



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Mecánica Eléctrica

**ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE
UN ENLACE ÓPTICO INALÁMBRICO PUNTO A PUNTO
FREE SPACE OPTICS**

Fernando Javier Méndez López
Asesorado por el Ing. Noel Narciso de León

Guatemala, julio de 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE
UN ENLACE OPTICO INALAMBRICO PUNTO A PUNTO
FREE SPACE OPTICS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

FERNANDO JAVIER MÉNDEZ LÓPEZ

ASESORADO POR EL ING. NOEL NARCISO DE LEÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, JULIO DE 2006

UNIVERSIDAD SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. Julio César Solares Peñate
EXAMINADOR	Ing. Kennet Ramiro Barnett Castellanos
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos Baiza de Illescas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ENLACE OPTICO INALAMBRICO PUNTO A PUNTO FREE SPACE OPTICS,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Mecánica Eléctrica, con fecha de 8 de Mayo del 2003.

Fernando Javier Méndez López

DEDICATORIA A:

Dios

Por todo

Mis padres

Francisco Alberto Méndez Aguilar

Ana Lucrecia López de Méndez

Mis hermanos

Mynor Francisco Méndez López

Mario Alberto Méndez López

Ana Lucrecia Méndez López

Mis amigos

Marlon Ramírez, Heber Corzo, Marco Mejía y

Noel Narciso de León

AGRADECIMIENTOS A:

DIOS todo poderoso	Por haberme dado la oportunidad y la sabiduría para lograr esta meta
Mis padres	Por estar siempre apoyándome y guiándome para ser cada día una mejor persona
Mis hermanos	Por brindarme su confianza y alegría cada día.
Mis amigos	Marlon Ramírez, Marco Mejía , Heber Corzo por brindarme su apoyo y confianza.
Mi asesor	Ing. Noel Narciso de León por su tiempo y consejos brindados a lo largo de este trabajo de graduación.
A todos los catedráticos que me brindaron sus conocimientos a lo largo de toda mi carrera universitaria.	

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIX
OBJETIVOS	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA FSO	1
1.1 Conceptos Básicos.....	1
1.2 Transmisor.....	3
1.2.1 Diodos emisores de luz LED.....	4
1.2.2 Características y operación del LED.....	4
1.2.3 Diodo Láser.....	7
1.2.4 Diseño de Láser.....	9
1.2.5 Láser WDM.....	10
1.2.6 Amplificadores dopados.....	12
1.2.7 Criterio de la selección de un diodo láser para FSO.....	16
1.3 Receptor.....	17
1.3.1 Diodos tipo PIN.....	17
1.3.2 Fotodiodos de avalancha.....	19
1.3.3 Criterio de selección para un receptor.....	21
1.3.4 Subsistema óptico.....	22
1.3.5 Lentes ópticos.....	22
1.3.5.1 Diseño básico de lentes ópticos.....	24
1.3.6 Sistema de rastreo y auto alineación TRACKING.....	25

1.3.7	Sistema de transmisión de haz amplio.....	26
1.3.8	Autotracking.....	27
1.3.9	Gimbal.....	28
1.3.10	Sistema de autoalineamiento basado en servomotores.....	29
1.3.11	Sistema de alineamiento por espejo.....	29
1.3.12	Sistemas micro-electromecánicos.....	30
1.3.13	Detectores cuádruples.....	30
1.3.14	Arreglos CCD.....	31
2.	FACTORES QUE PUEDEN AFECTAR A UN ENLACE FSO.....	33
2.1	Transmisión a través de la Atmósfera.....	33
2.2	Dispersión.....	33
2.2.1	Dispersión tipo Mie.....	35
2.3	Absorción.....	36
2.3.1	Ventanas Atmosféricas.....	37
2.3.2	Absorciones Atmosféricas.....	38
2.4	Turbulencia.....	41
2.4.1	Variaciones del Haz.....	42
2.4.2	Centelleo.....	43
2.4.3	Esparcimiento del Haz.....	44
2.5	El Impacto del Clima.....	45
2.5.1	Efecto de la Lluvia.....	45
2.5.2	Efecto de la Nieve.....	45
2.5.3	Efecto De La Niebla.....	46
2.6	Línea Vista.....	48
2.6.1	Determinación de Línea Vista (LOS).....	49
2.7	Otros factores que afectan a FSO.....	49
2.7.1	Factor de la Visibilidad.....	50
2.7.2	Factor de la Distancia.....	51

2.7.3	Factor del Ancho de Banda.....	51
2.8	Selección de la Longitud de Onda Para la Transmisión.....	52
3.	INTEGRACIÓN DE FSO EN UNA RED.....	53
3.1	La Revolución de las Redes Ópticas.....	53
3.2	Beneficios de las Redes Ópticas de la Siguiete Generación.....	54
3.3	La Tecnología SONET / SDH Redes de Primera Generación.....	55
3.3.1	Limitaciones de las Redes de Primera Generación.....	56
3.4	Evolución De La Segunda Generación.....	58
3.4.1	Necesidades de Ancho de Banda.....	59
3.4.2	Simplificando las Redes Switchadas.....	60
3.4.3	Prever Transparencia.....	61
3.4.4	Escalabilidad.....	62
3.4.5	Mejorando la Confiabilidad.....	62
3.5	Clasificación de las Redes Ópticas Globales.....	63
3.6	FSO en la Última Milla.....	64
3.7	Acceso Óptico a Edificios.....	65
3.8	Servicios en el Ancho de Banda Óptico.....	66
3.9	FSO en Redes Metropolitanas.....	67
4.	IMPLEMENTACIÓN DE UN ENLACE FSO.....	69
4.1	Estudio de Campo.....	70
4.1.1	Configuración General de los Sitios.....	71
4.1.2	Información General.....	71
4.1.3	Línea de Vista.....	73
4.1.4	Distancia del Enlace.....	74
4.1.5	Consideraciones de Montaje.....	75
4.1.6	Consideraciones de Energía.....	76
4.1.7	Consideraciones de Cableado.....	77
4.1.8	Configuración del Enlace para la Instalación.....	78

4.2	Instalación de la Infraestructura.....	78
4.3	Montaje del Equipo.....	79
4.4	Instalación del Cableado y la Energía.....	80
4.5	Seguridad.....	80
4.6	Alineamiento.....	81
4.7	Conexión a la Interfase de Red.....	82
4.8	Verificación del Enlace.....	83
4.9	Mantenimiento y Soporte del Sistema.....	83
5.	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	87
5.1	El Mercado de las Telecomunicaciones.....	87
5.1.1	Las Redes Ópticas en el Mercado.....	87
5.1.2	El Mercado del Ancho de Banda.....	89
5.2	Los Retos y Beneficios de FSO.....	90
5.3	Segmentos del Mercado.....	91
5.3.1	Por Tipo de Región.....	91
5.4	Factores del Mercado Para FSO.....	93
5.4.1	Factores del Mercado.....	93
5.4.2	Factores Económicos.....	95
5.4.3	Factores de Servicios.....	96
5.4.4	Factores De Negocios.....	96
5.4.5	Factores Ambientales.....	97
5.5	Estimacion de costos.....	97
5.5.1	Casos de Acceso Ethernet.....	99
	CONCLUSIONES.....	101
	RECOMENDACIONES.....	103
	BIBLIOGRAFÍA.....	105
	ANEXO I.....	107

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de un sistema básico de transmisión FSO.....	2
2.	Bandas de energía para el modelo de un LED.....	5
3.	Estructura de los diodos emisores de borde y de superficie.....	8
4.	Regenerador complejo versus regenerador dopado.....	13
5.	Diagrama niveles de energía y bombeo de los iones del erbio.....	14
6.	Esquema de la estructura de un diodo tipo PIN.....	18
7.	Esquema de la estructura de un diodo APD.....	19
8.	Comportamiento de un rayo de luz	23
9.	Lentes convergentes y divergentes.....	25
10.	Dispersión de Rayleigh versus Longitud de onda.....	35
11.	Transmisión atmosférica medida sobre el mar a una altura de 1820 m en un camino horizontal.....	38
12.	Transmisión como función de la longitud de onda sobre condiciones en un área urbana calculada por el programa MODTRAN.....	39
13.	Transmisión en un cielo despejado como función de la longitud de onda para el agua y el dióxido de carbón calculada por el programa MODTRAN.....	40
14.	Transmisión como función de la longitud de onda para el aerosol urbano.....	41
15.	Anillos SONET con multiplexores ADM.....	57
16.	Diferentes capas de un sistema complejo SONET.....	58
17.	Instalación en una terraza.....	72

18.	Instalación detrás de una ventana.....	73
19.	Imagen de Línea de vista hacia el punto remoto.....	74
20.	Advertencias típicas que acompañan a los equipos FSO.....	79
21.	Diagrama de flujos para la resolución de un problema de un enlace con un sistema FSO.....	85
22.	Crecimiento del mercado par FSO por regiones globales.....	92
23.	Factores que ayudan al crecimiento de FSO en el mercado.....	93
24.	Radiación absorbida por la retina.....	108
25.	Absorción del de la luz en el ojo Humano.....	109

TABLAS

I	Relación entre materiales y longitud de onda.....	9
II	Características de los Gimbal.....	28
III	Códigos internacionales de la visibilidad de las condiciones del clima y la precipitación.....	47
IV	Comparación de tasa de datos entre PDH y SONET.....	56
V	Capacidades relativas para la tecnología Eléctrica y Óptica.....	60
VI	Listado de precios, Velocidad Vrs Costo.....	98
VII	Costos de instalacion y Equipos.....	99
VIII	Estándares para la seguridad del ojo humano en sistemas FSO.....	110

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
AC	Corriente Alterna
a_t	Radio Efectivo
C	Velocidad de la luz en el vacío
C_n^2	Índice de refracción del coeficiente de la estructura
DC	Corriente Directa
dB	decibeles
dBm	Decibeles por miliwatts
dB / Km	Decibeles por kilómetro
e	Carga del electrón
eV	electro - voltios
f	Fuerza de oscilación
GHz	Gigahertz (10^9)
Gbps	Giga bits por segundo
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
Hz	Hertz
IR	Infrarrojo
k	Índice imaginario de refracción
L	Distanci
mw	miliwatts
mm	milímetros

Mbps	Mega bits por segundo
ms	Milisegundos (10^{-3})
MHz	Megahertz
m	Masa de la entidad oscilante
nm	Nanómetros (10^{-9})
N	Índice de refracción del medio
ns	Nanosegundos
N_a	Concentración de absorción de las partículas
r	Radio de la partícula
THz	Terahertz (10^{12})
UPS	Unidad de reserva de energía
V	Velocidad actual de la luz en medio no
vacío μm	micrómetro (10^{-6})
λ	Longitud de Onda
ρ	Tiempo de respuesta de un diodo APD
+/-	Más o menos
%	Por ciento
λ_0	Longitud de onda de frecuencia natural
ϵ_0	Constante dieléctrica
γ	Coefficiente de atenuación
α	Coefficiente de absorción
α_a	Sección de absorción
σ_r	Variación del radio
σ_i	Varianza

GLOSARIO

Azimut	el ángulo esférico formado por dos círculos que se cortan en la vertical del observador pasando uno por el astro observado y el otro por los polos. El azimut se expresa por los grados y los puntos cardinales correspondientes al ángulo menor y más cercano al astro observado.
ADM	Add/Drop Multiplexer, es un dispositivo que agrega canales de menor velocidad o los remueve de la transmisión para entregarlos en canales separados
ATM	El Modo de Transferencia Asíncrona Asynchronous Transfer Mode (ATM) es una tecnología de telecomunicación desarrollada para hacer frente a la gran demanda de capacidad de transmisión para servicios y aplicaciones
BER	Tasa de error de los bits por sus siglas en inglés Bit Error Rate
BERT	Tasa de errores para verificación de un enlace
BNC	Nombre que reciben los conectores usados en los cables coaxiales.

Centelleo	destellos producidos por la radiación en una sustancia luminiscente.
Conduit	Tubería de metal utilizada en las instalaciones eléctricas
Carrier	Es un operador de telefonía que brinda una conexión a Internet de alto nivel.
Dopado	Material semiconductor de silicio o Germanio con una cantidad mayor de electrones o huecos que permite la conducción
Dipolo	Centro donde se ubican la carga negativa y positiva, con este concepto en telecomunicaciones tenemos que es una antena simétrica integrada por dos elementos, en ondas cortas, generalmente, son dos segmentos de cable de igual tamaño, aislados uno del otro y en sus puntas exteriores. Esta antena es de alta direccionalidad y buen rendimiento para la frecuencia o banda a la que en particular fue diseñada
Difracción	En física, la difracción es un fenómeno característico de las ondas que consiste en la dispersión y curvado aparente de las ondas cuando encuentran un obstáculo. La difracción ocurre en todo tipo de ondas, desde ondas sonoras, ondas

en la superficie de un fluido y ondas electromagnéticas como la luz y las ondas de radio

DWDM Técnica utilizada en telecomunicaciones para multiplexar diferentes longitudes de onda sobre un mismo medio de transmisión

Fibra óptica La fibra óptica es una guía de ondas en forma de filamento, generalmente de vidrio, en realidad, de polisilicio, aunque también puede ser de materiales plásticos, capaz de guiar una potencia óptica, lumínica, generalmente, introducida por un laser, o por un LED

Frame Relay Tecnología de transmisión de datos que consiste en la conmutación de unidades de datos de tamaño variable denominadas tramas.

Gimbal Giroscopio

Hertz Hertz puede referirse a: Hertz, unidad de frecuencia Heinrich Rudolf Hertz, físico alemán, o bien, un ciclo por segundo

Haz Es el rayo de luz, generalmente invisible, infrarrojo, al cual proyecta el Láser.

Hubs Dispositivo que integra distintas clases de cables y arquitecturas o tipos de redes de área local.

Internet	Internet es una red de redes a escala mundial de millones de computadoras interconectadas con el conjunto de protocolos TCP/IP. También, se usa este nombre como sustantivo común y por tanto en minúsculas para designar a cualquier red de redes que use las mismas tecnologías que la Internet, independientemente de su extensión o de que sea pública o privada.
IP	Se han desarrollado diferentes familias de protocolos para comunicación por red de datos. El más, ampliamente, utilizado es el Internet Protocol Suite, comúnmente, conocido como TCP / IP. Es un protocolo DARPA que proporciona transmisión fiable de paquetes de datos. El nombre TCP / IP proviene de dos protocolos importantes de la familia, el Transmission Control Protocol (TCP) y el Internet Protocol (IP).
Jitter	Variación en el tiempo de una señal
LOS	Línea de Vista entre dos puntos, es decir, que no existe obstrucción visual entre estos 2 puntos.
LED	Un diodo LED, acrónimo inglés de Light Emitting Diode, diodo emisor de luz, es un dispositivo semiconductor que emite luz monocromática cuando se polariza en directa y es

atravesado por la corriente eléctrica. El color depende del material semiconductor empleado en la construcción del diodo pudiendo variar desde el ultravioleta, pasando por el espectro de luz visible, hasta el infrarrojo, recibiendo éstos últimos la denominación de diodos IRED, Infra-Red Emitting Diode.

LAN	LAN es un acrónimo inglés de Local Area Network, Red de Área Local, y se refiere a las redes locales de ordenadores.
Loops	inglés de bucle.
Modtran	Es un programa de computadora que sirve para calcular la transmisión en un ciclo despejado como función de la longitud de onda para el agua y el dióxido de carbono.
MAN	Acrónimo de Metropolitan Area Network que en español significa Red de Área Metropolitana. Es una red de distribución de datos para un área geográfica en el entorno de una ciudad
Multiplexor	Dispositivo utilizado en líneas de comunicación, que actúa como un embudo transmitiendo señales de datos separadas a través de un sólo canal, simultáneamente.
MTBF	Del inglés mean time between failures - tiempo medio entre fallos. En ingeniería, electrónica y telecomunicaciones, es el tiempo medio entre fallos de un sistema. Se mide

generalmente en horas e indica la dureza o fortaleza de un sistema.

