



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Simulación y evaluación de comunicación FSO bidireccional sobre
redes de acceso ópticos híbridos**

AUTOR:

Ing. Tomalá Acosta, Rafael David

Examen complexivo previo a la obtención del Grado Académico de

MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, 9 de marzo del 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster **Tomalá Acosta, Rafael David** como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **MAGISTER EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DEL PROGRAMA

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, 9 de marzo del 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Tomalá Acosta, Rafael David**

DECLARO QUE:

El examen complejo “**Simulación y evaluación de comunicación FSO bidireccional sobre redes de acceso ópticos híbridos**” previa a la obtención del Grado Académico de **Magíster en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del examen complejo del Grado Académico en mención.

Guayaquil, 9 de marzo del 2021

EL AUTOR

TOMALÁ ACOSTA, RAFAEL DAVID



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, **Tomalá Acosta, Rafael David**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del examen complejo titulado: **“Simulación y evaluación de comunicación FSO bidireccional sobre redes de acceso ópticos híbridos”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 9 de marzo del 2021

EL AUTOR

TOMALÁ ACOSTA, RAFAEL DAVID

REPORTE DE URKUND

URKUND Fernando Palacios Meléndez (edwin_palacios)

Documento	David_Tomala_MT.docx (D94240844)
Presentado	2021-01-31 18:19 (-05:00)
Presentado por	fernandopm23@hotmail.com
Recibido	edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com
Mensaje	RV: Revisión TT David Tomalá Mostrar el mensaje completo 1% de estas 22 páginas, se componen de texto presente en 3 fuentes.

Lista de fuentes	Bloques	Categoría	Enlace/nombre de archivo
			http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/33...
			Andrea_Molina_Final.docx
			Giler_Titulacion_2019.docx
			ALBAN_Titulacion.docx
			ALBAN_Titulacion.docx
			https://www.sistemamid.com/panel/uploa...
			https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965081

Reiniciar Exportar Compartir

1 Advertencia

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

TEMA: Simulación y evaluación de comunicación FSO
bidireccional sobre redes de acceso ópticos híbridos

AUTOR: Ing. Tomalá Acosta, Rafael David

Trabajo de Titulación previo a

la obtención del Grado Académico de Magister en
Telecomunicaciones

TUTOR: M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

20 de enero del 2021

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN
TELECOMUNICACIONES

DEDICATORIA

Gracias a Dios por tener y disfrutar de mi familia, gracias por apoyarme en cada decisión, gracias a la vida porque cada día me demuestra lo hermosa y justa que puede llegar a ser; gracias a mi esposa por el apoyo, comprensión, tolerancia y paciencia que permitieron llevar adelante un proyecto que pasó de ser una meta personal a un logro familiar.

No ha sido sencillo el camino hasta ahora, pero gracias por su amor, bondad y apoyo en los momentos de oscuridad y cansancio. Les agradezco, y hago presente mi gran afecto hacia ustedes, mi familia.

EL AUTOR

TOMALÁ ACOSTA, RAFAEL DAVID

AGRADECIMIENTO

Aquel sueño de un niño de primaria se hace realidad después de tanto tiempo mediante el presente documento y el logro alcanzado, por eso dedico esta tesis principalmente a mi hija, Claudia Michelle, por ser mi fuente de motivación e inspiración para poder superarme cada día.

EL AUTOR

TOMALÁ ACOSTA, RAFAEL DAVID



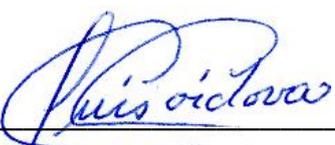
**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f.  _____

M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO
TUTOR

f.  _____

M. Sc. CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO
REVISOR

f.  _____

M. Sc. QUEZADA CALLE. EDGAR
REVISOR

f.  _____

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

Índice General

Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas	XIII
Resumen	XIV
Abstract	XV
Capítulo 1: Descripción General del Trabajo de Titulación.....	16
1.1. Introducción.....	16
1.2. Antecedentes.	17
1.3. Definición del Problema.....	17
1.4. Justificación del Problema.....	18
1.5. Objetivos del Problema de Investigación.....	18
1.5.1. Objetivo General.....	18
1.5.2. Objetivos Específicos.....	18
1.6. Hipótesis.	18
1.7. Metodología de Investigación.....	19
Capítulo 2: Fundamentación Teórica	20
2.1. Visión general de la comunicación por fibra óptica.....	20
2.2. Historia de la fibra óptica.	21
2.3. Transmisores en sistemas ópticos.	22
2.4. Receptores en sistemas ópticos.....	23
2.5. Fibra óptica.	24
2.6. Tipos de dispersión.	25
2.6.1. Dispersión intermodal.	25
2.6.2. Dispersión intramodal.	26
2.6.3. Dispersión del modo de polarización.	26
2.7. Atenuación.	27
2.7.1. Pérdida por flexión.....	28

2.7.2.	Desalineación mecánica.	28
2.7.3.	Pérdida de acoplamiento.	29
2.8.	Descripción general del diseño del enlace óptico.	30
2.8.1.	Fuente óptica.	31
2.8.2.	Empalme de fibra.	32
2.8.3.	Conectores de fibra óptica.	34
2.8.4.	Estructura básica del conector de fibra óptica SC.	35
2.9.	Ventajas de las comunicaciones por fibra óptica.	35
2.10.	Presupuesto de potencia del enlace óptico.	37
2.11.	Presupuesto de tiempo de subida.	38
	Capítulo 3: Diseño, Implementación y resultados	40
3.1.	Visión general del sistema.	40
3.2.	Arquitectura del sistema propuesto.	42
3.2.1.	Arquitectura de la comunicación downstream.	42
3.2.2.	Arquitectura de la comunicación upstream.	47
3.3.	Análisis de resultados experimentales obtenidos en la simulación. ...	48
3.3.1.	Análisis de rendimiento de la comunicación downstream.	48
3.3.2.	Análisis de rendimiento de la comunicación upstream.	53
	Conclusiones.	56
	Recomendaciones.	57
	Bibliografía.	58

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2. 1: Representación práctica de como la luz se transmite sobre una fibra óptica.	21
Figura 2. 2: Estructura de un LED hemisférico.....	23
Figura 2. 3: Estructuras básicas de fotodiodos PIN (a) mesa vertical con iluminación de superficie, (b) plana vertical con iluminación de superficie, (c) plana vertical con iluminación de borde, y (d) plana con iluminación de superficie.	24
Figura 2. 4: Dispersión intermodal en fibra de índice escalonado.	25
Figura 2. 5: Representación de la dispersión cromática.....	26
Figura 2. 6: Secciones transversales de tres tipos de fibra de modo de polarización.	27
Figura 2. 7: Atenuación lumínica por ZBLAN y fibras de sílice	27
Figura 2. 8: Ilustración de la propagación de un rayo de luz en una fibra óptica circular sin pérdida por macroflexión.....	28
Figura 2. 9: Ilustración de las desalineaciones (a) longitudinal, (b) lateral y (c) angular.	29
Figura 2. 10: Circuito de interfaz típico para enlace de fibra óptica	30
Figura 2. 11: LED/LD que convierte la señal eléctrica en señal luminosa	32
Figura 2. 12: Una muestra de conector SC.....	35
Figura 2. 13: Estructura del conector SC 20.	35
Figura 2. 14: Diagrama de enlace.....	37
Figura 2. 15: Esquemas de codificación RZ y NRZ.....	39

Capítulo 3

Figura 3. 1: Diseño del modelo de red GPON híbrida.	43
Figura 3. 2: Estructura del subsistema bloque hospital del sistema propuesto.	45

Figura 3. 3: Estructura de la ONU para el subsistema bloque hospital.	45
Figura 3. 4: Estructura del subsistema bloque edificio.	46
Figura 3. 5: Estructura de la ONU para el subsistema bloque edificio.	47
Figura 3. 6: Resultados del analizador de BER y diagrama de ojo del canal FSO descendente del subsistema bloque hospital para (a) 50 m y (b) 100 m.	49
Figura 3. 7: Rango mínimo de canales BER contra FSO para subsistema bloque hospital.	50
Figura 3. 8: Rango máximo de canales de factor Q contra FSO para el subsistema bloque hospital.	50
Figura 3. 9: Resultados del analizador de BER y diagrama de ojo del canal FSO ascendente del subsistema bloque edificio para (a) 50m y (b) 100m.	51
Figura 3. 10: Respuesta acumulativa del factor Q en el rango de canal FSO del subsistema bloque edificio.	52
Figura 3. 11: Min. log de BER vs Potencia total para todos los usuarios.	53
Figura 3. 12: Resultados del analizador de BER y diagrama de ojo del canal FSO ascendente para (a) 50m y (b) 150m.	54
Figura 3. 13: Min. log de BER en el lado OLT para upstream en diferentes rangos de canal FSO.	55

Índice de Tablas

Capítulo 2

Tabla 2. 1: Diferentes pérdidas de acoplamiento	29
Tabla 2. 2: Comparación de LED y LD.....	32
Tabla 2. 3: Presupuesto de potencia de enlace óptico.....	38

Capítulo 3

Tabla 3. 1: Parámetros de Fibra Óptica Bidireccional.	44
Tabla 3. 2: Parámetros del canal FSO.....	44
Tabla 3. 3: Resultados numéricos del analizador BER para el subsistema bloque hospital.	50
Tabla 3. 4: Resultados numéricos de analizadores BER para el subsistema bloque edificio.....	52
Tabla 3. 5: Resultados numéricos del analizador BER para canal upstream.	55

Resumen

El presente trabajo complejo consiste en la simulación y evaluación de comunicación óptica de espacio libre bidireccional sobre redes de acceso ópticos híbridos. Se realizó una descripción teórica de las comunicaciones por fibra óptica. Se desarrolla el modelo de simulación de canales FSO sobre GPON híbrida. Se logra entender, que las redes ópticas totalmente pasivas con función de multiplexación por división de tiempo (TDM) y de longitud de onda (WDM) abrirán a las redes de acceso a una verdadera banda ancha. Además, la integración con óptica inalámbrica es otro paso para agregar funciones de bajo costo con funciones de gran ancho de banda. La combinación de comunicaciones FSO con fibra óptica puede reducir los costos del sistema y proporcionar acceso de gran ancho de banda en áreas donde la instalación de fibra óptica es problemática. Se pone en claro que la distancia del enlace óptico de espacio libre puede permitir en el caso general de la red híbrida.

Palabras claves: REDES, COMUNICACIONES, HÍBRIDAS, MULTIPLEXACIÓN, RENDIMIENTO, ENLACES

Abstract

The present complex work consists of the simulation and evaluation of bidirectional free space optical communication over hybrid optical access networks. A theoretical description of fiber optic communications was made. The FSO channel simulation model is developed on hybrid GPON. It is possible to understand that fully passive optical networks with time division multiplexing (TDM) and wavelength (WDM) will open access networks to true broadband. In addition, integration with wireless optics is another step to add low-cost features with high-bandwidth features. Combining FSO communications with fiber optic can reduce system costs and provide high bandwidth access in areas where fiber optic installation is problematic. It becomes clear that the distance of the free space optical link can allow in the general case of the hybrid network.

Keywords: NETWORKS, COMMUNICATIONS, HYBRIDS, MULTIPLEXING, PERFORMANCE, LINKS

Capítulo 1: Descripción General del Trabajo de Titulación

1.1. Introducción.

Los sistemas ópticos de espacio libre (*Free Space Optics, FSO*) se utilizan para comunicaciones de alta velocidad entre dos puntos fijos a distancias de hasta varios kilómetros. En comparación con sus homólogos de radiofrecuencia (RF), el enlace FSO tiene un ancho de banda óptico muy alto disponible, lo que permite velocidades de datos mucho más altas. (Khalighi & Uysal, 2014)

Los sistemas FSO se pueden aprovechar para incrementar adecuadamente las redes malladas inalámbricas (*Wireless Mesh Network, WMN*) multicanales-multiradios (*Multi-Channel Multi-Radio, MCMR*) por su baja interferencia, corto tiempo de configuración y alto ancho de banda. A pesar de las ventajas, a diferencia de su contraparte de radiofrecuencia (RF), FSO es sensible a los fenómenos atmosféricos dependientes del clima como la turbulencia, la dispersión y la absorción. (Zhao et al., 2020)

El principio básico del sistema FSO es similar al de la transmisión por fibra óptica, dentro del cual se emplean canales guiados para transmitir señales de información y en el caso del FSO también se emplean canales guiados. FSO ofrece comunicación de línea de visión (*Line-of-Sight, LoS*) que utiliza longitudes de onda de la región infrarroja del espectro electromagnético. (Khajwal et al., 2020)

Las comunicaciones FSO han atraído recientemente una gran cantidad de actividad de investigación de la academia y la industria para una variedad de especificaciones como gran ancho de banda, bajo costo de implementación, alta seguridad de transmisión y robustez a la interferencia electromagnética. (Dabiri & Sadough, 2018; Ghassemlooy et al., 2013)

Sin embargo, a pesar de tener muchas características interesantes, el desvanecimiento inducido por la turbulencia atmosférica, la dispersión

geométrica y la pérdida de canal, que dependen de la distancia, limitan severamente la confiabilidad de los enlaces FSO para distancias de enlace superiores a varios kilómetros. (Anees & Bhatnagar, 2015)

Para superar esta limitación, se han recomendado técnicas de retransmisión para dividir un enlace largo en múltiples enlaces cortos para los transceptores del FSO como un medio para cubrir grandes distancias y mejorar el rendimiento de los sistemas FSO. Además, debido al requisito de línea visual entre el origen y el destino, los relés se pueden utilizar para mejorar la flexibilidad de las redes FSO.

1.2. Antecedentes.

Recientemente se han publicado muchos artículos que consideran a los sistemas ópticos de espacio libre (FSO). El sistema FSO generalmente es capaz de transportar una gran cantidad de datos en el espacio libre con una alta tasa de bits de datos. Esta tecnología es popular no solo por su simplicidad. Dos cabeceras FSO con visibilidad directa entre ellos son esenciales para establecer una comunicación de alta velocidad, dúplex completo y confiable. Finalmente, los sistemas FSO operan en un rango de frecuencia sin licencia, requiere un tiempo de montaje relativamente corto, ofrece costos razonables y proporciona alta seguridad.

En el campo de la comunicación, la comunicación óptica tiene un rápido crecimiento. En términos de desarrollo sin el uso de fibra, la comunicación se convierte en una nueva tendencia, la comunicación óptica en el espacio libre, una parte de la comunicación óptica en la que no hay un papel de la fibra para la comunicación, la luz se centra de transmisor a receptor para la transmisión de datos o información de un lugar a otro.

