



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

TEMA:

**Estudio y simulación de un sistema de comunicaciones
usando la tecnología FSO.**

AUTOR:

Suarez Morales, Andrés Gino

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

REVISOR:

Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

19 de Septiembre del 2017



**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 **Suarez Morales, Andrés Gino** como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

REVISOR

Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DE CARRERA

Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 19 del mes de Septiembre del año 2017



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

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Suarez Morales, Andrés Gino**

DECLARÓ QUE:

El **Estudio y simulación de un sistema de comunicaciones usando la tecnología FSO** previo a la obtención del Título de **Ingeniero en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 19 del mes de Septiembre del año 2017

EL AUTOR

SUAREZ MORALES, ANDRES GINO



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

AUTORIZACIÓN

Yo, **SUAREZ MORALES, ANDRES GINO**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución El **Estudio y simulación de un sistema de comunicaciones usando la tecnología FSO**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 19 del mes de Septiembre del año 2017

EL AUTOR

SUAREZ MORALES, ANDRES GINO

REPORTE DE URKUND

URKUND

Documento	SUAREZ_GINO_FINAL-FINAL.docx (D30601772)
Presentado	2017-09-17 16:03 (-05:00)
Presentado por	carlos.torres.m26@hotmail.com
Recibido	edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com
Mensaje	SUAREZ_GINO_FINAL Mostrar el mensaje completo 2% de estas 16 páginas, se componen de texto presente en 3 fuentes.

Lista de fuentes		Bloques
+	Categoría	Enlace/nombre de archivo
+	>	http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstrea...
+	■	Tesis.docx
+	■	https://repositorio.espe.edu.ec/bitstrea...
+	■	http://www.oocities.org/es/royalmartin...
+	■	Tesis_FSO Fabricio Toapanta.pdf

Reiniciar Exportar Compartir

1 Advertencia

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

TEMA: Estudio y simulación de un sistema de
comunicaciones usando la tecnología FSO.

AUTOR: Suarez Morales, Andrés Gino

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

REVISOR: Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador 23 de Agosto del 2017



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

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

ING. MIGUEL ARMANDO HERAS SÁNCHEZ, M. Sc.
DIRECTOR DE CARRERA

f. _____

ING. LUIS SILVIO CÓRDOVA RIVADENEIRA, M. Sc.
COORDINADOR DE TITULACIÓN

f. _____

ING. EDWIN FERNANDO PALACIOS MELÉNDEZ, M. Sc.
REVISOR

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
Resumen.....	XI
CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE PRÁCTICO.....	12
1.1. Introducción.....	12
1.2. Definición de problema a investigar.....	13
1.3. Objetivo General.	13
1.4. Objetivos Específicos.	13
1.5. Hipótesis	13
CAPÍTULO 2: Comunicaciones Ópticas Inalámbricas.....	14
2.1. Ondas y espectro electromagnético.	14
2.2. Radiación infrarroja.	16
2.3. Características de la radiación láser.....	17
2.4. Definición de la transmisión óptica en el espacio libre.....	17
2.4.1. Características de los sistemas FSO.	18
2.4.2. Descripción de un sistema FSO.....	20
2.4.3. Funcionamiento de los sistemas de transmisión por óptica del espacio libre.	24
2.5. Topologías más comunes en enlaces FSO.....	25
2.6. Línea de visión	27
2.7. Tasas de transmisión	28
2.8. Aplicaciones de FSO.....	28
Capítulo 3: Simulación de un enlace óptico inalámbrico	31

3.1. Introducción a la herramienta de simulación OptiSystem 7.0	31
3.2. Simulación del enlace óptico.	32
Conclusiones.	42
Recomendaciones.	43
Referencias bibliográficas.	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2:

Figura 2. 1: Espectro electromagnético.....	15
Figura 2. 2: Zona del infrarrojo dentro del espectro electromagnético.....	16
Figura 2. 3: Conexión de un sistema FSO	18
Figura 2.4: Sistema de comunicaciones FSO	20
Figura 2. 5: Tipos de topologías: (a) malla (b) anillo con estribaciones (c) estrella (d) varios enlaces punto a punto	26

Capítulo 3:

Figura 3. 1: Área de trabajo del OptiSystem 7.0.	32
Figura 3. 2: Esquema de bloques del sistema de comunicaciones	33
Figura 3. 3: Sistema de comunicaciones FSO a una distancia de enlace de 35 km.	33
Figura 3. 4: Configuración del enlace	34
Figura 3. 5: Configuración del generador de secuencias	35
Figura 3. 6: Configuración de la fuente láser	35
Figura 3. 7: Parámetros del receptor	36
Figura 3. 8: Parámetros del canal	36
Figura 3. 9: Parámetros del canal	37
Figura 3. 10: Visualizador de pulsos ópticos.....	37
Figura 3. 11: Medidor óptico de potencia	38
Figura 3. 12: (a) Espectro a la salida del transmisor (b) Espectro en la entrada del receptor.....	39
Figura 3. 13: BER obtenida en un enlace de 30 km	39
Figura 3. 14: BER obtenida en un enlace de 35 km	40

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 2:

Tabla 2. 1: Características de las fuentes ópticas más comunes en la transmisión por óptica del espacio libre.	21
---	----

Resumen

La tecnología de las comunicaciones mediante enlaces ópticos inalámbricos puede alcanzar velocidades de transferencia de datos en el orden de los 2,5 Gbit/s y es idónea para zonas de difícil acceso o despliegue, como son: zonas rurales, aeropuertos o lugares remotos. Esta permite a los usuarios moverse libremente sin perder la comunicación dentro del área de cobertura, es de fácil de instalación, flexibilidad, escalabilidad, gestión y ahorro de espacio. Además, permite el ahorro de costos sobre líneas dedicadas. Su seguridad en la transmisión de datos y la gran inmunidad a interferencias, son ventajas a tener en cuenta. En este trabajo se realiza un estudio de la tecnología antes mencionada y se implementa en el software OptiSystem 7.0 un enlace óptico. El análisis del comportamiento del sistema mediante el cálculo de indicadores como la tasa de bits erróneos, la ganancia, la potencia total recibida y la relación señal a ruido permitió comprobar el correcto funcionamiento del enlace.

Palabras claves: ÓPTICA DEL ESPACIO LIBRE, SISTEMAS, COMUNICACIONES, LÁSER, MODULACIÓN, BER.

CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE PRÁCTICO

1.1. Introducción.

Los seres humanos hemos utilizado formas remotas de comunicación óptica desde los inicios de la humanidad. Ejemplo de ellos son los sistemas de hogueras que se utilizaban para indicar diferentes situaciones, en la gran muralla china desde sus inicios se utiliza este sistema para comunicar ataques enemigos. A pesar de tener 21196 kilómetros de largo con el sistema de señales de humo se podía saber en la capital en menos de 2 horas que la muralla había sido atacada, lo cual era una proeza dadas las condiciones tecnológicas de la época.

Otro ejemplo de comunicaciones ópticas es el heliógrafo, el cual es un instrumento que refleja o no la luz a través de grandes lentes ópticas haciendo que esta pueda ser observada a gran distancia. Esta herramienta fue muy utilizada con fines militares en la segunda mitad del siglo XIX aunque se sabe que se usaba desde el siglo XV.

Alexander Graham Bell y su asistente crearon en 1880 el fonógrafo, el cual transmitía sonido sobre un haz de luz. En ese mismo año Bell logró la primera transmisión de telefonía inalámbrica entre dos edificios cercanos basada en este dispositivo.

La verdadera revolución de las comunicaciones ópticas en el espacio libre (FSO, del inglés *Free Space Optic*) fue en la década de 1960 con la invención del láser. Pero este tipo de comunicaciones ópticas perdieron gran notoriedad debido a que las redes de fibra óptica en la década de 1970 comenzaron a ser mucho más utilizadas debido al abaratamiento de los costos de su instalación, alta velocidad y la gran confiabilidad que presentaban.

En la actualidad los sistemas de óptica del espacio libre han vuelto a ser utilizados debido a que varios avances tecnológicos han permitido que estos sistemas sean confiables, tengan gran velocidad de transmisión y sean

relativamente baratos. Además, es importante decir que al contrario de los enlaces de radio este tipo de sistemas de comunicaciones es de uso libre y no hay regulaciones que impidan su uso.

1.2. Definición de problema a investigar.

Las redes FSO, también conocidas como redes ópticas inalámbricas han emergido como candidatas viables para las comunicaciones de banda ancha con un amplio rango de aplicación potencial, que va desde su uso en las casa hasta satélites. Sin embargo, en muchos ámbitos estas redes no han sido popularizadas por la insuficiente evaluación, confiabilidad y conocimiento tecnológico para su implementación práctica. Lo anterior es el **problema** que motiva la presente investigación.

1.3. Objetivo General.

Estudiar los fundamentos teóricos de la tecnología de transmisión óptica en el espacio libre y simular un sistema de comunicaciones de este tipo.

1.4. Objetivos Específicos.

- a. Estudiar los fundamentos teóricos de la tecnología de transmisión óptica en el espacio libre
- b. Analizar las principales características y aspectos tecnológicos del equipamiento FSO.
- c. Simular un sistema de comunicaciones utilizando esta tecnología y analizar los resultados obtenidos en la simulación.

1.5. Hipótesis

Como **hipótesis** tenemos que: el estudio de los fundamentos teóricos y los aspectos técnicos de la tecnología FSO permitirá simular un sistema de comunicaciones y adquirir criterios de selección del equipamiento necesario para una eventual implementación práctica.

CAPÍTULO 2: Comunicaciones Ópticas Inalámbricas.

2.1. Ondas y espectro electromagnético.

La onda electromagnética puede definirse como una perturbación electromagnética que se propaga en el vacío a la velocidad de la luz. Su velocidad está dada por la expresión $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$ donde ϵ es la permitividad dieléctrica y μ su permeabilidad dieléctrica. La generación y la propagación de estas ondas pueden ser modeladas a través de las ecuaciones de Maxwell (Majumdar, 2014).

La distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas se denomina espectro electromagnético, el cual se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, como los rayos gamma y los rayos X, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio. Se cree que el límite para la longitud de onda más pequeña posible es la longitud de Planck mientras que el límite máximo sería el tamaño del universo, no obstante, en teoría el espectro electromagnético es infinito y continuo.