- Nodos** Puntos en los cuales se ubican equipos de procesamiento en una red, los cuales están conectados los enlaces de la misma.
- OC – 1** OC-1 - *optical carrier one* - linea de trasmision uno, es una linea de transmisión SONET con una velocidad de 51.84 Mbits/s
- .
- O – E – O** Siglas que significan conversión de medios en Óptico – Eléctrico – Óptico.
- POTS** Acrónimo de Plain Old Telephone Service - viejo servicio telefónico - que se refiere a la manera en como se ofrece el servicio telefónico analógico - convencional - por medio de hilos de cobre.
- PDH** La Jerarquía Digital Plesiócrona, conocida como PDH -Plesiochronous Digital Hierarchy-, es una tecnología usada en telecomunicación para transportar grandes cantidades de información mediante equipos digitales de transmisión que funcionan sobre fibra óptica, cable coaxial o radio de microondas

Routers	Un router - enrutador o encaminador - es un dispositivo hardware o software de interconexión de redes de ordenadores/computadoras que opera en la capa 3 -nivel de red - del modelo OSI. Este dispositivo interconecta segmentos de red o redes enteras. Hacen pasar paquetes de datos entre redes tomando como base la información de la capa de red.
RSSI	Potencia de la señal recibida en un enlace de microondas
Refracción	Refracción es el cambio de dirección de una onda debido al cambio de velocidad. Esto ocurre cuando las ondas pasan de un medio con un índice de refracción dado a un medio con otro índice de refracción. Cambio de dirección de la luz.
Reflexión	En Óptica: proceso por el cual un rayo de luz que incide sobre una superficie "rebota" sobre ésta. El ángulo con la normal a esa superficie que forman los rayos incidente y reflejado son iguales. Además, se produce, también, un fenómeno de absorción diferencial en la superficie, por el cual la energía y espectro del rayo reflejado no coinciden con la del incidente. Para una explicación más detallada ver: radiación electromagnética.
RF	Frecuencias de Radio.
Receptor	Dispositivo complejo empleado en radiotelegrafía o CW, radiotelefonía, televisión, comunicaciones por microondas,

radar y otros servicios, para recibir y transformar en sonido, imagen o gráficos o texto, las ondas hertzianas originadas por un transmisor

Subsistema Óptico	Conjunto de dispositivos o elementos que conforman un equipo con una función determinada como lo es un transmisor FSO.
SONET / SDH	Synchronous Optical Network (SONET) es un estándar para el transporte de telecomunicaciones en redes de fibra óptica.
Switcheo	Cambio de dirección de una conexión
SNMP	Simple Network Management Protocol (SNMP) o protocolo simple de gestión de redes, es aquel que permite la gestión remota de dispositivos de red, tales como switches, routers y servidores
SC o ST	Nombre que reciben los conectores utilizados en la Fibra Óptica
Transmisor	Equipo que genera una señal de radio ya modulada y enviarla a una antena para su radiación al espacio en forma de energía electromagnética
Tracking	Sistema de rastreo

Transientes	En telecomunicaciones y electricidad es llamado transiente al pico de energía que se produce en las líneas eléctricas que alimentan los equipos cuando existe una descarga eléctrica atmosférica
WDM	En Telecomunicaciones, la multiplexación por división de longitud de onda - WDM, del inglés Wavelength Division Multiplexing - es una tecnología que multiplexa varias señales sobre una sola fibra óptica mediante portadoras ópticas de diferente longitud de onda, usando luz procedente de un láser o un LED.
WEB	La World Wide Web - del inglés, Telaraña Mundial - la Web o WWW, es un sistema de hipertexto que funciona sobre Internet. Para ver la información se utiliza una aplicación llamada navegador web para extraer elementos de información - llamados "documentos" o "páginas web" - de los servidores web, o "sitios", y mostrarlos en la pantalla del usuario

RESUMEN

Recientemente, se ha desarrollado la tecnología de FREE SPACE OPTICS para la implementación de enlaces ópticos inalámbricos para proveer interconexión entre dos puntos remotos a través de un haz de luz. Esta tecnología está basada en los semiconductores en los que promedio de una excitación eléctrica se logra la emisión de fotones con una gran eficiencia y gran direccionalidad, para la recepción se utiliza el proceso inverso, en donde los fotones que entran a los semiconductores logran generar una señal eléctrica.

Un enlace óptico se puede ver afectado o degradado por factores ambientales como lo son la neblina, el polvo y la contaminación ambiental, además es importante la delicada alineación que requieren estos enlaces, en donde vibraciones o movimientos térmicos de los edificios pueden provocar un desajuste en la alineación y, por ende, degradar o cortar el enlace.

Para una instalación es necesario realizar un estudio de campo y verificar que exista línea de vista entre los dos puntos del enlace y que las condiciones de instalación sean adecuadas, tomando en cuenta la toma de energía, la distancia del punto de conexión de los datos al enlace y que tipo de montaje necesario para la instalación.

Con toda la información recopilada se puede realizar un diseño para el enlace y con este lograr hacer un presupuesto el cual es muy importante para verificar si este es viable económicamente al compararlo contra otras alternativas.

OBJETIVOS

General

Proveer una guía para la instalación de un enlace óptico punto a punto utilizando la tecnología FREE SPACE OPTICS con los pasos para un estudio de campo y la instalación.

Específicos

1. Proporcionar todos los conceptos básicos de esta tecnología como lo son los semiconductores y sus propiedades para emisión y recepción de luz.
2. Determinar los pasos necesarios para una instalación de un enlace Óptico inalámbrico con la tecnología FREE SPACE OPTICS.
3. Proporcionar una guía para un análisis económico y poder determinar los costos de un enlace y poder compararlos con diferentes alternativas.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha observado el crecimiento de las redes de telecomunicaciones, en Guatemala, así como la competencia de las empresas que proveen servicios de telefonía celular e Internet. Esto ha llevado a instalar sistemas de alta velocidad con fibra óptica y enlaces de microondas para satisfacer la alta demanda y dar la cobertura necesaria. Se debe observar que existe una nueva tecnología láser que está encontrando lugar en las redes en el ámbito mundial, llamada FREE SPACE OPTICS (FSO). Esta consiste en un enlace punto a punto, utilizando la luz como medio de transporte a través del espacio libre, en este caso el aire. Algunas de las ventajas de FSO es que no se necesitan licencias para instalar un par de láser y que en un haz de luz puede llevarse más información que en el espectro de radio. Un enlace FSO es, potencialmente, tan rápido como la fibra y tan conveniente como un enlace de Microondas. Para una empresa que necesita llevar información a través de una distancia relativamente corta, por ejemplo menor, de 4 kilómetros o entre 2 edificios, un enlace FSO puede ahorrar miles de dólares. Esto como una opción diferente al alquiler de un enlace dedicado entre 2 edificios, teniendo en cuenta que el FSO es más rápido, menos sujeto a interferencias y más difícil para los invasores de espiar o escuchar.

Aunque FSO tiene un tiempo de instalación corto, comparado con una instalación de fibra óptica todavía tiene una desventaja: la niebla, las nubes o la contaminación pueden bloquear el enlace y dejarlo inservible por un corto período de tiempo si no se toman en cuenta los factores climáticos del sitio de

la instalación, en Guatemala. Además, existe un efecto llamado “SCINTILLATION” el cual es producido por los cambios de temperatura y densidad en la atmósfera, cambios que funcionan como lentes que pueden afectar al haz de luz provocando oscilaciones en la intensidad de la luz.

Un enlace de FSO tiene muchas variables, e, incluso hay muchos factores que deben ser estudiados antes de hacer una instalación: un enlace de fibra óptica inalámbrica puede tener mucho potencial, en Guatemala, sobre todo, en el área de la ciudad capital, donde la demanda de enlaces crece día a día y tanto los carriers como las empresas privadas pueden llegar a utilizarlo, logrando ganancias o ahorros significativos. Este documento trata del estudio para la instalación de un enlace FSO, incluyendo los conocimientos básicos y los factores que pueden afectar un enlace, así como un análisis económico y de regulaciones para la seguridad del enlace.

1. FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA FSO

1.1 Conceptos básicos

Los sistemas de FSO operan en el rango infrarrojo (IR) del espectro. Comercialmente están disponibles los sistemas FSO que utilizan longitudes de onda cercanas al espectro visible alrededor de los 850 y los 1550 nm, el cual corresponde a la frecuencia alrededor de los 200 THz. Los rangos de longitud de onda de 850 y 1550 nm caen dentro de dos ventanas atmosféricas que son regiones donde no sufren mucha absorción en la atmósfera.

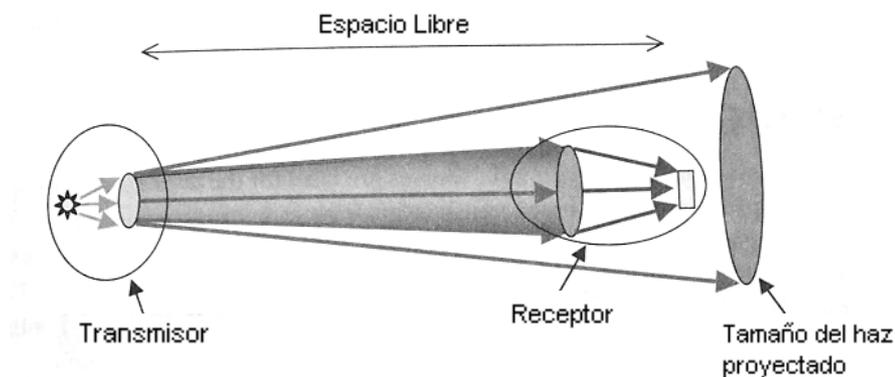
Debido a que las longitudes de onda y sus componentes son utilizadas en la industria para la transmisión y la recepción en fibra óptica, es de gran ventaja y ayuda para mantener bajos los costos de producción.

La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) no regula las frecuencias arriba de los 300 GHz. Por lo tanto a diferencia de las bajas frecuencias de microondas, los sistemas de comunicación FSO no requieren de licencias de operación, lo cual es aceptable mundialmente.

Debido a la cercanía con la luz visible, las señales del espectro IR tienen prácticamente las mismas propiedades de propagación que la luz visible. Un requerimiento primordial en FSO es tener una línea vista sin obstáculos entre los dos puntos de la comunicación ya que FSO utiliza luz para comunicarse y la luz no puede atravesar obstáculos sólidos tales como paredes

o árboles. Un esquema muy sencillo de un sistema de transmisión FSO se muestra en la figura 1.

Figura 1. Esquema de un sistema básico de transmisión FSO



Fuente: Free-Space Optics, Dr. Heinz Willebrand, pag11.

La parte óptica del transmisor involucra una fuente de luz y un telescopio. El telescopio puede ser diseñado usando tanto lentes como espejos parabólicos. Este telescopio crea un haz de luz más angosto y lo proyecta directo al receptor. En aplicaciones prácticas la divergencia del haz de transmisión varía entre unos cuantos cientos de micro-radianes y unos cuantos mili-radianes. Por ejemplo para un haz con divergencia de 1 mili-radian, el diámetro de un haz a 1 Km. es de 1 metro. En la práctica este modelo representa un equipo FSO de rango moderado.

La luz transmitida es recogida en el lado del receptor usando lentes o espejos, luego la luz es enfocada hacia un foto-detector. Para propósitos prácticos, el tamaño del haz proyectado en el receptor es mucho más grande que el receptor óptico. Parte de la luz transmitida se pierde durante el proceso de transmisión. Dependiendo de la divergencia del telescopio, el tamaño del

haz proyectado puede ser de varios metros, en el cual el tamaño del receptor es de 8 a 20 cm aproximadamente. A este fenómeno se le llama pérdida geométrica del enlace, donde la reducción del haz reduce la cantidad de pérdida geométrica. De cualquier manera reducir el haz requiere de una plataforma de montaje más estable o más sofisticada con sistemas de auto alineación automáticos.

Un sistema FSO puede operar en Full Duplex, esto quiere decir que la información puede recibirse y transmitirse en paralelo al mismo tiempo. Por lo tanto cada equipo incluye un transreceptor con operación Full Duplex.

En un equipo FSO durante el proceso de conversión electro-óptico (E-O), la información es convertida del dominio eléctrico al dominio óptico. Este proceso simple de conversión permite mantener la transmisión independiente de los protocolos de transporte.

En otras palabras, el sistema básico de transmisión FSO puede operar como la capa física en una conexión entre dos puntos de una red.

1.2 Transmisor

En los sistemas modernos de FSO se utiliza gran variedad de fuentes de luz para la transmisión de los datos. Nos enfocaremos en los transmisores basados en semiconductores, pues los transmisores láser de semiconductores son utilizados en la mayoría de sistemas FSO comerciales. Las principales diferencias entre estas fuentes de luz son la potencia, la velocidad de modulación y la longitud de onda. El precio de un transmisor de alto desempeño puede variar desde unos cuantos dólares hasta cientos de dólares.

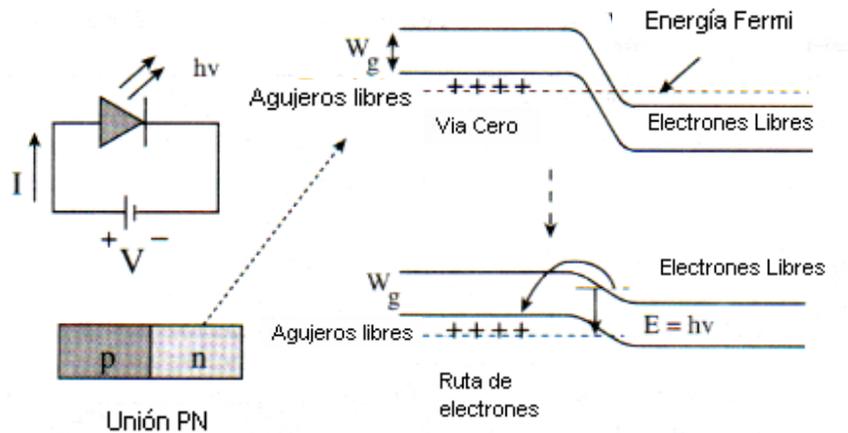
1.2.1 Diodos emisores de luz LED

Los diodos emisores de luz (LED), son estructuras semiconductoras emisoras de luz, debido a su consumo bajo de potencia, los LED son utilizados en aplicaciones de distancias cortas con anchos de banda moderados de 155 Mbps. Dependiendo del material del sistema, los LED pueden operar en diferentes rangos de longitud de onda. Cuando se comparan con el láser de banda angosta, los LED tienen mucho más rango espectral de operación. La emisión espectral varía entre 20 a 100 nm alrededor del centro de su diseño de operación. Una ventaja de los LED es su vida extremadamente larga y su bajo costo.

1.2.2 Características y operación del LED

Un LED es una unión de semiconductores PN. La unión PN es un componente que emite luz cuando un voltaje externo es aplicado en la dirección correcta. La figura 2, ilustra el símbolo de un circuito de este tipo, la unión y la energía relevante en las bandas de la estructura.

Figura 2. Bandas de energía para el modelo de un LED.



Fuente: Free-Space Optics, Dr. Heinz Willebrand, pag13.

La longitud de onda de la luz emitida depende de la energía entre las bandas W_g , como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{h.c}{W_g} \quad \text{o} \quad \lambda = \frac{1.24}{W_g}$$

El factor 1.24 provee la longitud de onda en micrómetros y la energía está dada en electrón volts.

Para aplicaciones de FSO, los sistemas de materiales compuestos de galio (GaAs) y aluminio (AlGaAs) es de interés, por que las longitudes de onda emitidas caen dentro de las ventanas de longitudes de onda bajas alrededor de 850 nm.

El ancho de banda de modulación de un LED está relacionado con el tiempo de vida de los portadores τ , donde τ está definida como el tiempo promedio de recombinación del portador. El ancho de banda eléctrico (3dB) esta dado por:

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

Los LED operan con un ancho de banda de modulación de 1MHz y 100 MHz, pueden ser utilizados en aplicaciones que requieran un ancho de banda de modulación más alto, pero no son capaces de emitir potencias elevadas. Un LED que emite 1mw es considerado de alta potencia.

Con el tiempo la potencia de salida de un LED decrece para un valor fijo de corriente. De cualquier manera para el tiempo de vida de un LED (tiempo en que la potencia es reducida a la mitad) puede ser tan alto como 10^5 horas, esto corresponde alrededor de 11 años.

Algunos diodos soportan temperaturas entre -65 a 125 grados Celsius, pero la potencia de salida disminuye con el aumento de la temperatura.

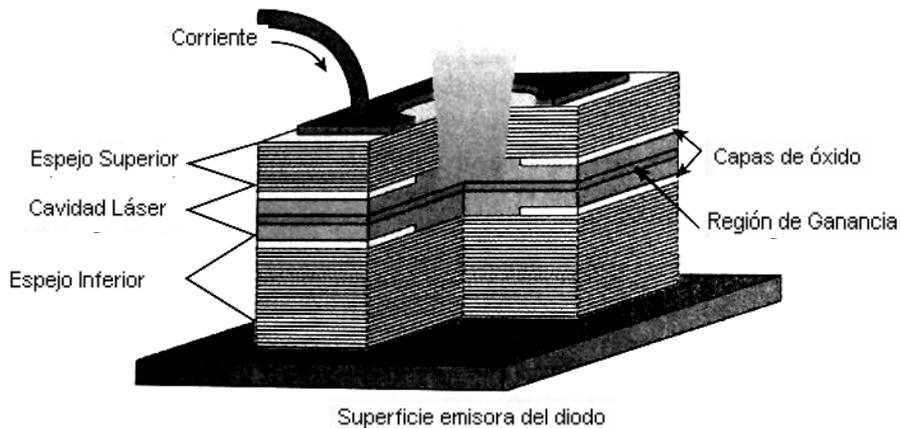
En referencia a la emisión de luz, los LED pueden ser clasificados en dos tipos: emisores de superficie y emisores de borde. Los emisores de superficie tienen un perfil de emisión simétrica, es decir, un patrón de radiación casi esférico y los emisores de borde tienen una emisión asimétrica. Comercialmente los LED están disponibles en una variedad de empaques: TO-18 o TO-46. Algunos incluyen micro lentes para mejorar la calidad del haz de salida o para mejorar la eficiencia de acople de la luz en una fibra óptica.

1.2.3 Diodo Láser

Toda la industria comercial láser se ha enfocado en utilizar láser de semiconductores por su tamaño reducido, alta potencia y el beneficio costo-eficiencia. La mayoría de láser son utilizados para la fibra óptica, por lo que su disponibilidad no es un problema.

Desde el punto de vista de los semiconductores, existen 2 estructuras diferentes de láser: emisores de borde y emisores de superficie. Con un emisor de borde, la luz sale de la estructura del semiconductor a través de una pequeña ventana de la capa activa y sale paralelo a las capas del semiconductor. Los emisores de superficie emiten a través de una pequeña ventana perpendicular a las capas de la estructura. Estas variaciones también existen para los LED. Ambos poseen ventajas y desventajas que deben ser considerados como los niveles de potencia, la calidad del haz emitido y la producción en masa. En la figura 3 se ilustran estos diseños.

Figura 3. Estructura de los diodos emisores de borde y de superficie.



Fuente: Free-Space Optics, Dr. Heinz Willebrand, pag 20.

Los emisores de borde pueden producir altos niveles de potencia, de 100 miliwatts a una modulación arriba de 1 GHz. Estos están disponibles comercialmente con una longitud de onda de 850 nm.