1.3. Definición del Problema.

FSO permite la transmisión óptica a través del aire a alta velocidad. A pesar de que las comunicaciones de FSO se estudiaron durante muchas décadas, y su red aún se encuentra en su primera etapa debido a los desafíos que enfrenta, como los factores ambientales (mal tiempo) al pasar datos a

través del espacio (aire). De acuerdo con lo indicado surge la necesidad de realizar la implementación de un modelo de simulación de canales (descendente y ascendente) FSO sobre redes de acceso óptico utilizando el software OptiSystem.

1.4. Justificación del Problema.

El proceso del sistema FSO se aclara como una antena óptica que se utiliza para emitir el rayo utilizando una terminación de fibra monomodo (SMF) para liberar espacio. En el receptor, el haz óptico se enfoca en la fibra para su detección. Y amplifique la señal del haz si el clima no es bueno y esto lo hará el Amplificador de retroalimentación dopado con erbio (EDFA). Dado que los enlaces de transmisión óptica de fibra y de espacio libre mantienen la misma señal óptica, es capaz de utilizar tecnologías avanzadas y componentes ópticos desarrollados para la transmisión de fibra de alta velocidad de bits. Una transmisión de espacio libre es igual a la transmisión SMF asumiendo que se omiten el factor de turbulencia atmosférica.

1.5. Objetivos del Problema de Investigación.

1.5.1. Objetivo General.

Realizar la simulación y evaluación de comunicación FSO bidireccional sobre redes de acceso ópticos híbridos.

1.5.2. Objetivos Específicos.

- Describir los fundamentos teóricos de las comunicaciones por fibra óptica.
- Diseñar el escenario de simulación de la red de acceso óptico utilizando canales FSO bidireccionales.
- Evaluar los resultados obtenidos del sistema propuesto a través de cinco iteraciones para diferentes distancias.

1.6. Hipótesis.

En el presente trabajo se caracteriza el canal de comunicación óptica inalámbrica a través de las medidas del canal FSO ascendente y descendente y se presentan diferentes modelos para evaluar el desempeño del enlace.

1.7. Metodología de Investigación.

La investigación científica es un proceso dinámico o un enfoque racional que nos permite examinar fenómenos, resolver problemas y obtener respuestas precisas de las investigaciones. Este proceso se caracteriza por ser sistemático y riguroso y conduce a la adquisición de nuevos conocimientos. Las funciones de la investigación son describir, explicar, comprender, controlar y predecir hechos, fenómenos y comportamientos. El rigor científico está guiado por la noción de objetividad, es decir que el investigador se ocupa únicamente de hechos, dentro de un marco definido por la comunidad científica.

El método de investigación utilizado en este trabajo es descriptivo, que consiste en determinar la naturaleza y características de los fenómenos y, a veces, en establecer asociaciones entre ellos. Descriptivo porque puede ser el objetivo de una búsqueda: por ejemplo, evaluar el rendimiento de los canales FSO (upstream y downstream) sobre una GPON híbrida. También, es descriptiva, ya que presenta los resultados de una observación a través de la simulación.

Capítulo 2: Fundamentación Teórica

2.1. Visión general de la comunicación por fibra óptica.

Los sistemas de comunicación óptico emplean técnicas de modulación y multiplexación para enviar información (por ejemplo: voz, datos, entre otras) de un sitio a otro a través de la emisión de señales de luz sobre un cable de fibra óptica. La señal de luz es enviada en forma de una onda portadora electromagnética que es modulada para transportar información. Las primeras comunicaciones de fibra óptica se desarrollaron en la década de 1970 y han revolucionado la industria de las telecomunicaciones debido a sus ventajas sobre la transmisión eléctrica. (Abad A., 2020)

La fibra óptica ha reemplazado en gran medida la comunicación por cable de cobre en las redes centrales. El proceso de uso de fibra óptica en la comunicación implica los siguientes pasos: mediante el uso de transmisores (LED y láser) se crea la señal óptica (luz), enviando la señal original sobre la red de acceso de fibra, y logrando que la señal no sea distorsionada y así la señal óptica sea receptada a través de fotodetectores (PIN y APD) y finalmente convertir la óptica señal en una señal eléctrica.

Actualmente las empresas de telecomunicaciones utilizan principalmente el cable de fibra óptica para la transmisión de señales de voz (telefonía fija), Internet y televisión por cable. En Ecuador las empresas de telecomunicaciones que utilizan fibra óptica ofrecen los servicios ya descritos. Debido a la menor atenuación e interferencia, las ventajas de la fibra óptica sobre el cable de cobre existente son que la señal óptica puede viajar largas distancias y tiene un gran ancho de banda. Sin embargo, es relativamente difícil y requiere mucho tiempo desarrollar la infraestructura en una ciudad, y el sistema de fibra óptica es complejo y costoso de instalar y operar. (Canchis C., 2015)

Debido a esos inconvenientes, las comunicaciones de fibra óptica se han instalado en aplicaciones de largo alcance pudiendo maximizar el ancho de

banda de la red, llevando así un incremento en los costos. Aunque, desde el año 2000, el precio de las comunicaciones por fibra óptica ha bajado significativamente en comparación con el despliegue de redes basadas en cobre, el precio del despliegue de fibras ópticas en el hogar ahora se ha vuelto más asequible y rentable. En las comunicaciones por fibra óptica, la información se transmite enviando la luz a través de una fibra óptica, tal como se ilustra en la figura 2.1.

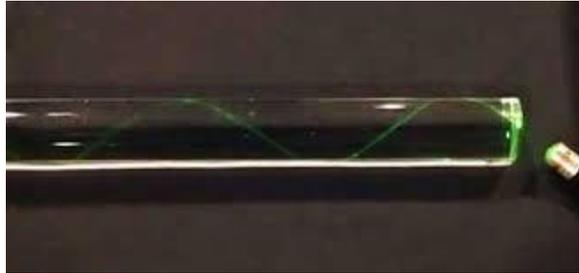


Figura 2. 1: Representación práctica de como la luz se transmite sobre una fibra óptica.

Fuente: (Foa, 2020)

2.2. Historia de la fibra óptica.

La fibra óptica fue desarrollada por primera vez por Corning Glass Work en la década de 1970. Posteriormente, durante diversas investigaciones fue desarrollado el primer sistema comercial de comunicaciones por fibra óptica. El sistema funcionaba a una longitud de onda de aproximadamente $0.8 \mu\text{m}$ y utilizaba transmisores láseres semiconductores de arseniuro de galio (GaAs). La 1era generación de comunicaciones ópticas operaba con velocidades de 45 Mbps y entre repetidoras a una distancia de 10 km. En abril del año 1977, en la ciudad de California, la compañía General Telephone and Electronics transmitió señales de voz telefónica en vivo sobre fibra óptica con una tasa de bits de 6 Mbps.

La 2da generación de comunicaciones ópticas fue desarrollada para uso comercial a principios de la década de 1980. El sistema funcionaba a una longitud de onda de alrededor de $1.3 \mu\text{m}$ y utilizaba láser semiconductor de fosfuro de arseniuro de galio (GaAsP). En 1981 se introdujo la fibra monomodo (*Single-Mode Fiber, SMF*) y esto mejoró el rendimiento del sistema. En 1987, la 2da generación operaba con tasas de bits máxima de 1.7 Gbps con una distancia entre repetidoras de máximo 50 km.

La 3era generación de comunicaciones ópticas fue desarrollada y operaba a una longitud de onda de 1.55 μm , utiliza láser semiconductor de Fosfuro de arseniuro de galio indio (InGaAsP) y tenía pérdidas de aproximadamente 0.2 dB/km. Para superar este problema, se utilizaron fibras de dispersión desplazada y fueron diseñadas para minimiza la dispersión alrededor de 1.55 μm o limitaban el espectro láser en modos de propagación longitudinales. Consecuentemente, la 3era generación funcionaba con velocidades de 2.5 Gbps y entre repetidoras a una distancia mayor a 100 km.

El sistema de comunicación de fibra óptica de 4ta generación está diseñado con el uso de amplificación óptica que reduciría la necesidad de repetidores mediante el uso de la tecnología de multiplexación por división de longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexing, WDM*) para aumentar la capacidad de datos. Estas mejoras permitieron duplicar la capacidad de datos cada 6 meses a partir del año 1992 hasta alcanzar una tasa de bits de 10 Tbps en el año 2001. Recientemente, las tasas de bits han subido a 14 Tbps en una sola línea de 160 km utilizando amplificadores ópticos.

El enfoque del desarrollo para el sistema de comunicación de fibra óptica de 5ta generación es extender el rango de longitud de onda sobre el cual puede operar un sistema WDM. Debido al mayor uso de Internet, se necesita una alta demanda para actualizar el ancho de banda en el sistema de fibra óptica de próxima generación.

2.3. Transmisores en sistemas ópticos.

Los diodos emisores de luz (*Light-Emitting Diode, LED*) y los diodos láser (*Laser Diode, LD*) son los transmisores ópticos más utilizados. La diferencia entre los dos es que los LEDs genera haces de luz incoherentes, mientras que los LDs generan haces de luz coherentes. Por ejemplo, Qaz, (2020) indica que los emisores ópticos fueron diseñados para ser robustos, eficaces y confiables, siendo operativos a una determinada longitud de onda (ventanas de operación de la fibra óptica) y moduladas a altas frecuencias. El LED es un semiconductor de unión p-n con polarización directa que emite luz a través de una emisión espontánea y crea un fenómeno conocido como

electroluminiscencia. El emisor LED envía luz incoherente y tiene un ancho espectral en el rango de 30 a 60 nm.

Aunque, la emisión de luz no es eficiente, por ejemplo, con el 1% de potencia (aproximadamente 100 μ W), casualmente transformada en potencia de emisión de pulsos de luz es acoplada a la fibra óptica. Aunque, los semiconductores LEDs son muy ventajosos en aplicaciones (redes backbone en campus universitarios) de bajo costo debido a su diseño relativamente simple. (Qaz, 2020)

Los LEDs de comunicaciones están hechos de fosfuro de arseniuro de galio (GaAsP) o arseniuro de galio (GaAs). Esto se debe a que los LEDs de GaAsP pueden operar a una longitud de onda más larga que los LEDs de GaAs, tienen un espectro de salida más amplio. En la figura 2.2 se muestra la estructura de un LED hemisférico de GaAs. Qaz, (2020) sostiene que los LEDs tienen un ancho de espectro alto lo que provoca un incremento en la dispersión de la fibra, lo que restringe la tasa de bits-distancia. Los LEDs se utilizan normalmente en aplicaciones de red de área local con tasas de bits de 10 a 100 Mbps y distancias de transmisión de unos pocos kilómetros.

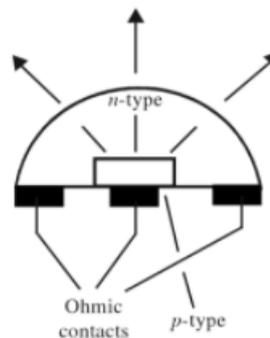


Figura 2. 2: Estructura de un LED hemisférico.
Fuente: (Gupta, 2015)

2.4. Receptores en sistemas ópticos.

Según Qaz, (2020) el fotodetector es el dispositivo principal en los receptores ópticos. Un fotodetector se encarga de convertir una señal de luz a señal eléctrica basado en el fenómeno de efecto fotoeléctrico. Los fotodetectores son fotodiodos semiconductores y que incluyen fotodiodos de avalancha (APD), fotodiodos P-I-N y fotodiodos P-N. El fotodiodo PIN se basa

en la unión P-N que tiene regiones altamente dopadas. Los fotodiodos P, I y N se pueden estructurar de diferentes formas, tal como se muestra en la figura 2.3 (Visvanathan et al., 2004). El fotodiodo PIN plano tiene un costo menor y una mejor eficiencia en comparación con los fotodiodos PIN verticales. En un fotodiodo PIN, la región intrínseca aumenta para obtener una mayor eficiencia y los fotones producen más pares de electrones y huecos. (W. Ahmad et al., 2018)

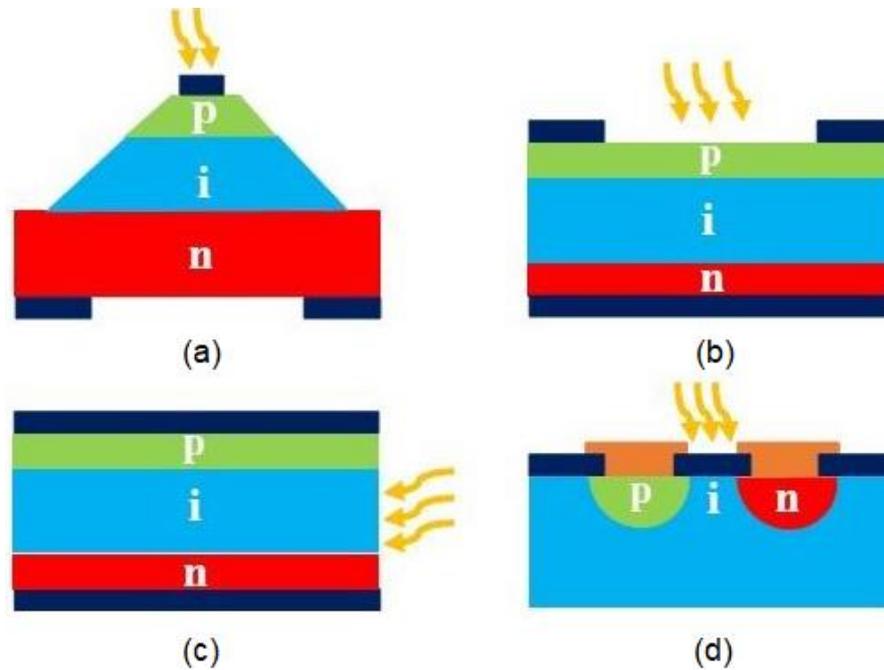


Figura 2. 3: Estructuras básicas de fotodiodos PIN (a) mesa vertical con iluminación de superficie, (b) plana vertical con iluminación de superficie, (c) plana vertical con iluminación de borde, y (d) plana con iluminación de superficie.

Fuente: (Visvanathan et al., 2004)

2.5. Fibra óptica.

La fibra óptica consta de un revestimiento, un núcleo y una cubierta con recubrimiento UV (una capa exterior protectora). De acuerdo con Qaz, (2020) el revestimiento confina la señal de luz a lo largo del núcleo y se propaga internamente, es decir, que se produce una reflexión interna total. Por ejemplo, el núcleo y el revestimiento (de menor índice de refracción) son fabricados con vidrio de sílice de alta calidad, algunos también son fabricados con plástico. El empalme por fusión o empalme mecánico es el método para conectar las fibras ópticas y requiere de destrezas técnicas y tecnología avanzada para fusionarlas, ya que se requiere de precisión microscópica para la alineación entre los núcleos de las fibras a fusionar.