La frecuencia y la longitud de onda generalmente son las unidades usadas para describir las ondas electromagnéticas. Ambas están estrechamente relacionadas por la ecuación 1.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío ($c = 300000000$ m/s), f es la frecuencia (Hz) y λ es la longitud de onda (nm). Como puede deducirse de la ecuación anterior, la frecuencia y la longitud de onda son inversamente proporcionales. Además de la frecuencia y la longitud de onda, la energía electromagnética también tiene asociada la energía de los fotones, que puede ser determinada por la siguiente expresión matemática:

$$E = hf \quad (2)$$

$$\text{Es decir: } E = \frac{hc}{\lambda}$$

Donde h es la constante de Planck y que viene dada por $h = 6,626069 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. Por lo tanto, las ondas electromagnéticas de alta frecuencia tienen una longitud de onda corta y mucha energía mientras que las ondas de baja frecuencia tienen grandes longitudes de onda y poca energía.

A la distribución energética de todas las ondas electromagnéticas se le denomina espectro electromagnético. Como ilustra la figura 2.1, el espectro se extiende desde las radiaciones con longitud de onda muy pequeña como los rayos cósmicos, rayos gamma y los rayos X; pasando por la radiación ultravioleta, la luz visible y la radiación infrarroja, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio. Las comunicaciones ópticas actuales abarcan aproximadamente desde los 50 nanómetros, considerado ultravioleta, hasta los 100 micrómetros que es la región del infrarrojo. Hablando en términos de frecuencia, los equipos de comunicación óptica en el espacio libre trabajan en el rango de los 150 a 500 THz, ubicándose en el zonas del infrarrojo, luz visible y ultravioleta (Sizun, Boisrobert, & Bouchet, 2006).

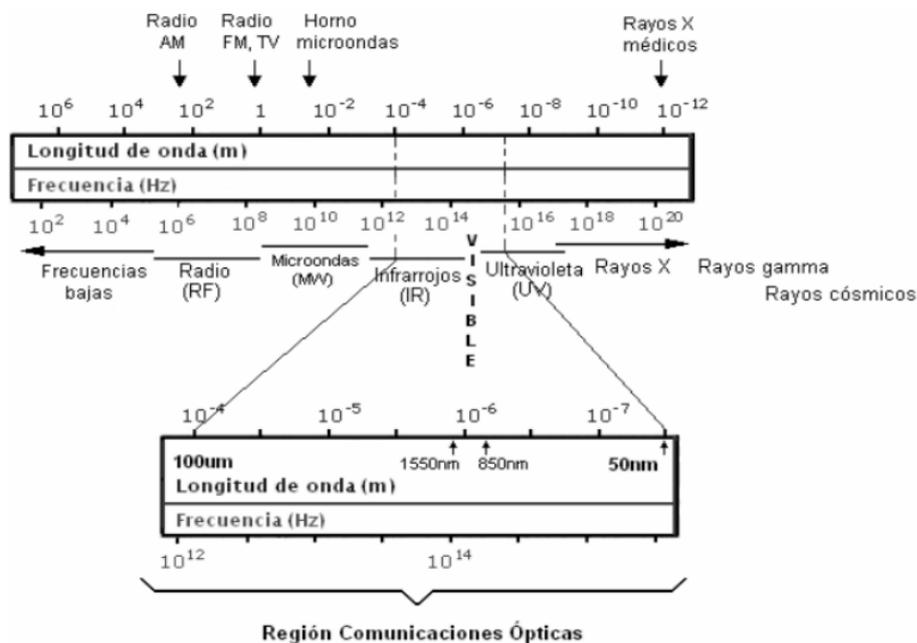


Figura 2. 1: Espectro electromagnético.
Fuente: (Cuenca & Palacio, 2008)

2.2. Radiación infrarroja.

La radiación infrarroja está ubicada en el rango del mismo nombre en el espectro electromagnético y es invisible para el ojo humano. Se utiliza en las comunicaciones ópticas como láser, ofreciendo acceso de gran ancho de banda a redes cableadas e inalámbricas. Esto ha permitido el desarrollo de esta tecnología, así como la comercialización de equipamiento para este tipo de aplicaciones. En la figura 2.2 se ilustra, con mayor detalle, la región del infrarrojo.

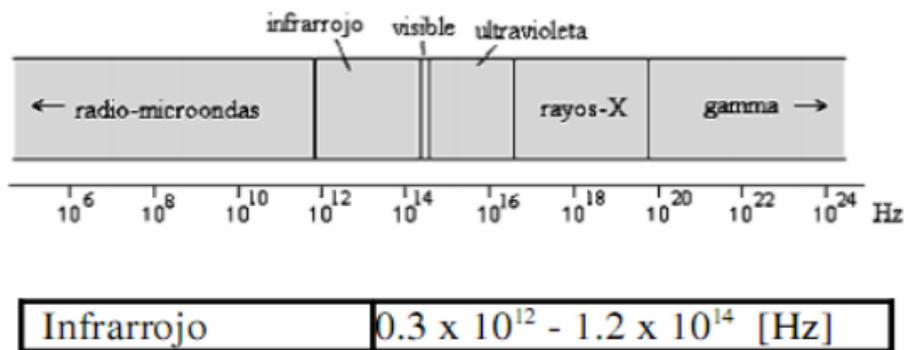


Figura 2. 2: Zona del infrarrojo dentro del espectro electromagnético.

Fuente: (Cuenca & Palacio, 2008)

La radiación infrarroja punto a punto, se transmite a través del aire en línea recta en condiciones ideales. Si se tiene en cuenta estas condiciones ideales, los haces invisibles forman enlaces puntuales sin deformarse con respecto a la fuente origen, lo que en la realidad no ocurre de este modo. En la práctica, los rayos infrarrojos no son totalmente puntuales, ellos se dispersan en cierta medida según avanzan por el medio, o sea, se produce una divergencia del haz en el sitio de llegada, la cual forma un ángulo de apertura. Este ángulo es inversamente proporcional a la potencia recibida y proporcional al área de cobertura en el extremo opuesto.

La divergencia del láser como radiación infrarroja, consiste en un aumento del diámetro del haz con la distancia, según el tipo de láser de que se trate. Generalmente, se produce con menos de 1 miliradian. Para reducir la divergencia de los equipos láser semiconductores se utiliza un colimador (Guadalupe, 2003).

2.3. Características de la radiación láser.

Entre las características más relevantes de la radiación láser destacan la monocromaticidad, la coherencia temporal y espacial y la direccionalidad.

Monocromaticidad: Este término se refiere a la presencia de una única frecuencia en la radiación electromagnética. En consecuencia, si analizamos su espectro, se observaría como resultado un único pulso, similar a una delta de Dirac con altura infinita. En la práctica, debido a un conjunto de factores, ese impulso se extiende cubriendo varias longitudes de onda.

Coherencia espacial y temporal: La coherencia temporal son las variaciones de fase y es fenómeno que ocurre en todas las fuentes de luz incluyendo el láser. Se produce cuando un conjunto de osciladores idénticos emite y dejan de emitir luz en instantes de tiempo distintos.

La coherencia espacial se refiere a la capacidad de que un rayo de luz permanezca generando una línea de pequeño tamaño e igual característica durante el transcurso de una transmisión.

Direccionalidad: La direccionalidad lograda con el láser es muy superior en comparación con otras fuentes luminosas, esto es debido, en parte, resonador usado para la realimentación. De todas maneras, el fenómeno de la divergencia está presente en alguna medida ya que es inevitable en condiciones naturales.

2.4. Definición de la transmisión óptica en el espacio libre

Las redes basadas en óptica del espacio libre (FSO, del inglés *Free Space Optics*), conocidas también como redes ópticas inalámbricas, son sistemas de telecomunicaciones inalámbricos que hacen uso del espacio libre como medio de transmisión para entregar señales ópticas de datos a altas velocidades. Los puntos de interconexión se sitúan en una línea de visión directa (LOS, del inglés *Line of Sight*) y se envían láser por infrarrojos.

Como se observa en la figura 2.4, esta tecnología permite conectar edificaciones con un equipamiento de sencillo montaje y de una forma económica en el sentido de que no se necesita realizar prácticamente ninguna obra adicional. Por lo anterior, es muy utilizada en áreas metropolitanas densamente pobladas, donde se necesita proveer servicio de banda ancha de forma rápida.

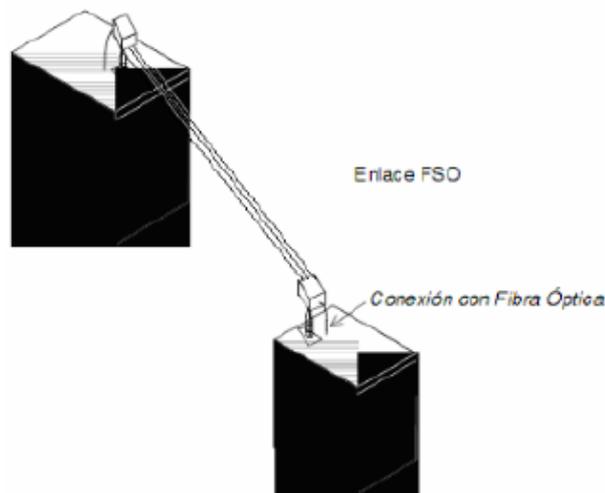


Figura 2. 3: Conexión de un sistema FSO
Fuente: (Cuenca & Palacio, 2008)

Los transmisores láser envían una señal modulada hacia los receptores de forma segura y confiable, permitiendo conectar redes que se encuentran separadas desde unos pocos metros hasta 4 ó 5 kilómetros. Esta tecnología utiliza el espectro no licenciado para enviar información mediante señales luminosas (haces infrarrojos) con un gran ancho de banda (Agrawal, 2010).

2.4.1. Características de los sistemas FSO.

Las características más relevantes de la transmisión mediante óptica del espacio libre y que hacen que resulte una alternativa de gran interés son (Hemani Kaushal, Jain V K, 2017):

- Idónea para zonas de difícil acceso o despliegue.
- Inmune a las interferencias de radiofrecuencia y del espectro electromagnético.
- Máxima seguridad de datos.
- Velocidad de transferencia hasta 10 Gbit/s.
- Rápida instalación y bajo costo de mantenimiento.

- Retorno rápido de la inversión realizada en el montaje del sistema.

El equipamiento usado en la transmisión óptica tiene algunos parámetros importantes que resulta de gran interés analizar (Caizaluisa, 2008).

