferentes áreas de aplicación.

- El enlace propuesto del sistema GPON-WDM implementado en el software OptiSystem fueron evaluados mediante diferentes escenarios (variando parámetros como la distancia, la velocidad binaria y la atenuación). Los resultados obtenidos evidencian de hecho una buena transmisión a cierta distancia, siendo esta arquitectura capaz de soportar una atenuación máxima de 0.3 dB y una tasa de velocidad que alcanza los 5 Gbps, lo que permite ofrecer resultados interesantes con una buena calidad de transmisión.

- Este estudio confirma las capacidades de las redes ópticas para transmitir gran cantidad de datos manteniendo una buena calidad de transmisión, aunque siempre hay que considerar la relación entre usuarios y velocidad de transmisión, y entre distancias y velocidad de transmisión.

4.2. Recomendaciones.

- Caracterización y análisis comparativo de arquitecturas G-PON y X-GPON utilizando multiplexación WDM.

- Estudio de arquitecturas basadas en multiplexación en tiempo y longitud de onda en la red de acceso para la migración a NG-PON a 40 Gbps.

Referencia

- Booz, I. M. (2018, octubre 22). *Fibre to the Home and Passive Optical Network | FTTH and PON - Latest News on Educational and Technical Era*.
<https://imbooz.com/technical-articles/fibre-to-the-home-and-passive-optical-network-ftth-and-pon/>
- Chan Garcia, A. E. (2020). *Fibra óptica: Evolución, estándares y aplicaciones*. [Trabajo monográfico, Universidad de Quintana Roo].
<http://risisbi.uqroo.mx/handle/20.500.12249/2610>
- Donjuan L., J. C. (2008). *Optimización de dispositivos utilizando ruteadores en una red para su aplicación en sistemas alámbricos e inalámbricos* [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Esfandiari, M. (2006). Reliability evaluation of SBC's <fiber to the node= network. *2006 Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference*, 7 pp.
<https://doi.org/10.1109/OFC.2006.215665>
- Granada-Torres, J. J., Cárdenas-Soto, A. M., & Guerrero-González, N. (2015). Redes ópticas elásticas: Un nuevo paradigma en las futuras redes de telecomunicaciones. *Respuestas*, 20(2), 6.
<https://doi.org/10.22463/0122820X.350>
- ITS. (2019). *Transmisores y receptores ópticos*. Ekselans.
https://www.ek.plus/wp-content/uploads/2019/11/TRANSMISORES_RECEPTORES_O%cc%81PTICOS_ES.pdf
- ITU-T G.656. (2010). *Series G: Transmission systems and media, digital systems and networks. Characteristics of a fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport*. International Telecommunication Union.

- ITU-T O.201. (2003). *Series O: Specifications of measuring equipment. Equipment for the measurement of optical channel parameters. Q-factor test equipment to estimate the transmission performance of optical channels*. International Telecommunication Union.
- Kapoor, A. (2010). *Modeling, Design and Applications of Optical Amplifiers and Long Period Gratings* [PhD Thesis, University of Delhi]. <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.3667.9529>
- Larsen, C. P., Gavler, A., & Wang, K. (2010). Comparison of active and passive optical access networks. *2010 9th Conference of Telecommunication, Media and Internet*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/CTTE.2010.5557694>
- Mazzenga, F., Giuliano, R., & Vatalaro, F. (2017). FttC-Based Fronthaul for 5G Dense/Ultra-Dense Access Network: Performance and Costs in Realistic Scenarios. *Future Internet*, 9(4), 71. <https://doi.org/10.3390/fi9040071>
- Miriampally, V. R. (2016). 2D Optical Fiber Wave Guide Design for Multi Haul Applications. *International Journal of Informatics and Communication Technology (IJ-ICT)*, 5(3), 94. <https://doi.org/10.11591/ijict.v5i3.pp94-105>
- Mondal, P. (2020). *Experimental Investigation of Intermodal Nonlinear Effects in Few-Mode Fibers and Its Application* [PhD Thesis, Unpublished]. <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.31683.02085>
- Pahlavan, K., & Krishnamurthy, P. (2021). Evolution and Impact of Wi-Fi Technology and Applications: A Historical Perspective. *International Journal of Wireless Information Networks*, 28(1), 3–19. <https://doi.org/10.1007/s10776-020-00501-8>
- Parkash, S., Sharma, A., Kumar, M., & Singh, H. (2015). Performance Enhancement of WDM-PON FTTH Network by Using Decision Feedback and Feed forward Equalizations. *International Journal of*

Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, 8(8),99–106. <https://doi.org/10.14257/ijcip.2015.8.8.11>

Rani, K. S. K., Devi, A. R., & Suganthi, J. (2016). Optimization of Disjoints Using WDM-PON in an Optical Network. *Circuits and Systems*, 07(09), 2207–2216. <https://doi.org/10.4236/cs.2016.79192>