Hay dos tipos de fibra óptica que se utilizan en las comunicaciones ópticas: fibra multimodo (*Multi-Mode Fiber, MMF*) y fibra monomodo (SMF). Una MMF tiene un núcleo más grande ($\geq 50 \mu\text{m}$), logrando así interconectar dispositivos de transmisión y recepción menos precisos y de menor costos. Aunque, una MMF presenta el inconveniente de distorsión, que por lo general restringe el ancho de banda y la distancia del enlace. Una SMF tiene un núcleo más pequeño ($<10 \mu\text{m}$) y permite enlaces mucho más largos y de mayor rendimiento, pero requiere componentes y métodos de interconexión más costosos. (Qaz, 2020)

2.6. Tipos de dispersión.

La dispersión es la propagación del pulso de luz a medida que viaja a lo largo de una fibra óptica. La dispersión limita el ancho de banda o la capacidad de transporte de información de una fibra. Las velocidades de bits deben ser lo suficientemente bajas para garantizar que los pulsos estén más separados y, por lo tanto, se pueda tolerar una mayor dispersión. (Teja et al., 2012)

2.6.1. Dispersión intermodal.

La dispersión intermodal ocurre solo en fibras multimodo. Surge porque los rayos siguen diferentes caminos a través de la fibra y, en consecuencia, llegan al otro extremo de la fibra en diferentes momentos. El modo es un concepto matemático y físico que describe la propagación de ondas electromagnéticas a través de los medios (Teja et al., 2012). En la figura 2.4 se presenta gráficamente la dispersión intermodal en una fibra multimodo de índice escalonado.

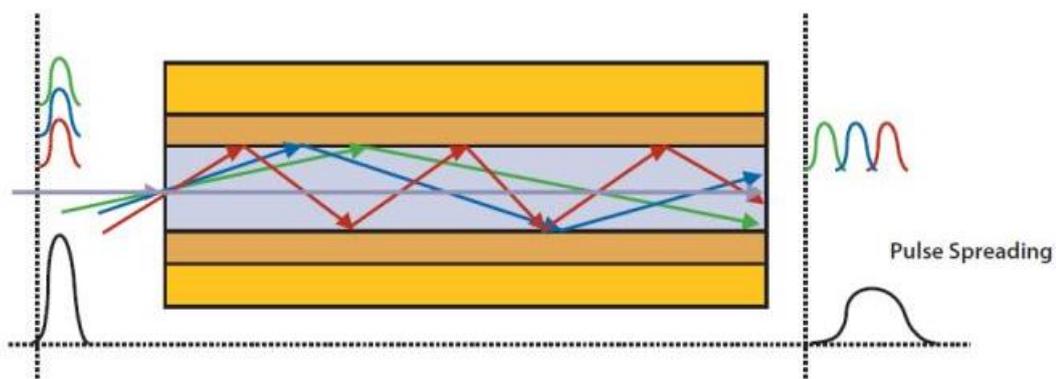


Figura 2. 4: Dispersión intermodal en fibra de índice escalonado.

Fuente: (Singh, 2015)

2.6.2. Dispersión intramodal.

La dispersión intramodal también conocida como dispersión cromática. El rendimiento en fibra monomodo está presente tanto en fibras monomodo como multimodo, en comparación con la dispersión intermodal que sucede en fibras multimodo. Aunque, principalmente limitado debido a que índice de refracción del vidrio se modifica levemente dependiendo de la longitud de onda. La propagación del pulso en la dispersión intramodal surge debido al hecho de que la señal portadora de información no consiste en una sola longitud de onda sino en un ancho espectral finito de la fuente del transmisor. En la figura 2.5 se ilustra un ejemplo del tipo de dispersión cromática.

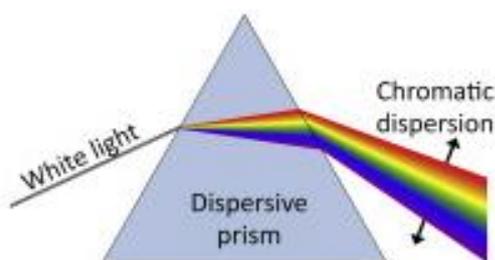


Figura 2. 5: Representación de la dispersión cromática.
Fuente: (Rumpf, 2015).

2.6.3. Dispersión del modo de polarización.

La dispersión del modo de polarización (P MD) significa que la dispersión de velocidad de grupo de las dos polarizaciones ortogonales en la fibra es diferente y no puede compensarse simultáneamente con una sola fibra compensadora de dispersión (DCF). Por lo general, se manifiesta como la división de un pulso en el receptor incluso después de la compensación de la dispersión cromática y causa interferencia entre símbolos. En la figura 2.6 se muestra los tres tipos de secciones transversales para la dispersión del modo de polarización (*Polarization Mode, PM*). (Bowers & Chou, 2005)

Cada uno de los tres diseños (ver figura 2.6) es capaz de generar suficiente birrefringencia incluso para las aplicaciones más exigentes, por lo que la elección precisa de la fibra suele estar determinada por otros criterios, que van desde las características de manipulación hasta el historial. En aplicaciones de telecomunicaciones, la fibra seleccionada suele ser el diseño Panda, ya que, en esencia, Panda es una fibra modificada mediante la

inserción de barras de tensión para proporcionar propiedades de PM. Hasta el día de hoy, las fibras de pajarita se encuentran con mayor frecuencia en aplicaciones de sensores y, de hecho, la mayoría de los giroscopios de fibra óptica en todo el mundo utilizan una fibra de este diseño.

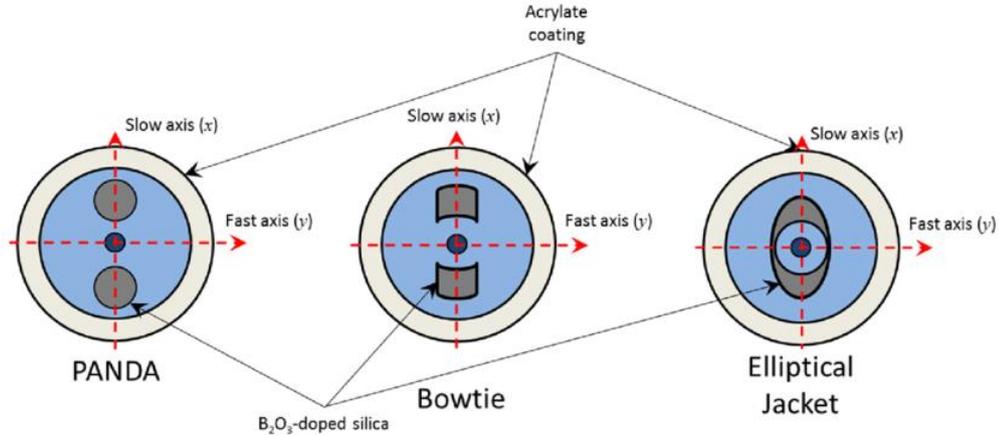


Figura 2. 6: Secciones transversales de tres tipos de fibra de modo de polarización. Fuente: (Primerov, 2013).

2.7. Atenuación.

La atenuación de la fibra se debe a una combinación de absorción de material, dispersión de Mie, dispersión de Rayleigh y pérdida de conexión. En la figura 2.7 se muestra la gráfica de atenuación en fibras con sus respectivas longitudes de onda. Otras formas de atenuación son causadas por tensiones físicas en la fibra, técnicas de empalme imperfectas, manejo de la fibra y fluctuaciones microscópicas en la densidad.

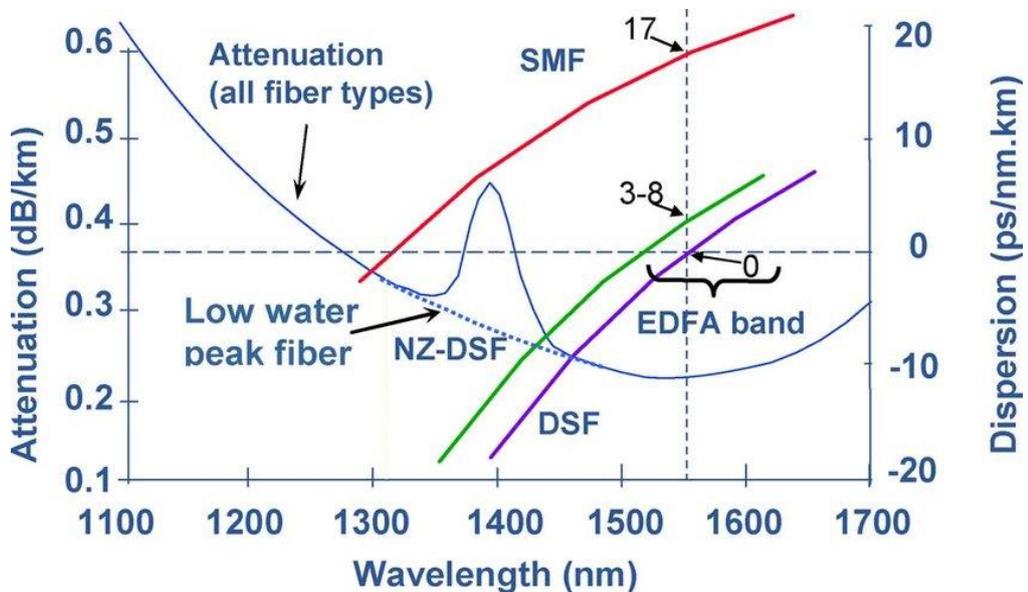


Figura 2. 7: Atenuación lumínica por ZBLAN y fibras de sílice Fuente: (Li & Nolan, 2008)

2.7.1. Pérdida por flexión.

Las pérdidas radiactivas ocurren cuando la fibra óptica experimenta un doblez de radio de curvatura finito. Las fibras pueden estar sujetas a dos tipos de curvas: (a) curvas macroscópicas (véase la figura 2.8) que tienen radios que son grandes en comparación con el diámetro de la fibra, por ejemplo, como las que ocurren cuando un cable de fibra gira en una esquina, y (b) curvas microscópicas aleatorias del eje de la fibra que puede surgir cuando las fibras se incorporan a los cables.

Para curvas macroscópicas, el exceso de pérdida es extremadamente pequeño y no se puede observar. A medida que disminuye el radio de curvatura, la pérdida aumenta exponencialmente hasta que en un cierto radio crítico la pérdida de curvatura se vuelve notable. Si el radio de curvatura se reduce un poco una vez que se alcanza este punto de umbral, las pérdidas de repente se vuelven extremadamente grandes.

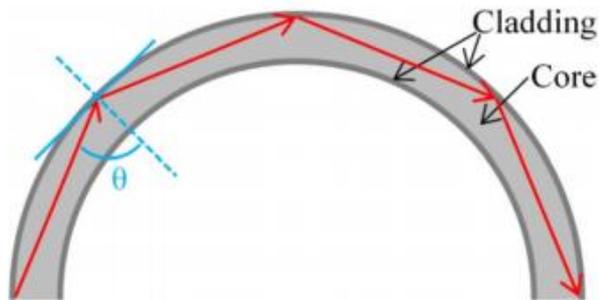


Figura 2. 8: Ilustración de la propagación de un rayo de luz en una fibra óptica circular sin pérdida por macroflexión.

Fuente: (Zhang et al., 2020)

2.7.2. Desalineación mecánica.

Las pérdidas por radiación resultan de desalineaciones mecánicas debido a que el cono de radiación de la fibra emisora no coincide con el cono de aceptación de la fibra receptora. La magnitud de la pérdida de radiación depende del grado de desalineación. Los tipos fundamentales de desalineación entre fibras se muestran en la figura 2.9.

La separación longitudinal ocurre cuando las fibras tienen el mismo eje, pero tienen espacios entre sus extremos. La desalineación angular se produce cuando los dos ejes forman un ángulo de modo que las caras de los extremos

de las fibras ya no son paralelas. El desplazamiento lateral tiene lugar cuando los ejes de las dos fibras están separados por una distancia. La desalineación más común que ocurre en la práctica y que también causa la mayor pérdida de potencia es el desplazamiento lateral. Por ejemplo, el desplazamiento axial reduce el área de superposición de las dos caras extremas del núcleo de la fibra, tal como se muestra en la figura 2.9 y, en consecuencia, reduce la cantidad de potencia óptica que se puede acoplar de una fibra a la otra.

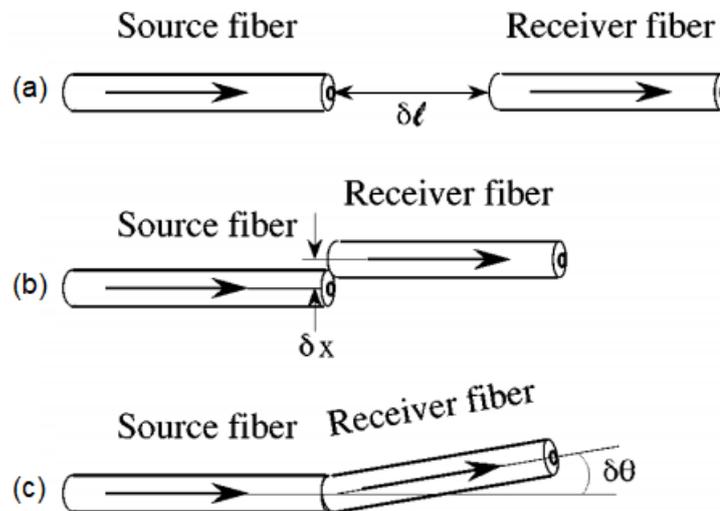


Figura 2. 9: Ilustración de las desalineaciones (a) longitudinal, (b) lateral y (c) angular.

Fuente: (Peter et al., 2002)

2.7.3. Pérdida de acoplamiento.

La pérdida de acoplamiento ocurre cuando dos componentes se unen. La fibra óptica está muy sujeta a pérdidas de acoplamiento. Estas son algunas de las pérdidas de acoplamiento.

Tabla 2. 1: Diferentes pérdidas de acoplamiento

Pérdidas	Causas
Fuente de fibra	Desde la fuente hasta la conexión de fibra
Empalme de fibra	Unión permanente entre dos fibras
Conectores de fibra óptica	Pérdida de fibra a conector

Elaborado por: Autor.

