



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TÍTULO DE LA TESIS:

TÉCNICAS DE TRANSMISIÓN ÓPTICA EN EL ESPACIO  
LIBRE (FSO): FUNDAMENTOS TEÓRICOS,  
TECNOLOGÍAS Y APLICACIÓN.

Previa la obtención del Grado Académico de Magíster en  
Telecomunicaciones

ELABORADO POR:

ING. JUAN CARLOS SUAREZ SERRANO

DIRIGIDO POR:

ING. MARÍA LUZMILA RUILOVA AGUIRRE, MSC.

Guayaquil, Julio de 2014



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

## SISTEMA DE POSGRADO

### CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Ing. Juan Carlos Suarez Serrano como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de Magíster en Telecomunicaciones.

Guayaquil, Julio de 2014

DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. María Luzmila Ruilova Aguirre, MSc.

### REVISORES:

---

Ing. Orlando Philco Asqui, MSc.

---

Ing. Luis Córdova Rivadeneira, MSc.

DIRECTOR DEL PROGRAMA

---

Ing. Manuel Romero Paz, MSc.



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

YO, ING. JUAN CARLOS SUAREZ SERRANO

DECLARO QUE:

La tesis “Técnicas de transmisión óptica en el espacio libre (FSO): fundamentos teóricos, tecnologías y aplicación”, previa a la obtención del grado Académico de Magíster, ha sido desarrollada en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

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

Guayaquil, Julio de 2014

EL AUTOR

---

ING. JUAN CARLOS SUAREZ SERRANO



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

AUTORIZACIÓN

YO, ING. JUAN CARLOS SUAREZ SERRANO

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución de la Tesis de Maestría titulada: “Técnicas de transmisión óptica en el espacio libre (FSO): fundamentos teóricos, tecnologías y aplicación”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, Julio de 2014

EL AUTOR

---

ING. JUAN CARLOS SUAREZ SERRANO

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, creador de todas las cosas, que me ha dado la fuerza para seguir adelante.

A mis Padres, Walter y Fabiola, a quien les debo toda mi vida, les agradezco el amor y comprensión, siempre me han ayudado a salir adelante buscando el mejor camino.

A mi esposa Michelle que ha sido un apoyo fundamental en todo momento.

## AGRADECIMIENTO

Agradecer a mi familia por el esfuerzo realizado para apoyarme en mis estudios. A mis padres y demás familiares ya que me brindan la motivación, la alegría y me dan la fortaleza necesaria para seguir adelante.

A la Msc. Maria Luzmila Ruilova, por su acertada guía durante la elaboración de este proyecto.

Al Msc. Manuel Romero, por su colaboración desinteresada para el desarrollo de este proyecto.

## **Resumen**

La economía actual depende en gran medida de la transmisión de datos, voz y multimedia a través de redes de telecomunicaciones, siendo las redes ópticas un medio idóneo para la comunicación a altas velocidades. Las técnicas de transmisión óptica en el espacio libre, se analizan en el presente trabajo, después de desarrollar una introducción a la tecnología inalámbrica y el uso del láser como fuente óptica. Como objetivo fundamental está analizar los principios teóricos y técnicos de la transmisión óptica en el espacio libre, así como su funcionamiento y métodos de despliegue. Se exponen además las principales ventajas y limitaciones, así como el diseño, simulación y comprobación de una propuesta para un caso particular, que permita obtener los parámetros de desempeño fundamentales en diferentes condiciones medioambientales con ayuda del OptiSystem 7.0 y con las características dadas por el fabricante del equipo óptico.

**Palabras claves:** transmisión óptica en el espacio libre, OptiSystem

## **Abstract**

The today's economy depends strongly of the transmission of data, voice and multimedia through telecommunication networks, being the optical networks an appropriate means of communication at higher speeds. After developing an introduction to wireless technology and the use of laser as optical source, the transmission techniques in free space optics are analyzed. The main goal is the analysis of the theoretical and technical principles of optical transmission in free space and their methods for operation and deployment. Also are discussed topics as their main advantages and limitations, design and simulation. A proposal for a particular case is proposed and their key performance parameters are verified under different environmental conditions by means of computer simulations using the optical simulation software OptiSystem 7.0. Also equipments solutions of world leader providers for optics systems are studied with the aim to use them in the proposal.

**Keywords:** transmission optics in free space, OptiSystem.



## INDICE GENERAL

Introducción .....	1
Generalidades del diseño de investigación .....	3
Problema de la investigación .....	3
Hipótesis .....	3
Objetivo General .....	3
Objetivos específicos.....	3
Metodología .....	4
<b>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN A LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS INALÁMBRICAS. ....</b>	<b>6</b>
1.1 Fundamento teórico. Ondas electromagnéticas.....	6
1.1.1 Espectro electromagnético .....	7
1.1.2 La luz y el espectro visible.....	11
1.1.3 Radiación infrarroja .....	11
1.2 Conceptos de la comunicación láser. Planteamientos básicos.....	12
1.2.1 Resonador de Fabry -Perot.....	13
1.2.2 Condiciones requeridas para alcanzar la oscilación láser .....	15
1.3 Características de la radiación láser.....	16
1.3.1 Láser semiconductor .....	17
1.4 Redes inalámbricas .....	18
1.4.1 Ventajas.....	19
1.4.2 Desventajas .....	19
1.5 Clasificación de las redes inalámbricas según su alcance .....	20
1.6 Topologías de redes inalámbricas.....	22
<b>CAPÍTULO II FUNDAMENTOS TEÓRICOS, TÉCNICOS Y DE DISEÑO DE LA TECNOLOGÍA FSO.....</b>	<b>24</b>
2.1 Definición de la transmisión óptica en el espacio libre (FSO).....	24
2.2 Historia del proceso de la transmisión óptica.....	25
2.3 Características de los sistemas FSO .....	26
2.4 Descripción de un sistema FSO.....	33
2.4.1 Transmisor .....	33
2.4.2 Receptor.....	36

2.5	Funcionamiento de sistemas FSO .....	39
2.6	Criterio de selección de receptores para sistemas FSO .....	40
2.7	Topologías para enlaces FSO .....	41
2.8	Estudio del margen de conexión.....	43
2.9	Pérdidas en un sistema FSO .....	45
2.9.1	Pérdidas ópticas .....	45
2.9.2	Pérdidas geométricas .....	45
2.9.3	Pérdidas en el aire y sensibilidad en el receptor.....	49
2.10	Margen de enlace.....	50
2.11	Generalidad del margen de enlace.....	51
2.12	Elementos que perturban FSO.....	54
2.13	Atenuación en el aire .....	54
2.14	Absorción en la atmósfera.....	58
2.15	Dispersión atmosférica.....	60
2.15.1	Dispersión de Rayleigh .....	60
2.15.2	Dispersión de Mie.....	62
2.16	Turbulencia.....	64
2.17	Desviación del rayo .....	64
2.18	Centelleo .....	65
2.19	Impacto del clima .....	66
2.19.1	Lluvia .....	66
2.19.2	Nieve .....	67
2.19.3	Niebla.....	67
2.20	Efecto de la línea de vista .....	68
2.20.1	Establecimiento de la línea de vista.....	69
2.21	Velocidades de propagación.....	69
2.22	Utilización de FSO .....	70
2.23	Ventajas.....	74
2.24	Desventajas .....	75
<b>CAPITULO III ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE LA RED</b>		
<b>INALÁMBRICA A IMPLEMENTAR.....</b>		<b>77</b>
3.1	Diseño del enlace óptico inalámbrico.....	77
3.2	Instalación de los equipos láser ópticos.....	80
3.2.1	Características .....	81

3.2.2	Estructura.....	82
3.2.3	Instalación .....	84
3.2.4	Instalación de la infraestructura .....	87
3.2.5	Montaje del equipo .....	87
3.2.6	Direccionamiento del lente .....	89
3.3	Análisis de las características de los sistemas FSO propuestos .....	90
3.3.1	Potencia de emisión de la señal y sensibilidad del receptor.....	91
3.3.2	Atenuación geométrica .....	92
3.3.3	Atenuación atmosférica por niebla.....	93
3.4	Pérdidas del sistema.....	96
3.5	Simulación de la red inalámbrica óptica.....	99
3.6	Análisis de los resultados.....	108
	CONCLUSIONES .....	112
	RECOMENDACIONES .....	113
	BIBLIOGRAFIA.....	114
	GLOSARIO .....	117

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Espectro electromagnético: Región de las comunicaciones ópticas	9
Figura 1. 2 Espectro visible al ojo humano	11
Figura 1. 3 Región del infrarrojo	12
Figura 1. 4 Sistema láser	13
Figura 1. 5 Láser Fabry-Perot	15
Figura 1. 6 Línea de emisión	15
Figura 1. 7 Esquema oscilador	16
Figura 1. 8 Cavity VCSEL	18
Figura 1. 9 Topologías de redes inalámbricas	23
Figura 2. 1 Conexión de un sistema FSO	24
Figura 2. 2 Transmisión Óptica a través del Photophone	26
Figura 2. 3 Absorción de luz en el ojo humano según la longitud de onda de la radiación	31
Figura 2. 4 Esquema de un sistema de comunicación óptico	33
Figura 2. 5 Esquema de un transceptor FSO Single-Beam de Lightpointe	40
Figura 2. 6 Arquitectura en forma de malla	41
Figura 2. 7 Arquitectura en forma de malla	42
Figura 2. 8 Arquitectura en estrella	43
Figura 2. 9 Arquitectura de varios enlaces punto a punto	43
Figura 2. 10 Vista de un equipo FSO instalado en una azotea	44
Figura 2. 11 Divergencia del rayo	46
Figura 2. 12 Ángulo de divergencia más extenso del rayo	47
Figura 2. 13 Tamaño del haz proyectado	47
Figura 2. 14 Margen de enlace en función del alcance para una atenuación de 10db/km	53
Figura 2. 15 Margen de enlace en función de la atenuación atmosférica para 1 km de enlace	53
Figura 2. 16 Atenuación en la atmósfera por la presencia de moléculas absorbentes	56
Figura 2. 17 Propagación considerando la longitud de onda en una ciudad con acumulación de aerosol normal con cielo despejado	58

Figura 2. 18 Propagación en un cielo despejado de acuerdo a la longitud de onda_	59
Figura 2. 19 Propagación en un entorno con dióxido de carbono de acuerdo a la longitud de onda_____	59
Figura 2. 20 Las ventanas atmosféricas en el espectro electromagnético _____	60
Figura 2. 21 La dispersión de Rayleigh producida en pequeñas partículas _____	61
Figura 2. 22 Dispersión de Rayleigh en función de la longitud de onda _____	62
Figura 2. 23 Dispersiones en función de la longitud de onda y el parámetro $\alpha$ ____	63
Figura 2. 24 Consecuencias del centelleo _____	65
Figura 2. 25 Sistema de redundancia espacial para envío de datos _____	65
Figura 2. 26 Visibilidad de acuerdo a la atenuación en entorno con niebla _____	68
Figura 2. 27 Enlace entre dos edificios _____	71
Figura 2. 28 Enlace urbano FSO _____	71
Figura 2. 29 Conexiones para redes celulares _____	72
Figura 2. 30 Redundancia FSO en sistemas de televisión por cable _____	73
Figura 2. 31 Integración de FSO con redes de telecomunicaciones _____	73
Figura 3. 1 Distancias entre las edificaciones la red inalámbrica óptica. _____	78
Figura 3. 2 Esquema de conexión de equipos ópticos _____	78
Figura 3. 3 TereScope 5000/G _____	82
Figura 3. 4 Parte frontal del equipo_____	82
Figura 3. 5 Parte trasera _____	83
Figura 3. 6 Locación idónea para la ubicación del equipamiento _____	85
Figura 3. 7 Montaje no recomendable _____	86
Figura 3. 8 Montaje inaceptable _____	86
Figura 3. 9 Equipos instalados _____	87
Figura 3. 10 Plato de montaje _____	88
Figura 3. 11 Dispositivo de alineamiento _____	88
Figura 3. 12 Kit de herramientas_____	89
Figura 3. 13 Ajuste del transmisor FSO _____	89
Figura 3. 14 Direccionamiento del lente _____	90
Figura 3. 15 Simulación de un enlace FSO de 380m _____	100
Figura 3. 16 Parámetros globales. _____	100
Figura 3. 17 Parámetros del transmisor. _____	101
Figura 3. 18 Parámetros del canal FSO. _____	102

Figura 3. 19 Parámetros del receptor. _____	103
Figura 3. 20 Medidor óptico de potencia. _____	104
Figura 3. 21 Analizador óptico de espectros. _____	104
Figura 3. 22 Resultados obtenidos por el BER para una atenuación de 30 dB/km.	105
Figura 3. 23 Resultados obtenidos por el BER para una atenuación de 40 dB/km.	105
Figura 3. 24 Resultados obtenidos por el BER para una atenuación de 50 dB/km.	106
Figura 3. 25 Resultados obtenidos por el BER para una atenuación de 60 dB/km.	106
Figura 3. 26 Señal óptica. _____	108

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Ondas del espectro electromagnético.....	10
Tabla 1. 2 Equivalencia de unidades de longitud y frecuencia.....	10
Tabla 1. 3 Tabla comparativa de redes inalámbricas .....	22
Tabla 2. 1 Fuentes ópticas más utilizadas en FSO .....	34
Tabla 2. 2 Deducción del enlace. ....	45
Tabla 2. 3 Deducción del enlace incluyendo la pérdida geométrica .....	49
Tabla 2. 4 Deducción del enlace incluyendo el margen de enlace.....	50
Tabla 2. 5 Cálculo del GLM de varios productos .....	54
Tabla 2. 6 Parámetros de las partículas dispersas en la atmósfera.....	63
Tabla 3. 1 Principales equipos ópticos con sus características y precios .....	79
Tabla 3. 2 Costos de implementación de la red inalámbrica óptica.....	80
Tabla 3. 3 Características del equipo TereScope 5000/G.....	81
Tabla 3. 4 Parte trasera del equipo .....	83
Tabla 3. 5 Atenuación geométrica de los enlaces. ....	93
Tabla 3. 6 Valores de visibilidad .....	93
Tabla 3. 7 Atenuación atmosférica por niebla. ....	95
Tabla 3. 8 Pérdidas del sistema .....	97
Tabla 3. 9 Parámetros más importantes en los enlaces propuestos.....	98

## **Introducción**

Los métodos de comunicación óptica han existido de forma muy primitiva por milenios. La comunicación óptica inalámbrica ha posibilitado la comunicación a grandes alcances, pero con una calidad de servicio defectuosa por la carencia de seguridad en el procedimiento de emisión y de los transmisores y receptores.

La electricidad reemplazó rápidamente a la comunicación óptica; con esta, la información era transmitida sobre líneas de cobre a tasas relativamente altas y aún en la actualidad la comunicación basada en enlaces de cobre continúa siendo explotada, pero no sería hasta la invención del láser en 1960, que se profundizaría en otra solución usada actualmente, la fibra óptica, la cual ofrece casi una ilimitada capacidad en la línea de transmisión. Los siguientes descubrimientos entre 1970 y 1971, como la baja atenuación óptica de las fibras, y la emisión de láseres semiconductores de manera continua en un material; permitieron el desarrollo de las comunicaciones ópticas cableadas.

El vidrio se convirtió en el medio de transmisión para los fotones y las fibras de vidrio podían extenderse sobre grandes distancias, convirtiéndose en un medio integral e indispensable para las actuales comunicaciones de larga distancia. Para cortas distancias, la denominada “última milla”, muchas y diferentes son las técnicas cableadas e inalámbricas que compiten en el mercado de las comunicaciones.

Entre ellas se encuentran las basadas en electricidad sobre un medio de cobre xDSL (*Digital Subscriber Loop*), la fibra óptica, las tecnologías inalámbricas como GSM (*Global System Mobile*), UMTS (*Universal Mobile Telephone System*), WiFi (*Wireless Fidelity*) y una nueva tecnología, FSO (*Free Space Optics*), una tecnología avanzada y revolucionaria que utiliza el láser como medio aéreo de transmisión de la información. Cada una de estas técnicas presenta distintas ventajas y desventajas relacionadas con la tasa de transmisión, las distancias permisibles, la calidad de servicio y los costos, aspectos a tener en cuenta dependiendo de la aplicación (LightPointe, 2012) (Marcillo, León, & Vaca, 2008).



Los enlaces ópticos inalámbricos ofrecen altas tasas de transmisión (Gbit/s) a cortas distancias, desde varios metros hasta pocos kilómetros. Permiten la comunicación entre teléfonos digitales, equipos procesadores de datos o redes de video, conexiones con altas tasas de transmisión en cortas distancias, dentro de redes de un tamaño limitado, como pequeñas empresas, universidades, etc.

El uso de enlaces ópticos inalámbricos presenta algunas ventajas que hace que su implementación se considere una opción de interés, una de ellas tiene que ver con el aspecto regulatorio, que a diferencia de los enlaces de radio no requiere de ninguna autorización para el uso de frecuencias, lo que permite a empresas, operadores de telecomunicaciones y proveedores de servicios aprovechar al máximo sus conexiones de red. Desde el punto de vista económico su puesta en funcionamiento se realiza de manera sencilla, rápida y con menos costos que los enlaces cableados.

Además de las ventajas que presentan estos sistemas, es necesario destacar los factores que limitan el desempeño de los sistemas FSO como son: los efectos atmosféricos y las condiciones climáticas, factores que son necesarios tener en cuenta ya que pueden reducir la disponibilidad del enlace e introducir errores. Por ello, lo más razonable es combinarla con la fibra óptica, ya que un sistema compuesto de punta a punta por esta última es demasiado costoso (Lándsberg, 1983 )

LightPointe es fabricante de estos sistemas y ha alcanzado un desarrollo muy avanzado, es una multinacional estadounidense que ha aceptado más de 33 millones de dólares de Cisco y Corning para extender la exploración en esta área. Otras empresas como Lucent, Nortel y British Telecom, apoyan también a las compañías “free-space”, entre las que hay que citar otros fabricantes como Harmonix o Endwave (LightPointe, 2012).

## **GENERALIDADES DEL DISEÑO DE INVESTIGACIÓN**

### **Problema de la investigación**

El diseño riguroso y confiable de sistemas basados en FSO resulta una tarea difícil de realizar en nuestro ámbito, debido fundamentalmente a la falta de experiencia en este campo así como a la falta de una bibliografía adecuada que brinde conocimientos tecnológicos (“*know how*”) para la implementación práctica de estos sistemas.

Los sistemas de transmisión óptica en el espacio libre constituyen el objeto de la presente investigación.

### **Hipótesis**

La determinación de los fundamentos teóricos, los aspectos técnicos fundamentales así como su utilización en un caso en particular y los criterios de selección del equipamiento necesario para una eventual implementación son importantes en el campo de las investigaciones en esta área.

### **Objetivo General**

Realizar una investigación de las diferentes tecnologías de transmisión óptica en el espacio libre, particularmente sus métodos de despliegue y diseñar un sistema para un caso particular, determinando sus parámetros de desempeño fundamentales.

### **Objetivos específicos**

1. Realizar un análisis de los fundamentos teóricos de la tecnología inalámbrica.
2. Analizar las principales características y aspectos técnicos del equipamiento FSO.

3. Proponer esta tecnología para un caso en particular y analizar los resultados obtenidos basados en la simulación.

En correspondencia con los objetivos planteados, el presente trabajo se divide en tres capítulos. En el capítulo 1 se estudian los elementos fundamentales y principios generales de la tecnología inalámbrica, así como las características de los láseres. En el capítulo 2 se analizan los fundamentos técnicos y teóricos de la tecnología FSO, ventajas, limitaciones y aplicaciones. Finalmente, en el capítulo 3 se analiza la posibilidad de utilizar la tecnología FSO en un caso en particular, con equipamiento disponible en el mercado mundial, además de la simulación con el software OptiSystem 7.0, lo que permitirá comprobar la disponibilidad y desempeño de los enlaces.

### **Metodología**

Este trabajo de investigación tiene el carácter de explicativo porque se pretende buscar el porqué de los hechos, en este caso la tecnología de transmisión óptica en el espacio libre (FSO), mediante la determinación de relaciones causa-efecto. En este caso se busca determinar las causas (investigación Ex post facto), así como los efectos mediante la prueba de la hipótesis planteada. Se aplica una investigación explicativa porque se trata acerca de un aspecto de la realidad, explicando su importancia a través de la investigación documental que posibilita el estudio del conocimiento acumulado, es decir lo que ha generado el fenómeno motivo de la investigación y trata de explicar ese fenómeno y demostrar que FSO puede aplicarse en la construcción de redes inalámbricas ópticas.

Desde el punto de vista de la metodología de la investigación, este trabajo corresponde al paradigma Empírico-Analítico y presenta un enfoque cualitativo puesto que se analizará esta tecnología desde el punto de vista de la calidad del servicio que presta y cuantitativo porque se presenta una serie de expresiones matemáticas con las que se realiza el cálculo de parámetros importantes y necesarios para determinar la eficiencia y disponibilidad de esta tecnología.

Como ya se indicó, se aplicará el método Ex post facto en razón de que se presenta la evolución tecnológica de FSO y su relación causa–efecto entre los diferentes equipos empleados en este sistema.

El diseño de la investigación es no experimental transversal, debido a que no se manipulan deliberadamente las variables de estudio, sino que se observará directamente su contexto natural, y finalmente se realizará su análisis respectivo.

# CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN A LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS INALÁMBRICAS.

En el presente capítulo se definen los conceptos básicos sobre la teoría de las comunicaciones ópticas. Se empezará describiendo el concepto de onda electromagnética, así como aclarar lo que se conoce como espectro electromagnético, con especial interés en la región que ocupan las comunicaciones ópticas, además de otros fundamentos teóricos de interés como es la radiación infrarroja del láser empleada en la tecnología FSO, la cual es el objetivo de investigación del presente trabajo.

## 1.1 Fundamento teórico. Ondas electromagnéticas.

La formación de una onda está supeditada a la presencia de enlaces entre las diferentes partes del sistema, los cambios que ocurren en el mismo, ocasionan los correspondientes cambios en los puntos vecinos del sistema, de manera que se transmite cierta cantidad de energía. De estos puntos, la perturbación pasa a otros adyacentes a ellos y así sucesivamente, propagándose de un punto a otro, es decir creando una onda.

La perturbación electromagnética, presente en alguna parte del espacio, debido a los enlaces electromagnéticos que se expresan mediante las leyes del electromagnetismo y la inducción electromagnética, se convierten en fuente de estas mismas perturbaciones las cuales se transmiten, y aparece la onda electromagnética.

La onda electromagnética constituye una perturbación electromagnética que se propaga en el vacío a la velocidad de la luz, y en el medio con una velocidad:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Donde  $\epsilon_0$  es la permitividad dieléctrica de la sustancia y en unidades del SIU (Sistema Internacional de Unidades), tiene un valor de:

$$\epsilon_0 = 10^7 / 4\pi c^2 \quad (\text{en } \text{A}^2 \text{s}^4 \text{kg}^{-1} \text{m}^{-3} = \text{F m}^{-1})$$

Y  $\mu_0$  es la permeabilidad dieléctrica del vacío que se define como:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad (\text{en } \text{kg m s}^{-2} \text{A}^{-2} = \text{N A}^{-2})$$

El cálculo de la onda electromagnética conocida también como pulso lumínico elemental, viene dado por la solución particularizada, bajo determinadas condiciones de fronteras, de las ecuaciones de Maxwell (Arceo, 2008)

### 1.1.1 Espectro electromagnético

Se llama así a la distribución de energía de las ondas electromagnéticas y va de la emisión de menos longitud de onda (rayos X y gamma), siguiendo con la luz ultravioleta y la visible, los rayos infrarrojos, hasta las de más longitud de onda, que son las ondas de radio. Teóricamente la longitud de onda más pequeña es la de Planck y la mayor correspondería al tamaño del universo sin embargo se considera que en la práctica el espectro electromagnético es infinito y continuo.

Las unidades más frecuentes para medirlas son la frecuencia y la longitud de onda, la relación entre ambas se determina por la ecuación 1.1.

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{1.1}$$

Dónde:

c: velocidad de la luz en el vacío=300.000.000 m/s

f : frecuencia (Hz)

$\lambda$  : Longitud de onda (nm)

La longitud de onda y la frecuencia de la señal tienen una relación inversamente proporcional.

La energía electromagnética además de la longitud de onda y la frecuencia tiene asociada también la energía de los fotones la cual puede determinarse de la siguiente manera:

$$E = h.f \quad (1.2)$$

O lo que es lo mismo:

$$E = \frac{hc}{\lambda}.$$

Dónde:

h: constante de Planck y viene dada por:

$$h = (6,63 * 10^{-34} J.s) \quad (1.3)$$

En consecuencia las ondas electromagnéticas de mayor frecuencia presentan una longitud de onda pequeña y mucha energía, en cambio las ondas de menor frecuencia alcanzan mayores longitudes de onda y menor energía.

En la figura 1.1 aparecen varias de las señales del espectro electromagnético, en la cual se observa hacia el centro y derecha la zona que cubre las actuales comunicaciones ópticas, que abarcan, aproximadamente, desde los 50 nanómetros (ultravioleta) hasta los 100 micrómetros (región del infrarrojo). A la derecha del

espectro visible se observa la zona de los rayos ultravioletas, y más allá la de los rayos X, los gamma y los cósmicos. En la figura 1.1 se presenta una representación del espectro electromagnético y como se encuentra dividido.

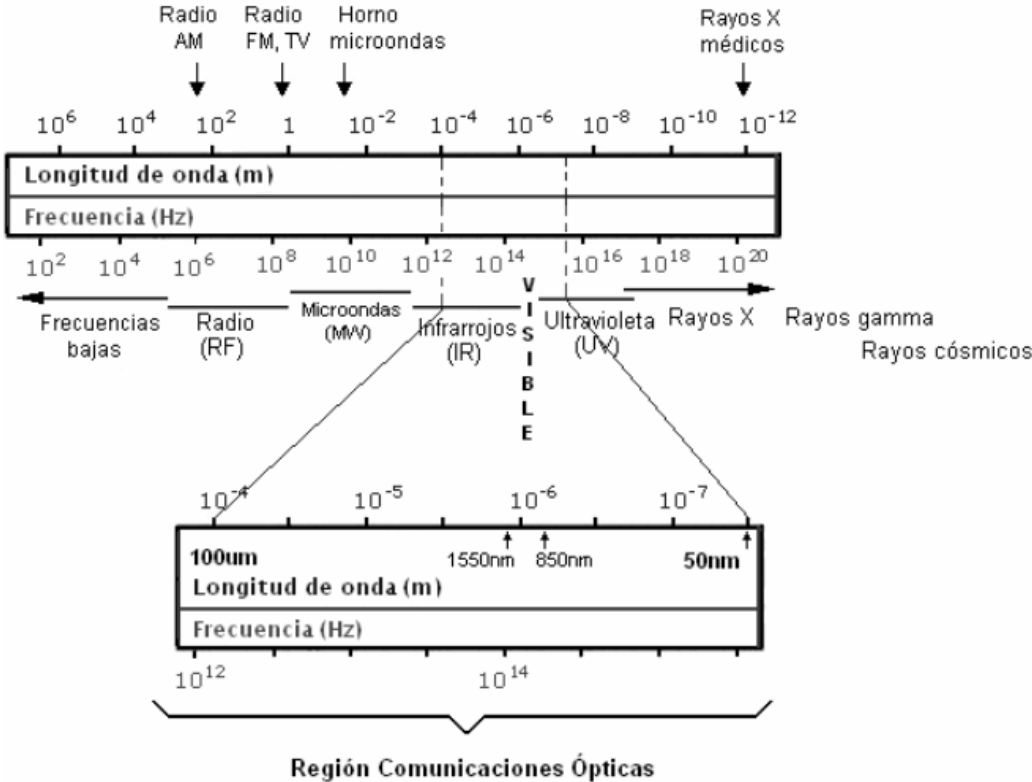


Figura 1. 1 Espectro electromagnético: Región de las comunicaciones ópticas

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

Los equipos FSO trabajan en la banda de 150 a 500 THz, es decir las regiones del infrarrojo, luz visible y ultravioleta (Marcillo, León, & Vaca, 2008) (Paschotta).

