

**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE
TRANSMISION FSO**

GIL ROJAS NICOLAS
JIMENEZ CALDERON CRISTHIAN DAVID

UNIVERSITARIA AGUSTINIANA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA EN TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ D.C

2017

**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE
TRANSMISION FSO**

GIL ROJAS NICOLAS
JIMENEZ CALDERON CRISTHIAN DAVID

tutor: Félix Roberto Gómez Devia

Trabajo de grado para optar al título de profesional en Ingeniería en Telecomunicaciones

UNIVERSITARIA AGUSTINIANA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA EN TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ D.C

2017

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

Dedico el resultado de este trabajo a mi familia quienes siempre me han apoyado y motivado en la búsqueda de alcanzar mis objetivos personales.

Nicolas Gil Rojas

A mis padres por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor. Gracias por los ejemplos de perseverancia y constancia que demostraron y que me han inculcado siempre, por el valor mostrado para salir adelante.

Cristhian Jimenez Calderón

Agradecimientos

Agradecemos a nuestros profesores por la guía a lo largo de nuestro paso por la Universitaria Agustiniana, quienes siempre se esforzaron en que aprendiéramos e interiorizáramos los conocimientos expuestos por ellos.

A la Universitaria Agustiniana por brindarnos la posibilidad de cursar una carrera de educación superior con todos los elementos necesarios para un correcto desarrollo profesional.

Un especial agradecimiento al ingeniero Félix Gómez, por su dedicación y paciencia en la guía para obtener los resultados esperados en el desarrollo de este proyecto.

Resumen

En el desarrollo del proyecto se ha buscado sustituir la conexión cableada (Ethernet) existente entre un host (pc) y otro dispositivo de red (switch, router, u otro pc) mediante el uso de un enlace óptico inalámbrico.

Para lograrlo se realizó un estudio de los elementos principales de las comunicaciones ópticas inalámbricas, desde el medio de transmisión hasta los componentes necesarios para la transmisión y recepción de la señal. También se analizó la señal empleada en Ethernet y porque esta no se puede transmitir directamente por un medio óptico.

Palabras clave: comunicaciones inalámbricas, enlace óptico, Ethernet, FSO.

CONTENIDO

IDEA DE INVESTIGACIÓN	1
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	1
Pregunta de investigación	1
OBJETIVOS	2
General.	2
Específicos.	2
JUSTIFICACIÓN	3
MARCO REFERENCIAL	4
Antecedentes	4
Marco teórico	4
Marco conceptual	5
FSO (Free-Space Optical)	5
Espectro radioeléctrico	6
Propagación en el espacio libre	6
Ethernet.	7
Multiplexación WDM.	8
Marco legal	9
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	9
Método	10
ADMINISTRACIÓN DEL PROYECTO	11
Cronograma	11
Presupuesto	12
PRINCIPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS INALÁMBRICAS	13
Redes inalámbricas	13
Espectro electromagnético	13
Radiación infrarroja	14

Seguridad equipos laser.....	14
COMPONENTES ESENCIALES DE UN ENLACE CON TECNOLOGÍA FSO.....	15
Transmisor.....	15
Receptor	16
Subsistemas adicionales.....	18
FACTORES QUE PUEDEN AFECTAR LA TRANSMISIÓN DE DATOS MEDIANTE TECNOLOGÍA FSO	19
Perdidas ópticas.....	19
Perdidas geométricas.....	19
Perdidas atmosféricas.....	21
Dispersión atmosférica.....	21
Absorción atmosférica.	22
Perdidas climáticas.....	24
Niebla.	24
Lluvia	24
OBJETIVOS DE CONFIABILIDAD DE UN ENLACE CON TECNOLOGÍA FSO	26
ENLACE CON TECNOLOGÍA FSO DISEÑADO	26
Transmisor.....	29
Receptor	30
RECOMENDACIONES	36
CONCLUSIONES	37
REFERENCIAS.....	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de un Sistema FSO (Suraj Informatics, 2008).	5
Figura 2. Bandas del espectro electromagnético usado en radiofrecuencia (CONATEL, s.f)..	6
Figura 3 Ejemplos de pérdidas en el espacio libre para ondas electromagnéticas (CF, Sonido y megafonía Loli, s.f.).....	7
Figura 4 Relación del estándar IEEE 802.3 (Ethernet) con el modelo OSI, en la capa física y la capa de enlace (IEEE, 2015).....	8
Figura 5 Multiplexado por división de longitud de onda. (Tomasi, 2003).....	8
Figura 6 Ejemplo de topología ad hoc. (Tinajero Ríos, 2011).....	13
Figura 7 Elementos en un transceptor FlightStrata, entre los que se destaca el transmisor, el receptor, el sistema óptico y el sistema rastreador. (Laseroptronics, n.d.)	19
Figura 8 Ejemplo de la forma de la divergencia de un haz de luz. (Laserworld, 2018)	20
Figura 9 Absorción de diferentes sustancias sobre la luz. W es equivalente a cm^{-1} , por lo tanto, las longitudes están ordenadas desde 20 μm a 1.25 μm . (Infrarrojo térmico, s.f.).....	23
Figura 10 Precipitación anual Bogotá (IDEAM, 2017)	25
Figura 11 Señal de protocolo Ethernet en el estándar 100Base-TX.	27
Figura 12 Señal empleada en el estándar 10Base-T.....	27
Figura 13 Circuito esquemático empleado para el transmisor.	30
Figura 14 Circuito esquemático empleado en el receptor.....	30
Figura 15 Transceptor empleado, en la parte izquierda se ubica el LED infrarrojo emisor y en la derecha el fototransistor empleado en la recepción.	31
Figura 16 Equipo transceptor conectado al computador.....	31
Figura 17 Señal recibida por el Arduino con una tasa de 1200 baudios a 150 cm de distancia entre transceptores.	32
Figura 18 Señal recibida por el Arduino a 2400 bps a 150 cm.	32
Figura 19 Señal recibida a 100 cm con velocidad de 2400 bps.	33
Figura 20 Texto mostrado en la consola del Arduino a 2400 bps.....	33
Figura 21 Señal recibida a 200 cm con tasa de 1200 baudios.....	33
Figura 22 Texto mostrado por la consola en base a la señal recibida.	34
Figura 23 Señal recibida aplicando cobertura lateral al receptor.	35

Lista de tablas

Tabla 1 Método para el desarrollo de los objetivos.	10
Tabla 2 Cronograma para el desarrollo de las actividades.....	11
Tabla 3 Recursos humanos.....	12
Tabla 4 Equipos.....	12
Tabla 5 Software	12
Tabla 6 Materiales y suministros	12
Tabla 7 Presupuesto total	12
Tabla 8 Tipos de fuentes ópticas empleadas en sistemas FSO infrarrojos.	16
Tabla 9 Perdidas asociadas a diferentes condiciones meteorológicas.....	22
Tabla 10 Posibilidad de establecer comunicación según la tasa de bits empleada por el Arduino.	28
Tabla 11 Resultados del enlace a ciertas tasas de bits.	29

IDEA DE INVESTIGACIÓN

Con el desarrollo de este proyecto, se busca diseñar y probar un sistema de transmisión mediante la tecnología FSO (free-space optical, por su sigla en inglés).

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Para conectar diferentes dispositivos a una red, se usan cables de ethernet o sistemas de radiofrecuencias como Wifi. El Wifi, al igual que otros sistemas de comunicación inalámbrica, presenta el problema que su radiación no es fácilmente controlable y puede ser objeto de ingresos no permitidos, recepción de datos sensibles, entre otro tipo de amenazas, (Vallejo de León, 2010) mientras que al usar cable se elimina de cierta forma este inconveniente, pero el resultante es la poca movilidad del dispositivo

Pregunta de investigación

¿Qué elementos debe tener un sistema de transmisión de datos mediante tecnología FSO que permita comunicación en tiempo real entre dos equipos de cómputo?

OBJETIVOS

General.

Diseñar e implementar un prototipo para transmisión de datos usando tecnología FSO que permita la comunicación en tiempo real entre dos equipos de cómputo del laboratorio de Telecomunicaciones.

Específicos.

Identificar los principios básicos de funcionamiento de las comunicaciones ópticas inalámbricas.

Establecer los componentes esenciales de un enlace con tecnología FSO.

Examinar los factores que pueden afectar la transmisión de datos mediante tecnología FSO.

Determinar los objetivos de confiabilidad de un enlace con tecnología FSO.

Construir un dispositivo que cumpla los objetivos de confiabilidad de un enlace con tecnología FSO deseados.

JUSTIFICACIÓN

Gracias al desarrollo de tecnologías que generan un mayor tráfico de datos por lo que requieren canales con un mayor ancho de banda para su correcto funcionamiento. Estos canales se encuentran en las bandas libres del espectro radioeléctrico en donde además se emplean otra gran cantidad de comunicaciones, produciendo una saturación en estas bandas y posibilitando la interferencia en las diferentes señales que se encuentran ahí.

Además, la creciente concientización de la privacidad en línea ve en los radioenlaces uno de sus mayores obstáculos pues las ondas radioeléctricas no son fácilmente controlables su propagación permitiendo que estas sean recibidas por equipos que no deberían tener acceso a la información que se propaga mediante estas ondas.

Con esto se ve en las comunicaciones ópticas una posible solución a estos inconvenientes, pues estas no emplean frecuencias en el espectro radioeléctrico y la propagación de la luz se puede controlar más eficazmente frente a las ondas radioeléctricas.

Teniendo en cuenta lo anterior se encuentra necesario el estudio de un enlace con tecnología FSO con el cual se pueda aplicar lo aprendido a lo largo de la carrera de ingeniería en telecomunicaciones.

MARCO REFERENCIAL

Antecedentes

Existe un proyecto de tecnología libre conocido como RONJA, que usa la FSO para realizar enlaces. En este momento operan con una distancia máxima de 1.4Km con velocidad de 10Mbps Full-Dúplex.

Existen empresas dedicadas a la fabricación de equipos especializados en FSO, como LightPointe, que es una empresa dedicada a la fabricación de dispositivos para la transmisión a través de Gigabit Ethernet FSO. También está Mostcom, que desarrolla dispositivos para la comunicación FSO y que son distribuidos a través de Artolink.

Marco teórico

Kim & Korevaar (2001) muestran la tecnología FSO como opción viable a las comunicaciones diferente a los cableados de fibra óptica y con un menor costo. Estudian las limitaciones de distancias de los sistemas FSO, pues dependen de las líneas de vista según la región geográfica donde se ubican los terminales del enlace. Concluyen que para poder mejorar las distancias de comunicación combinan el enlace FSO con una copia de seguridad de radiofrecuencia (RF).

A su vez, Kolka, Wilfert, & Biolkova, (2007) realizan un estudio basándose en la información de la visibilidad obtenida por diferentes aeropuertos europeos para ver la disponibilidad de los enlaces FSO que hay en estas regiones, encontrando que suelen estar en un 99% del tiempo disponibles para la transmisión.

Por otra parte, Kolka, Biolková, & Bielek (2008) realizan una simulación de un canal de FSO que usa OOK (On-Off Keying) para determinar cuál es el mejor código para transmitir. Encuentran que este código varía dependiendo de las condiciones atmosféricas en las cuales se transmite, además de que, en condiciones variantes lo mejor es usar códigos de bloques largos junto con correcciones de errores. Por último, mencionan que agregando una capacidad de corrección de error en la capa física mejora el rendimiento del canal.

Al mismo tiempo, Caizaluisa E. (2008) realiza el diseño de una red con tecnología FSO, para lo cual realizan diferentes estudios tales como: Comparación entre la fibra óptica y FSO, sus costos e implementación, datos de los factores que limitan el desempeño de la tecnología como las pérdidas relacionadas con la atmósfera, entre otros.

Como resultado del trabajo de Vavoulas, Sandalidis & Varoutas (2012) se encuentra un artículo en el diario de IEEE sobre los diversos factores climáticos que afectan la transmisión por FSO,

como la lluvia, nieve y niebla. Determinan cuántos transceptores se requieren para un enlace o la distancia del enlace que se puede cubrir con cierto número de transceptores. Encuentran que los cálculos de pérdidas dependen de los modelos de pérdida que usen y la modulación que se emplee.

