



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA
PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Evaluación de la calidad de transmisión en enlaces GPON
bidireccionales en el simulador OptiSystem**

AUTOR:

Sánchez Cevallos, Ricardo Arturo

Componente práctico del examen complejo previo a la
obtención del grado de **INGENIERO EN
TELECOMUNICACIONES**

REVISOR:

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, Ecuador

20 de septiembre del 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente **componente práctico del examen complejo**, fue realizado en su totalidad por **Sánchez Cevallos, Ricardo Arturo** como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

REVISOR



M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

DIRECTOR DE CARRERA



M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 20 días del mes de septiembre del año 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Sánchez Cevallos, Ricardo Arturo**

DECLARÓ QUE:

El **componente práctico del examen complejo, Evaluación de la calidad de transmisión en enlaces GPON bidireccionales en el simulador OptiSystem**, 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 20 días del mes de septiembre del año 2021

EL AUTOR

SÁNCHEZ CEVALLOS, RICARDO ARTURO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, **Sánchez Cevallos, Ricardo Arturo**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del **componente práctico del examen complejo, Evaluación de la calidad de transmisión en enlaces GPON bidireccionales en el simulador OptiSystem** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 20 días del mes de septiembre del año 2021

EL AUTOR

SÁNCHEZ CEVALLOS, RICARDO ARTURO

REPORTE DE URKUND

URKUND Abrir sesión

Documento	Sánchez Ricardo EC A-2021.docx (D112957793)
Presentado	2021-09-19 22:27 (-04:00)
Presentado por	fernandopm23@hotmail.com
Recibido	edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com
Mensaje	Revisión EC Ricardo Sánchez Cevallos Mostrar el mensaje completo 3% de estas 21 páginas, se componen de texto presente en 5 fuentes.

Lista de fuentes	Bloques		
+	Categoría	Enlace/nombre de archivo	-
+		http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/54...	-
+		http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/12...	-
+		http://201.159.223.180/bitstream/3317/15599/1/T...	-
+		http://201.159.223.180/bitstream/3317/11346/1/T...	-
+		http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/12...	-
+		http://201.159.223.180/bitstream/3317/16582/1/T...	-

1 Advertencias. Reiniciar Exportar Compartir

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

Evaluación de la calidad de transmisión en enlaces GPON bidireccionales en el simulador OptiSystem

AUTOR: Sánchez Cevallos, Ricardo Arturo

Componente práctico del examen complejo previo a la obtención del grado de INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

REVISOR: M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, Ecuador 3 de septiembre del 2021

DEDICATORIA

Este componente práctico es dedico con todo mi amor y cariño primero a Dios, segundo a mis padres por su sacrificio y esfuerzo, por darme una carrera para mi futuro y por creer en mí capacidades, aunque momentos difíciles siempre han estado brindándome su comprensión, cariño y amor.

A mi abuelita Martha quien ha sido pieza fundamental en mi vida, en mi formación como persona y me ha visto crecer.

A Camila Palacios por ser mi fuente de motivación e inspiración para poder superarme cada día más y así poder luchar para que la vida nos depare un futuro mejor.

Y por último a la obra el Opus Dei por toda la formación recibida espiritualmente y hacer las cosas correctas.

EL AUTOR

SÁNCHEZ CEVALLOS, RICARDO ARTURO

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil porque me dio la bienvenida al mundo como tal, las oportunidades que me ha brindado son incomparables y como no mencionar aquellos docentes que más que docentes se hicieron amigos como el Ing. Edwin Palacios, él Ing. Carlos Romero, él Ing. Luis Córdova y muchos más que han formado parte de mi desarrollo académico, muchas gracias

EL AUTOR

SÁNCHEZ CEVALLOS, RICARDO ARTURO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 

M. Sc. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESUS
DECANO

f. 

M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO
COORDINADOR DEL ÁREA

f. 

M. Sc. CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO
OPONENTE

Índice General

Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas.....	XIII
Resumen	XIV
Capítulo 1: Descripción General	15
1.1. Introducción.....	15
1.2. Definición del problema.....	16
1.3. Objetivos del Problema de Investigación.	16
1.3.1. Objetivo General.....	16
1.3.2. Objetivos Específicos.	16
Capítulo 2: Estado del arte.	17
2.1. Descripción general de la fibra óptica.	17
2.2. Enlace de transmisión óptica (OTL).	17
2.2.1. Transmisores ópticos.....	18
2.2.2. Diodos emisores de luz.	18
2.2.3. Diodos láser (LD).....	18
2.2.4. Fibra	19
2.2.5. Fibra multimodo frente a monomodo.	20
2.2.6. Atenuación de la fibra.	21
2.2.7. Dispersión.....	21
2.3. Receptores ópticos.....	23
2.3.1. Receptores de PIN.	23
2.3.2. Receptores de fotodiodos de avalancha.....	24
2.4. Modulación óptica.	25
2.4.1. Sistema de modulación electroóptica.	25
2.4.2. Electroóptica – Modulador Mach Zehnder (MZM).....	26
2.5. Amplificadores ópticos.	26

2.6.	Redes ópticas pasivas (PON).	28
2.6.1.	Funcionamiento de una PON.	28
2.6.2.	Terminal de línea (OLT).	29
2.6.3.	Unidad de red (ONU).	29
2.6.4.	Divisores (Splitters).	30
2.6.5.	Descripción del funcionamiento de la red óptica pasiva.	30
2.7.	GPON.	31
Capítulo3: Diseño, Implementación y Análisis de Resultados		33
3.1.	Descripción general del componente práctico.	33
3.2.	Descripción del software del OptiSystem.	33
3.3.	Estudio del enlace GPON.	35
3.3.1.	Descripción del terminal de línea óptica (OLT).	35
3.3.2.	Canal de transmisión.	37
3.3.3.	Descripción de la ONT.	38
3.4.	Criterios y métodos para evaluar la calidad de la transmisión.	39
3.5.	Análisis de los resultados obtenidos de la simulación.	40
3.5.1.	Influencia de la distancia.	40
3.5.2.	Efectos de la variación de la velocidad de datos y el número de usuarios.	43
CONCLUSIONES		49
RECOMENDACIONES.		50
Bibliografía		51

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2. 1: Enlace de transmisión óptica.	18
Figura 2. 2: Estructura de una fibra óptica.	19
Figura 2. 3: PIN Fotodetector.	24
Figura 2. 4: Tipos funcionales de amplificadores ópticos (a) amplificador en línea (b) preamplificador. (c) Booster.	27
Figura 2. 5: Diagrama de una red óptica pasiva.	28
Figura 2. 6: Diagrama de una PON en sentido descendente utilizando TDMA.	32

Capítulo 3

Figura 3. 1: Ventana del área de trabajo del entorno de simulación OptiSystem.	34
Figura 3. 2: Diseño de modulación de amplitud (AM) eléctrica.	34
Figura 3. 3: Diseño del enlace GPON bidireccional.	35
Figura 3. 4: Diagrama de bloques de la parte de Tx y RX de la OLT.	36
Figura 3. 5: Formato del esquema de modulación NRZ.	37
Figura 3. 6: Señal de mensaje y señal modulada AM.	38
Figura 3. 7: Diagrama de bloques de la parte de Tx y RX de la OLT.	38
Figura 3. 8: Representación gráfica del diagrama de ojo.	40
Figura 3. 9: Efectos del Factor Q con relación a la distancia.	41
Figura 3. 10: Efectos de la BER con relación a la distancia.	42
Figura 3. 11: Efectos del factor Q con relación a la distancia para 8 usuarios.	43
Figura 3. 12: Efectos del factor Q con relación a la distancia para 8 usuarios en canales ascendentes y descendentes de GPON.	44
Figura 3. 13: Efectos de la BER con relación a la distancia para 8 usuarios.	44

Figura 3. 14: Efectos del factor Q con relación a la distancia para 16 usuarios.	45
Figura 3. 15: Efectos de la BER con relación a la distancia para 16 usuarios.	46
Figura 3. 16: Efectos del factor Q con relación a la distancia para 32 usuarios.	47
Figura 3. 17: Efectos de la BER con relación a la distancia para 32 usuarios.	47

Índice de Tablas

Capítulo 3

Tabla 3. 1: Efectos del factor de calidad debido a la distancia del enlace. ...	41
Tabla 3. 2: Efectos de la tasa de error de bits debido a la distancia del enlace.	42
Tabla 3. 3: Efectos de la BER debido a la distancia del enlace GPON para 8 usuarios.	45
Tabla 3. 4: Efectos de la BER debido a la distancia del enlace GPON para 16 usuarios.	46
Tabla 3. 5: Efectos de la BER debido a la distancia del enlace GPON para 32 usuarios.	48

Resumen

El presente componente práctico del examen complejo se denomina “Evaluación de la calidad de transmisión en enlaces GPON bidireccionales en el simulador OptiSystem”. En el capítulo 1, se presenta la descripción general del componente práctico. En el capítulo 2, se revisa el estado del arte de las comunicaciones por fibra óptica. En el capítulo 3, se diseña la simulación de la red óptica pasiva Gigabit (GPON) con una fibra bidireccional utilizando el entorno de simulación OptiSystem. En la investigación del enlace GPON bidireccional, se ha estudiado la calidad de la transmisión en función de los siguientes parámetros: la velocidad del enlace, la distancia entre el transmisor y el receptor (OLT y ONU) y el número de usuarios (8, 16 y 32 clientes), y para ello se han utilizado dos criterios para evaluar la calidad de la transmisión: el factor de calidad (Q) y la tasa de error de bits (BER).

Palabras claves: Enlaces, Ascendente, Descendente, OLT, ONU, GPON

Capítulo 1: Descripción General

1.1. Introducción.

Para satisfacer la enorme demanda de ancho de banda y de ofertas de servicios de banda ancha, el servicio FTTH es ahora una tecnología que habrá que poner en marcha, ya que presenta varias ventajas: el diseño de una red FTTH permite alcanzar velocidades muy superiores a las del ADSL. Las tecnologías de redes ópticas pasivas (Passive Optical Network, PON) representan hoy una referencia en las redes de acceso de banda ancha, ya que permiten disponer de una capacidad de transporte muy elevada y minimizar la infraestructura de fibra necesaria.

Las tecnologías de PONs encuentran su mayor despliegue en las redes de acceso debido a sus escasos requisitos en las redes de distribución óptica (Optical Distribution Network, ODN), como las fibras ópticas simples y compartidas entre los clientes y la oficina central (Central Office, CO). Esta técnica utiliza una infraestructura compartida punto a multipunto (P2MP), pero hay que tener en cuenta que una fibra compartida implica algunas limitaciones por parte del cliente, como el ancho de banda compartido, y que la transmisión ascendente debe asegurarse con otro mecanismo de control. Las PONs pueden transmitir señales desde el terminal de línea óptica (Optical Line Terminal, OLT) hasta la(s) unidad(es) de red óptica (Optical Network Unit, ONU) hasta 20 km, pero en algunos casos, esta limitación de distancia debe romperse o ampliarse debido a las extensiones de transmisión de señales en zonas rurales, oficinas remotas, ciudades remotas, etc. (Horvath et al., 2020)

Los actuales despliegues de PON admiten una escalabilidad espacial limitada utilizando la típica óptica de clase C+ de la PON con capacidad de gigabit (GPON), cada conexión de OLTR de la GPON admite 64 abonados a lo largo de 20 km en un único tramo de fibra de alimentación. La mayoría de los PON utilizan la multiplexación por división de tiempo (Time Division Multiplexing, TDM) con un divisor de potencia en el nodo remoto y todos los usuarios comparten el ancho de banda agregado. Aunque se permite un

mayor número de abonados en los estándares PON de mayor velocidad, el presupuesto óptico limita en gran medida la relación de división posible en todos los enlaces, salvo los muy cortos. (Du et al., 2019)

1.2. Definición del problema.

Necesidad de simular la tecnología GPON con una fibra bidireccional utilizando el software OptiSystem con el fin de evaluar la calidad de la transmisión variando algunos parámetros (velocidad, número de usuarios, etc.) que pueden influir en la calidad de la transmisión, lo que nos ha permitido ver el cambio de los criterios a los que nos dirigimos (factor de calidad, BER) durante nuestra simulación.

1.3. Objetivos del Problema de Investigación.

1.3.1. Objetivo General.

Realizar la evaluación de la calidad de transmisión en enlaces GPON bidireccionales en el simulador OptiSystem.

1.3.2. Objetivos Específicos.

- Describir el estado del arte de la comunicación por fibra óptica y sus componentes.
- Estudiar el enlace GPON con fibra monomodo bidireccional en la OLT, canales upstream/downstream y ONT.
- Evaluar los criterios y métodos de rendimiento en el enlace GPON con fibra monomodo bidireccional en el software OptiSystem.

Capítulo 2: Estado del arte.