Las ondas electromagnéticas abarcan una amplia variedad de frecuencias y se clasifican de acuerdo a su fuente de origen.

La tabla 1.1 muestra la clasificación del rango de frecuencias, la descripción y la longitud de onda de las diferentes ondas del espectro electromagnético.



**Tabla 1. 1 Ondas del espectro electromagnético**

		Longitud de onda	Frecuencia
<b>Radio</b>	Muy Baja Frecuencia	> 10 Km	< 30 KHz
	Onda Larga	< 10 Km	> 30 KHz
	Onda media	< 650 m	> 650 KHz
	Onda corta	< 180 m	> 1.7 MHz
	Muy alta frecuencia	< 10 m	> 30 MHz
	Ultra alta frecuencia	< 1 m	> 300 MHz
<b>Microondas</b>		< 30 cm	> 1.0 GHz
<b>Infrarrojo</b>	Lejano	< 1 mm	> 300 GHz
	Medio	< 50 um	> 6.0 THz
	Cercano	< 2.5 um	> 120 THz
<b>Luz Visible</b>		< 780 nm	> 384 THz
<b>Ultravioleta</b>	Cercano	< 380 nm	> 789 THz
	Extremo	< 200 nm	> 1.5 PHz
<b>Rayos X</b>		< 10 nm	> 30.0 PHz
<b>Rayos Gamma</b>		< 10 pm	> 30.0 EHz

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

En la tabla 1.2 se aclara la equivalencia de muchas de las unidades de longitud y frecuencia utilizadas en el presente trabajo.

**Tabla 1. 2 Equivalencia de unidades de longitud y frecuencia**

<b>Múltiplos y Submúltiplos</b>					
<b>Unidades de Longitud</b>			<b>Unidades de Frecuencia</b>		
<b>Nombre</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Equivalencia(m)</b>	<b>Nombre</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Equivalencia(Hz)</b>
Kilómetro	Km	$10^3$	Exahertz	EHz	$10^{18}$
Metro	m	1	Petahertz	PHz	$10^{15}$
Centímetro	cm	$10^{-2}$	Terahertz	THz	$10^{12}$
Milímetro	mm	$10^{-3}$	Gigahertz	GHz	$10^9$
Micrómetro	um	$10^{-6}$	Megahertz	MHz	$10^6$
Nanómetro	nm	$10^{-9}$	Kilohertz	KHz	$10^3$
Picómetro	pm	$10^{-12}$	Hertz	Hz	1

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

### 1.1.2 La luz y el espectro visible

La luz es una onda electromagnética, formada por partículas con energía conocidas como fotones, apta para ser distinguida por el ojo humano y cuyo color depende de su frecuencia.

La luz visible para el ojo humano comprende una banda angosta que va de los 380 nm correspondiente al violeta a los 780 nm del rojo. Los colores del espectro se ordenan como en el arco iris, formando el llamado espectro visible, como se observa en la figura 1.2. (Marcillo, León, & Vaca, 2008) (Arceo, 2008)

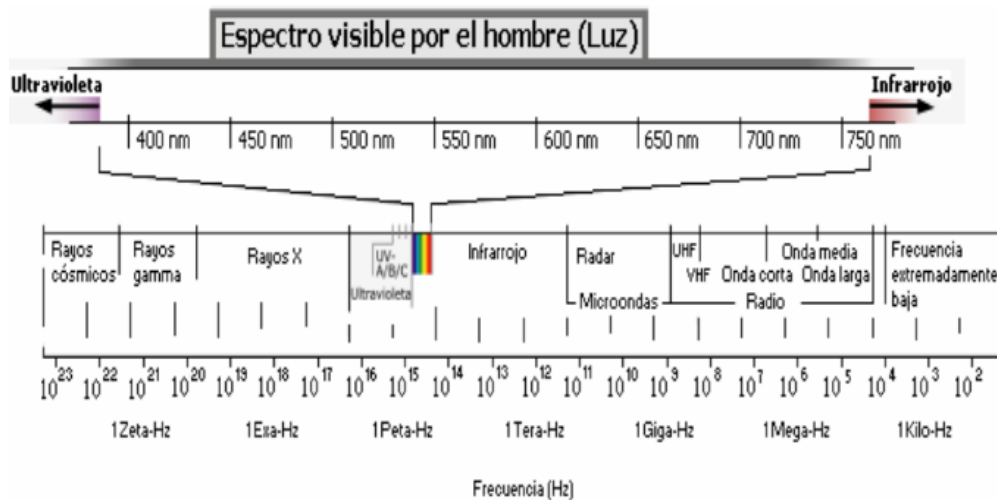
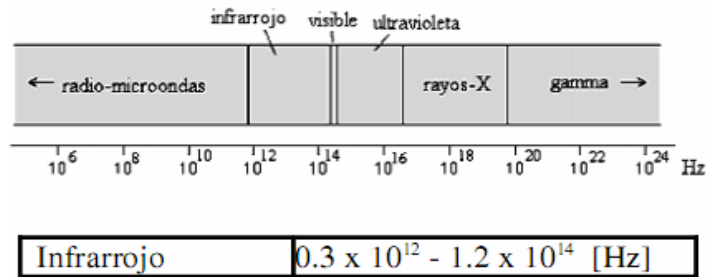


Figura 1. 2 Espectro visible al ojo humano

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

### 1.1.3 Radiación infrarroja

La radiación infrarroja, utilizada como láser para las comunicaciones ópticas, se origina en el rango del infrarrojo del espectro electromagnético. Esta es invisible para el ojo humano y se utiliza en las comunicaciones ópticas como una alternativa que ofrece acceso de gran ancho de banda a redes inalámbricas y cableadas, característica que ha permitido desarrollar y comercializar productos para este tipo de aplicaciones. En la figura 1.3 se muestra la región del infrarrojo.



**Figura 1. 3 Región del infrarrojo**

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

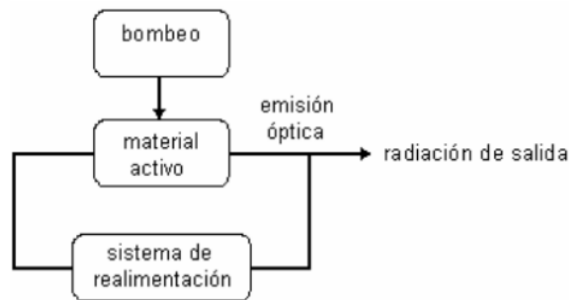
Una emisión infrarroja punto a punto, se propaga por el aire idealmente en línea recta, de esta manera los rayos invisibles establecen enlaces puntuales sin distorsionarse, en la práctica no sucede así, sino que los rayos infrarrojos o láser no son completamente puntuales, pues se "abren" al propagarse por el medio, produciéndose una divergencia del rayo en el destino.

La divergencia indicada produce un ángulo de apertura de acuerdo al área de cobertura en el extremo final y proporcionalmente inversa a la potencia recibida en el receptor. La divergencia del láser como radiación infrarroja, presenta una ampliación del radio del rayo con el recorrido, de acuerdo al tipo de láser empleado, normalmente tal divergencia es de menos de 1 miliradian.

En la estructura de los láseres semiconductores se dispone de un elemento colimador, el cual permite reducir la divergencia en los equipos láser. (Marcillo, León, & Vaca, 2008) (Paschotta).

## 1.2 Conceptos de la comunicación láser. Planteamientos básicos

Todo sistema de emisión del tipo láser está compuesto básicamente por los elementos representados en la figura 1.4.



**Figura 1. 4 Sistema láser**

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

El material activo se bombea mediante un mecanismo externo característico de cada tipo de láser; mediante dicho bombeo el material pasa a un estado de excitación, del cual, para salir, tiene que realizar la emisión de la radiación óptica a una determinada longitud de onda.

Esta radiación alcanza las características necesarias para ser considerada de clase láser, al aplicarse algún tipo de realimentación óptica, la cual generalmente se consigue utilizando un resonador tipo Fabry-Perot (resonador básico en la generación láser).

### 1.2.1 Resonador de Fabry -Perot

El resonador Fabry-Perot consiste en un medio de caras planas y paralelas separadas una distancia  $d$ , con un índice de refracción  $2n$ , e inmerso en otro medio infinito de índice de refracción  $1n$ . Sobre dicho medio se hace incidir una radiación que forme un ángulo  $\theta_1$  con la normal a las caras, por reflexión y refracción, se producirá un conjunto de rayos refractados y reflejados.

Para valores de retardo de fase periódicos, es decir  $2m\pi$ , se cumple que la intensidad transmitida es igual a la intensidad incidente, sin pérdidas por reflexión; expresión representada por la ecuación siguiente:

$$I_t + I_r = I_i \tag{1-4}$$

$$I = I_r$$

Dónde:

$I_t$ : intensidad transmitida (mW)

$I_r$ : intensidad reflejada (mW)

$I_i$ : intensidad incidente (mW)

Del análisis de las trayectorias seguidas por los haces de reflexión y refracción, se obtiene la ecuación (1-5):

$$\lambda_m = \frac{2n \cdot d}{m} \quad (1-5)$$

Dónde:

$\lambda_m$ : longitud de onda (nm)

m: entero

n: índice de refracción del medio

d: distancia de separación (m)

En la ecuación (1-5) se pueden variar los parámetros n, d,  $\lambda_m$ , donde la variación de la longitud de onda origina los resonadores ópticos (Fabry -Perot) o cavidades láser. Para el caso en que se tomen constantes los valores n, d, el único parámetro variable sería la longitud de onda; de manera que la cavidad se comporta como un filtro de frecuencias y refleja aquellas que no cumplan ciertas condiciones, así, es posible inducir una emisión estimulada más intensa en torno a las frecuencias de interés y

reducir en una magnitud apreciable las del resto. Este es el principio de funcionamiento del láser (Marcillo, León, & Vaca, 2008), (Olivera, 2006). En la figura 1.5 se observa un resonador Fabry-Perot.

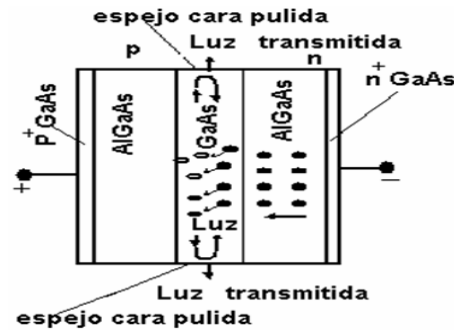


Figura 1. 5 Láser Fabry-Perot

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

### 1.2.2 Condiciones requeridas para alcanzar la oscilación láser

La oscilación láser se logra cuando la ganancia en el sistema, que en este caso es a través del mecanismo de emisión estimulada, llegue a ser superior a todas las pérdidas existentes. Cada material tiene una estructura única con diferentes niveles de absorción y emisión, tanto espontánea como estimulada; por ello, para obtener la oscilación deseada es necesario conocer las características que posee el material. La manera más directa de conocer las características del material es a través de la forma que presentan las líneas de emisión del material que se analiza. De manera general, cada una de ellas posee una estructura similar, como se observa en la figura 1.6.

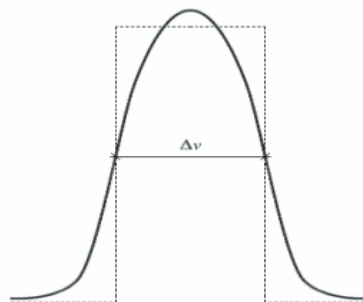


Figura 1. 6 Línea de emisión

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

Dónde  $\Delta\nu$  es la frecuencia de rango variable (Hz)

Para alcanzar esa ganancia, la cantidad de átomos del material debe ser superior a la del medio, así las radiaciones estimuladas serán mayores que las absorciones, produciéndose ganancia y el rayo aumentará exponencialmente.

Si ahora, mediante la introducción del material en un resonador Fabry -Perot, se consigue un mecanismo de realimentación, que hace que el haz recorra de forma indefinida un camino de ida y vuelta entre los correspondientes espejos, y si se logra que la potencia de partida en una de las caras del resonador  $P(0)$ , sea igual o inferior a la energía que retorna al mismo punto después de un recorrido de ida y regreso, en ese caso se alcanzará la oscilación en el sistema. La figura 1.7 muestra el esquema de un oscilador (Mohamed, 2009).

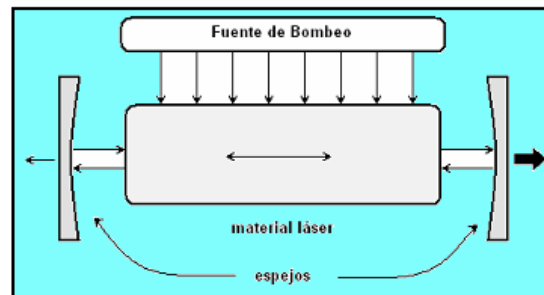


Figura 1. 7 Esquema oscilador

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

### 1.3 Características de la radiación láser

Las características más importantes del láser son la monocromaticidad, la coherencia temporal y espacial así como la direccionalidad (Marcillo, León, & Vaca, 2008), (Arceo, 2008), (Mohamed, 2009).

- **Monocromaticidad**

Para que una emisión electromagnética se considere monocromática debe contener una sola frecuencia.

Así, su espectro sería un solo pulso, como una delta con altura infinita. En la práctica, por diversos factores, el impulso se ensancha cubriendo un determinado rango de longitudes de onda. Considerar al láser como monocromático es inuestionable al compararlo a otras fuentes ópticas.

- **Coherencia temporal y espacial**

La coherencia temporal comprende las oscilaciones de fase que sufre una fuente óptica, incluyendo el láser, esto se debe a que el conjunto de osciladores iguales del material, radian y dejan de emitir su radiación en lapsos distintos de tiempo, produciendo una radiación más intensa en torno a una frecuencia, pero además, un conjunto de frecuencias a su alrededor.

La coherencia espacial es la capacidad de que un rayo de luz se conserve produciendo una línea intensa de igual característica todo el tiempo, es decir que si se ubica junto a otro rayo, las interferencias constructivas o destructivas sean invariantes.

- **Direccionalidad**

Un haz láser posee características de direccionalidad muy superiores a las de cualquier otra fuente luminosa, esto se debe, parcialmente al resonador empleado para la realimentación, no obstante en cualquier haz láser existe el fenómeno de divergencia, el cual es inevitable en condiciones naturales.

### **1.3.1 Láser semiconductor**

(Marcillo, León, & Vaca, 2008), (Lándsberg, 1983 ), (Mohamed, 2009) coinciden en que, las características del láser semiconductor lo diferencian significativamente frente a otros tipos de láser, de manera que es el componente idóneo para utilizarse en las comunicaciones ópticas. Entre los láseres semiconductores se encuentran los siguientes:

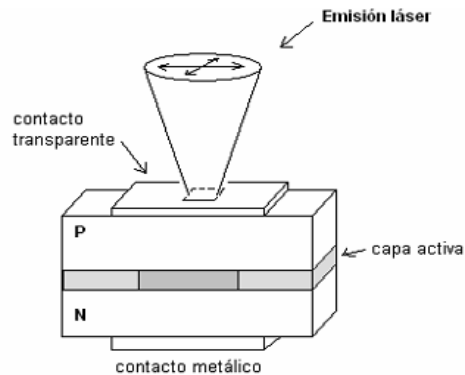


- **Láseres monomodo**

Los láseres monomodo surgieron para eliminar los modos longitudinales adicionales que se generan en los láseres de tipo Fabry -Perot. Este tipo de láseres de modo longitudinal único o monomodo, en realidad, no emite una sola frecuencia, sino una línea con un ancho espectral, que aunque reducida, cubre un cierto margen de frecuencias. Los resultados obtenidos con estos láseres en cuanto a su cromaticidad, valores de intensidad óptica de salida, rendimiento y sobre todo su precio, los convierten en alternativas óptimas para las necesidades actuales y futuras.

- **Láseres de cavidad vertical o VCSEL (*Vertical Cavity Surface – Emitting Lasers*)**

Estos se consideran láseres monomodo, conformados para que la cavidad resonante se establezca con las superficies horizontales de la zona activa. Mediante esta estructura, se logra que el rayo de salida tenga la forma de esas superficies horizontales, y que la cavidad que ahora tiene la misma altura que la zona activa, emita varios rangos de magnitud menor que la de los láseres conocidos. En la figura 1.8 se muestra un VCSEL.



**Figura 1. 8 Cavidad VCSEL**

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

## 1.4 Redes inalámbricas

La comunicación inalámbrica, en su modo más sencillo, es la que se realiza sin cables (medios guiados) para la conexión entre usuarios que necesitan enviar y recibir información.

Las redes inalámbricas permiten operar en sitios en que la ubicación física de los equipos varía continuamente. Además, las redes inalámbricas se usan en circunstancias donde el tendido de una red cableada se torna difícil, debido a dificultades en los ambientes geográficos o ambientales, costos elevados y requerimientos de rápida y fácil instalación.

#### **1.4.1 Ventajas**

Entre las ventajas que diferencian a las redes inalámbricas sobre otro tipo de redes cableadas se encuentran las siguientes:

- Brinda a los usuarios libertad de movimientos sin perder la comunicación en la zona de cobertura.
- Fácil de instalación, flexibilidad, gestión y ahorro de espacio.
- Escalabilidad.
- No se destruyen ambientes frágiles.
- Ahorro de costos sobre líneas dedicadas.

#### **1.4.2 Desventajas**

Como toda tecnología, también presenta desventajas, que con el desarrollo creciente de las tecnologías inalámbricas serán vencidas, entre las que se encuentran las siguientes:

- Bajas velocidades de transmisión, entre 11 y 54 Mbit/s.

- Problemas de seguridad, la información es susceptible de ser interceptada (Lándsberg, 1983 ), (Marcillo, León, & Vaca, 2008).

## **1.5 Clasificación de las redes inalámbricas según su alcance**

Existen dos amplias categorías de redes inalámbricas: de larga distancia y de corta distancia (Marcillo, León, & Vaca, 2008).

- Redes inalámbricas de corta distancia

Este tipo de redes son utilizadas principalmente en redes corporativas cuyos puntos de conexión no se encuentran muy lejos entre sí, en uno o varios edificios. Se pueden encontrar soluciones que permiten altas velocidades de transmisión.

La comunicación óptica en el espacio libre se puede clasificar dentro de esta categoría, ya que actualmente su máximo alcance no supera los 5 kilómetros.

- Redes inalámbricas de larga distancia

Este tipo de redes son utilizadas para transmitir la información en espacios que pueden ir desde una ciudad hasta varios países vecinos, conocidas como WAN (*Wide Area Network*); con velocidades de transmisión relativamente bajas.

Las redes de larga distancia pueden ser: de conmutación de paquetes (públicas y privadas) y celulares.

De acuerdo a la aplicación para la cual han sido diseñadas, se encuentran las siguientes redes inalámbricas (Mohamed, 2009), (Lándsberg, 1983 ), (Nogueira, 2007):

- WBAN (*Wireless Body Area Network*)

Redes que permiten la comunicación inalámbrica de dispositivos ubicados en el cuerpo para el monitoreo y control de los mismos. Su aplicación se encuentra mayormente difundida en el campo de la medicina.

- WPAN (*Wireless Personal Area Network*)

Redes inalámbricas de corto alcance, para la interconexión de los distintos dispositivos de un mismo usuario; de esta manera se tiene mayor comodidad en los enlaces y se evitan los cables. Se utiliza en las comunicaciones dentro del hogar.

- WLAN (*Wireless Local Area Network*)

Permite la comunicación inalámbrica en un entorno local, de esta manera se puede conectar en unos pocos cientos de metros computadoras o terminales para intercambiar información.

- WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*)

Redes que permiten la comunicación inalámbrica en un entorno urbano, con alcances desde cientos de metros a algunos kilómetros. Las comunicaciones ópticas en el espacio libre se ubican dentro de esta clasificación, otras alternativas son: LMDS, MMDS y WiMAX.

- LMDS (*Local Multipoint Distribution Service*)

Tecnología basada en el uso de ondas de radio, donde un emisor central emite señales a una distancia aproximada de 5 km. Es utilizada para la comunicación entre puntos fijos, no para usuarios móviles.

- MMDS (*Multichannel Multipoint Distribution Service*)

Tecnología pensada para la comunicación punto -multipuntos fijos, tiene mayor alcance que LMDS.

- WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*)

Tecnología para la transmisión de microondas, se utiliza en muchas aplicaciones donde no existe línea de visión directa (NLOS). Tiene una cobertura de 40 a 50 km.

- WWAN (*Wireless Wide Area Network*)

Redes con cobertura global inalámbrica, basadas en la tecnología celular que en muchos países tiene un gran desarrollo; debido a la mejora de sus servicios y en algunos casos a la disminución en sus costos. La tabla 1.3 muestra un resumen de las características más importantes de las redes citadas anteriormente.

**Tabla 1.3 Tabla comparativa de redes inalámbricas**

	WPAN	WLAN	WMAN	WWAN
<b>Estándares</b>	Bluetooth/ Infrared	802.11 a, 11 b, 11 g HiperLAN2	802.11, MMDS, LMDS	GSM, GPRS, CDMA, 2.5 – 3G
<b>Ancho de Banda</b>	< 1 Mbits/s	2 a 54 Mbits/s	22 Mbits/s	9.6 a 384 Kbits/s
<b>Alcance</b>	Corto Muy Corto	Medio	Medio Largo	Largo
<b>Aplicaciones</b>	Domésticas, PDA's, Entorno Oficina	Redes Corporativas	Interconexión de redes Corporativas	Telefonía móvil, celular, satélite, Redes Radio Terrestre, GPS

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

## 1.6 Topologías de redes inalámbricas

Las topologías que se implementan en las redes inalámbricas pueden ser del tipo infraestructura y tipo ad-hoc (Marcillo, León, & Vaca, 2008).

- Infraestructura

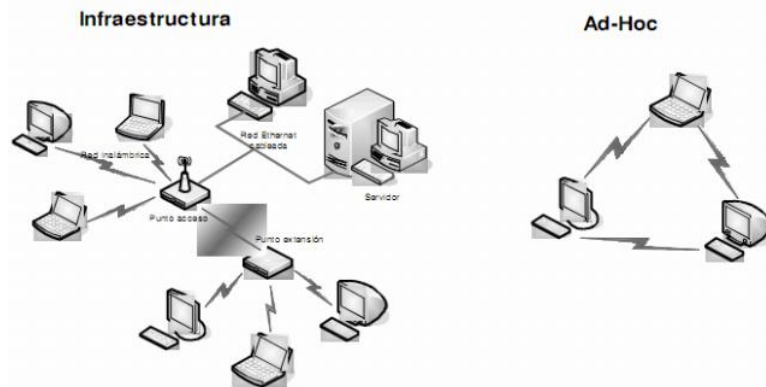
Este tipo de redes tiene un dispositivo que hace las funciones de un servidor centralizado para interconectar inalámbrica mente varios dispositivos terminales.

- Ad-hoc

Es una red punto a punto, donde no existe un dispositivo que cumpla las funciones de un servidor centralizado.

La figura 1.9 muestra la disposición general de las topologías mencionadas.

Los enlaces inalámbricos ópticos se incluyen dentro de la topología de tipo ad-hoc, ya que no se tiene ningún equipo FSO que cumpla las funciones de un concentrador o dispositivo central. Los equipos FSO establecen un medio de transmisión o un camino redundante según sea el caso.



**Figura 1. 9 Topologías de redes inalámbricas**

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

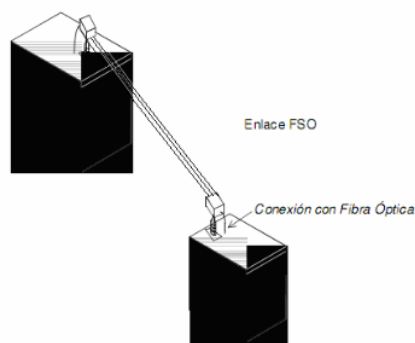
Analizados los principales aspectos relacionados con las comunicaciones inalámbricas y las particularidades de los láseres, se hace necesario el estudio de las características de los sistemas FSO, los parámetros de transmisión y los fenómenos ambientales que pueden afectar el desempeño de los enlaces. Toda esta información, ayudará a entender el modo de funcionamiento de las transmisiones ópticas en espacio libre, conocer las ventajas y desventajas de esta alternativa de transmisión respecto a otros medios guiados e inalámbricos. Estos y otros aspectos se abordarán en el siguiente capítulo.

## CAPÍTULO II FUNDAMENTOS TEÓRICOS, TÉCNICOS Y DE DISEÑO DE LA TECNOLOGÍA FSO.

La incursión en este tipo de tecnología abre un panorama muy amplio sobre lo que son las aplicaciones de gran ancho de banda, adaptarlas a las necesidades actuales constituye un reto, y presenta nuevas expectativas de superación en cuanto a la forma en que se transmitirá la información en un futuro inmediato.

### 2.1 Definición de la transmisión óptica en el espacio libre (FSO)

Un sistema óptico en el espacio libre consiste en una transmisión inalámbrica láser por infrarrojos diseñada para la interconexión de dos puntos situados en una línea de visión directa (LOS). Esta tecnología permite conectar edificios cercanos entre sí, en áreas metropolitanas densamente pobladas, de una forma barata y sencilla, al no tener que hacer prácticamente ninguna obra, como se observa en la figura 2.1.



**Figura 2. 1 Conexión de un sistema FSO**

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

Los transmisores láser transmiten una onda modulada al receptor de manera segura y confiable, permitiendo enlazar redes distantes unos pocos metros o hasta 4 o 5 kilómetros. Esta tecnología utiliza el espectro no licenciado con haces de luz infrarroja y permite anchos de banda muy grandes, debido a que la información viaja en señales luminosas (Marcillo, León, & Vaca, 2008), (Lándsberg, 1983 ), (PAV, 2012).

Para comprender la operación de esta tecnología se puede considerar dos puntos conectados mediante fibra óptica y retirar la fibra. Los fundamentos de propagación de la señal por la fibra son similares a los de la transmisión a través del espacio libre (Marcillo, León, & Vaca, 2008), (Lándsberg, 1983 ).

## **2.2 Historia del proceso de la transmisión óptica**

La transmisión de información como forma de comunicación se convirtió en una necesidad para los seres humanos. Así, las señales de humo y el fuego, se emplearon para comunicarse, también se utilizaron fuentes de luz para enviar información. Antiguas inscripciones romanas, muestran el empleo de platos metálicos para reflejar la luz del sol a manera de espejos, además los barcos hacen parpadear sus luces para mandar mensajes a otras embarcaciones.

Uno de los antecedentes más significativos, lo realiza en el siglo XIX, Alexander Graham Bell al enviar ondas de voz por el aire mediante un dispositivo de su invención denominado “*Photophone*” que reflejaba la luz del sol en un espejo vibrante con una fotocelda de selenio para ondas sonoras con un alcance de 200 metros, como se observa en la figura 2.2.

En la primera y segunda guerra mundial, se hicieron pruebas de transmisión con luz y ondas de radio, siendo éstas las que tuvieron más éxito. Con la invención del láser, la evolución de dispositivos semiconductores y los cables de fibra óptica en los 60 adquirió relieve la comunicación óptica. Actualmente, la comunicación mediante dispositivos ópticos se emplean en muchas actividades comunes (LightPointe, 2012), (Nogueira, 2007), (Ghassemlooy & Popoola, 2010).