Algo semejante ocurre con Tatarko, Ovsenik & Turan (2012) quienes analizan un enlace de FSO mediante el estudio de las condiciones climáticas que se presentan y cómo medirlas, en especial la visibilidad entre terminales del enlace. Encuentran que en varias de las ciudades de Eslovaquia estos enlaces están disponibles por encima del 98% del tiempo.

Por último, Toth, Ovsenik & Turan (2013) mencionan características básicas de un sistema FSO, y los modelos que se usan para calcular la atenuación de la luz. Realizan pruebas de un enlace de FSO a lo largo de un año donde encuentran que en primavera y otoño los enlaces son menos factibles debido a las condiciones climáticas (lluvia y niebla) por lo que no son recomendables.

Marco conceptual

FSO (Free-Space Optical).

Enlace de radiocomunicaciones que utiliza ondas ópticas sin ningún medio guiado, como se ve en la figura 1 (ITU, 2007).

Los sistemas FSO trabajan en la región IR del espectro electromagnético. Usan las longitudes de onda cerca del espectro visible, cuyos valores están cerca de 850 y 1550 nm. Debido a la cercanía con el espectro visible, la longitud de onda de IR tiene casi las mismas propiedades que la luz visible y su propagación. (Caizaluisa, 2008).

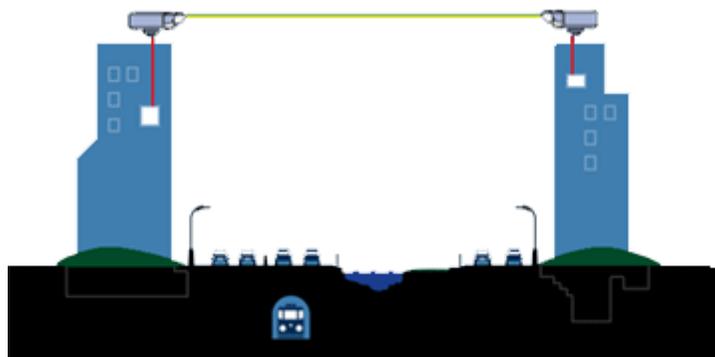


Figura 1. Ejemplo de un Sistema FSO (Suraj Informatics, 2008).

Los sistemas FSO cuentan con una serie de ventajas frente a otras tecnologías, ya que los laser no pueden ser detectados mediante analizadores de espectros ni detectores de potencia RF. Además de que la información puede transmitirse de forma cifrada y esto proporciona mayor seguridad. (Modelo para una red híbrida óptica inalámbrica)

Espectro radioeléctrico

Es el conjunto de ondas electromagnéticas cuya frecuencia se fija convencionalmente entre 3 KHz y 3000 GHz y que se propagan por el espacio sin guía artificial. (Ane, s.f.) como se ve en la figura 2.

Un canal de radiofrecuencia normalmente está definido por dos límites especificados, o por su frecuencia central y ancho de banda, además de que puede ser compartido en el tiempo para permitir la radiocomunicación en ambas direcciones mediante una operación simplex (IEC, 1998).

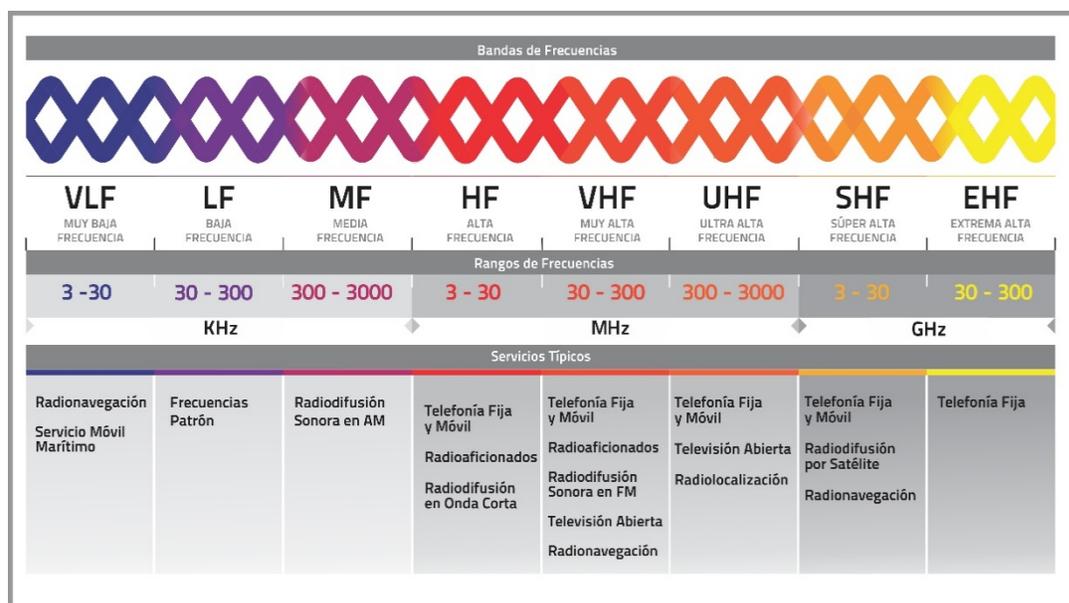


Figura 2. Bandas del espectro electromagnético usado en radiofrecuencia (CONATEL, s.f.).

Propagación en el espacio libre.

Transmisión de una onda electromagnética en un medio dieléctrico uniforme e infinito, donde “la magnitud de cada vector del campo electromagnético en cualquier dirección dada a partir de la fuente ... es proporcionalmente inversa a la distancia desde la fuente.” (ITU, 2015)

Las pérdidas asociadas a la propagación en el espacio libre son: pérdidas por absorción, al interactuar con los gases de la atmósfera; pérdidas por difracción, al igual que las ondas terrestres; pérdidas por dispersión; pérdidas por interferencia de fase entre el haz directo y haces reflejados; entre otros (IEC, 1995). Algunas de estas pérdidas se pueden ver representadas en la figura 3.

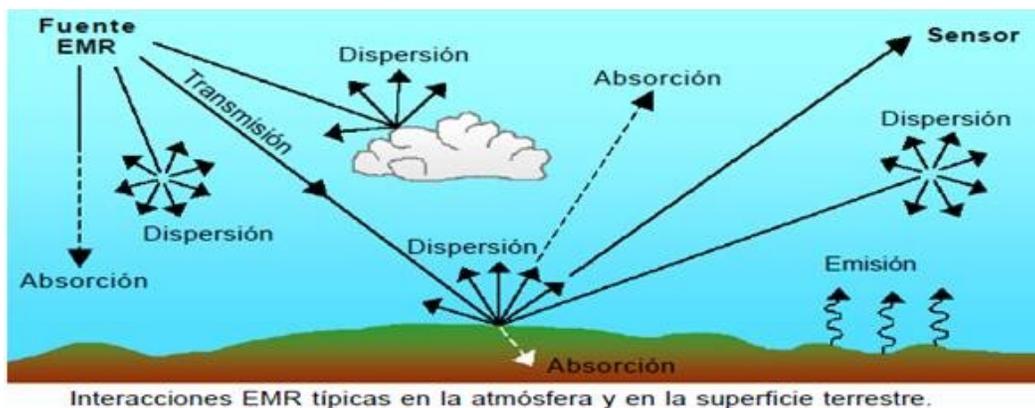


Figura 3 Ejemplos de pérdidas en el espacio libre para ondas electromagnéticas (CF, Sonido y megafonía Loli, s.f.).

Ethernet.

Estándar desarrollado por la IEEE conocido como 802.3 para las comunicaciones de redes LAN y MAN, dirigido a la capa física (modelo OSI), como se ve en la figura 4. Su funcionamiento se adapta según la velocidad de operación, las cuales varían entre 1Mbps a 100Gbps. Usa el protocolo MAC CSMA/CD (Acceso múltiple con escucha de portadora con detección de colisiones) para determinar el funcionamiento Half dúplex o Full dúplex (IEEE, 2015).

La capa física codifica las tramas a transmitir, además de decodificar las tramas entrantes para la modulación según la velocidad o distancia del enlace, o el medio de transmisión. Permite usar dispositivos de la capa física (PHY) que operen con coaxial, par trenzado o fibra óptica, según la velocidad de la *Media Independent Interfaces* (MII). También permite el uso de diferentes tipos de PHY para el acceso a la red, o la alimentación eléctrica a través de un par trenzado para PHY seleccionados (IEEE, 2015).

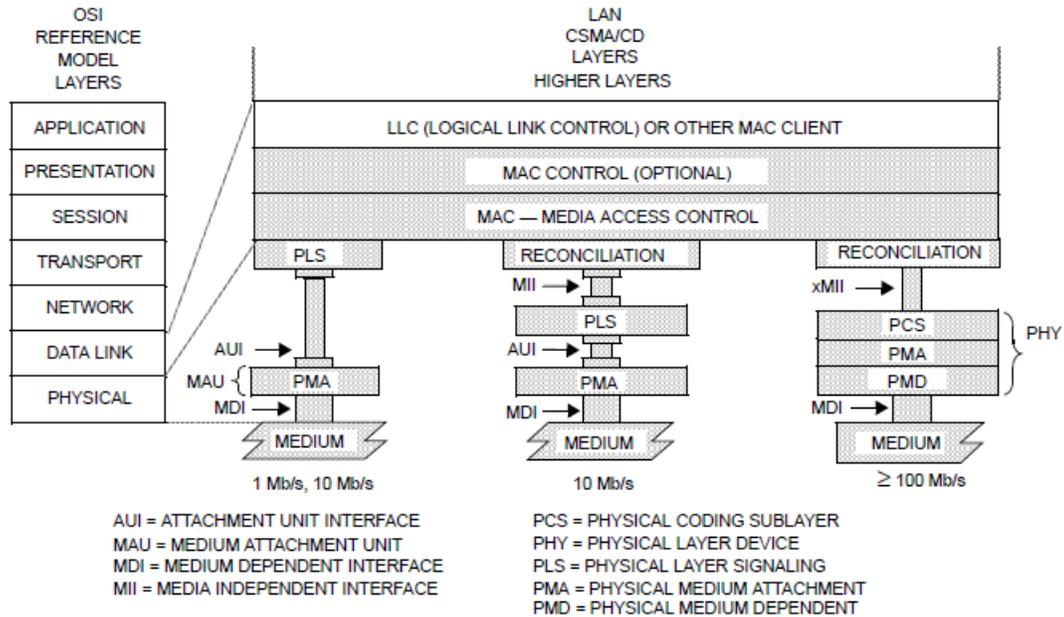


Figura 4 Relación del estándar IEEE 802.3 (Ethernet) con el modelo OSI, en la capa física y la capa de enlace (IEEE, 2015).

Multiplexación WDM.

Se trata de mandar señales de información que ocupen la misma banda de frecuencia, a través de la misma fibra y al mismo tiempo, sin que interfieran entre sí. Como se muestra en la figura 5.

Para lograr esto se modulan diodos laser de inyección que transmiten ondas luminosas muy concentradas a distintas longitudes de onda. Cada longitud de onda es capaz de llevar grandes cantidades de información, sea analógica o digital. Por lo tanto, la multiplexación WDM se trata de acoplar la luz de dos o más longitudes de onda discretas para que entre y salga de una fibra óptica (Tomasi, 2003).