➤ **Interfaz aérea**

Está relacionado con el nivel de seguridad que ofrece el transmisor, este a su vez depende de la potencia de transmisión del láser y de la longitud de onda de trabajo. Los láseres pueden clasificarse en:

- Láser Clase 1M: Transmisores que pueden ser vistos de forma directa por los ojos humanos sin usar ninguna protección y no causan daño, o sea, que son completamente seguros.
- Láser Clase 3B: Son transmisores que representan un peligro en caso de haber exposición directa.

Los equipos usados en la tecnología FSO operan a una longitud de onda superior a los 780 nm, por lo que la radiación es invisible para el ojo humano. Esto implica que FSO cumple con los estándares de seguridad 1M y evita daños en la salud humana.

➤ **Longitud de onda**

La tecnología FSO trabaja en las siguientes longitudes de onda:

- Cercano a los 800 nm: Esta longitud de onda puede llegar a dañar la retina del ojo en caso de incidencia con el rayo ya que se encuentra dentro del espectro conocido como "Región de Riesgo Retinal". Por lo que los estándares recomiendan transmitir con potencias bajas.
- 1550 nm: Generalmente los equipos que operan en esta longitud de onda cumplen con las normas de seguridad para el ojo y pueden transmitir a niveles de potencia mayores.

➤ **Divergencia del haz de luz**

Esta característica es inherente al tipo de emisor de luz que se utilice y es el que en gran medida determina la distancia mínima del sistema de comunicaciones óptico.

➤ **Montaje y estabilidad de los equipos que conforman el sistema**

Por lo general estos equipos tienen una alta susceptibilidad a golpes y movimientos bruscos, por lo es aconsejable que la estructura de montaje del equipo sea rígida y estable y que los movimientos se hagan con cierta delicadeza.

➤ **Interfaz física de los sistemas de comunicaciones FSO**

Estos sistemas de comunicaciones trabajan en la capa 1 del modelo OSI, o más conocida como la capa física. La conexión puede ser sobre cobre para interfaces como E1, Ethernet o Fast Ethernet o sobre fibra óptica para servicios como ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) o SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*). Un enlace óptico puede emplearse junto a multiplexores para el envío de tramas de datos, voz y video simultáneamente.

➤ **Disponibilidad y confiabilidad del enlace**

Los equipos que se comercializan en el mercado ofrecen una confiabilidad excepcional. Es posible alcanzar valores de un 99% de confiabilidad, aun teniendo en cuenta condiciones climáticas desfavorables.

2.4.2. Descripción de un sistema FSO.

En la figura 2.4 se muestra el diagrama en bloques de un enlace terrestre FSO típico. De forma similar a otras tecnologías de comunicación está formado por 3 partes: el transmisor, el canal de transmisión y el receptor óptico.

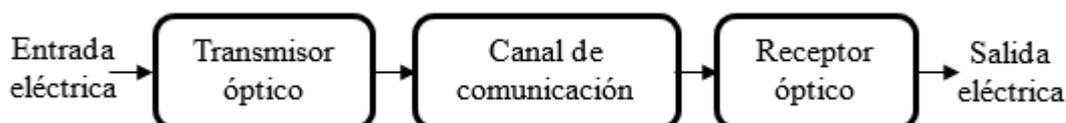


Figura 2.4: Sistema de comunicaciones FSO

Elaborado por: Autor

Transmisor: Convierte la señal eléctrica en una señal óptica. La fuente óptica es el componente más importante de los transmisores ópticos, y se le añade un esquema para la modulación directa o externa de la señal. Los sistemas modernos se usan diversas fuentes de luz, aunque las que están hechas con semiconductores son las más utilizadas. Las principales diferencias entre transmisores son la frecuencia, potencia, longitud de onda, y velocidad de transmisión. El uso específico de cada fuente depende de la aplicación (Chassemlooy & Popoola, 2011). En la Tabla 1 se presenta un resumen de los componentes más comúnmente utilizados en los sistemas ópticos del espacio libre.

Tabla 2. 1: Características de las fuentes ópticas más comunes en la transmisión por óptica del espacio libre.

Longitud de onda (nm)	Fuentes ópticas	Características
≈ 850	VCSEL	Presenta una baja densidad de potencia. Es barata y disponible fácilmente. No posee enfriamiento activo y su uso es confiable hasta ≈ 10 Gbps
≈ 1300 / ≈ 1550	Fabry – Perot Láser con retroalimentación distribuida	Ofrece poca seguridad visual, tiene 50 veces mayor densidad de potencia (100 mW/cm) en comparación con otras fuentes. Compatible con la EDFA Alta velocidad, hasta 40 Gbps Eficiencia de 0,03 – 0,2 W/m
≈ 10,00	Láser cascada	Es cara, relativamente nueva, con alta velocidad y sensibilidad. No funciona detrás de cristales y es menos afectada por la niebla
Infrarrojo cercano	LED	Presenta baja potencia y tasa de bits, su circuito es simple.

El objetivo principal de las fuentes ópticas es producir una onda portadora óptica modulada por las señales eléctricas procedentes de un equipo que puede ser analógico o digital. Es deseado que las fuentes ópticas

presenten características como: pequeño tamaño, alta potencia de salida, bajo consumo y alta fiabilidad con los cambios de temperatura.

En la industria de los equipos usados en la tecnología FSO se ha generalizado el uso del láser semiconductor, el cual tiene dimensiones reducidas, incluso puede llegar a ser tan minúsculos como un gramo de sal y a veces menores. Pueden ser producidos en grandes cantidades a precios relativamente bajos. Este tipo de láser es usado en muchas ocasiones para los montajes de fibra óptica (Mahamed, 2010).

Los diodos emisores de luz (LED, del inglés *Light Emitting Diode*) son usados como fuentes ópticas solamente cuando se requiere realizar transmisiones a distancias cortas, con poca potencia de salida y con una velocidad de alrededor de 155 Mbit/s. Esto se debe a que estos diodos presentan gran dispersión de la luz y su amplia distribución espectral. Por otro lado, el láser tiene un espectro de emisión muy estrecho, o sea, la luz no se dispersa tanto como la luz producida por un diodo LED. Por este motivo, el láser puede ser empleado de forma eficiente para transmisiones a largas distancias, lo cual representa una gran ventaja (Mahamed, 2010).

A la hora de seleccionar una fuente láser para su uso en aplicaciones de transmisiones ópticas es importante tener en cuenta varios factores. Primero, la longitud de onda para la transmisión debe estar relacionada con la ventana atmosférica (los valores recomendados están entre 850 nm y 1550 nm).

Otros factores a considerar al usar una determinada fuente de luz son el precio y el tiempo de vida de los componentes, la potencia de transmisión, la seguridad para los humanos, sus dimensiones, la capacidad de modulación y la compatibilidad con otros medios de transmisión como por ejemplo la fibra óptica (Olivera, 2006).

Receptor: La mayoría de los detectores están basados en semiconductores. En dependencia del material de fabricación es la longitud

de onda en la que operan. La información es recuperada demodulando y decodificando la señal óptica recibida la cual generalmente es filtrada con el objetivo de eliminar ruidos.

Entre las características que los receptores deben poseer están el bajo consumo, bajo ruido, alta sensibilidad y eficiencia, pequeñas dimensiones físicas y rendimiento en la conversión opto-eléctrica. Además, una baja tasa de bits erróneos o proporción de errores (BER, del inglés *Bit Error Rate*), la cual generalmente está en el orden de 10^{-9} para posibilitar la recuperación de la señal original.

Los fotodiodos semiconductores cumplen muchas de las características deseadas en los detectores ópticos ya que son pequeños, tienen alta sensibilidad y proporcionan diferentes bandas de longitud de onda usadas en aplicaciones FSO. Por estas razones, son muy empleados en sistemas de transmisión por óptica del espacio libre. Un inconveniente de los fototransistores es que no proveen altas velocidades de transmisión, lo que limita su aplicación.

Los fotodiodos son diodos semiconductores que trabajan polarizados inversamente. Son sensibles a la incidencia de la luz visible o infrarroja. Su principio de funcionamiento es que, cuando un haz de luz de suficiente energía incide en el fotodiodo, las partículas de energía luminosa (fotones) son absorbidas generando pares electrón-hueco, que en presencia de un campo eléctrico producen una corriente eléctrica. Estos dispositivos tienen alta sensibilidad, son rápidos y de pequeño tamaño. La corriente eléctrica que generan está en el orden de los nanoamperes (10^{-9} A) por lo que es necesario amplificar la señal (Calderón, Aguilar, Vera, & González, 2010).

Los fotodiodos más comunes en la actualidad son los PIN (*Positive – Intrinsic – Negative*) y los de avalancha (APD, del inglés *Avalanche Photo Diode*).

Diodo PIN: Son fabricados generalmente con germanio (Ge) y últimamente se utiliza el GaAs, GaInAs, InP, con resultados muy buenos (Caizaluisa, 2008). Entre las capas de material semiconductor n y p tiene una capa intrínseca, casi pura, de material semiconductor. La luz que entra en el fotodiodo es absorbida por el material intrínseco, una vez ocurrido esto los electrones se mueven de su banda de valencia lo que hace que el fotodiodo conduzca la energía eléctrica.

Los fotodiodos PIN son de gran duración, que es una característica deseada en los receptores ópticos. Además, trabajan con bajas tensiones y son adecuados para trabajar en la segunda y tercera ventana de transmisión, con longitudes de onda de 1300 y 1550 nm, respectivamente. También tienen una velocidad de respuesta rápida lo que permite velocidades de recepción de datos elevada (Caizaluisa, 2008).

Fotodiodos avalancha (APD): Son 10 veces más sensibles que los fotodiodos PIN por lo que son usados en sistemas donde las pérdidas suelen ser grandes. La desventaja de estos elementos es que su tiempo de vida es poco haciendo que el mantenimiento de los equipos de comunicaciones que los contienen tenga que ser más frecuente. Su estructura interna consiste en un material semiconductor ordenado en forma $p-i-p-n$.

Cuando un haz de luz incide en el diodo es absorbida por la capa n , esto provoca que algunos electrones pasen de la banda de valencia a la de conducción. Como el campo eléctrico que se genera por la polarización inversa es grande, los electrones adquieren altas velocidades y al colisionar con los electrones de otros átomos hacen que éstos se ionicen, estos a su vez ionizan otros creando un efecto avalancha que da el nombre a estos fotodiodos (Chassemlooy & Popoola, 2011).