**Figura 2. 2 Transmisión Óptica a través del Photophone**

Fuente: (Ghassemlooy & Popoola, 2010)

### **2.3 Características de los sistemas FSO**

Entre las características más importantes y de mayor interés de los sistemas FSO se encuentran las siguientes (Lándsberg, 1983 ), (Popoola, Ghassemlooy, Awan, & Leitgeb, 2009):

- Total inmunidad a las interferencias de radiofrecuencia y las del espectro electromagnético cumpliendo con las normativas de seguridad 1M (láseres completamente seguros).
- Máxima seguridad de datos.
- Rápida instalación.
- Bajo costo de mantenimiento.
- Rápido retorno de la inversión realizada.
- Velocidad de transferencia hasta 2,5 Gbit/s.

- Idónea para zonas de difícil acceso o despliegue, como son: ríos, aeropuertos, ferrocarriles, etc.

Los principales parámetros en un equipo FSO son (Lándsberg, 1983 ), (Nogueira, 2007):

- **Interfaz aérea**

Se clasifica de acuerdo al nivel de seguridad que ofrece el transmisor, el cual está determinado principalmente por la longitud de onda y la potencia de transmisión del láser.

Los tipos de láser se clasifican en:

- Láser Clase 1M: Transmisores totalmente seguros para el ojo humano sin necesidad de protección.
- Láser Clase 3B: Transmisores generalmente peligrosos al ocurrir una exposición directa con el láser.

La transmisión FSO no es perceptible para el ojo humano puesto que trabajan en los 780nm, cumpliendo así los estándares de seguridad 1M y previniendo la ocurrencia de daños irreversibles en los usuarios de estos sistemas.

- **Longitud de onda**

Los equipos FSO pueden trabajar en las siguientes longitudes de onda:

- 800 nm: corresponde a la zona del espectro llamada "Región de Riesgo Retinal" por el daño que puede causar en la retina del ojo al ocurrir la incidencia del haz. La transmisión a niveles bajos de potencia es la única manera de lograr un rango de seguridad aceptable.

- 1550 nm: los equipos que trabajan en esta longitud de onda cumplen los estándares de seguridad para el ojo humano.

La potencia de transmisión de los dispositivos que trabajan a 1550nm es cincuenta veces mayor que los de 850nm, cumpliendo adicionalmente los estándares de seguridad.

- **Divergencia del láser**

Los haces de emisión láser no son completamente puntuales, ya que se "abren" al propagarse por el medio, formando un ángulo de divergencia.

Dicho ángulo depende del área de cobertura en el extremo final, y es inversamente proporcional a la potencia recibida en el receptor del equipo remoto. Para implementar enlaces FSO en paralelo, éste indicador establecerá la separación mínima entre los dispositivos. A menor divergencia, menor es la distancia necesaria.

- **Montaje y estabilidad del equipo.**

A diferencia de los equipos de radio, los dispositivos FSO son más susceptibles al movimiento, por lo que es muy importante que la plataforma y la estructura de montaje del equipamiento sean rígidas y estables, para evitar la necesidad de hacer realineaciones de los equipos.

Es por esto que se recomienda la instalación de los equipos en:

- Aparejos en terrazas o muros.
- Aparejos tras las ventanas.
- Torres autos soportados.

Ciertos dispositivos FSO tienen sistemas activos de alineación y se emplean especialmente en implementaciones en que el armazón de ensambladura no es muy firme o si los alcances son muy largos.

- **Interfaz física**

Los equipos FSO operan en la capa física o capa 1 del modelo OSI. Un sistema FSO puede emplearse con multiplexores para la transmisión de tramas de voz, datos y video de forma simultánea. Dependiendo del tipo de servicios, la conexión al receptor se soporta 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*).

Los dispositivos FSO brindan una interfaz física, que consiste en un cable de fibra óptica conectado al aparato terminal. Las particularidades de dicha interfaz dependen del modelo. Debido a esto, se emplean en FSO los mismos dispositivos usados con cables de fibra óptica. Además, se puede desplegar un tramo de fibra, hasta de 2 km, desde el equipo FSO sin repetidores.

- **Eficiencia y seguridad del enlace**

Es posible alcanzar valores de hasta 99,999% dependiendo del lugar de instalación y la implementación del sistema, aún en condiciones meteorológicas negativas y sin disminuir el alcance del enlace.

Los dispositivos disponibles comercialmente ofrecen una alta seguridad. Los láseres de los transmisores FSO poseen un método autónomo de enfriamiento activo, para conservar el láser en su temperatura adecuada de trabajo, garantizando así una mejor eficiencia del dispositivo y mayor vida útil.

Los equipos pueden ser utilizados tanto en ambientes cerrados como en el exterior, por eso el armazón del aparato es de aluminio y sella totalmente el dispositivo

dándole reciedumbre para su instalación y manejo sin provocarle daño y permitiéndole operar adecuadamente en entornos de mucha humedad.

- **Seguridad**

La seguridad óptica inalámbrica brinda grandes ventajas por la condición no cableada del medio de transmisión, el pequeño tamaño de los dispositivos y el aislamiento cerrado del rayo transmitido.

De esta manera, un transmisor puede presentar una divergencia del rayo de un miliradian, sin lóbulos adyacentes y partir con radio del rayo de unos pocos centímetros. Con estas características un rayo puede expandirse solamente un metro en una trayectoria de un kilómetro.

El rayo transmitido puede ser completamente bloqueado por un cuerpo en su trayectoria, es decir que solo se puede interceptar el enlace, poniendo un receptor en la ruta óptica del rayo. Según el sitio, esto sería muy difícil de ejecutar y peor aún en secreto. En esta tecnología Hay el peligro de que se bloquee totalmente la transmisión pero esto generaría la alarma de supervisión del sistema.

La obstrucción de un sistema FSO que emplea un rayo en el rango del infrarrojo es muy dificultosa. Tomar la onda en un punto que no esté en la trayectoria del rayo, empleando fotones de luz diseminados por un aerosol, partículas de lluvia o nieve que pueden aparecer en el aire, es muy improbable, por los considerablemente pequeños rangos de potencia infrarroja empleados en la propagación de la señal.

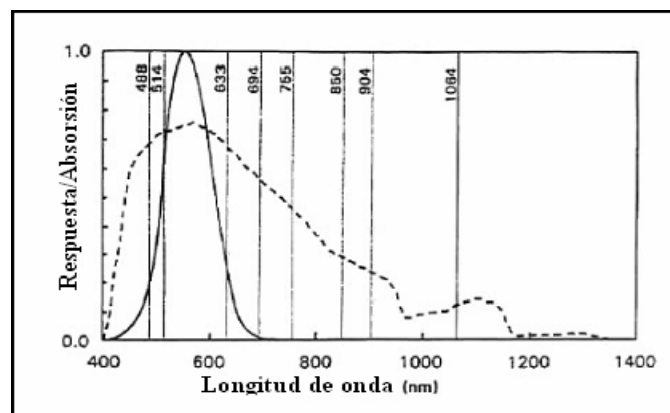
En conclusión, las transmisiones FSO brindan un alto nivel de seguridad en el medio de transmisión.

- **Peligro visual al emplear láser**

En relación a la tecnología FSO han surgido preocupaciones en cuanto al uso del láser y los peligros que puedan presentarse para quien esté en la trayectoria del

rayo transmitido. Es claro que en contraste con las microondas y las ondas de radio, las señales ópticas al incidir sobre un ser humano, normalmente no penetran, ni se disipan dentro del tejido corporal. El rango de potencia de la radiación de un sistema FSO es menor al del sol, pues sus componentes corresponden al infrarrojo y no al ultravioleta, esto descarta cualquier daño a la salud por esta causa. Es importante aclarar que en la explicación del párrafo anterior se exceptúan los ojos, ya que la pupila constituye una abertura al interior del ojo y así cualquier rango de potencia óptica que pase por ella, normalmente se absorberá y disipará en la retina, la cual es una zona muy sensible del ojo pudiendo ser dañada con un rayo de luz muy fuerte. Es necesario considerar la longitud de onda de trabajo del láser, porque aquellas entre 400nm y 1550nm pueden penetrar el ojo con la fuerza necesaria para dañar la retina. La energía que el ojo soporta sin que se produzca daño depende de la longitud de onda. Esto se establece por la absorción de luz por el agua, principal componente del ojo a diferentes longitudes de onda.

En la figura 2.3 la línea continua representa la región visible y la discontinua la respuesta ante longitudes de onda próximas al infrarrojo. La segunda demuestra que el fluido vítreo es transparente de los 400nm a los 1400nm y por la capacidad de enfoque de los ojos, unas 100 veces la energía es enfocada en la retina. En cambio, para mayores longitudes de 1400nm, la luz no es propagada por el fluido vítreo, y la energía no se transfiere a la retina, evitándose así su daño.



**Figura 2. 3 Absorción de luz en el ojo humano según la longitud de onda de la radiación**

Fuente: (Nogueira, 2007)

En conclusión, la exposición de la pupila al rayo láser puede causar daños fuertes en la retina que podrían ser permanentes, llegando hasta la pérdida de la visión. En la práctica no se producen casos tan graves, porque nadie puede conservar su vista totalmente constante, ya que el ojo realiza movimientos espontáneos, que son suficientes para desenfocar la zona de la retina de la emisión láser (Nogueira, 2007).

- **Protocolos y normas de protección**

La protección al emplear láser y su utilización adecuada es tema de estudio y esfuerzos para su normalización desde que estos equipos se crearon. Las inquietudes primordiales son:

- La exposición a las radiaciones del láser, especialmente a los ojos del ser humano.
- Los altos voltajes presentes en los equipos láser.

Hay que reflexionar escrupulosamente acerca del tiempo de exposición y la potencia del láser, el cual al ser de alta potencia causaría una lesión diferente del producido por radiaciones continuas de poca potencia. Así, en el caso de un impulso de alta potencia durante un lapso menor a un microsegundo provocaría un daño permanente, en cambio una radiación de menor potencia, produce lesiones únicamente si la exposición prolongada ocurre a distancias muy cortas.

El radio del lente en la fuente láser y la distancia respecto al láser, disminuyen la solidez de potencia del láser y por consiguiente el peligro para los ojos. Acerca de este tema el Centro Nacional de Dispositivos y Salud Radiológica, que depende de la Federación de Alimentos y Drogas (EDFA), de los Estados Unidos, ha determinado las normas para estos casos y otros países tienen las suyas propias, de acuerdo a las recomendaciones de la Comisión Internacional Electrónica (IEC).

Los organismos de normalización clasifican los láseres en diferentes clases de acuerdo a determinados indicadores como la longitud de onda (Marcillo, León, & Vaca, 2008), (Lándsberg, 1983 ).

## 2.4 Descripción de un sistema FSO

El diagrama en bloques de un típico enlace terrestre FSO se muestra en la figura 2.4 y al igual que otras tecnologías de comunicación cuenta esencialmente de tres partes: el transmisor óptico, el canal de transmisión y el receptor óptico.



**Figura 2. 4 Esquema de un sistema de comunicación óptico**

Fuente: (Lándsberg, 1983 )

### 2.4.1 Transmisor

La función de estos transmisores es convertir una señal eléctrica en una señal óptica. El componente más importante de los transmisores ópticos es la fuente óptica. A ésta, hay que añadirle un esquema para la modulación directa o externa de la señal. Actualmente los equipos FSO emplean diversas fuentes luminosas para transmitir información, pero aquellas con dispositivos semiconductores son las más usadas. Las fuentes se diferencian especialmente por la longitud de onda y la potencia. La elección de la fuente depende de su aplicación (Lándsberg, 1983 ), (Ledesma, 2012).

En general las fuentes son transductores que producen una portadora óptica para ser modulada mediante las ondas eléctricas provenientes de un dispositivo analógico o digital y deben tener las siguientes características (Nogueira, 2007), (Ledesma, 2012):



- Bajo consumo.
- Alta fiabilidad con los cambios de temperatura.
- Pequeño tamaño.
- Alta potencia de salida.

En la tabla 2.1 se presenta un resumen de las fuentes usadas con mayor frecuencia en los sistemas FSO.

**Tabla 2. 1 Fuentes ópticas más utilizadas en FSO**

<b>Wavelength(nm)</b>	<b>Fuentes ópticas</b>	<b>Comentario</b>
<b>~850</b>	<b>VCSEL</b>	<b>Barato y disponible fácilmente</b> <b>No enfriamiento activo</b> <b>Baja densidad de potencia</b> <b>Confiable hasta ~10Gbps</b>
<b>~1300/~1550</b>	<b>Fabry-Perot</b> <b>Láser con retroalimentación distribuida</b>	<b>Poca seguridad visual</b> <b>50 veces mayor densidad de potencia (100mw/ cm<sup>2</sup>)</b> <b>Compatible con la EDFA</b> <b>Alta velocidad, hasta 40 Gbit/s</b> <b>Eficiencia de 0.03-0.2 w/m</b>
<b>~10,00</b>	<b>Láser cascada</b>	<b>Caro y relativamente nuevo</b> <b>Muy rápido y alta sensibilidad</b> <b>Menos afectado por la niebla</b> <b>No trabaja detrás de cristales</b>
<b>Infrarrojo cercano</b>	<b>LED</b>	<b>Barato</b> <b>Circuito simple</b> <b>Baja potencia y tasa de bits</b>

Fuente: (Ledesma, 2012)

Los fabricantes de FSO están especialmente dedicados al empleo del láser semiconductor, los cuales son muy pequeños y se fabrican a precios muy bajos en grandes cantidades. Muchos de ellos también se emplean con fibra óptica (PAV, 2012).

A causa de la dispersión de la luz y la amplia distribución espectral de los diodos LED (*Light Emitting Diode*), éstos se emplean únicamente si las transmisiones son a cortas distancias, que requieren poca potencia de salida y velocidades de unos 155 Mbit/s, en cambio el láser presenta un espectro de emisión muy angosto, por lo que la luz no se dispersa como en el caso del LED, esto permite utilizarlo de manera eficiente en transmisiones de largo alcance.

La elección de una fuente láser adecuada para sistemas FSO obedece a varios parámetros. Por ejemplo, la longitud de onda debe estar relacionada con la ventana atmosférica, la cual está entre los 850nm y 1550nm. Adicionalmente, las fuentes generalmente requieren bajas temperaturas de operación. Otros factores importantes en las fuentes para FSO son (Mohamed, 2009):

- Costo y empleo de dispositivos comerciales.
- Potencia de transmisión.
- Tiempo de vida.
- Capacidad de modulación.
- Seguridad para el ojo humano.
- Tamaño pequeño.
- Compatibilidad con otros medios de transmisión como la fibra.

## 2.4.2 Receptor

De manera análoga a las fuentes láser, los detectores de sistemas FSO disponibles en el mercado son construidos con semiconductores y según el material empleado pueden trabajar a distintas longitudes de onda.

Estos dispositivos demodulan la portadora óptica recibida, recobrando los datos que después pasan en el receptor por técnicas de amplificación, filtrado, etc. Los detectores deben brindar (Paschotta), (Ledesma, 2012):

- Alta sensibilidad.
- Bajo consumo y pequeñas dimensiones.
- Una baja tasa de bits erróneos o proporción de errores, BER, (*Bit Error Rate*) típicamente en el orden de  $10^{-9}$  para la recuperación de la señal original.
- Bajo ruido.
- Alta eficiencia y rendimiento en la conversión opto-eléctrica.

El detector transforma la señal luminosa en una eléctrica en la primera parte del proceso de recepción; luego la señal se regenera, para entregarla al dispositivo terminal o a un repetidor óptico.

En la actualidad los equipos incluyen la detección directa de la señal modulada en intensidad a la portadora de la fuente láser; el detector obtiene una fotocorriente de la luz modulada incidente, de esta manera la corriente es proporcional a la potencia recibida y corresponde a la forma de onda de la modulante.

Los sistemas FSO emplean comúnmente fotodiodos semiconductores, por su pequeño tamaño, su sensibilidad y porque brindan diversas bandas de longitudes de onda importantes en FSO. En cambio, los fototransistores tienen buena sensibilidad pero no permiten altas velocidades de transmisión, limitando así su uso.

Los fotodiodos semiconductores trabajan con polarización inversa, en la recepción de la luz, al iluminarse el fotodiodo, los fotones son absorbidos produciendo pares electrón-hueco, que ante un campo eléctrico generan una corriente eléctrica del orden de los nanoamperios ( $10^{-9}$  A) y por consiguiente se debe amplificarla para procesar apropiadamente la señal. Son muy rápidos, poseen alta sensibilidad y son de tamaño pequeño. En la actualidad los fotodiodos empleados son (Paschotta), (Mohamed, 2009):

- PIN (*Positive – Intrinsic – Negative*)
- APD (*Avalanche Photo Diode*)

A continuación se describen algunas de sus características principales:

- **Diodo PIN**

Contiene una capa intrínseca muy pura, de material semiconductor, en la unión de dos capas de semiconductores tipo n y p. trabajan con tensión de polarización inversa.

La luz ingresa al diodo por una abertura muy pequeña y se absorbe en el material intrínseco, este añade la energía suficiente para que los electrones pasen de la banda de valencia a la de conducción y produzcan portadores de carga eléctrica que permiten que una corriente fluya por el diodo. Los elementos más empleados en la fabricación de estos detectores son el germanio, el GaAs, GaInAs, InP.

Necesitan bajos voltajes para operar, pero requieren buenos amplificadores. Tienen tiempos de vida relativamente altos; y son los más adecuados para transmisión en

1300 y 1550 nm. Este dispositivo resuelve el problema de lentitud en el tiempo de respuesta en las estructuras del semiconductor. Son muy usados en los receptores FSO (PAV, 2012), (Nogueira, 2007).

- **Fotodiodos avalancha (APD)**

Presentan una estructura de materiales semiconductores, ordenados en forma p-i-p-n.

La luz ingresa al dispositivo y es absorbida en la capa n, por lo que algunos electrones van de la banda de valencia a la de conducción. A causa del gran campo eléctrico producido por la polarización inversa, los electrones alcanzan altas velocidades chocando con otros electrones haciendo que éstos se ionicen. Estos iones, a su vez ionizan otros átomos, provocando un efecto de avalancha de corriente fotoeléctrica.

Estos dispositivos son mucho más sensibles que los diodos PIN y necesitan menos amplificación adicional. Su limitación es que los tiempos de transición son muy largos y su vida útil es muy corta.

Aquellos contruidos de silicio tiene ruido bajo y un rendimiento hasta del 90%. Su factor de ganancia es alto y no es crítico, ya que la ganancia del receptor es fácilmente controlable. Su sensibilidad es casi inversamente proporcional a la velocidad de transmisión, típicamente de  $-64$  dBm a 8 Mbit/s y  $-50$  dBm a 140 Mbit/s y el tiempo medio entre fallas es de 107 horas. En cuanto a los anchos de banda obtenidos comercialmente, supera a 1 GHz. Su desventaja está en su alto voltaje de alimentación (200 -300V).

Los de germanio operan con longitudes de onda de 1000 y 1300nm con rendimientos del 70%. Se puede extender su operación a los 1550nm, pero considerando que las aplicaciones a 1550nm requieren mayores velocidades de transmisión y esta es una limitación para el APD de germanio; por lo tanto su sensibilidad es afectada. El voltaje necesario para la polarización, es del rango de 30V (PAV, 2012), (Nogueira, 2007).

## 2.5 Funcionamiento de sistemas FSO

Esta tecnología emplea rayos de luz a través del aire para propagar información a altas velocidades, opera en la región infrarroja y emplea las longitudes de onda cerca del espectro visible, por lo que presentan propiedades similares de propagación que la luz visible, con valores entre 850 y 1550nm, correspondientes a frecuencias de unos 200 THz.

El principio de funcionamiento de los sistemas FSO es el siguiente (Lándsberg, 1983 ), (Mohamed, 2009):

- Se colocan los transmisores que envían una señal modulada hacia los receptores de forma segura (*eye-safe*) y confiable (*carrier class*) en los lugares de interés y se transmiten entre ellos haces láser infrarrojos que pueden transportar desde mensajes de Internet, vídeo, señales de radio hasta ficheros informáticos. La velocidad de transmisión de estos enlaces se encuentra entre los 100 Mbit/ s y los 2,5 Gbit/s. Experimentalmente se han logrado velocidades de transmisión de hasta 1,6 Gbit/s. Por tanto, ofrece prestaciones similares a la fibra óptica.
- Las ondas de información, en formato eléctrico arriban al transmisor, para transformarse en señales ópticas. Se emplea modulación en potencia porque no es realmente una modulación de amplitud ya que se cambia la potencia de la señal óptica para que al enviar un uno lógico la intensidad de la señal sea mayor que al transmitir un cero lógico. Un enlace FSO es exactamente igual que un enlace convencional de fibra, pero que utiliza un canal de transmisión diferente.

FSO no necesita licencia para operar y son completamente inmunes a interferencias radioeléctricas o electromagnéticas. Para funcionar requieren fundamentalmente contar con línea de vista pues se emplea luz para la transmisión y ésta no puede atravesar obstáculos sólidos como paredes o árboles. FSO puede funcionar en modo full dúplex, es decir que cada enlace FSO debe tener un transceptor para ejecutar esa operación (Nogueira, 2007), (Nogueira T. , 2008), (Sadaiti, 2010) . En la figura 2.5 se muestra un ejemplo de un transceptor FSO.

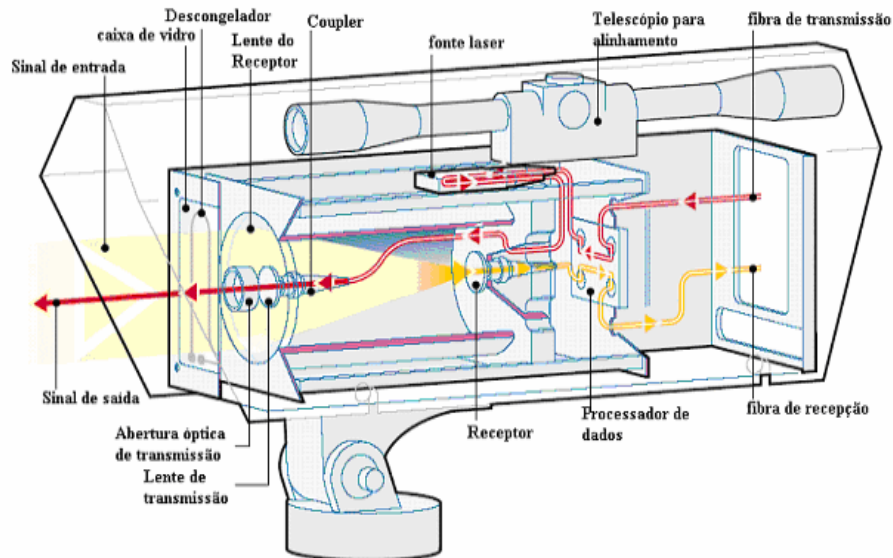


Figura 2. 5 Esquema de un transceptor FSO *Single-Beam* de *Lightpointe*

Fuente: (Sadaiti, 2010)

## 2.6 Criterio de selección de receptores para sistemas FSO

Seleccionar un modelo determinado de detector o material del mismo, es función de la aplicación. Es importante equilibrar la sensibilidad, la longitud de onda empleada y el transmisor.

En usos que necesitan longitudes de ondas cortas a 850nm se debe emplear detectores de silicio. Los detectores PIN son suficientes para cortas distancias y el transmisor opuesto genera suficiente potencia.

Los detectores APD son mejores para USOS de largas trayectorias, por la alta sensibilidad de estos diodos se tiene adicionalmente un margen de enlace. En cambio necesitan una alta tensión y estable, además son más costosos que los PIN. Los dispositivos de silicio no pueden ser emplearse para grandes longitudes de onda.

Continuando con este análisis, hay que indicar que a 1550nm el material adecuado es InGaAs, los diodos PIN de este material son muy populares con óptimas

características de modulación su capacidad de trabajar a altas velocidades de 10 Gbit/s o más. En cambio los de germanio presentan una amplia respuesta espectral y pueden trabajar a longitud de onda corta y larga, pero por su alta corriente de huecos no es apropiado para FSO.

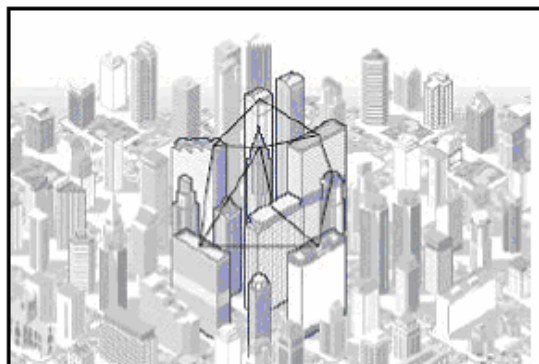
En longitudes de onda de 3-5 $\mu$ m y 8-14 $\mu$ m, mercurio cadmio telurio (MCT) se constituye en el material más empleado en los detectores por su respuesta en el espectro en esos rangos. (Nogueira D. , 2007).

## 2.7 Topologías para enlaces FSO

Un aspecto fundamental al diseñar sistemas FSO es la topología a emplearse. FSO puede trabajar en todas las topologías de red (punto-punto, punto-multipunto, malla, anillo y anillo con estribaciones), esto posibilita ampliar la red de acuerdo a la demanda, y operar a velocidades de la fibra óptica (Nogueira D. , 2007).

- **Topología en forma de malla**

Se fundamenta en una serie de nodos dispersos enlazados con cierta redundancia. Una red de este tipo totalmente interconectada, permite que cada nodo esté enlazado con los otros nodos (Lándsberg, 1983 ). Un ejemplo se muestra a continuación en la figura 2.6.



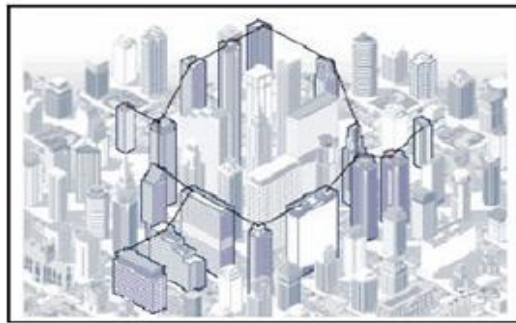
**Figura 2. 6 Arquitectura en forma de malla**

Fuente: (Sadaiti, 2010)



- **Topología en forma de anillo con derivaciones**

Permite implantar anillos de alta velocidad en representación del núcleo, mediante fibra o FSO. Así es posible enlazar sub-anillos mediante un *router* de capa 3 (Lándsberg, 1983 ), como se muestra en el ejemplo de la figura 2.7.



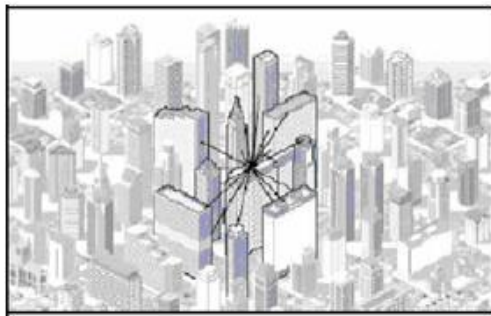
**Figura 2. 7 Arquitectura en forma de malla**

Fuente: (Sadaiti, 2010)

- **Topología en forma de estrella**

Está formada por múltiples conexiones a partir de un solo nodo. Hay diversas formas para implementar esta tipología en FSO, pero el más usado es la conexión de cada enlace FSO con un terminal de capa dos o tres situado en una edificación cercana. Las conexiones se acoplan mediante fibras al *switch* o al *router* y se ubican en posiciones arbitrarias en el techo del inmueble o en un cuarto u oficina.