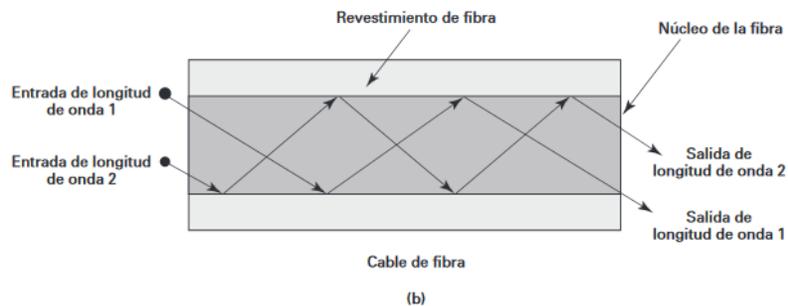


Figura 5 Multiplexado por división de longitud de onda. (Tomasi, 2003)

Marco legal

Para la realización del proyecto se deben tener en cuenta, la recomendación ITU-T G.640, donde se realizan recomendaciones para los parámetros de instalación y funcionamiento de sistemas de FSO coubicados, de forma que estos no generen interferencia entre ellos. Entre los parámetros que referencia, se encuentran la diferencia de las longitudes de onda de cada sistema, la atenuación de los haces según las condiciones climáticas, entre otros (ITU, 2006).

También se debe tener en cuenta la recomendación G.984.1 de la UIT, que se ocupa de las características generales de los sistemas de red óptica pasiva con capacidad gigabit (GPON) con el fin de guiar y motivar la capa física y las especificaciones de la capa de convergencia de transmisión. Las características generales incluyen ejemplos de servicios, interfaces de usuario-red (UNI) e interfaces de nodo de servicio (SNI) que son solicitados por los operadores de red. Además, esta Recomendación muestra la configuración de implementación principal. (ITU, 2008)

Además, se debe tener en cuenta el estándar 60825-12 de la IEC, la cual establece requerimientos y especificaciones para el uso seguro de sistemas y productos laser usados para la transmisión de datos en FSO (IEC, 2004).

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

El enfoque cuantitativo es una serie de pasos consecutivos los cuales no se pueden eludir ni alterar el orden, para así poder probar una idea la cual debe estar delimitada y muy concreta. Para esto se deben crear unas hipótesis en base a las preguntas que delimitaron la idea, y así poder diseñarlas y mediante métodos estadísticos analizar los resultados para finalmente llegar a una conclusión. Al final lo que se quiere con los métodos cuantitativos es intentar explicar y predecir los fenómenos investigados (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010).

Existen diferentes técnicas del enfoque cuantitativo, para este proyecto utilizaremos el diseño de prototipo en donde se crea una versión inicial de un dispositivo, además se caracteriza por la manipulación intencional de unas o más variables independientes y así medir su influencia en variables dependientes (Rodríguez Gómez & Valldeoriola Roquet).

Este tipo de investigación es el aplicado a este proyecto debido a que se realizan diferentes pruebas con diferentes variables en ambientes controlados, para medir el rendimiento del dispositivo FSO, de forma que a futuro se pueda predecir el comportamiento de este en diversas situaciones.

Método

Tabla 1 Método para el desarrollo de los objetivos.

Objetivos específicos	Instrumento o método que toca desarrollar	Población que interviene	Entregable
Identificar los principios básicos de funcionamiento de las comunicaciones ópticas inalámbricas.	Consultar el funcionamiento de sistemas inalámbricos de comunicación óptica.	Documentación técnica. Artículos de investigación.	Documento con los principios básicos aplicables en los sistemas inalámbricos de comunicación óptica.
Establecer los componentes esenciales de un enlace con tecnología FSO.	Identificar los componentes principales de un enlace FSO.	Documentación técnica. Artículos de investigación.	Documento que establece los elementos fundamentales en un enlace FSO.
Examinar los factores que pueden afectar la transmisión de datos mediante tecnología FSO.	Investigar los diferentes factores que generan pérdidas de señal en un enlace FSO.	Documentación técnica. Artículos de investigación.	Documento con los principales factores de atenuación para una señal en un enlace FSO.
	Identificar cuales factores son más propensos a afectar un enlace FSO utilizado en interiores.	Documentación técnica. Artículos de investigación.	Documento explicando los factores identificados.
Construir el dispositivo que cumpla los objetivos de disponibilidad y confiabilidad de un enlace con tecnología FSO deseados.	Elaborar el prototipo de un dispositivo que permita una comunicación óptica inalámbrica entre dos equipos de cómputo.	Laboratorio. Equipos de cómputo. Transmisor óptico. Receptor óptico.	Prototipo capaz de brindar conectividad inalámbrica.

Presupuesto

Tabla 3 Recursos humanos

Perfil	Justificación	Cantidad	Valor
Estudiante ingeniería en telecomunicaciones	Encargados de desarrollar el proyecto	2	\$5,901,736

Tabla 4 Equipos

Equipo	Justificación	Cantidad	Valor
Computador	Necesarios para la red	2	\$3,000,000
Osciloscopio	Observar las señales recibidas	1	\$2,000,000

Tabla 5 Software

Software	Justificación	Cantidad	Valor
Arduino IDE	Programación de los Arduinos	2	\$0

Tabla 6 Materiales y suministros

Materiales	Justificación	Cantidad	Valor
fototransistor	Proveer recepción óptica	2	\$2,000
LED infrarrojo	Proveer emisión óptica	2	\$2,000
Protoboard	Medio para conectar diferentes dispositivos	2	\$2,000
Cables jumpers	Facilitar conexiones	10	\$4,000
Resistencias	Necesarias para regular la corriente en los dispositivos	10	\$500
Amplificador operacional	Amplificar la señal en la recepción	2	\$3,000
Arduino Mega	Funcionar como medio de codificación entre el medio óptico y el computador	1	\$35,000
Arduino Uno	Funcionar como medio de codificación entre el medio óptico y el computador	1	\$23,000

Tabla 7 Presupuesto total

Ítem	Valor
Recursos humanos	\$5,901,736
Equipos	\$5,000,000
Software	\$0
Materiales y suministros	\$71,500
Total	\$10,973,236

PRINCIPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS INALÁMBRICAS

Redes inalámbricas

Una red inalámbrica es un grupo de dispositivos que se comunican entre sí sin la necesidad de un medio guiado para la transmisión de la información. Son redes especialmente útiles para terminales que no se encuentran siempre en un lugar fijo. Entre sus principales ventajas se encuentran la libertad de movimiento de sus usuarios, su escalabilidad y su fácil y rápida instalación. A su vez la principal desventaja se encuentra en la posibilidad de que la información sea interceptada. (Suarez Serrano, 2014)

Las topologías de implementación en redes inalámbricas se encuentran la topología de modo infraestructura y la topología ad-hoc. La primera se caracteriza porque un dispositivo se encarga de interconectar a los demás dispositivos y toda la información que se envía entre terminales debe pasar por él. La topología ad-hoc es una topología en la que no existe un dispositivo encargado de brindar la conectividad entre terminales, sino que ellos se conectan directamente entre sí como se muestra en la figura 6. (Suarez Serrano, 2014)

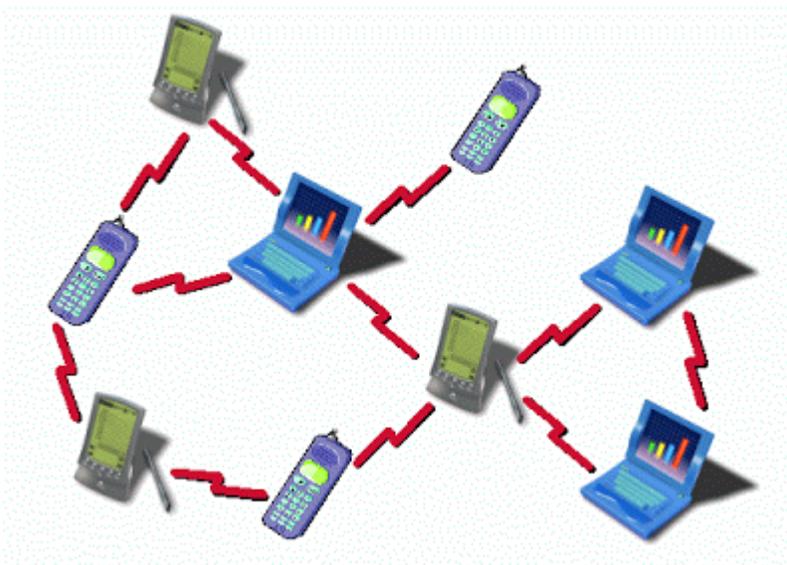


Figura 6 Ejemplo de topología ad hoc. (Tinajero Ríos, 2011)

Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es el conjunto de todas las longitudes de onda de las ondas electromagnéticas, que son el tipo de ondas que no necesitan de un medio de propagación físico. Entre estas ondas se encuentran las de menor longitud de onda, como los rayos gamma, pasando

por la luz visible, hasta las ondas de gran longitud de onda como lo son las ondas radioeléctricas. Las maneras más comunes de describir sus propiedades son su longitud de onda o su frecuencia y que están relacionadas mediante la ecuación (1), donde c es la velocidad con la que viajan estas ondas en el vacío y es de 300.000.000 m/s, y λ y f son la longitud de onda y la frecuencia de esta. (Suarez Serrano, 2014)

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

Otro aspecto importante en el estudio de estas ondas es la cantidad de energía transmitida por cada una. Esto se determina con la ecuación (2), donde E es la energía de la onda, h es la constante de Planck, equivalente a 6.63×10^{-34} J·s. En esta ecuación vemos que la energía de una onda aumenta a medida que su frecuencia lo hace, que es lo mismo a decir que aumenta mientras su longitud disminuye. (Suarez Serrano, 2014)

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

Radiación infrarroja

La radiación infrarroja es el conjunto de ondas electromagnéticas generadas con una longitud de onda en la región infrarroja del espectro electromagnético, que se caracteriza por ser invisible para el ojo humano, además de ser ampliamente utilizada para comunicaciones ópticas en las que su generación se realiza mediante emisión laser. (Suarez Serrano, 2014)

Idealmente, en la comunicación óptica por medio de láser, se espera que el haz generado se propague por el medio en forma de línea recta llegando de forma puntual al receptor, cosa que no sucede en la realidad debido a que a medida que la luz avanza por el medio esta diverge de la trayectoria de propagación lineal. En los láseres se suele emplear un colimador para reducir este efecto. (Suarez Serrano, 2014)

Seguridad equipos laser

Debido al uso de fuentes laser en la transmisión óptica, se debe cuestionar los posibles detrimentos a la salud que estos ocasionan. En primer lugar, Caizaluisa (2008) menciona que la potencia de las ondas ópticas empleadas, al incidir sobre los tejidos de una persona, es absorbida y que solo presenta un riesgo sobre el ojo pues al pasar por la pupila la energía lumínica se absorbe y disipa en la retina, siendo esta muy sensible.

Es por esto por lo que la UIT (2007) indica que la selección del láser se debe tener en cuenta que este sea de clase 1 o 1M según la norma CEI 60825-1, dentro de la cual se definen parámetros de selección como la longitud de onda, la potencia o la forma del haz.

COMPONENTES ESENCIALES DE UN ENLACE CON TECNOLOGÍA FSO

Un sistema FSO, al igual que otros sistemas de comunicación, consta de un transmisor, un receptor y un medio de comunicación. Además, presenta un subsistema de rastreo y adquisición, y un subsistema óptico. (Caizaluisa, 2008) (Suarez Serrano, 2014)

Transmisor

El transmisor del sistema FSO es un transductor encargado de convertir las señales eléctricas, tanto análogas como digitales, a señales ópticas, y que en la gran mayoría de casos se basa en diodos laser, aunque también se encuentran otros tipos de fuentes ópticas clasificadas según la longitud de onda que generan, como se puede ver en la tabla 1. Debido a que en diodos LED se presenta “gran dispersión de la luz y a la distribución espectral tan amplia” (Caizaluisa, 2008) estos se usan en especial para transmisiones en cortas distancias y con bajas tasas de transmisión de hasta 155 Mbps. (Caizaluisa, 2008) (Suarez Serrano, 2014)

Tabla 8 Tipos de fuentes ópticas empleadas en sistemas FSO infrarrojos.