2.4.3. Funcionamiento de los sistemas de transmisión por óptica del espacio libre.

La tecnología FSO transmite datos a altas velocidades utilizando haces de luz que viajan a través de la atmósfera. Para esto utiliza luz infrarroja cuyas

longitudes de onda se encuentran por debajo de los valores de la luz roja en el espectro electromagnético. Los valores normalmente utilizados se encuentran desde los 850 nm hasta 1550 nm. Las longitudes de onda del IR tienen casi las mismas propiedades de propagación que la luz visible, debido a la proximidad al espectro visible.

El principio de funcionamiento de los sistemas FSO es el siguiente (Olivera, 2006):

- Los transceptores que utilicen láseres infrarrojos se colocan en lugares apropiados, normalmente lugares altos. Estos enlaces ofrecen prestaciones similares a la fibra óptica pudiendo alcanzar hasta los 10 Gbit/s de velocidad de transmisión.
- Las señales eléctricas que contiene la información llegan al transmisor y se convierten en pulsos ópticos. La modulación que se emplea es conocida como modulación en potencia y consiste en transmitir con alta intensidad luminosa cuando el dato es un uno lógico y con poca intensidad luminosa cuando es un cero lógico.

Como fue mencionado en epígrafes anteriores, los sistemas de comunicaciones que trabajan bajo la tecnología FSO no necesitan licencia para su operación, lo cual viabiliza su uso. También tienen alta inmunidad a las interferencias radioeléctricas o electromagnéticas. Estos sistemas pueden operar en modo full dúplex, por lo que cada enlace contiene transceptores capaces de realizar la transmisión y recepción de las señales. Teniendo en cuenta que la información viaja mediante la luz, y que esta no puede pasar a través de los obstáculos sólidos como paredes o árboles, es necesario que haya línea de visión directa entre los extremos del enlace. En el epígrafe 2.6 se abordará este tema con mayor detalle.

2.5. Topologías más comunes en enlaces FSO.

En el diseño de un enlace de comunicación es muy importante seleccionar el tipo de topología que va a ser desarrollada, de forma que cumpla los requisitos de la aplicación. Son múltiples las topologías de red en

las que puede operar la tecnología FSO, por ejemplo: malla, estrella, punto a punto, punto a multipunto, anillo y anillo con estribaciones. Esta flexibilidad posibilita ir extendiendo la red según la demanda y logrando altas velocidades (Caizaluisa, 2008). En la figura 2.5 se ilustran algunas de las topologías mencionadas.

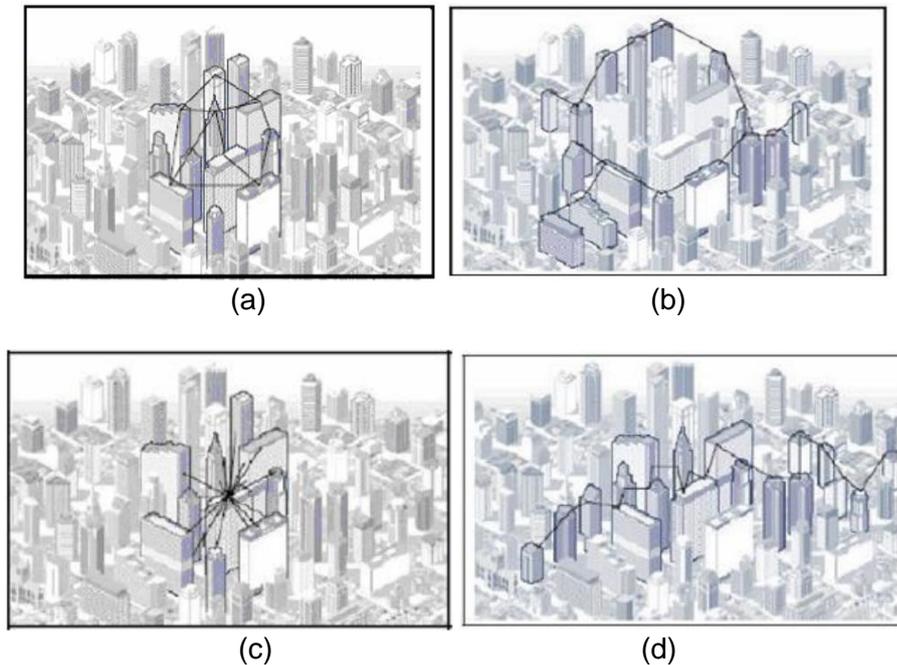


Figura 2. 5: Tipos de topologías: (a) malla (b) anillo con estribaciones (c) estrella (d) varios enlaces punto a punto
Fuente: (Sadaiti, 2007)

Una red con una configuración en forma de malla consiste en una serie de nodos dispersos que se conectan con algún grado de redundancia. En una red en forma de malla completamente interconectada, cada nodo se conecta con todos los demás nodos.

En la topología de anillo con estribaciones se establecen anillos de alta velocidad en representación del núcleo, ya sea basado en fibra o en FSO. En una arquitectura de anillo, se pueden conectar sub-anillos a través de un enrutador de capa 3.

La topología en estrella consiste en varios enlaces que se originan desde un único nodo. Aunque hay varios métodos que pueden ser usados para lograr este tipo de arquitectura, el más efectivo consiste en conectar cada enlace

FSO con un dispositivo de capa 2 o de capa 3 tres ubicado en un edificio cercano. Esta conexión con los conmutadores y enrutadores se realiza mediante fibra óptica. Estos equipos pueden estar en ubicaciones arbitrarias, como por ejemplo la terraza del edificio o dentro de una oficina o habitación. Este método tiene como ventaja que cada puerto en el conmutador o en el enrutador puede ser configurado de forma individual con una velocidad de datos específica, dependiendo del servicio contratado con el usuario terminal. También es una forma que brinda flexibilidad a la hora de distribuir datos desde un punto a múltiples puntos.

La topología punto a punto es utilizada para enlaces de gran extensión, que en ocasiones sobrepasan el rango límite del equipo o las condiciones climáticas recomendadas para una determinada distancia del enlace. En estos casos, usualmente se conectan varios enlaces punto a punto sin que haya ningún equipo intermedio.

2.6. Línea de visión

La línea de visión directa entre los extremos del enlace es el único requisito esencial para la transmisión inalámbrica óptica. Esto quiere decir que el transmisor y el receptor deben estar ubicados de forma que se puedan ver, o sea, que no haya ningún obstáculo en el medio. En comparación con los sistemas de microondas que requieren un camino despejado debido a las zonas de Fresnel, el criterio de la línea de visión en los sistemas FSO es menos estricto ya que el haz infrarrojo se propaga en modo lineal.

La forma más sencilla de saber si se cumple la línea de visión directa entre dos lugares remotos es la observación visual. Ya para distancias mayores a 1 milla, determinar si existe o no línea de visión directa no es tan trivial. En estos casos se utilizan telescopios y lentes, de hecho algunos fabricantes incorporan un telescopio de alineación entre los equipos terminales para ayudar en esta labor. Por otra parte, hay quienes prefieren hacer el análisis usando mapas, los cuales contienen información de los edificios y su ubicación específica.

Los enlaces montados en las terrazas de los edificios es uno de los escenarios más típicos para la instalación de los equipos FSO. También es posible el montaje de transceptores junto a las ventanas en sitios donde no existe acceso a la terraza. En estos casos, el ángulo que se forma entre el haz de luz y la ventana es crítico debido a que debe ser perpendicular, aunque ligeramente orientado 5 grados. Esto evita el rechazo del haz del propio receptor. Si se usa otro ángulo no ocurrirá la transmisión de la luz. Algunas ventanas están construidas con un cristal que reduce la luz intensa, y a menudo están diseñadas para rechazar los rayos infrarrojos. Las capas de cristal pueden reducir la señal en un 60% o incluso más. Un inconveniente del montaje en ventanas es que dificulta la estabilidad de los equipos (Caizaluisa, 2008).

2.7. Tasas de transmisión

En los sistemas *Free Space Optics* con norma O-E-O (Óptico-Eléctrico-Óptico), existen dos elementos que limitan la velocidad de transmisión en todo el sistema que generalmente se deben al emisor de luz y al canal aunque las características del fotodetector también influyen. A velocidades superiores de 10 Gbit/s como es el caso que simularemos en nuestro trabajo se utilizan moduladores externos en la fuente láser. Existen detectores que trabajan con velocidades de 10Gbit/s, en las redes comerciales especializadas(Guadalupe, 2003).

2.8. Aplicaciones de FSO

La tecnología FSO está siendo cada vez más usada para proveer comunicaciones inalámbricas de banda ancha, generalmente en ambientes empresariales. Ella permite enlaces que pueden construirse de forma sencilla y rápida para proporcionar una comunicación fiable a pequeñas distancias. Por ser una tecnología libre de licencias gubernamentales y no requerir permisos de operación, los diseñadores utilizan las redes FSO como herramientas integrales para la conectividad, aprovechando las importantes ventajas en términos de tiempo y costo. Entre sus principales aplicaciones podemos mencionar (Calderón, Aguilar, Vera, & González, 2010):

- Interconexión empresarial: La tecnología FSO es usada para crear enlaces de alta seguridad que permitan la comunicación entre edificios, oficinas, etc. Al disponer de alta velocidad en la transmisión de datos no se genera un cuello de botella en el transporte de información. Por supuesto esto permite un alto desempeño y mantener una variedad de servicios (Calderón, Aguilar, Vera, & González, 2010).
- Redes de TV por cable: Los servicios por cables como Internet a alta velocidad y telefonía generan altas ganancias a los operadores. Generalmente se usa redundancia en la red para así garantizar una calidad de servicio aceptable. Con los enlaces ópticos se logra este tipo de redundancia de una forma económica, protegiendo así los sistemas de distribución por cable, cerrando anillos e incluso permiten contar con enlaces paralelos en la red (Calderón, Aguilar, Vera, & González, 2010).
- Redes metropolitanas: FSO también es una alternativa para brindar servicios de telecomunicaciones en aquellos casos donde no se tiene acceso a la fibra óptica, con la ventaja adicional de prestar el servicio en un tiempo corto. Es posible configurar topologías en forma de bus y anillo, de forma similar a las realizadas en la fibra óptica. En estos casos, el equipo terminal utilizado puede ser el mismo que se emplea en los enlaces de fibra óptica (Calderón, Aguilar, Vera, & González, 2010).
- Aplicaciones celulares: FSO ofrece una solución económica para llegar a lugares donde la infraestructura no permite el uso de cables. Es una alternativa a la problemática de los nodos de fuera del alcance de la fibra óptica en redes de telefonía y a la saturación del espectro electromagnético por diversos estándares (Calderón, Aguilar, Vera, & González, 2010).
- Redes de telecomunicaciones: La tecnología FSO permite maximizar la utilización de los anillos metropolitanos instalando enlaces laterales hacia edificios que se encuentran fuera del enlace a un bajo costo y un gran ancho de banda. Los enlaces de FSO pueden funcionar como un respaldo de los enlaces de radio puesto que, a diferencia de estos, son

menos susceptibles a eventos climatológicos como la lluvia (Calderón, Aguilar, Vera, & González, 2010).