Esta tipología presenta la ventaja de que a cada puerto en el *switch* o en el *router* puede asignársele una velocidad determinada de acuerdo a la clase de aplicación del usuario final. Esta arquitectura de red constituye la forma más dúctil de intercambiar información de un solo punto a múltiples puntos (Lándsberg, 1983 ). Un ejemplo de esta topología se observa en la figura 2.8.



**Figura 2. 8 Arquitectura en estrella**

Fuente: (Sadaiti, 2010)

- **Topología de enlaces punto a punto**

Se emplea cuando se necesita implementar conexiones amplias que puede sobrepasar los límites de los elementos FSO o las condiciones atmosféricas recomendadas para alcances con enlaces ópticos, de esta manera algunos enlaces punto a punto se conectan sin necesidad de dispositivos intermedios (Lándsberg, 1983 ), (Paschotta). Un ejemplo de esta topología se observa en la figura 2.9.



**Figura 2. 9 Arquitectura de varios enlaces punto a punto**

(Sadaiti, 2010)

## **2.8 Estudio del margen de conexión**

Este estudio es primordial para FSO por su dependencia respecto a un coeficiente de pérdida en la atmósfera entre equipos transmisor y el receptor que cambia en el

transcurso del tiempo a causa del clima, esto demuestra la importancia de poner atención a los factores atmosféricos del sitio de implementación del sistema FSO.

Un ejemplo podría ser el siguiente, un sistema FSO instalado en un edificio alto en medio de una ciudad con un enlace entre un transmisor que se encuentra en el punto A y un receptor ubicado en el punto B con una onda propagándose entre ellos, tal como se muestra en la figura 2.10. Esta operación requiere considerar la energía utilizable en el receptor después que la onda se transmitió y el uso de esa energía en el receptor y establecer la seguridad del enlace para un alcance determinado, aspecto fundamental si se considera que esa energía de la señal receptada puede cambiar al transcurrir el tiempo.

La evaluación de estos aspectos implica proyectar la conexión considerando las pérdidas y ganancias calculadas y comparar la energía de la señal receptada con el rango que necesita el detector. La implementación de una conexión más segura implica la necesidad de considerar un rango de conexión mayor que el valor nominal mínimo de energía receptada, poniendo atención a la capacidad del búfer utilizable; cabe anotar en este punto que la energía determinada para el rango de conexión puede aumentar el alcance del transmisor al receptor (Nogueira D. , 2007), (Nogueira T. , 2008).



**Figura 2. 10 Vista de un equipo FSO instalado en una azotea**

Fuente: (Nogueira D. , 2007)

## 2.9 Pérdidas en un sistema FSO

Las pérdidas que se producen en un enlace FSO se deben tener muy en cuenta ya que pueden afectar de manera significativa la calidad de la transmisión. Las de mayor impacto se explicarán a continuación:

### 2.9.1 Pérdidas ópticas

Ésta ocurre por la imperfección en los lentes y otros dispositivos ópticos. Así, hay que considerar que el lente propaga aproximadamente el 96% de la luz incidente y refleja o absorbe el 4% restante, ésta característica constituye la pérdida óptica y debe considerarse al diseñar el sistema. Las pérdidas producidas de esta manera dependen de las propiedades del dispositivo y las características del lente y se determinan en la producción de los elementos ópticos. (Nogueira D. , 2007), (Ledesma, 2012), (PAV, 2012).

Al diseñar el sistema es ventajoso elaborar un cuadro como el que se muestra en la tabla 2.2 con valores a manera de ejemplo: una potencia de salida de 4mW o sea 6dBm para una pérdida óptica de 4 decibelios, valor que debe restarse del valor de potencia inicial. En esta tabla se incluyen estos datos y se irán añadiendo las pérdidas que se vayan calculando por otros factores en la evaluación del enlace.

**Tabla 2. 2 Dedución del enlace.**

Descripción	Valor	Unidad
Potencia de transmisión	6	<u>dBm</u>
Pérdidas ópticas	-4	dB

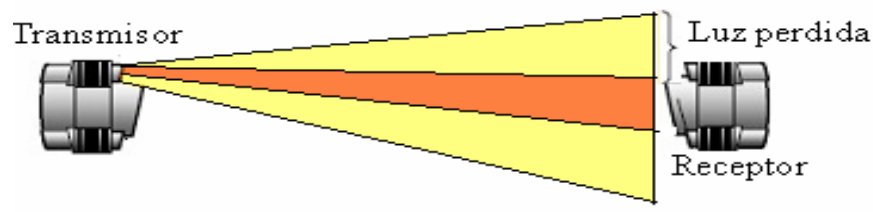
Elaborada por el autor

### 2.9.2 Pérdidas geométricas

Comprende las pérdidas producidas a causa de la divergencia del rayo de luz. Como ya se indicó el láser no es completamente puntual y se ensancha durante su propagación. Esa divergencia producida muestra el ángulo de abertura del rayo, el

cual depende del área de cobertura en el receptor y es inversamente proporcional a la potencia recibida.

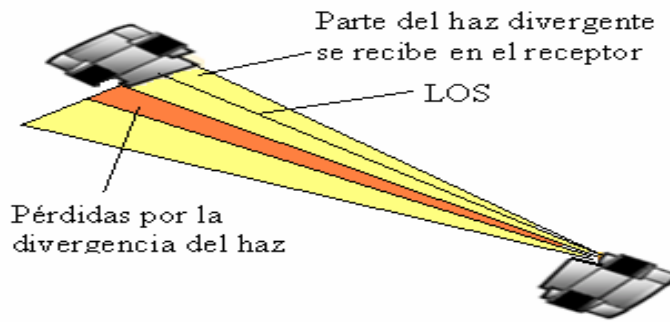
El uso de detectores activos disminuye la divergencia del rayo, en cambio los equipos que no lo utilizan deben diseñarse para que al ocurrir una oscilación del rayo, parte de él arrije al receptor manteniendo la conexión, ya que el efecto de la divergencia ocurre porque el rayo no es absorbido por el receptor y su ángulo presenta forma cónica, tal como se muestra en la figura 2.11, en que se observa como el rayo se va ampliando al propagarse causando que la luz no ingrese en su totalidad al receptor produciéndose la pérdida de la porción que no ingresa.



**Figura 2. 11 Divergencia del rayo**

Fuente: (Nogueira D. , 2007)

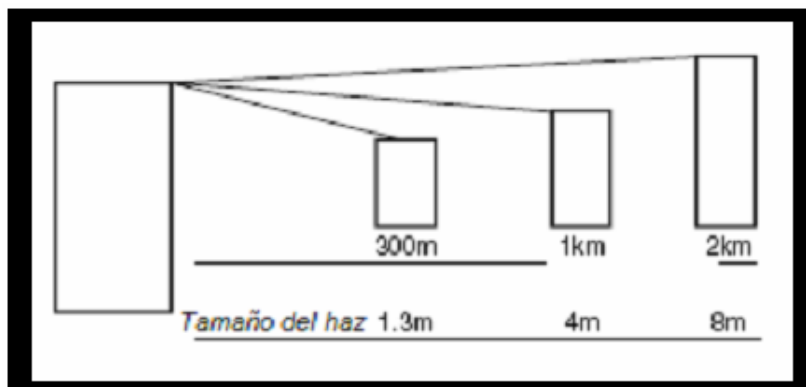
Al reducir la divergencia del rayo mayor cantidad de luz ingresa al receptor, pero esto dificulta la alineación del rayo entre los equipos. En la figura 2.12 se puede observar el efecto de un ángulo de divergencia del rayo más extenso, el cual puede adaptarse a las oscilaciones producidas por movimientos de las armazones de instalación o a causa del viento, en cambio al tener un ángulo más angosto cualquier oscilación desajustaría el rayo (Nogueira D. , 2007).



**Figura 2. 12 Ángulo de divergencia más extenso del rayo**

Fuente: (Nogueira D. , 2007)

La pérdida geométrica que se produce es equivalente a la relación del área del receptor a la del rayo recibido, ésta puede determinarse mediante una ecuación geométrica considerando que la divergencia se produce a velocidad constante inmediatamente después que el rayo sale del emisor. En la figura 2.13 se observa un rayo emitido cuyo diámetro se evalúa a 300m, 1Km y 2Km, mostrándose el aumento del diámetro con la distancia.



**Figura 2. 13 Tamaño del haz proyectado**

Fuente: (Nogueira D. , 2007)

Teóricamente la propagación lineal del rayo es muy precisa, por eso hay equipos construidos para trabajar despreciando la dispersión de Rayleigh, de esta manera el radio del rayo emitido y el área de la onda recibida se determina mediante la expresión (2-1) y (2-2) respectivamente (Nogueira D. , 2007), (Ledesma, 2012).

$$\text{Radio} = \left[ \frac{\text{Diámetro de óptica recibida}}{\text{Diámetro de óptica transmitida} + \frac{\text{Distancia * diverg. del}}{\text{ángulo}}} \right]^2 \quad (2-1)$$

Para el diámetro expresado en centímetros, la distancia en kilómetros y la divergencia en mili-radianes la expresión es la siguiente:

$$\frac{A_B}{A_R} = \left[ \frac{D}{D_T \frac{R}{100*d*\theta}} \right]^2 \quad (2-2)$$

Dónde:

$A_B$  = Área del haz

$A_R$  = Área del receptor

Este valor puede expresarse en decibelios.

Para una mejor comprensión de este apartado, se realiza el análisis de la expresión indicada para la relación  $A_B/A_R$  mediante un ejemplo: para un diámetro del rayo emitido de 3cm, el del receptor des 8cm y una divergencia de 2mrad, a una distancia de 1Km la pérdida sería:

$$\frac{A_B}{A_R} = 0,001569 = -28\text{dB}$$

En el caso de sistemas que operan con múltiples rayos para enviar información o en los que los rayos no son uniformes, la determinación de la pérdida geométrica es más enredada, pero el concepto fundamental continúa igual.

El resultado obtenido se incluye en la tabla cuya elaboración se había iniciado anteriormente, como se muestra en la tabla 2.3.

**Tabla 2. 3 Dedución del enlace incluyendo la pérdida geométrica**

Descripción	Valor	Unidad
Potencia de transmisión	6	<u>dBm</u>
Pérdidas ópticas	-4	dB
Pérdida geométrica	-28	dB

Elaborada por el autor

### 2.9.3 Pérdidas en el aire y sensibilidad en el receptor

En el aire se produce la disminución de la onda y la atenuación de la conexión FSO de varias formas, tales como absorción, dispersión y centelleo, los cuales cambian en el tiempo y dependen de las condiciones atmosféricas presentes.

Para finalizar la evaluación de la conexión se requiere conocer la distancia a la que se puede instalar el transmisor y el receptor, esto permitirá establecer el rango de desvanecimiento de la conexión para un alcance determinado y con este dato determinar la seguridad de la conexión.

La capacidad del detector para utilizar el rango de energía recibida se mide a través de la sensibilidad, la cual depende de la velocidad de modulación de la onda entrante, altas velocidades implican gran cantidad de bits en la unidad de tiempo que contienen pocos fotones para ser detectados y receptados, dificultando la diferenciación de los estados lógicos 1 y 0.

FSO emplea codificación binaria simple y códigos NRZ (No Return Zero) o RZ (Return Zero). De acuerdo a la clase de receptor empleado hay un rango teórico de una potencia de onda mínima que es perceptible a pesar del ruido de fondo que puede generarse de algunas fuentes como la luz del entorno, el ruido de disparo que produce oscilaciones estadísticas notorias en una medición y el ruido térmico



causado por el movimiento aleatorio de electrones en los conductores. El uso de diodos APD incrementan el ruido en la amplificación.

Al diseñar un equipo debe conocerse la energía de las fuentes de ruido para establecer la sensibilidad y cotejar con los detalles de fábrica del mismo, si estos datos no están disponibles, es posible medirlos mediante un medidor de potencia óptica y otro de BER. A causa del ruido se aumenta la tasa de error a un límite establecido que puede elegirse según la aplicación y alta tasa de propagación, que comúnmente es  $1 \times 10^{-10}$ , para el ejemplo que se está desarrollando se considera un receptor con sensibilidad de -43 decibelios y una tasa digital de propagación de 155Mbps y de error de  $1 \times 10^{-10}$ , (Lándsberg, 1983 ), (Nogueira D. , 2007).

Ahora se incluye 17 decibelios como margen de enlace señalado para proteger la conexión ante efectos del aire en la tabla 2.4.

**Tabla 2. 4 Deducción del enlace incluyendo el margen de enlace**

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Potencia de transmisión	6	<u>dBm</u>
Pérdidas ópticas	-4	dB
Pérdida geométrica	-28	dB
Margen de enlace	17	dB

Elaborada por el autor

## 2.10 Margen de enlace

Se relaciona con el rango dinámico, es decir la diferencia en decibelios entre el valor mínimo de entrada requerido para discernir una onda, es decir la sensibilidad del receptor y el máximo que sobrecarga el receptor FSO, este nivel produce inconvenientes de saturación provocando alinealidades, lo cual se presenta en enlaces cortos cuya señal se atenúa poco en el aire.

Un valor típico del rango dinámico es de unos 30 decibelios que implica que el máximo valor de señal detectable es mil veces más grande que el mínimo requerido,

cabe indicar en este punto que un valor de rango dinámico alto permite que el enlace sea más versátil y fuerte en FSO (Nogueira D. , 2007).

### 2.11 Generalidad del margen de enlace

La ecuación (2-3) permite establecer la potencia recibida en el receptor:

$$P_{recibida} = P_{transmitida} \times \frac{L \cdot D^2}{d^2 \cdot R^2 \cdot 10^6} \times 10^{-a \cdot R / 10} \quad (2-3)$$

Dónde:

P: potencia (mW)

L: pérdidas ópticas en el transmisor y receptor (dB)

D: diámetro de apertura del receptor (m)

d: divergencia del haz (radianes)

R: rango (km)

a: atenuación atmosférica (dB)

La potencia recibida es la mínima necesaria y depende de la sensibilidad del receptor, así el margen de enlace en función de la sensibilidad se obtiene de la ecuación (2-4):

$$\text{Margen de enlace} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{recibida}}{S}\right) \quad (2-4)$$

Dónde:

S: sensibilidad del receptor

También es posible determinar el margen de enlace en función del rango de enlace y la atenuación atmosférica, como se muestra en la ecuación (2-5):

$$\begin{aligned} \text{Margen de Enlace} &= 10 \cdot \log \left( \frac{P_{\text{trans}} \cdot L \cdot D^2}{S \cdot d^2} \cdot \frac{10^{(-a \cdot R / 10)}}{1e6 \cdot R^2} \right) \quad (2-5) \\ &= 10 \cdot \log \left( \frac{P_{\text{trans}} \cdot L \cdot D^2}{S \cdot d^2} \right) + 10 \cdot \log \left( \frac{10^{(-a \cdot R / 10)}}{1e6 \cdot R^2} \right) \end{aligned}$$

Parámetros relacionados  
con el sistema

Parámetros relacionados  
con el enlace

Nótese que el margen de enlace corresponde a la suma de un componente que envuelve las circunstancias determinadas del enlace, es decir la atenuación que debe vencerse para conservar operativa la conexión y un segundo componente dado por las medidas que involucran el rendimiento del sistema FSO, es decir la medida de la capacidad del sistema para vencer esa atenuación, siendo los dos componentes independientes.

GLM (*Generalized Linear Model*) es una generalización del margen de enlace en decibelios y especifica un método FSO con sus ventajas esenciales, a través de elementos propios de la conexión y es independiente del rango de conexión y las condiciones meteorológicas. La ecuación (2-6) muestra la manera de calcularlo:

$$\text{GLM} = 10 \cdot \log \left( \frac{P_{\text{trans}} \cdot L \cdot D^2}{S \cdot d^2} \right) \quad (2-6)$$

GLM permite comparar dos productos fundamentado en el diseño de ellos, porque como ya se indicó, el rango de conexión y las condiciones meteorológicas no entran en esta generalización. Si el producto A con un GLM de 10dB y B tiene 13dB, entonces B tendrá 3dB más que A en tosa conexión, es decir que B posee el doble de rendimiento que A, lo cual significa un mejor recurso y un servicio más seguro (Nogueira D. , 2007).

En la figura 2.14 se observa el margen de enlace en función del alcance para una atenuación de 10db/km y en la figura 2.15 se observa el margen de enlace en función

de la atenuación atmosférica para 1 km de enlace, ambas figuras representan al producto A y al producto B.

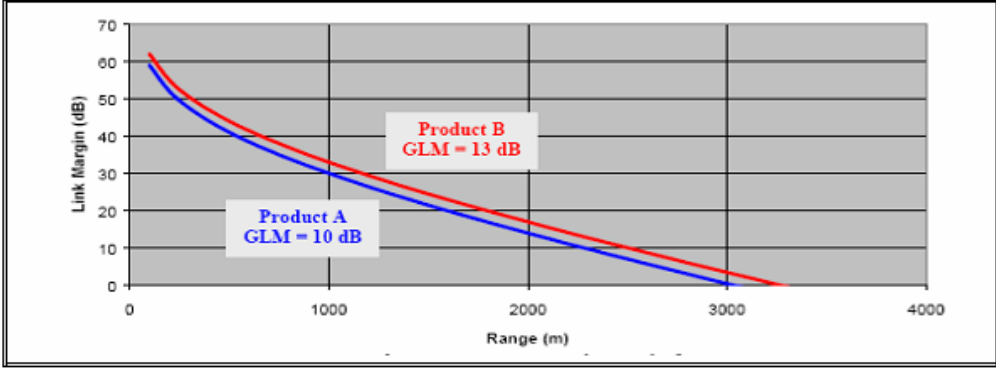


Figura 2. 14 Margen de enlace en función del alcance para una atenuación de 10db/ km  
Fuente: (Nogueira D. , 2007)

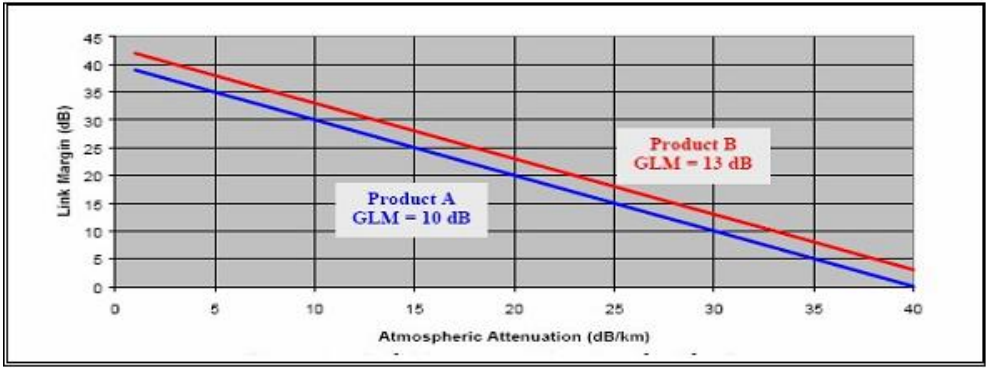


Figura 2. 15 Margen de enlace en función de la atenuación atmosférica para 1 km de enlace  
Fuente: (Nogueira D. , 2007)

En la tabla 2.5 se detallan los resultados del GLM para diferentes productos disponibles comercialmente, considerando que no se producen pérdidas ópticas.

**Tabla 2. 5 Cálculo del GLM de varios productos**

<b>ESPECIFICACIONES</b>	<b>PRODUCTO A</b>	<b>PRODUCTO B</b>	<b>PRODUCTO C</b>	<b>PRODUCTO D</b>
Potencia Tx (mW)	640	30	345	16
Divergencia (rad)	2e-3	1e-3	5e-3	2e-3
Apertura Tx (m)	0.2	0.13	0.15	0.15
Sensibilidad Rx (mW)	5e-4	1e-4	1e-4	5e-5
<b>GLM (dB)</b>	<b>101</b>	<b>97</b>	<b>95</b>	<b>93</b>

Fuente: (Arceo, 2008)

### 2.12 Elementos que perturban FSO

Aunque el aire se vea nítido y despejado, contiene moléculas de oxígeno, nitrógeno y vapor de agua, además de elementos propios de zonas con contaminación. Los componentes indicados pueden diseminar o absorber los fotones que se propagan en el aire, obligando a operar en una ventana recomendable con la longitud de onda apropiada.

Por lo indicado, FSO trabaja en el nivel del infrarrojo de tal forma que se reduce la atenuación por dispersión o absorción, es decir a longitudes de onda de 850nm y 1550nm. (PAV, 2012).

### 2.13 Atenuación en el aire

Se la denomina atenuación atmosférica y está dada por la “Ley de Beer-Lambert”, que detalla la atenuación de la luz en su propagación por el aire a causa de la absorción y dispersión, mediante la expresión (2-7) (Nogueira D. , 2007), (PAV, 2012), (Sadaiti, 2010).

$$\frac{P_R}{P_0} = \tau(R) = e^{-\sigma R} \quad (2-7)$$

Dónde:

$\tau(R)$  = transmitancia a un alcance R

$P_0$  = energía del láser en la fuente (mW)

$P_R$  = energía del láser al alcance R del transmisor (mW)

$\sigma$  = coeficiente total de atenuación ( $m^{-1}$ )

La suma de cuatro componentes que dependen de la longitud de onda, determina el coeficiente de atenuación  $\sigma$  que representa la atenuación total, como se muestra en la ecuación (2-8)

$$\sigma = \alpha_m + \alpha_a + \beta_m + \beta_a \quad (2-8)$$

Dónde:

$\alpha_m$ : coeficiente de absorción molecular

$\alpha_a$  : coeficiente de absorción del aerosol

$\beta_m$ : coeficiente de dispersión molecular

$\beta_a$ : coeficiente de dispersión por aerosol

Los coeficientes de absorción son resultado de la absorción de energía que hace el medio (atmósfera) y ciertas partículas. El coeficiente de dispersión de Rayleigh, es el resultado de la interacción de la luz con partículas de tamaño pequeño en relación a la longitud de onda. El coeficiente de dispersión de Mie, aparece cuando las partículas incidentes son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la onda transmitida.

A continuación la figura 2.16 muestra la atenuación causada por moléculas absorbentes como agua, oxígeno y dióxido de carbono.

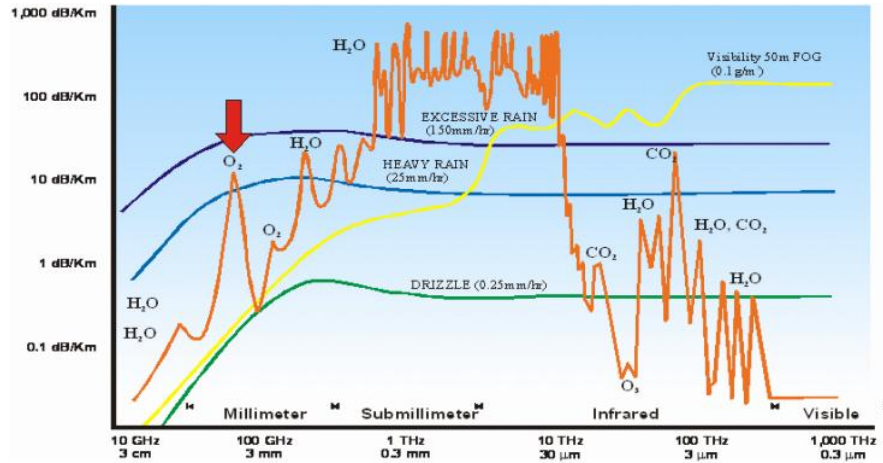


Figura 2. 16 Atenuación en la atmósfera por la presencia de moléculas absorbentes (Nogueira D. , 2007)

Ahora, es necesario tener en cuenta las características de los sistemas FSO:

- Las longitudes de onda de interés se encuentran entre 780nm y 1550nm
- Los coeficientes de absorción molecular, absorción por aerosol y dispersión de Rayleigh son despreciables.

Resulta entonces que el coeficiente de atenuación está dado por la dispersión de Mie, que a su vez, está en función de la visibilidad.

Por lo tanto, en las longitudes de onda de interés, el coeficiente de atenuación se describe por la ecuación (2-9) (Marcillo, León, & Vaca, 2008), (Ledesma, 2012), (PAV, 2012):

$$\sigma = \beta_a \tag{2-9}$$

La visibilidad es técnicamente definida como la distancia en la cual la intensidad de luz decrece al 2% de su valor inicial. Cualitativamente, la visibilidad es la máxima distancia en la cual es posible distinguir un objeto oscuro en el horizonte.

La variación del coeficiente de atenuación con la visibilidad es descrita mediante la ley de Kruse, de acuerdo a la ecuación (2-10). Para una longitud de onda determinada la atenuación es función sólo de la visibilidad (Marcillo, León, & Vaca, 2008), (Ledesma, 2012), (PAV, 2012), (Sadaiti, 2010).

$$\sigma = \frac{3.91}{V} \left( \frac{\lambda nm}{500 nm} \right)^{-q} \quad (2-10)$$

Donde q según la visibilidad presente puede ser:

1,6	si	$V > 50 \text{ km}$
1,3	si	$6 \text{ km} < V < 50 \text{ km}$
$0,16 * V^{0,34}$	si	$1 \text{ km} < V < 6 \text{ km}$
$V^{-0,5}$	si	$0,5 \text{ km} < V < 1 \text{ km}$

En la ecuación (2-10):

$\sigma$ : coeficiente de atenuación atmosférica

V: visibilidad (Km)

$\lambda nm$ : longitud de onda en nanometros

q: factor que depende de la dispersión de la partícula en el medio.

La atenuación atmosférica se relaciona con la transmitancia de acuerdo a la ecuación (2-11).



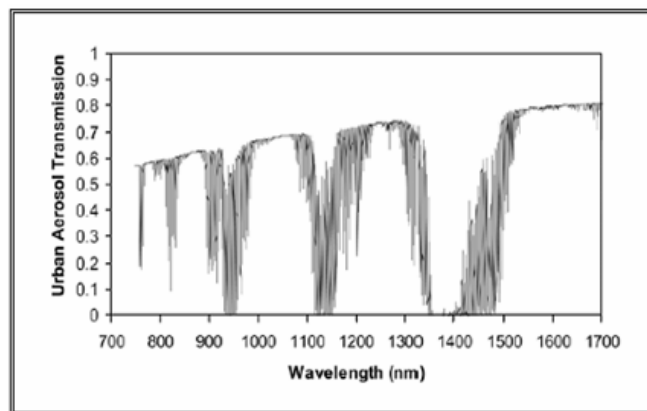
$$Aff_{atm(db)} = 10.\log(1/\tau(d)) \quad (2-11)$$

## 2.14 Absorción en la atmósfera

La cantidad de variedades absorbentes establece cuanto puede atenuarse la señal, pudiendo presentarse: absorción molecular y por aerosoles.

El caso de la absorción por aerosol comprende partículas sólidas finamente diseminadas y líquidas en forma de gotas de agua, hielo, polvo y materiales orgánicos, cuyo radio es de unos  $20\mu\text{m}$ . La molecular es provocada por diferentes gases que se hallan en el aire y que absorben determinadas bandas de frecuencia. Los elementos con más absorción en la zona del infrarrojo son: el agua, el dióxido de carbono, el ozono y el oxígeno.

A continuación, en la figura 2.17 se presenta el caso del espectro de propagación correspondiente a un cielo despejado en que ocurre una acumulación de aerosol normal provocando una visibilidad de 5km, su evaluación contiene la absorción por vapor de agua, dióxido de carbono, entre otras moléculas (Ledesma, 2012).