2.8. Descripción general del diseño del enlace óptico.

El diseño de un enlace óptico implica muchas variables interrelacionadas entre las características de funcionamiento de la fibra, la fuente y el fotodetector, de modo que el diseño y el análisis del enlace real pueden requerir varias iteraciones antes de que se completen satisfactoriamente. Dado que las restricciones de rendimiento y costo son factores muy importantes, los componentes se eligen sabiamente para garantizar que se pueda alcanzar el nivel de rendimiento deseado durante la vida útil esperada del sistema sin especificar demasiado las características de los componentes. Los siguientes requisitos clave del sistema son necesarios para analizar un enlace: (1) distancia de transmisión, (b) velocidad de datos o el ancho de banda del canal, y (c) tasa de errores de bits (BER).

El sistema típico de comunicación óptica (véase la figura 2.10) consta de un transmisor, una fuente óptica, un medio de transmisión, un detector y un receptor. En un sistema de este tipo, el transmisor es uno de los componentes clave cuando actúa como interfaz entre la electrónica y los emisores.

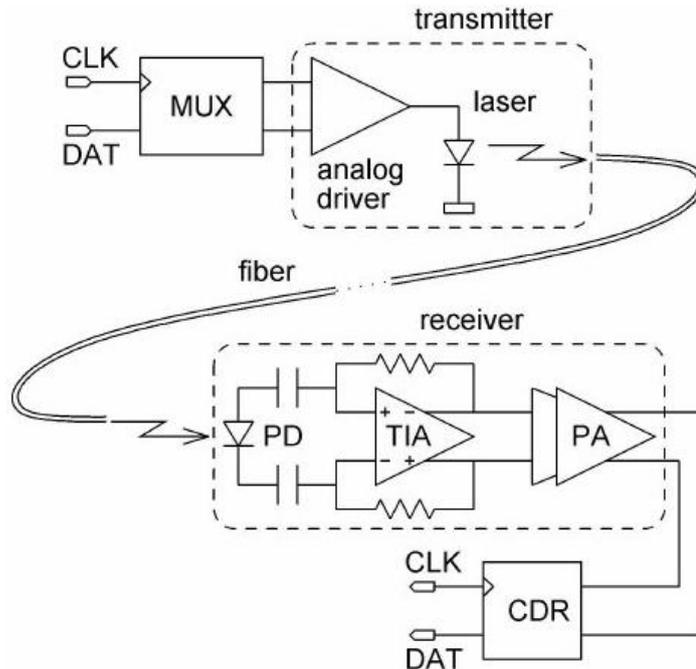


Figura 2. 10: Circuito de interfaz típico para enlace de fibra óptica
Fuente: (Leroux et al., 2008)

Para pasar información eléctrica a través de una fibra, se utiliza un transmisor óptico para convertir los impulsos eléctricos en luz modulada, que

luego es lanzada o enfocada por el transmisor en la fibra. El transmisor generalmente consta de un circuito integrado de silicio que convierte los niveles de voltaje de entrada de una computadora en pulsos de corriente. Estos pulsos de corriente, a su vez, impulsan un diodo emisor de luz (LED).

La luz de salida del diodo es luego enfocada por una o más lentes en la fibra. El balance del enlace permite calcular hasta qué punto el enlace transportará las señales sin un repetidor en sistemas con atenuación limitada o cuántos conectores y empalmes se pueden utilizar a una distancia determinada en enlaces con dispersión limitada. Otro aspecto del enlace será la consideración de elegir el tipo de fibra.

Para mantener un rendimiento óptimo, la conexión también debe proteger los extremos de la fibra de los daños que puedan ocurrir debido a la manipulación (conexión y desconexión), debe ser insensible a factores ambientales (por ejemplo, humedad y polvo) debe hacer frente a la carga de tracción en el cable. Además, lo ideal es que el conector sea un componente de coste perdido que pueda instalarse con relativa facilidad.

Por lo tanto, los conectores de fibra óptica pueden considerarse en tres áreas principales:

- La terminación de la fibra permite proteger y ubicar los extremos de la fibra;
- La alineación del extremo de la fibra para proporcionar un acoplamiento óptico óptimo;
- La capa exterior, que mantiene la conexión y la alineación de la fibra, protege los extremos de la fibra del medio ambiente y proporciona la resistencia adecuada en la unión.

2.8.1. Fuente óptica.

En cualquier sistema de fibra óptica los emisores de luz son el elemento clave. Este componente convierte las señales eléctricas en señales ópticas correspondientes que se pueden inyectar en fibras ópticas. El emisor de luz es un elemento importante porque suele ser el elemento más caro del sistema

y sus características suelen afectar en gran medida el límite de rendimiento final de un enlace determinado. Hay dos tipos de emisores de luz de uso generalizado: diodos láser (LD) y diodos emisores de luz (LED).

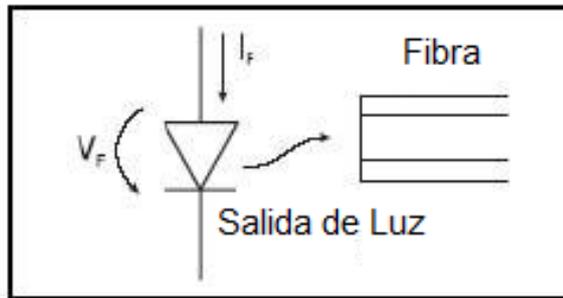


Figura 2. 11: LED/LD que convierte la señal eléctrica en señal luminosa
Elaborado por: Autor.

En la tabla 2.2 se muestra un cuadro comparativo entre las fuentes ópticas láser y LED.

Tabla 2. 2: Comparación de LED y LD.

Parámetros	LED	LD
Potencia de Salida	Linealmente proporcional a la corriente de conducción	Proporcional a la corriente por encima del umbral
Corriente	Corriente de accionamiento de 50 a 100 mA pico	Corriente umbral de 5 a 40 mA
Potencia acoplada	Moderado	Alto
Banda Ancha	Moderado	Alto
Longitudes de onda disponibles	0,66 a 1,65 μm	0,78 a 1,65 μm
Espectro de emisión	40 nm a 190 nm FWHM	0.00001nm a 10nm FWHM
Costo	\$ 5 a \$ 300	\$ 5 a \$ 3000

Elaborado por: Autor.

2.8.2. Empalme de fibra.

Un empalme de fibra es una unión permanente entre dos fibras. Por lo general, se utilizan para crear enlaces ópticos largos o en situaciones en las que no se necesitan conexiones y desconexiones frecuentes. Al realizar y

evaluar tales empalmes, se deben tener en cuenta las diferencias geométricas de las dos fibras, las desalineaciones de las fibras en la unión y la resistencia mecánica del empalme. El empalme por fusión es una de las técnicas de empalme de fibras que produce una unión permanente.

Los empalmes por fusión se realizan uniendo térmicamente los extremos de las fibras preparadas. El empalme por fusión implica una serie de pasos. Primero, la fibra debe exponerse cortando el cable. Luego, la cubierta de plástico protectora debe pelarse desde unos pocos milímetros hasta algunos centímetros de los extremos de la fibra a empalmar. Los extremos de la fibra deben cortarse para producir un ángulo de corte que esté dentro de 1 a 3 grados de ser perpendicular al eje de la fibra. Los extremos deben mantenerse limpios hasta que se fusionen.

El siguiente paso es la alineación de las fibras, que se puede realizar de forma manual o automática mediante diferentes modelos de empalmado. Después de la alineación preliminar, los extremos pueden fusionarse previamente durante aproximadamente un segundo con un arco moderado que limpia sus extremos y redondea sus bordes. Luego, estos extremos se juntan, lo que permite probar la transmisión de potencia para ver con qué precisión están alineados. Una vez que los resultados son satisfactorios, se dispara el arco para soldar los dos extremos de las fibras. Se debe tener cuidado para asegurar la sincronización adecuada del arco para que los extremos de las fibras se calienten a la temperatura adecuada.

Una vez que la junta se enfría, se puede recubrir con un material plástico para protegerla contra la degradación ambiental. El área empalmada también se puede encerrar en una chaqueta de plástico. Luego, todo el conjunto de empalme se encierra mecánicamente para su protección, que a su vez se monta en una caja de empalme. La caja alrededor del empalme individual proporciona alivio de tensión.

Esta técnica puede producir pérdidas de empalme muy bajas (normalmente con un promedio de menos de 0,01 dB). Sin embargo, se debe

tener cuidado en esta técnica, ya que el daño de la superficie debido a la manipulación, el crecimiento de defectos en la superficie creado durante el calentamiento y las tensiones residuales inducidas cerca de la junta como resultado de cambios en la composición química que surgen de la fusión del material pueden producir un empalme débil.

2.8.3. Conectores de fibra óptica.

Se ha desarrollado una amplia variedad de conectores de fibra óptica para numerosas aplicaciones diferentes. Sus usos van desde simples conectores de fibra de un solo canal a conectores de fibra en una ubicación benigna hasta conectores multicanal utilizados en entornos militares hostiles. Algunos de los principales requisitos de un buen diseño de conector son los siguientes:

- Pérdidas de acoplamiento bajas:

El conjunto del conector debe mantener estrictas tolerancias de alineación para asegurar bajas pérdidas de acoplamiento. Estas bajas pérdidas no deben cambiar significativamente durante el funcionamiento o después de numerosas conexiones y desconexiones.

- Intercambiabilidad:

Los conectores del mismo tipo deben ser compatibles de un fabricante a otro.

- Facilidad de montaje:

Un técnico de servicio debería poder instalar fácilmente el conector en un entorno de campo. La pérdida del conector también debe ser bastante insensible a la habilidad de ensamblaje del técnico.

- Baja sensibilidad ambiental:

Condiciones como la temperatura, el polvo y la humedad deberían tener un pequeño efecto en las variaciones de pérdida del conector.

- Construcción confiable y de bajo costo:

El conector debe tener una precisión adecuada a la aplicación, pero su costo no debe ser un factor importante en el sistema de fibra.

- Facilidad de conexión:

En general, uno debe poder acoplar y separar el conector simplemente a mano.

2.8.4. Estructura básica del conector de fibra óptica SC.

Varios fabricantes han desarrollado más de una docena de tipos de conectores de fibra óptica desde la década de 1980. Aunque el diseño mecánico varía mucho entre los diferentes tipos de conectores, los elementos más comunes en un conector de fibra se pueden resumir en la siguiente imagen.

El ejemplo que se muestra en la figura 2.12 es un conector SC desarrollado por NTT (Nippon Telegraph and Telephone) de Japón. La figura 2.13 muestra los componentes internos del conector SC 20.



Figura 2. 12: Una muestra de conector SC
Elaborado por: Autor.

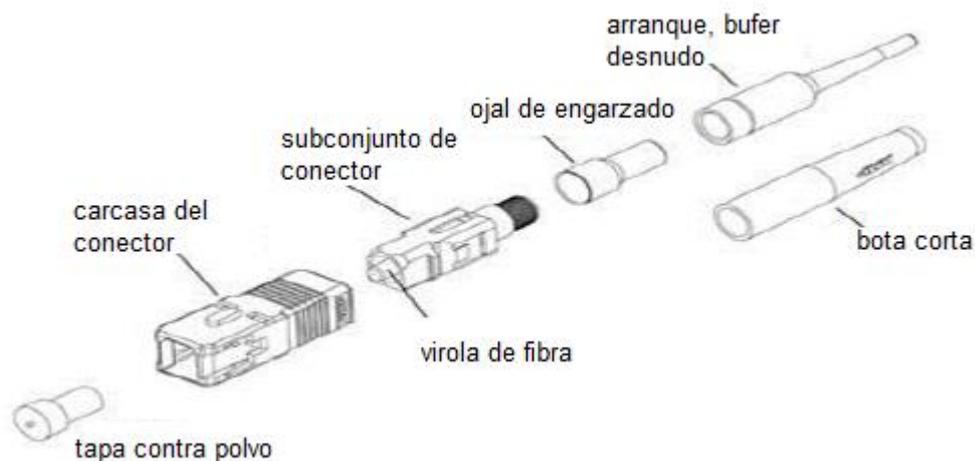


Figura 2. 13: Estructura del conector SC 20.
Elaborado por: Autor.

2.9. Ventajas de las comunicaciones por fibra óptica.

A continuación, se describen las ventajas de las comunicaciones por fibra óptica:

- Pérdida de transmisión baja.

El desarrollo de fibras ópticas durante los últimos 40 años ha dado como resultado la producción de fibras ópticas que presentan una atenuación o

pérdida de transmisión muy baja. Se han fabricado fibras con pérdidas tan bajas como 0.1 dB/km y esta característica facilita la implementación de enlaces de comunicación con un espaciado de repetidor extremadamente amplio.

- Pequeño tamaño y peso

Las fibras ópticas tienen pequeños diámetros que a menudo no son mayores que el diámetro de un cabello humano. Incluso con revestimientos protectores, son mucho más pequeños y livianos que los cables de cobre correspondientes.

- Aislamiento eléctrico

Las fibras ópticas que se fabrican a partir de vidrio, o algunas veces un polímero plástico, son aislantes eléctricos y, por lo tanto, a diferencia de sus contrapartes, no presentan problemas de bucle de tierra ni de interfaz.

- Gran ancho de banda

La frecuencia de la portadora óptica produce un ancho de banda de transmisión potencial mucho mayor que los sistemas de cables metálicos. La capacidad de transporte de información del sistema de fibra óptica ha demostrado ser muy superior a los mejores sistemas de cable de cobre. En comparación, las pérdidas en los sistemas de cable coaxial de banda ancha restringen la distancia de transmisión a solo unos pocos kilómetros en anchos de banda superiores a 100 MHz.

- Fiabilidad del sistema

Estas características provienen principalmente de la propiedad de baja pérdida de los cables de fibra óptica que reduce el requisito de repetidores intermedios o amplificadores de línea para aumentar la intensidad de la señal transmitida. Además, la fiabilidad de los componentes ópticos ya no es un problema con una vida útil prevista de 20 años o más, reduciendo en lo sucesivo el tiempo y los costes de mantenimiento.

- Bajo costo

Las fibras ópticas ofrecen un potencial de comunicación de línea de bajo costo en comparación con aquellas con conductores de cobre. El costo general del sistema cuando se utilizan comunicaciones de fibra óptica en

enlaces de largo alcance es sustancialmente menor que el de los sistemas de líneas eléctricas equivalentes.

- Inmunidad a interferencias y diafonía

Las fibras ópticas forman una guía de ondas dieléctrica y, por lo tanto, están libres de interferencia electromagnética (EMI), interferencia de radiofrecuencia (RFI) o interruptores transitorios que dan pulsos electromagnéticos (EMP). De ahora en adelante, el funcionamiento de un sistema de comunicación óptica no requiere protección contra EMI.