Capítulo 3: Simulación de un enlace óptico inalámbrico

En el capítulo anterior se realizó el estudio de los fundamentos teóricos y características principales de la transmisión por óptica del espacio libre, resulta entonces de gran interés la simulación de un sistema de comunicaciones mediante un enlace óptico. En este capítulo se realiza la referida simulación y el análisis de resultados con la ayuda del software profesional OptiSystem 7.0.

3.1. Introducción a la herramienta de simulación OptiSystem 7.0

La implementación de laboratorios con equipamiento real es una solución que, desde el punto de vista técnico y económico, suele ser cara y hace muy difícil poder abarcar todos los casos de estudio. Es por esta razón que la tendencia actual para estos fines es emplear, en conjunto con equipamiento real, programas de simulación de redes y componentes.

El software OptiSystem 7.0 permite simular sistemas de comunicaciones ópticas a nivel de capa física, incorporando una amplia biblioteca de componentes entre los que se incluyen transmisores, fibras, receptores, amplificadores ópticos y otros. Este software proporciona además importantes instrumentos virtuales para el estudio de los sistemas ópticos, tales como osciloscopios, analizadores de espectros ópticos y eléctricos, diagramas de ojo y estimador de la proporción de error.

También es posible incorporar nuevos componentes basados en los subsistemas y las bibliotecas definidas por el usuario, o utilizar co-simulación con herramientas de terceros tales como Matlab. Las simulaciones se pueden repetir con una variación de los parámetros, optimizándolos para minimizar o maximizar cualquier resultado, de esta forma el usuario puede combinar múltiples barridos de parámetros y varias optimizaciones.

Entre las ventajas ofrecidas por OptiSystem 7.0 se encuentran:

- Gran reducción del riesgo de la inversión y el tiempo de lanzamiento al mercado.
- Representación visual de las opciones de diseño y de los escenarios.
- Fácil acceso a los datos de caracterización del sistema.
- Búsqueda automática de los parámetros.

Al ser un simulador de nivel de sistema, basado en el modelado realista de los sistemas de comunicación de fibra óptica, posee un potente entorno de simulación y una definición jerárquica de los componentes y sistemas, además de una interfaz gráfica de usuario robusta que controla el diseño de componentes ópticos, lista de conexiones y gráficos de presentación. El área de trabajo del OptiSystem 7.0 se muestra en la figura 7.

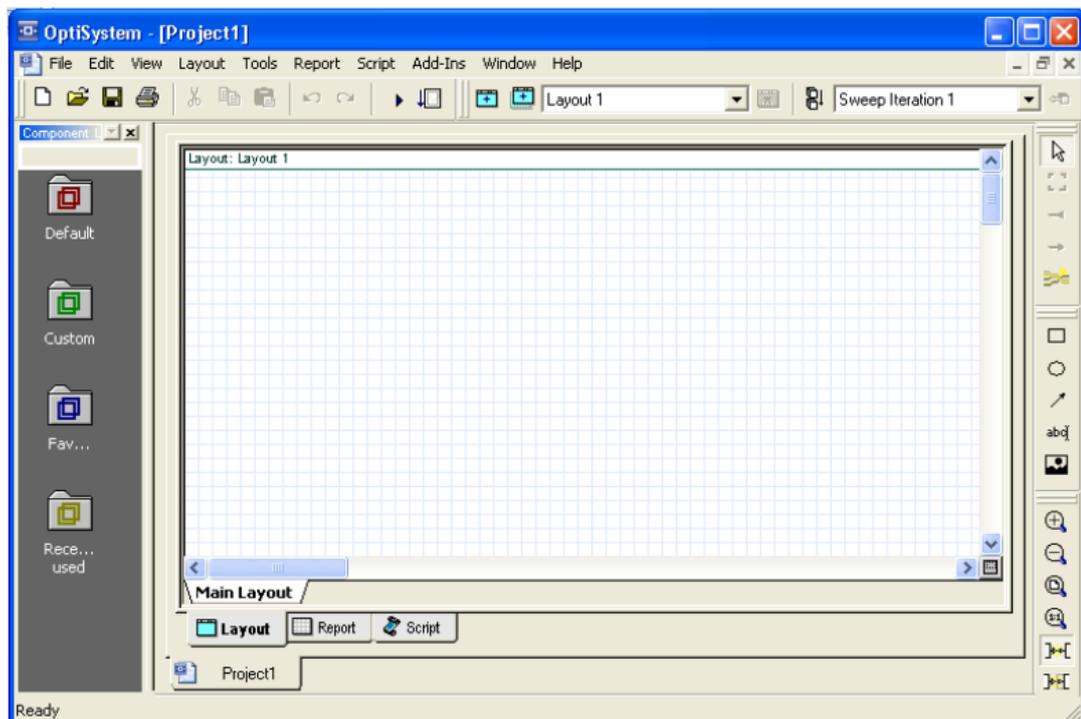


Figura 3. 1: Área de trabajo del OptiSystem 7.0.
Elaborado por: Autor.

3.2. Simulación del enlace óptico.

En este apartado se implementa un enlace óptico utilizando el software OptiSystem. Los elementos fundamentales que conforman el sistema son: el transmisor óptico, el canal y el receptor, como puede observarse en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** El transmisor (Tx) incluye el generador de secuencia pseudoaleatoria (PRBS, *Pseudo Random Bit*

Sequence), el generador de pulso no retorno a cero (NRZ), una fuente láser y el modulador Mach-Zehnder. El receptor (Rx) incluye el fotodetector y el filtro pasabajo.

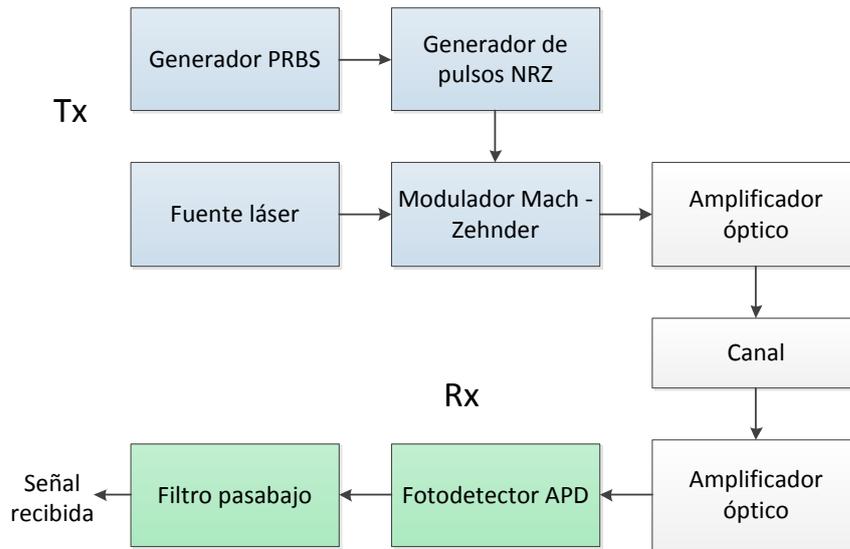


Figura 3. 2: Esquema de bloques del sistema de comunicaciones
Elaborado por: Autor

En la simulación, mostrada en la figura 3.3, los datos generados por el generador de secuencia pseudoaleatoria a una velocidad de 10 Gbps son codificados con un código de línea no retorno a cero y modulados usando un modulador Mach-Zehnder donde la fuente láser actúa como la fuente portadora con 1550 nm de longitud de onda y 20 dBm de potencia. Esta luz modulada se amplifica usando amplificadores ópticos antes de su transmisión a una distancia de 40 Km. La ganancia del amplificador fue fijada a 20 dB. Luego la señal amplificada es enviada directamente al receptor mediante el canal con óptica del espacio libre.

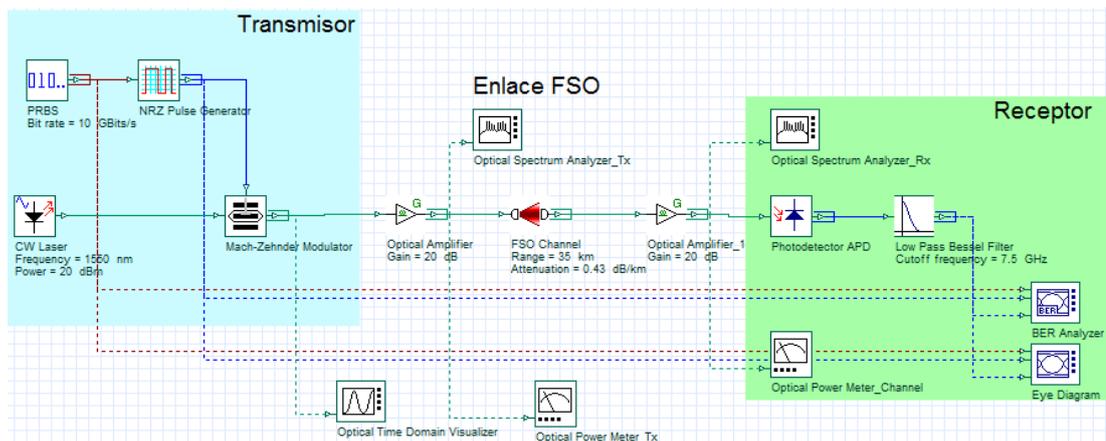


Figura 3. 3: Sistema de comunicaciones FSO a una distancia de enlace de 35 km.