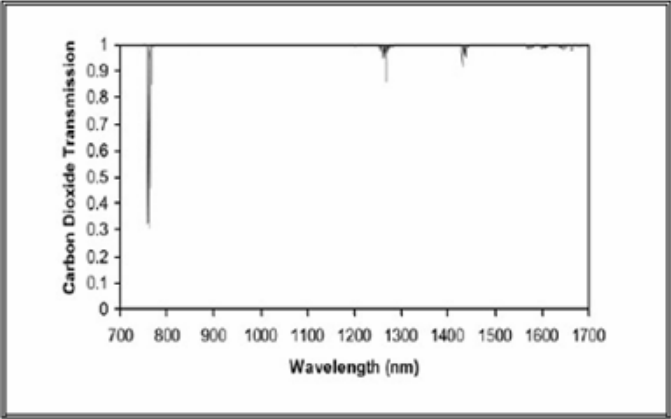


**Figura 2. 17 Propagación considerando la longitud de onda en una ciudad con acumulación de aerosol normal con cielo despejado**

Fuente: (Nogueira D. , 2007)

La figura 2.18 corresponde a la propagación cuando se tiene un cielo tranquilo y despejado, caso en el que el vapor de agua predomina en la propagación. Gran

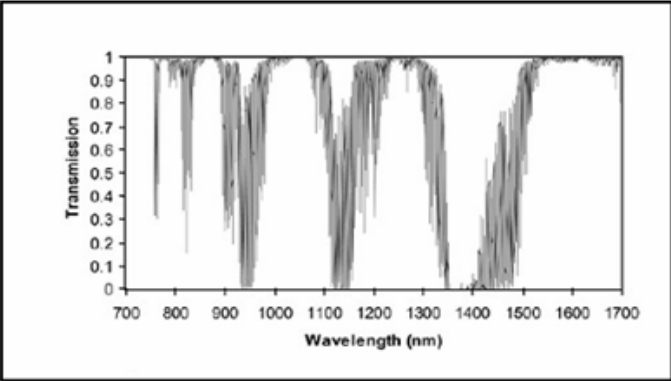
cantidad de líneas forman un espectro con ventanas casuales a longitudes de 850 y 1550nm.



**Figura 2. 18 Propagación en un cielo despejado de acuerdo a la longitud de onda**

Fuente: (Nogueira D. , 2007)

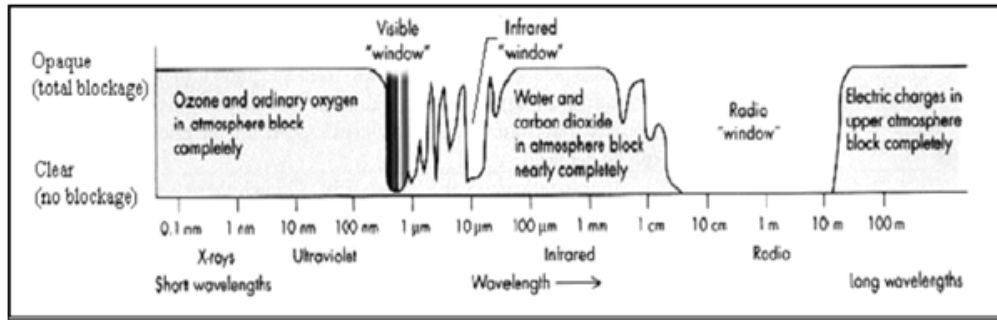
En la figura 2.19 se observa la propagación con dióxido de carbono en la cual se superponen vértices casuales.



**Figura 2. 19 Propagación en un entorno con dióxido de carbono de acuerdo a la longitud de onda**

Fuente: (Nogueira T. , 2008)

Algunas partículas dispersas en el aire absorben bandas de frecuencias determinadas, a las cuales se denomina “ventanas atmosféricas” que operan como filtros por las cuales la energía puede transitar, esto se representa en la figura 2.20.



**Figura 2. 20 Las ventanas atmosféricas en el espectro electromagnético**

Fuente: (Nogueira D. , 2007)

En FSO se emplea generalmente la ventana atmosférica correspondiente al rango del infrarrojo, en el cual entre las partículas absorbentes más comunes se tiene el agua, dióxido de carbono y ozono y para la longitud de onda de 0,7-2,0 $\mu\text{m}$  está limitada por la absorción del vapor de agua y en la de 2,0-4,0 $\mu\text{m}$  se debe a la absorción por la combinación de agua y dióxido de carbono. Sin embargo hay que indicar que la absorción atmosférica no causa mucho efecto en FSO (Nogueira T. , 2008).

## 2.15 Dispersión atmosférica

Se produce a causa de las pequeñas partículas dispersas en el aire que causan que la luz del rayo viaje con cualquier trayectoria. Esta dispersión puede considerarse como una adicional repartición espacial de la energía. Depende de la longitud de onda de la señal y del radio de las partículas dispersas en el aire. Esta dispersión de la luz podría perturbar mucho la operación de los equipos FSO.

Se presenta como: dispersión de Rayleigh y dispersión de Mie.

### 2.15.1 Dispersión de Rayleigh

La emisión sobre los electrones de un átomo causa una inestabilidad, por la cual los dipolos fluctúan a la frecuencia de la emisión incidente, causando una nueva radiación de luz de los electrones como una onda dispersa. La expresión de Rayleigh para la dispersión en un área se presenta en la ecuación (2-12) (Nogueira D. , 2007), (Sadaiti, 2010), (Nogueira T. , 2008):

$$\sigma_s = \frac{fe^4 \lambda_o^4}{6\pi\epsilon_o^2 m^2 c^4} \frac{1}{\lambda^4} \quad (2-12)$$

Dónde:

$\sigma_s$ : coeficiente de dispersión

$f$ : frecuencia del oscilador (nm)

$e$ : carga del electrón (J\*s)

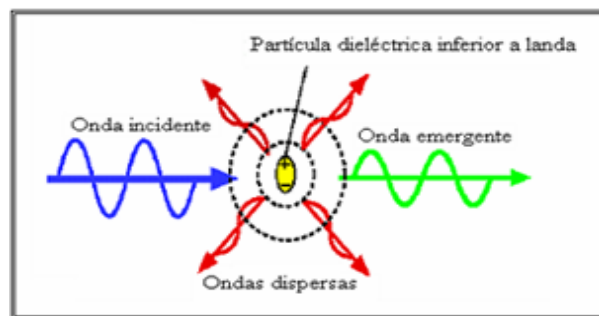
$\lambda_o$ : longitud de onda correspondiente a la frecuencia,  $\omega_o = \frac{2\pi c}{\lambda_o}$

$\epsilon_o$ : constante dieléctrica

$c$ : velocidad de la luz

$m$ : masa del elemento oscilante

El polvo o la ceniza provocan esta dispersión, sus partículas poseen un radio menor que la longitud de onda de la señal. La fuerza de la dispersión cambia con  $\lambda^{-4}$ . Esta dispersión produce el color azul del cielo y se muestra en la figura 2.21.



**Figura 2. 21 La dispersión de Rayleigh producida en pequeñas partículas**

Fuente: (Nogueira D. , 2007)

Para los equipos FSO que trabajan con longitudes de onda cercanas a la zona del infrarrojo, el efecto a causa de la dispersión de Rayleigh al propagar la onda, puede despreciarse. En la figura 2.22 puede observarse como depende la longitud de onda y la dispersión en la zona del infrarrojo en el espectro electromagnético (Nogueira T. , 2008).

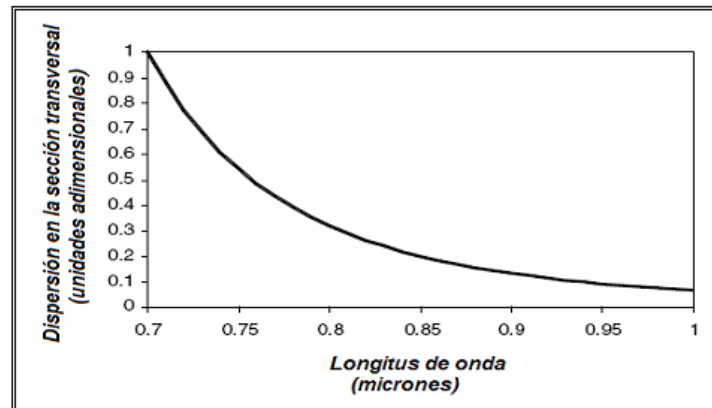


Figura 2. 22 Dispersión de Rayleigh en función de la longitud de onda

Fuente: (Nogueira T. , 2008)

### 2.15.2 Dispersión de Mie

Esta anomalía se produce cuando las partículas dispersas en el aire poseen un radio similar o mayor que la longitud de onda de la señal. Esta dispersión no depende mucho de la longitud de onda de la onda; pero para longitudes de onda en el rango del infrarrojo, la niebla y partículas producidas a causa del uso de aerosoles generan la dispersión de Mie, la cual domina casi todo el espectro.

La partícula extendida presenta una sección transversal efectiva que depende del valor del parámetro  $\alpha = 2 \pi r / \lambda$  y la diferencia del índice de refracción entre dicha partícula y el aire.

Dónde:

r: radio de la partícula dispersa ( $\mu\text{m}$ )

$\lambda$ : longitud de onda del láser (nm)

Algunas partículas dispersas en la atmósfera se presentan en la tabla 2.5 con su correspondiente radio y valor del parámetro  $\alpha$  en función de varias longitudes de onda del láser (Nogueira D. , 2007), (Sadaiti, 2010), (Nogueira T. , 2008).

**Tabla 2. 6 Parámetros de las partículas dispersas en la atmósfera**

Tipo de partículas	Radio ( $\mu\text{m}$ )	Valor del parámetro $\alpha$	
		785nm	1550nm
Moléculas de aire	0.0001	0.0008	0.0004
Neblina	0.01 a 1	0.08 - 8	0.04 - 4
Niebla	1 a 20	8 - 160	4 - 80
Lluvia	100 - 10000	800 - 80000	400 - 40000
Nieve	1000 - 5000	8000 - 40000	4000 - 20000
Granizo	5000 - 50000	40000 - 800000	20000 - 400000

Fuente: (Kim, McArthur, & Korevaar, 2001)

En la figura 2.23 se observan las zonas donde ocurren dispersiones de Rayleigh, Mie y geométrica, para variados valores de longitudes de onda y del parámetro  $\alpha$ .

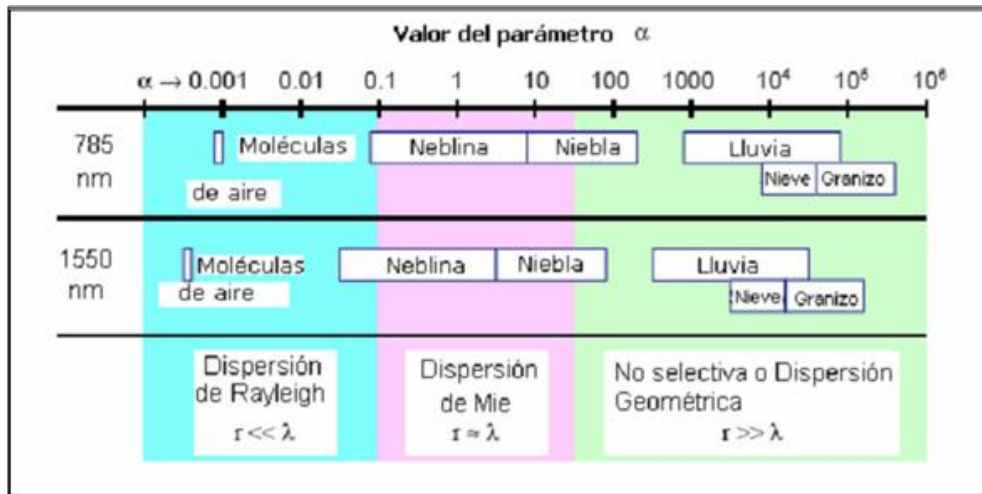


Figura 2. 23 Dispersiones en función de la longitud de onda y el parámetro  $\alpha$

Fuente: (Nogueira D. , 2007)

En FSO las longitudes de onda usadas, tienen un valor similar al radio de las partículas de niebla, esto hace que la niebla sea el más importante oponente del rayo de luz, en cambio las partículas de lluvia, nieve y granizo son mayores y por consiguiente son menos impedimento para el rayo.

La operación de equipos FSO en entornos de niebla espesa debe hacerse para enlaces cortos, para conservar rangos altos de eficiencia. Los niveles de potencia de enlace de los equipos disponibles comercialmente, permite lograr una eficiencia del 99,99% para distancias menores a 200 m (Nogueira D. , 2007).

## **2.16 Turbulencia**

En teoría, el desierto sería el entorno ideal para la operación de FSO, pero a causa del clima seco, el calor, la potencia de la perturbación genera dificultades en la propagación. El sol intenso calienta la superficie y las ráfagas de aire, generan variaciones del índice de refracción, causando que la señal luminosa se altere en su trayectoria por el aire. Tales ráfagas no son constantes en el tiempo y las variaciones del índice de refracción ocurren de acuerdo al movimiento del aire, siendo por tanto aleatorio. El rayo láser sufre dos trastornos por la perturbación: la desviación del rayo y otro producido por la variación de fase que genera intensas oscilaciones o centelleo.

Para disminuir las consecuencias del centelleo en la ruta de propagación de la señal, los equipos FSO no deben implementarse junto a zonas calientes, como techos de alquitrán, porque podrían sufrir altos rangos de centelleo en días calientes. (PAV, 2012), (Ledesma, 2012).

## **2.17 Desviación del rayo**

El rayo puede desviarse aleatoriamente por las variaciones del índice de refracción, a esto se denomina desviación del rayo, ocurre por la refracción en el aire, análogo a lo que se produce al pasar la luz por un medio refractivo, por ejemplo un lente de vidrio. Esta desviación se produce por torbellinos tumultuosos más grandes que el rayo. Si estos torbellinos son menores que el rayo, se produce el denominado esparcimiento de rayo de breve término. Estas oscilaciones son menores que los heces desviados y normalmente no perturban al sistema (Nogueira D. , 2007).

## 2.18 Centelleo

Son los cambios temporales y espaciales vertiginosos y de pequeño rango del índice de refracción debido a perturbaciones meteorológicas. Así se generan índices casuales de refracción a causa del viento y subidas de temperatura a causa de las bolsas de aire producidas por la diferencia en la temperatura con densidades variadas. En la figura 2.24 se muestran los efectos del centelleo.

Una señal luminosa frontal propagándose en una perturbación meteorológica podría distorsionarse por las bolsas de aire que intervienen como lentes o prismas. A causa del centelleo ocurre una oscilación temporal de la energía del rayo en el receptor (PAV, 2012), (Nogueira T. , 2008).

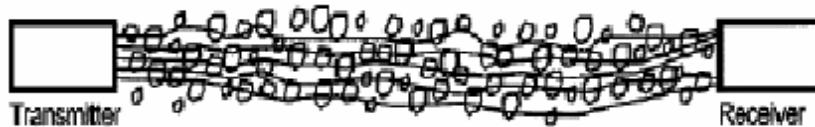


Figura 2. 24 Consecuencias del centelleo

Fuente: (Nogueira T. , 2008)

Para evitar el centelleo, se envían datos redundantes a través de enlaces apartados físicamente, un ejemplo se presenta en la figura 2.25, mostrándose cuatro rayos que empiezan a superponerse al llegar a los 100 m de recorrido, es decir que esa redundancia incrementa la distancia y la eficiencia.

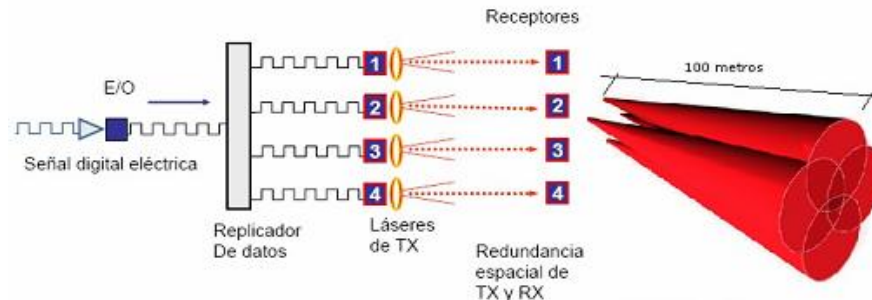


Figura 2. 25 Sistema de redundancia espacial para envío de datos

Fuente: (Nogueira D. , 2007)



Como el centelleo disminuye con la altura es mejor realizar la instalación en ubicaciones altas sobre la terraza y no en el filo de la pared.

## **2.19 Impacto del clima**

El clima constituye la más importante limitación para FSO, pues es muy sensible a la niebla, lluvia, etc. A causa de que FSO se fundamente en la propagación de señales ópticas en el espacio libre, los rayos enviados se atenúan por el rigor de las condiciones meteorológicas, pudiéndose disminuir la eficiencia del sistema, produciéndose errores, e inclusive la pérdida total del enlace. A continuación se analizarán algunos de estos fenómenos atmosféricos.

### **2.19.1 Lluvia**

La importancia de la lluvia es mucho menor que la niebla, porque las gotas de lluvia son de un radio de 200-2000 $\mu$ m y por lo tanto mayor que la longitud de onda de las fuentes de luz usadas en FSO (PAV, 2012). La lluvia produce una atenuación que depende de su propia naturaleza. Así, una precipitación de 2.5cm/hora produce una atenuación de 6 dB/km; por esta razón los equipos FSO disponibles en el mercado trabajan con un rango de enlace de 25dB de esta manera la lluvia no dificulta la propagación. De la misma manera si un sistema trabaja en distancias de 500m con lluvia, la atenuación es de 3dB, pero al aumentar la lluvia a más de 10 cm/hora también lo hace la atenuación, constituyéndose en un problema crítico, inclusive a cortas distancias; afortunadamente esta clase de tempestades duran poco tiempo (Nogueira D. , 2007).

Es importante anotar que las tecnologías inalámbricas de radiofrecuencia que trabajan sobre 10GHz, cuando soportan lluvia el impacto es mayor que por niebla a causa de que la longitud de onda RF y las gotas de lluvia son similares y las dos son mayores que las gotas húmedas que forman la niebla. Las frecuencias no licenciadas de 2,4 GHz y 5GHz, no son perturbadas por lluvia ni niebla.

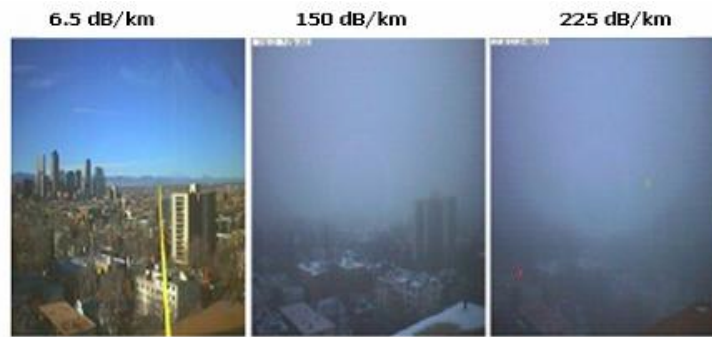
### **2.19.2 Nieve**

Está formada por cristales de hielo con diversidad de formas y tamaños. Su tamaño es mayor que la lluvia, pero cuando la nieve cubre las áreas, limitando mucho la visibilidad, la atenuación aumenta. Sin embargo la dispersión a causa de la nieve no es un gran problema para FSO, debido a que la dimensión de los copos de nieve es mayor que la longitud de la onda que emplean estos sistemas. Al presentarse una leve ráfaga de nieve y una lluvia tenue con la presencia de algo de niebla, la atenuación alcanza de 3 a 30 dB/km respectivamente. (Marcillo, León, & Vaca, 2008), (Lándsberg, 1983 ).

### **2.19.3 Niebla**

Es el fenómeno atmosférico más perjudicial para la técnica FSO debido a que está formada por pequeñas gotas de agua con un radio similar a la longitud de onda de la fuente luminosa. Ante la presencia de niebla la visibilidad es de 0-2000m. En los casos en que la visibilidad supera los 2000m, comúnmente se le denomina bruma.

En la figura 2.26 se muestra los efectos de la niebla en función de la visibilidad en un edificio de aproximadamente 300m de altura. En la imagen de la izquierda se observa claramente el inmueble porque el día es claro y despejado, con una pérdida de 6,5 dB/km y un rango de visibilidad de 2000 m, al centro se nota la presencia de una ligera niebla produciéndose una pérdida de 150 dB/km y un rango de visibilidad de 113m, se observa que la edificación es aún visible a 300m de distancia y a la derecha la niebla es muy espesa y no es posible ver el edificio, ahora la pérdida es de 225 dB/km y la visibilidad de 75m (Nogueira D. , 2007).



**Figura 2. 26** Visibilidad de acuerdo a la atenuación en entorno con niebla

Fuente: (Popoola, Ghassemlooy, Awan, & Leitgeb, 2009)

Es importante acotar que al disminuir la visibilidad también disminuye la eficacia y la utilidad de FSO, lo cual se presenta en determinados lapsos de tiempo. Para resolver esta dificultad se ubican los equipos en tramos menores para mejorar el rendimiento del sistema FSO, al brindar más margen de enlace y contrarrestar las circunstancias negativas del tiempo, como la niebla en el caso que se está analizando. Otra solución es la implementación de una vía redundante, lo cual también aumenta el rendimiento o el empleo de un equipo de rayo múltiple lo cual permite conservar la eficiencia de la conexión.

Las condiciones anotadas, es decir la baja visibilidad y elevadas capacidades de dispersión son los elementos que más restringen la implementación de FSO para largos trayectos. Como conclusión, se puede destacar que la niebla se constituye en el componente más restrictivo para el rendimiento de FSO.

## **2.20 Efecto de la línea de vista**

Por lo expresado hasta el momento, queda claro que el elemento principal para la propagación óptica inalámbrica es tener línea de vista entre los equipos de la conexión. Considerando que se trabaja en el rango infrarrojo, el rayo viaja en forma lineal, el diseño de línea de vista es menos preciso que para el caso de las microondas en que se necesita una vía abierta a causa de las zonas de Fresnel (Lándsberg, 1983 ).

### **2.20.1 Establecimiento de la línea de vista**

Mediante un reconocimiento visual realizado en las ubicaciones potenciales de los equipos se puede determinar de forma sencilla si se tiene línea de vista entre los dos puntos. Al incrementarse la longitud del enlace a más de un kilómetro el establecimiento de línea de vista se complica haciendo necesario el empleo de mapas e instrumentos ópticos que permiten visualizar objetos lejanos

La implementación característica de FSO es el enlace entre las azoteas de dos edificios, también se puede instalar transeptores ópticos contiguo a ventanas en edificaciones en que su implementación en la azotea es impráctica, en estos casos el ángulo que el rayo forma con la ventana es fundamental, ya que de ser factible éste debe ser de  $90^\circ$  o con una desviación de hasta  $5^\circ$  para impedir el rebote del rayo en el receptor. De acuerdo al cristal empleado en la ventana las implementaciones en ellas no constituyen una buena opción, porque el cristal puede reducir la energía de la señal e impiden la estabilidad de los dispositivos (Nogueira D. , 2007).

### **2.21 Velocidades de propagación**

Hay dos componentes que restringen la tasa de propagación de los equipos FSO clase O-E-O (Óptico- Eléctrico-Óptico), la fuente emisora y el fotodetector. Los rayos láser modulados directamente trabajan a tasas arriba de 2,5Gbit/s y son disponibles en el mercado para FSO. Con fuentes láser con moduladores externos se pueden alcanzar tasas arriba de 10Gbit/s. Existen detectores en el mercado para velocidades de 10Gbit/s para usarse en sistemas FSO; sin embargo, a altas velocidades la cantidad de luz que puede ser recogida por el receptor y convertida en electrones es extremadamente baja y la sensibilidad del receptor llega a estar en función de la velocidad de transmisión (Paschotta), (PAV, 2012), (Nogueira D. , 2007).

## 2.22 Utilización de FSO

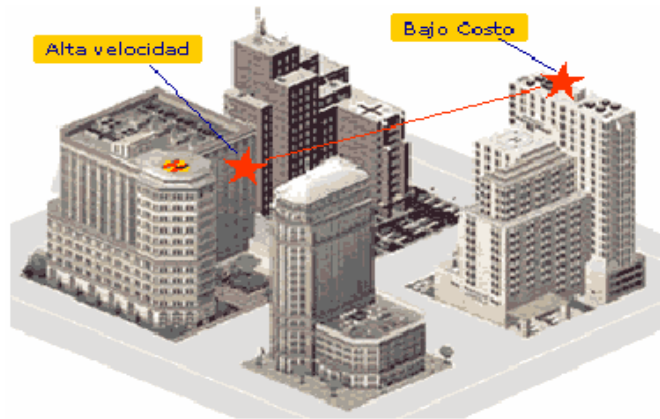
La propagación óptica inalámbrica empieza a adquirir importancia en el ámbito técnico y comercial para emisiones de banda ancha, en este ámbito FSO brinda de manera simple y rápida comunicaciones seguras en enlaces cortos. Al no requerir licencias o permisos de operación se emplean redes FSO como instrumentos sistémicos para tener conectividad gracias a sus atributos de tiempo y precio. Los usos primordiales de FSO son los siguientes (Marcillo, León, & Vaca, 2008), (Lándsberg, 1983 ), (Nogueira D. , 2007):

- **Enlace empresarial**

FSO es empleado por empresas en enlaces de alta protección para enlazar inmuebles, oficinas alejadas, etc., de esta manera gracias a la alta velocidad se evita el efecto embudo o *bottleneck* (cuello de botella) en el envío de datos, alcanzando un gran rendimiento y con diversidad de aplicaciones entre las que se puede mencionar:

- Enlace de redes LAN (*Local Area Network*)-LAN, MAN (*Metropolitan Area Network*)-LAN, etc.
- Video conferencia de alta calidad.
- Envío de bases de datos a altas tasas de transmisión.

En conclusión, FSO permite propagaciones a elevadas tasas como los enlaces con cables de fibra óptica pero a menor precio, además es posible trasladar el enlace rápida y sencillamente de ser necesario. A manera de ejemplo la figura 2.27 presenta un enlace FSO entre dos edificios ubicados relativamente cerca y con línea de vista clara (Marcillo, León, & Vaca, 2008), (Lándsberg, 1983 ), (Paschotta).



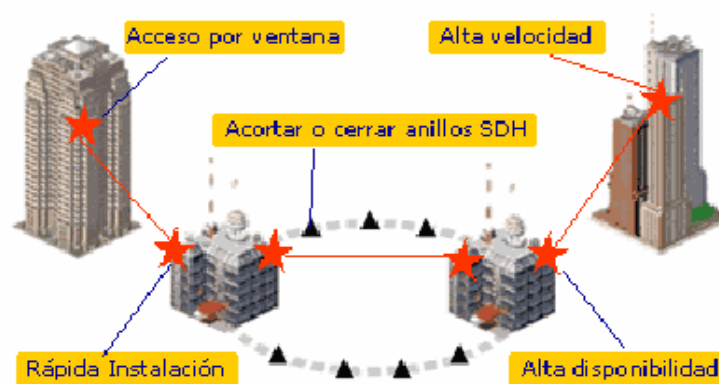
**Figura 2. 27 Enlace entre dos edificios**

Fuente: (Nogueira D. , 2007)

- **Redes urbanas**

En sistemas de acceso en que no es posible contar con un cableado de fibra óptica, puede implementarse FSO en corto tiempo y como ya se indicó anteriormente, se puede implementar arquitecturas tipo bus o anillo, empleando los mismos dispositivos que con fibra óptica.

Incluso, como se muestra en la figura 2.28, FOS puede emplearse para completar sistemas de anillos de fibra óptica, ya sea como como redundancia o para emplear menor cantidad de nodos en el anillo con lo cual se reduce el “jitter” en el sistema (Marcillo, León, & Vaca, 2008), (Lándsberg, 1983 ).