El perfil de haz de los diodos emisores de borde no es simétrico. El valor de radiación elíptica del patrón de salida es de 20 x 35 grados. Esta característica específica puede causar problemas cuando la potencia de salida debe ser acoplada eficientemente en una fibra óptica externa, generalmente reutiliza un lente óptico para aumentar la eficiencia de acople. Los diodos emisores de superficie producen generalmente menos potencia de salida, pero el patrón del haz está mucho más cerca de ser simétrico o redondo. Una característica para acoplar la luz en una fibra óptica debe ser que el valor para la divergencia del haz sea de 12 grados.

La tabla I, muestra los materiales y sistemas correspondientes a los rangos de longitud de onda que son importantes para FSO. La potencia de salida que

puede alcanzarse por diferentes láser semiconductores varía entre unos cuantos miliwatts hasta varios cientos de miliwatts. La potencia requerida para una aplicación específica depende de factores tales como el ancho de banda, la distancia, entre otros.

Tabla I. Relación entre materiales y longitud de onda.

Compuesto	Longitud de onda, (nm)	Indicaciones
Ga(1-x)Al(x)As	620-895	X = 0-0.45 Tiempo vida corto para longitudes de onda menores a 720 nm
GaAs	904	
In(1-x)Ga(x)As(y)P(1-y)	1100-1650	InP substrato.
In(0.58)Ga(0.42)As(0.9)P(0.1)	1550	Longitud de onda para la mayoría de comunicaciones por fibra
InGaAsSB	1700-4400	*
PbEuSeTe	3300-5800	*

* No son utilizadas actualmente en los sistemas FSO.

1.2.4 Diseño de Láser

Existen varios diseños y configuraciones de láser. El propósito de una cavidad es confinar la luz y crear una condición resonante para una longitud de onda específica.

Un diodo láser de cavidad que se utiliza con frecuencia es de cavidad de Fabry-Perot. En este la luz es confiada entre capas de semiconductores que son similares entre sí pero tienen diferentes índices de refracción.

Utilizando AlGaAs, los índices de refracción pueden cambiar con una pequeña variación en los porcentajes de la composición de este material. Los índices de refracción de uno de los espejos es tan alto que provoca que toda la luz sea reflejada mientras que el otro deja escapar un porcentaje de luz, siendo ésta la salida del láser.

Una mejora en el desempeño del láser se observa en el láser de retroalimentación distribuida (DFB), el cual emite una onda menor a 0.1 nm. El láser DFB es mucho más costoso, alrededor de 1,000 veces el costo de un láser Fabry-Perot. Pueden llegar a requerir de enfriamiento externo, pero en algunos casos proveen beneficios de desempeño significativos.

Los láseres DFB pueden ser utilizados para proveer un sistema sintonizable, ajustando la longitud de onda para ciertas condiciones atmosféricas específicas, lo cual es costoso.

Una opción popular en FSO es el láser emisor de superficie con cavidad vertical. Estos emiten luz perpendicular a la superficie, teniendo la ventaja de un consumo bajo de potencia, poca generación de calor, gran facilidad de acoplamiento elíptico, bajo costo y un alto ancho de banda alrededor de 5 GHz.

1.2.5 Láser WDM

Los láseres que pueden ser utilizados en multiplexación por longitud de onda o WDM (Transmiten al mismo tiempo y en diferentes partes del espectro óptico), son monomodo y de un ancho de banda espectral angosto. Para la

interoperabilidad de los sistemas la ITU estableció un estándar para la operación en WDM, con la intención de unificar a un estándar los niveles internacionales.

La frecuencia central de operación de un canal debe ser la misma en la transmisión y en la recepción. Recomendando 81 canales iniciando en 196.1 THz y disminuyendo en pasos de 50 GHz (0.39 nm). Otro método de especificar este estándar es aplicar la fórmula siguiente:

$$\lambda = 193.1 \text{ THz} \pm m * 100 \text{ GHz}$$

Donde m es un número entero.

El espacio de los 100 GHz corresponde a la diferencia de longitud de onda cerca de 0.8 nm. Este estándar especifica la longitud de onda conocida como multiplexación densa de división de longitud de onda o DWDM.

Inicialmente muchos sistemas operaban con espacios de 200 o 400 GHz, pero con las mejoras en el proceso de manufactura y los requerimientos para una mayor capacidad, la operación fue empujada hacia un espaciamiento de 100 GHz e incluso 50 GHz.

Anteriormente se utilizó sólo una longitud de onda de 1300 nm y una en 1500 nm, pero la revolución real de DWDM en los sistemas de comunicación realmente empezó después de los estándares a mediados de 1990.

Actualmente los láseres WDM siguen las especificaciones de las longitudes de onda. La mayoría de los láseres son de tipo DFB o DBR. Cuentan con mejoras electrónicas y controles de temperatura como el sistema de enfriamiento (TE), estabilizando o mejorando la sintonía fina para la longitud de onda correspondiente a las especificaciones de DWDM. Debido a las estrictas

especificaciones el proceso de producción de estos dispositivos es extremadamente preciso y controlado. Una de las razones de la longitud de onda del láser es controlada por los parámetros geométricos de la cavidad. La producción es baja por las fuentes de luz DWDM debido a su alto costo comparadas con los láser estándar.

De manera similar, los sistemas de fibra óptica WDM pueden ser utilizados en sistemas FSO, permitiendo un incremento en la capacidad de transmisión al agregar otra longitud de onda. Debido a que la banda de 1550 nm cae dentro de una ventana atmosférica los láseres estándar y los componentes de los sistemas de fibra óptica pueden ser utilizados en sistemas de WDM FSO. El traslape entre la ventana atmosférica y la fibra óptica nos permite hacer un sistema de transmisión para fibra óptica como para FSO de manera transparente. En demostraciones de laboratorio se ha logrado operar satisfactoriamente con sistemas hasta 40 longitudes de onda separadas.

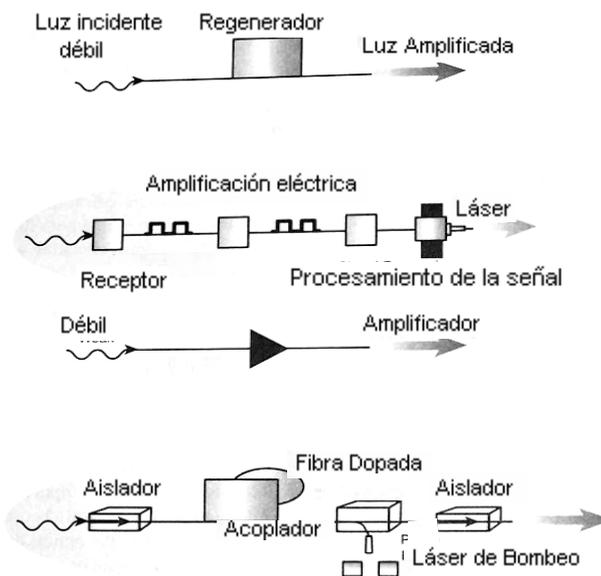
La dispersión de la luz y los efectos no lineales como la limitación de 4 ondas mezcladas dentro de una fibra óptica no afecta excesivamente a un sistema FSO DWDM, por lo que la operación de estos sistemas resulta aún mejor al efectuar el cambio a FSO.

1.2.6 Amplificadores dopados

En los sistemas actuales de FSO las señales pasan por varias etapas: de óptico a eléctrico y de nuevo a óptico. Este proceso de regeneración y amplificación aumenta la complejidad de los sistemas FSO ya que involucra varias partes electrónicas dependientes de la velocidad de los datos.

Una manera más eficaz de ampliar la señal óptica se logra utilizando amplificadores ópticos como los amplificadores dopados, utilizados para aumentar directamente la potencia de la señal óptica. En estos sistemas la señal permanece en el dominio óptico hasta la salida, sin la existencia de conversiones electro ópticas, sin dependencia de la velocidad de los datos, sin el requerimiento de protocolos electrónicos. En la figura 4 se ilustra la diferencia entre un proceso electro óptico y en línea de amplificador dopado.

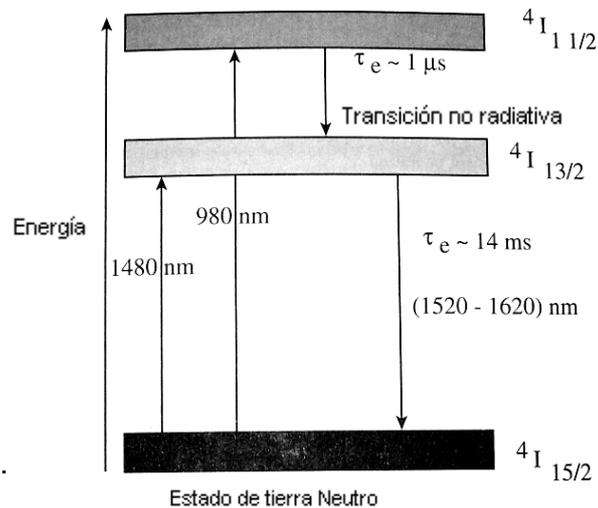
Figura 4. Regenerador complejo versus regenerador dopado.



Fuente: Free-Space Optics, Dr. Heinz Willebrand, pag 24.

Un amplificador híbrido es un segmento altamente dopado con átomos de erbio. Los átomos de erbio pueden ser excitados en un estado más alto de energía por un número de longitudes de ondas, incluyendo 532, 667, 800, 980, y 1480 nm. La figura 5 muestra un sistema atómico simplificado de un átomo de erbio (Er^{3+}) e ilustra el proceso de bombeo para las longitudes de onda más utilizadas de 980 y 1480 nm.

Figura 5. Diagrama niveles de energía y bombeo de los iones del erbio.



Fuente: Free-Space Optics
Dr. Heinz Willebrand, pag 24.

Cuando los iones de erbio son estimulados por una fuente de 980 nm, éstos caen aproximadamente en 1 microsegundo a un estado más bajo y semi estable de energía que tiene un tiempo de vida espontáneo de 14 ms.

La transición del estado bajo al estado alto es un estado no radiactivo, es decir, no genera emisión de fotones. El ión de erbio puede terminar en el mismo estado de baja energía utilizando una fuente de bombeo de 980 nm. La fuente de bombeo varía de 100 mw hasta 1 watts. Los estados de bombeo crean la inversión de población requerida para un proceso de simulación de emisión.

Si los átomos son emitidos para liberar la energía por un fotón de una longitud de onda de 5 micrones viajando por la región del material dopado estimulado, éstos liberan la energía y caen de nuevo en el estado primario, este es un proceso de estimulación de emisor que amplifica la luz.

Dependiendo de la longitud de onda del protón, el proceso de estimulación y amplificación puede llevarse a cabo en toda la banda de ganancia del erbio en su banda de transición.

En estos amplificadores la longitud de onda de la banda puede ser ampliada entre 1520 y 1620 nm. De cualquier manera, el factor de ganancia no es siempre el mismo; por tal motivo se necesitan ajustes especiales para asegurar una amplificación igual a la longitud de onda que es requerida en el diseño del sistema.

En los sistemas de comunicación, la tasa de transmisión es muy alta, la duración de los bits es menor de 1 ns. Consecuentemente ésta es muy corta comparada con la emisión espontánea de la excitación de los átomos que son alrededor de 14 ms. Sin embargo si ninguna luz está presente, los átomos liberan su energía por una emisión espontánea. Pero estos fotones serán amplificados mientras viajan a través del erbio dopado. Esta emisión es llamada amplificación espontánea por emisor y agrega ruido al amplificador no siendo deseada cuando la luz se detecta en el lado del receptor.

En el sistema actual de comunicación, la tecnología de amplificadores dopados ha sido preferida para todas las aplicaciones con longitud de onda de 1550 nm, teniendo las siguientes ventajas:

- Alta eficiencia de bombeo (50%)
- Amplificación simultánea y directa de una amplia banda de longitud de onda en la región de 1550 nm, misma que la banda de baja atenuación de la fibra óptica y FSO.
- Alta potencia de salida (tan alta como +37 dBm)

- Alto nivel de saturación por potencia de salida
- Una relativa figura de ruido baja. (< 5 dBm)
- Óptimamente transparente al formato de modulación
- Operación independiente de la polarización

Algunas de las ventajas de estos dispositivos se relacionan por no ser integrados con otros dispositivos de semiconductores, ya que el proceso de amplificación se lleva a cabo en largas piezas de fibra y no en un material semiconductor

1.2.7 Criterio de la selección de un diodo láser para FSO

La selección de una fuente láser para una aplicación FSO depende de varios factores. Es importante que la longitud de onda de transmisión esté correlacionada con una de las ventanas atmosféricas. Como se mencionó anteriormente, una buena ventana atmosférica está alrededor de 850 nm y 1550 nm en el rango espectral bajo de IR. Algunas longitudes de onda de las ventanas están presentes de 3-5 micrómetros (especialmente entre 3.5-3.6 micrómetros y de 8-14 micrómetros).

La disponibilidad de una fuente de luz en estos rangos es muy limitada. Podemos mencionar que la mayoría de las fuentes necesitan temperaturas de enfriamiento bajas que limitan sus aplicaciones comerciales en las telecomunicaciones.

Otros factores que impactan el uso de una fuente específica incluyen lo siguiente:

- Precio y disponibilidad comercial de los componentes
- Potencia de transmisión
- Tiempo de vida
- Capacidad de modulación
- Seguridad visual
- Dimensiones físicas
- Compatibilidad con otros medios de transmisión como la fibra.

1.3 Receptor

Además de las fuentes de transmisión, los detectores de luz son importantes para la construcción y diseño de los sistemas FSO. Los receptores de luz detectan la luz utilizando diferentes efectos físicos. Muy parecido a las fuentes de láser, la mayoría de los detectores utilizados comercialmente en sistemas FSO son a base de semiconductores. Dependiendo del sistema del material específico se puede operar en diferentes rangos de longitud de onda.

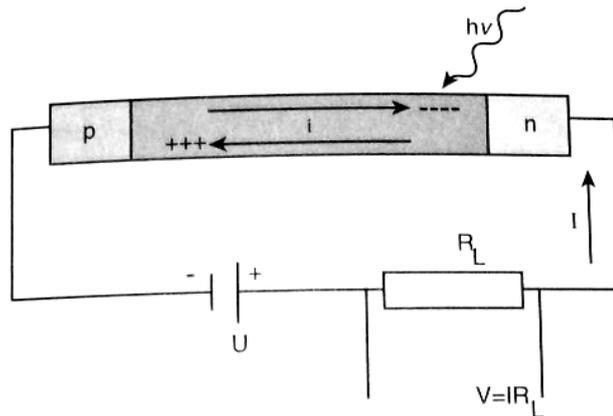
1.3.1 Diodos tipo PIN

Los diodos tipo PIN resolvieron muchos problemas respecto a la baja respuesta y corto tiempo de las señales ópticas en los semiconductores. Son los detectores de semiconductores más utilizados en equipos FSO.

Como se ilustra en la figura 6, los diodos de PIN tienen una capa amplia de material semiconductor intrínseco, separando las capas tipo P y tipo N. Las capas intrínsecas no tienen portadores libres, así que su resistencia es alta. La

caída de tensión se presenta en ésta capa intrínseca en donde el campo eléctrico entre las capas es alto.

Figura 6 Esquema de la estructura de un diodo tipo PIN.



Fuente: Free-Space Optics, Dr. Heinz Willebrand, pag 29.

Debido al diseño amplio de la capa intrínseca, la mayoría de los fotones son absorbidos dentro de la región intrínseca y no en las capas N o P en las afueras de la estructura. Esto mejora el nivel de respuesta e incrementa el tiempo de subida de las señales de los diodos tipo PIN cuando es comparado a los diodos tipo PN. Para crear un agujero-electrón dentro de la capa intrínseca, el fotón necesita una cantidad mínima de energía para empujar el electrón a través de la banda de energía.

La longitud de onda de corte λ_c para un material detector específico esta dada por la siguiente fórmula:

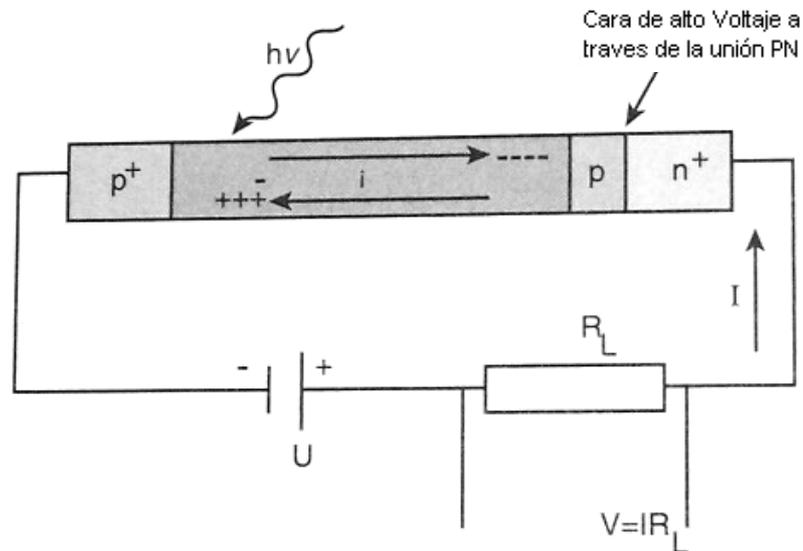
$$\lambda_c = \frac{1.24}{W_g}$$

Con λ dado en μm y W_g en eV. Siendo ésta la misma ecuación utilizada para los LED emisores láser.

1.3.2 Fotodiodos de avalancha

Un fotodiodo de avalancha o APD, es un detector semiconductor que posee ganancia interna. Esto incrementa la respuesta cuando se compara con los tipos PN o tipos PIN. La ganancia interna tiene un mejor desempeño con la relación señal a ruido cuando se compara con la de un amplificador externo, (circuito con transistores). La figura 7, muestra la estructura interna de un APD.

Figura 7 Esquema de la estructura de un diodo APD



Fuente: Free-Space Optics, Dr. Heinz Willebrand, pag 30.