Longitud de onda (nm)	Fuentes ópticas	Comentario
≈850	VCSEL	Barato y disponible fácilmente No enfriamiento activo Baja densidad de potencia Confiable hasta ≈10Gbps
≈1300/≈1550	Fabry-Perot Laser con retroalimentación-distribuida	Poca seguridad visual 50 veces mayor densidad de potencia (100mw/cm ³) Compatible con EDFA Alta velocidad, hasta ≈40Gbps Eficiencia de 0.03-0.2w/m
≈10,00	Laser cascada	Caro y relativamente nuevo Muy rápido y alta sensibilidad Menos afectado por la niebla No trabaja detrás de cristales
Infrarrojo cercano	LED	Barato Circuito simple Baja potencia y tasa de bits

Cabe resaltar que según el uso del enlace se realiza la elección de la fuente óptica, basándose en requisitos como costo, potencia, tiempo de vida, modulación, seguridad para el ojo humano, tamaño y compatibilidad con otros sistemas de comunicación. Además, el transmisor preferiblemente debe tener estas características: ser de bajo consumo, ser capaz de entregar alta potencia, ser altamente confiable frente a cambios de temperatura y no ser muy extenso. (Caizaluisa, 2008) (Suarez Serrano, 2014)

Receptor

El receptor es un dispositivo que convierte las señales ópticas en señales eléctricas para así ser empleadas con mayor facilidad. Su componente principal es el detector óptico encargado de la conversión ópto-eléctrica y se fabrican mayoritariamente de materiales semiconductores. Estos dispositivos se caracterizan por tener una alta sensibilidad, no ser extensos, tener bajo consumo energético, generar bajo ruido, y presentar una alta fiabilidad y rendimiento de forma que se

presenten tasas de error de bit, BER, del orden de 10^{-9} y así permitir una fácil recuperación de la señal original. Luego de la conversión ópto-eléctrica se amplifica la señal permitiendo su manipulación. (Caizaluisa, 2008) (Suarez Serrano, 2014)

El elemento comúnmente más usado es el fotodiodo, debido a su pequeño tamaño, con alta sensibilidad, mientras que los fototransistores tienen un uso limitado debido a su limitación en velocidad de transmisión. Los fotodiodos son empleados en los circuitos eléctricos mediante polarización inversa de modo que al recibir iluminación y existir un campo eléctrico genera corriente eléctrica del orden de los nanoamperios, por lo que se debe amplificar para su correcto procesamiento. Los principales tipos de fotodiodos usados son: los fotodiodos tipo PIN (Positivo, Intrínseco, Negativo), y los fotodiodos tipo avalancha, ADP. (Caizaluisa, 2008) (Suarez Serrano, 2014)

El diodo PIN consiste en una capa de material semiconductor casi puro que une capas de material semiconductor de tipo P y N, y se fabrican en su mayoría de Germanio o uniones de otros elementos como GaAs o GaInAs. Su funcionamiento se basa en la incidencia del haz de luz sobre el material intrínseco, cargando de energía los electrones que generan la corriente eléctrica. Esta corriente es demasiado baja, por lo que el uso de estos diodos requiere además la implementación de buenos amplificadores. (Caizaluisa, 2008) (Suarez Serrano, 2014)

Este tipo de diodos presentan una vida útil larga, que solo se podría ver afectada por condiciones meteorológicas, y son de los más adecuados para transmisiones con longitudes de onda de 1300 y 1550 nm. (Caizaluisa, 2008) (Suarez Serrano, 2014)

Por otra parte, el fotodiodo de avalancha está compuesto de materiales semiconductores ordenados de forma PIPN, y a causa del impacto de los fotones sobre la capa N, se crea un efecto avalancha de corriente fotoeléctrica, pues en un principio se genera una conducción de electrones que al chocar con otros electrones los ionizan y a su vez estos iones ionizan otros átomos. (Caizaluisa, 2008) (Suarez Serrano, 2014)

Entre las ventajas que presentan estos diodos encontramos una mayor sensibilidad que los diodos PIN, por lo que no se requiere una gran amplificación. En los diodos de silicio se presenta un rendimiento de hasta el 90%, una alta ganancia no crítica, generalmente presentan un ancho de banda mayor a 1GHz, y su sensibilidad tiene un comportamiento casi inverso a la velocidad de transmisión, pero su principal desventaja se encuentra en la alta tensión necesaria para su alimentación, entre 200V y 300V. Los diodos de germanio no presentan un rendimiento tan alto

como los de silicio, siendo este de hasta 70% con longitudes de onda de 1000nm a 1300nm, pero no su tensión de alimentación es de 30V. (Caizaluisa, 2008) (Suarez Serrano, 2014)

Para la selección del receptor se debe de tener en cuenta la aplicación del enlace, pues la sensibilidad de este se debe de balancear con la longitud de onda del transmisor. Los diodos PIN resultan mejores para enlaces de corta distancia mientras los ADP en largas distancias. También, los ADP requieren tensiones altas y estables para su operación, lo que resulta más caro que la instalación necesaria para el funcionamiento de un diodo PIN. Por último, los diodos fabricados con silicio resultan más eficientes para longitudes de onda corta, mientras que los de InGaAs son más apropiados para altas longitudes de onda. (Caizaluisa, 2008)

Subsistemas adicionales

El subsistema óptico consiste en el conjunto de lentes y espejos empleados para la transmisión de la luz en el medio, mediante la mínima divergencia del haz de luz en el medio de transmisión, y recoger el haz lumínico y dirigirlo al receptor. Estos sistemas pueden ser sencillos, de unos cuantos espejos o lentes, hasta sistemas complejos de alto costo. (Caizaluisa, 2008)

Por otra parte, el subsistema de rastreo y adquisición es el encargado de mantener alineados el transmisor y receptor para una óptima transmisión. En estos sistemas se emplean servomotores, espejos, o arreglos CCD, entre otros. Son necesarios, pues debido a la posibilidad de movimiento tanto en el receptor como en el transmisor, debido a movimientos estructurales donde se encuentren ubicados. (Caizaluisa, 2008)

El mecanismo más sencillo para mantener una óptima comunicación se basa en la proyección de un haz ancho, de forma que el receptor tenga un margen de movimiento que no afectara su rendimiento. El principal inconveniente de este tipo de transmisión es la alta pérdida de potencia en la señal a su llegada al receptor, debido a su mismo ancho. Solo es aconsejable usar este método cuando el transmisor como el receptor están ubicados en lugares estables que no vayan a provocar un amplio cambio en la dirección del láser/detector. (Caizaluisa, 2008)

En la figura 7 se ilustra un transceptor FlightStrata en el cual se mencionan algunos de sus elementos.

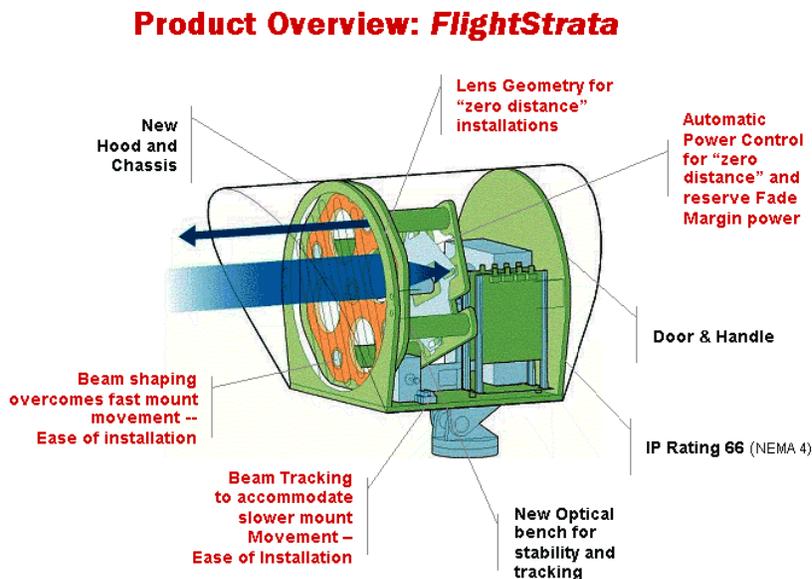


Figura 7 Elementos en un transceptor FlightStrata, entre los que se destaca el transmisor, el receptor, el sistema óptico y el sistema rastreador. (Laseroptronics, n.d.)

FACTORES QUE PUEDEN AFECTAR LA TRANSMISIÓN DE DATOS MEDIANTE TECNOLOGÍA FSO

Para entender los factores que afectan la transmisión de datos en un enlace con tecnología FSO se debe realizar un análisis sobre el margen del enlace con el cual se estudia como varía la potencia en su trayecto desde el emisor hasta el receptor para lograr determinar la disponibilidad del enlace. En este análisis se debe tener en cuenta todas las pérdidas y ganancias esperadas para así conocer la potencia disponible en el receptor en la peor y en la mejor de las condiciones. (Caizaluisa, 2008)

Perdidas ópticas

La primera fuente de pérdidas en el enlace se debe a pérdidas ópticas asociadas a fenómenos de propagación de las ondas, como lo son la refracción que se producen en los lentes o la reflexión de la luz sobre estos, por lo que se establece que en el lente ubicado a la salida del transmisor se produce una pérdida del 4% de la potencia transmitida por la fuente óptica. (Caizaluisa, 2008)

Perdidas geométricas

Otro factor de pérdidas presente en sistemas de FSO se debe a pérdidas geométricas generadas por la divergencia del haz de luz, la cual es un indicador de la apertura del láser, como se observa en la figura 8, y que es “directamente proporcional al área de cobertura en el extremo remoto, y es

inversamente proporcional a la potencia recibida en el receptor del equipo remoto.” (Caizaluisa, 2008)

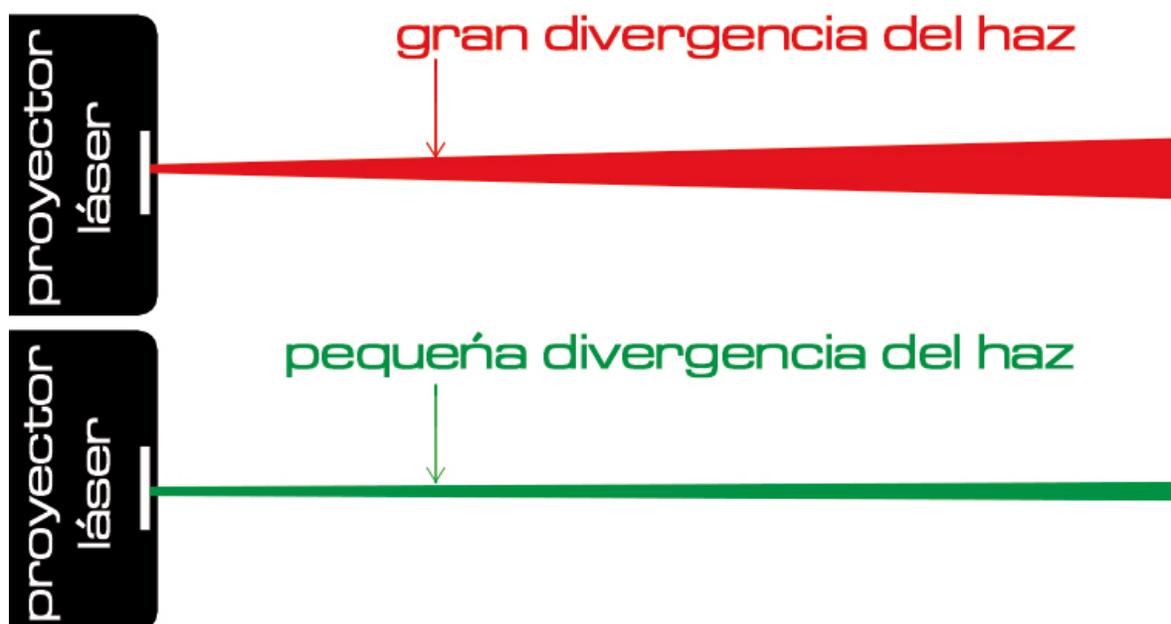


Figura 8 Ejemplo de la forma de la divergencia de un haz de luz. (Laserworld, 2018)

Siguiendo esto, en el receptor del enlace FSO se pierde potencia alrededor de este, lo que conlleva a que no se requiere de un alineamiento muy preciso entre el transmisor y el receptor. Hacer que el haz de luz llegue de la manera más puntual a la superficie del receptor requerirá de una mejor alineación entre el transmisor y el receptor. (Caizaluisa, 2008)

Para conocer las pérdidas debido a este factor, la UIT (2007) da a conocer en su recomendación la forma de calcularla, que se puede apreciar en la ecuación 3, en la cual las pérdidas de potencia se dan en veces, y donde d es la distancia del enlace expresada en m, θ es la divergencia del haz expresada en miliradianes y la cual se suele encontrar en valores de entre 1 y 3 miliradianes, y S_c es el área de captura del haz expresada en m^2 .

$$Att_{Geo} = \frac{\pi}{4} \frac{(d\theta)^2}{S_c} \quad (3)$$

Además, los sistemas con tecnología FSO, al no tener un medio de transmisión guiado, son propensos a sufrir problemas en la transmisión debido a alteraciones en la composición del medio, en este caso la atmósfera. Suarez J. (2014) expone que estos sistemas son muy sensibles a diferentes cambios climáticos, ya sea la lluvia, niebla, nieve, entre otros, porque los rayos enviados

por el espacio libre se atenúan debido a las cuestiones meteorológicas, disminuyendo la eficiencia del sistema.