- Seguridad de la señal

La luz de las fibras ópticas no se irradia significativamente y, por lo tanto, proporcionan un alto grado de seguridad de la señal. A diferencia de la situación con los cables de cobre, una señal óptica transmitida no se puede obtener de una fibra de una manera no invasiva (es decir, sin extraer energía óptica de la fibra).

2.10. Presupuesto de potencia del enlace óptico.

En la figura 2.14 se muestra un modelo de pérdida de potencia óptica para un enlace punto a punto. La potencia óptica recibida en el fotodetector depende de la cantidad de luz acoplada a la fibra y de las pérdidas que se producen en la fibra y en los conectores y empalmes.

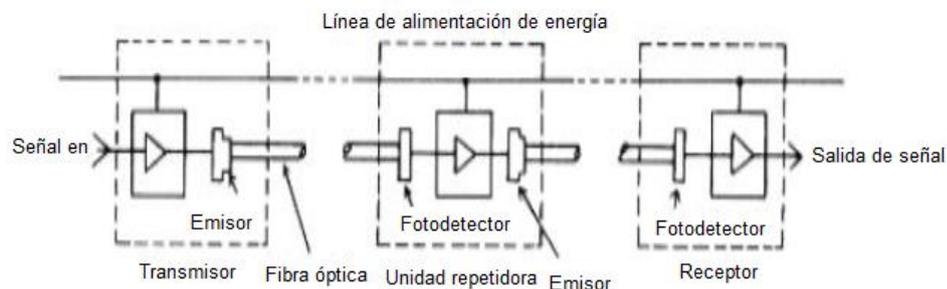


Figura 2. 14: Diagrama de enlace
Elaborado por: Autor.

El presupuesto de pérdidas del enlace se deriva de las contribuciones de pérdidas secuenciales de cada elemento del enlace. Cada una de estas pérdidas se expresa en decibeles (dB) como:

$$Pérdida = 10 \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$$

donde P_{in} y P_{out} son los poderes ópticos que entran y salen del elemento de pérdida, respectivamente. Un margen de enlace de 6 a 8 dB se utiliza generalmente para los sistemas que no se espera que incorporen componentes adicionales en el enlace en el futuro.

Tabla 2. 3: Presupuesto de potencia de enlace óptico.

Potencia de salida del transmisor óptico	-13 dBm
Sensibilidad del receptor	-42 dBm
Margen requerido	29 dBm
Pérdida de fibra 3.5 dBm/km X 5 km	17.5 dB
Pérdida de conector 1dB x 2 conectores	2 dB
Pérdida total de empalme (0.5 dB X 5)	2.5 dB
Margen del sistema	6 dB
Atenuación total	28 dB

Elaborado por: Autor.

El presupuesto de pérdida de enlace simplemente considera la pérdida de potencia óptica total permitida entre la fuente de luz y el fotodetector, y asigna esta pérdida a la atenuación del cable, la pérdida del conector, la pérdida del empalmado y el margen del sistema. La tabla 2.3 muestra un ejemplo del cálculo del balance de potencia del enlace.

En este ejemplo, se tiene un margen de potencia en exceso de 29dB - 28dB = 1 dB. Por lo tanto, se tiene un margen total de 7dB cuando en la tabla 2.3 se indica un margen del sistema de 6dB.

2.11. Presupuesto de tiempo de subida.

El presupuesto de tiempo de subida determina la limitación de dispersión de un enlace. La dispersión es la ampliación de un pulso cuando viaja a través de una fibra óptica. Se define el tiempo de subida en función del material

(cromático) (t_{mat}) y la dispersión modal (t_{mod}). Por tanto, el tiempo de subida total del sistema es el valor eficaz de todos los tiempos de subida.

$$\text{Tiempo de subida total : } t_{sub} = \sqrt{t_{tx}^2 + t_{mat}^2 + t_{mod}^2 + t_{rx}^2}$$

Para los datos digitales, se utilizan dos esquemas de codificación principales. Son el retorno a cero (RZ) y el no retorno a cero (NRZ). El método NRZ ocupa todo el ancho de bits (período de bits), mientras que el método RZ ocupa solo una parte del período de bits.

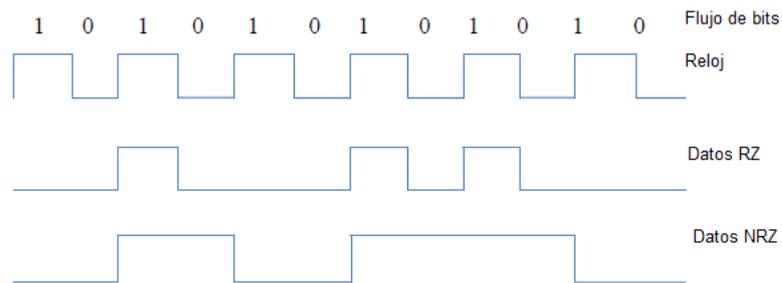


Figura 2. 15: Esquemas de codificación RZ y NRZ
Elaborado por: Autor.

Una regla general es que el tiempo de subida del sistema debe ser menor que un porcentaje de uno de estos métodos. El período de bits en segundos es el recíproco de la velocidad de bits en hercios.

$$T_{sub}(RZ) \leq 35\% \left(\frac{1}{tasa\ de\ bits} \right) = 35\%(\text{Período de bits})$$

$$T_{sub}(NRZ) \leq 70\% \left(\frac{1}{tasa\ de\ bits} \right) = 70\%(\text{Período de bits})$$

Capítulo 3: Diseño, Implementación y resultados

3.1. Visión general del sistema.

El crecimiento de dispositivos sofisticados e inteligentes que trae la necesidad de estar prácticamente siempre conectados con cualquier cosa y todo lo que se pueda pensar está creando una demanda de altas velocidades de datos que podrían soportar diferentes servicios como triple play (telefonía, TV e internet). Por lo tanto, hay un despliegue masivo de fibra hasta el hogar (Fiber-To-The-Home, FTTH) para atender a más usuarios con un mayor ancho de banda.

La arquitectura de red óptica pasiva (*Passive Optical Network, PON*) se adopta en todo el mundo para proporcionar un mayor soporte de ancho de banda. Más específicamente, Gigabit PON o GPON proporcionan una potente solución punto a multipunto para satisfacer la creciente demanda de capacidad en la parte de acceso de la infraestructura de comunicación, entre la oficina central del proveedor de servicios (*Central Office, CO*) y varias unidades de red óptica (*Optical Network Unit, ONU*) en las instalaciones del cliente o usuario.

Por ejemplo, GPON híbrido es una red óptica pasiva híbrida, donde WDM – GPON y TDM – GPON están integrados en una sola red óptica pasiva. TDM/WDM híbrido significa que para el flujo descendente se está utilizando multiplexación por división de longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexing, WDM*) solamente y en el flujo ascendente se está utilizando la multiplexación por división de longitud de onda (WDM) junto con la multiplexación por división de tiempo (*Time Division Multiplexing, TDM*) para que múltiples unidades de red óptica (ONU) que utilicen la misma longitud de onda no envíen datos superpuestos.

En el extremo del usuario, la implementación del canal óptico de espacio libre (*Fiber Space Optical, FSO*) en lugar de fibra óptica es el enfoque principal de este trabajo. FSO se puede considerar como una alternativa al cable de

fibra óptica o los sistemas de RF/microondas, especialmente cuando las conexiones físicas no son prácticas debido a varias consideraciones y se ha convertido en la opción ideal para la tecnología de acceso GPON.

Diferentes investigaciones han trabajado con GPON TDM/WDM (GPON híbrido) utilizando velocidades de 2.5 Gbps y 1.244 Gbps para comunicaciones downstream y upstream, respectivamente. Se ha visto en la etapa de investigación, que el sistema GPON híbrido está completamente basado en fibra óptica bidireccional principal que conecta al terminal de línea óptica (*Optical Line Terminal, OLT*) a la red de distribución óptica (*Optical Distribution Network, ODN*) y cuya longitud es en promedio 5 Km. Es decir, que, en el lado de la red de acceso, las longitudes de la fibra óptica bidireccional en cada área son diferentes dependiendo de los requisitos de esa área.

En este trabajo, se va a implementar en el software OptiSystem 7.0 canales FSO en el lado de la ODN/ONU. El cable principal de fibra de la red troncal (backbone) tiene una longitud de 50 km. y se simulan dos áreas diferentes, a saber, el bloque hospital y edificio (Building). Cada bloque tiene un canal FSO para upstream y downstream. La longitud del canal FSO es uno de los principales problemas que pueden afectar el rendimiento del sistema.

Entonces, el objetivo de este trabajo es modificar los rangos entre 50 m y 250 m y así analizar el rendimiento del sistema GPON híbrido. Teniendo en cuenta el medio ambiente de Guayaquil, este sistema proporcionará un rendimiento en términos de factor de calidad (Q) y tasa de error de bits (BER) junto con sus respectivos diagramas de ojos. Las secciones restantes se organizan de la siguiente manera. En la sección 3.2 se analiza la arquitectura del sistema, destacando por separado los componentes de comunicación downstream y upstream, su sistema de comunicación y los parámetros para obtener las métricas ya indicadas. En la sección 3.3 se discuten los resultados experimentales y se proporciona el análisis de desempeño en forma de diagramas de ojo, calidad del factor Q y BER con respecto a los múltiples

rangos del canal FSO. Y finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo propuesto.

3.2. Arquitectura del sistema propuesto.

La figura 3.1 muestra el diseño completo del sistema GPON TDM/WDM (GPON híbrido). Para comprender, primero se explica la conectividad descendente (downstream), que es de la OLT a las ONUs y luego se explica la conectividad ascendente (upstream), es decir, de las ONUs a la OLT. Como se ve en la figura 3.1, el sistema consta de tres secciones principales, primero la OLT, seguido del canal backbone (red troncal) principal y finalmente la red de acceso (hospital y edificio). La tasa de bits utilizada en este sistema es de 2.5 Gbps. El sistema se basa en dos áreas, a saber, el bloque hospital y bloque edificio. En consecuencia, para esta propuesta se utilizarán dos longitudes de onda.

3.2.1. Arquitectura de la comunicación downstream.

Con referencia a la figura 3.1, el terminal de línea óptica (OLT) consta de un transmisor de multiplexación por división de longitud de onda (WDM) que puede proporcionar múltiples longitudes de onda. Estas longitudes de onda son multiplexadas por el multiplexor WDM. En esta parte se utiliza dos longitudes de onda diferentes, tales como, $\lambda_1 = 1450 \text{ nm}$ y $\lambda_2 = 1470 \text{ nm}$ con un espaciado de frecuencia de 20 nm. La relación de extinción se establece en 10 dB. Se requiere que el sistema WDM combine las longitudes de onda que se transmitirán en una sola fibra. El sistema WDM tiene un ancho de banda de 80 nm con una pérdida de inserción de 2 dB.

Para garantizar una transmisión de señal de buena calidad, también se utiliza un amplificador óptico con una ganancia de 15 dB. Se utiliza un circulador bidireccional para transmitir datos descendentes a las ONUs y recibir tráfico ascendente de las ONUs. La señal óptica descendente pasa a través del canal backbone principal, que en si es una fibra óptica bidireccional que tiene una longitud de 50 km. En la tabla 3.1 se muestra la configuración de los parámetros de la fibra óptica bidireccional.

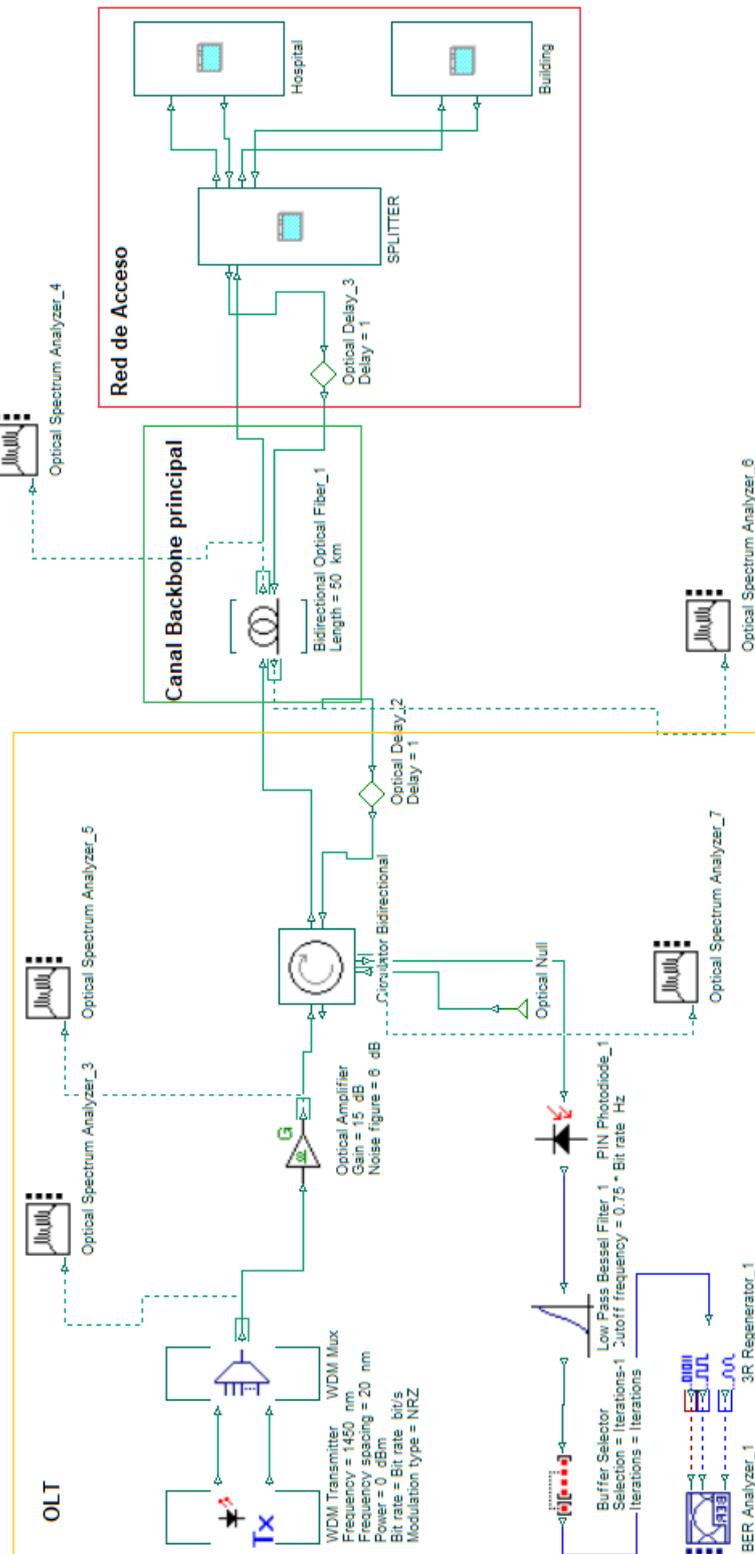


Figura 3. 1: Diseño del modelo de red GPON híbrida.
Elaborado por: Autor.