La multiplicación de la corriente de avalancha se puede describir de la siguiente manera: un fotón es absorbido en la región que genera un par agujero-electrón. Similar a la estructura PIN, ésta es una región intrínseca que

contiene unos cuantos portadores libres de carga, lo que le hace ser de alta resistencia. Debido a que el voltaje que cae a lo largo de la región intrínseca es alto, las cargas creadas por el fotón son aceleradas en este campo eléctrico y ganan energía cinética. Si la energía cinética ganada durante el proceso de aceleración es suficientemente alta para crear otro par agujero-electrón durante la colisión con otro átomo, se genera un segundo par. Las cargas denegadas no alcanzan la cantidad de energía cinética para crear cargas adicionales por lo tanto no forman parte en el proceso de multiplicación.

La ganancia de un fotodiodo de avalancha incrementa al aumentar el voltaje de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_d}{V_{BR}} \right)^n}$$

Donde V_{BR} es el voltaje inverso máximo del diodo, V_d es el voltaje de la unión del diodo y n es un factor empírico que es mayor a 1. El voltaje máximo inverso depende de la estructura específica del diodo y puede variar entre 20 y 500 voltios.

El tiempo de respuesta ρ para la ganancia de un diodo APD está dado por la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{Me\lambda\eta}{hc}$$

Donde η es la eficiencia cuántica con unidades de ganancia. El rango de respuesta de avalancha varía de 20 a 80 A/W, considerado alto cuando se compara con los diodos tipo PIN que tienen un tiempo de respuesta entre 0.5 y 0.7 A/W.

1.3.3 Criterio de selección para un receptor

Similar a las fuentes de luz, la elección de un tipo específico de detector o material detector depende de la aplicación, la sensibilidad y las características mismas de la transmisión y la longitud de onda del transmisor.

Para aplicaciones pequeñas de longitud de onda en la ventana de 850 nanómetros, los detectores de silicio son la mejor opción. Los detectores tipo PIN son suficientes para aplicaciones sobre distancias cortas y cuando el transmisor del lado opuesto puede transmitir suficiente potencia.

Los APD son excelentes para aplicaciones de largas distancias. La alta sensibilidad del diseño de los APD provee un margen adicional al enlace. De cualquier manera los APD requieren una fuente de voltaje muy estable y son más costosos que los diodos de tipo PIN. Además, la corriente de los diodos APD comparados con los diodos tipo PIN en un ambiente oscuro es alta. Los sistemas de material de silicón tienen un paso de corte a una longitud de onda de 1.1 μm . Por lo que el silicón sólo puede ser utilizado con longitudes de onda grandes. La respuesta del material InGaAs puede ser tan alta como 0.9 A/W alrededor de 1550 nm. Estos diodos están disponibles comercialmente y cuentan con excelentes características de modulación que operan a altas velocidades (10 Gbps y más).

El germanio tiene una amplia respuesta espectral y puede operar en longitudes de onda corta y larga. Trabajando en ambas ventanas espectrales el germanio tiene valores altos de corriente en la oscuridad, por lo que no se utiliza frecuentemente en aplicaciones de FSO.

Para aplicaciones potenciales en el rango de 3-5 μm y 8-14 μm existen detectores de diversos materiales como el MCT mercurio-cadmio-telurio. Al igual que con los sistemas de transmisión éstos materiales deben ser enfriados a bajas temperaturas.

1.3.4 Subsistema óptico

El subsistema óptico juega un rol importante en el diseño de todo el sistema FSO. Los componentes ópticos son utilizados en la transmisión como en la recepción del enlace óptico. En los sistemas FSO, los diferentes lentes y espejos pueden ser utilizados para el diseño, donde los lentes se basan en la refracción de la luz y los espejos se basan en las propiedades reflectivas de los materiales. El diseño escogido frecuentemente depende del requerimiento del desempeño de aplicaciones específicas y de los precios a los que se registra el diseño.

1.3.5 Lentes ópticos

Para este análisis consideraremos que la luz está compuesta por pequeñas ondas, tomando en cuenta que los objetos geométricos ópticos como los lentes, siguen algunas reglas simples:

- La relación entre la velocidad de la luz en el vacío (c) y la velocidad actual de la luz en un determinado medio (v) que no sea el vacío, está dada por la siguiente ecuación: $v = \frac{C}{N}$

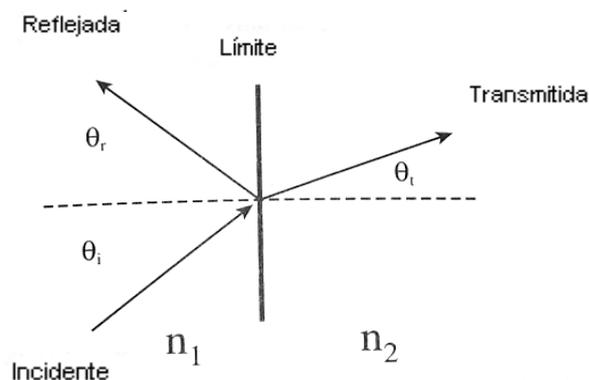
Donde $C = 3 \times 10^8$ m/s y N es el índice de refracción del medio. Debemos notar que el índice de refracción del aire y de otros gases es cercano a la

unidad. Por ejemplo el índice de refracción del silicio es aproximadamente 3.5 y el vidrio tiene un índice cercano a 1.5. Este hecho es usado en las fibras ópticas para proveer estructuras capaces de guiar la luz.

- Los rayos de luz viajan en una dirección lineal a menos que sean reflejados por un cambio en el medio del camino de propagación.

Si la luz entra en un medio que tiene dos índices de refracción, los rayos de luz son reflejados de regreso a un ángulo igual al de incidencia. Este ángulo está medido con respecto a la normal de la dirección que es perpendicular a la superficie. Esto se representa en la figura 8 con un haz de luz incidente, reflejado y transmitido en una interfase entre dos materiales con diferentes índices de refracción, n_1 y n_2 .

Figura 8 Comportamiento de un rayo de luz.



Fuente: Introduction to Modern Optics, Grant R. Fowles, pag 40.

- El ángulo del haz transmitido está relacionado al ángulo del haz incidente por la ley de Snell's.

$$\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{n_1}{n_2}$$

La ley de Snell's tiene dos implicaciones muy importantes:

- El haz transmitido es redireccionado hacia la normal, cuando la luz incidente entra de un material con índice de refracción más bajo a un material con índice de refracción más alto.
- El haz es redireccionado en la dirección normal cuando el haz incidente entra de un material con índice de refracción más alto a un material con índice más bajo.

1.3.5.1 Diseño básico de lentes ópticos

Un lente es un pedazo de vidrio o algún otro material transparente que refracta la luz. Los lentes pueden ser vistos como una serie de pequeños prismas refractores, donde cada prisma refracta la luz hacia un lugar determinando. Cuando todos los prismas actúan juntos el producto es una imagen enfocada en un mismo punto.

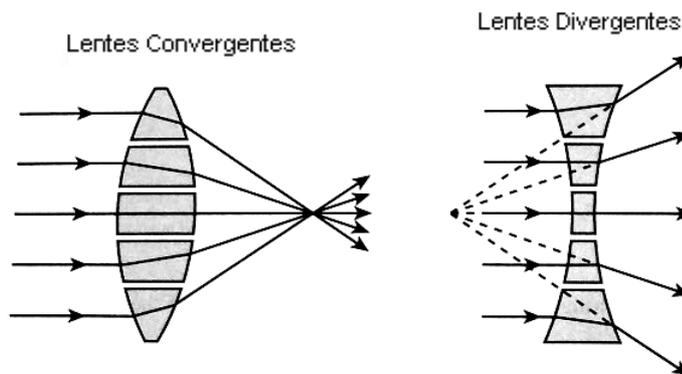
Los lentes pueden ser diferenciados unos de otros en términos de su forma y por el material del que son fabricados. La forma determina cuándo el lente es convergente o divergente. El material posee un índice refractivo que determina sus propiedades refractivas. El eje horizontal de un lente es conocido como el eje principal.

Un lente convergente redirecciona la luz entrante hacia el centro de su eje del camino del haz, son anchos en su centro y delgados en la parte superior e inferior. Cuando en el haz inciden rayos paralelos a este lente, la luz es

enfocada en un punto. El punto donde la luz converge es llamado punto focal del lente.

Un lente divergente redirecciona la luz entrante lejos de su eje, son delgados en su centro y gruesos en sus partes inferior y superior. La figura 9 ilustra el comportamiento de los lentes de divergencia y convergencia.

Figura 9. Lentes convergentes y divergentes.



Fuente: Free-Space Optics, Dr. Heinz Willebrand, pag 34.

Los lentes de la figura 9, son doblemente convexas y doblemente cóncavas respectivamente, son simétricos tanto en su eje horizontal como en el vertical.

En lugar de lente doblemente convexo o cóncavo, los lentes más utilizados en diseños ópticos son lentes plano convexas o plano cóncavas. Estos lentes poseen un lado plano, y el otro ya sea cóncavo o convexo.

1.3.6 Sistema de rastreo y auto alineación TRACKING

El autoalineamiento de los láser ha sido uno de los temas más comentados en las conferencias, cubriendo varios aspectos de los sistemas de comunicación satelital basados en láser. Para comunicaciones entre satélites o

entre satélites y terminales en tierra, la precisión de alineación del láser es de gran importancia. Distancias entre estos puntos remotos pueden ser de kilómetros, el haz deber ser angosto de unos cuantos micro-radianes para transportar toda la potencia posible al lado opuesto del receptor. Un error en el alineamiento de un haz tan pequeño puede causar una interrupción completa de la comunicación del enlace.

Para aplicaciones en el espacio, nadie puede alinear el láser hacia el lado opuesto en el satélite remoto. Numerosos métodos de rastreo fino han sido desarrollados par realizar esta tarea. Estos métodos incluyen el uso de servomotores, motores de paso a paso, espejos, detectores cuádruples, arreglos CCD, incluso cristales líquidos y sistemas microelectrónicas. Generalmente los sistemas de rastreo sofisticado se han desarrollado para aplicaciones específicas en el espacio y no son aplicables para sistemas de bajo costo en enlaces terrestres.

En aplicaciones terrestres, las distancias involucradas entre los puntos remotos son mucho más pequeñas. En éstos sistemas, la alineación y el rastreo son muy importantes.

1.3.7 Sistema de transmisión de haz amplio.

Los sistemas de transmisión de haz amplio que no poseen un sistema de tracking son una solución económica y confiable para una operación a velocidad moderada sobre distancias cortas. El haz amplio causa un incremento

en la pérdida de la potencia, esto se ve reflejado en los cálculos del margen del enlace. Cuando se utiliza un haz circular, para cierto tamaño de la superficie del receptor que está localizado a una distancia fija se incrementará el total de la potencia recibida en 6 db cuando el diámetro del haz recibido se reduce a la mitad. Los sistemas FSO disponibles comercialmente utilizan un ángulo amplio de transmisión sin un sistema de tracking y operan a divergencia entre 2 a 10 miliradianes. A este ángulo de divergencia difícilmente corresponde a un haz del diámetro de 2 m y 10 m a distancias de 1 km. La mayoría de fabricantes han encontrado en el campo éste ángulo de divergencia que provee suficiente margen de error como para mantener el haz en su objetivo. La clave para reducir el desalineamiento es seleccionar un montaje y una estructura estable cuando el sistema es instalado. El montaje de paredes exteriores es preferible en superficies de madera y en las esquinas de éstos, más que en el techo de algún edificio. Si el sistema es instalado en un inmueble alto, donde se experimentan movimientos apreciables, un sistema de autotracking es necesario para contrarrestar el desalineamiento del enlace, pues no es recomendable instalar un sistema FSO sin autotracking.

1.3.8 Autotracking

El Sistema de auto-alineación es una característica dónde el haz es realineado automáticamente hacia el lado del receptor, en el caso del balanceo del edificio o la superficie del montaje.

Los sistemas de auto alineamiento detectan la variación de la alineación del haz recibido y lo corrige. Muchos sistemas utilizan un haz por separado para detectar la alineación, en donde es necesario que tanto el haz de alineamiento y el de datos sean paralelos.

Para poder separar el haz de datos como el de alineamiento se utilizan longitudes de onda diferentes, utilizando un espejo dicróico que refleja la luz selectivamente, dependiendo de la longitud de onda en donde el haz de alineamiento es reflejado hacia la dirección del detector de alineamiento separando ambos haces.

Si se utiliza el mismo haz de los datos para la alineación se emplea un divisor de luz llamado splitter que refleja parte de la luz hacia el detector de alineamiento. Una desventaja de esto es que parte del haz que lleva los datos, se pierde cuando se utiliza para la alineación.

1.3.9 Gimbal

Un gimbal es un dispositivo utilizado frecuentemente para soportar algunas cabezas de ciertos equipos. Pueden ser girados en diferentes direcciones cubriendo el movimiento en el eje vertical y en el horizontal.

Un gimbal puede ser útil para la auto alineación y el rastreo de la señal que viene del lado remoto. En la tabla II se muestran algunas características importantes de los gimbal.

Tabla II. Características de los Gimbal

Características	Valores típicos
Campo vertical	+/- 20 grados
Campo Horizontal	+/- 25 grados
Jitter	< 5 radianes rms
Velocidad de cambio	2- radianes / seg.
Aceleración	Azimut = 7 radianes / seg ² Elevación = 12 radianes/ seg ²

1.3.10 Sistema de autoalineamiento basado en servomotores

Los servomotores que mueven una banda para el alineamiento, son de alto consumo de potencia y robustos, lo que es inconveniente cuando se instalan en el techo de un edificio.

Este sistema mueve todo el telescopio en el rastreo. La alineación da como resultado una inercia alta provocando una masa considerable que tiene limitaciones de qué tan rápido se pueden seguir los movimientos del objetivo. Este diseño es utilizado para sistemas de rastreo y autoalinamiento lento.

1.3.11 Sistema de alineamiento por espejo

El sistema de alineamiento por espejo es básicamente un espejo montado sobre una plataforma que puede cambiar de dirección, utilizando bobinas en donde el movimiento del espejo puede ser tridimensional.

La ventaja de este sistema es que no se involucran grandes masas en el movimiento ya que los espejos son livianos. Esto permite un rastreo rápido de la señal óptica y el logro de velocidades de varios cientos de hertz.

El inconveniente de esta técnica es que tienen un ángulo de rastreo pequeño. En aplicaciones de rastreo en el espacio exterior se combinan las dos técnicas para lograr una gran flexibilidad y un rápido sistema de rastreo. En aplicaciones terrestres de FSO, un ángulo amplio de rastreo no es necesario si se mantienen los dos extremos instalados en una base sólida y fija como un edificio. Siendo suficiente un sistema de rastreo con espejos para obtener un mejor resultado en cuanto a eficiencia y a costos se refiere.

1.3.12 Sistemas micro-electromecánicos

Las micromáquinas de silicón son el análogo mecánico de los circuitos integrados electrónicos son fabricados con métodos similares. Las aplicaciones en las que se utilizan estos dispositivos están los switches ópticos y atenuadores variables, los cuales tienen gran interés para sistemas de rastreo. Son muy pequeños, de bajo consumo de potencia y tienen un tiempo de respuesta muy bueno. Pueden ser producidos en masa e integrados en el receptor en una pequeña impresión. En conjunto con un procesador de señales digitales que controla el algoritmo de rastreo, estas micro-maquinas electrónicas tienen el potencial de proveer un sistema poderoso y bajo costo de rastreo para un sistema FSO.

Texas instrumentos fabricó recientemente un sistema de rastreo que puede ser incorporado para FSO, este dispositivo cuenta con los siguientes datos técnicos:

- Material: Single Cristal silicón
- Área del Espejo: 3.2 mm x 3.6 mm
- Curvatura del espejo: > 40 metros
- Superficie del espejo para girar: 50 mm
- Reflectividad: > 97% (840 y 1550 nm)
- Rango de movimiento: 2 ejes
- Rango de deflexión: > +/- 5 grados

1.3.13 Detectores cuádruplex

Estos detectores son utilizados en aplicaciones de rastreo láser. La mayoría están basados en silicón y responden a la luz visible, cercana al espectro IR.

Además pueden estar hechos de diferentes materiales para cubrir varios rangos espectrales.

La luz que llega del equipo remoto es enfocada en el detector usando dispositivos externos como espejos o lentes. El detector consiste en cuatro detectores en un arreglo de matriz, cada uno de estos recoge la luz separadamente. Si el haz está localizado exactamente en el centro la cantidad de luz recibida por cada uno es exactamente la misma, pero si este se mueve las cantidades ya no serán iguales. Analizando y comparando estas cuatro salidas es posible determinar la dirección en la que el haz se ha movido. Debido a que el análisis se realiza únicamente en 4 dispositivos éste es sumamente rápido.

Debemos tomar en cuenta que la resolución de este método depende del espaciamiento entre los detectores y su tamaño. Si los detectores son pequeños la resolución será alta. Con una combinación apropiada de amplificadores se puede lograr detectar el movimiento de la luz en 10 μm o incluso menos. Si la luz sale de la matriz el sistema de autoalineamiento pierde su capacidad de rastreo. Los detectores son utilizados para pequeños ángulos de cambio, es decir, un rastreo fino.

1.3.14 Arreglos CCD

Los dispositivos de carga acoplados o CCD pueden encontrarse en muchas aplicaciones comerciales como en las cámaras de video modernas que requieran de una conversión de la señal óptica a una señal electrónica.

Los píxeles de un sistema CCD pueden ser tan pequeños como de 10 μm . Debido al gran número de píxeles el área total de detección es más grande que los de los detectores cuádruplex. Su gran área de detección se traduce en un campo amplio de vista para el rastreo. Pero debido a que estos dispositivos

están basados en un registro es necesario leerlo todo para obtener la información. Los sistemas que funcionan con CCD frecuentemente tienen incorporada una computadora que controla el programa que corre en éstas, realiza la detección del posicionamiento en los campos de información y la lleva al sistema que controla los movimientos de los espejos. Este sistema de rastreo es para movimientos lentos de haz.