Perdidas atmosféricas

Dispersión atmosférica.

El primer factor atmosférico a tener en cuenta para conocer las pérdidas debido a la atmósfera es la dispersión atmosférica. Causada por las partículas presentes en la atmósfera, la dispersión atmosférica genera que la energía transmitida mediante la señal de luz sea entregada en otras zonas debido a que toma direcciones diferentes a la deseada. La cantidad de energía perdida por este factor se debe a la longitud de onda de la señal y del tamaño de las partículas presentes en la atmósfera. (Caizaluisa, 2008)

Existen dos tipos de dispersión atmosférica, la dispersión de Rayleigh y la dispersión de Mie. La dispersión de Rayleigh no suele ser tenida en cuenta en sistemas FSO debido a que esta se produce cuando la onda incidente tiene una longitud de onda mucho mayor que el tamaño de la partícula que impacta. (Caizaluisa, 2008)

Por otra parte, la dispersión de Mie ocurre cuando la onda tiene una longitud de onda igual o menor a una partícula sobre la que incide. Debido a la naturaleza de las partículas presentes en la niebla, neblina y de aerosol son los principales atenuadores de las bandas infrarrojas. El coeficiente de dispersión de Mie se calcula mediante la ecuación (4), donde r es el radio de la partícula presente y λ es la longitud de onda de la onda. (Caizaluisa, 2008) En la tabla 1 podemos encontrar diferentes radios de partículas y su coeficiente de dispersión de Mie correspondiente para diferentes longitudes de onda infrarroja.

$$\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (4)$$

Tabla 9 Perdidas asociadas a diferentes condiciones meteorológicas.

Tipo de partícula	Radio (μm)	8.50E-07	9.80E-07	1.30E-06	1.50E-06
Moléculas de aire	0.0001	0.00074	0.00064	0.00048	0.00042
Neblina	0.01 - 1	0.0739 - 7.3919	0.0641 - 6.4114	0.0483 - 4.8332	0.04188 - 4.1887
Niebla	1 a 20	7.3919 - 147.839	6.4114 - 128.228	4.8332 - 96.664	4.1887 - 83.775
Lluvia	100 - 10000	739.198 - 73919.82	641.141 - 64114.13	483.32 - 48332.19	418.879 - 41887.90
Nieve	1000 - 5000	7391.98 - 36959.91	6411.41 - 32057.06	4833.21 - 24166.09	4188.79 - 20943.95
Granizo	5000 - 50000	36959.91 - 369599.13	32057.06 - 320570.67	24166.09 - 241660.97	20943.95 - 209439.51

Absorción atmosférica.

El otro factor atmosférico es el fenómeno de la absorción, la cual consiste en la atenuación del haz de luz por las partículas de la atmosfera, las cuales se pueden clasificar en absorción por aerosol y absorción molecular. La absorción por aerosol se produce por partículas sólidas o líquidas dispersas en la atmosfera con un radio promedio de 20 μm. (Caizaluisa, 2008)

La absorción molecular se debe a sustancias gaseosas presentes en la atmosfera que logran la atenuación de la luz durante grandes rangos de longitudes de onda, y en la región del infrarrojo los principales absorbentes son el vapor de agua, el CO₂ y el ozono. (Caizaluisa, 2008)

En la figura 9 vemos como se produce la absorción atmosférica de diferentes gases presentes en la atmosfera para diferentes longitudes de onda ordenadas desde 20 μm a 1.25 μm, pues W estado en cm⁻¹. Se aprecia que el vapor de agua es el principal factor de absorción y su principal ventana de transmisión es entre 2.5 μm y los 1.25 μm. (Infrarrojo térmico, s.f.)

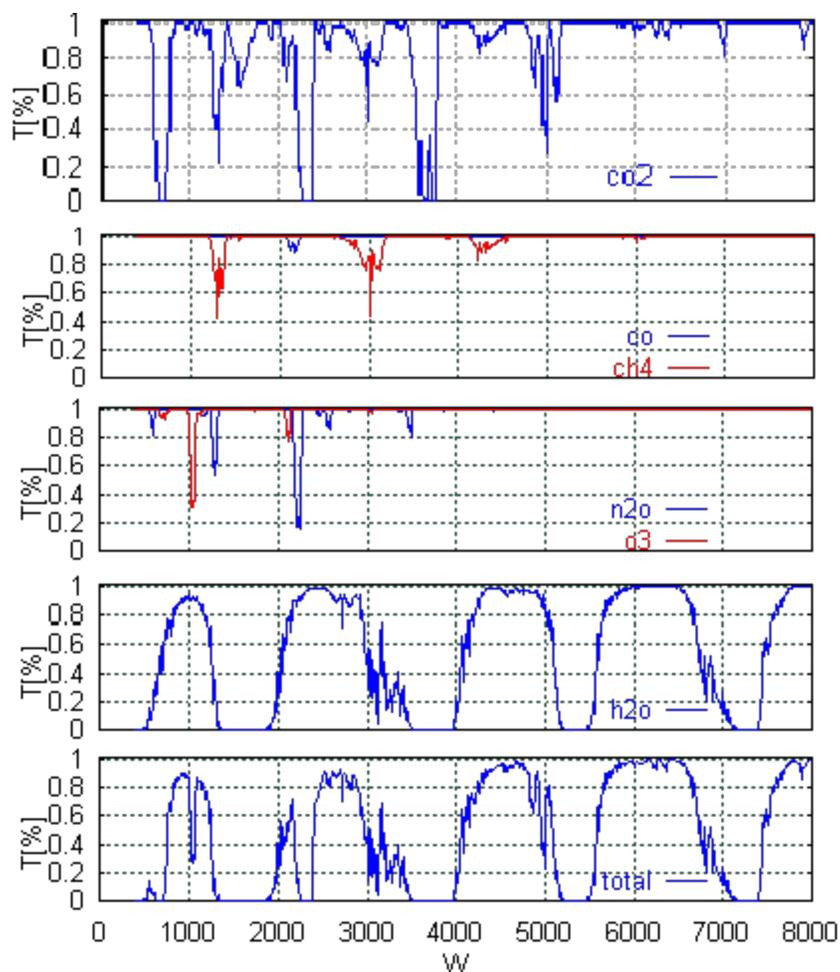


Figura 9 Absorción de diferentes sustancias sobre la luz. W es equivalente a cm^{-1} , por lo tanto, las longitudes están ordenadas desde $20 \mu\text{m}$ a $1.25 \mu\text{m}$. (Infrarrojo térmico, s.f.)

Con estos factores de atenuación de la luz se obtiene la atenuación total producida por la atmosfera, y que es descrita por la ley de Beer-Lambert presentada en la ecuación (5), y que determina la transmitancia de la luz a una distancia R , donde γ es la atenuación total de la señal y P_0 es la potencia de emisión de en la fuente. (Caizaluisa, 2008)

$$\frac{P_R}{P_0} = e^{-\gamma R} \quad (5)$$

También es posible estimar γ en función de la visibilidad en la zona de implementación del sistema y se expresa en la ecuación (6) donde V es la visibilidad de la región en Km y δ indica la distribución del tamaño de las partículas en la atmosfera, que puede ser 1.6 para visibilidad de más de 50Km, 1.3 si la visibilidad esta entre 6 Km y 50Km, o $0.858V^{1/3}$ cuando la visibilidad sea menor a 6Km. (Caizaluisa, 2008)

$$\gamma = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550nm} \right)^{-\delta} \quad (6)$$

Perdidas climáticas

Niebla.

Para la viabilidad de un enlace de FSO es la visibilidad que puede verse afectada por niebla presente en el ambiente, por lo que puede ser un factor para establecer la distancia de visión en la zona, como lo realizó Tatarko M., Ovsenik L. y Turan J. (2012), además de que es posible encontrar información de la visibilidad en sitios web, a pesar de que estos no son muy específicos.

Por esto mismo Quiroz L., Moreno N. y Vera N. (2012) hablan de este factor de niebla el cual está descrito por la ley de Beer, la cual es una relación entre la absorción de la luz y las propiedades del material atravesado.

(Suarez Serrano, 2014) igualmente toma este factor de niebla como el factor más perjudicial, debido a que está formada por pequeñas gotas de agua con un radio similar a la longitud de la onda de la fuente luminosa. Es importante aclarar que al disminuir la visibilidad también disminuye la eficiencia del sistema FSO y puede ser inservible.

Una solución a este problema es colocar los dispositivos a corta distancia para mantener una disponibilidad del enlace óptico, y así proveer una comunicación sin pérdida mayor. Como lo plantea (Caizaluisa, 2008)

Lluvia

La lluvia es otro de los factores atmosféricos que afectan la transmisión de datos a través de la tecnología FSO, en Bogotá el promedio de lluvia anual es de 797 mm, y en meses lluviosos como abril, mayo o noviembre puede llover hasta 18 días en el mes, como se observa en la figura 10.

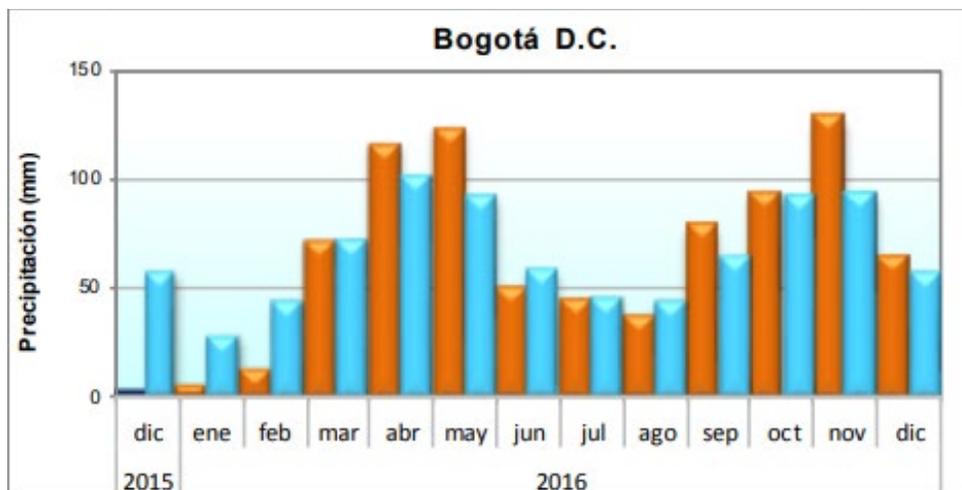


Figura 10 Precipitación anual Bogotá (IDEAM, 2017)

Por ende, este factor es muy importante en la investigación, para Vavoulas, Sandalidis, & Varoutas (2012) los diseñadores de sistemas FSO deberían tomar este factor particularmente ya que causan la dispersión de señales laser en la atmosfera, y esta dispersión hace que una porción de haz de luz que va a viajar desde el transmisor se desvíe y no llegue al receptor, aunque el impacto es significativamente menor al ser comparado con el de la niebla.