2.1. Descripción general de la fibra óptica.

La fibra óptica es un medio de transmisión que se utiliza habitualmente en redes de datos, como las redes ópticas pasivas (PON). La fibra óptica puede estar definida por un vidrio o plástico delgado, transparente y flexible, mediante el cual se envían pulsos de luz para representar los datos a transmitir. El haz de luz está completamente contenido y se extiende dentro de la fibra en un ángulo de reflexión por encima del ángulo crítico de reflexión total, de acuerdo con la ley de Snell: (Ruiz Palacios et al., 2018)

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

donde, n_1 y n_2 representan a los índices de refracción del medio de propagación, y θ_1 y θ_2 representan a los ángulos de incidencia y refracción en un hilo de fibra óptica.

La fibra óptica es muy utilizada en telecomunicaciones porque permite enviar grandes cantidades de datos a gran distancia y tener anchos de banda mayores que otras formas de comunicación. Es un medio de transmisión que proporciona una alta inmunidad a las interferencias electromagnéticas y las señales viajan a lo largo de ellos sin grandes pérdidas. Esta forma de transmisión permite el transporte de una gran cantidad de información. Se utiliza para aplicaciones como Internet de banda ancha, teléfono y televisión por cable. Este capítulo destaca la literatura citada sobre el enlace de transmisión óptica con más detalles sobre fibra óptica, transmisor óptico, modulación óptica, receptor y amplificador óptico y cubre sobre la red óptica pasiva.

2.2. Enlace de transmisión óptica (OTL).

Un enlace de transmisión óptica se basa en una señal digital que es transmitida a través de una fibra óptica (véase la figura 2.1). El enlace óptico está conformado por un transmisor, un receptor y un amplificador de fibra óptica (cada una de ellas se describen en las siguientes subsecciones).

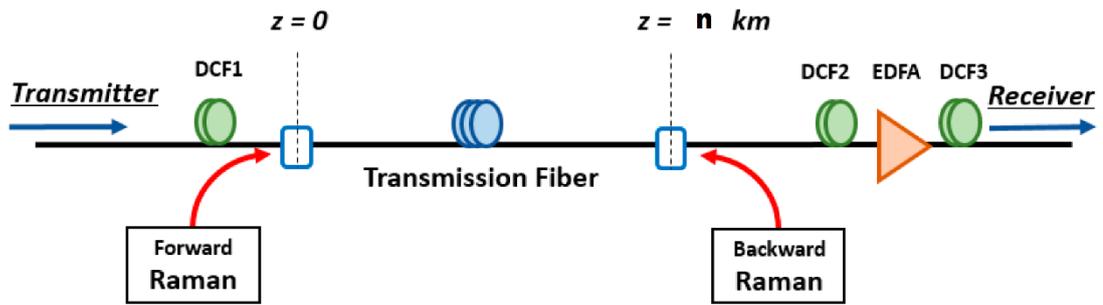


Figura 2. 1: Enlace de transmisión óptica.
Fuente: (Syuaib et al., 2019)

2.2.1. Transmisores ópticos.

Un transmisor óptico convierte una señal eléctrica en una señal óptica y es conducida a través de una fibra óptica. En las redes de comunicaciones ópticas, el transmisor óptico ideal es aquel que emite una luz de alta calidad. Esto se puede definir por tener un ancho espectral estrecho, alta estabilidad, bajo consumo de energía y una longitud de onda central sintonizable. Las fuentes de luz más comunes que se encuentran en los sistemas de comunicación de fibra óptica son los diodos emisores de luz (Light Emitting Diode, LED) y los diodos láser (Laser Diode, LD). Ambos son pequeños dispositivos semiconductores que convierten señales eléctricas en señales de luz.

2.2.2. Diodos emisores de luz.

Los LEDs emiten señales de luz por emisión espontánea y se utilizan ampliamente en sistemas de comunicación por fibra óptica debido a su pequeño tamaño, larga vida útil y bajo costo (Diaz & Zuany, s/f). Se encuentran principalmente en redes de corta distancia y ancho de banda bajo, como la red de área local (Local Area Network, LAN), ya que sus capacidades de transmisión están limitadas por su baja intensidad de salida, un enfoque deficiente del haz y una radiación incoherente.

2.2.3. Diodos láser (LD).

En comparación con los LED, los láseres emiten luz mediante la amplificación de la radiación mediante emisión estimulada. Los láseres tienen una potencia de salida más alta que los LED y, por lo tanto, son

capaces de transmitir información a distancias más largas. Además, los láseres tienen un ancho espectral mucho más estrecho y pueden proporcionar comunicación de alto ancho de banda a largas distancias, por lo que son una excelente fuente de luz para enlaces de fibra óptica de largo alcance.

2.2.4. Fibra

La fibra óptica es una guía de ondas dieléctrica que opera a frecuencias ópticas y transmite información en forma de luz a lo largo de su eje, como se muestra en la Figura 2.2. Tiene un núcleo central en el que se guía la luz, incrustado en un revestimiento exterior de índice de refracción ligeramente inferior. El núcleo y el revestimiento están protegidos por un amortiguador y una cubierta exterior donde el núcleo tiene el índice de refracción más alto. La fibra óptica tiene dos regiones de baja atenuación [12]. La región de 1300 nm es un rango de 200 nm y su atenuación es menor a 0.5dB / km, tiene un BW total de aproximadamente 25 THz. La segunda región centrada en 1550 nm con atenuación es inferior a 0,2 dB / km. La combinación de estas dos regiones proporciona un ancho de banda teórico de 50 THz. Al utilizar estas grandes áreas de baja atenuación para la transmisión de datos, la pérdida de señal para un conjunto de uno o más, las longitudes de onda se pueden hacer muy pequeñas. De esta forma, se reduce el número de amplificadores y repetidores realmente necesarios.

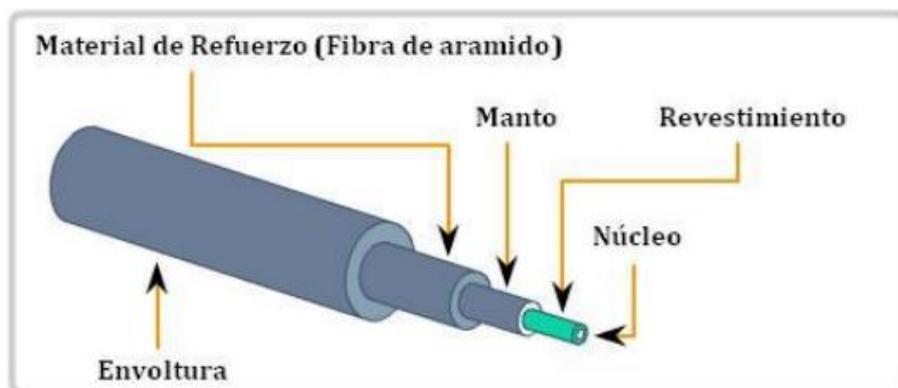


Figura 2. 2: Estructura de una fibra óptica.
Fuente: (Cevallos et al., 2021)

En los experimentos de larga distancia, las señales ópticas se pueden enviar a cientos de kilómetros sin amplificación. Además del gran ancho de

banda y la baja atenuación, Fiber ofrece bajas tasas de error. Los sistemas de comunicación que utilizan fibra óptica suelen funcionar con una BER inferior a 10^{-10} . Al instalar redes locales en edificios, el pequeño radio de la fibra hace que ocupe el mismo espacio físico que el cobre. Además, la transmisión por fibra tiene una alta inmunidad a las interferencias electromagnéticas y no causa interferencias. Existen principalmente dos tipos de fibra óptica: la primera, la denominada fibra de índice escalonado y la segunda, la fibra de índice graduado.

2.2.5. Fibra multimodo frente a monomodo.

Un modo en una fibra óptica corresponde a una de las múltiples formas posibles en las que una onda puede propagarse a través de la fibra. También puede verse como una onda estacionaria en el plano transversal de la fibra. Más formalmente, un modo corresponde a una solución de la ecuación de onda que se deriva de las ecuaciones de Maxwell y está sujeta a las condiciones de contorno impuestas por la guía de ondas de fibra óptica. Si más de un modo se propaga a través de una fibra, la fibra se denomina multimodo. En general, un diámetro de núcleo más grande o una frecuencia de operación alta permite que se propague un mayor número de modos.

La ventaja de la fibra multimodo es que el diámetro de su núcleo es relativamente grande; como resultado, la inyección de luz en la fibra con baja pérdida de acoplamiento se puede lograr mediante el uso de fuentes de luz económicas de gran superficie, como diodos emisores de luz (LED). La desventaja de la fibra multimodo es que introduce el fenómeno de la intermodal dispersión. En la fibra multimodo, cada modo se propaga a una velocidad diferente debido a diferentes ángulos de incidencia en el límite del revestimiento del núcleo. Este efecto hace que diferentes rayos de luz de la misma fuente lleguen al otro extremo de la fibra en diferentes momentos, lo que da como resultado un pulso que se extiende en el dominio del tiempo. La dispersión intermodal aumenta con la distancia de propagación, por lo que limita la tasa de bits de la señal transmitida y la distancia que la señal puede viajar (Lora, s/f).

Por lo tanto, en las redes RoF, la fibra multimodo no se utiliza tanto como sea posible, en cambio, la fibra monomodo se usa ampliamente. La fibra monomodo permite solo un modo y generalmente tiene un tamaño de núcleo de aproximadamente 10 μm , mientras que la fibra multimodo generalmente tiene un tamaño de núcleo de 50-100 μm . Elimina la dispersión intermodal y, por lo tanto, puede soportar la transmisión en distancias mucho más largas. Sin embargo, introduce el problema de concentrar suficiente energía en un núcleo muy pequeño. Los LED no pueden acoplar suficiente luz en una fibra monomodo para facilitar las comunicaciones de larga distancia. Un láser semiconductor puede proporcionar una concentración tan alta de energía luminosa, que puede generar un haz de luz estrecho.

2.2.6. Atenuación de la fibra.

La atenuación es la pérdida de potencia óptica de una señal a medida que viaja por una fibra. La atenuación depende de la longitud de onda de la luz que se propaga dentro de ella y se mide en decibelios por longitud (dB/m, dB/km). Las características de atenuación se pueden clasificar como intrínsecas o extrínsecas. La atenuación intrínseca se produce debido a sustancias inherentemente presentes en la fibra, mientras que la atenuación extrínseca se produce debido a influencias externas como la flexión o la pérdida de conexión.

2.2.7. Dispersión.

La salida de una fuente de comunicaciones ópticas (LED o LÁSER) no es una sola longitud de onda, sino una distribución de longitudes de onda. Estos diversos componentes de longitud de onda se propagan a lo largo de la fibra a diferentes velocidades y llegan al receptor en diferentes momentos, lo que hace que el pulso se extienda o se disperse. Este se caracteriza por el parámetro de dispersión.

La dispersión se mide en picosegundos de ensanchamiento de pulso por nanómetro del ancho espectral de la señal por kilómetro de la longitud del camino, es decir, ps / nm.km. Cuando un pulso se propaga al grado en

que se superpone con un pulso adyacente, causa problemas de detección en el receptor que resultan en errores en la transmisión. Esto se llama interferencia entre símbolos.

(ISI) o patrones. La dispersión es un factor limitante en el ancho de banda de la fibra, ya que cuanto más cortos son los pulsos, menor es el tiempo posible entre pulsos, más susceptibles son a la formación de patrones.

Hay tres tipos de dispersión que se encuentran en las comunicaciones de fibra óptica: dispersión cromática, intermodal y en modo de polarización. La dispersión cromática ocurre en todo tipo de fibras; La dispersión intermodal solo ocurre en fibras multimodo y la dispersión por modo de polarización solo es significativa en fibras monomodo. La dispersión intermodal se produce cuando múltiples modos de la misma señal se propagan a diferentes velocidades a lo largo de la fibra. La dispersión intermodal no ocurre en una fibra monomodo.

Otra forma de dispersión es material o dispersión cromática. En un medio dispersivo, el índice de refracción es función de la longitud de onda. Por lo tanto, si la señal transmitida consta de más de una longitud de onda, ciertas longitudes de onda se propagarán más rápido que otras longitudes de onda. Dado que ningún láser puede crear una señal que consista en una única longitud de onda exacta, la dispersión cromática ocurrirá en la mayoría de los sistemas.

El tercer tipo de dispersión que se encuentra en las fibras se llama dispersión por modo de polarización (PMD). El modo fundamental que viaja en una fibra monomodo tiene dos componentes de polarización. Idealmente, estos dos estados transportan la mitad de la potencia total cada uno y cuando la fibra es simétrica, la PMD no es un problema en la transmisión de la señal. La PMD se produce cuando la sección transversal de la fibra no es simétrica, es decir, los índices de refracción a lo largo de los ejes x e y de la fibra no son iguales, lo que conduce a la ampliación de la señal óptica. Esto ocurre generalmente durante los procesos de cableado de fibra y de

especiado de fibra. En las primeras fibras instaladas, se encontró que PMD limitaba severamente la distancia de propagación a altas velocidades de bits. La investigación sobre PMD continúa, ya que existe una gran cantidad de fibra estándar instalada que tiene un valor de PMD comparativamente grande, lo que es un problema potencial a altas velocidades de bits.