Una mejora en este sistema es la utilización de un procesador digital de señales o DSP para realizar el análisis y llevar la información al sistema de control. Los DSP realizan un análisis de la imagen pero siempre están limitados por el tiempo de lectura del chip CCD. Actualmente se encuentra en desarrollo sistemas de lectura directa para chips CCD. Los componentes de un sistema FSO consisten en la fuente de luz, el sistema óptico, el enfoque, los receptores ópticos y el manejo electro-óptico de las señales. La tecnología es similar a la utilizada para enlaces de fibra óptica, a diferencia de los requerimientos para transmitir en el espacio libre. Estos requerimientos y limitantes se discuten en el capítulo tres.

2. FACTORES QUE AFECTAN A UN ENLACE FSO

Con el fin de realizar una instalación correcta es necesario conocer todos los factores que afectan a un enlace FSO y determinar si es factible y conveniente instalarlo.

2.1 Transmisión a través de la atmósfera

En una atmósfera limpia, el ambiente está compuesto por moléculas de oxígeno y nitrógeno. El clima contribuye a la acumulación de grandes cantidades de vapor y con la existencia de otras combinaciones de partículas especialmente en ambientes contaminados pueden provocar una absorción o dispersión de los fotones que se propagan por la atmósfera.

Tomando en cuenta que no podemos cambiar las características físicas de la atmósfera, es posible aprovechar las regiones óptimas de ésta, seleccionando las longitudes de onda correctamente. Para asegurar la mínima atenuación en la señal por dispersión y absorción, los sistemas FSO operan en ventanas atmosféricas en el rango espectral de IF alrededor de 850 nm y 1550 nm. Existen otras ventanas en el rango entre 3-5 μm y 8-14 μm , aunque su uso comercial es limitado por la disponibilidad de estos componentes y las dificultades de la implementación práctica tales como el requerimiento de sistemas de refrigeración de baja temperatura.

2.2 Dispersión

La dispersión se refiere a la desviación que sufre la luz al tratar de pasar por la atmósfera. La dispersión de la luz puede causar un impacto drástico en el

desempeño de un sistema FSO. La dispersión no está relacionada a la pérdida de energía en la atmósfera, sino al redireccionamiento o distribución de la luz. Esto implica una disminución drástica de la intensidad de la luz en el sitio del receptor.

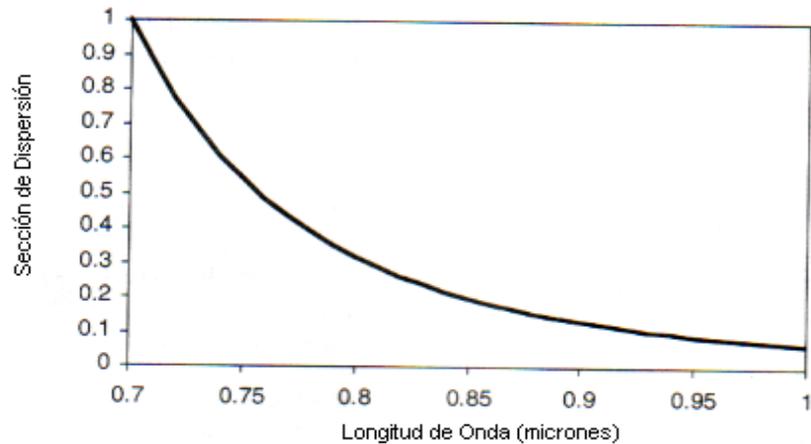
Existen varios regímenes de la dispersión dependiendo del tamaño de las partículas.

Una descripción está dada por la fórmula $X_0 = 2\pi r / \lambda$, donde λ es la longitud de onda y r es el radio de la partícula. Para las longitudes de onda infrarrojas que son las utilizadas en FSO, el radio promedio de las partículas de niebla es prácticamente del mismo tamaño del de la longitud de onda. La niebla es el principal enemigo del haz de luz, la lluvia y la nieve por otro lado son mayores y presentan un obstáculo menor para el haz de luz. Un haz que incide en el límite de un electrón de un átomo o molécula induce una carga desbalanceada o dipolo que oscila a la frecuencia del haz incidente. La oscilación de los electrones irradia la luz en una forma de dispersión. Esta es llamada dispersión de Rayleigh y la fórmula es la siguiente:

$$\sigma_s = \frac{fe^4 \lambda_o^4}{6\pi\epsilon_0^2 m^2 c^4} \frac{1}{\lambda^4}$$

Donde f es la fuerza de oscilación, e es la carga del electrón, λ_o es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia natural, $\omega_o = 2\pi c / \lambda_o$, ϵ_o es la constante dieléctrica, c es la velocidad de la luz y m es la masa de la entidad oscilante. La dispersión de Rayleigh es la razón por la que el cielo parece azul bajo condiciones soleadas. Para la operación de los sistemas FSO en longitudes de onda cercanas al infrarrojo, el impacto de Rayleigh, en la transmisión puede ser despreciado. La dependencia de la dispersión de Rayleigh en el rango espectral se muestra en la figura 10.

Figura 10. Dispersión de Rayleig versus longitud de onda.



Fuente: The Physics of Free-Space-Optics

2.2.1 Dispersión tipo Mie

La dispersión en este régimen ocurre para partículas del mismo tamaño, longitud de onda, rangos cercanos al infrarrojo, la niebla y contaminación (aerosoles). Estas partículas son la mayor contribución al proceso de dispersión Mie. Debido a que la absorción se encuentra en la mayor parte del espectro, los datos deben ser captados en un rango de longitud de onda que esté dentro de una ventana atmosférica. Asumiendo que únicamente ocurre la dispersión, sabiendo la distribución de las partículas para aerosoles, esta distribución depende de la ubicación, el tiempo, la humedad relativa y la velocidad del viento, etc. La siguiente es una fórmula empírica simplificada utilizada en FSO para calcular el coeficiente de atenuación debido a la dispersión de Mie.

$$\gamma = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-\delta} \quad \text{Cuando } \delta = 0.525(V)^{1/3} \text{ por } V < 6 \text{ Km}$$

$$\begin{aligned} \bar{\delta} &= 1.6 && \text{por } V > 50 \text{ Km} \\ \bar{\delta} &= 1.3 && \text{por } 6 \text{ Km} < 50 \text{ Km} \end{aligned}$$

Donde V corresponde a la visibilidad y λ es la longitud de onda de transmisión. Aunque la comunidad de FSO ha encontrado que el coeficiente de atenuación no depende completamente de la longitud de onda. Esto es cierto únicamente en el rango de IR en donde trabajan los sistemas de FSO. La conclusión que podemos sacar de esto es que la principal fuente de atenuación y que el efecto es geoméricamente acentuado conforme se incrementa la distancia, es por la niebla. Para fines prácticos las condiciones de visibilidad deben ser determinadas.

Los datos de visibilidad han sido tomados por varias décadas y están disponibles en el servicio nacional del clima y pueden ser utilizados para encontrar la dependencia de la disponibilidad según la distancia. Los resultados han sido medidos en aeropuertos los cuales están situados lejos de la ubicación de los enlaces de FSO. Para la mayoría de enlaces comerciales FSO la operación en niebla espesa requiere mantener la distancia bastante corta para mantener altos los niveles de disponibilidad. El margen del límite de la mayoría de los fabricantes permite una disponibilidad tan exacta como 99.99%, si las distancias se mantienen por debajo de los 200 metros.

2.3 Absorción

Los átomos y las moléculas se caracterizan por el índice de refracción. El índice imaginario k de la refracción está relacionado con el coeficiente de absorción, α por la siguiente fórmula:

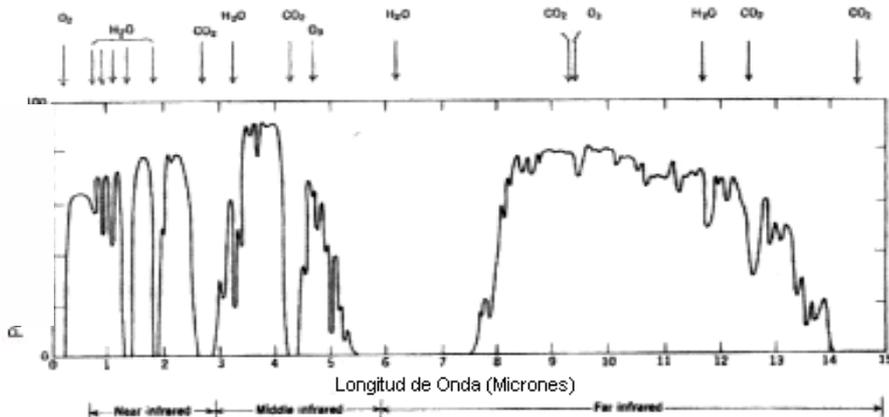
$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} = \alpha_a N_a$$

Donde α_a es la sección de absorción y N_a es la concentración de absorción de las partículas. En otras palabras el coeficiente de absorción está en función de la fuerza de absorción de una especie de partícula dada, como también en función de la densidad de las partículas.

2.3.1 Ventanas atmosféricas

Las ventanas atmosféricas son utilizadas en los enlaces de FSO en el rango infrarrojo. Las partículas más comunes que producen absorción son las de agua, dióxido carbónico y ozono. Un espectro típico de absorción se muestra en la figura 11, donde se puede observar que las ventanas existen entre 0.72 y 15.0 μm , algunas son angostas y la región de 0.7-2.0 μm está dominada por el vapor de agua y la absorción del dióxido carbónico.

Figura 11. Transmisión atmosférica medida sobre el mar a una altura de 1820 m en un camino horizontal.



Fuente: Free-Space Optics, Dr. Heinz Willebrand, pag 52.

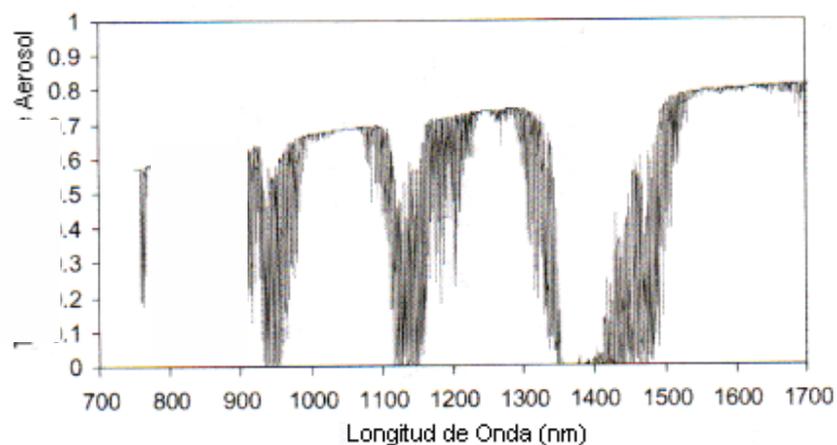
2.3.2 Absorciones atmosféricas

La abundancia de diferentes tipos de partículas que pueden absorber las señales ópticas determinan qué tan fuerte será atenuada la señal. Estos tipos pueden ser divididos en dos clases generales: moléculas y aerosoles. La figura 12 muestra el espectro de transmisión para condiciones de un cielo despejado con un estándar urbano de concentración de aerosol con una visibilidad de 5 Km. Esta gráfica fue generada utilizando el programa MODTRAN. En los cálculos se incluye la absorción del agua, el vapor, el dióxido de carbono y demás.

En la región cercana al infrarrojo los vapores de agua son las principales moléculas que absorben la energía atenuando la señal alrededor de 2.0 μm . Tanto el vapor de agua como el dióxido de carbono juegan un papel importante. Las transiciones vibracionales y rotacionales determinan cuál energía es

fácilmente absorbida, pero el gran número de permutaciones incrementan el número de líneas de absorción.

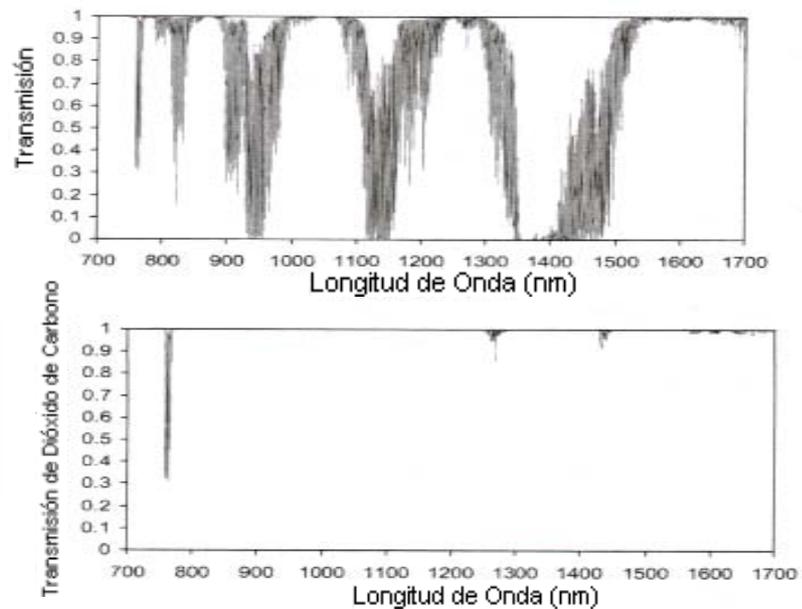
Figura 12. Transmisión como función de la longitud de onda sobre condiciones en un área urbana (visibilidad = 5 km) calculada por el programa MODTRAN.



Fuente: Free-Space Optics, Dr. Heinz Willebrand, pag 53.

En la figura 13 se muestra la transmisión únicamente sobre vapor en un cielo claro para el espectro cercano al infrarrojo y la transmisión en dióxido de carbono. El gran número de líneas complica el espectro con ventanas ocasionales a las frecuencias de FSO, tales como 850 y 1550 nm. Los picos ocasionales se superponen en el ambiente generalmente plano.

Figura 13 Transmisión en un cielo despejado como función de la longitud de onda para el agua (gráfica superior) y el dióxido de carbón (gráfica inferior) calculada por el programa MODTRAN.

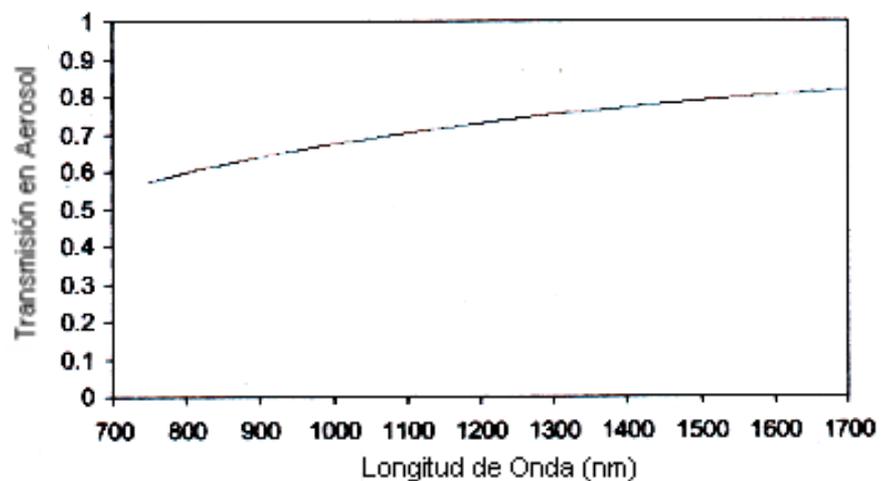


Fuente: Free-Space Optics, Dr. Heinz Willebrand, pag 54.

Los aerosoles se dan en forma natural por medio del polvo de meteoritos, partículas del mar, polvo del desierto y reacciones volcánicas. También pueden ser creadas por la mano del hombre, por conversiones químicas, cambiando gases de sólidos a líquidos y por desperdicios industriales. Estas partículas pueden variar en rangos y tamaños desde polvo fino menos de $0.1 \mu\text{m}$ hasta grandes partículas mayores que $10.0 \mu\text{m}$. Se estima que el 80% de la masa aerosol está contenida en las capas bajas de la atmósfera. La tierra produce más aerosol que el océano y el hemisferio norte produce el 61% del total del aerosol en el mundo. Estas partículas absorben el espectro infrarrojo, por ejemplo el carbón y el hierro tienen muchas líneas de absorción pero su abundancia en la atmósfera es generalmente limitada. En la figura 14 se

muestra una transmisión en un cielo despejado incluyendo los aerosoles urbanos. Una comparación de la figura 13 y 14 muestra cómo la transmisión en la atmósfera es afectada por las partículas de aerosol.

Figura 14. Transmisión como función de la longitud de onda para el aerosol urbano Calculado con MODTRAN.



Fuente: Free-Space Optics, Dr. Heinz Willebrand, pag 55.

2.4 Turbulencia

El desierto puede verse como una ubicación perfecta para un sistema FSO, esto es cierto siempre y cuando la atenuación atmosférica sea limitada. En ambientes secos y calientes la turbulencia puede causar problemas en la transmisión.

Cuando el suelo se calienta por el sol el aire también se calienta y algunas celdas de aire o bolsa de aire caliente suben más que otras. Esto causa cambios en el índice de refracción por lo tanto cambia la dirección que tenía la luz cuando se propaga a través del aire. Debido a estas bolsas de aire que no

son estables en el tiempo o en el espacio el cambio del índice de refracción toma un movimiento aleatorio. Por lo observado esto parece como un comportamiento de turbulencia.