El impacto de la lluvia es menor respecto al de niebla ya que las gotas de lluvia tienen un radio aproximado de 200-2000 μm , el cual es más grande que la longitud de onda de la fuente de luz. (Caizaluisa, 2008)

Se han desarrollado diferentes modelos estadísticos para calcular el impacto que tienen los factores climáticos en el enlace, uno de los más utilizados es el log-normal (LN) en el cual se toman los factores de propagación más débiles y se realiza un análisis al rendimiento del enlace. (Tóth, Obseník, & Turán, 2013)

OBJETIVOS DE CONFIABILIDAD DE UN ENLACE CON TECNOLOGÍA FSO

La confiabilidad en sistema de comunicaciones refiere a la integridad con la que los datos son recibidos, así en un sistema poco confiable los datos recibidos tienen poca relación con los transmitidos, mientras en un sistema confiable los datos recibidos se asemejan en gran medida con los datos transmitidos.

Una de las maneras de establecer la confiabilidad de un sistema se realiza con la tasa de error de bit, o BER por sus siglas en inglés. El BER no es más que la relación entre los bits erróneos en una transmisión respecto a los bits enviados en la misma. Usualmente se expresa como una potencia de 10 negativa, como por ejemplo 10^{-6} donde de 1,000,000 de bits enviados solo 1 es erróneo. (Andreotti, 2015)

Además, Andreotti (2015) menciona que para sistemas de fibra óptica se esperan BER de 10^{-9} o 10^{-10} cuando el sistema es muy bueno, en sistemas degradados se espera que la BER sea de 10^{-3} o 10^{-5} e incluso se pueden presentar BER mayores a 10^{-3} en sistemas dañados.

Teniendo en cuenta lo anterior, se espera que el BER para el sistema de transmisión sea de por lo menos 10^{-3} .

ENLACE CON TECNOLOGÍA FSO DISEÑADO

Con los conocimientos encontrados anteriormente se buscó establecer la comunicación entre dos pc aplicando el sistema FSO a las interfaces RJ45 de los equipos. Para esto se empezó por observar la señal con la que se comunican los equipos en una red Ethernet. Como se puede ver en la figura 11 la señal emplea tres niveles lógicos y una amplitud de 200 mV_{pp} , además se logra observar que el tiempo de bit en esta señal es de 10 ns. Esta señal está codificada de forma que al recibir 2 veces seguidas un bit equivalente a 1 se produce un cambio de estado lógico, y al llegar un bit 0 se mantiene en el mismo estado lógico. Debido a la complejidad para lograr decodificar esta señal se decidió realizar un análisis para el estándar 10Base-T.

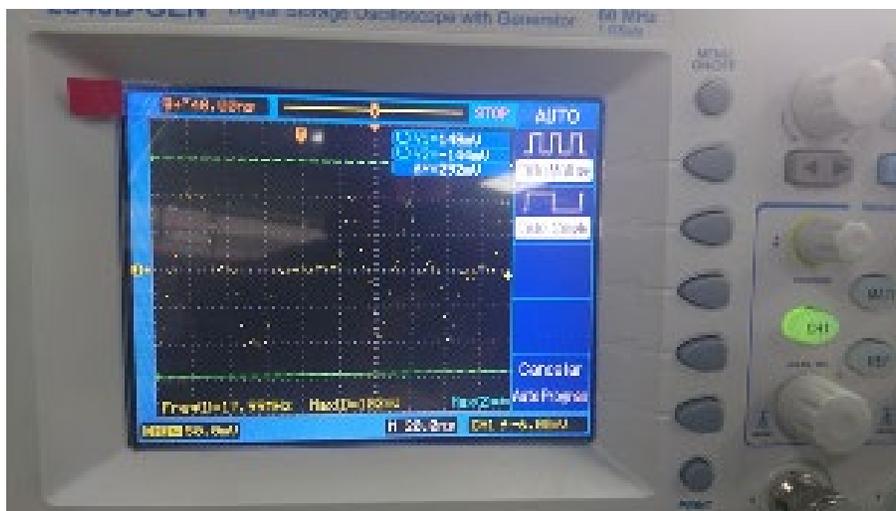


Figura 11 Señal de protocolo Ethernet en el estándar 100Base-TX.

Al estudiar el estándar 10Base-T se ajusta la configuración de uno de los equipos para indicarle a la tarjeta de red que se comunicara bajo los parámetros de este estándar. Se observa la señal en el osciloscopio, como se aprecia en la figura 12, encontrando lo que parece ser una señal que se modula mediante cambios de frecuencia. Se encuentra que la codificación en la señal se realiza mediante la detección de flancos, los cuales son leídos cada 100 ns. Así, un flanco de subida indica un bit “1” y uno descendente es un bit “0”. Al intentar emplear esta señal para realizar la comunicación mediante el enlace resulta más sencilla que la anterior, pero igual se presenta el problema de regenerar la codificación luego de la transmisión inalámbrica, pues sería necesario un oscilador que genere ondas con frecuencias entre 10 y 20 MHz, los cuales son de alto costo y compleja construcción.

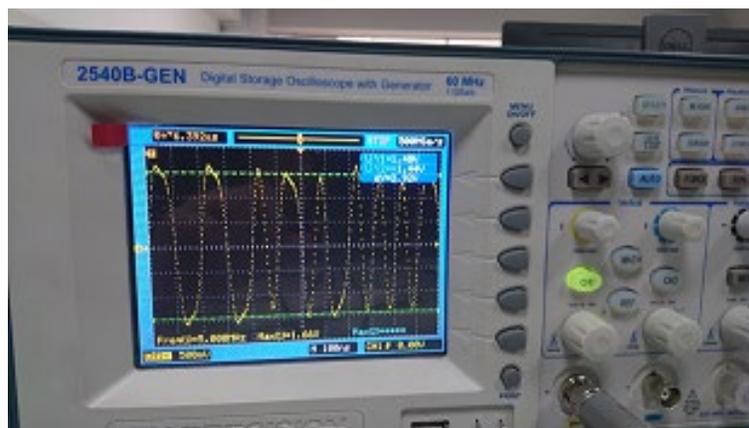


Figura 12 Señal empleada en el estándar 10Base-T.

Con esto presente, se escoge realizar una comunicación entre dos equipos usando las herramientas que nos proporciona Arduino para esto. En primer lugar, se usaron dos placas de Arduino cada una conectada a un equipo diferente. Estas placas nos sirven como codificadores/decodificadores entre los caracteres escritos y los bits enviados en el medio óptico. También encontramos la consola propia del ambiente de desarrollo de Arduino, desde la cual digitaremos los caracteres a enviar, y que serán mostrados en el otro equipo sobre la misma aplicación. Por último, cabe recalcar que la comunicación que se realiza entre los dos Arduinos es una comunicación serial, la cual tiene unas tasas de velocidad soportadas por el Arduino.

Se recurrió al empleo de LEDs infrarrojos y de fototransistores genéricos, pues en principio se pensó en usar laser para el enlace, pero debido a su inexistencia en el mercado nacional, sumado a sus altos costos y altos tiempos de importación, se optó por una alternativa más económica como los LEDs. De igual forma sucedió con los fotodiodos, pues estos no se encuentran en el mercado nacional, además que deben ser adquiridos junto con los laser para

En primer lugar, se buscó la referencia tanto del LED infrarrojo a ser empleado y del fototransistor, que son IR333-A y PT333-3B, respectivamente, fabricados por Everlight. En la hoja técnica del fototransistor se observa que tanto el tiempo de subida como de bajada de voltaje es de 15 μ s, por lo que se espera que en una transmisión digital el tiempo mínimo de bit sea de 30 μ s, permitiendo así una comunicación con una velocidad máxima de 33.33 Kbps. Junto con las velocidades soportadas para la comunicación serial del Arduino se crea la tabla 10 donde se identifica la tasa de baudios para la comunicación, el tiempo de bit según esta tasa, y si es posible, teóricamente, establecer la comunicación usando estos dispositivos optoelectrónicos.

Tabla 10 Posibilidad de establecer comunicación según la tasa de bits empleada por el Arduino.

Baudios (bps)	Tiempo de bit (s)	¿Es, teóricamente, posible comunicarse?
300	0.003333333	SI
600	0.001666667	SI
1200	0.000833333	SI
2400	0.000416667	SI
4800	0.000208333	SI
9600	0.000104167	SI
14400	6.94444×10^{-5}	SI
19200	5.20833×10^{-5}	SI
38400	2.60417×10^{-5}	NO
57600	1.73611×10^{-5}	NO
115200	8.68056×10^{-6}	NO

Conociendo esto, se realizaron pruebas para cada tasa de bits mencionada y que además es soportada por la consola en pantalla del Arduino, por lo que se omiten los valores de 14400 bps y 28800 bps, obteniendo los resultados de la tabla 11. Se observa que, debido a la baja capacidad de respuesta del fototransistor, no es posible establecer una comunicación después de los 4800 bps, además que a 2400 baudios y 4800 baudios no es posible establecer una comunicación sin errores de bit, pues al momento de la decodificación no se realiza una lectura correcta de estos, lo que conlleva a caracteres erróneos sobre el texto mostrado en la consola.

Tabla 11 Resultados del enlace a ciertas tasas de bits.

Tasa de bits (bps)	¿Hay comunicación?	Distancia máxima sin errores (cm)	Distancia máxima con errores (cm)
300	Si	200	230
600	Si	170	200
1200	Si	150	210
2400	Si	-	120
4800	No	-	-
9600	No	-	-
19200	No	-	-
38400	No	-	-

Luego de haber realizado esto se espera realizar un enlace a 1.5 m de distancia entre interfaces ópticas, pues es la que permite la mayor velocidad de transmisión sin presentar mayores errores. A continuación, se detallan mejor los elementos empleados y se estudian las señales recibidas con tasas de 1200 bps y 2400 bps para entender las diferencias.

Transmisor

El transmisor empleado es un circuito que consta de una resistencia y un LED infrarrojo de referencia IR333-A, mencionado anteriormente, y dispuestos como se ve en la figura 13. Se emplea una resistencia de 47Ω con el fin de aumentar la intensidad de corriente sobre el diodo y por ende la intensidad lumínica irradiada, permitiendo un mayor alcance en el enlace.

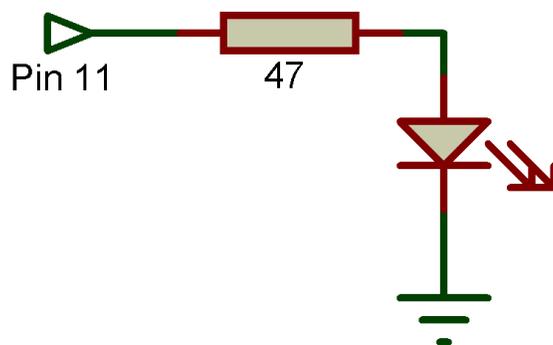


Figura 13 Circuito esquemático empleado para el transmisor.

En la comunicación serial, el Arduino realiza envíos de 8 bits y agrega un bit de parada de manera predeterminada (aunque se puede configurar el número de bits a enviar, la paridad y el número de bits de parada al momento de indicar la preparación de la comunicación).

Receptor

Para el receptor se empleó un fototransistor junto con 2 resistencias, en otro circuito sencillo, que es posible apreciar en la figura 14. El fototransistor empleado se trata del PT333-3B de Everlight y es el principal responsable de la baja velocidad de transmisión del enlace. A la salida de este circuito se emplea una etapa de amplificación realizada con un amplificador operacional, en este caso un LM358, empleando una configuración no inversora.