2.3. Receptores ópticos.

Un receptor o detector óptico es un dispositivo electroóptico que acepta señales ópticas y las convierte en señales eléctricas. Un receptor óptico ideal en un sistema de comunicaciones ópticas tendrá alta sensibilidad, gran ancho de banda, sensibilidad a baja temperatura, bajo consumo de energía e independencia de polarización. Los receptores ópticos más comunes que se encuentran en los sistemas de comunicación de fibra óptica son fotodiodos intrínsecos (PIN) y receptores de fotodiodos de avalancha (APD). Ambos son dispositivos semiconductores muy sensibles que convierten pulsos de luz en señales eléctricas.

2.3.1. Receptores de PIN.

Un fotodiodo PIN positivo-intrínseco-negativo consiste en una región de agotamiento intrínseca (sin dopar) gruesa intercalada entre regiones dopadas positivas y negativas, como se muestra en la Figura 2.3. El material de las capas p y n se elige de modo que no haya absorción de los fotones incidentes en estas capas. Generalmente se opera aplicando un voltaje de polarización inversa, típicamente menos de unos pocos voltios. La mayoría de los fotones incidentes entrarán en la capa intrínseca gruesa y producirán pares de agujeros de electrones que generarán una fotocorriente. Esta fotocorriente es directamente proporcional a la potencia óptica absorbida.

Una corriente conocida como corriente oscura todavía es producida por la corriente de fuga que fluye cuando se aplica la polarización inversa sin ninguna luz incidente sobre el fotodiodo. La corriente oscura depende de la temperatura y aumentará a medida que aumenta la temperatura del dispositivo. El fotodiodo PIN permite lograr altos anchos de banda y capacidad de respuesta simultáneamente (Islam et al., 2019). Los fotodiodos

PIN son los receptores más comúnmente empleados en los sistemas de comunicación de fibra óptica debido a su facilidad de fabricación, alta confiabilidad, bajo ruido, bajo voltaje y ancho de banda relativamente alto.

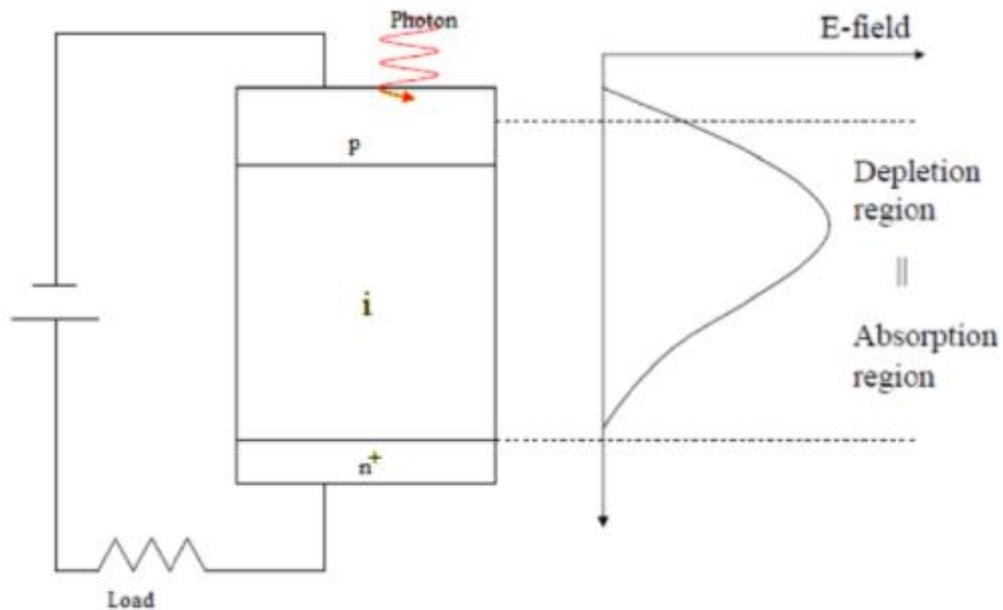


Figura 2. 3: PIN Fotodetector.
Fuente: (Islam et al., 2019)

2.3.2. Receptores de fotodiodos de avalancha.

Un fotodiodo de avalancha (APD) es un fotodiodo que amplifica internamente la fotocorriente mediante un proceso de avalancha, lo que lo convierte en un receptor más sensible que un fotodiodo PIN. Cuanto más sensible sea el receptor, más largo puede ser el enlace de comunicaciones con las pérdidas dadas. El APD tiene una mayor sensibilidad al amplificar internamente la fotocorriente sin introducir el ruido asociado con los circuitos electrónicos externos.

Se aplica una polarización inversa a la región activa que hace que los electrones generados por los fotones incidentes se aceleren. La ganancia aumenta a medida que aumenta el voltaje de polarización inversa para acercarse al voltaje de ruptura. Sin embargo, en las proximidades del voltaje de ruptura, una gran corriente fluye a través del APD que fácilmente puede causarle daños permanentes. El alto sesgo también aumenta los niveles de ruido y limita la ganancia útil del APD.

Un APD tiene mayor ganancia y ancho de banda que un PIN, pero requiere que se aplique un voltaje mucho mayor en la región activa. Este requisito de mayor potencia reduce la capacidad de miniaturización de una unidad receptora y limita las posibilidades de integración en los sistemas de comunicación.

2.4. Modulación óptica.

Para transmitir datos a través de una fibra óptica, la información primero debe codificarse o modularse en la señal láser. Las técnicas analógicas incluyen modulación de amplitud (AM), modulación de frecuencia (FM) y modulación de fase (PM). Las técnicas digitales incluyen modulación por desplazamiento de amplitud (ASK), modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) y modulación por desplazamiento de fase (PSK). De todas estas técnicas, ASK binario es actualmente el método preferido de modulación digital debido a su simplicidad. En ASK binario, también conocido como codificación on-off (OOK), la señal cambia entre dos niveles de potencia. El nivel de potencia más bajo representa un bit 0, mientras que el nivel de potencia más alto representa un bit de 1.

En los sistemas que emplean OOK, la modulación de la señal se puede lograr simplemente encendiendo y apagando el láser (modulación directa). Sin embargo, en general, esto puede provocar un chirrido o variaciones en la amplitud y frecuencia del láser cuando se enciende el láser. Un enfoque preferido para altas tasas de bits es tener un modulador externo que modula la luz que sale del láser. Con este fin, el interferómetro de Mach Zehnder se utiliza ampliamente.

2.4.1. Sistema de modulación electroóptica.

Hay dos métodos principales para modular la luz en los sistemas de telecomunicaciones: modulación directa y externa. La modulación directa se refiere a la modulación de la fuente, es decir, encender y apagar un láser para crear pulsos, mientras que la modulación externa usa un dispositivo separado para modular la luz. La modulación externa se ha convertido en el método dominante para los sistemas de telecomunicaciones de larga

distancia de alta velocidad. Los moduladores externos se pueden implementar utilizando una variedad de materiales y arquitecturas.

2.4.2. Electroóptica – Modulador Mach Zehnder (MZM).

El MZM electroóptico se ha convertido en un dispositivo omnipresente para los sistemas de comunicación óptica de alta velocidad. Se utiliza habitualmente como modulador de intensidad para sistemas típicos que hacen uso de los formatos de modulación sin retorno a cero (NRZ) o retorno a cero (RZ), y recientemente ha demostrado su potencial para la modulación de fase en sistemas futuros haciendo uso del Formato DPSK. Dichos moduladores están hechos de un cristal electroóptico (típicamente niobato de litio, LiNbO₃), cuyo índice de refracción depende del campo eléctrico, por lo tanto, del voltaje que se le aplica. Por tanto, los datos eléctricos pueden modular el índice de refracción del cristal, de ahí la fase de la onda de luz entrante. La incorporación del cristal en una estructura interferométrica (interferómetro Mach-Zehnder) convierte a su vez la modulación de fase en modulación de intensidad (Aguilera Arreaga, 2018).

Aunque el principio de tal modulador es bastante simple, su funcionamiento puede presentar muchos grados de libertad y las compensaciones resultantes. Una tarea particular será establecer relaciones entre la relación de extinción (definida como la relación de la potencia transmitida a un '1' y '0' binario) de la señal óptica modulada y su chirrido de frecuencia, dependiendo del mecanismo de generación del chirp (óptico o desequilibrio eléctrico del MZM).

2.5. Amplificadores ópticos.

La atenuación reduce la potencia óptica de la señal a medida que viaja a través de la fibra. Por tanto, los amplificadores ópticos son de gran ayuda para aumentar la capacidad de distancia de transmisión de un sistema de comunicación al tiempo que permiten que la señal cumpla con los requisitos de sensibilidad del receptor óptico. Los amplificadores ópticos se clasifican en términos de su función de la siguiente manera.

Hay tres tipos básicos de amplificador con respecto a su función: boosters, amplificadores en línea y preamplificadores como se puede ver en la Figura 2.4. Tenga en cuenta que, en la figura, TX se refiere al transmisor, mientras que RX se refiere al receptor. En el amplificador, el amplificador de potencia se coloca inmediatamente después del transmisor. El amplificador eleva la potencia de una señal óptica a su potencia máxima, lo que sirve para aumentar la distancia de transmisión en 10-100 km dependiendo de la ganancia del amplificador y la pérdida de fibra. Un amplificador en línea o un amplificador de rango medio funciona con una señal en el medio de un enlace de fibra óptica y se utiliza para compensar las pérdidas de potencia causadas por la atenuación de la fibra. Un preamplificador aumenta una señal inmediatamente antes de que llegue al receptor, por lo que generalmente funciona con una señal de entrada débil, ya que se encuentra al final de la línea de transmisión. Buena sensibilidad, alta ganancia y bajo ruido son requisitos clave para un buen preamplificador.

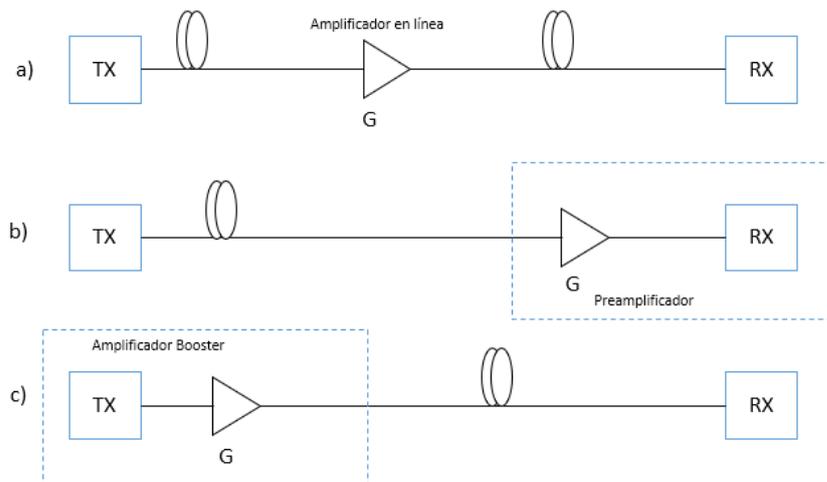


Figura 2. 4: Tipos funcionales de amplificadores ópticos (a) amplificador en línea (b) preamplificador. (c) Booster.

Fuente: Autor

Actualmente se utilizan tres clases principales de amplificadores ópticos: amplificadores ópticos de semiconductores (SOA), amplificadores de fibra óptica (FOA) y Raman. Esta sección detallará los FOA "EDFA". Un amplificador de fibra óptica es una pieza de fibra especial empalmada con una fibra de transmisión y conectada a una bomba láser. Ambos tipos de amplificadores funcionan según el principio de emisión estimulada. Los

amplificadores de fibra, específicamente los amplificadores de fibra dopados con erbio (EDFA), se utilizan ampliamente en las redes de telecomunicaciones. Los EDFA operan solo en la ventana de 1550nm mientras que las SOA pueden funcionar en ventanas de comunicaciones de 1300nm o 1550nm.

2.6. Redes ópticas pasivas (PON).

Una PON es una red que, por su naturaleza, proporciona una variedad de servicios de banda ancha a los usuarios a través del acceso de fibra óptica. PON permite eliminar todos los componentes activos entre el servidor y el cliente introduciendo componentes ópticos pasivos para guiar el tráfico a través de la red. Su elemento principal es el divisor óptico. La red óptica pasiva es una arquitectura de red óptica de punto a multipunto. Como puede verse en la Figura 2.5. Pasando de la red al usuario, se puede decir que la arquitectura PON consta del siguiente equipo: un OLT en la oficina central del proveedor de servicios y varias ONU o Terminales de Red Óptica (ONT) cerca de los usuarios finales.