Finalmente, se observa en la figura 3.1 la red de acceso o llamada también ODN que consta del subsistema de divisor óptico (Splitter) y dos ONUs, a saber, bloques Hospital y edificio. La primera salida del divisor óptico

está conectada al subsistema bloque hospital (véase la figura 3.2) y la segunda salida está conectada al subsistema bloque edificio (véase la figura 3.4).

Tabla 3. 1: Parámetros de Fibra Óptica Bidireccional.

Parámetros	Valor
Longitud de onda	150 nm
Distancia del enlace	50 km
Atenuación de la fibra óptica	0.2 dB/km
Dispersión de la fibra	16.75 ps/nm/km
Pendiente de dispersión de la fibra	0.075 ps/nm ² /km

Elaborado por: Autor.

La figura 3.2 muestra el subsistema bloque hospital, que contiene el canal FSO para enlace de datos descendente (downstream). La configuración de los parámetros del canal FSO se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3. 2: Parámetros del canal FSO.

Parámetros	Valor
Rango	$50\text{ m} \leq R \leq 250\text{ m}$
Atenuación	$25 \frac{\text{dB}}{\text{km}}$
Diámetro de apertura del transmisor	0.05 m
Divergencia del haz	$2\text{ m} \cdot \text{rad}$
Diámetro de apertura del receptor	0.20 m

Elaborado por: Autor.

La longitud de los canales FSO varía en el rango de 50 m y 250 m. Este canal está conectado a la ONU del bloque hospital (véase la figura 3.3) donde los datos descendentes son detectados por un fotodetector PIN que transformará la señal óptica en eléctrica. Esta salida está conectada a un filtro pasa bajo de Bessel y finalmente a un generador 3R que está conectado al analizador de la tasa de error de bits (BER) para detectar el rendimiento en

términos del factor Q, diagrama de ojo, etc. La otra parte de la ONU se analiza en la arquitectura ascendente que se describe en la sección 3.2.2.

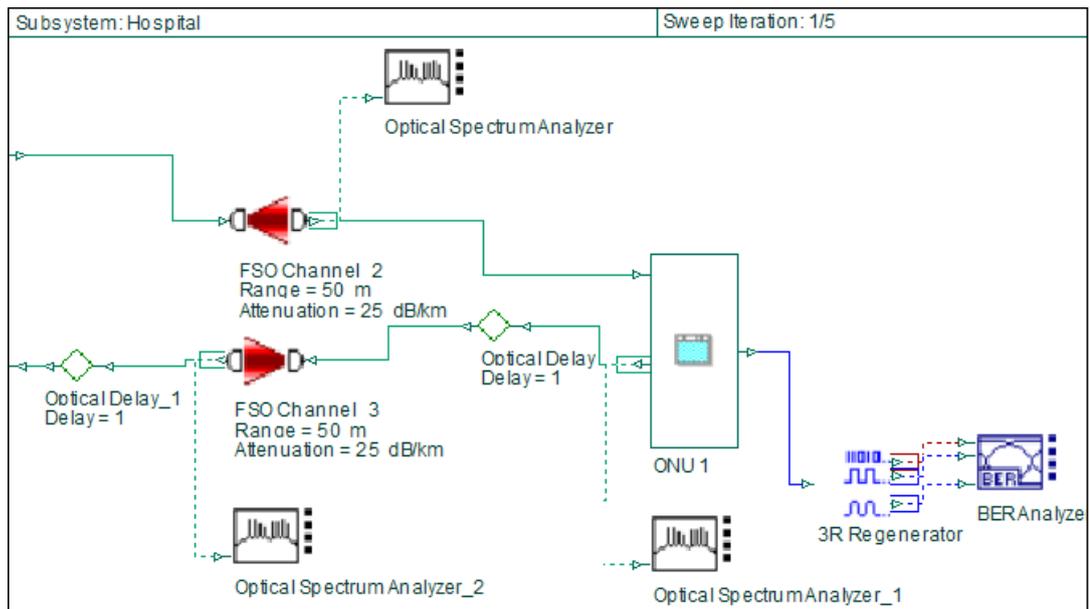


Figura 3. 2: Estructura del subsistema bloque hospital del sistema propuesto.

Elaborado por: Autor.

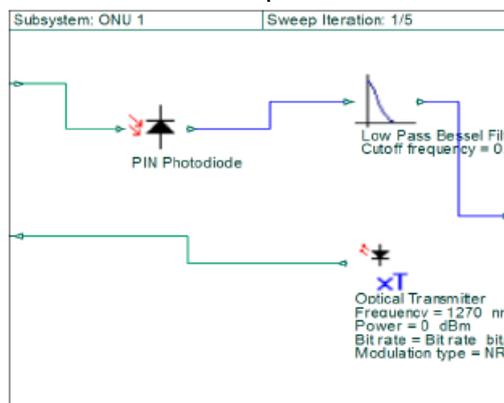


Figura 3. 3: Estructura de la ONU para el subsistema bloque hospital.

Elaborado por: Autor.

La segunda salida del divisor óptico está conectada al bloque edificio tal como se muestra en la figura 3.4. Este bloque contiene dos secciones de edificios y ambos recibirán una longitud de onda $\lambda_2 = 1470 \text{ nm}$.

En la figura 3.5 se muestra que el canal FSO se usa tanto para enlaces de datos descendentes para ascendentes, y su salida está nuevamente conectada a un divisor óptico 1:2 porque hay dos ONUs o dos secciones del bloque edificio, cada una de las cuales recibe la misma longitud de onda en el enlace de datos descendente. Dentro de la unidad del edificio, hay

nuevamente una fibra óptica bidireccional de 50 m que se utiliza para controlar los datos ascendente y descendente de ambas ONUs. La estructura de la ONU se muestra en la figura 3.5.

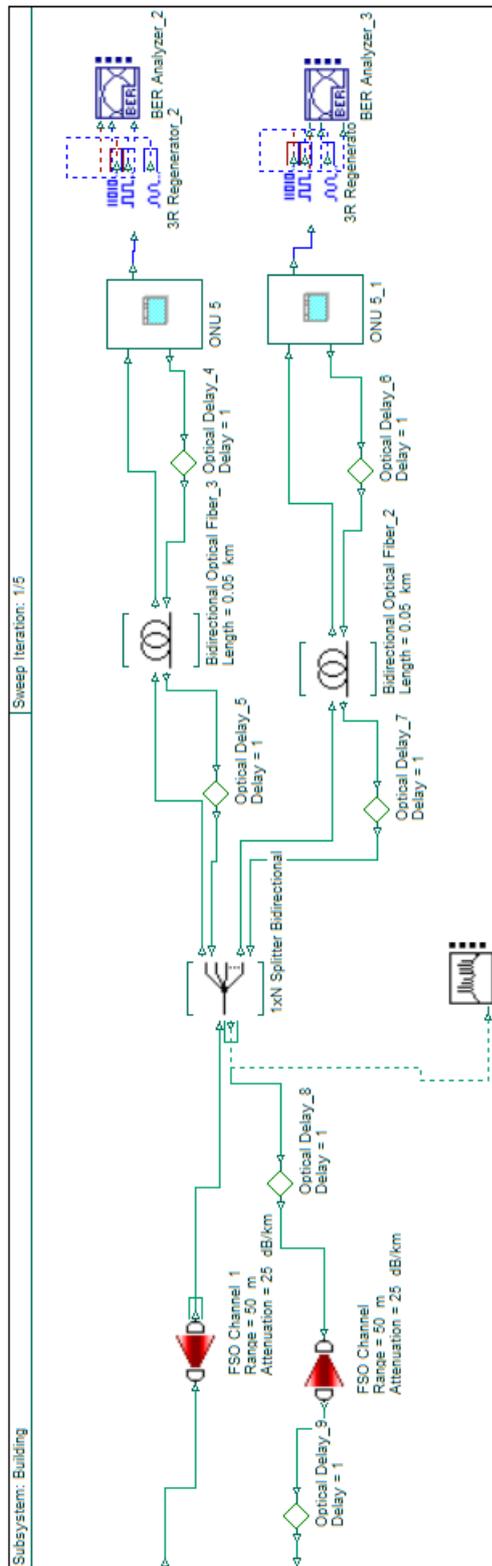


Figura 3. 4: Estructura del subsistema bloque edificio.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.5 también contiene el mismo mecanismo de detección, es decir, el fotodetector PIN que está conectado al filtro pasa bajo de Bessel de pérdida que está conectado al generador 3R y al analizador de la tasa de error de bits (BER). La otra parte es el enlace de datos ascendente, que se analiza en la arquitectura ascendente.

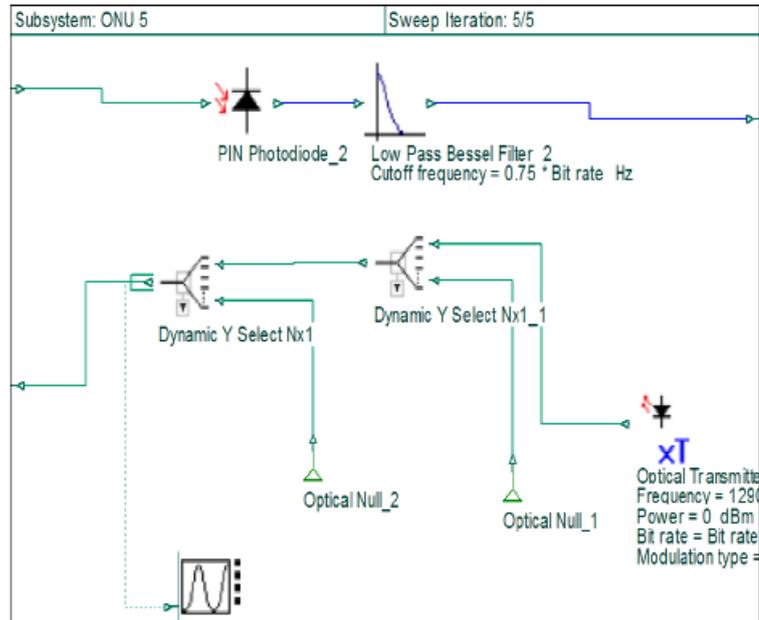


Figura 3. 5: Estructura de la ONU para el subsistema bloque edificio.
Elaborado por: Autor.

3.2.2. Arquitectura de la comunicación upstream.

En sentido ascendente, la señal óptica viajará desde cada usuario final (ONU) hasta la OLT. Así que ahora la OLT es el receptor y cada ONU funcionará como transmisor. Consulte la figura 3.3 para la ONU del subsistema bloque hospital. Aquí solo hay una ONU, el transmisor óptico transmitirá a longitud de onda de 1270 nm con una potencia de 0 dB (1 mW). Estos datos se enviarán a la OLT a través del canal FSO que tiene los mismos parámetros mostrados en la tabla 3.2. La salida de este canal FSO está conectada al divisor óptico que ahora funciona como multiplexor.

Esta salida del divisor óptica está conectada a la fibra óptica bidireccional de la red troncal (backbone) que enviará los datos ascendentes a la OLT. En la OLT, el circulador óptico es bidireccional, por lo que los datos ascendentes se recibirán por separado en la OLT a través del fotodetector PIN, el filtro pasa bajo, el selector de búfer, el generador 3R y finalmente el analizador BER.

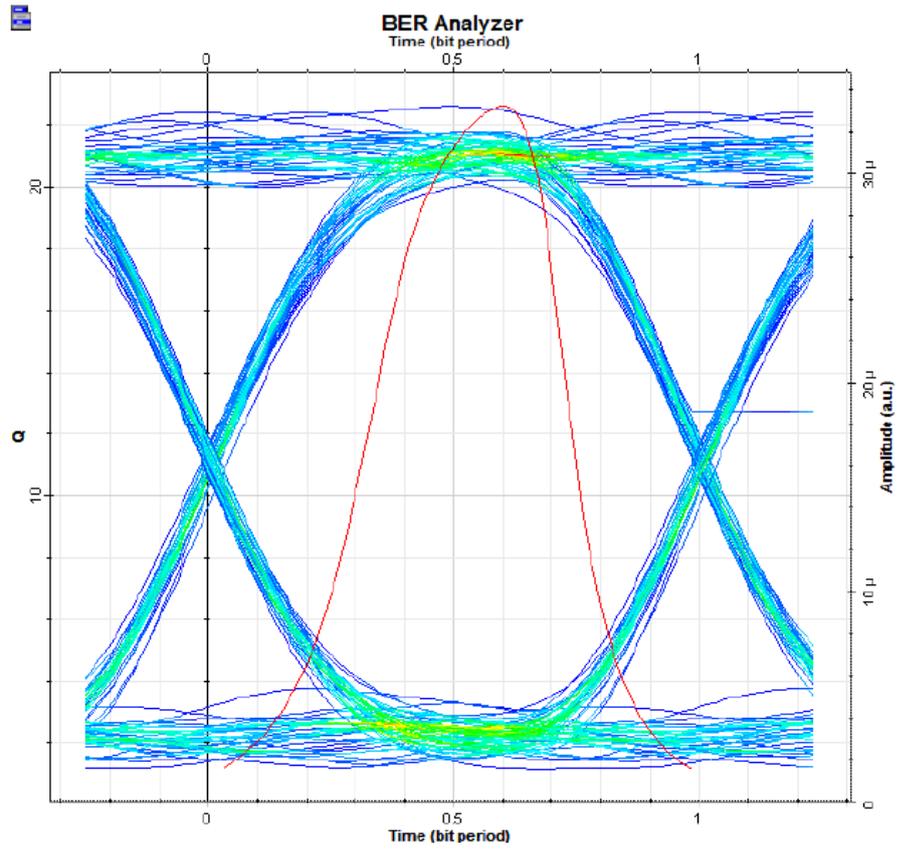
En la figura 3.4 se muestran dos secciones para el subsistema bloque edificio, por lo que ambas compartirán la misma longitud de onda de 1290 nm. En este caso, se puede aprovechar las ventajas del acceso múltiple por división de tiempo (*Time Division Multiple Access, TDMA*) asignando un intervalo de tiempo específico a cada ONU para que los datos no se superpongan. Por lo tanto, como se muestra en la figura 3.5, la ONU del subsistema bloque edificio contiene un transmisor óptico cuya salida está conectada a una selección dinámica y que permitirá a la ONU enviar sus datos en su tiempo de duración específico. La salida de la selección dinámica está conectada a otros dispositivos que ya se explicaron y que se mostraron en la figura 3.4. En la siguiente sección 3.4 se analizan los resultados obtenidos para las arquitecturas descendente y ascendente.