El haz de láser experimenta tres efectos bajo las turbulencias: Primero, el haz puede ser redireccionado aleatoriamente por las celdas de aire. Este fenómeno es conocido como haz aleatorio. Debido a la refracción el aire trabaja similar a la luz, pasando por cualquier tipo de medio refractivo como los lentes de vidrio. La luz puede ser enfocada y desenfocada aleatoriamente, siguiendo los cambios del índice del aire. Segundo, la fase frontal del haz puede variar produciendo fluctuaciones en la intensidad o centelleo. Tercero, el haz puede dispersarse más de lo que la teoría de refracción predice.

Una buena medición de la turbulencia es el índice de refracción del coeficiente de la estructura, C_n^2 . Debido a que el aire necesita un tiempo para calentarse, la turbulencia es mayor a media tarde y más débil horas después del atardecer. Este coeficiente aumenta al acercarse al suelo y decrece con la altitud. Para minimizar los efectos del centelleo en la transición, los sistemas de FSO no deben ser instalados cerca de superficies calientes, como los techos que pueden experimentar grandes cantidades de centelleo en un verano caliente. Debido a que el centelleo decrece con la altitud, se recomienda que los sistemas FSO sean entablados a una distancia mayor de la altura del techo, (> 4 pies) y lejos de cualquier pared en las instalaciones que pueda tomar parte de un ambiente como el desierto.

2.4.1 Variaciones del haz

Para un haz en presencia de grandes cantidades con celdas de turbulencias comparado con el diámetro del haz, los cálculos geométricos pueden utilizarse

para describir la variación del radio, σ_r , como función de la longitud de onda y la distancia L:

$$\sigma_r = 1.83C_n^2 \lambda^{-1/6} L^{17/6}$$

Esta relación implica que entre más larga sea la longitud de onda se tendrá menos variación que las longitudes grandes. La dependencia por la longitud de onda es baja. Manteniendo el haz angosto en un sistema de rastreo éstas fluctuaciones serían un problema, el rango de fluctuaciones es bajo (menos de un kHz o dos). En estas condiciones es posible utilizar un sistema de rastreo.

2.4.2 Centelleo

Al observar la apariencia de agua en el medio de un asfalto caliente, se ha experimentado los efectos del centelleo atmosférico. De los tres tipos de turbulencias los sistemas FSO son afectados principalmente por el efecto del centelleo. Una interferencia aleatoria con el frente de la onda causa picos bajos, resultando en la saturación del receptor pérdidas de la señal. Puntos calientes en la sección media del haz pueden ocurrir en un tamaño de $\sqrt{\lambda L}$, alrededor de 3 cm para un haz de 850 nm a una distancia de 1 Km. Los sistemas FSO operan horizontalmente en la atmósfera cerca de la superficie experimentando la mayor cantidad posible del centelleo. Los efectos del centelleo de pequeñas fluctuaciones siguen una distribución normal, caracterizada por la varianza, σ_i , para una onda plana dada por:

$$\sigma_i^2 = 1.23C_n^2 K^{7/6} L^{11/6}$$

Donde $k = 2\pi/\lambda$. Esta expresión sugiere que una longitud de onda grande puede experimentar una pequeña varianza, cuando los otros factores permanecen sin cambio. Para los sistemas FSO con un haz angosto y una pequeña divergencia,

la expresión del plano de la onda es apropiada para una onda esférica, incluso si el frente de onda es curvo cuando alcanza el detector el haz transmitido es mucho más grande que el área del detector y éste será prácticamente plana.

La expresión de la varianza para fluctuaciones grandes es:

$$\alpha_{high}^2 = 1.0 + 0.86(\sigma^2)^{-2/5}$$

Refiriéndose que una longitud de onda corta experimenta una pequeña varianza. En un despliegue FSO el camino del haz debe ser más de 5 metros al atravesar cualquier calle de una ciudad o aparecerán otras fuentes potenciales de centelleo.

2.4.3 Esparcimiento del haz

El tamaño del haz puede caracterizarse por el radio efectivo, a_t , la distancia del centro del haz ($z = 0$) hasta donde la intensidad ha decrecido por $1/e$. El radio efectivo está dado por:

$$a_t = 2.01(\lambda^{-1/5} C_n^{6/5} z^{8/5})$$

La dependencia de la longitud de onda en el esparcimiento de la onda no es fuerte. El tamaño es el doble del límite de difracción del diámetro del haz. Muchos sistemas FSO son aproximadamente de un metro del haz esparcido por kilómetro. En un ambiente perfecto el esparcimiento del haz es el único limitante para la distancia máxima del enlace.

2.5 El Impacto del clima

Hasta ahora se ha discutido la parte teórica de un enlace FSO, pero para las aplicaciones prácticas, la parte más importante para los diseñadores y los instaladores de un sistema FSO es el clima.

2.5.1 Efecto de la lluvia

La lluvia tiene un impacto que reduce la distancia de un enlace FSO. Aunque la lluvia sea menor que la niebla debemos tomarla en cuenta, debido a que el radio de las gotas de 200 a 2000 μm es significativamente más grande que el de la longitud de onda de una fuente de luz FSO.

Los valores de la atenuación de la lluvia son moderados en la naturaleza. Por ejemplo, para una caída de lluvia de 2.5 cm por hora, se observa una atenuación de 6 dB/ Km. Los sistemas FSO disponibles comercialmente operan con un margen de 25 dB, penetrando la lluvia de manera relativamente fácil. Este es el caso en un sistema desplegado en áreas metropolitanas donde las distancias entre edificios están por debajo de 1 km. Si el sistema es desplegado sobre distancias de 500 metros bajo las mismas condiciones, la atenuación es solamente 3 dB/km. Pero si la lluvia incrementa dramáticamente arriba de los 10 cm / hora de lluvia, la atenuación puede ser un problema en distancias mayores a las que se utilizan en el área metropolitana. Este tipo de lluvia dura únicamente un corto período de tiempo.

2.5.2 Efecto de la nieve

En Guatemala aunque son muy pocos lugares y épocas donde cae esta, es necesario explicar el problema que se presentaría en dado caso:

Los copos de nieve están compuestos por cristales de hielo que vienen en variedad de formas y tamaños. Generalmente son más grandes que las gotas de lluvia. Una nevada fuerte puede atenuar el haz, pero la dispersión no es un gran problema para FSO porque el tamaño de los copos de nieve es más grande comparados al de la longitud de onda. El impacto de la luz en la nieve con ventisca o una nevada fuerte queda exactamente en medio de lluvia suave a niebla moderada, con un potencial de atenuación aproximadamente de 3 dB/km a 30 dB/km.

2.5.3 Efecto de la niebla

La niebla es el problema determinante para un enlace FSO. Compuesta por pequeñas partículas de agua y con un radio aproximado al de la longitud de onda del infrarrojo. La distribución del tamaño de las partículas varía por los diferentes grados de niebla. Las condiciones del clima se refieren a niebla cuando la visibilidad varía entre 0 – 2,000 metros. Las condiciones de niebla espesa son difíciles de describir. Se utilizan algunas veces las frases de niebla espesa o niebla delgada; cuando la visibilidad es mayor a 2,000 metros las condiciones se describen como nebulosas.

La Tabla III, detalla la visibilidad, las condiciones de niebla, la atenuación esperada en dB/Km y su correlación a la visibilidad. La lluvia tiene un impacto menor en un sistema FSO comparada con la niebla. La dispersión es el mecanismo principal para las pérdidas en la niebla. Incluso una niebla modesta puede causar atenuación en una señal infrarroja sobre una distancia corta.

Por ejemplo una lluvia término medio causa menos atenuación que una niebla delgada

Tabla III. Códigos internacionales de la visibilidad de las condiciones del clima y la Precipitación

Condiciones	Precipitación	Cantidad	Visibilidad	dB Loss/ Km
Niebla Densa			0 m, 50 m	-
271.65				
Niebla Semidensa			200 m	-59.57
Niebla Moderada	Nieve		500 m	-20.99
Niebla Liviana	Nieve Nubosidad	100	770 m	-12.65
			1 km	-9.26
Niebla Delgada	Nieve Lluvia fuerte	25	1.9 km	-4.22
			2 km	-3.96
Vapor	Nieve Lluvia media	125	2.8 km	-2.58
			4 km	-1.62
Vapor Liviano	Nieve Lluvia Ligera	2.5	5.9 km	-0.96
			10 km	-0.44
Claro	Nieve Llovizna	0.25	18.1 km	-0.24
			20 km	-0.22
Muy Claro			23 km	-0.19
			50 km	-0.06

Generalmente no se comprende bien el concepto de la niebla y es difícil caracterizarla físicamente, incluso la visibilidad no es usada comúnmente para determinar las condiciones de la niebla. Para describirla de una manera más cuantitativa, se han elaborado métodos de medición del tamaño de las partículas y la densidad. La comunidad de FSO utiliza principalmente la

visibilidad porque éstas medidas se han tomado en aeropuertos durante muchas décadas. Estas mediciones permiten caracterizar diferentes regiones y tener ciertas figuras estadísticas de un sistema FSO. Los datos han sido promediados durante años y se observa que la resolución no es muy alta.

Debido a que el ambiente micro climático como los ríos pueden inducir condiciones de niebla, los datos tomados en los aeropuertos algunas veces no son confiables. Se ha demostrado que los datos de visibilidad en aeropuertos cuentan con un buen porcentaje para la estimación mínima esperada. Esto es porque la ubicación fuera del área metropolitana y el clima inciden en la ciudad generalmente con una condición menos favorable para la niebla.

La distribución de la densidad de la partícula de niebla puede variar con el peso, haciendo el modelo de la niebla complicado. La cantidad limitada de información referente al impacto local de la niebla a un sistema FSO es uno de los mayores retos para esta industria.

2.6 Línea de vista

La operación de un sistema FSO requiere una línea de vista o LOS. La línea de vista consiste en que el transmisor y el receptor puedan verse el uno al otro, es decir, que no haya obstáculos en medio. Debido a que un haz infrarrojo se propaga y expande en una forma lineal, el criterio de línea de vista es menos estricto comparado con los sistemas de microondas que requieren un camino adicional llamado zona de Fresnel.

2.6.1 Determinación de línea devista (LOS)

La forma más fácil de determinar si existe línea de vista entre dos ubicaciones remotas es una observación visual. Para distancias mayores de una milla esto puede no ser trivial. Es necesario utilizar binoculares o telescopios en este tipo de escenarios. Muchos fabricantes de FSO incorporan un telescopio de alineación. Algunas organizaciones prefieren utilizar mapas sofisticados antes de enviar personal al campo. Existe gran variedad de programas que pueden lograr una alta resolución en mapas de topología tridimensional. Estos mapas incluyen información referente a edificios y sus ubicaciones específicas, lo cual permite determinar en dónde existe la línea de vista.

Uno de los escenarios más utilizados es de terraza a terraza. Es posible instalar el transreceptor detrás de una ventana en un edificio cuando el acceso al techo no está disponible e indispensable que la línea de vista exista. El ángulo en el que el haz atraviesa la ventana es crítico y debe ser lo más perpendicular posible, con una variación de 5 grados para reducir el haz que es reflejado hacia el mismo equipo en el receptor. Algunas ventanas poseen una cubierta especial que está diseñada para reflejar la luz infrarroja por lo que éstas ventanas reflejaran 60% de la señal o más.

2.7 Otros factores que afectan a FSO

Cuando se planea una instalación FSO es necesario considerar la aplicación prevista. Conociendo algunos factores, por ejemplo, si el menor tráfico se presenta por la noche, si se trata de datos de video de alta velocidad no interrumpibles, si la distancia es larga, si la ubicación se mantiene notoriamente

nublada, éstos factores influyen directamente en la selección del sistema FSO más apropiado.

2.7.1 Factor de la visibilidad

La visibilidad reduce la disponibilidad efectiva de un sistema FSO. Observaciones en un largo período mostraron que algunas ciudades, tienen un promedio de visibilidad menor que otras. Esto significa que para la misma distancia y el mismo sistema FSO en la primera se experimenta una mayor disponibilidad del sistema que en la segunda.

La baja visibilidad puede ocurrir durante un período específico de tiempo, por ejemplo: en un año, en horas específicas del día o en las primeras horas de la mañana. Especialmente en áreas costeras la baja visibilidad puede ser un fenómeno localizado. Esto significa que para la misma distancia de un sistema en una localidad experimentará menos tiempo desconectado que en otra.

Una solución para el impacto negativo de baja visibilidad es acortar la distancia entre dos terminales FSO. Esto provee un margen mayor de la potencia que alcanza el otro extremo del enlace óptico con lo se logra manejar las malas condiciones del tiempo como la niebla espesa. Caminos redundantes de operación pueden mejorar la disponibilidad si la visibilidad es limitada en un área local. Otra solución es utilizar un haz múltiple para mantener la disponibilidad del enlace.

2.7.2 Factor de la distancia

El impacto de la distancia sobre un sistema FSO se ocasionaría en tres maneras: Primero, en condiciones despejadas el haz diverge y el elemento detector recibe menos potencia; para un haz circular la pérdida geométrica se incrementa por 6 dB, cuando la distancia aumenta en un factor de dos. Segundo, la pérdida total de la transmisión del haz se incrementa con la distancia. Tercero, los efectos de dispersión se acumulan con distancias mayores por lo que el valor de la potencia se incrementará para mantener un valor determinado de BER.

Los sistemas FSO disponibles comercialmente están diseñados para la operación entre 25 a 5,000 metros. Para sistemas de alta potencia en satélites militares los sistemas son capaces de alcanzar hasta 2,000 Km. La mayoría de sistemas están hechos para distancias mayores de 1 km, incorporan tres o más láser para su operación en paralelo y así mitigar los efectos de la distancia. Es importante mencionar que en el vacío un sistema FSO puede alcanzar hasta miles de kilómetros.

2.7.3 Factor del ancho de banda.

En sistemas FSO estándar existen dos elementos que limitan el ancho de banda, estos elementos son la fuente de transmisión y el foto-detector. Cuando los LED son incorporados a un sistema FSO, el ancho de banda es de 155 Mbps. Cuando se utilizan fuentes láser, la velocidad puede ser mucho más alta. Los láser modulados directamente operan hasta 2.5 Gbps y están disponibles comercialmente para el uso en sistemas FSO. Una velocidad mayor de 10 Gbps puede ser lograda con moduladores externos a la salida del láser. Con respecto a los foto-detectores, algunos diodos pueden lograr hasta 1.250 Gbps para la

operación con longitudes de onda de 1.5 micrómetros. Los detectores de InGaAs se pueden utilizar y están disponibles comercialmente soportando anchos de banda de 10 Gbps e incluso más. A velocidades mayores la luz que es captada por un receptor y es convertida a electrones es muy baja y la sensibilidad está en función de la velocidad, esto significa que a mayores velocidad menor sensibilidad. La sensibilidad varía entre -43 dbm a 155 Mbps y -34 dBm a 622 Mbps. Cuando el sistema alcanza su límite de sensibilidad el ruido térmico impacta demasiado creando una tasa de error (BER) demasiado grande.

2.8 Selección de la longitud de onda para la transmisión

Como se ha mencionado existen ventajas al utilizar longitudes de onda para los sistemas FSO, también existen factores que se deben tomar en cuenta como el hecho que a $1,550 \mu\text{m}$ se le permite una potencia aproximadamente 100 veces mayor, por la seguridad de la vista. Esto es por que a ésta longitud de onda el fluido del ojo absorbe mucho más la energía del haz, previniendo que ésta viaje hasta la retina y provoque daño. La desventaja es que en éste tipo de láser el costo es mayor comparado con la longitud de 850 nm . Por lo que los ingenieros de diseño tienen que tomar en cuenta esto para la implementación de dichos sistemas.

Seleccionar la longitud de onda correcta incluye factores como la disponibilidad de los componentes, el precio, la distancia requerida, las consideraciones de la seguridad de la vista, entre otras. Las longitudes de onda más utilizadas son de 850 nm y de 1550 nm .

3. INTEGRACIÓN DE FSO EN UNA RED

La llegada de la tecnología óptica ha cambiado la dinámica de las redes globales, entre más y más elementos ópticos son desplegados, es evidente que las redes ópticas jugarán un rol en el futuro de la comunicación. La superioridad tecnológica de la comunicación óptica, el proceso de enviar voz, datos y video sobre las señales de luz, comparado a los modos alternativos de comunicación como enviar señales sobre pares de cobre, puede ser muy evidente.

3.1 La revolución de las redes ópticas

La tecnología óptica ha revolucionado a las redes modernas hoy en día, considerando el hecho de que en un lapso corto de tres años, la tecnología de multiplexación densa por división de longitud de onda o con sus siglas en inglés DWDM, ha incrementado la capacidad de una sola fibra, más delgada aún que un cabello humano, capaz de llevar todas las comunicaciones del planeta entero. Incluyendo cada llamada telefónica que se esté realizando, cada correo enviado y cada página WEB que esté siendo descargada, por cada persona del planeta, por ésta única fibra.

Los dispositivos ópticos amplificadores utilizados actualmente permiten llevar la comunicación a través de un haz de luz a más de 300 millas sin necesidad de ninguna ayuda electrónica en el camino. Si esto no es lo suficientemente impresionante con tecnología de corrección de errores y amplificadores, es posible extender estas señales de luz hasta varios miles de kilómetros.

Las redes ópticas, con grandes capacidades y flexibilidades para proveer y manejar datos, voz y video con ecuanimidad está permitiendo a las redes globales de comunicaciones enfrentarse con las demandas del Internet. El rol que las redes ópticas juegan actualmente como acceso para el Internet se convertirá incluso más crítico en el mañana. El Internet de la siguiente generación servirá como portal para aplicaciones de gran ancho de banda, gráficas 3D, video y audio en tiempo real.

Un concepto importante que se debe tomar en cuenta es que las redes ópticas están limitadas por la infraestructura física, esto es en el caso de la fibra óptica, por no encontrarse disponible en todas partes, lo cual hace imposible tener un alcance óptico en todo el mundo. FSO incrementa el alcance de las redes ópticas prometiendo que la red óptica sea un hecho factible.