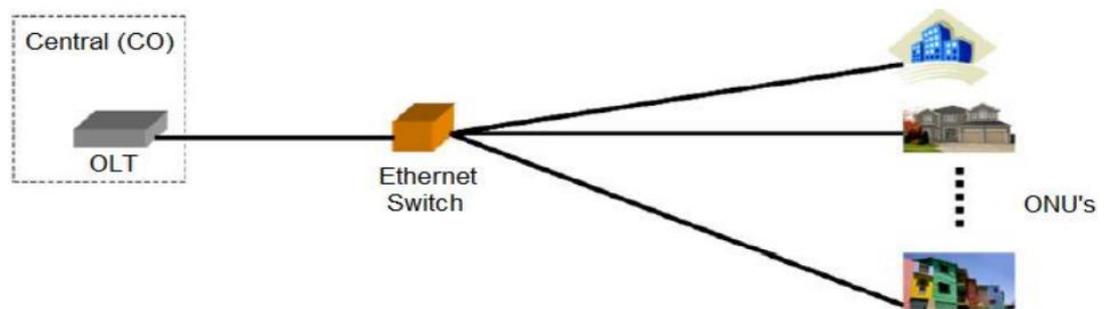


Figura 2. 5: Diagrama de una red óptica pasiva.
Fuente: (Freire Castellanos, 2020)

2.6.1. Funcionamiento de una PON.

Como se ha descrito en el apartado anterior en términos generales, una red óptica pasiva siempre funciona en transmisión entre la OLT y las distintas ONU a través de divisores ópticos, que multiplexan o demultiplexan señales en función de su origen y destino. Por tanto, aparecen tres dispositivos distintos en la red: la OLT, la ONU y el divisor, cada uno de los cuales tiene una función necesaria y prioritaria en la red óptica pasiva. A

continuación, se detallan la función y características generales de cada uno de ellos.

2.6.2. Terminal de línea (OLT).

La OLT está ubicada en una oficina central y controla el flujo bidireccional de información a través de la ODN. Una OLT debe poder soportar distancias de transmisión a través de la ODN de hasta 20 km (actualmente podría ser más con EDFA). En la dirección descendente, la función de una OLT es recibir el tráfico de voz, datos y video de una red de largo alcance y transmitirlo a todos los módulos ONU en la ODN. En sentido inverso (upstream), OLT acepta y distribuye todo el tráfico de los usuarios de la red [23]. La transmisión simultánea de tipos de servicios separados en la misma fibra en la ODN se habilita utilizando diferentes longitudes de onda para cada dirección. Para las transmisiones descendentes, una PON utiliza una longitud de onda de 1490 nm para el tráfico combinado de voz y datos y una longitud de onda de 1550 nm para la distribución de video. El tráfico ascendente de voz y datos utiliza una longitud de onda de 1310 nm. También se requiere una medición de potencia óptica en la OLT para garantizar que se entregue suficiente potencia a las ONU. Esto debe hacerse durante la activación inicial porque no se puede repetir sin interrumpir el servicio para toda la red una vez que la red se ha conectado. Finalmente, tenga en cuenta que la OLT no emite la misma salida de luz en todas las ONU de manera justa, sino que depende de la distancia a la que se encuentren de la planta. Por lo tanto, un usuario cercano a la central necesita menos energía, mientras que un usuario remoto necesitará una energía mayor.

2.6.3. Unidad de red (ONU).

La ONU se coloca como el vecindario de abonados para terminar la transmisión de fibra óptica y convertir las señales en eléctricas a través de una línea metálica a los abonados. Las señales se adaptarán al tráfico de usuarios a través de Network Terminal (NT). En el extremo de alto rendimiento, una ONU puede agregar, preparar y transportar varios tipos de tráfico de información proveniente del sitio del usuario y enviarlo en sentido

ascendente a través de una infraestructura PON de fibra única. El término preparación significa que el equipo de conmutación mira dentro de un flujo de datos multiplexado por división de tiempo, identifica los destinos de los canales multiplexados individuales y luego reorganiza los canales para que puedan entregarse eficientemente a sus destinos.

2.6.4. Divisores (Splitters).

Los splitters son divisores de potencia pasivos que permiten la comunicación entre el OLT y sus respectivos ONT que sirven. Sin embargo, no solo están dedicados a señales multiplexadas o demultiplexadas, sino que también combinan potencia: son dispositivos de distribución óptica bidireccionales con una entrada y múltiples salidas:

- La señal que ingresa desde el puerto de entrada (enlace descendente), procede del OLT y se divide entre múltiples puertos de salida.
- Las señales que ingresan por las salidas (uplink), provienen de la ONU y se combinan en la entrada sin energía externa, reduciendo su costo de implementación, operación y mantenimiento. Simplemente introducen pérdida de potencia óptica en las señales de comunicación, que son inherentes a la naturaleza.

2.6.5. Descripción del funcionamiento de la red óptica pasiva.

Una vez detallados todos los elementos que componen una PON, es necesario conocer cómo funciona el sistema global y el comportamiento de la red con todos los elementos interconectados, desde la OLT de cabecera hacia los usuarios de la ONU, y viceversa. Lo más importante a destacar en el funcionamiento genérico de la red es la existencia de dos canales, uno ascendente y otro descendente. Sin embargo, ambos generalmente funcionan a través del mismo cable físico, por lo que se asignan diferentes longitudes de onda a cada canal de transmisión y, dependiendo del tráfico, coexisten en la misma fibra al menos 3 longitudes de onda diferentes: una para el flujo de video en el canal ascendente y dos para datos. flujo de enlace ascendente y enlace descendente respectivamente. A continuación, se van a analizar con más detalle ambos canales de transmisión:

A. Canal descendente

El canal descendente es la dirección de la información del operador OLT a la ONU ubicada en el usuario final. En esta red, la PON se comporta como una red de puntos multipunto. El OLT incluye una gran cantidad de tramas de voz y datos adicionales que van hacia PON, a través del terminal de línea óptica de paquetes (POLT) y el terminal de línea óptica de video (VOLT). Los fotogramas recogidos por estos equipos se transforman en señales que se inyectan en las diferentes ramas de los usuarios. Estos ramales están formados por una o dos fibras que transportan señales bi o unidireccionales, y se acoplan pasivamente mediante divisores ópticos que permiten la unión de todas las ONT de la red, sin regeneración intermedia de señales (evitando elementos activos).

B. Canal ascendente

El canal ascendente es la dirección de la información del usuario final de la ONU al operador OLT. En esta red, el PON se comporta como un punto a punto. Cada ONU incluye las tramas agregadas de voz y datos (de cada usuario) que se dirigen hacia la OLT. En este punto, la ONU realiza la misma operación que la OLT en el canal descendente, es decir, convierte las tramas en señales de inyección a través de fibra óptica que han sido dedicadas al usuario.

2.7. GPON.

La búsqueda de compatibilidad entre equipos de diferentes fabricantes ha llevado a la creación de estándares PON. Dos organismos de normalización han estado activos en el área de acceso. Por un lado, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) con la ayuda del grupo Full Service Access Network (FSAN) ha creado los estándares BPON (Broadband PON) y GPON (Gigabit PON). Por otro lado, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) y en particular el grupo Ethernet en el grupo First Mile (EFM) es responsable de los estándares EPON (Ethernet PON). GPON es el estándar más avanzado en el que se sigue trabajando, es el que nace de la evolución del BPON. Todos los estándares anteriores se consideran en las mejoras que ofrece GPON. Por lo tanto,

GPON funciona bien con los cambios en las tecnologías de la comunicación. En general, las mejoras incluyen aumentar el ancho de banda en transmisión y brindar seguridad a la propia red por nivel de protocolo (Seminario Imán, 2021).

El estándar Gigabit PON se define en la recomendación G.984.1 (2003). El sector de estandarización de telecomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-T) estandarizó G.984 o PON con capacidad Gigabit (GPON) en 2003 con revisiones en 2008. Los sistemas GPON están formados por una OLT y múltiples ONU u ONT que se interconectan con una ODN. Por tanto, existe una relación de uno a varios entre la OLT y las ONU / ONT, respectivamente. GPON admite varias velocidades de bits en ambos canales, como combinaciones asimétricas o simétricas, desde 155 Mb/s a 2,5 Gb/s.

La multiplexación por división de tiempo (TDM) se utiliza en sentido descendente y el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) se implementa en sentido ascendente, como puede verse en la Figura 2.6. Su cobertura física máxima es de hasta 20 km y su alcance lógico puede ser de hasta 60 km. Existe una compensación entre la longitud de la PON y su capacidad de división, con un máximo de 128 ONU por OLT; sin embargo, hoy en día es común una relación de división de 32.

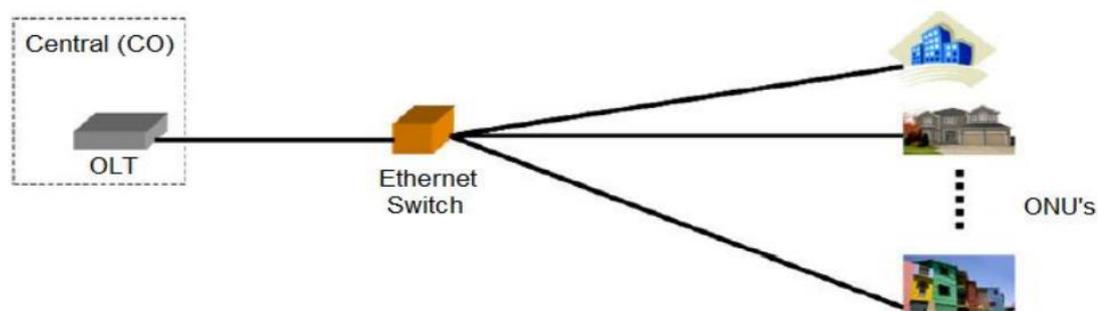


Figura 2. 6: Diagrama de una PON en sentido descendente utilizando TDMA.
Fuente: (Seminario Imán, 2021)

Capítulo3: Diseño, Implementación y Análisis de Resultados

3.1. Descripción general del componente práctico.

En este capítulo se estudia un enlace G-PON bidireccional utilizando el software "OptiSystem". Este software nos permite simular y analizar los enlaces ópticos y optimizar la calidad de la transmisión. Se expondrán los resultados obtenidos con la arquitectura punto a multipunto en GPON. Esto se hará variando los parámetros del enlace, como la velocidad de datos, la distancia entre el emisor y el receptor... etc. El objetivo es analizar los resultados obtenidos, para medir la calidad de la transmisión optimizando el rendimiento del enlace.

3.2. Descripción del software del OptiSystem.

OptiSystem es un software desarrollado por la empresa canadiense OPTIWAVE. Permite a los investigadores y científicos modelar y simular sistemas ópticos. Dispone de un potente entorno de simulación con componentes del sistema donde se puede analizar y estudiar la simulación. Para ello, se utiliza un simulador de sistemas para facilitar la tarea. En este caso, se trata de un enlace de una red óptica pasiva Gigabit (GPON) bidireccional compuesto por una terminación de línea óptica (OLT) y una terminación de red óptica (ONT). El enlace podrá alcanzar velocidades de datos de hasta 2.5 Gbps manteniendo una buena calidad de transmisión.

OptiSystem es una aplicación de Windows, que consiste esencialmente en una ventana principal que se divide en varias partes:

- Editor de esquemas o planos (layout): permite editar y configurar los planos que se está diseñando.
- Vista general del proyecto: permite la vista en miniatura del plano que se está editando.
- Biblioteca: consiste en una base de datos de varios componentes existentes en la librería de OptiSystem.

En la figura 3.1 se muestra las subventanas del software OptiSystem.

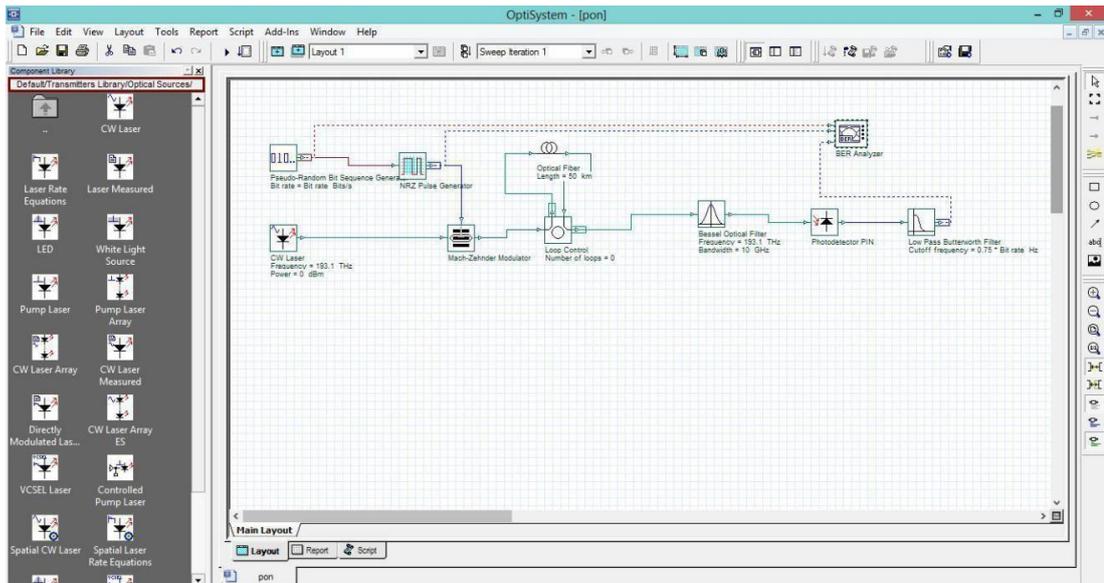


Figura 3. 1: Ventana del área de trabajo del entorno de simulación OptiSystem.
Elaborado por: Autor.