3.3. Análisis de resultados experimentales obtenidos en la simulación.

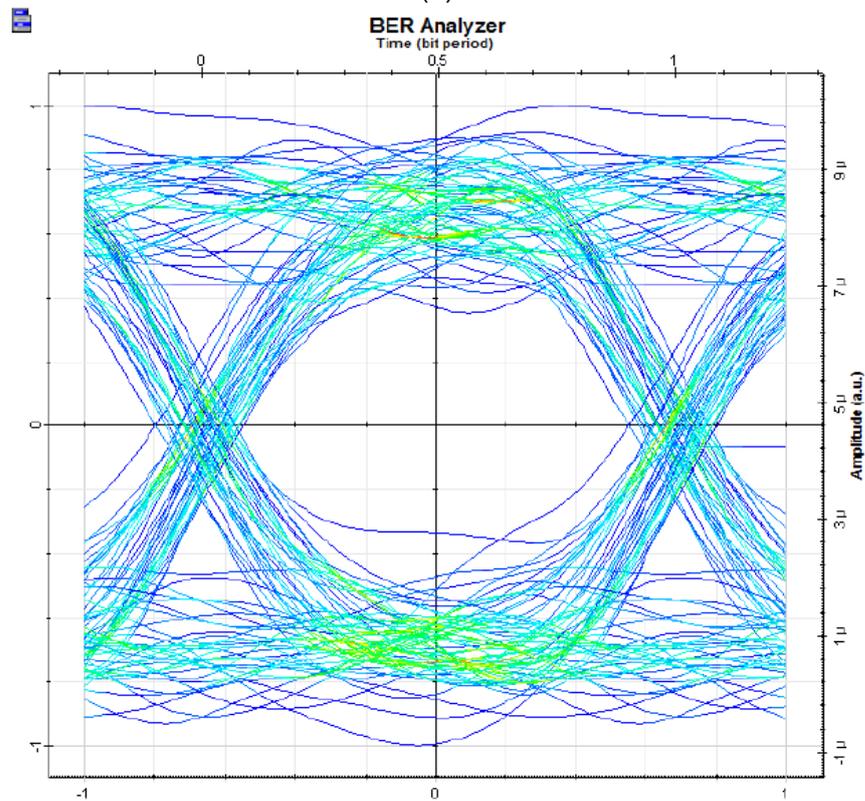
Con la explicación anterior de la arquitectura completa del sistema, aquí se analizan los resultados experimentales. Los resultados están en forma de diagramas de ojos, máximos factor Q, BER mínimo con respecto al rango del canal FSO. Por lo tanto, en esta sección, se determina la viabilidad del canal FSO en la red de última milla.

3.3.1. Análisis de rendimiento de la comunicación downstream.

En el caso de la ONU para el subsistema bloque hospital, la figura 3.6 muestra los resultados del diagrama de ojo cuando el rango del canal FSO es de 50 m y 100 m. Después de 100 m, el diagrama del ojo se degrada significativamente. En la tabla 3.3 se muestra los valores del analizador BER para el bloque hospital, lo que muestra claramente que el canal FSO está dando su rendimiento máximo en un rango de 50 a 100 m. Mientras, que en las figuras 3.7 y 3.8 muestran la tasa de error (BER) mínimo y del factor Q, respectivamente con respecto al rango del canal FSO y muestra que después de 100 m, la BER y el factor Q muestra un rendimiento deficiente y, por lo tanto, el canal FSO es más adecuado para un rango de 50 a 100 m.



(a)



(b)

Figura 3. 6: Resultados del analizador de BER y diagrama de ojo del canal FSO descendente del subsistema bloque hospital para (a) 50 m y (b) 100 m.

Elaborado por: Autor.

Tabla 3. 3: Resultados numéricos del analizador BER para el subsistema bloque hospital.

Alcance (m)	Máximo Factor Q	Mínimo BER	Mínimo log BER
50	22.580	3.403×10^{-113}	-112.468
100	6.221	2.469×10^{-10}	-9.608
150	2.143	0.016	-1.796
200	0	1	0
250	0	1	0

Elaborado por: Autor.

 **Min. log of BER (Range (m))**

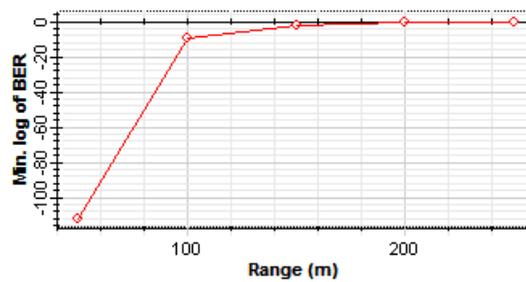


Figura 3. 7: Rango mínimo de canales BER contra FSO para subsistema bloque hospital.

Elaborado por: Autor.

 **Max. Q Factor (Range (m))**

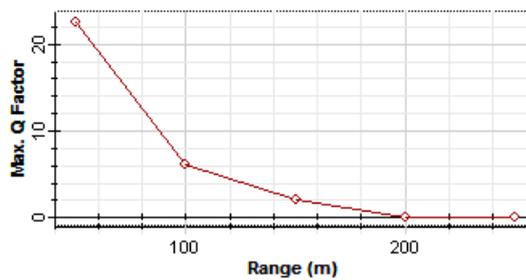


Figura 3. 8: Rango máximo de canales de factor Q contra FSO para el subsistema bloque hospital.

Elaborado por: Autor.

Para el bloque edificio, los diagramas de ojo se muestran en la figura 3.9 y parecen casi iguales que para el bloque hospital, por lo tanto, todos los demás gráficos no se muestran deliberadamente por simplicidad porque ambos bloques en el lado de la ONU brindan un rendimiento similar para el rango de canal FSO entre 50 y 100 m. La tabla 3.4 proporciona los valores del

analizador BER para ambas secciones del edificio, por lo que valida este punto.

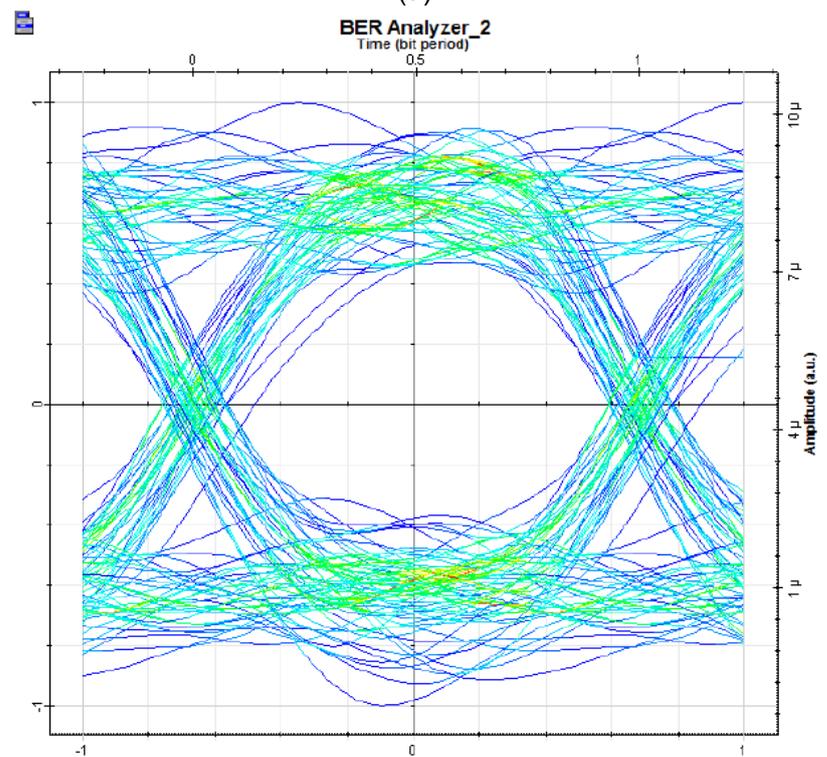
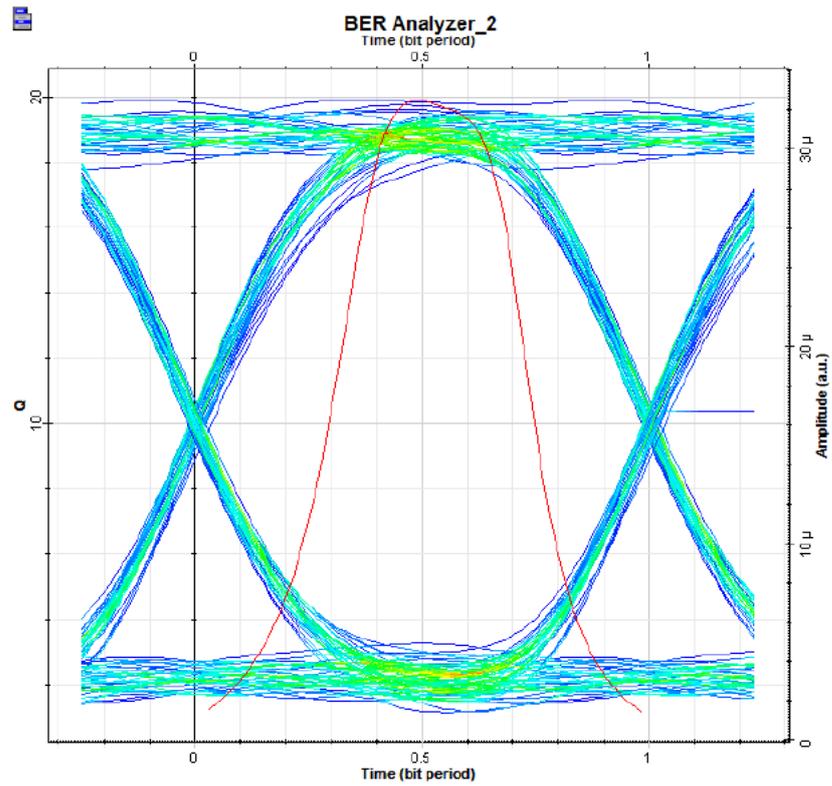


Figura 3. 9: Resultados del analizador de BER y diagrama de ojo del canal FSO ascendente del subsistema bloque edificio para (a) 50m y (b) 100m.

Elaborado por: Autor.

Tabla 3. 4: Resultados numéricos de analizadores BER para el subsistema bloque edificio.

Rango (m) del canal FSO	Resultados del analizador BER2			Resultados del analizador BER3		
	Máximo Factor Q	Mínimo BER	Mínimo log de BER	Máximo Factor Q	Mínimo BER	Mínimo log de BER
50	19.913	1.57×10^{-088}	-87.804	21.407	5.78×10^{-102}	-101.238
100	5.471	2.23×10^{-008}	-7.651	5.571	1.26×10^{-008}	-7.898
150	2.394	0.0083	-2.080	2.672	0.0038	-2.424
200	0	1	0	0	1	0
250	0	1	0	0	1	0

Elaborado por: Autor.

Además, la figura 3.10 muestra la respuesta acumulada del factor Q con respecto al rango del subsistema bloque edificio utilizado del canal FSO. Tenga en cuenta que la calidad de la señal desciende de 150 m en adelante.

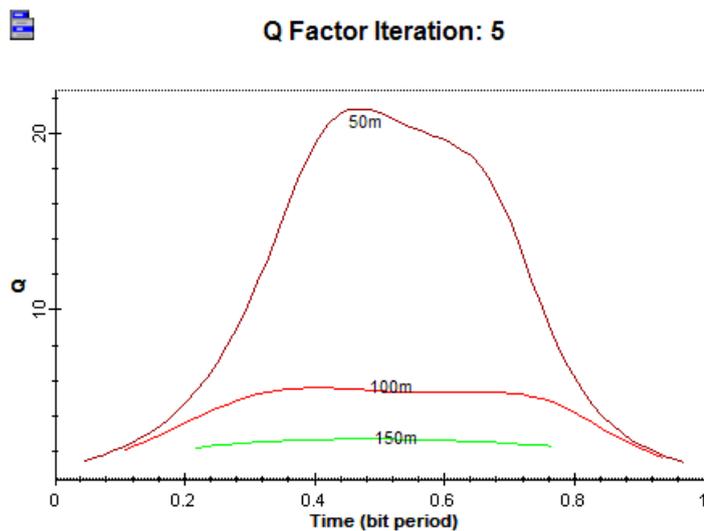


Figura 3. 10: Respuesta acumulativa del factor Q en el rango de canal FSO del subsistema bloque edificio.

Elaborado por: Autor.

Finalmente, la figura 3.11 muestra el min. logaritmo de la BER frente a la potencia total en la comparación de dBm de todos los usuarios.

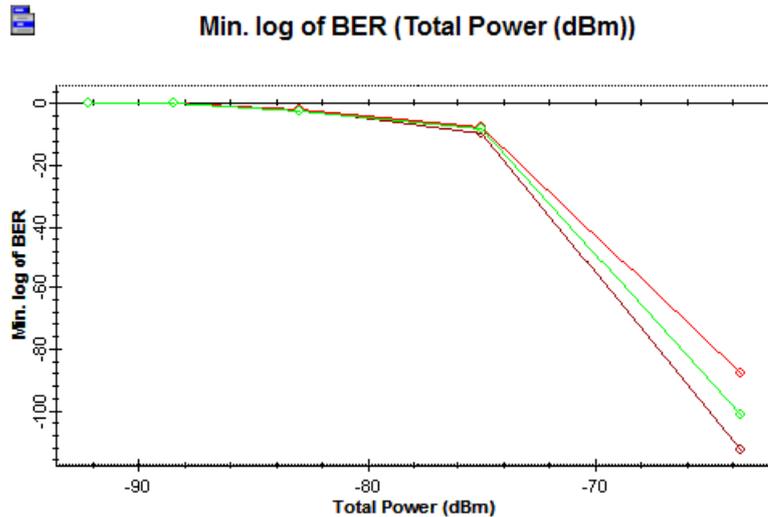


Figura 3. 11: Min. log de BER vs Potencia total para todos los usuarios.
Elaborado por: Autor.

3.3.2. Análisis de rendimiento de la comunicación upstream.

En el caso de la comunicación ascendente, el OLT se convierte en receptor como se muestra en la figura 3.1. Por lo tanto, los resultados se muestran en la figura 3.12, donde se muestran diagramas de ojo para el rango de canal FSO ascendente de 50 m y 150 m. Cabe señalar aquí que, en la parte superior, la apertura de los ojos en el rango de 150 m es un poco mejor en comparación con la transmisión en la parte inferior. Pero el rendimiento máximo sigue siendo de 50 a 100 m.