Elaborado por: Autor

En los casos prácticos existe una atenuación en la señal recibida debido a condiciones atmosféricas del canal. En el software de simulación es posible fijar las pérdidas por dicha atenuación. Los valores típicos de atenuación de tres posibles condiciones son: 0,43 dB/Km para clima despejado, 4,3 dB/Km para nublados y 43 dB/Km para niebla (Kim, McArthur, & Korevaar, 2001). El fotodetector APD recibe los datos que provienen del canal y genera una señal eléctrica. Esta señal va a un filtro tipo pasabajo lo que ayuda en la eliminación del ruido.

Configuración del enlace:

La tasa de transmisión es 10 Gbps la longitud de la secuencia transmitida es 128 bits, la tasa de muestreo es 64. Estos valores tienen que ser configurados por igual en el transmisor y el receptor, de otra forma existirían muchos errores en la transferencia de la información.

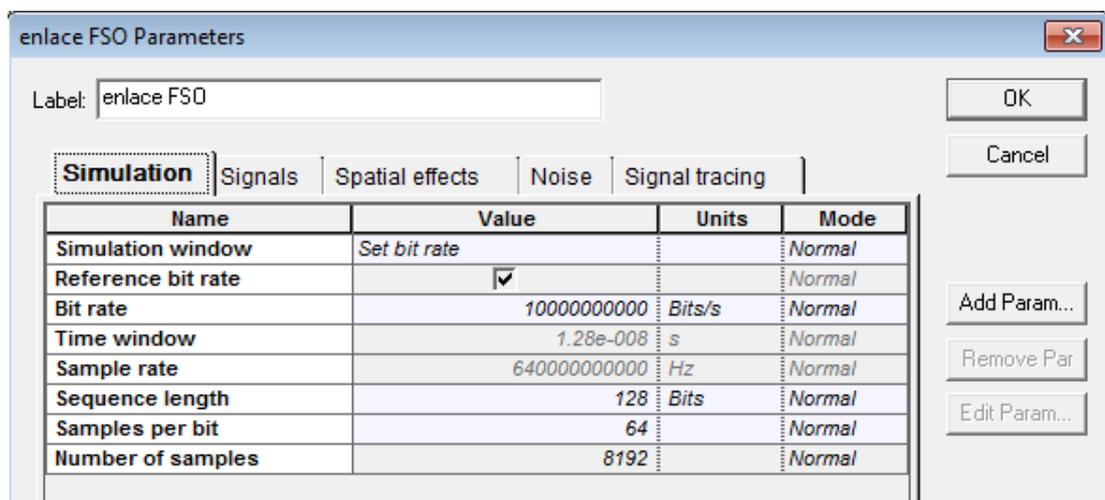


Figura 3. 4: Configuración del enlace

Elaborado por: Autor

A continuación, se muestran las configuraciones de algunos componentes utilizados en el diseño propuesto.

- Generador de secuencias pseudoaleatorias

En la figura 3.4 se muestra la configuración del generador de secuencias pseudoaleatorias. La tasa de transmisión es de 10 Gbps y los bits son generados a partir de una semilla aleatoria.

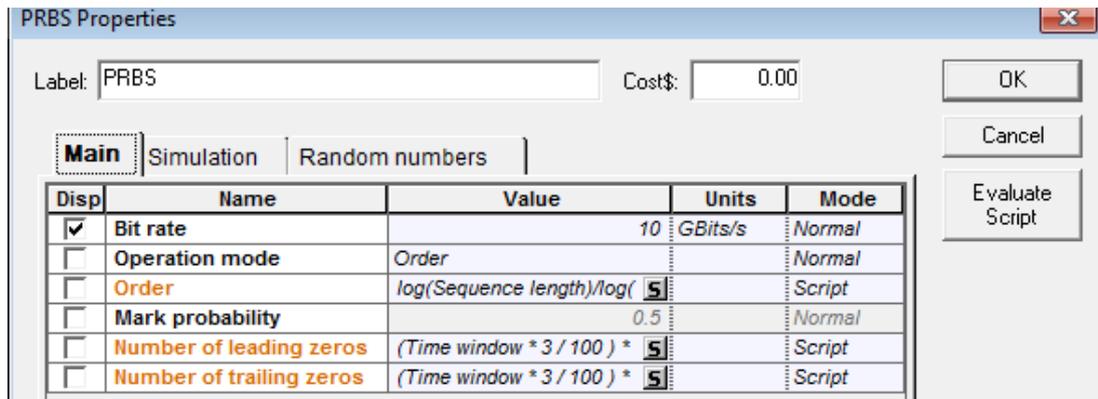


Figura 3. 5: Configuración del generador de secuencias
Elaborado por: Autor

- Fuente láser

En la figura 3.5 se muestran las propiedades de la fuente láser, la cual opera a una longitud de onda de 1550 nm, que es una de las ventanas de trabajo en la transmisión óptica; y a una potencia de 20 dBm.

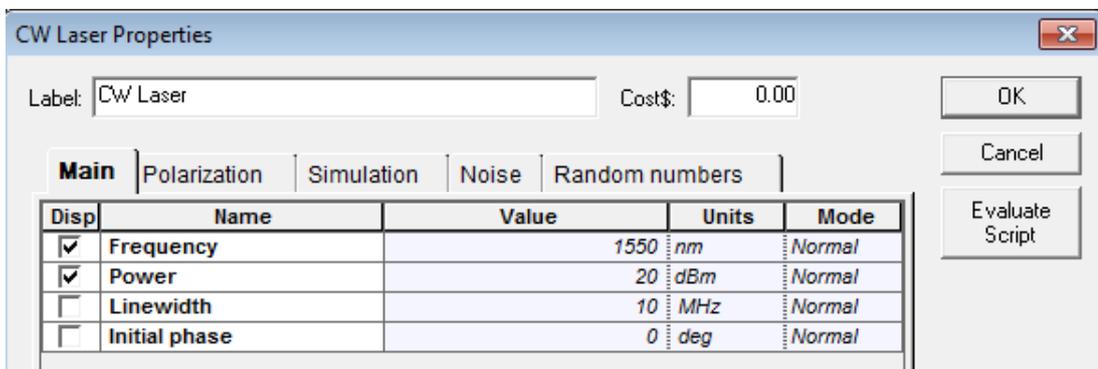


Figura 3. 6: Configuración de la fuente láser
Elaborado por: Autor

- Amplificador óptico

En la figura 3.6 se muestra la configuración de los dos amplificadores ópticos utilizados, que trabajan con una ganancia de 20 dB y realizan control de la misma. Estos componentes consideran el ruido introducido y el valor de la figura de ruido es de 4 dB.

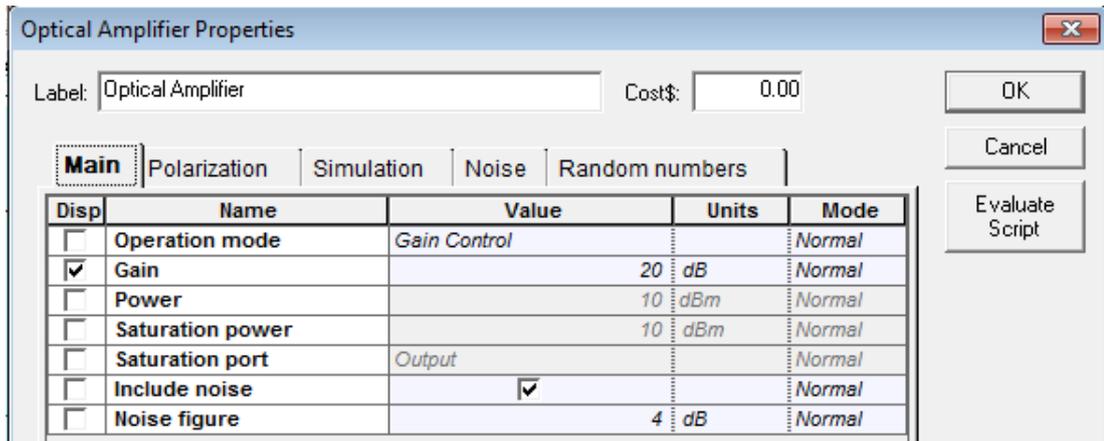


Figura 3. 7: Parámetros del receptor
Elaborado por: Autor

- Canal FSO

En la figura 3.7 se muestran los parámetros que describen el canal. Se considera una longitud del enlace de 35 km con un clima despejado, por lo que la atenuación se fijó en 0,43 dB/km. Se tuvo en cuenta la pérdida geométrica. Las aperturas del transmisor y receptor son de 5 y 20 cm, respectivamente. La divergencia del rayo emitido es de 2 mrad. Los valores anteriormente mencionados son los típicos en estos enlaces.

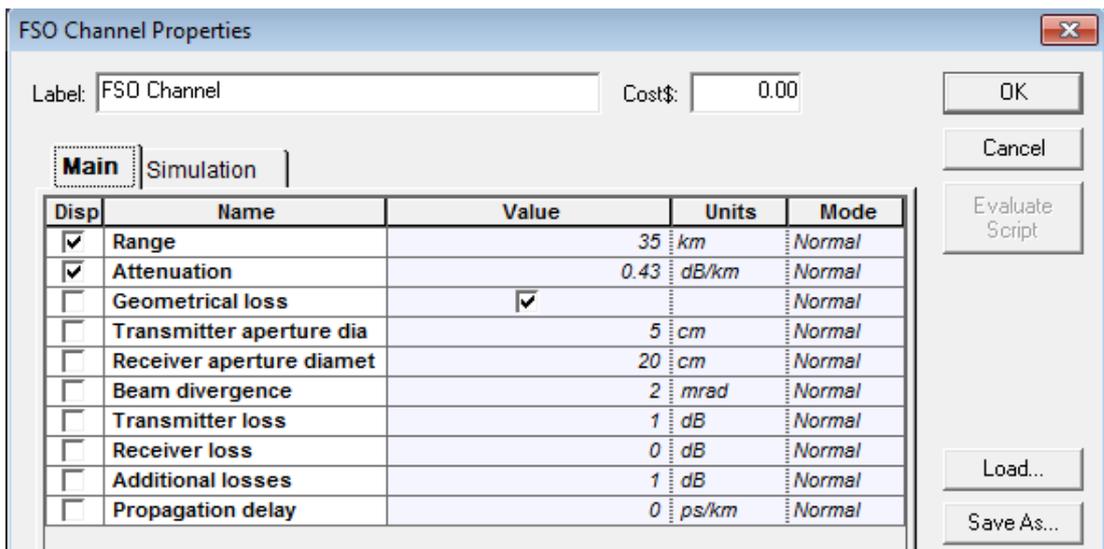


Figura 3. 8: Parámetros del canal
Elaborado por: Autor

En la figura 3.8 se muestra la configuración del filtro pasabajo de Bessel, cuya frecuencia de corte es el 75 % de la tasa de bit de la fuente de información, en este caso del generador de secuencias pseudoaleatoria.