**Figura 2. 28 Enlace urbano FSO**

Fuente: (Nogueira D. , 2007)

- **Utilización en redes celulares**

Día a día las redes de la telefonía celular se desarrollan y se presentan nodos a los que no es posible atender con fibra óptica, en estos casos FSO es una opción de bajo costo para resolver este tipo de inconveniente y alcanzar ubicaciones a las que las instalaciones no admitan el empleo de cables. Con FSO se pueden construir conexiones de x(E1) y alcanzar los 155Mbit/s con sistemas STM1 o 622Mbit/s en sistemas STM4 con los mismos dispositivos de emisión. De la misma manera se pueden establecer enlaces directos entre nodos para obviar la interconexión con terceros o implementar como se observa en la figura 2.29, conexiones mediante radiofrecuencia (Marcillo, León, & Vaca, 2008), (Nogueira D. , 2007).

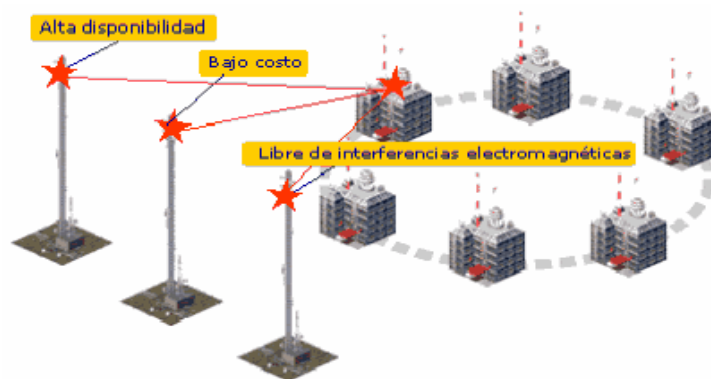


Figura 2. 29 Conexiones para redes celulares

Fuente: (Nogueira D. , 2007)

- **Aplicación en redes de televisión por cable**

Las operadoras de televisión por cable actualmente han ampliado su portafolio de negocios incluyendo la prestación de aplicaciones de Internet de banda ancha y altas tasas de transmisión y telefonía fija, obteniendo de esta manera un importante incremento en sus ingresos. Este desarrollo a menudo obliga a tener redes redundantes que permitan brindar una calidad de servicio nivel adecuada, lo cual puede conseguirse como se muestra en la figura 2.30 mediante FSO a bajo costo, salvaguardando los sistemas de distribución a través de cables, completando anillos o estableciendo conexiones paralelas en la red (Marcillo, León, & Vaca, 2008).

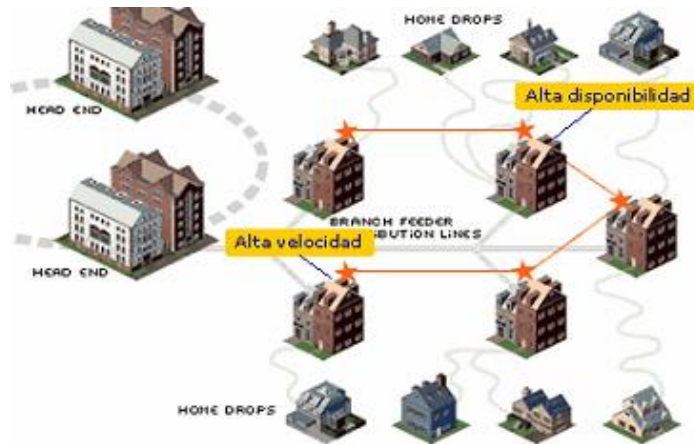


Figura 2. 30 Redundancia FSO en sistemas de televisión por cable

Fuente: (Nogueira D. , 2007)

- **Integración con redes de telecomunicaciones**

Una forma de optimizar los anillos empleados en los servicios de telecomunicaciones es aplicar FSO en la implementación de conexiones adyacentes económicas y de banda ancha a inmuebles ubicados alejados del anillo. Un ejemplo se puede observar en la figura 2.31. También FSO puede brindar redundancia a conexiones de radio debido a que son menos afectados por factores meteorológicos que aquellos.

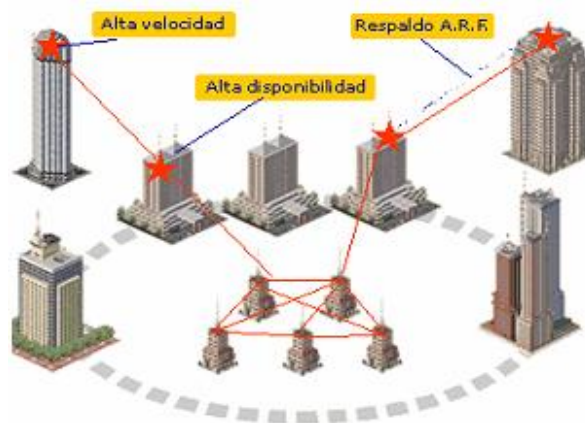


Figura 2. 31 Integración de FSO con redes de telecomunicaciones

Fuente: (Nogueira D. , 2007)



### 2.23 Ventajas

La principal ventaja de las FSO es la sencillez de su instalación. Al no tener que romper las calles de la ciudad, se agiliza mucho los trámites para las autorizaciones de obras civiles para la implementación del sistema. Además de sencilla, la infraestructura necesaria es relativamente barata. Simplemente es necesario colocar los transmisores y receptores de tal manera que haya visión directa entre ellos. Debido a que se trabaja en el espectro óptico, los haces de luz infrarroja no atraviesan paredes pero sí cristales como los de las ventanas. Esto permite colocar los emisores y receptores dentro de los edificios.

Las FSO son una de las posibles soluciones al “problema de la última milla”. En la actualidad, las redes WAN tienen muy alta capacidad, las LAN también la tienen, pero existe un cuello de botella en la conexión entre ambas que, con otras tecnologías basadas en cable, resulta muy costoso de evitar. Las FSO son una solución barata a este problema.

Las FSO presentan una serie de interesantes ventajas de seguridad frente a otras tecnologías inalámbricas basadas en radio:

- Los haces láser son altamente directivos y se hace muy complicado interceptarlos sin que el propietario se percate de ello.
- Tampoco pueden ser detectados mediante analizadores de espectro ni detectores de potencia de radiofrecuencia .
- Son invisibles al ojo humano, así que su presencia no resulta evidente.
- La información puede transmitirse de forma cifrada, al igual que en el resto de comunicaciones digitales, lo que proporciona un grado de seguridad aún mayor (Lándsberg, 1983 ), (Popoola, Ghassemlooy, Awan, & Leitgeb, 2009).

## 2.24 Desventajas

La principal desventaja de las FSO es su alto grado de vulnerabilidad frente a los factores atmosféricos. Al estar operando con ondas luminosas, la atenuación de la señal será muy grande en condiciones de niebla. Esto no invalida las FSO como método de comunicación, simplemente es un factor que debe tenerse en cuenta en el diseño de los enlaces de forma que cumplan las especificaciones requeridas por el usuario.

Otras desventajas de las FSO son:

- La posibilidad de obstrucción del enlace, por ejemplo, por pájaros. Dado que éste es un hecho inevitable, la única solución es la redundancia entre los equipos transmisores y receptores.
- Estabilidad de los edificios: para que el enlace FSO funcione correctamente, emisor y receptor deben estar perfectamente enfrentados. Cualquier pequeño desplazamiento de uno de ellos conllevaría a la caída del enlace. Por ello, en el diseño debe tenerse en cuenta los movimientos a los que están sujetos los edificios, muchas veces provocados por sismos. El equipamiento comercial está preparado para soportar la mayoría de los movimientos a los que pueden verse sometidos.
- Interferencia con la radiación solar: el Sol emite también radiación en el espectro del infrarrojo donde trabajan las FSO y por tanto es una fuente de ruido para el sistema. Unos filtros apropiados que eliminen toda la potencia fuera de la banda de interés junto con una potencia suficiente en el receptor solucionan este problema.
- Salud: las FSO emiten al espacio una gran potencia luminosa concentrada en haces láser invisibles. Si esta potencia incide sobre la retina de los ojos de las personas, puede quemarla y provocar graves trastornos de visión. Por ello, es muy importante que se asegure la inocuidad de la utilización de las FSO en zonas

transitadas por la personas (Lándsberg, 1983 ), (Popoola, Ghassemlooy, Awan, & Leitgeb, 2009), (Nogueira T. , 2008).

Después de analizar los principales aspectos relacionados con la tecnología FSO, se realiza una propuesta de un caso real para diseñar una red inalámbrica utilizando la tecnología estudiada y el equipamiento idóneo de acuerdo a las características y comercialización de estos en el mercado mundial. Además de calcular los principales parámetros que intervienen en la evaluación de su desempeño, así como su simulación con el software Optisystem 7.0. Estos y otros aspectos se abordarán en el siguiente capítulo.

### **CAPITULO III ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE LA RED INALÁMBRICA A IMPLEMENTAR.**

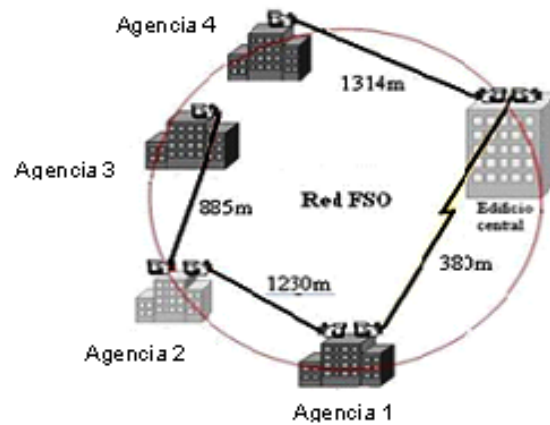
El diseño de la red inalámbrica óptica que se propone, es el enlace entre dos edificios, teniendo en cuenta que existe una línea de visión directa entre ellos, lo que hace posible proponer la utilización de la tecnología FSO para la comunicación entre ellos y en algunos casos implementar una red de contingencia en algunos sitios donde se tiene un enlace por fibra óptica, y de esta forma extender y mejorar la calidad de los servicios de la red actual, como Internet, la seguridad en la transferencia de información, y sobre todo garantizar mayor estabilidad en la comunicación.

En el presente capítulo se realizará un estudio de la factibilidad de la red propuesta a través de los valores que se obtengan de las ecuaciones matemáticas que se utilizan para el cálculo de enlaces FSO, además de la simulación con el software OptiSystem 7.0 de uno de los enlaces, lo cual permitirá obtener resultados preliminares de lo que sería la implementación de la red inalámbrica óptica.

Con estos resultados se sentarán las bases para estimar el rendimiento de la red inalámbrica óptica, lo que permitirá realizar conclusiones y tomar decisiones acerca de los beneficios que brindará esta red, si en un futuro se hiciese la implementación física.

#### **3.1 Diseño del enlace óptico inalámbrico**

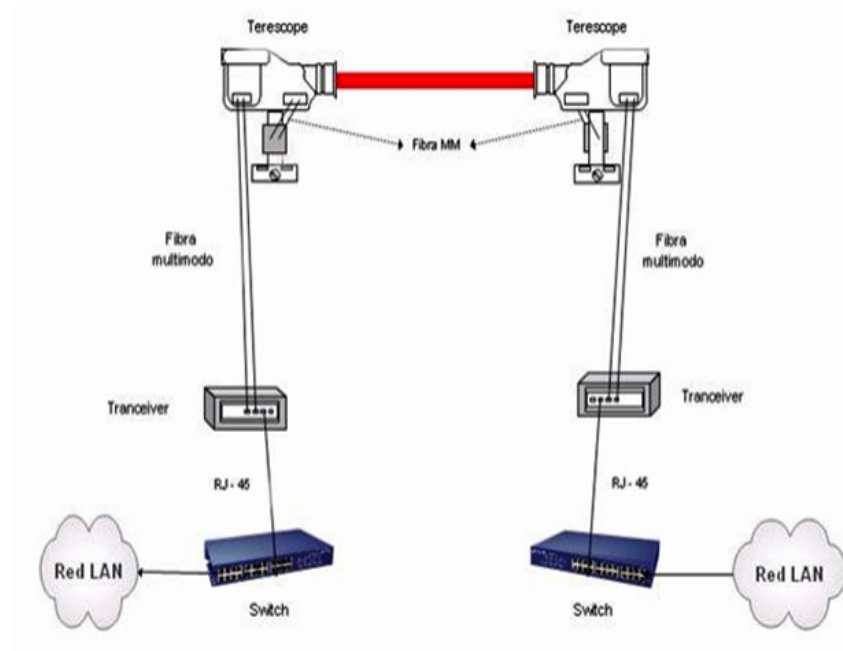
Para la realización del diseño general de la red inalámbrica óptica láser se requiere conocer en primera instancia la distancia (m) existente entre las diferentes edificaciones, lo cual se puede observar en la figura 3.1, distancias que permitirán determinar el tipo de equipo láser que cubre las necesidades del diseño a realizar.



**Figura 3. 1 Distancias entre las edificaciones la red inalámbrica óptica.**

Elaborado por: Autor

Si se realiza un acercamiento, en cuanto a la estructura de conexión punto a punto de los equipos ópticos, se podrá visualizar que cada equipo óptico se conecta a través de fibra óptica, con un convertidor (*Transceiver*) de fibra óptica a RJ45 y viceversa. Luego con un cable de red - RJ45 se conecta hacia un enrutador que está en el interior del edificio. En la figura 3.2 se muestra el esquema de conexión utilizando equipos ópticos.



**Figura 3. 2 Esquema de conexión de equipos ópticos**

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

Para seleccionar el equipo óptico a utilizar en el funcionamiento de este enlace, además de conocer la distancia, es necesario tener en cuenta otras importantes características como, la velocidad de transmisión de los datos y evaluar además el precio con el que se comercializa esta tecnología en el mercado por sus principales empresas productoras. En la tabla 3.1 se especifican los costos respectivos, por cada proveedor.

**Tabla 3. 1 Principales equipos ópticos con sus características y precios**

Empresa	Modelo	Características Principales	Costo (dólares)
	PAVLight Gigabit	Velocidad: 1Gbps. Estándar de Transmisión: Fast Ethernet, Gigabit Ethernet. Alcance: hasta 1000mts.	\$26500
	PAVExpress 155	Velocidad: 155 Mbps. Alcance: hasta 200mts.	\$7430
	SONAbeam 1250-E	Velocidad: 100–1602 Mbps. Estándar de Transmisión: Gigabit Ethernet. Alcance: 50 a 3600mts.	\$28900
	SONAbeam 155-E	Velocidad: 31 – 180 Mbps. Estándar de transmisión: Fast Ethernet. Alcance: 50 – 3000mts.	\$18000
	WB5100	Velocidad: 100Mbps. Estándar de Transmisión: Fast Ethernet. Alcance: hasta 1000mts.	\$11368
	TereScope 5000/G	Velocidad: 100 – 1250 Mbps. Estándar de Transmisión: Gigabit Ethernet. Alcance: hasta 3000mts.	\$27000

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

Nota: los precios establecidos en la tabla anterior, para cada una de las empresas proveedoras, incluyen el kit de los equipos; es decir soportes, bases, conectores, entre otros accesorios.

En cuanto a la máxima velocidad de transmisión, el equipo que cumple este requerimiento es el SONAbeam 1250-E con velocidad de 1,6 Gbit/s, siendo también el que mayor alcance tiene, no obstante en el diseño de la nueva red inalámbrica óptica a implementarse, la distancia máxima de los enlaces no sobrepasa los 3km y los requerimientos de usuario establecen velocidades mayores de 1 Gbit/s y enlaces seguros en la comunicación de datos por lo que se decidió que el equipo que cumple con las expectativas en cuanto a costo-beneficio es el perteneciente al proveedor MRV con el equipo TereScope 5000/G.

Una vez seleccionado el equipo a utilizar, se detalla en la tabla 3.2 el costo total aproximado de lo que sería la implementación de la red inalámbrica óptica.

**Tabla 3. 2 Costos de implementación de la red inalámbrica óptica**

No.	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (dólares)	PRECIO TOTAL (dólares)
1	Equipos ópticos (equipo emisor y receptor, instalación, kit de herramientas, garantía 1 año, transporte, <u>transceiver</u> )	2	2700	54.000
2	Cable de fibra óptica 4 hilos (m)	40	5,65	226
3	Conectores de la fibra óptica	8	4,5	36
Total				54.262

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

### 3.2 Instalación de los equipos láser ópticos

Para la presente implementación se seleccionó el equipo TereScope 5000/G, porque cumple con los requerimientos necesarios para la implementación de la red inalámbrica óptica propuesta.

### 3.2.1 Características

- Es un equipo diseñado para trabajar con una velocidad que sobrepasa a 1Gbit/s para la transferencia de voz, datos y video con un alcance mayor de 1km entre los enlaces.
- El modelo de este equipo tiene un alcance de 3km, usa tres láseres transmisores y tres receptores.

En la tabla 3.3 se muestran las características técnicas del equipo seleccionado:

**Tabla 3. 3 Características del equipo TereScope 5000/G**

Indicadores	Especificaciones	Sistema 3 Tx	
<b>Rendimiento</b>	Tasa de transferencia	100 Mbps – 1.5 Gbps	
	Rango (metros)	3000	
	Tasa de error bit	$< 1 E^{-12}$	
	Atenuación	3 dB/km	3500 m
		5 dB/km	2750 m
10 dB/km		1750 m	
	17 dB/km	1300 m	
	30 dB/km	870 m	
<b>Transmisor</b>	Numero de transmisores	3	
	Fuente de luz	Diodo Laser	
	Clase de laser	1 M	
	Longitud de onda (nm)	830 - 860	
	Potencia (dBm)	18,5 – 21,5	
	Divergencia de laser (mrad)	2	
<b>Receptor</b>	Tipo de detector	APD	
	Sensibilidad (dBm)	- 33	
<b>Interfaz de cliente</b>	Presentación	Fibra Optica	
	Conectores	Dual SC	
	Sistemas	Gigabit Ethernet	
	longitud de onda	850nm	
	Potencia (dBm)	-4 a 9,5	
<b>Fuente de poder</b>	Voltaje de salida	100 – 240 VAC, 35 - 60 VDC	
	Poder de consume (Watts)	30	
<b>Diseño mecánico</b>	Peso (kg)	18	
	Dimensiones del equipo W x L x H	790 x 390 x 556	
<b>Protocolos</b>	E3 / T3, Fast y Gigabit Ethernet, FDDI, OC – 3, ATM y STM – 1, Fiber Channel.		

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)



Las características mencionadas corresponden al equipo que se muestra en la figura 3.3.

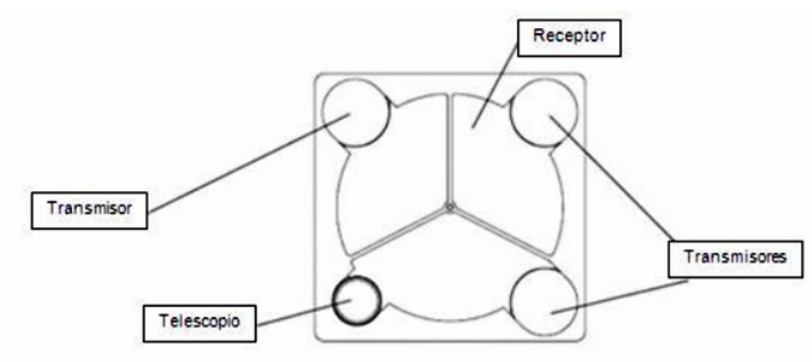


**Figura 3. 3 TereScope 5000/G**

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

### 3.2.2 Estructura

Cada equipo consta de un receptor y tres transmisores, como se observa en la figura 3.4 y una interface en el panel trasero para la conexión periférica del equipo, como se observa en la figura 3.5.



**Figura 3. 4 Parte frontal del equipo**

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

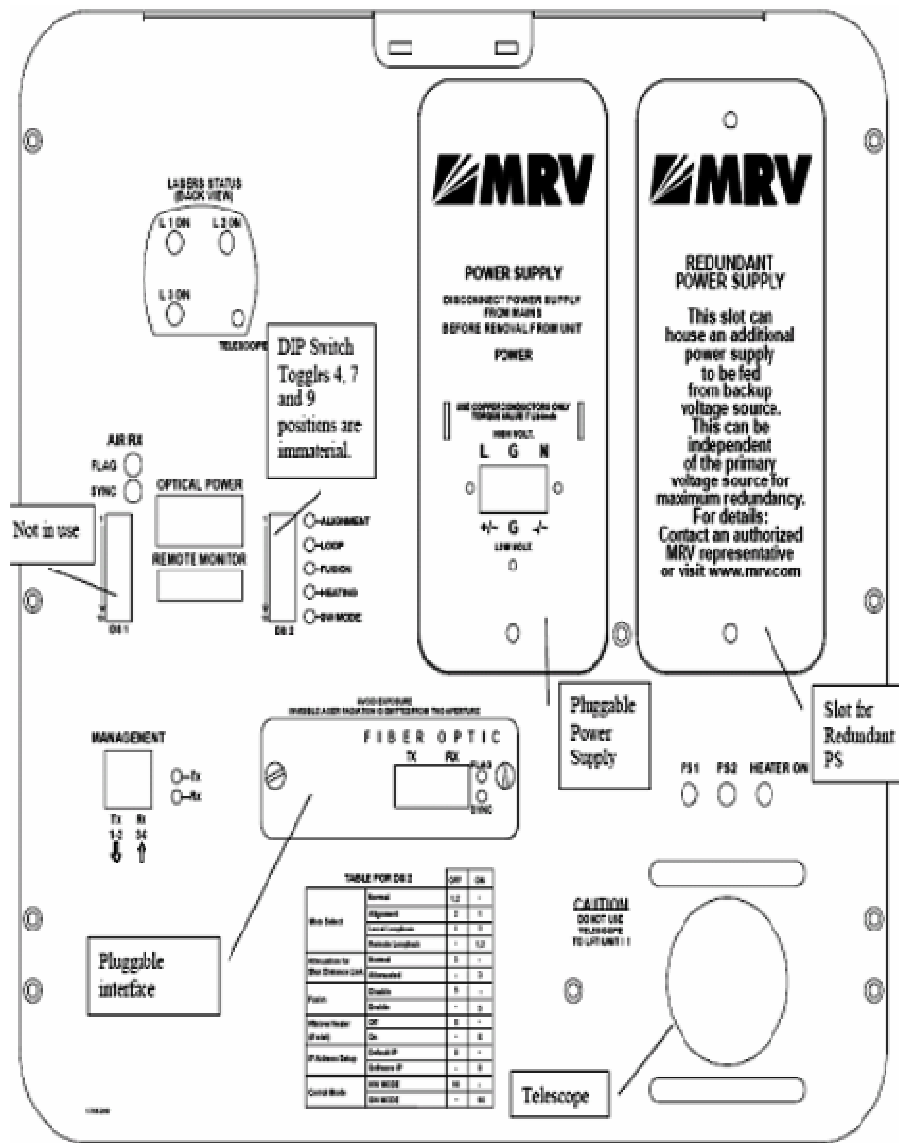


Figura 3. 5 Parte trasera

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

En la tabla 3.4 se muestra en detalle los diferentes indicadores que se encuentran en la parte trasera del equipo óptico.

Tabla 3. 4 Parte trasera del equipo

	Potencia	Fuente de Poder
	Fibra Óptica	Sirve para conectar equipos periféricos, estos pueden ser

Conectores		dispositivos de red ( <i>switch, hub, router</i> )
	Monitor Remoto	Permite una conexión opcional a un monitor remoto
	Administración	Permite la conexión a un interfaz 10Base-T SNMP, administrable. Transmisión (pines 1, 2), recepción (pines 3, 6), otros propósitos (pines 4, 5, 7 y 8 que pueden ser conectores RJ45))
Alineamiento	Telescopio	Permite alinear los equipos transmisor con receptor
Selectores (DIP Switch DS2 toggles)	Modo seleccionado (1, 2)	Alineación.- Se enciende cuando existe transmisión. Normal.- Señal recibida por el puerto de fibra óptica y transmitida a través del Tx. Señal recibida por el Rx y transmitida a través de fibra óptica al Tx. Loopback.- Indica que hay enlace Rx y Tx. Remoteloop.- Respuesta de emisión y recepción.
Indicadores	Laser Status	L1On.- Cuando está siendo utilizado el transmisor 1 L2On.- Cuando está siendo utilizado el transmisor 2 L3On.- Cuando está siendo utilizado el transmisor 3 Telescope.- Cuando está siendo utilizado el telescopio de dirección. PS1.- Indica el estado del equipo. Fuente de poder activa o inactiva PS2.- Indica si la fuente de poder redundante (opcional) está activada Heater On.- se enciende cuando el lente tiene actividad.

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

### 3.2.3 Instalación

Para la instalación del equipo óptico seleccionado se recomienda seguir las siguientes etapas:

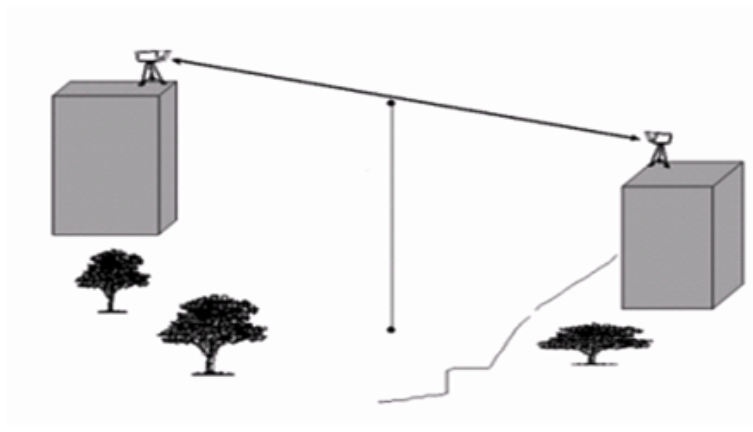
- Observación in situ del escenario de despliegue.
- Instalación de la infraestructura.

- Montaje del equipo.
- Direccionar el lente.

Observación in situ del escenario de despliegue: esta etapa consiste en visitar el sitio donde se van a instalar los equipos, con la finalidad de descubrir obstáculos o dificultades para la colocación de los equipos y por ende tener las condiciones iniciales para una conexión fiable.

Se debe tener una línea de vista libre entre las dos edificaciones, es decir, se debe considerar la no presencia de edificios, árboles, entre otros obstáculos (Marcillo, León, & Vaca, 2008), (Nogueira D. , 2007).

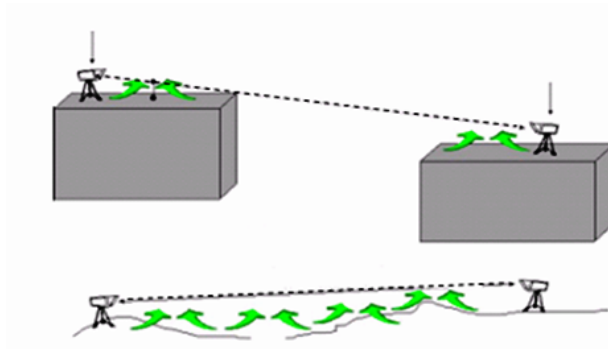
En la figura 3.6 se visualiza una locación idónea para la ubicación de los equipos ópticos.