Róka, R. (2022). Performance Analysis of Wavelength Division Multiplexing-Based Passive Optical Network Protection Schemes by Means of the Network Availability Evaluator. *Applied Sciences*, 12(15), 7911. <https://doi.org/10.3390/app12157911>

Sharma, D., Payal, & Kumar, S. (2018). Q Factor Based Performance Evaluation of Bidirectional TDM PON Network Using Hybrid Amplifier ConFigurations. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, 6(4), 51–60. <https://doi.org/10.26438/ijcse/v6i4.5160>

Singhal, A., & Singh, C. (2017). Performance Enhancement for Hybrid WDM-TDM Passive Optical Networks. *Indian Journal of Science and Technology*, 10(18), 1–7. <https://doi.org/10.17485/ijst/2017/v10i18/112519>

Straullu, S., Abrate, S., & Gaudino, R. (2015). Self-Coherent Reflective Passive Optical Networks. En Moh. Yasin, H. Arof, & S. W. Harun (Eds.), *Advances in Optical Fiber Technology: Fundamental Optical Phenomena and Applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/58999>

Toala Q., J. R. (2018). *Diseño de un módulo didáctico para el uso básico de la fibra óptica para la asignatura de Telecomunicaciones de la Carrera de Ingeniería en Computación y Redes* [Proyecto de Investigación]. Universidad Estatal del Sur de Manabí.

Toro Mejía, C. A. (2016). *Redes de fibra óptica, más allá de la luz* [Bachelor thesis, Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/100422>

- Wang, Q., Farrell, G., & Yan, W. (2008). Investigation on Single-Mode–Multimode– Single-Mode Fiber Structure. *Journal of Lightwave Technology*, 26(5), 512–519. <https://doi.org/10.1109/JLT.2007.915205>
- Wavelength, E. (2022). Photodiode basics. *Team Wavelength*. <https://www.teamwavelength.com/photodiode-basics/>
- Yu, J., Li, X., & Pang, X. (2020). Broadband radio-over-fiber technologies for next-generation wireless systems. En *Optical Fiber Telecommunications VII* (pp. 979–1038). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816502-7.00030-0>



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, **Zúñiga Guerrero, Iván Gerardo** con C.C: # 092353822-7 autor del Trabajo de Titulación: **Análisis del rendimiento de una red FTTH basada en la arquitectura GPON-WDM utilizando el simulador OptiSystem** previo a la obtención del título de **INGENIERO 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, 15 de febrero del 2023

f. _____

Nombre: Zúñiga Guerrero, Iván Gerardo

C.C: 092353822-7

<i>REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA</i>		
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN		
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Análisis del rendimiento de una red FTTH basada en la arquitectura GPON-WDM utilizando el simulador OptiSystem	
AUTOR(ES)	Zúñiga Guerrero, Iván Gerardo	
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Ing. Medina Moreira, Washington Adolfo	
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil	
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo	
CARRERA:	Ingeniería en Telecomunicaciones	
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero en Telecomunicaciones	
FECHA DE PUBLICACIÓN:	15 de febrero del 2023	No. DE PÁGINAS: 50
ÁREAS TEMÁTICAS:	Sistemas de Comunicaciones, Comunicaciones Ópticas	
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Multiplexación, Redes, Acceso, Fibra, Simulación, Ancho de Banda.	
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):		
<p>Las tecnologías de acceso óptico están experimentando un desarrollo acelerado a la par de Internet y otros servicios de telecomunicación a escala mundial. En el presente documento se estudia la problemática de diseño y planificación de red óptica pasiva de alta capacidad (GPON), también denominada red de acceso. El tema de estudio se denomina <Análisis del rendimiento de una red FTTH basada en la arquitectura GPON-WDM utilizando el simulador OptiSystem=>. La finalidad del presente trabajo es diseñar y simular una red óptica GPON/WDN para analizar su rendimiento con respecto a la distancia de separación entre su nodo de distribución y el destino final. Esta necesidad está motivada por el incremento en la demanda de ancho de banda y las características dinámicas del tráfico actual. Mediante una simulación en tiempo real, se utiliza al software OptiSystem para evaluar el rendimiento de las redes consideradas. El presente trabajo se basa en la técnica WDM (multiplexación por división de longitud de onda), no obstante, existen diversas variantes de esta técnica, en las que los distintos usuarios que transmiten sus datos simultáneamente se multiplexan entre sí. Esta multiplexación entre los distintos usuarios se caracteriza por un espaciado entre los canales, lo que favorece al intercambio de grandes cantidades de información.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
CONTACTO CON AUTOR/ES:	<input checked="" type="checkbox"/> Teléfono: +593 99 927 0084	<input type="checkbox"/> E-mail: izunigag@outlook.com
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE	Nombre: Ing. Celso Bayardo Bohórquez Escobar	
	Teléfono: +593 99 514 7293	
	E-mail: celso.bohorquez@cu.ucsg.edu.ec	
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA		
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):		
Nº. DE CLASIFICACIÓN:		
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):		