La tabla 3.5 proporciona el conjunto completo de valores del analizador BER para la comunicación ascendente, mostrando que el rendimiento ideal es de hasta 100 m de alcance. La figura 3.13 muestra el gráfico del registro mínimo de BER en el lado OLT para upstream en diferentes rangos del canal FSO. Hay que tener en cuenta que, a 50 m, la BER produce un rendimiento máximo, ya que en este punto la BER alcanzada es de $5,75 \times 10^{-176}$. A 100 m, el valor de BER es 4.91×10^{-16} y después de eso, la BER se degrada significativamente.

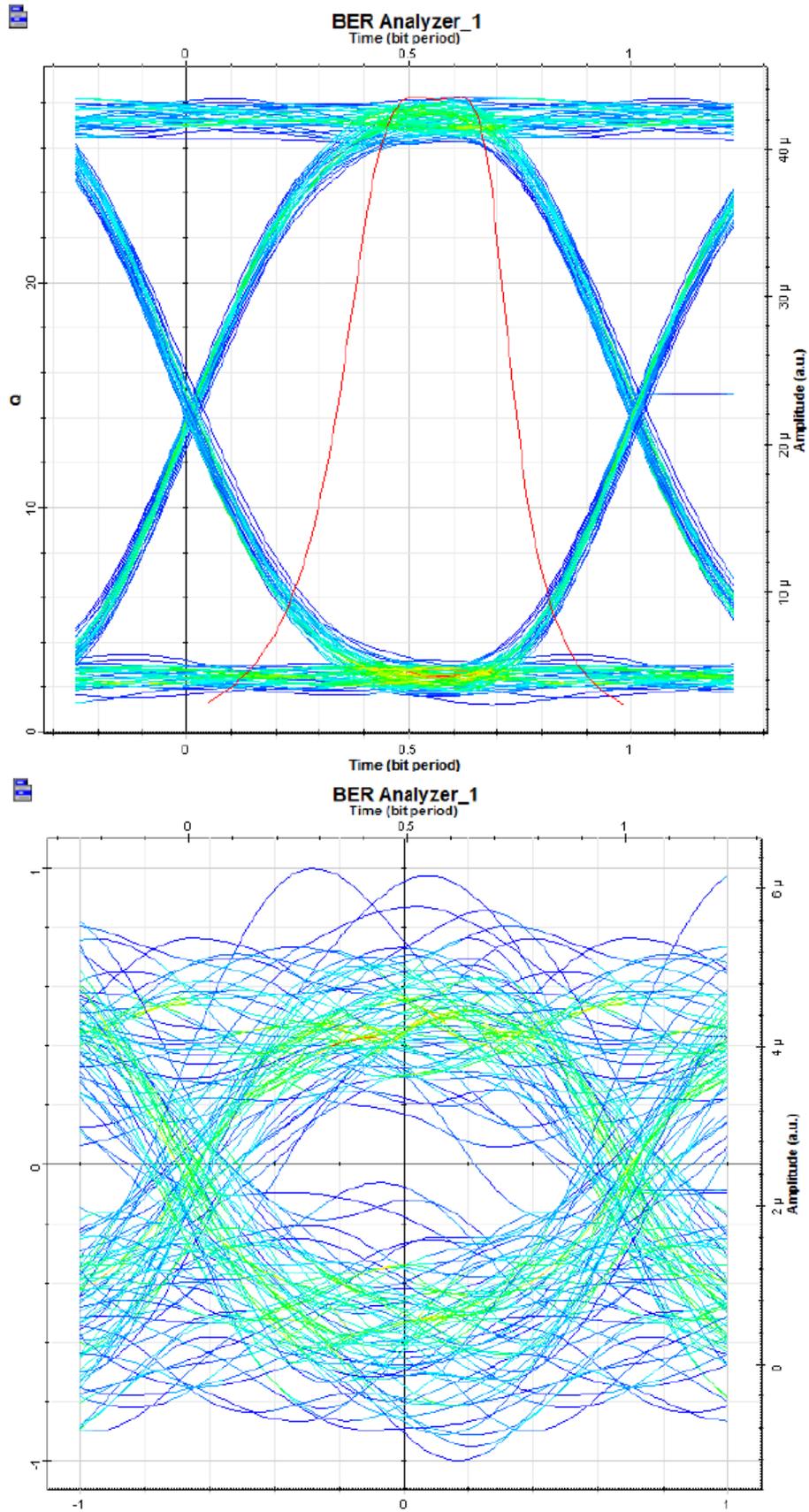


Figura 3. 12: Resultados del analizador de BER y diagrama de ojo del canal FSO ascendente para (a) 50m y (b) 150m.

Elaborado por: Autor.

Tabla 3. 5: Resultados numéricos del analizador BER para canal upstream.

Alcance (m)	Max. Factor Q	Min. BER	Min. log de BER
50	28.2572	5.75632e-175	-175.24
100	8.02883	4.91682e-016	-15.3083
150	3.14412	0.000830138	-3.08085
200	0	1	0
250	0	1	0

Elaborado por: Autor.

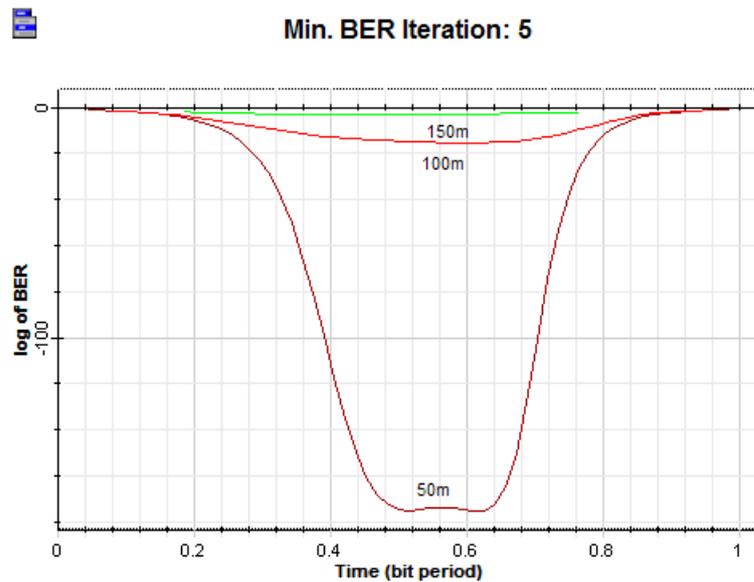


Figura 3. 13: Min. log de BER en el lado OLT para upstream en diferentes rangos de canal FSO.

Elaborado por: Autor.

Conclusiones.

- La arquitectura de backhaul híbrida es capaz de proporcionar no solo alta velocidad de datos, sino también flexibilidad y rápida implementación.
- El uso de un amplificador o fotodiodo de avalancha en el lado del receptor sería una mejor solución para mantener la tasa de error de bits (BER) en niveles bajos.
- Los canales ópticos bidireccionales de espacio libre proporcionan una transmisión de datos de buena calidad en un sistema GPON híbrido (TDM/WDM) en el rango de 50 m a 100 m.
- Se logró una BER del orden de 10^{-16} y 10^{-12} a una distancia de 100 m tanto para canales descendentes como ascendentes, lo que sugiere que a menudo se implementan en la práctica. Pero si el alcance es superior a 100 m, el rendimiento del sistema se deteriora significativamente.

Recomendaciones.

- Análisis de una red óptica híbrida pasiva para sistemas de comunicación de luz visible y óptica de espacio libre.
- Evaluar los efectos del clima en la conectividad de la red óptica de espacio libre.

Bibliografía

- Abad A., W. F. (2020). *Diseño de una red DWDM Troncal para minimizar el efecto de dispersión cromática en el enlace de fibra Guayaquil-Loja*. [Trabajo de Titulación de Maestría, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/15761>
- Ahmad, W., Ali, M. U., Laxmi, V., & Syed, A. S. (2018). Simulation and Characterization of PIN Photodiode for Photonic Applications. *Asian Journal of Nanoscience and Materials*, 1(3), 122–134.
- Anees, S., & Bhatnagar, M. R. (2015). Performance of an Amplify-and-Forward Dual-Hop Asymmetric RF–FSO Communication System. *Journal of Optical Communications and Networking*, 7(2), 124. <https://doi.org/10.1364/JOCN.7.000124>
- Bowers, J., & Chou, H. F. (2005). Optical Communication Systems | Wavelength Division Multiplexing. En *Encyclopedia of Modern Optics* (pp. 433–440). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369395-0/00673-4>
- Canchis C., R. A. (2015). *La Fibra Óptica en la Telefonía IP* [Monografía Técnica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.13563.98083>
- Dabiri, M. T., & Sadough, S. M. S. (2018). Performance Analysis of All-Optical Amplify and Forward Relaying Over Log-Normal FSO Channels. *Journal of Optical Communications and Networking*, 10(2), 79. <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000079>
- Foa. (2020). *Fiber U - FOA Online Self-Study Programs About Fiber Optics And Cabling* [The Fiber Optic Association]. Fiber U. <https://fiberu.org/>

Ghassemlooy, Z., Popoola, W., & Rajbhandari, S. (2013). *Optical wireless communications: System and channel modelling with MATLAB*. Taylor & Francis.

Gupta, S. C. (2015). *Optoelectronic devices and systems* (Second edition). PHI Learning Private Limited.

Khajwal, T. N., Mushtaq, A., & Kaur, S. (2020). Performance Analysis of FSO-SISO and FSO-WDM Systems under Different Atmospheric Conditions. *2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, 312–316. <https://doi.org/10.1109/SPIN48934.2020.9071116>

Khalighi, M. A., & Uysal, M. (2014). Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(4), 2231–2258. <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2329501>

Leroux, P., De Cock, W., Uffelen, M., & Steyaert, M. (2008). *Design and Radiation Assessment of Optoelectronic Transceiver Circuits for ITER*.

Li, M.-J., & Nolan, D. A. (2008). Optical Transmission Fiber Design Evolution. *Journal of Lightwave Technology*, 26(9), 1079–1092. <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.922150>

Peter, Y.-A., Herzig, H. P., & Dandliker, R. (2002). Microoptical fiber switch for a large number of interconnects: Optical design considerations and experimental realizations using microlens arrays. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 8(1), 46–57. <https://doi.org/10.1109/2944.991398>

- Primerov, N. (2013). *Generation and application of dynamic gratings in optical fibers using stimulated Brillouin scattering* [Tesis Doctoral]. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Qaz, W. (2020). *Comunicación por fibra óptica—Fiber-optic communication* [Enciclopedia libre]. https://es.qaz.wiki/wiki/Fiber-optic_communication
- Rumpf, R. C. (2015). Engineering the Dispersion and Anisotropy of Periodic Electromagnetic Structures. En *Solid State Physics* (Vol. 66, pp. 213–300). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.ssp.2015.02.002>
- Singh, M. (2015). Different Dispersion Compensation Techniques in Fiber Optic Communication System: A Survey. *International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering*, 4(8), 2236–2240.
- Teja, N. R., Babu, M. A., Prasad, T. R. S., & Ravi, T. (2012). Different Types of Dispersions in an Optical Fiber. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2(12), 1–5.
- Visvanathan, N. V., Menon, P. S., & Shaari, S. (2004). Development of silicon planar P-I-N photodiode. En A. L. Ahmad, A. R. M. Yahya, A. A.-A. Abdullah, & T. S. T. Muhammad (Eds.), *The 4th Annual Seminar of National Science Fellowship NSF 2004 Proceedings* (pp. 466–471). Penerbit Universiti Sains Malaysia. <http://eprints.usm.my/43402/>
- Zhang, Z. F., Ye, F., Ma, X., Zhao, W., & Wang, H. (2020). Dependence of macro-bending loss on bending configuration of multimode optical fibers studied by ray-tracing simulation. *Optical Review*, 27(3), 290–295. <https://doi.org/10.1007/s10043-020-00595-8>

Zhao, Y., Shi, W., Shi, H., Liu, W., Wang, Z., & Zhang, J. (2020). Resource Allocation for Hybrid RF/FSO Multi-Channel Multi-Radio Wireless Mesh Networks. *IEEE Access*, 8, 9358–9370. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965081>



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, **Tomalá Acosta, Rafael David** C.C: # 092304581-9 autor del examen complejo: Simulación y evaluación de comunicación FSO bidireccional sobre redes de acceso ópticos híbridos, previo a la obtención del título de **Magister en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido examen complejo 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 examen complejo, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 9 de marzo del 2021

f. _____

Nombre: **Tomalá Acosta, Rafael David**

C.C: 092304581-9

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA		
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN		
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Simulación y evaluación de comunicación FSO bidireccional sobre redes de acceso ópticos híbridos	
AUTOR(ES)	Tomalá Acosta, Rafael David	
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	M. Sc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio; M. Sc. Quezada Calle Edgar / M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando	
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil	
FACULTAD:	Sistema de Posgrado	
PROGRAMA:	Maestría en Telecomunicaciones	
TÍTULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones	
FECHA DE PUBLICACIÓN:	Guayaquil, 9 de marzo del 2021	No. DE PÁGINAS: 61
ÁREAS TEMÁTICAS:	Sistemas de transmisión ópticos, Teoría de la Comunicación	
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Redes, Comunicaciones, Híbridas, Multiplexación, Rendimiento, Enlaces.	
RESUMEN/ABSTRACT: El presente trabajo complejo consiste en la simulación y evaluación de comunicación óptica de espacio libre bidireccional sobre redes de acceso ópticos híbridos. Se realizó una descripción teórica de las comunicaciones por fibra óptica. Se desarrolla el modelo de simulación de canales FSO sobre GPON híbrida. Se logra entender, que las redes ópticas totalmente pasivas con función de multiplexación por división de tiempo (TDM) y de longitud de onda (WDM) abrirán a las redes de acceso a una verdadera banda ancha. Además, la integración con óptica inalámbrica es otro paso para agregar funciones de bajo costo con funciones de gran ancho de banda. La combinación de comunicaciones FSO con fibra óptica puede reducir los costos del sistema y proporcionar acceso de gran ancho de banda en áreas donde la instalación de fibra óptica es problemática. Se pone en claro que la distancia del enlace óptico de espacio libre puede permitir en el caso general de la red híbrida.		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593 96 029 9050	E-mail: rtomala@hotmail.com
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Manuel Romero Paz	
	Teléfono: 0994606932	
	E-mail: manuel.romero@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):		