3.2 Beneficios de las redes ópticas de la siguiente generación

Los primeros sistemas telefónicos llamados POTS han servido a la industria de las telecomunicaciones a lo largo de las últimas décadas, por su estabilidad legendaria y por adaptarse al incremento en el tráfico de las comunicaciones, con el uso de la tecnología óptica antigua. ¿Por qué cambiar una cosa buena implementando una nueva generación revolucionaria? Fue hecho no para resolver un problema, sino para agregar algunas características.

Para que una nueva tecnología reemplace a una antigua, la versión nueva debe satisfacer uno o los dos criterios siguientes:

- Habilitar funciones o servicios que sean posibles con la tecnología anterior, pero que es demandada por nuevas circunstancias.
- Realizar la tarea de la tecnología anterior pero de una manera más eficiente en términos de costo-desempeño.

Las redes ópticas de la nueva generación realizan ambos criterios, permiten dar servicios y funcionalidades que no se podían en la generación anterior y lo hacen a un costo más económico.

3.3 La tecnología SONET / SDH redes de primera generación

SONET ó red de sincronía óptica y SDH o Jerarquía digital de sincronía. SONET y SDH son versiones un poco diferentes del mismo estándar, donde SONET es adaptado a las redes de Norte América, y SDH adaptado para las pequeñas diferencias en Europa y en Japón. SONET/SDH son esquemas de multiplexación, agregando tráfico de comunicaciones a una tasa de datos más alta, permitiendo que la red pueda ser usada eficientemente. SONET fue desarrollado para solucionar un problema con la versión anterior PDH (Jerarquía digital pleo-síncrona) y definido incluso a tasas de datos más alta empezando con OC-1 (810 circuitos telefónicos simultáneos) y después el OC-192 (10 Gbps) la tabla IV muestra algunas de éstas definiciones.

Tabla IV. Comparación de tasa de datos entre PDH y SONET

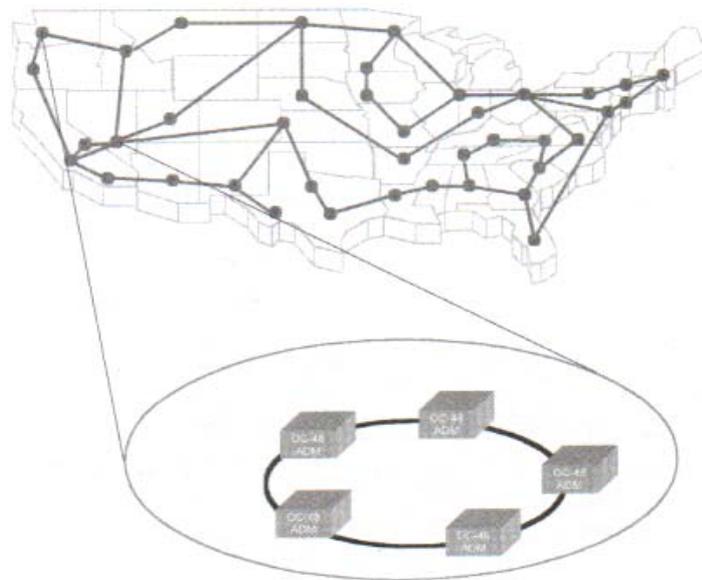
Estándares	Nombre	Velocidad		Circuitos de
		(Mbps)	Voz Equivalente	Capacidad Relativa
PDH	DS-O	0.064	1	Base
	DS-O (T-1)	1.544	24	24 veces DS-0
	DS-2 (T-2)	6.312	96	4 veces DS-1
	DS-3 (T-3)	44.736	672	7 veces DS-2
	DS-4 (T-4)	274.176	4,032	6 veces DS-3
SONET	OC-1	51.840	810	Base
	OC-3	155.520	2,430	3 veces OC-1
	OC-12	622.080	9,720	4 veces OC-3
	OC-24	1,244.320	19,440	2 veces OC-12
	OC-48	2,488.320	38,880	2 veces OC-24
	OC-192	9,953.280	155,520	4 veces OC-48

3.3.1 Limitaciones de las redes de primera generación

La tecnología óptica no es nueva para las redes de comunicación, las empresas que llevan toda la información a través de sus redes han desplegado fibras ópticas en sus redes desde los años 80. Las redes ópticas a las cuales nos referimos como redes de primera generación, tienen topologías de anillos y están basadas en los estándares SONET. En el ámbito de las telecomunicaciones se refiere a ella como anillos SONET ver figura 15. La topología de los anillos SONET incorpora enlaces de punto a punto entre los

nodos, los cuales permiten que el tráfico entre o salga hacia los hubs que se encuentra en los centros de población.

Figura 15. Anillos SONET con multiplexores ADM



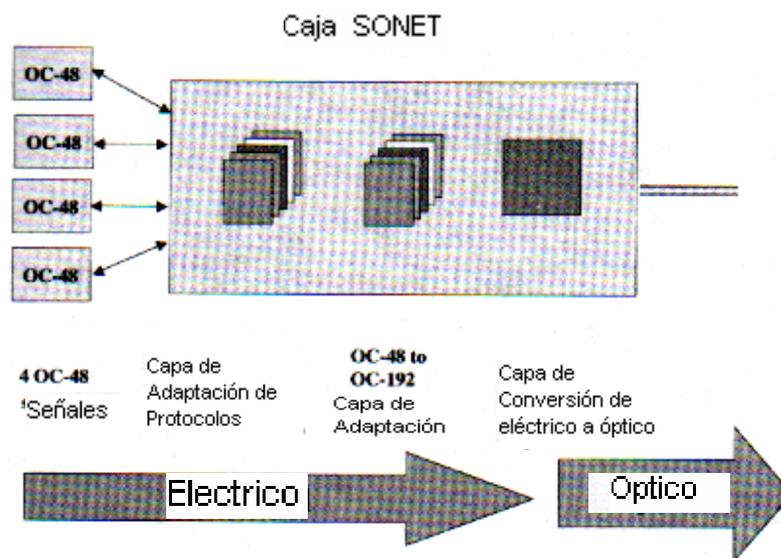
Fuente: Free-Space Optics, Dr. Heinz Willebrand, pag 70.

Estas redes están equipadas con ADM los cuales son equipos electrónicos que toman los datos a una baja velocidad como el OC-3 y OC-48, se multiplexan agregándolo a las tasas de velocidad más alta como el OC-192, donde la señal multiplexada es convertida a señales ópticas y llevada hacia la fibra.

El problema con SONET es que el equipo electrónico en las cajas ADM es específico tanto para la velocidad como para el protocolo (ver figura 16). Esto hace que la arquitectura SONET sea complicada, rígida y costosa. Adicionalmente, el tamaño físico de estos equipos es significativo, siendo esto un costo considerable para un cuarto de equipos que contenga a los mismos.

Cada equipo SONET posee una salida máxima de 10 Gbps para obtener más ancho de banda, por ejemplo 20 Gbps necesitaran dos fibras para colocar dos cajas SONET, con lo cual estaríamos duplicando el costo.

Figura 16. Diferentes capas de un sistema complejo SONET.



Fuente: Free-Space Optics, Dr. Heinz Willebrand, pag 71.

3.4 Evolución de la segunda generación

Existe la necesidad para la evolución de la generación anterior a las nuevas redes ópticas y ésta se presenta en la figura 16. Considerando el número de capas que comprometen a la generación anterior, en donde las capas de ambos lados son los equipos ADM que consisten de dos elementos:

- El multiplexor y demultiplexor, que convierte las señales eléctricas en señales ópticas y viceversa.
- El cross conector, que swichea electrónicamente las señales agregadas a la comunicación.

Las redes ópticas de nueva generación eliminan los equipos ADM y simplifican significativamente las redes de comunicación.

Las redes ópticas de nueva generación incorporan tres elementos revolucionarios.

- Amplificadores ópticos
- DWDM
- Switches ópticos.

Juntos estos elementos crean una versatilidad extrema y poderosa en las redes de comunicación. La eliminación de las capas de SONET proveen grandes ventajas, aunque este es el único beneficio presentado por las redes ópticas.

3.4.1 Necesidades de ancho de banda

Las redes ópticas de la nueva generación son la única solución para la demanda explosiva del ancho de banda. Ninguna otra tecnología puede mantener este paso ya que el tráfico de Internet se esta duplicando cada año. La tecnología DWDM ha incrementado la capacidad de transmisión por fibra en un rango de 50 veces durante los últimos tres años. La tabla V compara la capacidad entre la tecnología óptica y eléctrica.

Tabla V. Capacidades relativas para la tecnología Eléctrica y Óptica.

Tecnología	Medio	Máximo	Máxima distancia
		Ancho de Banda	(Sin amplificador)
DSL	Par de cobre trenzado		
	Alto DSL	-1.5 Mbps*	9,000 ft
	ADSL	-8 Mbps	18,000 ft
	VDSL	-52 Mbps	1,000 ft
Cable óptico	Cable Coaxial	60 Mbps	12,000 ft
DWDM	Fibra	1.6 Tbps**	60 millas

*Mbps = Megabits por Segundo
 **Tbps = Terabits por Segundo

3.4.2 Simplificando las redes Switchadas

La tecnología óptica de switcheo puede simplificar y reducir los costos de las redes. Actualmente las funciones de switcheo en redes ópticas se realizan por medio de equipos opto-electrónicos. La utilización de switches opto-electrónicos hace necesario que las señales pasen por un proceso de regeneración costoso. En éste proceso las señales ópticas son convertidas en ondas eléctricas, procesadas electrónicamente y regeneradas, donde al final son convertidas de regreso a señales ópticas. Este proceso es conocido como conversión O-E-O en redes de multi-longitudes de onda, las cuales llevan señales de múltiples longitudes de ondas o colores de luz, la regeneración requiere transmisores y

receptores para cada longitud de onda, sumando un costo y complejidad a los nodos.

Para una señal que únicamente pasa a través del nodo (entre el 30% y 80 % del tráfico), la regeneración puede ser innecesaria. Switchar estas señales de luz en el dominio óptico y evitar el proceso de regeneración puede salvar substancialmente los costos y eliminar controles complejos de la electrónica. No es necesario eliminar por completo la electrónica de switcheo de los equipos, sino minimizar el rol de la electrónica para el monitoreo y el desempeño de las funciones de switcheo en el dominio óptico.

3.4.3 Preveer transparencia

Las redes ópticas de la nueva generación son independientes del protocolo y de la velocidad de los datos. A diferencia de la transmisión eléctrica, las redes ópticas son transparentes al contenido de la señal, al protocolo y a la velocidad de los datos. Después de que las interfaces ponen una señal eléctrica en el dominio de la luz, la red óptica no diferencia el contenido de dichas señales, sin importar si es voz, video o datos. Así mismo, no diferencia el protocolo IP, ATM o Gigbit Ethernet, ni la velocidad de los datos. Esto es de gran beneficio para las redes ópticas por que permite que las redes trabajen con las señales de todos los diferentes protocolos. Únicamente las interfaces ópticas electrónicas deben ser cambiadas al final de la red.

3.4.4 Escalabilidad

Las redes de la nueva generación óptica son de fácil escalabilidad. En las redes SONET, una mejora requiere un cambio en cada caja a lo largo de toda la red. Considerando 4 nodos OC-48 que necesiten actualizarse a OC-192, se realiza reemplazando los cuatro OC-48 por cuatro OC-192, en contraste con las redes ópticas de DWDM, en éste caso el transporte de DWDM en los nodos no necesita ser reemplazado. Lo único que necesita es reemplazar las interfaces electrónicas de 2.5 Gbps por las de 10 Gbps. Las redes SONET tienen un límite comercial más bajo para la máxima velocidad de datos. En cambio en una red óptica dependiendo del número de canales en el sistema DWDM puede ser escalado hasta cientos de Giga bits por segundo e incluso hasta Terabits.

3.4.5 Mejorando la confiabilidad

Las redes ópticas tienen inherentemente más confiabilidad que las que contienen partes electrónicas, las cuales reducen los puntos de falla en una red. La transición eléctrica genera calor y éste es la principal causa de falla en los dispositivos de comunicación. La comunicación óptica no posee fricción y no genera calor excepto cuando la señal es convertida de regreso al formato electrónico. Empleando componentes ópticos y dispositivos para reducir las capas electrónicas en las redes de nueva generación hacen las comunicaciones más eficientes y menos propensas a fallos.

Desde la perspectiva del dueño de una red, podemos tener la siguiente ecuación: por cada \$35 gastados en capital para construir una red, se gastan \$65 en mantenimiento, estos costos incluyen energía, inventarios, equipos de control de ambiente y temperatura, entre otros. La tecnología óptica puede

reducir estos costos significativamente, ya que los componentes ópticos y los módulos necesitan menos potencia que su contraparte electrónica. Los componentes ópticos son más confiables y hace que las fallas sean menos frecuentes, reduciendo así los costos de reparación. El equipo óptico tiene dimensiones más reducidas lo cual es conveniente para cualquier central de comunicaciones.

3.5 Clasificación de las redes ópticas globales

Las redes de comunicaciones globales pueden clasificarse y segmentarse de muchas maneras, una de ellas es por protocolos o por formatos, de la señal que es transportada por la red. Una red que transporta tráfico IP puede ser llamada RED IP, mientras que otra que transporta tráfico ATM puede ser clasificada como una RED ATM. Una segunda clasificación envuelve el contenido de tráfico, voz, datos o video. Un tercer esquema de clasificación está en las bases geográficas: larga distancia, metropolitana y red local de acceso.

Para redes ópticas, el esquema de clasificación más adecuado es por base geográfica, esto debido a que una red óptica es independiente del contenido de la señal, puede llevar voz, video o datos con ecuanimidad. También es independiente del formato de la señal, ya que puede llevar IP, ATM, Frame Relay o Gigabit en longitudes de onda separadas simultáneamente sobre la misma red óptica. Es importante clasificar la red en términos geográficos, de capacidad, de desempeño y requerimientos de costos para las diferentes dimensiones en que una red pueda variar significativamente.

Tomando ésta medida las redes ópticas pueden ser clasificadas en tres segmentos principales:

- **Redes de larga distancia:** Éstas cubren un área geográfica grande, más de 100 millas que conectan la mayoría de ciudades y pueden ser terrestres o submarinas.
- **Redes de área metropolitana:** Las redes de área metropolitana o MAN se refieren a las redes de segmentos que cubren una área metropolitana como Nueva York o Atlanta. Una red metropolitana puede cubrir entre 10 a 200 millas. Las redes metropolitanas pueden estar divididas en dos partes una que une a las oficinas centrales con los cubos de alta capacidad de tráfico y la otra que une las oficinas centrales con los clientes.
- **Redes de área local:** También llamadas redes de acceso, las redes de área local LAN, son de distancias cortas que cubren de unos cuantos cientos de pies o 10 millas. Utilizando cable o teléfono en un vecindario, la red conecta varios edificios en un campus o incluso una red dentro de un edificio de apartamentos.

3.6 FSO en la última milla

Si observamos una red óptica metropolitana, veremos dos segmentos primarios: La capa metropolitana y El acceso metropolitano. En donde se han logrado mejoras e innovaciones en estos segmentos, anticipando la explosión del ancho de banda.

Un tercer segmento es el perímetro de la red o la llamada última milla, el cual representa la mayor parte de los usuarios de la red que son ignorados principalmente por formar parte del 95% de los edificios comerciales que no están conectados con fibra. Ellos representan la fuerza detrás del crecimiento óptico de las redes metropolitanas. Existe una abundancia de fibra que no ha alcanzado toda su capacidad en las redes metropolitanas porque el tráfico del usuario final no ha alcanzado este nivel de la red. La respuesta está en FSO,

porque brinda capacidad al usuario para llegar a la red de alto ancho de banda de una forma rápida, costo efectivo y confiable.

3.7 Acceso óptico a edificios

En el mercado, el equipo para enlaces es limitado debido a que no existen edificios con varios clientes que requieran de un acceso de alta capacidad, por ejemplo el mercado en Estados Unidos es de aproximadamente 125,000 edificios con más de 20 clientes en un mismo edificio.

Hoy en día estos clientes realizan negocios directamente con varios proveedores para el acceso de sus servicios. Generalmente los dueños de los edificios limitan la entrada de los servicios, impidiendo la instalación en las terrazas. Actualmente se construyen edificios con redes internas que reducen los problemas de comunicación y proveen una plataforma de múltiples servicios para los clientes. Esto generalmente aumenta la velocidad de instalación por los servicios, haciéndolos más competitivos y logrando una expansión en sus servicios.

El mercado puede ser alcanzado de varias formas, lo cual multiplica las oportunidades para los vendedores de equipos ópticos. Algunos edificios pueden beneficiarse de las redes de nueva generación SONET. Las Redes SONET son capaces de soportar el transporte de estándares de voz así como proveer conexiones cruzadas para realizar conexiones de circuitos de voz en las redes. Esto da una eficiencia mayor a las redes de área metropolitana para múltiples servicios. Los proveedores de acceso óptico IP pueden argumentar que su bajo costo en infraestructura se puede desplegar muy bien para el acceso en el edificio por que están basados en tecnologías de Ethernet. Esto

permite una transmisión local entre los proveedores de servicio de Ethernet que soportan varios servicios adicionales en su arquitectura de anillos.

El reto para los proveedores de IP óptico es entregar un sistema que verdaderamente soporte varios tipos de servicios. Hasta la fecha la capacidad frecuentemente prometida, muy raras veces es entregada y si se utiliza un esquema propietario puede ser tan costosos, que sobrepasen los límites establecidos.

3.8 Servicios en el ancho de banda óptico

Cuando se agrega una capa óptica en la red se obtienen nuevos métodos de protección y restauración. En las redes ópticas presentes como ATM y SONET, la capa óptica posee su propio mecanismo de protección independiente, diseñada para trabajar junto con el sistema de red. La dificultad aquí es que cierto número de estas funciones es redundante o ineficiente. Los mecanismos de protección en las capas ópticas tienen la ventaja de ser independientes de la tasa de los datos y del protocolo.