Para seleccionar un componente, basta con arrastrarlo con el cursor desde la biblioteca hasta el plano para colocarlo. Se pueden ajustar los parámetros de simulación del componente en cuestión haciendo doble clic sobre él, y aparecerá una ventana para modificar los parámetros (véase la figura 3.2). En la figura 3.2 se observa como cambiar los parámetros del diodo como la frecuencia, la potencia, etc.

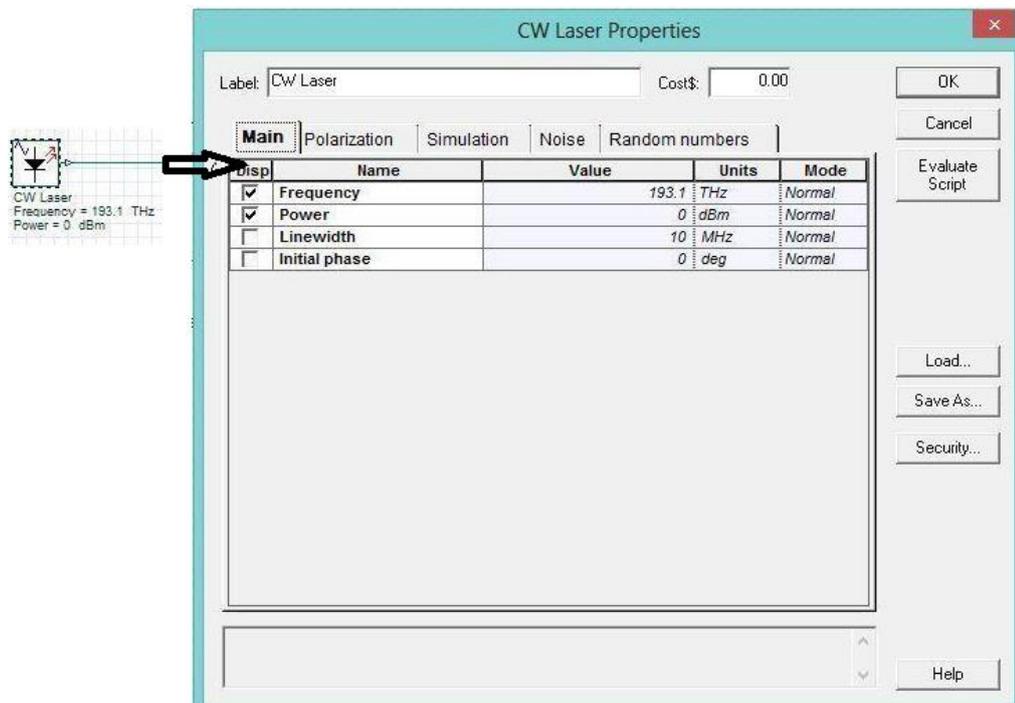


Figura 3. 2: Diseño de modulación de amplitud (AM) eléctrica
Elaborado por: Autor.

3.3. Estudio del enlace GPON.

En la figura 3.3 se muestran los diferentes componentes utilizados en la simulación. El sistema se divide en tres partes principales:

- OLT (Terminal de Línea Óptica)
- ONT (Terminación de Red Óptica)
- Divisor óptico (Splitter)
- Enlace ascendente (los datos van de la ONU a la OLT).
- Enlace descendente (los datos van de la OLT a la ONU).

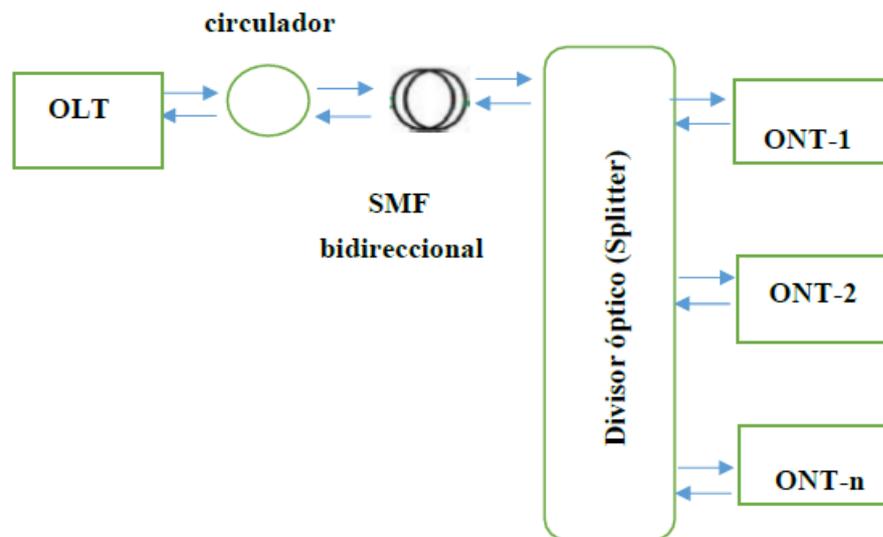


Figura 3. 3: Diseño del enlace GPON bidireccional.
Elaborado por: Autor.

3.3.1. Descripción del terminal de línea óptica (OLT).

Para la parte de transmisión de la OLT, contiene un transmisor que utiliza la multiplexación por división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing, WDM). La OLT tiene los siguientes parámetros:

- Longitud de onda 1550 nm;
- Potencia de transmisión -3 dBm.
- Velocidad de datos 622 Mbps.
- Modulación de no retorno a cero (NRZ).

En la parte del sistema de transmisión GPON de la OLT hay una parte de recepción que proviene de la ONT. Este último contiene componentes ópticos, tales como el filtro de Bessel y un fotodiodo o fotodetector PIN. En esta sección se presenta la dirección del enlace descendente (downstream)

del sistema GPON bidireccional propuesto, tal como se muestra en la figura 3.4.

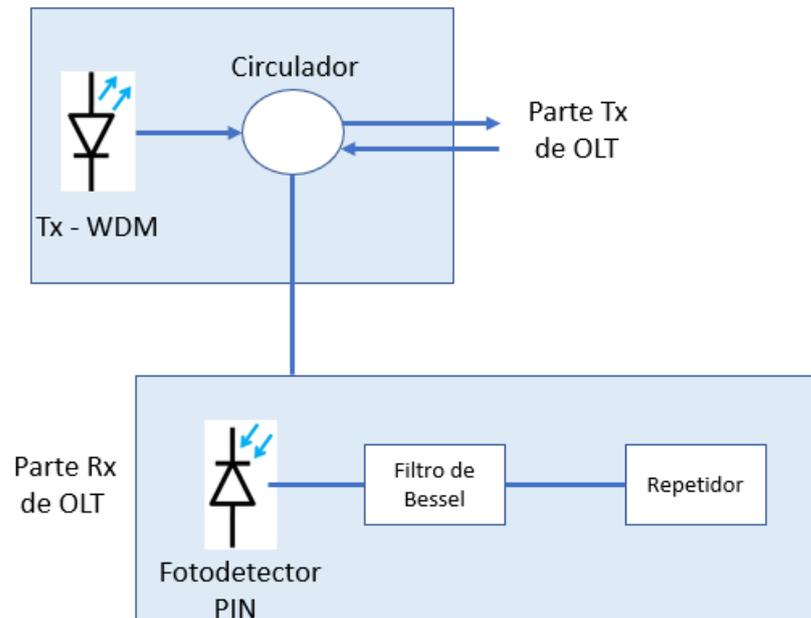


Figura 3. 4: Diagrama de bloques de la parte de Tx y RX de la OLT.
Elaborado por: Autor.

A continuación, se describe cada elemento:

1. Circulador óptico:

Los circuladores ópticos son dispositivos de tres puertos que pueden integrarse en una carcasa con conectores integrados y modulares. Un circulador de fibra óptica ofrece un excelente rendimiento con un alto aislamiento y pérdidas de inserción muy bajas. Los circuladores de fibra óptica de IDIL se utilizan ampliamente en operaciones unidireccionales para muchas aplicaciones, como sistemas de transmisión bidireccional, sistemas de multiplexación de división de longitud de onda densa (DWDM), soluciones de multiplexación por adición y sistemas de detección. Los circuladores ópticos redirigen las señales a longitudes de onda de 780 nm, 1064 nm, 1310 nm, 1550 nm, 1610 nm. Aunque, son posibles otras longitudes de onda y personalizadas. En el sistema GPON propuesto se utiliza para transportar la señal óptica en una sola dirección (ascendente o descendente).

2. Filtro de Bessel:

El filtro de Bessel es un filtro polinómico cuya principal característica es ofrecer un retardo de ancho de banda constante. En concreto, esto significa

que todas las frecuencias puras, dentro de la banda, la atraviesan exactamente al mismo tiempo. Por tanto, el filtro de Bessel minimiza la distorsión que sufre una señal compleja durante una operación de filtrado. La característica del filtro está optimizada para la fase, lo que permite un desplazamiento de fase lineal para las frecuencias dentro de la banda de paso. Para el sistema GPON propuesto, el filtro se utiliza con una frecuencia de corte de 0.75 Hz, lo que minimiza la distorsión de la señal óptica.

3. Modulación de no retorno a cero (NRZ):

El formato NRZ (véase la figura 3.5) es muy utilizado en este tipo de enlaces ópticos. El bit "1" está asociado a un impulso óptico de duración igual al tiempo de símbolo, mientras que el bit "0" corresponde a la ausencia de la señal. Este formato se utiliza ampliamente en sistemas WDM y para velocidades de datos inferiores a 10 Gbps.

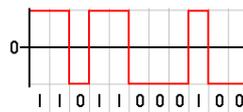


Figura 3. 5: Formato del esquema de modulación NRZ.
Elaborado por: Autor.

4. Repetidores:

El repetidor es un dispositivo electrónico que combina un receptor y un transmisor y que compensa las pérdidas de transmisión en una fibra óptica amplificando y posiblemente procesando la señal, sin cambiar su contenido. En telecomunicaciones, un repetidor es un canal de modulación utilizado en las transmisiones de radio, televisión y datos digitales que transporta las señales utilizadas en otras frecuencias de transmisión. En el sistema GPON propuesto, la señal óptica viaja a través de sistemas que pueden tener una longitud de hasta varios cientos de kilómetros, por lo que se insertan repetidores para garantizar que la señal no se debilite o distorsione.

3.3.2. Canal de transmisión.

El canal de transmisión es una fibra óptica bidireccional de distancia variable. En este caso la fibra óptica tiene una atenuación de 0.24dB/km, la dispersión es 16.75 ps/nm/km, y la pendiente de dispersión es de 0.075

ps/nm²/km. La figura 3.6 muestra el bloque de fibra bidireccional disponible en la librería de OptiSystem.

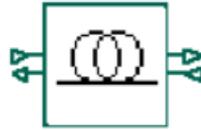


Figura 3. 6: Señal de mensaje y señal modulada AM
Elaborado por: Autor.

3.3.3. Descripción de la ONT.

En una estructura de fibra hasta el hogar (FTTH) cada abonado está representado por una ONU (Unidad de Red Óptica). Cada ONU se compone de una parte transmisora y otra receptora. Para la parte de recepción de la ONU hay componentes como el fotodiodo y el filtro de Bessel. Cada uno de ellos está conectado a un repetidor que realiza las funciones de regeneración. En este caso, la ONT tiene los siguientes parámetros:

- Potencia del transmisor: -3 dBm.
- Velocidad de datos: 622 Mbps.
- Longitud de onda: 1300 nm.
- Tipo de modulación NRZ.

La figura 3.7 se presenta la parte de transmisión y recepción en la ONT.

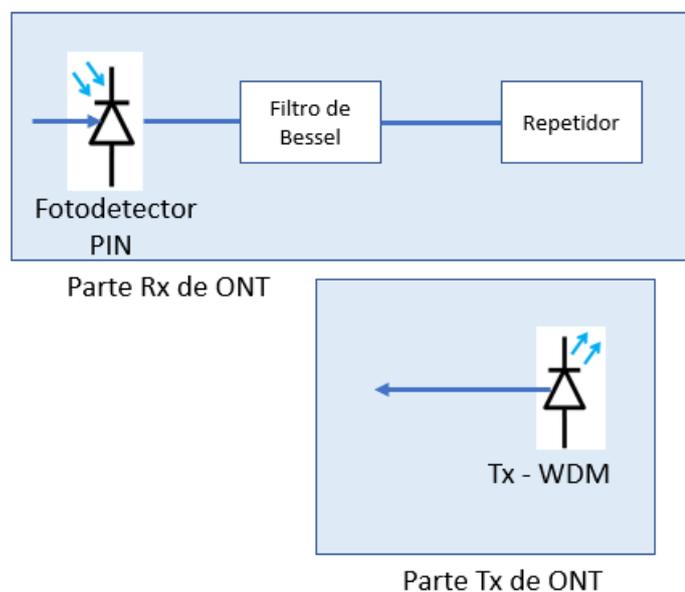


Figura 3. 7: Diagrama de bloques de la parte de Tx y RX de la OLT.
Elaborado por: Autor.