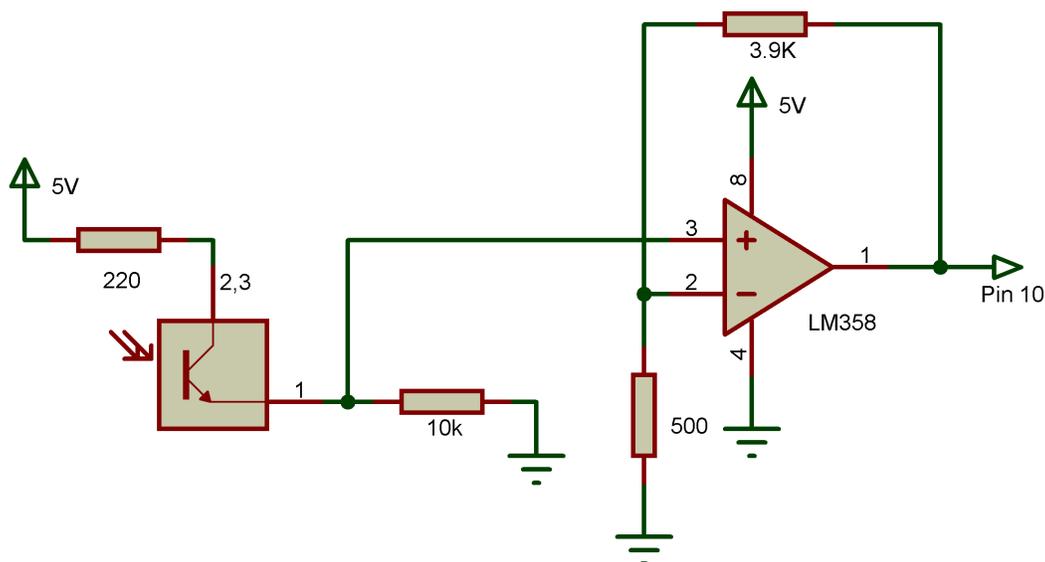


Figura 14 Circuito esquemático empleado en el receptor.

En la figura 15 se observa el montaje tanto del transmisor como del receptor usados para un equipo, mientras en la figura 16 se observa la instalación realizada de todo el equipo, donde a la izquierda se ubica el transceptor, y en la protoboard se encuentra la etapa de amplificación de la señal recibida, además de observarse la placa de Arduino Mega.

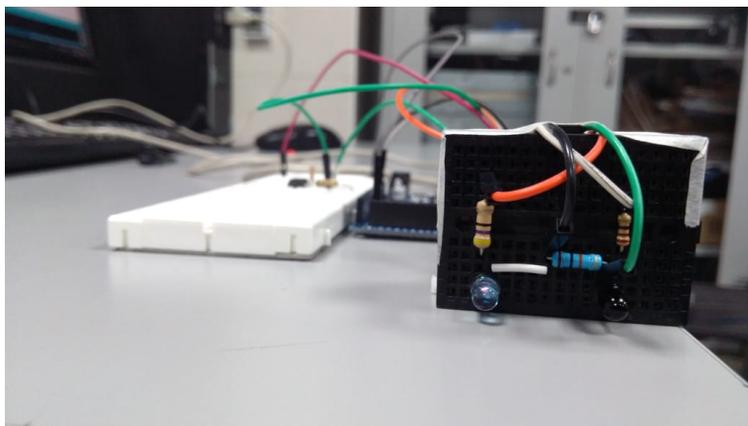


Figura 15 Transceptor empleado, en la parte izquierda se ubica el LED infrarrojo emisor y en la derecha el fototransistor empleado en la recepción.

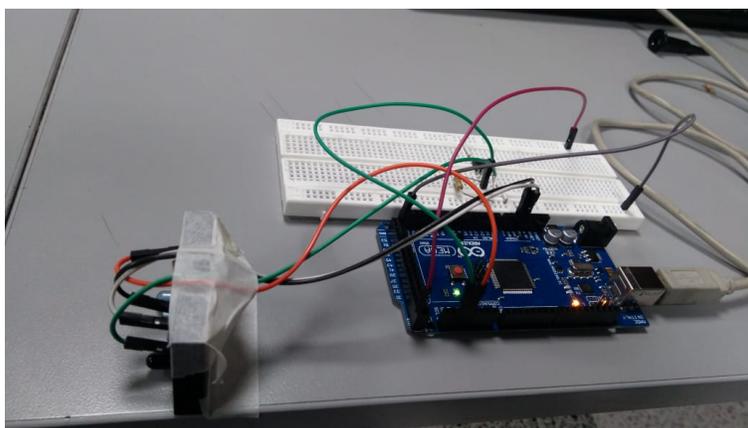


Figura 16 Equipo transceptor conectado al computador.

Se ubicaron los dos transceptores a una distancia de 150 cm y se inició con pruebas de transmisión en las cuales se envió el mensaje “Hola equipo remoto” con la mínima velocidad disponible para la comunicación serial del Arduino, la cual es de 300 bps, aumentándola progresivamente hasta llegar a 1200 bps, velocidad en la cual la transmisión se llevó a cabo sin problemas. Se observó la señal a la salida del amplificador mediante el osciloscopio observando la calidad de esta, obteniendo lo que se muestra en la figura 17. Se aprecia que gracias al amplificador los niveles lógicos altos se distinguen perfectamente, mientras que, por los tiempos de transición entre estados del fototransistor, no se obtiene una lectura clara de los niveles lógicos bajos de la señal y son apenas reconocibles por el Arduino.

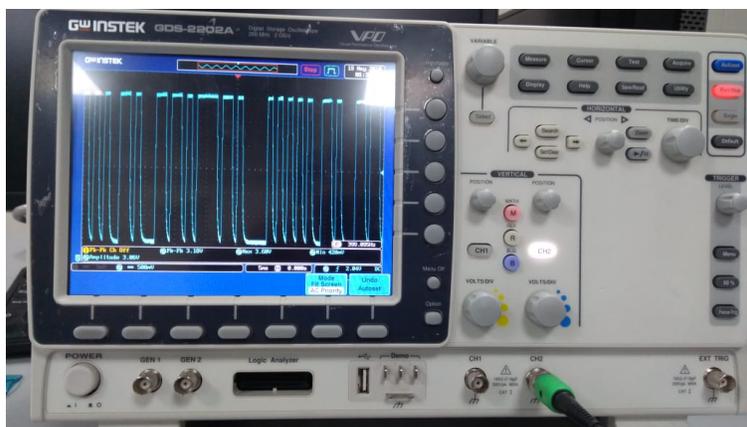


Figura 17 Señal recibida por el Arduino con una tasa de 1200 baudios a 150 cm de distancia entre transceptores.

Al momento de subir la velocidad de comunicación a 2400 bps y observar la señal en el osciloscopio se ve lo que se muestra en la figura 18, donde el nivel alto se identifica claramente gracias al amplificador, mientras que los niveles bajos no alcanzan en algunos casos a ser reconocidos por el Arduino.

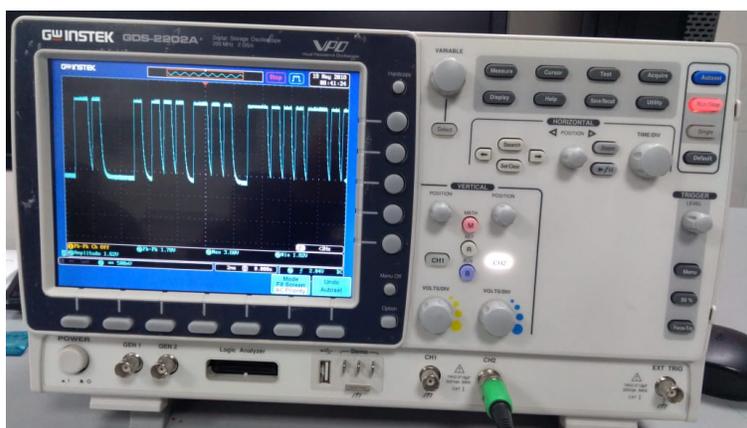


Figura 18 Señal recibida por el Arduino a 2400 bps a 150 cm.

Para comprobar esta hipótesis se acorto la distancia del enlace a 100 cm y se observó la señal recibida, ilustrada en la figura 19. Al compararla con la señal recibida a 150 cm se aprecia que el voltaje para el nivel lógico bajo es menor, pero se confirma que los tiempos de transición entre estados es muy alto para el tiempo de bit, por lo que no alcanza a ser reconocida por el Arduino. En la figura 20 se ve un ejemplo del texto recibido el cual no es bien decodificado por el Arduino.

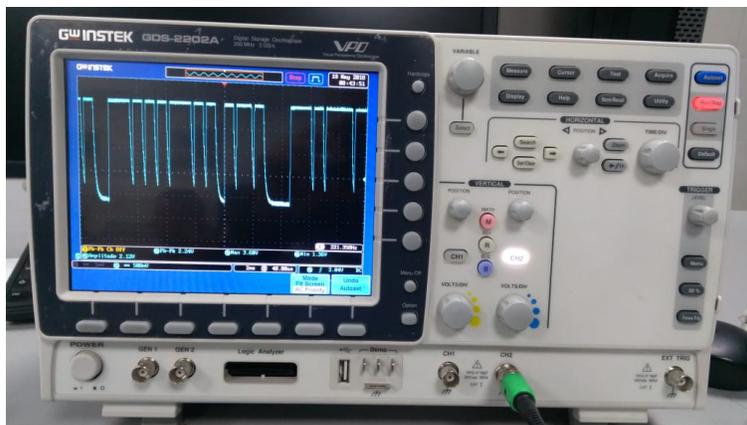


Figura 19 Señal recibida a 100 cm con velocidad de 2400 bps.

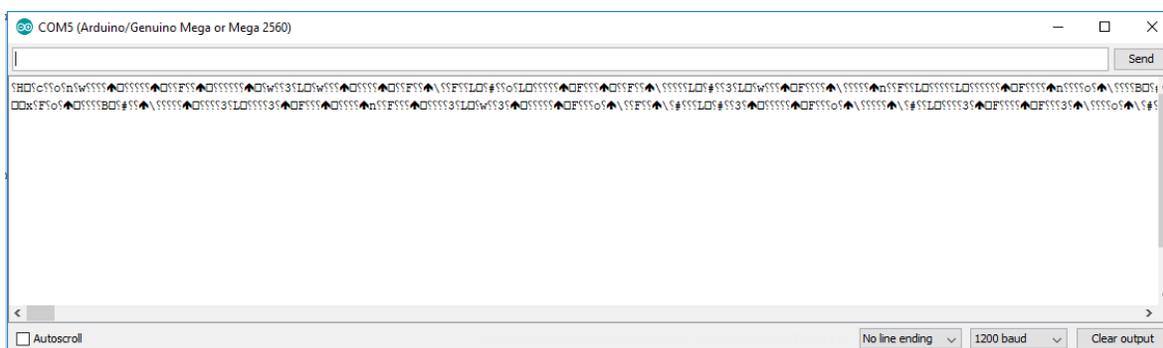


Figura 20 Texto mostrado en la consola del Arduino a 2400 bps.

Luego de esto se decidió bajar nuevamente la velocidad de comunicación, pero esta vez se aumentó la distancia a 200 cm para ver la calidad de la comunicación. Se revisa la señal recibida por el Arduino y se aprecia que tiene una menor amplitud pico a pico, como se ve en la figura 21, pero al revisar la consola del Arduino se aprecia que el mensaje llega en su mayoría, pero con errores de bits por lo que aparecen caracteres erróneos, apreciables en la figura 22.

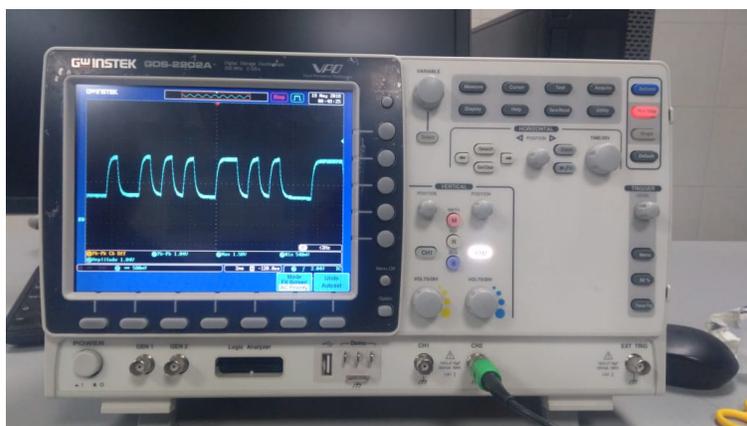


Figura 21 Señal recibida a 200 cm con tasa de 1200 baudios.