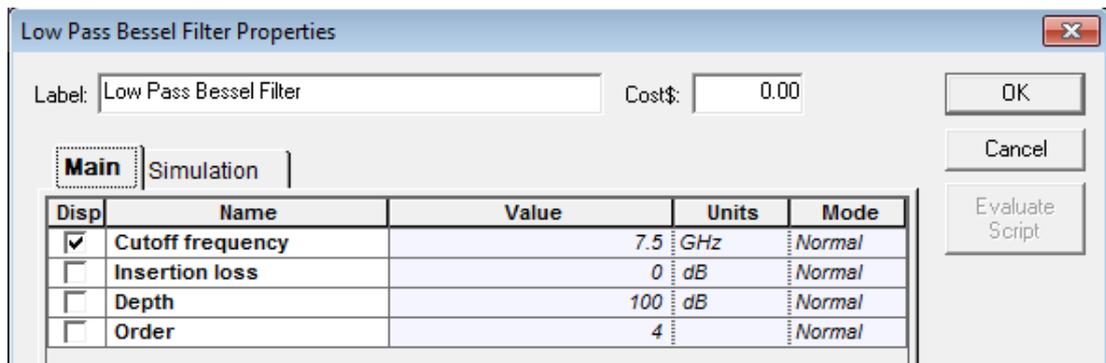


Figura 3. 9: Parámetros del canal
Elaborado por: Autor

- **Instrumentos de medición virtuales**

Para evaluar los resultados arrojados por la simulación se utilizaron varios instrumentos de medición virtual de magnitudes eléctricas y ópticas. Por ejemplo, el potenciómetro, analizador de espectro en el dominio óptico, osciloscopio, calculador de tasa de bit erróneo (BER) y diagrama de ojo.

- **Monitorización de la señal de luz**

Permite analizar los pulsos luminosos en el tiempo, observándose la potencia del 100 mW (20 dB, vea figura 3.9).

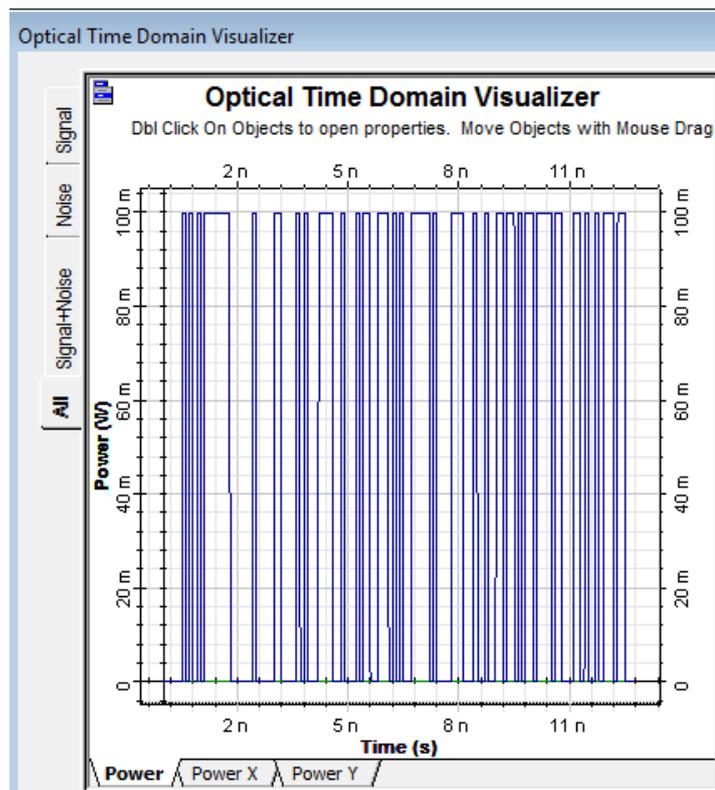


Figura 3. 10: Visualizador de pulsos ópticos.
Elaborado por: Autor

Potenciómetro óptico:

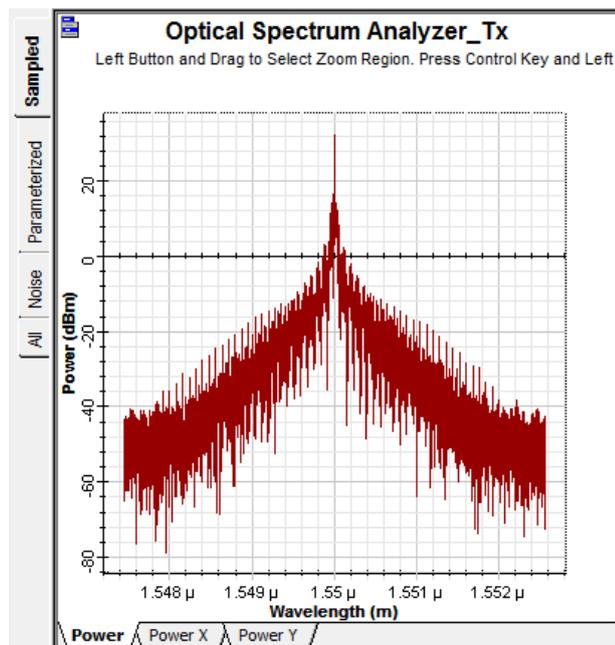
Este instrumento virtual nos permite medir en Watt o dBm la potencia en el a la salida del transmisor y en la entrada del receptor vea figura 3,11. En nuestro trabajo la potencia del transmisor son 4,766 W, y se puede observar la disminución en el receptor debido a la atenuación del canal.



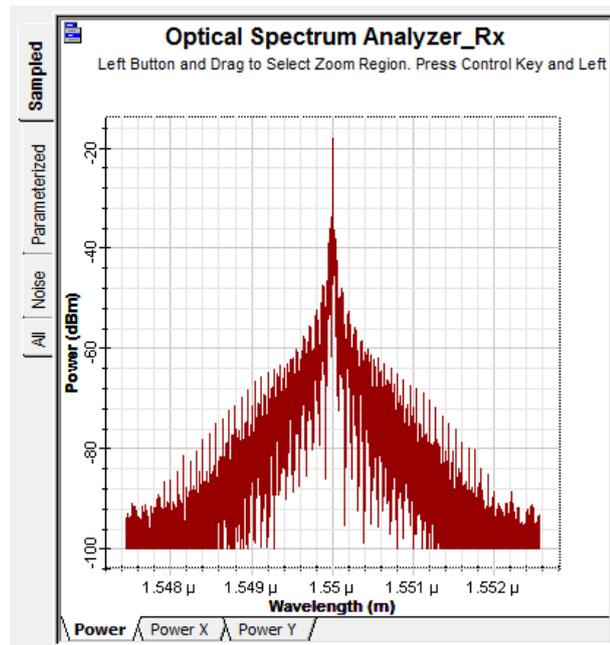
Figura 3. 11: Medidor óptico de potencia
Elaborado por: Autor

Analizador de espectro óptico:

Esta herramienta brinda la facilidad de analizar el espectro óptico. La figura 3.12 (a) y (b) muestra el espectro de frecuencia de las señales transmitida y recibida, respectivamente. Se observa que, en ambos casos, el espectro está centrado en los 1550 nm. Además, puede notarse claramente la pérdida de potencia en la señal recibida.



(a)



(b)

Figura 3. 12: (a) Espectro a la salida del transmisor (b) Espectro en la entrada del receptor.

Elaborado por: Autor

Calculador de BER:

Esta herramienta virtual permite saber el número de bits erróneos que fueron recibidos durante un intervalo específico de tiempo. Los de BER resultados obtenidos al varias la longitud del enlace en de 30, 35 y 40 km, respectivamente son mostrados en las figuras 13, 14 y 15 en una línea roja.