3.4. Criterios y métodos para evaluar la calidad de la transmisión.

Para definir la calidad de una transmisión óptica, existen diferentes criterios. Los tres principales criterios de calidad de una señal transmitida son el diagrama de ojos, la tasa de error de bits BER y el factor de calidad Q. Estos tres criterios se describen a continuación:

1. El factor de calidad Q.

El factor de calidad (Q), es un parámetro que permite cuantificar y evaluar la señal sin tener que contar directamente los errores dados por:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\delta_1 - \delta_0}$$

Donde I_1 e I_0 son los valores medios de las fotocorrientes del símbolo 1 y 0, δ_1 y δ_0 son las raíces cuadradas de las varianzas de las densidades de probabilidad de los símbolos 1 y 0. La medición experimental del factor Q de una señal es difícil, es decir, no se puede medir directamente I_1 , I_0 , δ_1 y δ_0 . Para resolver este problema, se puede utilizar la relación de la tasa de error de bits BER en función del factor de calidad Q siempre que la distribución de potencia de los símbolos sea gaussiana:

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

siendo "erf" la función de error complementaria.

2. La tasa de error de bits:

Dado que, en los sistemas de transmisión, los datos se transmiten de forma digital, es decir, una secuencia de datos binarios, y para evaluar la calidad de la transmisión digital binaria, es necesario comparar la secuencia de símbolos enviados con la secuencia de símbolos recibidos y calcular el número de bits erróneos, es decir, el número de veces que se detecta un "0" para un símbolo "1" transmitido o viceversa. La tasa de error de bits (BER) se define como el número de bits erróneos entre el número de bits transmitidos.

$$BER = \frac{N_{BE}}{N_{BT}}$$

En general, se considera que un sistema es de buena calidad en las telecomunicaciones ópticas si su tasa de error binario es inferior a 10^{-9} o incluso inferior a 10^{-12} según el sistema de comunicación utilizado.

3. Diagrama de ojo:

El diagrama de ojo es la forma más "visual" de juzgar la calidad de una señal, formada por la superposición de todos los símbolos binarios de la señal transmitida. Cuanto mejor sea la calidad de la señal, más abierto será el diagrama de ojo, mayor será el factor de calidad (Q) y, por tanto, más fácil será detectar la señal sin errores. El diagrama de ojo es, por tanto, un excelente medio visual para juzgar la calidad de la señal dentro de los límites de la respuesta del fotodiodo y del osciloscopio utilizado. La figura 3.8 muestra la forma que tiene el diagrama de ojo.

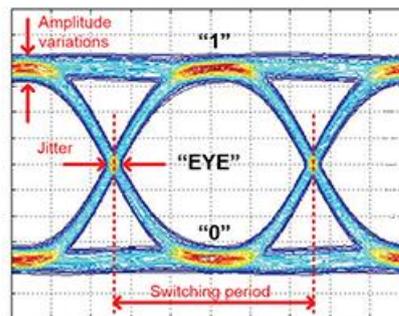


Figura 3. 8: Representación gráfica del diagrama de ojo.
Elaborado por: Autor.

3.5. Análisis de los resultados obtenidos de la simulación.

3.5.1. Influencia de la distancia.

La distancia de funcionamiento influye en la calidad de la transmisión debido al fenómeno de la dispersión y la atenuación, para comprobarlo se variará la longitud de la fibra de 15 a 45 km fijando la tasa de transmisión en 622 Mbps, la potencia de transmisión en 3 dBm, y la longitud de onda en 1550 nm y se observará como varía la BER y el factor de calidad (Q). La tabla 3.1 muestra el cambio en el factor de calidad a medida que se varía la distancia entre el transmisor y el receptor.

Tabla 3. 1: Efectos del factor de calidad debido a la distancia del enlace.

Distancia (km) entre Tx y Rx	Factor de calidad (Q)
15.0	10.5
17.5	9.5
20.0	8.5
22.5	8.0
25.0	7.5
27.5	6.75
30.0	6.0
32.5	5.25
35.0	4.5
37.5	4.25
40.0	4.0
42.5	3.75
45.0	3.5

Elaborado por: Autor.

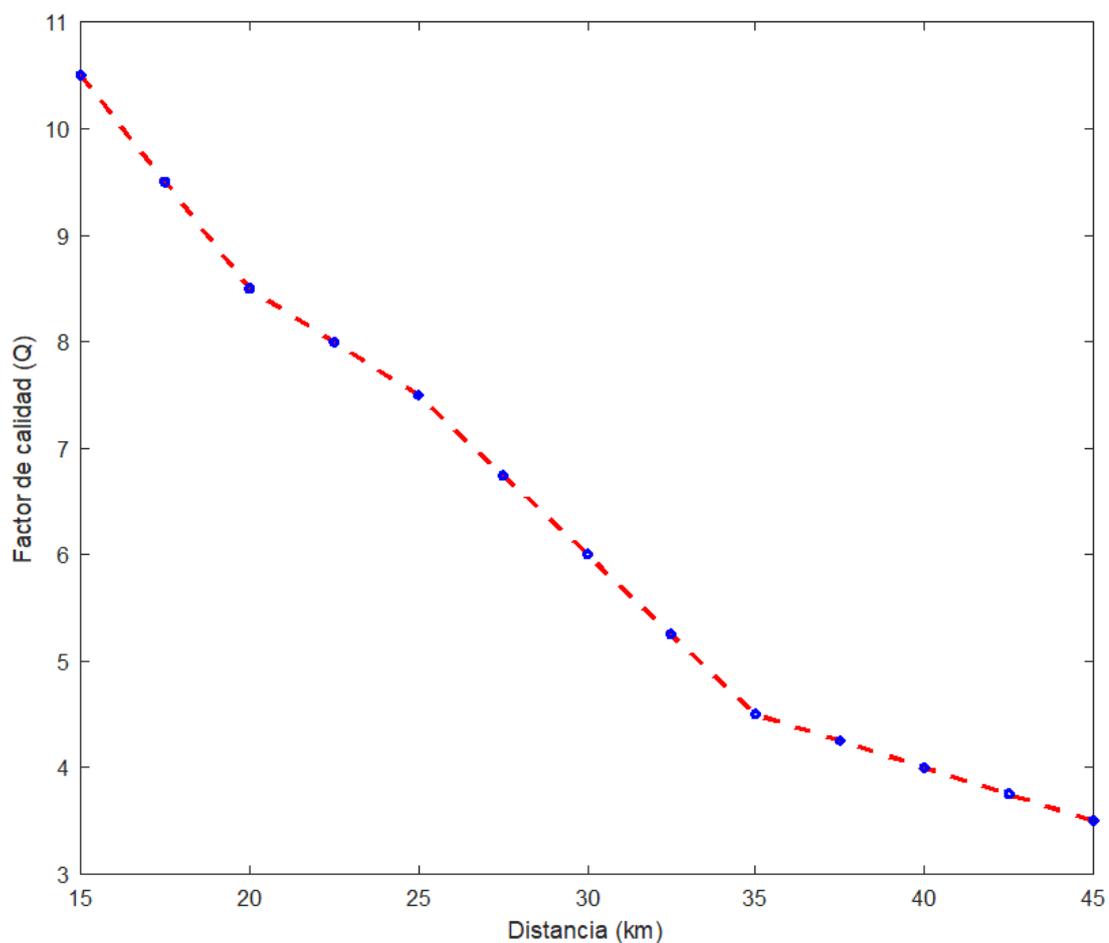


Figura 3. 9: Efectos del Factor Q con relación a la distancia.

Elaborado por: Autor.

La tabla 3.2 muestra el cambio en la tasa de error de bits (BER) en función de la distancia entre el transmisor y el receptor.

Tabla 3. 2: Efectos de la tasa de error de bits debido a la distancia del enlace.

Distancia (km) entre Tx y Rx	Tasa de error de bits
15.0	10^{-12}
17.5	10^{-11}
20.0	10^{-11}
22.5	10^{-11}
25.0	10^{-11}
27.5	10^{-10}
30.0	10^{-9}
32.5	10^{-8}
35.0	10^{-6}
37.5	10^{-5}
40.0	10^{-4}
42.5	10^{-3}
45.0	10^{-2}

Elaborado por: Autor.

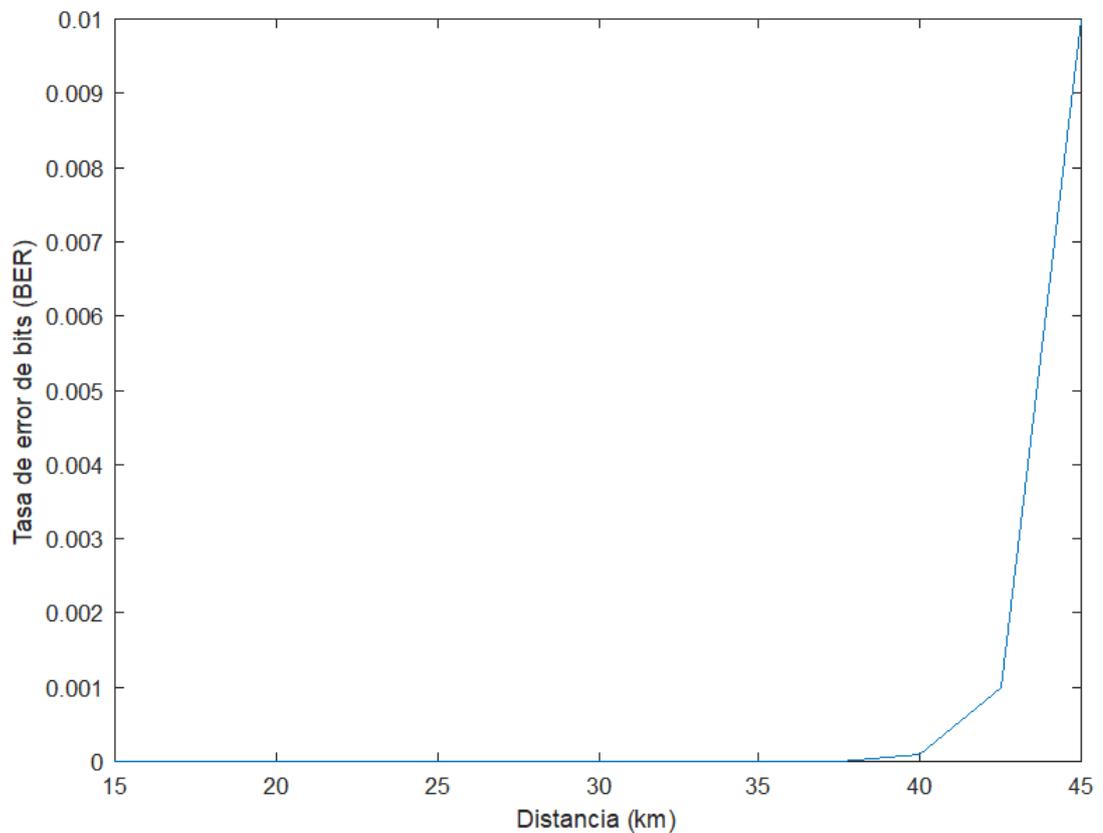


Figura 3. 10: Efectos de la BER con relación a la distancia.

Elaborado por: Autor.

A partir de los resultados obtenidos en las figuras 3.9 y 3.10 se puede ver que a medida que aumenta la distancia del enlace GPON la calidad de la transmisión disminuye. Es decir, que el factor de calidad Q y la BER son mejores para enlaces cuyas distancias son inferiores a 30 km. Las diferentes degradaciones en el enlace para distancias mayores a 30 km se deben principalmente a efectos lineales y no lineales.

3.5.2. Efectos de la variación de la velocidad de datos y el número de usuarios.

A continuación, se variará la velocidad de datos en sentido ascendente y descendente, así como el número de usuarios para ver la influencia de estos parámetros en la calidad de la transmisión.

a. Para 8 usuarios:

En este escenario se ha simulado para 8 usuarios, la longitud de la fibra varía de 15 a 170 km. Las velocidades de datos utilizadas varían, respectivamente, 622 Mbps para APON, 1 Gbps para EPON, 1244 Mbps para BPON, 1.25 Gbps en sentido ascendente y 2.5 Gbps en sentido descendente para GPON. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 3.11 a 3.13. En la tabla 3.3 se muestran los datos obtenidos para el enlace de GPON.