**Figura 3. 6** Locación idónea para la ubicación del equipamiento

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

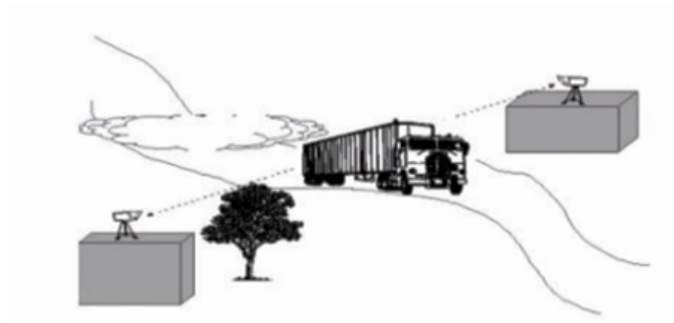
En la figura 3.7 se puede visualizar una manera no recomendable de montar equipos ópticos para un enlace de comunicación.



**Figura 3. 7 Montaje no recomendable**

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

En la figura 3.8 se observa un montaje inaceptable debido a las interferencias inesperadas que puedan interrumpir el enlace, así como vehículos, lo cual se debe evitar.



**Figura 3. 8 Montaje inaceptable**

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

Se recomienda también que todo tipo de instalación se debe realizar lejos de equipos que causen vibración y movimientos bruscos, ya que traería como resultado un desalineamiento del láser óptico.

En la figura 3.9 se puede visualizar diversas maneras de colocar estos equipos:



**Figura 3. 9 Equipos instalados**

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008), (Popoola, Ghassemlooy, Awan, & Leitgeb, 2009)

### **3.2.4 Instalación de la infraestructura**

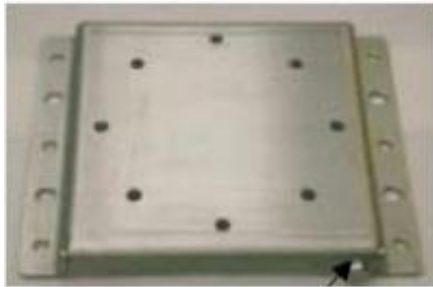
Una vez colocados los equipos, se procede a hacer la conexión tanto en lo que se refiere a cableado eléctrico como de red, es decir, alimentar la fuente de poder del equipo y la conexión de la fibra óptica hacia el enrutador, el mismo que dará servicio a la red LAN, cabe recalcar que la fibra que se utilice para la conexión del equipo hacia el enrutador debe estar apta para una interfaz Gigabit Ethernet.

### **3.2.5 Montaje del equipo**

Cada equipo transmisor viene con su kit de accesorios de montaje, los que permiten realizar el montaje vertical y horizontal.

El kit de accesorios consta de:

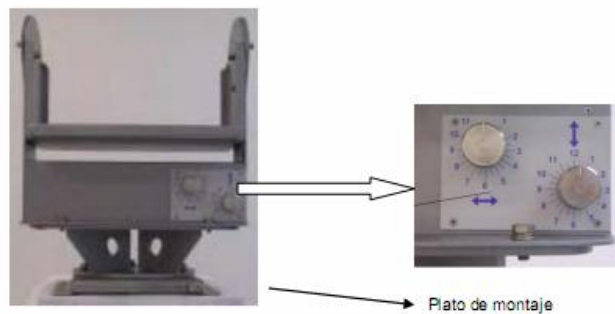
- El plato de montaje. - Es usado por el equipo como base sobre cualquier superficie firme, este se observa en la figura 3.10.



**Figura 3. 10 Plato de montaje**

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

- Dispositivo de alineamiento (AD 5000).- Se usa para alinear la cámara de transmisión (TS 5000), tanto de manera horizontal como vertical, mediante una escala gradual de alineación. Este equipo se puede observar en la figura 3.11.



**Figura 3. 11 Dispositivo de alineamiento**

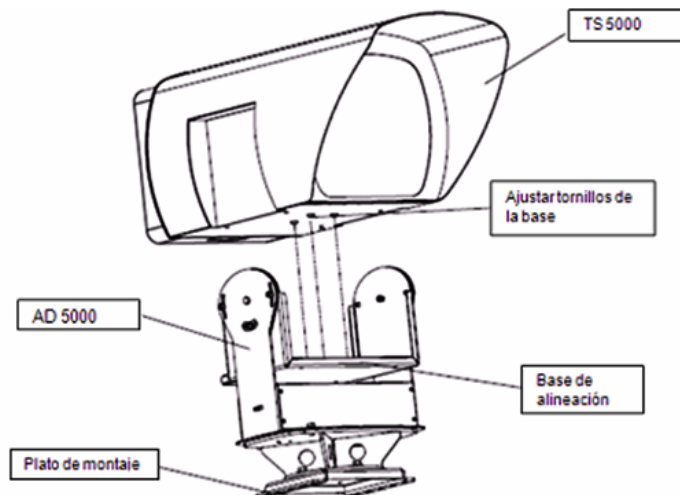
Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

- Kit de herramientas. - Es utilizado para el ajuste de tuercas y tornillos del dispositivo de alineamiento AD 5000, se recomienda utilizar solamente las herramientas de este kit, para evitar aislamientos. En la figura 3.12 se observa el kit de herramientas que se recomienda.



**Figura 3. 12 Kit de herramientas**  
(Marcillo, León, & Vaca, 2008)

Ajuste del transmisor.- Se muestran en la figura 3.13 los elementos para realizar el montaje del equipo.



**Figura 3. 13 Ajuste del transmisor FSO**  
Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

### 3.2.6 Direccionamiento del lente

Como se conoce, la tecnología FSO, requiere una conexión punto a punto entre un emisor y un receptor, lo que hace que el enlace óptico inalámbrico tenga una posición simétrica lo más precisa posible hacia el receptor remoto.

El procedimiento de alineamiento del transmisor se implementa en dos etapas:



- Alineamiento preliminar : Se refiere a los ajustes previos de todo el transmisor en cuanto a tornillos y tuercas, fijando a través del telescopio la dirección hacia el equipo receptor. Esto aplica tanto para el emisor como para el receptor.
- Alineamiento final: En esta etapa se requiere una persona en cada sitio, lo cual implica proveer un dispositivo móvil de comunicación a cada persona que les permita informar la posición del equipo.

Este proceso se realiza fijando primero el segmento horizontal, y a continuación el segmento vertical, de tal manera que los lentes ópticos queden alineados punto a punto, como se muestra en la figura 3.14.

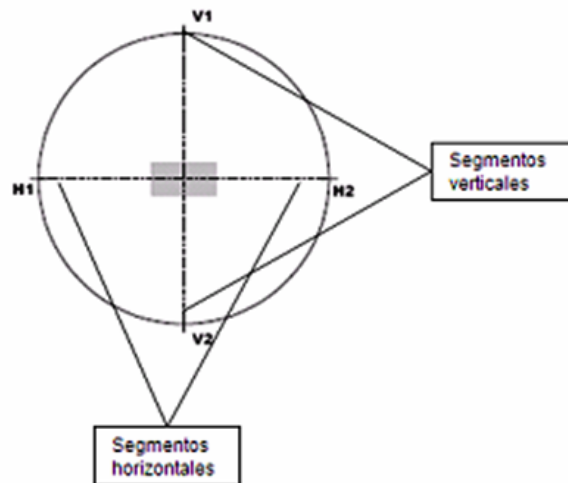


Figura 3. 14 Direccionamiento del lente

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

### 3.3 Análisis de las características de los sistemas FSO propuestos

Las características de los sistemas FSO serán evaluadas a través del margen del enlace (*link margin*), de acuerdo con la ecuación (3-1) (Marcillo, León, & Vaca, 2008), (Ledesma, 2012).

$$M_{link} = P_e + |S_r| - A_t Geo - A_t Atm - P_{Sist} \quad (3-1)$$

Dónde:

$M_{link}$ : margen del enlace

$P_e$ : potencia de emisión de la señal (dBm)

$S_r$ : sensibilidad del receptor (dBm)

$A_t Geo$ : atenuación geométrica del enlace (dB)

$A_t Atm$ : atenuación atmosférica del enlace (dB)

$P_{Sist}$ : pérdidas del equipo, conectores, fibra óptica y desalineamiento del haz (dB)

Para poder calcular el margen de enlace primeramente hay que conocer y calcular, en caso de ser necesario, los diferentes parámetros de la ecuación anterior.

### **3.3.1 Potencia de emisión de la señal y sensibilidad del receptor**

Los datos de la potencia de emisión de la señal y la sensibilidad del receptor son proporcionados por el fabricante del FSO, en este caso que se utiliza para los enlaces inalámbricos ópticos entre los edificios el equipo Tere Scope 5000/G la potencia de emisión y la sensibilidad son:

$$P_e = 140 \text{ mw}$$

$$S_r = -33 \text{ dBm}$$

Este equipo es de características multihaz, lo que permite disminuir considerablemente efectos como la dispersión atmosférica, en este caso el modelo utilizado consta de 3 haces; la potencia de emisión sería la siguiente:

$$P_e = 3 * 140 \text{ mw} = 420 \text{ mw}$$

$$P_e = 26.23 \text{ dBm}$$

### 3.3.2 Atenuación geométrica

El haz emitido por el transmisor sufrirá divergencia, de esta manera la celda receptora recibirá únicamente una fracción de la energía emitida.

La atenuación geométrica se calcula de la manera siguiente:

$$Aff_{GEO} = \frac{S_d}{S_{capture}} = \frac{\frac{\pi}{4}(d \cdot \theta)^2}{S_{capture}} \quad (3-2)$$

Dónde:

$\theta$  : ángulo de divergencia del haz (mrad)

$d$  : distancia que recorre el haz (m)

$S_{captura}$ : área de captura del receptor (metros cuadrados)

$S_d$ : área del haz a la distancia  $d$  (metros cuadrados)

Como se observa, la atenuación geométrica está en función de la divergencia del haz, la distancia y el área de captura. El valor de la divergencia del haz considerado para el diseño de los enlaces inalámbricos ópticos es 3 miliradianes. (valor estimado tomando en cuenta que es el máximo posible de acuerdo a las características de los enlaces), esto se debe a que los diseños deben ser siempre realizados tomando en consideración las peores condiciones, para que el

funcionamiento del sistema diseñado sea óptimo en condiciones normales de funcionamiento. El área de captura, dato estándar de los fabricantes de equipos FSO, es de 0,025 metros cuadrados, valor con el que se realizan los cálculos.

Basados en la fórmula (3-2) se calculan los valores de la atenuación geométrica para los enlaces inalámbricos ópticos, los resultados se muestran en la tabla 3.5:

**Tabla 3. 5 Atenuación geométrica de los enlaces.**

Enlace	Distancia (m)	Divergencia (radianes)	Área de captura (m <sup>2</sup> )	Atenuación geométrica
Edificio Central Agencia 1	380	0.003	0.025	16.11
Agencia1 Agencia 2	1230	0.003	0.025	26.31
Agencia 2 Agencia 3	885	0.003	0.025	23.45
Agencia 4 Edificio Central	1314	0.003	0.025	26.89

Elaborada por: Autor

La atenuación geométrica es un factor que limita la distancia del enlace inalámbrico óptico y puede reducir la disponibilidad del sistema, su valor será mayor mientras menor sea el área de captura y la distancia que recorra el haz sea mayor.

### **3.3.3 Atenuación atmosférica por niebla**

En la tabla 3.6 se muestran los valores de visibilidad presentes ante diversas condiciones meteorológicas de interés para los enlaces FSO:

Tabla 3. 6 Valores de visibilidad

CONDICIONES AMBIENTALES	PRECIPITACIÓN		VISIBILIDAD [m]
		mm/hr	
<i>Nebula muy Espesa</i>			0 m
			50 m
<i>Nebula Espesa</i>			500 m
			600 m
	<i>Tormenta</i>	100	770 m
			1 Km
<i>Nebula Moderada</i>			1,9 Km
	<i>Lluvia Fuerte</i>	25	2 Km
			2,8 Km
	<i>Lluvia Moderada</i>	12,5	4 Km
<i>Neblina</i>			5,9 Km
	<i>Lluvia Ligera</i>	2,5	10 Km
<i>Despejado</i>			18,1 Km
	<i>Llovizna</i>	0,25	20 Km
<i>Muy Despejado</i>			23 Km
			50 Km

Fuente: (Marcillo, León, & Vaca, 2008)

Si se considera el peor de los escenarios climáticos que pudiera presentarse, que sería la presencia de una lluvia torrencial y niebla al mismo tiempo, el valor promedio de visibilidad es de 770 metros, según la tabla 3.6.

La longitud de onda a la que opera el equipo FSO a utilizar es 860nm.

$$\lambda_{nm} = 860 \text{ nm}$$

$$V = 770 \text{ m} = 0,77 \text{ Km}$$

q, el factor que depende de la dispersión de la partícula en el medio se calcula de la siguiente manera:

$$q = V - 0,5 \text{ ya que } 0,5 \text{ km} < V < 1 \text{ km}$$

Entonces:

$$q = V - 0,5 = 0,77 - 0,5 = 0,27$$

Utilizando la ecuación (2-10), se calcula el coeficiente de atenuación para los enlaces inalámbricos ópticos en las peores condiciones.

$$\sigma = \frac{3.91}{V} \left( \frac{\lambda nm}{500nm} \right)^{-q}$$

$$\sigma = \frac{3.91}{0.77} \left( \frac{860}{500nm} \right)^{-0.27}$$

$$\sigma = \beta n = 11.04$$

Con este valor del coeficiente de atenuación se puede emplear la ley de Beer y calcular la transmitancia mediante la ecuación (2-7) y con la ecuación (2-11) obtener la atenuación atmosférica.

De esta manera se calculan los valores de la atenuación atmosférica producida por la lluvia torrencial y la niebla para los distintos enlaces, resultados que se muestran en la tabla 3.7:

**Tabla 3. 7 Atenuación atmosférica por niebla.**

Enlace	Distancia (m)	Coficiente de Atenuación	Atenuación Atmosférica (dB)
Edificio Central Agencia 1	380	11.04	8.22
Agencia 1 Agencia 2	1230	11.04	1.03
Agencia 2 Agencia 3	885	11.04	4
Agencia 4 Edificio Central	1314	11.04	7

Elaborada por: Autor

De igual manera que la atenuación geométrica, la atmosférica limita la distancia en el enlace y puede reducir la disponibilidad del sistema de acuerdo a sus valores.

### **3.4 Pérdidas del sistema**

Entre las pérdidas del sistema se deben considerar las que se producen debido a las pérdidas propias de los equipos FSO, los conectores y la fibra óptica, estos últimos utilizados para la instalación final del equipamiento.

- **Pérdidas de equipos**

Estos valores surgen de factores intrínsecos en los elementos electrónicos que componen los equipos FSO. Está el hecho de que con el tiempo todos los equipos electrónicos sufren desgaste y cambio en sus propiedades de funcionamiento; lo cual exige que se considere un valor de reserva para adoptar la situación real. El dato de pérdida de un equipo FSO se da por el fabricante.

- **Pérdidas en conectores**

Los conectores son elementos pasivos que unen la fibra óptica con los puertos respectivos en los enrutadores. Establecer un enlace FSO con los equipos ubicados en las terrazas de los edificios correspondientes requiere de un conector hacia la parte posterior del enrutador. Las pérdidas en los conectores, son en general valores bajos y son proporcionados por los fabricantes. De esta manera se tiene por enlace dos conectores, los cuales introducen un valor de pérdidas bastante bajo.

- **Pérdidas en la fibra óptica**

Las pérdidas en la fibra óptica monomodo y/o multimodo son directamente proporcionales a la distancia de la misma. Su valor oscila entre 5 y 10 dB por kilómetro (Marcillo, León, & Vaca, 2008).

Estas pérdidas son despreciables para nuestros enlaces, puesto que los tramos de fibra óptica que se necesitan para la conexión de los equipos FSO y los enrutadores son bastante cortos.

- **Pérdidas por desalineamiento**

Esta clase de pérdidas se producen por un desalineamiento o desapuntamiento entre los equipos FSO. Cuando las haces no se encuentran perfectamente alineados se genera un margen de pérdida en la recepción de la señal que se conoce como pérdida por desalineamiento.

El desalineamiento debe ser considerado en el diseño, puesto que existe la posibilidad de que ocurran errores en la instalación o por efectos externos como el viento, golpes, oscilación de la estructura de soporte, etc.

Las pérdidas del sistema son el resultado de la suma de las pérdidas de los equipos FSO, los conectores de fibra óptica, los tramos de fibra óptica y el desalineamiento en el montaje de los equipos, las cuales se observan en la tabla 3.8.

**Tabla 3. 8 Pérdidas del sistema**

Enlace	Pérdidas de equipos (dB)	Pérdidas en conectores (dB)	Pérdidas en la fibra óptica (dB)	Pérdidas por desalineamiento (dB)	Pérdidas del sistema (dB)
Edificio Central Agencia 1	1	1	0	1	3
Agencia1 Agencia 2	1	1	0	1	3
Agencia 2 Agencia 3	1	1	0	1	3
Agencia 4 Edificio Central	1	1	0	1	3

Elaborada por: Autor



- **Margen de enlace o “Link Margin”**

Este se calcula en base a la ecuación (3-1) anteriormente mencionada. La tabla 3.9 resume los parámetros calculados para los diferentes enlaces.

**Tabla 3. 9 Parámetros más importantes en los enlaces propuestos.**

Enlace	Distancia (m)	Potencia de emisión (dB)	Sensibilidad (dBm)	Atenuación geométrica (dB)	Atenuación molecular (dB)	Pérdidas del sistema (dB)	Margen del enlace (dB)
Edificio Central Agencia 1	380	26.23	-33	16.11	8.22	3	31.9
Agencia 1 Agencia 2	1230	26.23	-33	26.31	1.03	3	28.29
Agencia 2 Agencia 3	885	26.23	-33	23.45	4	3	28.78
Agencia 4 Edificio Central	1314	26.23	-33	26.89	7	3	22.34

Elaborada por: Autor

Luego de realizado el diseño de los enlaces inalámbricos ópticos se llega a las siguientes consideraciones:

- Los enlaces del sistema FSO que se diseñan en el presente capítulo, consideran la máxima divergencia del haz (3 miliradianes) y el área de captura estándar de los equipos FSO (0,025 metros cuadrados). Estos datos producen valores de atenuación geométrica entre 16,11dB y 26,89dB, correspondientes a los enlaces de menor distancia (Edificio Central-Agencia 1) y mayor distancia (Agencias 4-Edificio Central) respectivamente.
- El margen de enlace, valor que permite conocer si un enlace es factible de realizar, fluctúa entre 22,34 dB y 31,9 dB.

### **3.5 Simulación de la red inalámbrica óptica**

Para la simulación con el software OptiSystem 7.0 se decidió simular uno de los enlaces propuestos para la nueva red. Este sistema trabaja en un régimen binario de 1,25 Gbit/s.

El transmisor óptico trabaja con una frecuencia de 860nm y una potencia de emisión 140mw, esta transmisión se realiza a través del espacio libre, se establece el rango de distancia entre el emisor y el receptor, que será de 380 m y la atenuación que varía de acuerdo al tipo de clima en el cual se va a implementar el enlace, se ha establecido el valor de 60dB/km, como el peor de los casos, el cual refleja un clima lluvioso, con niebla moderada y fuertes vientos. Como se puede apreciar la atenuación que se aplica es sumamente alta, lo cual indica que puede existir una considerable pérdida de potencia, por ende pérdida de información.

El receptor está basado en un fotodetector APD, que genera una señal eléctrica.

Todos los valores de los parámetros que se especifican tanto en el transmisor como en el receptor han sido extraídos de las características del dispositivo comercial del proveedor seleccionado.

En la figura 3.15 se pueden ver elementos para visualización de señales eléctricas, ópticas, medidores de nivel de potencia y analizador de espectros.

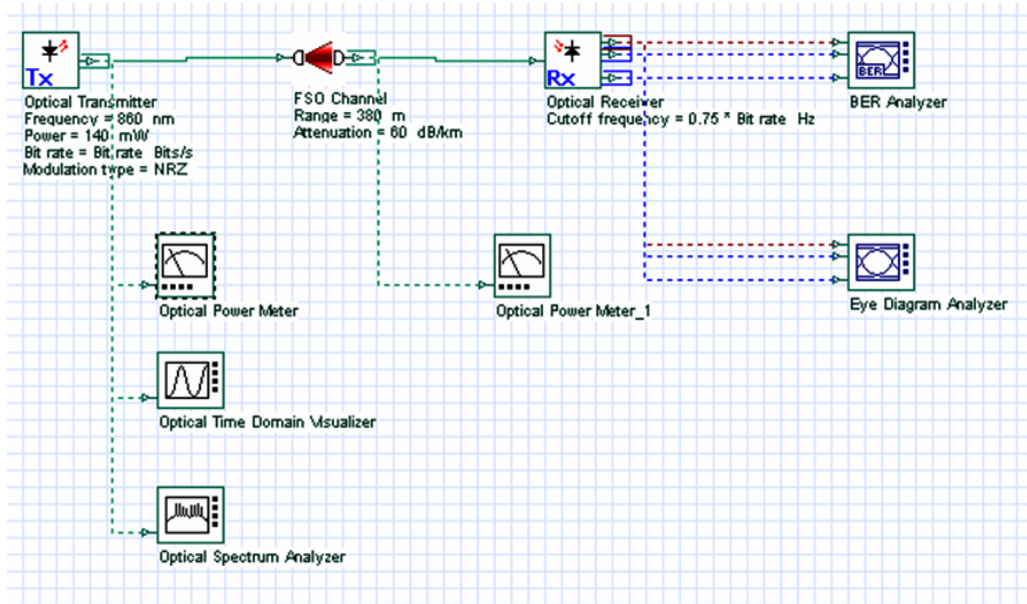


Figura 3. 15 Simulación de un enlace FSO de 380m

Elaborada por: Autor

- Parámetros globales:** Existen ciertos parámetros comunes que se asignan a todo el enlace óptico, como se puede observar en la figura 3.16, los parámetros son la tasa de transmisión y la longitud de la secuencia transmitida, los cuales se utilizarán para el cálculo de los resultados obtenidos por la simulación.

Simulation				
	Signals	Spatial effects	Noise	Signal tracing
Name	Value	Units	Mode	
Simulation window	Set bit rate		Normal	
Reference bit rate	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal	
Bit rate	1250000000	Bits/s	Normal	Es el valor de la tasa de transferencia por unidad de tiempo que se va a utilizar para todos los componentes del enlace óptico.
Time window	1.024e-007	s	Normal	
Sample rate	8000000000	Hz	Normal	
Sequence length	128	Bits	Normal	Es la longitud de la secuencia de bits que se establece para todo el enlace óptico.
Samples per bit	64		Normal	
Number of samples	8192		Normal	

Figura 3. 16 Parámetros globales.

Elaborado por: Autor

- Elementos del escenario:** Entre los elementos presentes en el escenario del software OptiSystem 7.0 están el transmisor óptico, el canal FSO y

el receptor óptico. En las figuras 3,17; 3,18 y 3,19 se relacionan los valores asignados a cada una de las magnitudes que los caracterizan, teniendo en cuenta el equipamiento a utilizar.

- **Transmisor óptico**

Name	Value
Optical Transmitter	Optical Transmitter
Ports	
Parameters	
Adiabatic chip	1 [1/(W.s)]
Alpha parameter	10
Azimuth	0 [deg]
Bit rate	Bit rate
Calculate side mode	NO
Convert noise bins	NO
Damping time leading edge	1 / (Bit rate ) * 0.5
Damping time trailing edge	1 / (Bit rate ) * 0.5
Different each iteration	NO
Duty cycle	0.5 [bit]
Ellipticity	0 [deg]
Enabled	YES
Extinction ratio	1 [dB]
Fall time	1 / (Bit rate ) * 0.05
Frequency	860 [nm]
Generate random seed	YES
Include RIN	NO
Initial phase	0 [deg]
Iterations	Iterations
Linewidth	10 [MHz]
Measured power	10 [dBm]
Modulation type	NRZ
Noise bandwidth	30 [nm]
Noise bins spacing	20 [nm]
Number of leading zeros	1
Order	log(Sequence length)/lo...
Overshoot	30 [%]
Parameterized	Parameterized
Polarization filter	None
Position	0 [bit]
Power	140 [mW]
Random seed index	0
Random seed index PRBS	0
Resonant frequency leadin...	(Bit rate ) * 5
Resonant frequency trailing...	(Bit rate ) * 5
RIN	-130 [dB/Hz]
Rise time	1 / (Bit rate ) * 0.05
Sample rate	Sample rate
Separation	75 [GHz]
Suppression ratio	30 [dB]
Transmitter type	EML
Undershoot	30 [%]

El valor referencia al parámetro global.

Trabaja a una frecuencia de 860 nm.

El tipo de modulación que utiliza es código NRZ.

La potencia que utiliza para la transmisión del enlace se expresa en mW.

El tipo de transmisor que utiliza es un láser con modulación externa

Figura 3. 17 Parámetros del transmisor.

Elaborado por: Autor

- **Canal FSO**

Name	Value
Layout 1	1
Global	
BER Analyzer	BER Analyzer
BER Analyzer_1	BER Analyzer
Data Recovery	Data Recovery
Dual Port WDM Analyzer	Dual Port WDM Analyzer
<b>FSO (Edif. Nuevo - Comedor)</b>	<b>FSO Channel</b>
Ports	
Parameters	
Additional losses	1 [dB]
Attenuation	30 [dB/km]
Beam divergence	2 [mrad]
Discrete delay	YES
Enabled	YES
Geometrical loss	YES
Propagation delay	0 [ps/km]
Range	380 [m]
Receiver aperture diameter	15 [cm]
Receiver loss	0 [dB]
Transmitter aperture diameter	5 [cm]
Transmitter loss	1 [dB]

El canal tiene una atenuación, que es la pérdida de potencia, y divergencia de emisión, es decir, el ángulo de apertura del láser emitido hacia el receptor.

El rango es la distancia que existe entre las edificaciones que se van a enlazar, también se determina cuál será el diámetro tanto del equipo emisor como del receptor.

Figura 3. 18 Parámetros del canal FSO.