The screenshot shows a serial monitor window titled "COM5 (Arduino/Genuino Mega or Mega 2560)". The window contains a list of characters and strings that appear to be corrupted or misinterpreted. The text includes various combinations of letters and symbols, such as "HoLa equIpO reMoto", "HOLA equeipO remOtO", and "HOLA equiPO reMotO". Some lines show multiple characters on the same line, like "HOLA equiPO reMotO" followed by "HOLA equiPO raIotO". The text is displayed in a monospaced font. At the bottom of the window, there are controls for "Autoscroll" (unchecked), "No line ending" (dropdown), "1200 baud" (dropdown), and "Clear output" (button).

```

HoLa equIpO reMoto
HoLa equiPO remOtO
HOLA equeipO remOtO
HOLA equiPO reMotO
HoLA equiPO reMotO
HoLa AquipO bemoto      □HOLA equipo ramoto□HOLA equipo raIotO
HOLA equiPO rdioto□
@OLA eqthpo peiNto      □HNla eqt`po r`hntn
HOLA eqthpo reinto
HOLA eqqipo rdIntO
Hnl` equipo rdIntO▲
Hol` equipn reloto
Hnl` equipo remnto
Hol` eqthpN remNto
Hol` eqtipo reloto
Hol` equiPO remoto
HOLA equiPO remotO
HoLa dquipo bemoto
HOLA EquipO bEmotO
HOLA eaiPO rDmotO□HOLA equeipo reIoto□HOLA equipo reIoto
HOLA equipo reiNto
HOLA equeipo reiOpo
HOLA equipo remOtO
Hol` equipN remnto
Hoh` eqtipN remopN▲
HOLA equipo rdmnto▲
Hol` eqtipN rdmotn
HOLA eqthpn rdmntN▲
Hol` equipn reloto
Hol` equipn remoto▲
HOLA equipo remotO▲
HOLA equipo remOtO
HOLA equiPO remoto
HOLA Equeipo remotO
HOLA Equeipo rEMotO
HOLA EqueIpo remOtO
HOHa equeIpo rEModo

```

Figura 22 Texto mostrado por la consola en base a la señal recibida.

Por último, se cubrió con cartulina negra el transceptor que se encontraba recibiendo la señal para reducir la incidencia de luz proveniente de otras fuentes, pues en ese momento se encontraba una lámpara de luz blanca encendida. Al hacerlo, se aprecia que la señal sufre un desplazamiento de offset aumentando los voltajes para los niveles lógicos en 500 mV, como se observa en la figura 23, pero no evita los errores de bit.

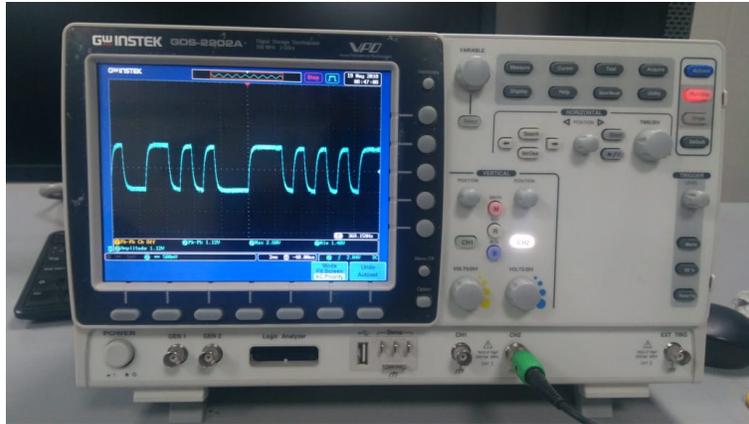


Figura 23 Señal recibida aplicando cobertura lateral al receptor.

Gracias a esto se establece que el enlace funciona correctamente con una velocidad de 1.2 Kbps a una distancia de 1.5 m siempre y cuando no haya obstrucción de la línea de vista entre las interfaces ópticas.

RECOMENDACIONES

Al momento de realizar un enlace de FSO se deben emplear fotodiodos en la recepción de la señal, pues estos permiten una mayor velocidad de transmisión gracias a sus menores tiempos de cambio de estado que los fototransistores empleados. La línea de vista resulta importante para el correcto desempeño de la comunicación, por lo que la instalación de las terminales se debe realizar teniendo en cuenta que esta sea rara vez interrumpida. Resulta importante la filtración de la luz visible en el receptor pues esta es capaz de generar errores en la recepción y decodificación de la señal.

CONCLUSIONES

Un sistema de comunicaciones ópticas por el espacio libre es un sistema útil gracias a las características de propagación de la luz con la cual se pueden alcanzar altas velocidades con una modulación básica como OOK, además que no se necesita licencia para ser usado, a diferencia de un sistema de comunicación que emplee ondas radioeléctricas para operan en bandas licenciadas, y presenta menor interferencia, que los sistemas radioeléctricos que trabajan en las bandas libres. También presenta mayor seguridad que estos sistemas, pues la información es más compleja de interceptar pues siempre se necesita línea de vista entre interfaces.

El primer factor que puede afectar la transmisión en estos sistemas es la necesidad permanente de línea de vista, pues donde esta sea interferida no se podrá establecer comunicación.

También se debe considerar la distancia de transmisión, pues dependiendo de la longitud de onda en la que trabaje el sistema, la señal presentará mayor o menor dispersión y absorción atmosférica.

Por último, se debe considerar si el enlace será ubicado en espacios abiertos en los cuales se pueda presentar lluvia o nieve, pues bajo estas condiciones la señal sufrirá mayores pérdidas.

Para la instalación de un prototipo de FSO que permita la comunicación entre equipos se debe tener presente: la zona de instalación, pues la línea de vista no debe ser interrumpida y, el tipo de información a transmitir, pues de esta dependerá la complejidad del sistema, debido a que entre mayor sea el número de bytes a transmitir se requerirá de mayor tasa de transmisión y se necesitara un método para mejorar la fidelidad de la recepción.

REFERENCIAS

- Andreotti, J. I. (21 de Agosto de 2015). *¿Qué es el BER (Bit Error Rate)?* . Obtenido de http://ingenieroandreotti.blogspot.com.co/2015/08/que-es-el-ber-bit-error-rate_21.html
- Ane. (s.f.). www.ane.gov.co. Recuperado el 26 de 08 de 2017, de <https://www.ane.gov.co/index.php/informacion-de-interes/glosario>
- 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*. Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- CF, Sonido y megafonía Loli. (s.f.). 2.2. *PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN EL ESPACIO LIBRE*. Obtenido de <https://sites.google.com/site/sonidoymegafonialolicf/tema1/tema-2/2-2-propagacion-del-sonido-en-el-espacio-libre-espacio-libre-es-un-proceso-complejo-simultaneamente>
- CONATEL. (s.f.). *¿Qué es?* Obtenido de Espectro Radioeléctrico: <http://www.conatel.gob.ve/espectro-radioelectrico/>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. d. (2010). *Metodología de la investigación*. México: Mc Graw-Hill.
- IDEAM. (2017). *Anuario climatológico 2016*. Recuperado el Febrero de 2018, de <http://passthrough.fw-notify.net/download/071726/http://www.ideam.gov.co/documents/21021/565224/ANUARIO%20CLIMATOLOGICO%202016.pdf/86272b98-5f47-43ea-8596-b1e01ecd155e?version=1.0>
- IEC. (09 de 1995). *loss relative to free space*. Obtenido de International Electrotechnical Commission: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=705-08-07>
- IEC. (04 de 1998). *(radio-frequency) channel*. Obtenido de International Electrotechnical Commission: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=713-06-04>
- IEC. (02 de 2004). *IEC 60825-12*. Obtenido de https://webstore.iec.ch/preview/info_iec60825-12%7Bed1.0%7Den.pdf
- IEEE. (2015). IEEE Standard for Ethernet.

- Infrarrojo térmico.* (s.f.). Obtenido de <http://rammb.cira.colostate.edu/wmovl/vrl/tutorials/euromet/courses/spanish/satmet/s2500/s2500006.htm>
- ITU. (03 de 2006). *ITU-T G.640 (03/2006)*. Obtenido de ITU-T Recommendations: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?id=8750&lang=en>
- ITU. (2007). *Aplicaciones del servicio fijo que utilizan enlaces ópticos en el espacio libre*.
- ITU. (2007). *www.itu.int*. Recuperado el 27 de Agosto de 2017, de <https://www.itu.int/net/ITU-R/asp/terminology-definition.asp?lang=en&rlink={6D6F855D-16DF-4A93-9230-9ADC9D1CF54A}>
- ITU. (03 de 2008). *ITU-T G.984.1 (03/2008)*. Recuperado el 17 de 09 de 2017, de ITU-T Recommendations: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=9379&lang=es>
- ITU. (08 de 2015). *V.573 : Vocabulario de radiocomunicaciones*. Obtenido de Union Internacional de Telecomunicaciones: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/v/R-REC-V.573-5-200709-S!!PDF-S.pdf
- Kim, I., & Korevaar, E. (27 de Noviembre de 2001). Availability of free space optics (FSO) and hybrid FSO/RF systems. *Optical Wireless Communications IV*, págs. 84-95.
- Kolka, Z., Biolková, V., & Biolek, D. (2008). Simulation of FSO transmission channel. *7th WSEAS International conference on CIRCUITS, SYSTEMS, ELECTRONICS, CONTROL and SIGNAL PROCESSING (CSECS'08)*.
- Kolka, Z., Wilfert, O., & Biolkova, V. (2007). Reliability of Digital FSO Links in Europe. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 34. Republica Checa.
- Laseroptronics. (s.f.). *LASEROPTRONICS*. Obtenido de <http://www.laseroptronics.com/>
- Laserworld. (2018). *LASERWORLD*. Obtenido de <https://www.laserworld.es/es/bueno-saber/guia-de-iluminacion-laser/caracteristicas-del-haz>
- Rodríguez Gómez, D., & Valldeoriola Roquet, J. (s.f.). *Metodología de la investigación*. Obtenido de Universitat Oberta de Catalunya: http://zanadoria.com/syllabi/m1019/mat_cast-nodef/PID_00148556-1.pdf
- Suarez Serrano, J. C. (2014). *Técnicas de transmisión en el espacio libre (FSO): Fundamentos teóricos, tecnologías y aplicación*. Tesis previa a la obtención del grado académico de Magister en telecomunicaciones., Universidad Católica de Santiago de Guayaquil,

- Guayaquil. Obtenido de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/2188/1/T-UCSG-POS-MTEL-24.pdf>
- Suraj Informatics. (2008). *Free Space Optics - FSO*. Obtenido de <http://www.surajinformatics.com/fso-free-space-optics.htm>
- Tatarko, M., Ovseník, L., & Turán, J. (2012). Availability and Reliability of FSO Links Estimated from Visibility. *Carpathian Journal of Electronic and Computer Engineering*, 5(1), 121-126.
- Tinajero Ríos, L. Á. (02 de 2011). *Manejo de redes*. Obtenido de Topologías inalámbricas Ad-hoc e Infraestructura : <http://manejoredes.blogspot.com.co/2011/02/topologias-inalambricas-ad-hoc-e.html>
- Tomasi, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Mexico: Pearson Educación.
- Tóth, J., Obseník, L., & Turán, J. (2013). The New Statistical Model for FSO Systems. *Carpathian Journal of Electronic and Computer Engineering*, 6(2), 42-45.
- Vallejo de León, T. V. (2010). *Vulnerabilidades y niveles de seguridad en redes WI-FI*. Trabajo de graduación, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Vavoulas, E., Sandalidis, H., & Varoutas, D. (Octubre de 2012). Weather effects on FSO network connectivity. *Journal of Optical Communications and Networking*, 4(10), págs. 734-740.