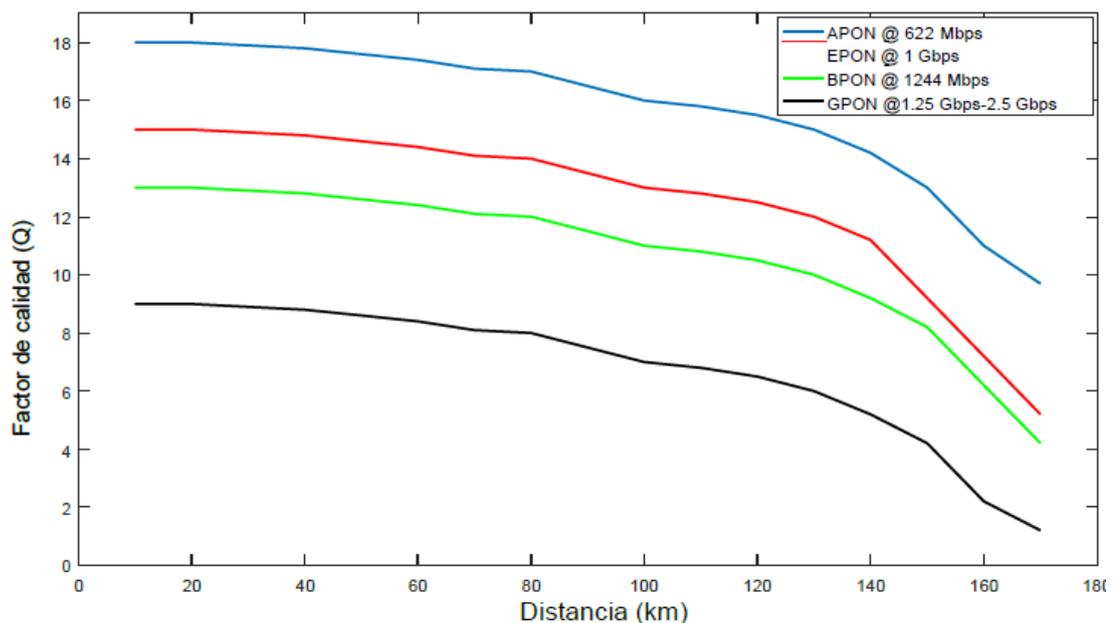


Figura 3. 11: Efectos del factor Q con relación a la distancia para 8 usuarios.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.11 muestra una disminución del factor de calidad con la distancia. Se puede observar que la calidad de la transmisión es mejor en el caso de APON que en los otros estándares. La calidad se deteriora con el aumento de la velocidad de datos (upstream o downstream) tal como se observa en la figura 3.12.

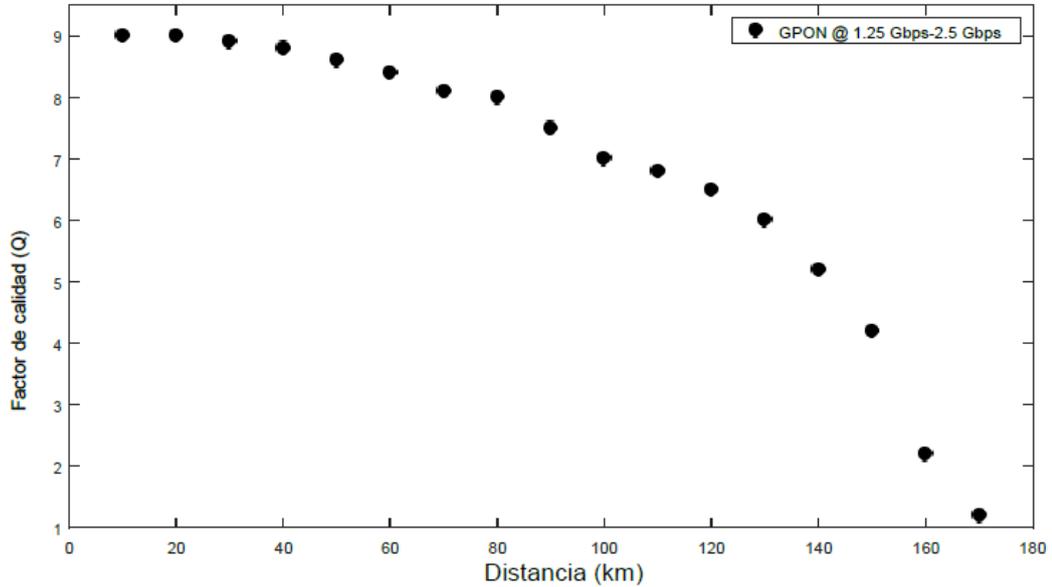


Figura 3. 12: Efectos del factor Q con relación a la distancia para 8 usuarios en canales ascendentes y descendentes de GPON.

Elaborado por: Autor.

A continuación, se estudia el efecto de la distancia en la tasa de error de bits (BER). La figura 3.13 muestra la BER con relación a la distancia y se puede ver que se ha obtenido una calidad de transmisión aceptable $BER=10^{-12}$ para una distancia que varía entre 120 y 160 km.

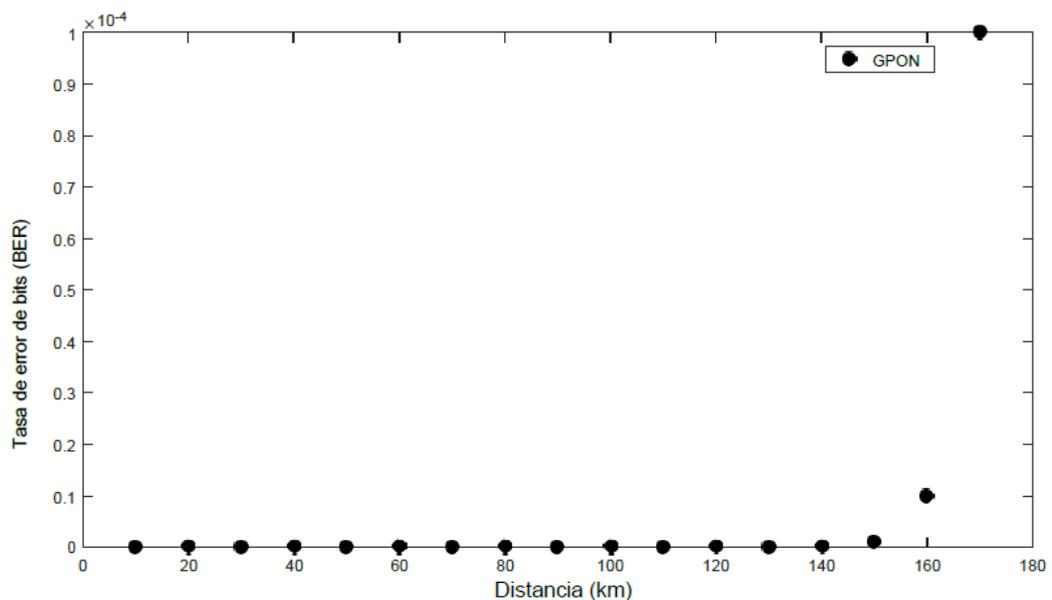


Figura 3. 13: Efectos de la BER con relación a la distancia para 8 usuarios.

Elaborado por: Autor.

La tabla 3.3 muestra la BER en función de la distancia, se puede ver que a medida que aumenta la distancia también lo hace la BER, la distancia máxima es de 160 km.

Tabla 3. 3: Efectos de la BER debido a la distancia del enlace GPON para 8 usuarios.

Distance (km)	BER	Distance (km)	BER
10	10^{-20}	100	10^{-14}
20	10^{-20}	110	10^{-13}
30	10^{-20}	120	10^{-12}
40	10^{-20}	130	10^{-11}
50	10^{-19}	140	10^{-10}
60	10^{-19}	150	10^{-10}
70	10^{-17}	160	10^{-9}
80	10^{-16}	170	10^{-5}
90	10^{-15}	180	10^{-5}

Elaborado por: Autor.

b. Para 16 usuarios:

Se procedió de la misma manera que con los 8 usuarios, los resultados se muestran a continuación en las figuras 3.14 y 3.15.

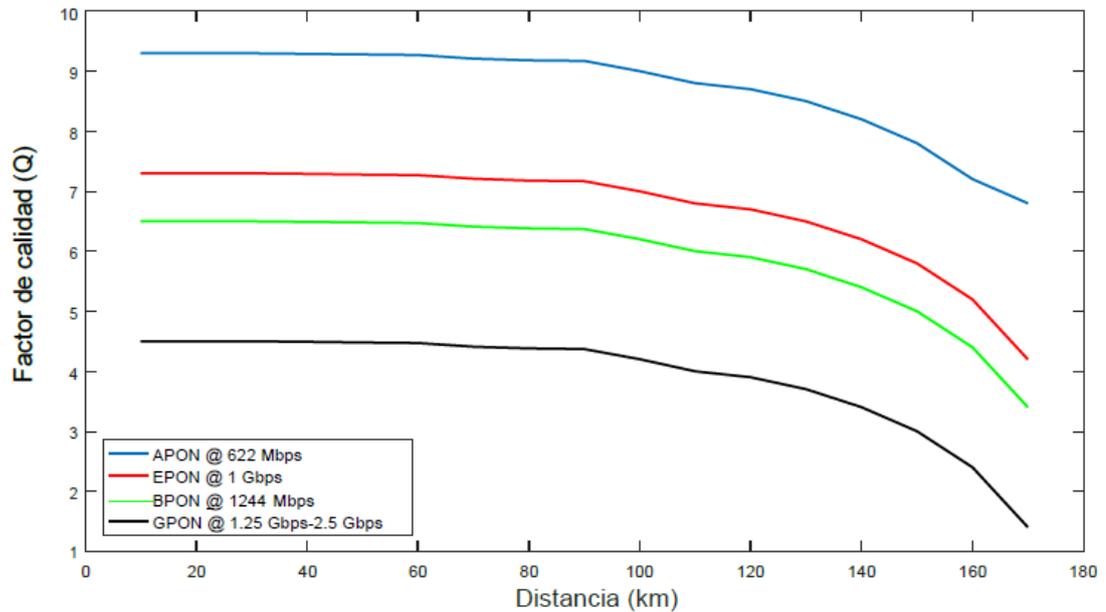


Figura 3. 14: Efectos del factor Q con relación a la distancia para 16 usuarios.

Elaborado por: Autor.

Ya se puede ver que los resultados obtenidos con 16 usuarios no son los mismos para 8 usuarios. La calidad de la transmisión se deteriora con el número de usuarios. Otra observación se refiere a la distancia entre el transmisor y el receptor para tener una buena calidad de transmisión, a partir del resultado dado se nota que la calidad ya no es aceptable. En la tabla 3.4 se muestran los diferentes valores de BER versus la distancia en el sistema GPON propuesto.

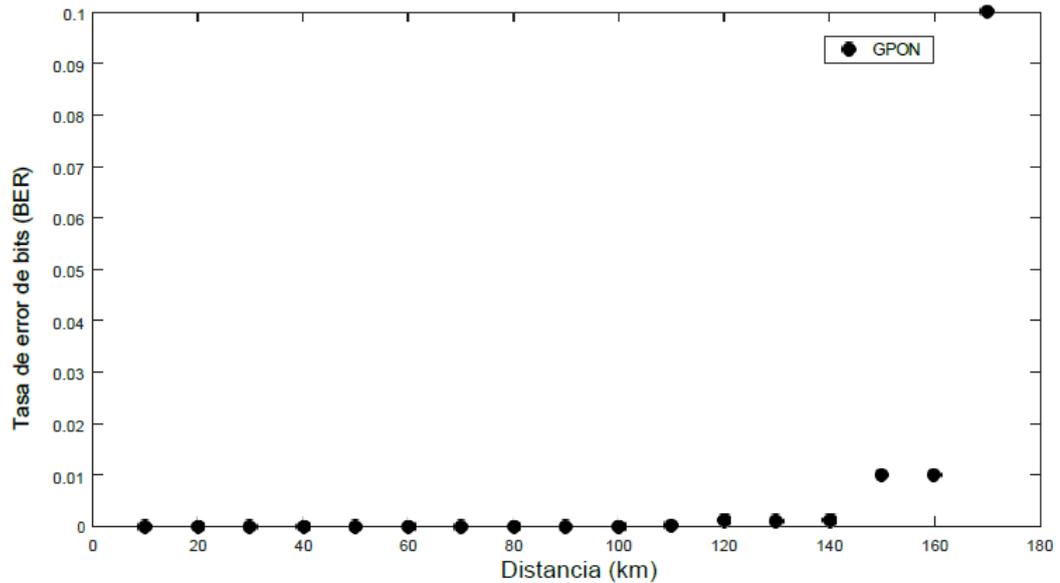


Figura 3. 15: Efectos de la BER con relación a la distancia para 16 usuarios.
Elaborado por: Autor.