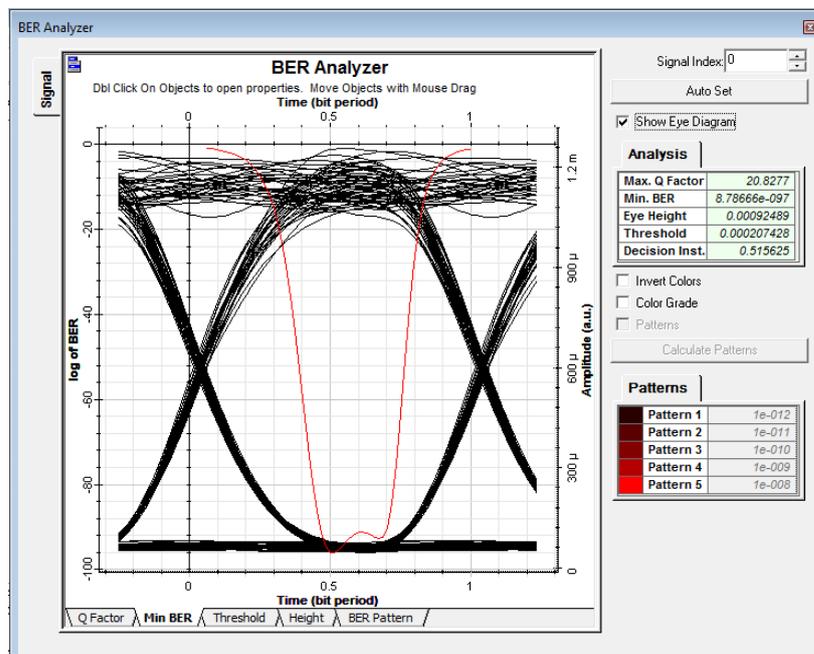


Figura 3. 13: BER obtenida en un enlace de 30 km

Elaborado por: Autor

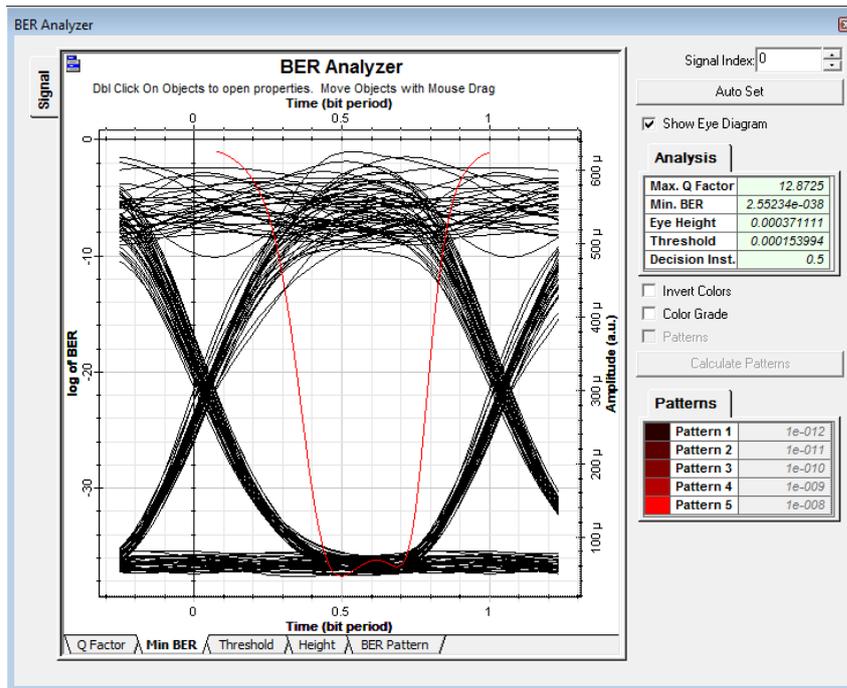


Figura 3. 14: BER obtenida en un enlace de 35 km
Elaborado por: Autor

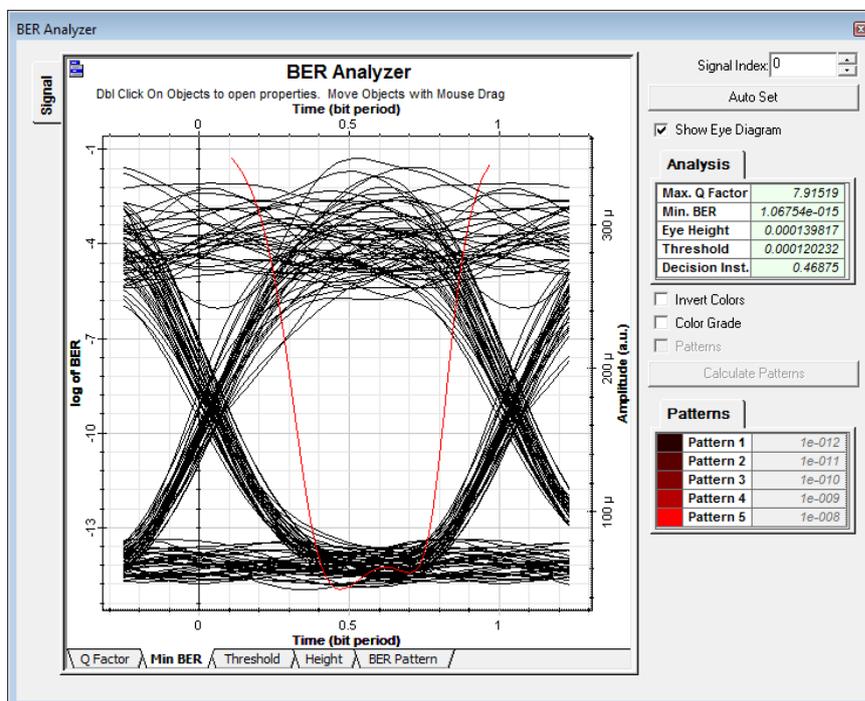


Figura 3.15. BER obtenida en un enlace de 40 km
Elaborado por: Autor

La tasa de bits erróneos o proporción de errores se puede definir como se observa en la ecuación 3:

$$BER = \frac{\text{No. bits erróneos}}{\text{No. total de bits transmitidos}} \quad (3)$$

Generalmente, para garantizar un óptimo desempeño de los sistemas FSO, el límite inferior esperado de la tasa de bits erróneos es de 10^{-9} . Según el diseño del sistema simulado y considerando un clima despejado, a los 43 km se alcanza una BER de aproximadamente $1,88 * 10^{-9}$.

Conclusiones.

En este trabajo se estudiaron los fundamentos teóricos y prácticos de los sistemas que utilizan la tecnología *Free Space Optics* y se analizaron varias características de sus características.

Esta tecnología permite proporcionar un enlace de calidad y estable de manera sencilla y rápida. A pesar de que en la actualidad este tipo de sistemas de comunicación se utiliza en enlaces de hasta 5 Km mediante la simulación presentada en este trabajo se demostró que se pudieran alcanzar distancias de hasta 35 Km si se incorporan amplificadores ópticos en varias partes del sistema. Otra ventaja de este sistema de comunicaciones es que no necesita licencias de operación.

Con los conocimientos acerca de esta tecnología, se simuló un enlace óptico utilizando el software OptiSystem 7.0. Con la ayuda de las herramientas de visualización se observó el comportamiento del sistema a las distancias de 30, 35 y 40 km. Se llegó a la conclusión de que el sistema puede cubrir hasta 43 km manteniendo el valor de la tasa de bits erróneos por debajo de 10^{-9} .

Recomendaciones.

Las oportunidades que se presenta en el ámbito de ingeniería, especialmente en procesamiento de señales digitales es importante tener en cuenta que existen varias herramientas a nuestro alcance especialmente MatLab/Simulink en el cual se puede usar esta herramienta para estudios elegidos, simularlos y entender su funcionamiento con la modelización que da el programa.

Referencias bibliográficas.

- Calderon, V. A. B., Aguilar, J. M. G., Vera, R. E. T., & Gonzalez, G. V. (2010). Diseño de una red con tecnología laser inalámbrica para el campus de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil. Universidad Católica Santiago De Guayaquil.
- Caizaluisa, E. (2008). *Diseño de una red con tecnología láser free space optics (FSO), para el campus de la Escuela Politécnica Nacional y su comparación con la red de fibra óptica*. Escuela Politécnica Nacional, Quito. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4232>
- Chassemlooy, Z., & Popoola, W. (2011). Terrestrial-Free-Space-Optical-Communications. Retrieved from http://www.intechopen.com/source/pdfs/9002/InTechTerrestrial_free_space_optical_communications.pdf
- Cuenca, C., & Palacio, J. (2008). *Diseño y factibilidad de una red inalámbrica óptica utilizando tecnología FSO para la comunicación entre los edificios de la Escuela Politécnica Nacional y el Observatorio Astronómico*. Escuela Politécnica Nacional, Quito. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/9943>
- Guadalupe, J. (2003). *Diseño de un sistema de comunicación en el infrarrojo para escenarios cerrados*. Instituto Politécnico Nacional I, Tijuana, México. Retrieved from http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/720/249_2005_CITEDI_MAESTRIA_guadalupe_arceo.pdf?sequence=1
- Hemani Kaushal, Jain V K, S. K. (2017). *Free Space Optical Communication*. Springer.
- Herve Sizun, Christian Boisrobert, O. B. (2006). *Free-Space Optics:*

Propagation and Communication.

León, J., & Vaca, R. (2008). Estudio de factibilidad y simulación de una red inalámbrica óptica basada en la tecnología FSO (Free Space Optical), para mejorar el rendimiento del BACKBONE. Retrieved from <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/1085>

Mahamed, N. (2010). *Wireless Local Area Network System Employing free space optic communication*. Universiti Teknologi, Malaysia.

Majumdar, A. K. (2014). *Advanced Free Space Optics (FSO): A Systems Approach*. Springer.

Olivera, A. (2006). *Diseño y construcción de un modelo experimental para la comprobación de un enlace de telecomunicación inalámbrico óptico punto a multipunto usando el plano de Fresnel*. Universidad Tecnológica de Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca.

Sadaiti, W. (2007). *Estudo e Modelagem de Canal Óptico Atmosférico Utilizando o Lightsim como Plataforma de Simulação*. Universidade de Campinas, São Paulo.



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, **SUÁREZ MORALES, ANDRÉS GINO** con C.C: # 0924589047 autor del Trabajo de Titulación: **Estudio y simulación de un sistema de comunicaciones usando la tecnología FSO**, 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, 19 de Septiembre de 2017

f. _____

Nombre: SUÁREZ MORALES, ANDRÉS GINO

C.C: 0924589047

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Estudio y simulación de un sistema de comunicaciones usando la tecnología FSO		
AUTOR(ES)	SUÁREZ MORALES, ANDRÉS GINO		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	M. Sc. CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Ingeniería en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	19 de Septiembre de 2017	No. DE PÁGINAS:	45
ÁREAS TEMÁTICAS:	Fundamentos de Comunicación, Comunicaciones Ópticas y Sistemas de Comunicación.		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Óptica del espacio libre, Sistemas, Comunicaciones, Láser, Modulación, BER.		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):			
<p>La tecnología de las comunicaciones mediante enlaces ópticos inalámbricos puede alcanzar velocidades de transferencia de datos en el orden de los 2,5 Gbit/s y es idónea para zonas de difícil acceso o despliegue, como son: zonas rurales, aeropuertos o lugares remotos. Esta permite a los usuarios moverse libremente sin perder la comunicación dentro del área de cobertura, es de fácil de instalación, flexibilidad, escalabilidad, gestión y ahorro de espacio. Además, permite el ahorro de costos sobre líneas dedicadas. Su seguridad en la transmisión de datos y la gran inmunidad a interferencias, son ventajas a tener en cuenta. En este trabajo se realiza un estudio de la tecnología antes mencionada y se implementa en el software OptiSystem 7.0 un enlace óptico. El análisis del comportamiento del sistema mediante el cálculo de indicadores como la tasa de bits erróneos, la ganancia, la potencia total recibida y la relación señal a ruido permitió comprobar el correcto funcionamiento del enlace.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-9-82480445	E-mail: gino_suarez91@outlook.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE	Nombre: Córdova Rivadeneira, Luis Silvio		
	Teléfono: +593-9-92305262		
	E-mail: luis.cordova@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):			