Elaborado por: Autor

- Receptor óptico

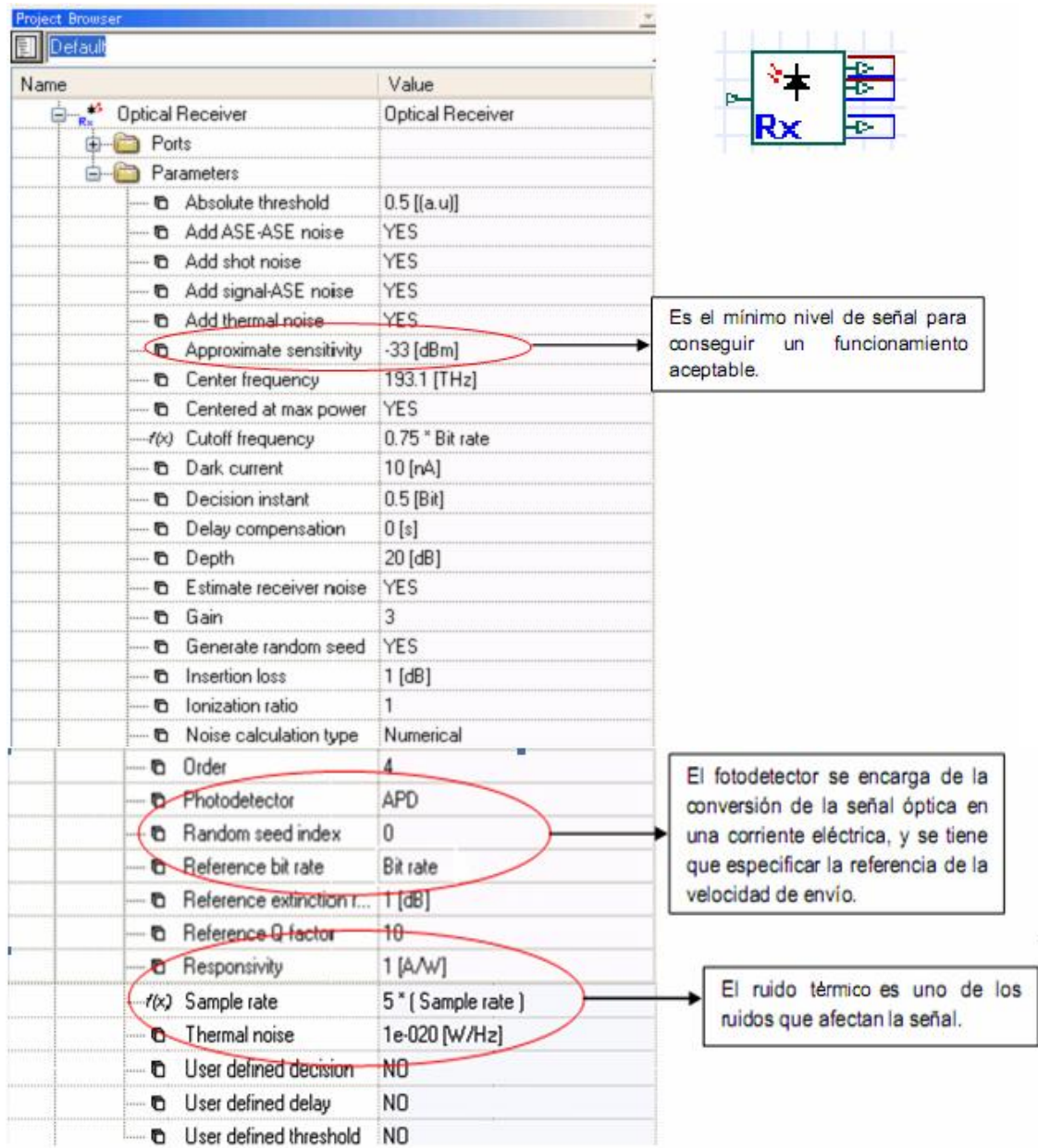


Figura 3. 19 Parámetros del receptor.

- Componentes de visualización
- Medidor óptico de potencia

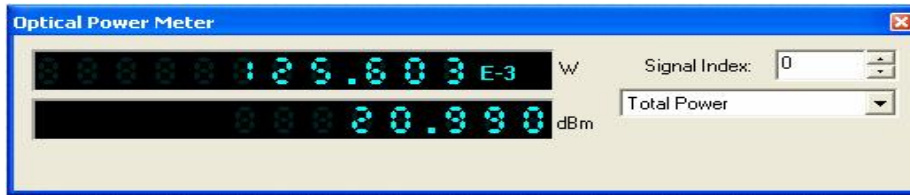


Figura 3. 20 Medidor óptico de potencia.

Elaborado por: Autor

Como se puede apreciar en la figura 3.20, la potencia final de salida que emite el transmisor óptico es de 125,603mW, esta potencia tiende a disminuir por factores como el ruido, la atenuación y la frecuencia utilizada.

- **Analizador óptico de espectros**

La figura 3.21 muestra en una escala logarítmica la señal originada por el transmisor óptico en el dominio de frecuencia.

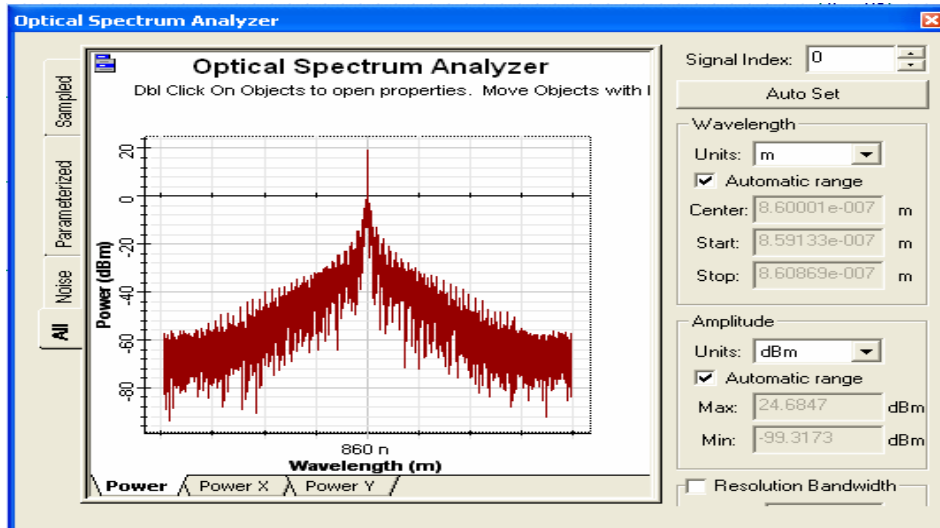


Figura 3. 21 Analizador óptico de espectros.

Elaborado por: Autor

- **Bit Error Rate (BER, proporción de errores, tasa de bits erróneos):** Es el número de bits incorrectamente recibidos, con respecto al total de bits enviados durante un intervalo específico de tiempo. Se muestran los efectos de degradación de la transmisión al incrementar el valor de la atenuación. En la figuras 3.22,

3.23, 3.24 y 3.25 se muestran los resultados obtenidos por el BER para una atenuación de 30, 40, 50 y 60 dB/km respectivamente.

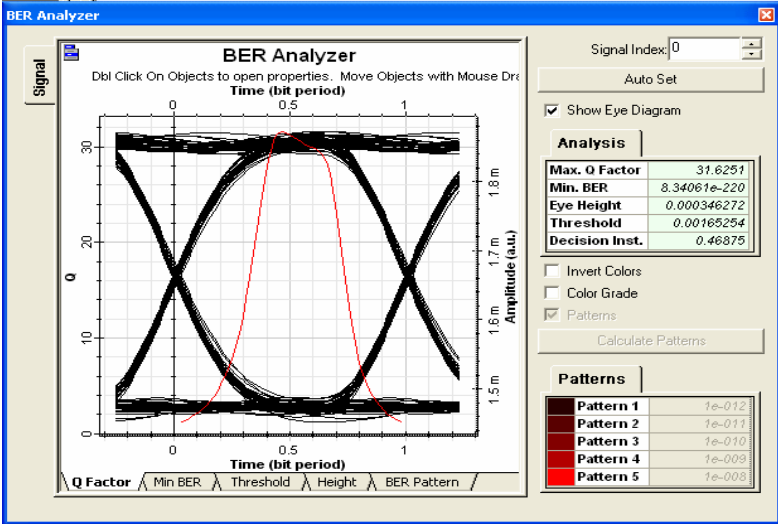


Figura 3. 22 Resultados obtenidos por el BER para una atenuación de 30 dB/km.

Elaborado por: Autor

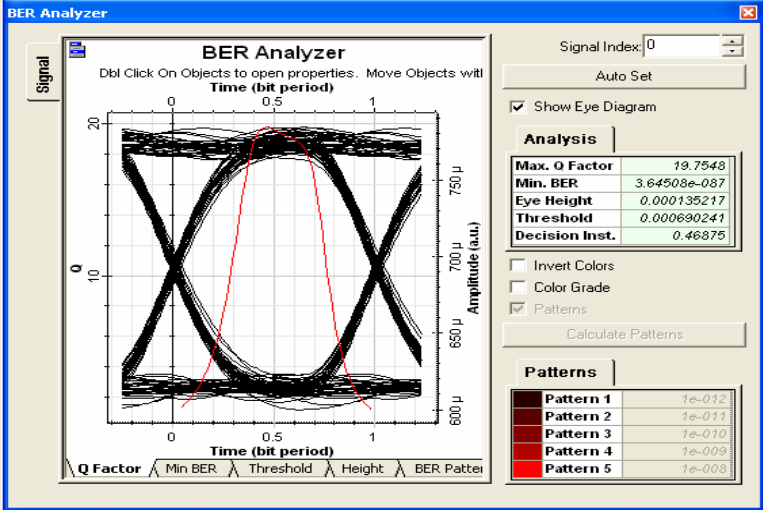


Figura 3. 23 Resultados obtenidos por el BER para una atenuación de 40 dB/km.

Elaborado por: Autor



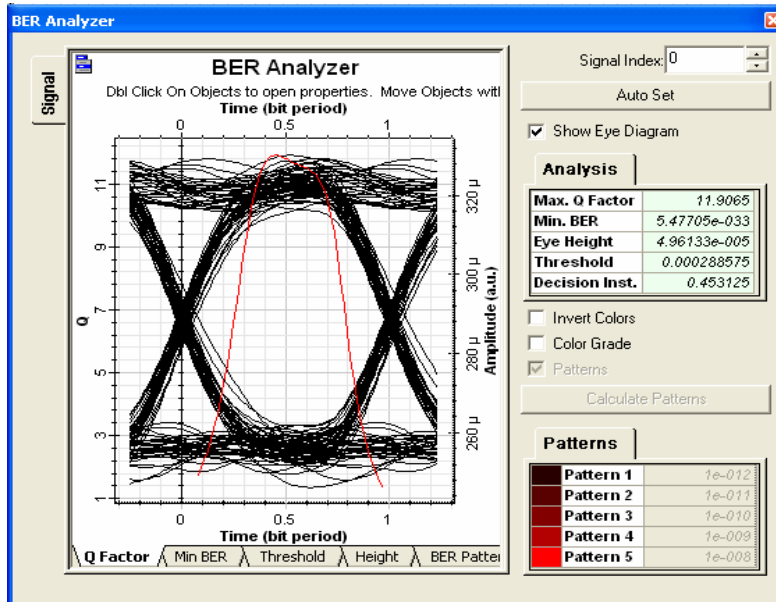


Figura 3. 24 Resultados obtenidos por el BER para una atenuación de 50 dB/km.

Elaborado por: Autor

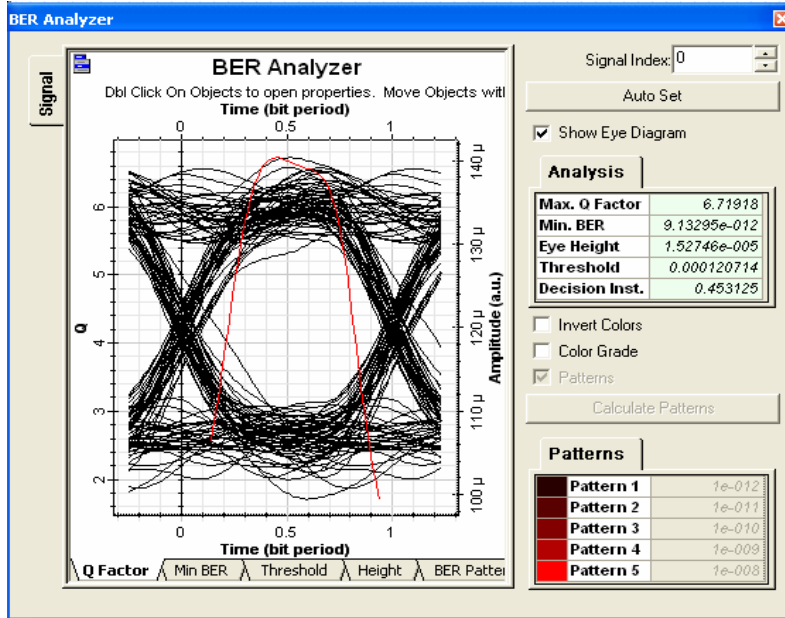


Figura 3. 25 Resultados obtenidos por el BER para una atenuación de 60 dB/km.

Elaborado por: Autor

La tasa de bits erróneos o proporción de errores (BER), se puede definir como se observa en la ecuación (3-3):

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

En las simulaciones realizadas no se obtiene la probabilidad de error típica ( $10^{-9}$ ) de los sistemas FSO. Este resultado se justifica atendiendo a que en el trabajo se calcula la proporción de errores según la ecuación (3-3). Hay que tener en cuenta que se puede aproximar la proporción de errores ( $P_e$ ) a la probabilidad de error (BER) cuando la cantidad de bits transmitidos tiende a infinito. La obtención de la probabilidad de error típica de los sistemas bajo estudio requiere la transmisión de millones de dígitos binarios. La transmisión de esta cantidad de bits en las simulaciones realizadas se haría excesivamente compleja desde el punto de vista computacional.

Esta problemática se puede solucionar empleando el método de Monte Carlo, el cual emplea la inferencia estadística para obtener conclusiones del comportamiento de un sistema. Este método se utiliza generalmente cuando las inferencias que se obtienen con los métodos analíticos no brindan el resultado esperado y se puede emplear para la evaluación del desempeño de un sistema determinado. La idea fundamental de la simulación de Monte Carlo para la inferencia estadística es que los conocimientos sobre las características de una estadística, se adquieren realizando varias observaciones, en las que se toman muestras del comportamiento del sistema, en otras palabras, se estima la distribución estadística por muestreo aleatorio y se registran estos valores para realizar la estimación. Mientras mayor sea el número de observaciones, más exacta será la distribución estadística que se obtiene con éste método.

- **Monitoreo de la señal óptica**

Indica el transcurso de la señal en el tiempo, en función de la potencia del transmisor, que es de 140mW , como se observa en la figura 3.26.

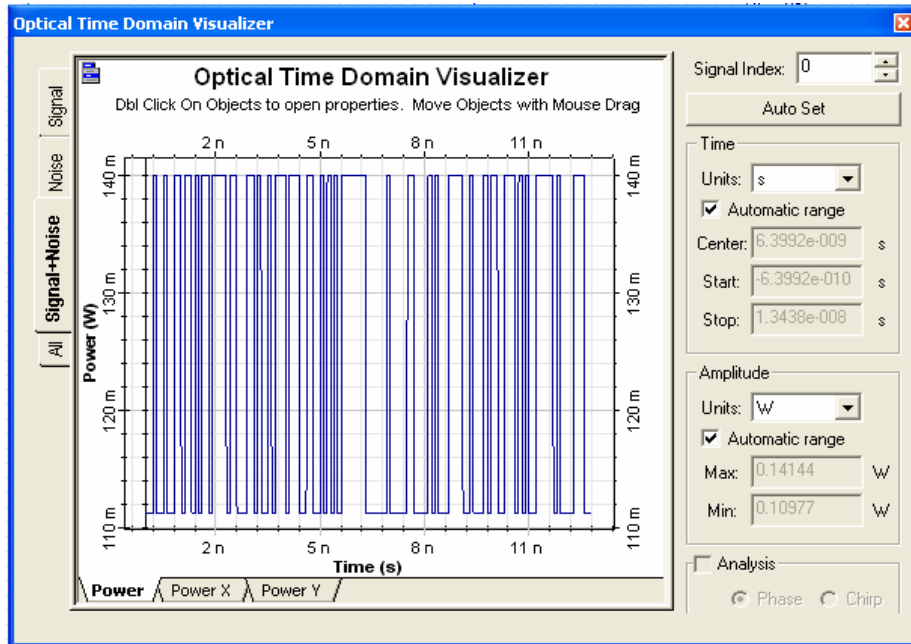


Figura 3. 26 Señal óptica.

Elaborado por: Autor

### 3.6 Análisis de los resultados

- Relación señal a ruido

Los resultados obtenidos en el simulador, específicamente del visualizador “*optical power meter*”, permiten constatar que la potencia total de la señal recibida es de 125,603mW, la cual ha sido calculada por la ecuación (3-4) (Marcillo, León, & Vaca, 2008):

$$P_{total} = P_{salida} - P_{perdida} \quad (3-4)$$

Al sustituir los valores se tiene que:

$$P_{total} = 140\text{mW} - 14,97\text{mW}$$

$$P_{total} = 125,03\text{mW}$$

También es necesario calcular el ruido producido en el transcurso de toda la transmisión, desde que la señal sale del transmisor hasta que llega al receptor como se muestra en la ecuación (3-5).

$$N_{total} = (N_{disparo} N_{térmico} N_{RIN}) \quad (3-5)$$

Con los valores que toman estos ruidos, y efectuando la sumatoria total del ruido producido en la transmisión, su valor aproximado es:

$$N_{total} = 2\text{dBm}$$

Equivalente a:

$$N_{total} = 1.58489\text{mW}$$

Ahora, para efectuar el cálculo de la relación señal a ruido, se sustituyen los valores en la fórmula (3-6) y se expresa habitualmente en dB .

$$\frac{S}{N} [dB] = 10 \log \left( \frac{S[w]}{N[w]} \right) \quad (3-6)$$

Al sustituir los valores se tiene que:

$$\frac{S}{N} [dB] = 10 \log \left( \frac{125.03}{1.5849} \right)$$

$$\frac{S}{N} [dB] = 19\text{dB}$$

Según los gráficos obtenidos y la determinación de la relación señal a ruido (S/N), se concluye que mientras exista un aumento en el valor de la relación, se reduce el BER, es decir, a mayor valor en decibeles en la relación S/N, mejor calidad de la señal y menor ruido.

Se obtiene como resultado de la determinación de la relación S/N un valor de 19dB. Si se analiza este resultado se puede expresar que es una cantidad bastante aceptable, la cual garantiza una buena calidad de la señal, si se tiene en cuenta que se tiene una atenuación de 60 dB/km. Por lo que se puede concluir, que aunque teniendo una atenuación alta y un nivel de ruido considerable, se tiene una excelente señal.

- **Disponibilidad**

Si se analiza la disponibilidad que tendría la nueva red inalámbrica óptica, se deben tomar en cuenta varios factores como: la fiabilidad de los equipos tanto transmisores como receptores, considerando también las interferencias, el ruido y la atenuación que afecta el servicio.

Para el cálculo de la disponibilidad se emplea la siguiente fórmula:

$$Disponibilidad \% = 100 \frac{(\text{Tiempo de uso efectivo})}{(\text{Tiempo de uso total})}$$

Como toda red bien estructurada, se debe tener la expectativa de que el funcionamiento tiene que ser de un 100% de disponibilidad; sin embargo por los factores mencionados anteriormente, este porcentaje se reduce.

Aunque la tecnología FSO es propensa a factores que pueden afectar su disponibilidad, la calidad en el servicio de la red es elevada, es decir la disponibilidad es excelente.

- **Ganancia**

La ganancia puede ser calculada de la siguiente manera:

$$G = 10 \log \frac{P_{salida}}{P_{total}}$$

$$G = 10 \log \frac{140mW}{125.03mW}$$

$$G = 0.471dB$$

El resultado obtenido con este cálculo expresa un valor aceptable de ganancia, se confirma que la calidad de la señal emitida contiene poco ruido que afecte a la misma.

Cabe recalcar que aplicando una atenuación bastante considerable, acompañada de un nivel de ruido alto, no se registra inconvenientes en la transmisión de la señal, es decir, la señal transmitida tiene buena calidad.

## CONCLUSIONES

La capacidad de transmisión de un sistema FSO actualmente es de hasta 2,5Gbit/s, lo que lo convierte en un sistema de altas tasas de velocidades, de manera que puede desempeñarse como soporte secundario de una red o como conexión principal de una red (*backbone*). Con los conocimientos acerca de esta tecnología, se mostró la implementación de una red inalámbrica óptica utilizando FSO, que permitiría satisfacer las necesidades de conexión entre los edificios, cumpliendo eficientemente las mismas, tanto por las distancias a cubrir como por la velocidad de transferencia de bits requerida. Se calcularon parámetros que permitieron evaluar su desempeño, como fueron la potencia emitida por el transmisor óptico y el nivel de señal recibida en el receptor, el margen de enlace y la relación señal a ruido, por mencionar algunas de las magnitudes más importantes a tener en cuenta para garantizar la disponibilidad del sistema.

Cabe recalcar que aplicando una atenuación bastante considerable, de 60 dB/Km, acompañada de un nivel de ruido alto, no se registran inconvenientes en la transmisión de la señal. En las simulaciones realizadas con el software profesional OptiSystem 7.0, capaz de simular este tipo de redes ópticas, y con las características reales del equipamiento disponible, se muestran los efectos de la degradación de la transmisión al incrementar el valor de la atenuación, pero el BER se acerca más a su valor típico a medida que se incrementa la atenuación en el canal.

Bajo condiciones atmosféricas críticas en un clima tropical, se lograron buenos resultados en la calidad de la señal recibida, que aunque no cumple con los valores característicos para la tasa de bits erróneos (BER), no afecta el correcto funcionamiento de los enlaces.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda:

Emplear la tecnología óptica en el espacio libre en lugares donde exista línea de visión directa.

Poner a disposición el presente trabajo para que sirva de material de estudio a los interesados en el tema.

Realizar más investigaciones acerca de esta tecnología.

Emplear OptiSystem 7.0 para realizar simulaciones de sistemas de fibra óptica o de FSO.



## BIBLIOGRAFIA

Abaza, R., Azzam, M., & Aly, N. (2012). *Free-Space Optical Communication Systems in Turbulent Channels*. LAP Lambert Academic Publishing.

Al-Nuaim, T., Jalal, T., Al-Khamesah, A., & Ismail, A. (13 de Octubre de 2010). *Wavelength Division Multiplexing (WDM); Optical amplifiers*. Obtenido de slideshare:

[http://www.slideshare.net/Eng\\_Ahmad/wdm-amp-optical-amplifiers?related=1](http://www.slideshare.net/Eng_Ahmad/wdm-amp-optical-amplifiers?related=1)

Arceo, J. (2008). *Diseño de un sistema de comunicación en el infrarrojo para escenarios cerrados*. Tijuana: Instituto Politécnico Nacional .

Bouchet, O. (2006). *Free-space Optics: Propagation and Communication*. ISTE.

Ghassemlooy, Z., & Popoola, W. (2010). Terrestrial free-space optical communications. *Mobile and Wireless Communications Network Layer and Circuit Level Design*, 362-363.

Grabner, M., & Kvicera, V. (2011). *The wavelength dependent model of extinction in fog and haze for free space optical communication* . Obtenido de Optical Society of America:

[http://www.opticsinfobase.org/view\\_article.cfm?gotourl=http%3A%2F%2Fwww%2Eopticsinfobase%2Eorg%2FdirectPDFAccess%2FF8D66F2B-0EDA-E4D8-74F9F09C095B1B7B\\_209954%2Foe-19-4-3379%2Epdf%3Fda%3D1%26id%3D209954%26seq%3D0%26mobile%3Dno&org=](http://www.opticsinfobase.org/view_article.cfm?gotourl=http%3A%2F%2Fwww%2Eopticsinfobase%2Eorg%2FdirectPDFAccess%2FF8D66F2B-0EDA-E4D8-74F9F09C095B1B7B_209954%2Foe-19-4-3379%2Epdf%3Fda%3D1%26id%3D209954%26seq%3D0%26mobile%3Dno&org=)

Hanis, N. (2011). *Free Space Optics (Fso)*. LAMBERT.

Herrera, E. (2003). *Tecnologías y redes de transmisión de datos*. México: LIMUSA.

Ibarra, R., & Serrano, M. (1999). *Principios de teoría de las comunicaciones*. México D.F.: LIMUSA.

Kartalopoulos, S. (2011). *Free Space Optical Networks for Ultra-Broad Band Services*. Wiley.

Kim, I., McArthur, B., & Korevaar, E. (2001). *Comparision of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications*. Obtenido de [www.systemsupportolutions.com/WhitePapers/Comparison\\_Of\\_Beam\\_in\\_Fog.pdf](http://www.systemsupportolutions.com/WhitePapers/Comparison_Of_Beam_in_Fog.pdf)

Kumar, N. (24 de Julio de 2013). *Free space optical communication*. Obtenido de slideshare: <http://www.slideshare.net/NaveenKumar11/free-space-optical-communication-24572340>

Lándsberg, G. (1983 ). *Óptica. Tomo 1* . Moscú: Editorial MIR .

Ledesma, E. (2012). *Transmisión y Recepción de dos canales de voz por fibra óptica con premodulación digital*. Obtenido de <http://catarina.udlap.mx/>: Transmisión y recepción de dos canales de voz con fibra óptica con premodulación digital. Capítulo 2.pdf

Liang, Q. (2012). *Free space optical coupling of fiber optic sensors integrated with composite structures*. Proquest.

LightPointe. (2012). *LightPointe lanza su producto de óptica de espacio libre para operadores de telefonía móvil inalámbrica*. Recuperado el Abril de 2012, de PR Newswire: <http://www.prnewswire.co.uk/news-releases/lightpointe-lanza-su-producto-de-optica-de-espacio-libre-para-operadores-d>

Majumdar, A. (2014). *Advanced Free Space Optics (FSO)*. Berlin: Springer.

Marcillo, D., 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 actual de la ESPE CAMPUS SANGOLQUÍ*. Sangolquí: ESPE / SANGOLQUÍ.

Merino, B. (2011). *Análisis de tráfico con Wireshark*. España: Instituto Nacional de tecnologías de la Comunicación.

Mohamed, N. (2009). *Wireless Local Area Network System Employing free space optic communication*. Universiti Teknologi Malaysia.

Nogueira, D. (2007). *Estudo sobre a Viabilidade de Utilização de Sistemas com. Multiplexação por Subportadora*. Rio de Janeiro.

Nogueira, T. (2008). *ESTUDO DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO UTILIZANDO ÓPTICA NO ESPAÇO LIVRE*. Rio de Janeiro: INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA.

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*. Huajuapán de León, Oaxaca: Universidad Tecnológica de la Mixteca.

Paschotta, R. (s.f.). *Fabry-pérot Interferometers*. Obtenido de RP Photonics Encyclopedia: [http://www.rp-photonics.com/fabry\\_perot\\_interferometers.html](http://www.rp-photonics.com/fabry_perot_interferometers.html)

PAV. (2012). *What is Free Space Optics*. Obtenido de PAV free space optical solution: [http://www.pavdata.com/technology\\_what\\_is.php](http://www.pavdata.com/technology_what_is.php)

Popoola, W., Ghassemlooy, Z., Awan, M., & Leitgeb, E. (2009). Atmospheric channel effects on terrestrial free-space optical communication links. *Proceedings of 3rd International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence*, 17-23.

Ricklin, J., & Majumdar, A. (2007). *Free-Space Laser Communications*. Berlin: Springer.

Sadaiti, W. (2010). *Estudo e modelagem de canal óptico atmosférico utilizando o Lightsim como plataforma de simulação*. NDLTD Union Catalog

Tomasi, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. México: Pearson Education.

Willebrand, H., & Ghuman, B. (2001). *Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks*. Sams.

Wolf, K. (2004). *Geometric Optics on Phase Space*. Berlin: Springer.

## **GLOSARIO**

APD: Fotodiodo de avalancha.

ATM: Modo de transferencia asincrónico.

CDMA: Acceso múltiple por división de código.

FSO: Óptica en el espacio libre.

GPRS: Servicio de paquetes de radio general.

GSM: Sistema global para las comunicaciones móviles.

GSP: Global system position.

LAN: Red de área local.

LED: Diodo emisor de luz.

LMDS: Servicio de distribución local multipunto

MAN: Red de área metropolitana.

MMDS: Servicio de distribución multicanal multipunto

NRZ: No retorno a cero.

PDA: Asistente digital personal.

PIN: Positivo - intrínseco –negativo.

RZ: Retorno a cero.

SDH: Jerarquía digital sincrónica.

STM: Módulo de transferencia sincrónica.

UMTS: Sistema de telefonía móvil universal.

VCSEL: Láseres de cavidad vertical

WAN: Red de área amplia.

WBAN: Red inalámbrica de área corporal.

WiFi: Fidelidad inalámbrica.

WiMAX: Acceso de microondas a alcance mundial.

WLAN: Red inalámbrica de área local.

WMAN: Red inalámbrica de área metropolitana.

WPAN: Red inalámbrica de área personal

WWAN: Red inalámbrica de área amplia.

xDSL: Lazo de abonado digital.