Tabla 3. 4: Efectos de la BER debido a la distancia del enlace GPON para 16 usuarios.

Distance (km)	BER	Distance (km)	BER
10	10 ⁻⁶	100	10 ⁻⁶
20	10 ⁻⁶	110	10 ⁻⁵
30	10 ⁻⁶	120	10 ⁻⁴
40	10 ⁻⁶	130	10 ⁻⁴
50	10 ⁻⁶	140	10 ⁻⁴
60	10 ⁻⁶	150	10 ⁻³
70	10 ⁻⁶	160	10 ⁻³
80	10 ⁻⁶	170	10 ⁻²
90	10 ⁻⁶	180	10 ⁻²

Elaborado por: Autor.

c. Para 32 usuarios:

Al igual que con los 8 y 16 usuarios se ha realizado una simulación con 32 usuarios, los resultados se muestran en las figuras 3.16 y 3.17.

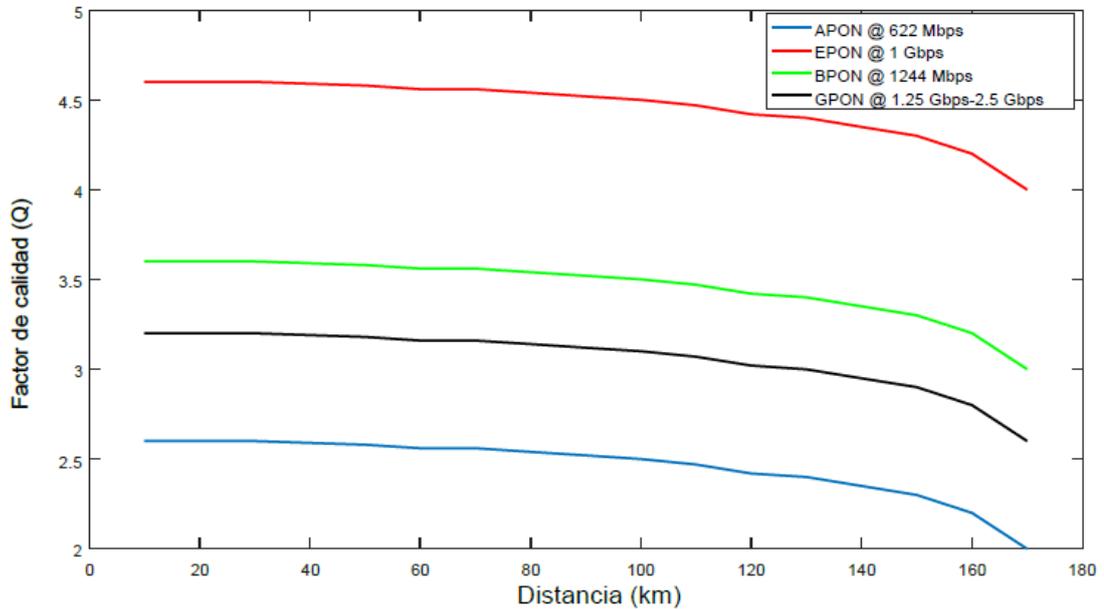


Figura 3. 16: Efectos del factor Q con relación a la distancia para 32 usuarios.
Elaborado por: Autor.

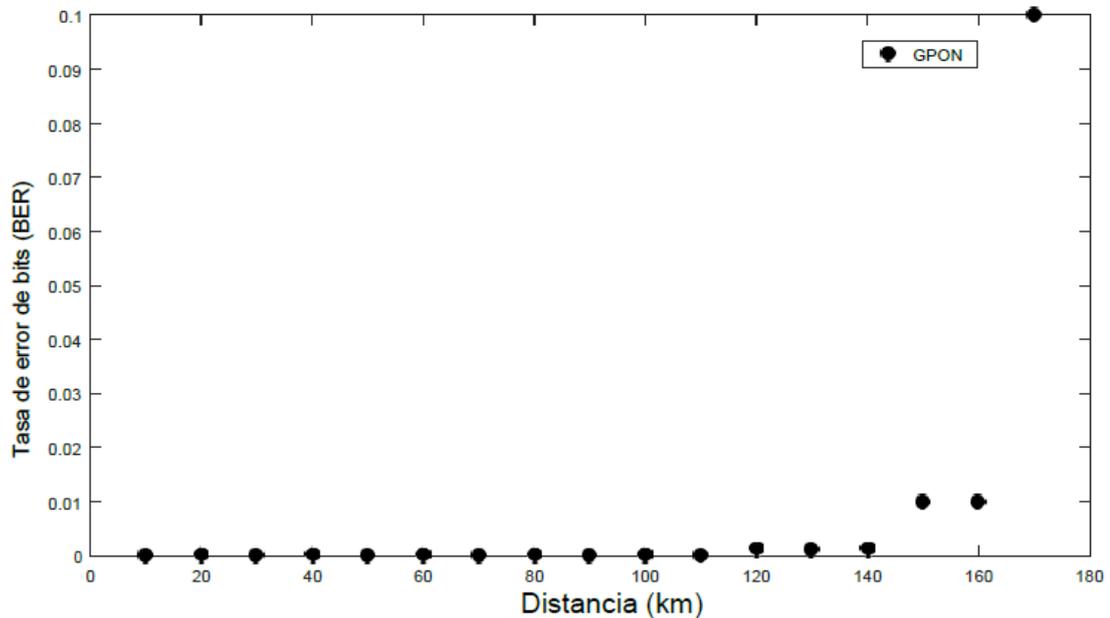


Figura 3. 17: Efectos de la BER con relación a la distancia para 32 usuarios.
Elaborado por: Autor.

Cuando se ejecuta la simulación con 32 usuarios se pudo observar que los resultados son completamente diferentes a los obtenidos con 8 y 16 usuarios. Se puede ver que la calidad de la transmisión también disminuye,

lo que muestra el impacto del número de usuarios y la distancia entre la OLT y la ONU en la calidad de la transmisión.

En la tabla 3.5 se observa que la BER es baja independientemente de la distancia y de la velocidad de datos utilizada en el sentido ascendente o descendente. Por lo tanto, se concluye que el caso de 8 usuarios ofrece un mejor resultado en términos de calidad de transmisión y tasa de error de bits para una distancia de hasta 170 km.

Tabla 3. 5: Efectos de la BER debido a la distancia del enlace GPON para 32 usuarios.

Distance (km)	BER	Distance (km)	BER
10	10^{-4}	100	10^{-4}
20	10^{-4}	110	10^{-3}
30	10^{-4}	120	10^{-2}
40	10^{-4}	130	10^{-2}
50	10^{-4}	140	10^{-2}
60	10^{-4}	150	10^{-2}
70	10^{-4}	160	10^{-2}
80	10^{-4}	170	10^{-1}
90	10^{-4}	180	10^{-1}

Elaborado por: Autor.

CONCLUSIONES

- Se estudió los diferentes tipos de redes de acceso y la descripción de las redes FTTx, las llamadas redes ópticas pasivas PON, tras lo cual se trataron las diferentes arquitecturas y estándares, y las velocidades de datos ofrecidas con una comparación entre estos estándares.
- Al estudiar el enlace G-PON bidireccional, primero se varió la velocidad de datos de la siguiente manera: 622Mbit/s, 1244Mbit/s, 1Gbit/s, 1,25Gbit/s (en la dirección de subida), y 2,5Gbit/s (en la dirección de bajada) que corresponden a los estándares APON, BPON, EPON, GPON respectivamente. Se ha observado que cuanto mayor es la velocidad de datos, peor es la calidad de la transmisión.
- A continuación, para el estándar G-PON, se ha jugado con el número de usuarios y la distancia entre el LTO y la ONU, y de los resultados obtenidos se desprende que la mejor calidad de transmisión es con 8 usuarios.

RECOMENDACIONES.

Se sugieren dos trabajos a futuro que se pueden desarrollar utilizando el software OptiSystem:

- Evaluación comparativa de modulaciones PSK y FSK en redes ópticas pasivas utilizando la multiplexación por división de longitud de onda en el tiempo (TWDM)
- Evaluación del rendimiento de las redes ópticas espectralmente flexibles sobre fibra multinúcleo de pocos modos.

Bibliografía

- Aguilera Arreaga, J. L. (2018). *Análisis comparativo del rendimiento de los moduladores Mach-Zehnder y electroabsorción para comunicaciones ópticas*. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/11146>
- Cevallos, R., Espinosa, R., & Vinueza, M. (2021). *Estudio y diseño de una red de última milla, utilizando la tecnología G-PON, para el sector del nuevo aeropuerto de Quito*.
- Diaz, D., & Zuany, J. (s/f). *Análisis de sistemas de radio sobre fibra usando fibras ópticas de plástico*. Recuperado el 8 de septiembre de 2021, de <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/7964>
- Du, L. B., Zhao, X., Yin, S., Zhang, T., Barratt, A. E. T., Jiang, J., Wang, D., Geng, J., DeSanti, C., & Lam, C. F. (2019). Long-Reach Wavelength-Routed TWDM PON: Technology and Deployment. *Journal of Lightwave Technology*, 37(3), 688–697. <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2850343>
- Freire Castellanos, J. S. (2020). *Evaluación de redes ópticas pasivas mediante asignación de ancho de banda y longitud de onda con tecnología coexistente Tx-Rx en redes convergentes*. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/15045>
- Horvath, T., Radil, J., Munster, P., & Bao, N.-H. (2020). Optical Amplifiers for Access and Passive Optical Networks: A Tutorial. *Applied Sciences*, 10(17), 5912. <https://doi.org/10.3390/app10175912>
- Islam, M., Ahmed, S., & Islam, A. (2019). Performance Analysis of 2.5 Gbps PIN and APD Photodiodes to Use in Free Space Optical Communication Link. *Thin Films*, 8, 53–58. <https://doi.org/10.18576/ijtfst/080204>

- Lora, J. R. W. (s/f). *Propuesta del uso de un multicanalizador por división espacial en un sistema de comunicación a fibra óptica*. 78.
- Ruiz Palacios, D. J., Pérez Ramírez, Y. L., & Montiel González, L. (2018). *Validación de estrategias metodológicas que faciliten el análisis y comprensión en la resolución de problemas, utilizando la ley de Snell; con estudiantes de undécimo grado del colegio Luis Ángel Delgadillo de la comunidad de Panalí, municipio de Quilalí, departamento de Nueva Segovia; en el segundo semestre del 2017* [Other, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua]. <https://repositorio.unan.edu.ni/9397/>
- Seminario Imán, R. Y. (2021). Diseño de una red piloto FTTH utilizando estándar GPON, en modalidad de conmutación de datos por paquetes para el distrito de Miraflores—Lima. *Universidad Nacional de Piura*. <http://repositorio.unp.edu.pe/handle/20.500.12676/2764>
- Syuaib, I., Asvial, M., & Rahardjo, E. T. (2019). Modeling of Ultra-Long Span Bidirectional Raman Transmission Link Using Three-Segment Hybrid Fiber Core Structure. *Photonics*, 6(1), 2. <https://doi.org/10.3390/photonics6010002>



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, **Sánchez Cevallos, Ricardo Arturo** con C.C: # 094119874-9 autor del Trabajo de Titulación: **Evaluación de la calidad de transmisión en enlaces GPON bidireccionales en 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, 20 de septiembre del 2021

f. _____

Nombre: Sánchez Cevallos, Ricardo Arturo

C.C: 094119874-9

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Evaluación de la calidad de transmisión en enlaces GPON bidireccionales en el simulador OptiSystem		
AUTOR(ES)	Sánchez Cevallos, Ricardo Arturo		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
PROGRAMA:	Ingeniería en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	20 de septiembre del 2021	No. DE PÁGINAS:	52
ÁREAS TEMÁTICAS:	Sistemas de Comunicaciones, Comunicaciones Ópticas		
PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:	Enlaces, Ascendente, Descendente, OLT, ONU, GPON		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):			
<p>El presente componente práctico del examen complejo se denomina "Evaluación de la calidad de transmisión en enlaces GPON bidireccionales en el simulador OptiSystem". En el capítulo 1, se presenta la descripción general del componente práctico. En el capítulo 2, se revisa el estado del arte de las comunicaciones por fibra óptica. En el capítulo 3, se diseña la simulación de la red óptica pasiva Gigabit (GPON) con una fibra bidireccional utilizando el entorno de simulación OptiSystem. En la investigación del enlace GPON bidireccional, se ha estudiado la calidad de la transmisión en función de los siguientes parámetros: la velocidad del enlace, la distancia entre el transmisor y el receptor (OLT y ONU) y el número de usuarios (8, 16 y 32 clientes), y para ello se han utilizado dos criterios para evaluar la calidad de la transmisión: el factor de calidad (Q) y la tasa de error de bits (BER).</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-9-59900037	E-mail:	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Palacios Meléndez Edwin Fernando		
	Teléfono: +593-9-67608298		
	E-mail: edwin.palacios@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):			