La coordinación de la protección y restauración entre las capas de la red, es un proceso complicado. En las primeras etapas del mercado de las redes ópticas SONET, los equipos son controlados por programas. Hoy en día un sistema puede controlar fácilmente 16 canales. El programa que se requiere para manejar estas longitudes de onda independientes y lograr restaurarlas en topologías complejas no está disponible todavía.

El crecimiento de las redes WDM será similar al de las redes SONET, pues ambos sistemas son orientados a la conexión de redes multiplexadas y emplean inteligencia distribuida para facilitar la protección del switcheo. El

beneficio potencial de las protecciones en las capas ópticas y la restauración incluye lo siguiente:

- Switches multigigabits y routers en el dominio óptico
- Reducción de las funciones electrónicas y del costo por medio de la migración a la protección de las capas ópticas.
- La creación de una plataforma común de monitoreo y sobrevivencia para todos los servicios de la red.

3.9 FSO en redes metropolitanas

Ahora que tenemos el concepto general de las redes, debemos conocer en que parte encaja FSO. La respuesta es simple, FSO en una tecnología óptica que puede darnos conectividad en cualquier punto de la red SONET. FSO tiene la característica de estar en la capa 1 o capa física de una red y es transparente al protocolo, siendo capaz de integrarse y operar con una gran variedad de elementos e interfaces. Esto le permite ser parte de la familia de una red óptica en crecimiento.

A continuación se presentan algunas aplicaciones usando FSO:

- **Extensiones de red metropolitanas:** FSO puede ser desplegada para extender una red metropolitana ya existente de anillo o para conectar una nueva red. Este enlace generalmente no alcanza la última milla ni al usuario.
- **Empresas:** La flexibilidad de FSO permite ser desplegada en muchas aplicaciones de empresas tales como LAN a LAN, en conexiones para áreas de almacenaje, etc.

- **Conectividad de la última milla:** Estos son enlaces que alcanzan al usuario final, pudiendo ser enlace punto a punto o punto multipunto, con conexiones de estrella.
- **Complemento a la Fibra:** FSO puede ser instalada como un enlace redundante para back-up de fibra, la mayoría de operadores que instalan fibra para aplicaciones de negocios conectan dos fibras por seguridad y confiabilidad. En vez de instalar dos fibras los operadores pueden optar por instalar un sistema redundante FSO.
- **De Acceso:** FSO puede ser instalada en aplicaciones de acceso tales como acceso a servicios de Gigabit Ethernet o los proveedores de servicios puede utilizar FSO para llegar a los sistemas de alta capacidad en algún sitio remoto.

4. IMPLEMENTACIÓN DE UN ENLACE FSO

Como en la mayoría de sistemas, también en FSO es primordial y extremadamente importante tener una instalación correcta para su funcionalidad y estabilidad de larga duración. Si la instalación se realiza correctamente, el sistema FSO funcionará sin fallas por un largo período de tiempo. Las tecnologías FSO tiene su propia red de operaciones y requerimientos, algunos de ellos son únicos para los equipos de comunicación láser.

Es necesario mencionar que para el éxito de cualquier trabajo es primordial realizar una planeación previa tomando en cuenta la mayor cantidad de aspectos posibles, minimizando los contratiempos. El planeamiento debe tomar en cuenta las necesidades desde la perspectiva del cliente como desde la perspectiva de la red. Para evaluar los requerimientos de la red es crítico determinar qué productos usar, de qué fabricante y además los requerimientos del usuario, para determinar qué tipo de sistema FSO debemos utilizar, es decir, qué velocidad, qué interfase, etc.

Para la instalación se debe tomar en cuenta el ambiente, incluyendo los patrones del clima, la distancia del enclave, la línea de vista, y demás.

La instalación de un sistema FSO incorpora pasos múltiples, pero después de haber completado la planeación, la instalación toma solamente de 2 a 4 horas.

Los pasos principales para la instalación son los siguientes:

- Estudio de campo
- Montaje del equipo
- Instalación de la infraestructura (cableado, energía)
- Alineación del sistema
- Verificación del enlace

4.1 Estudio de campo

La ubicación de los puntos de instalación es uno de los pasos más importantes para el buen funcionamiento del sistema FSO que puede ser hecha por un técnico o por un proveedor de servicios entrenado por el personal de la fábrica, además incluye obtener la información necesaria que será importante para su instalación. Cada fabricante provee con los equipos las instrucciones y sus requerimientos, con esto podremos generar un listado que debemos llenar en el estudio previo a la instalación.

Generalmente este listado es un cuestionario diseñado para obtener la respuesta de las preguntas más importantes antes de llevar el equipo al sitio del montaje. Este cuestionario debe incluir los siguientes puntos:

- ¿Existe línea de vista?
- ¿Qué tipo de fuentes de poder se requieren?
- ¿Cuál es el tipo de aplicación?
- ¿Cuáles son los objetivos?

El estudio de campo incluye una serie de pasos que aportan la información necesaria para una instalación exitosa. Es recomendable incluir dentro de la información fotos de los puntos para adjuntarlos al reporte final que se tendrá después del estudio de campo, esto nos ayudará en un futuro ya que una imagen visual aporta mucha más información que un reporte escrito.

La mayoría de fabricantes proveen un entrenamiento inicial con la venta de los primeros equipos. El objetivo es que la persona que realice la instalación sea autosuficiente para efectuar sus propios estudios de campo e instalaciones. Un estudio de campo no es un arte complicado, más bien es algo con muchos detalles. Algunos vendedores cobran el estudio de campo como parte del

entrenamiento y las tarifas varían de \$300 a \$2,000 dependiendo del tamaño del proyecto y del número de sitios.

4.1.1 Configuración general de los sitios

El primer paso es determinar la configuración general del sitio, esto es de gran ayuda para desarrollar un bosquejo inicial de los edificios, documentando sus posiciones, aspectos y posteriormente las distancias entre los dos puntos. En la mayoría de los casos el cliente tendrá un esquema del o los enlaces propuestos. Es necesario observar los detalles en el esquema ya que en la mayor parte de los casos se exigen fotografías de los puntos de instalación.

4.1.2 Información general

Es muy importante verificar que se tengan las direcciones exactas de ambos sitios, pues esto servirá para determinar las distancias entre los enlaces tanto como la línea de vista. Luego de verificar las ubicaciones, la distancia y la línea de vista, el siguiente paso es determinar la ubicación del montaje en el edificio. Seleccionar la ubicación del punto de instalación y el tipo de montaje es el paso más importante del estudio de campo.

Cuando se considera el punto de instalación se tienen 2 opciones: terrazas o ventanas, ver figuras 18 y 19. Cuando se instala detrás de una ventana, es necesario revisar la especificación de la distancia del equipo que provee el fabricante, la especificación del factor de reducción para vidrios, incluyendo también el mínimo y máximo ángulo con el vidrio. Instalar detrás de una ventana puede ser una opción favorable, por que reduce los impactos del clima como el acumulamiento de la nieve. En algunos casos se puede minimizar costos con la reducción de la distancia entre el equipo y la fuente de poder, es

decir, se produce un ahorro de cableado e instalación, eliminación de protección contra eléctricos, además del ahorro del pago de derechos por la instalación en la terraza.

Figura 17. Instalación en una terraza



Fuente: Free-Space Optics, Dr. Heinz Willebrand, pag 126.

Los obstáculos que encontraremos en la instalación de una ventana incluyen la acumulación de partículas de hielo, acumulación de partículas de polvo o contaminación que obscurezcan la ventana. Existe el peligro de una interferencia con equipos que utiliza el personal, tales como controles remotos y equipo láser, y una elevación inadecuada con respecto a la línea de vista, además también se debe tomar en cuenta el centelleo atmosférico que se explicó en el capítulo 3.

Figura 18 Instalación detrás de una ventana.



Fuente: Free-Space Optics, Dr. Heinz Willebrand, pag 127

4.1.3 Línea de vista

FSO es una tecnología de línea de vista, en otras palabras si una persona puede ver el lado opuesto al cual deseamos conectarnos, se podrá instalar y conectar el enlace. Esto suena simple pero desde luego es un poco más complicado que eso, pues se deben tomar varias consideraciones para determinar la línea de vista. Algunas de éstas son fáciles de describir, mientras que otras deben ser consideradas dependiendo del sitio y del medio ambiente en el que se encuentran. Uno de los pasos elementales en el proceso de la determinación de línea de vista es tomar fotos del enlace propuesto en las

ubicaciones de un punto al otro y luego analizarlas. Por ejemplo en la figura 20, ésta imagen nos ayudará a considerar las obstrucciones potenciales como el crecimiento de los árboles, nuevas construcciones, terrazas intermedias, chimeneas y fuentes de humo. Algunas de estas obstrucciones pueden pasar desapercibidas a menos que se tome el tiempo necesario para el análisis. Debido al comportamiento dinámico de la naturaleza, la determinación de la línea de vista no es una ciencia exacta, más bien es un ejercicio de análisis y experiencia.

Figura 19. Imagen de línea de vista hacia el punto remoto.



Fuente: Free-Space Optics, Dr. Heinz Willebrand, pag 127.

4.1.4 Distancia del enlace

Uno de los pasos en el estudio de campo es la determinación de la distancia del enlace, esta es medida como la distancia entre las cabezas de los dos transmisores. Es importante conocer la distancia exacta ya que estos equipos poseen un límite y esto se refleja en el costo del equipo, estando restringida directamente por las condiciones del clima como la niebla espesa y la potencia.

El exceso de potencia en un sistema con una distancia muy corta puede saturar el receptor y por ende el enlace no es funcional, por otro lado la falta de potencia puede causar una disminución en el margen del enlace a una distancia muy larga.

Existen varios métodos para determinar la distancia del enlace: El primero es realizar medidas utilizando cinta métrica o rueda de medición. El segundo es utilizar un GPS para obtener las coordenadas y luego calcular la distancia. El tercero es por medio de un software con mapas en 3D que posea la información detallada de los sitios en los que se instalará. El método recomendado es el de GPS, pues proporciona una medición en línea recta y una muy buena exactitud de +/- 5 mts. Otro método para realizar la medición es por medio de un medidor de distancias cortas con láser o viewfinder, su nombre en inglés.

4.1.5 Consideraciones de montaje

Después de ubicar el punto de montaje, es necesario instalar una plataforma sólida para la instalación. Es importante que el punto de montaje sea estable ya que cualquier pequeña fluctuación puede causar un desajuste en la alineación del enlace. El concreto es una buena opción siendo mejor que el metal, y este mejor que la madera. Las esquinas son mejores que las paredes y las paredes son mejores que la terraza.

Cada sistema FSO viene con un montaje universal que es utilizado para su montaje estándar. Los montajes están diseñados para prevenir la corrosión (aluminio, acero inoxidable, galvanizado), además debe ser fuerte y proveer la rigidez hacia el edificio. Existen 2 tipos de terraza:

- **Montajes penetrantes:** Estos montajes están anclados en el techo.
- **Montajes no penetrantes:** Generalmente son mantenidos en posición por objetos pesados y pueden estar sellados con algún pegamento para evitar desajustes en la alineación.

Los edificios altos requieren una planeación cuidadosa del montaje. La carga del viento y la respuesta térmica puede crear movimientos y oscilaciones apreciables. La dispersión del haz y los mecanismos de rastreo se pueden utilizar para disminuir el efecto de estos movimientos y mantener el haz lo mejor alineado posible.

Otro punto a considerar es que muchos equipos no funcionan cuando la luz del sol pega directamente sobre el lente receptor. La saturación del foto detector hará que el enlace se caiga por unos minutos hasta que el sol cambie de posición y esto se repetirá por varios días en el período del año en el que éste alineamiento ocurre. Para eliminar este problema se pueden colocar los receptores de tal manera que alguna barrera bloquee el sol.

4.1.6 Consideraciones de energía

Después de montar el sistema es necesario realizar el trabajo eléctrico para asegurar la correcta instalación de las fuentes de poder en el sistema.

Cada enlace FSO viene con una variedad de requerimientos de energía, incluyendo 110 y 220 Voltios a 50 ó 60 Hz AC, también puede ser de 24 y 48 Voltios DC. Debemos tener presente que el cliente generalmente posee ciertos

requerimientos o restricciones que se refieren a la energía y se deben tomar en cuenta en la realización del estudio de campo para preparar la instalación.

Es recomendable utilizar un circuito independiente para la alimentación de cada equipo. Para reducir cualquier interrupción es indispensable asegurar que la energía no falte, inclusive en un apagón por lo que se puede colocar UPS o bancos de baterías según sea el caso. Se recomienda instalar protecciones contra transientes, además es importante verificar los requerimientos específicos de cada fabricante para el modelo seleccionado.

4.1.7 Consideraciones de cableado

Dependiendo del equipo, así serán las interfaces y el cableado ya que estos pueden ser de cobre UTP Cat 5, BNC con cable coaxial o fibra óptica con conectores SC o ST.

Los modelos que incorporan un T1 o un E1 utilizan cable UTP o coaxial, para una red de 10 Mbps Ethernet se utiliza cable UTP o fibra y para los demás de mayor capacidad se utilizan interfaces de fibra óptica. Los cables de fibra óptica ofrecen ventajas de mayor distancia y mayor ancho de banda, eliminando las protecciones contra transientes que se utilizan para UTP y coaxiales. Si los dispositivos de acceso a la red no poseen una interfase de fibra óptica será necesario agregar un módulo para esta conversión de fibra a cable UTP.

Los dos problemas potenciales en una instalación, asumiendo que se ha realizado un estudio de campo apropiado, es el cableado y el ajuste del alineamiento del transmisor. Si se contrata a una persona por separado para la instalación del cableado es necesario hacer pruebas de medición para certificarlo.

Cualquier cable que llegue hasta la terraza debe poseer una armadura para exterior o ir en conduit. La protección contra transientes o descargas

atmosféricas y las uniones entre las cajas deben ser a prueba de agua para intemperie y estar montadas a un nivel fuera del alcance del agua.

Debido al leve incremento en el costo, es preferible utilizar una fibra de 6 hilos en vez de una de 4, proveyendo redundancia para el enlace en el caso de que una de las fibras se rompa, también puede servir para gestión del enlace y diagnóstico de interfaces.

4.1.8 Configuración del enlace para la instalación

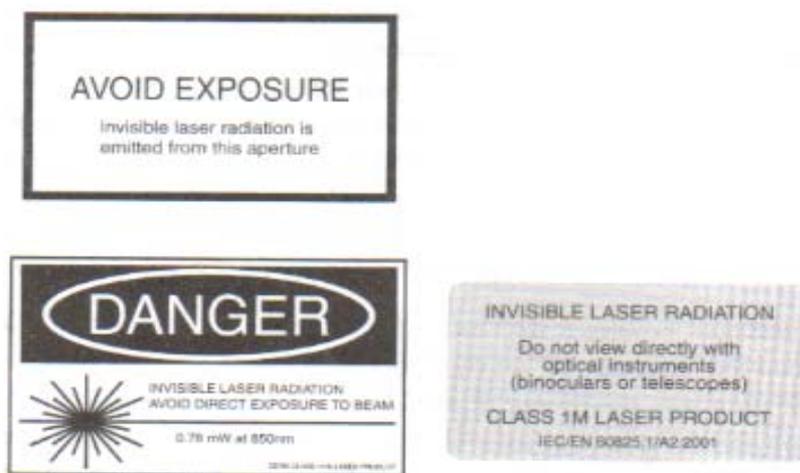
Debido que se pueden instalar diferentes configuraciones para un enlace FSO como punto a punto, en estrella, anillo o punto a multipunto, es importante como parte del estudio de campo tomar en cuenta todos los factores pertinentes para dicha instalación.

4.2 Instalación de la infraestructura

Después de haber terminado el estudio de campo, estamos listos para la preparación de la instalación del enlace.

Es necesario mencionar que cada fabricante provee detalladamente las instrucciones de instalación según el modelo específico. Estas instrucciones contienen advertencias importantes referente a la seguridad, ver figura 21, además contiene otras instrucciones que los instaladores deben seguir cuidadosamente.

Figura 20. Advertencias típicas que acompañan a los equipos FSO.



Fuente: Free-Space Optics, Dr. Heinz Willebrand, pag 130.

La instalación de un enlace FSO comienza por preparar todas las herramientas que se requerirán en la instalación y el equipo que será instalado. Es recomendable armar el kit de instalación para terraza, así evitamos cualquier retraso en la instalación, es decir, adelantar todo lo posible antes de llegar al sitio.

4.3 Montaje del equipo.

El montaje del equipo puede ser una tarea difícil dependiendo de la ubicación escogida. El montaje debe estar anclado a la estructura de soporte por medio de los agujeros hechos para el efecto, frecuentemente se utilizan seis o más. Se debe utilizar únicamente acero inoxidable para evitar la corrosión.

Si es necesario instalar en una superficie que no sea sólida como es la madera, hojas de acero, etc., es adecuado instalar una plancha relativamente grande entre el montaje y la superficie de instalación. Debemos recordar que el montaje debe ser una roca sólida, es decir, que debe cumplir los requerimientos de rigidez para lograr una buena exactitud a largas distancias. La sujeción del equipo al montaje también debe ser realizada con acero inoxidable.

4.4 Instalación del cableado y la energía

La instalación del cableado al equipo se puede realizar en una caja separada. Para realizar la conexión de la energía al equipo es necesario leer detenidamente los requerimientos en los manuales, además se debe cerciorar que el calibre de los cables sea el adecuado para soportar la carga del equipo y revisar de antemano los circuitos de protección como flipones o fusibles en cada caso.

4.5 Seguridad

Al realizar la instalación es necesario tener en cuenta ciertos parámetros de seguridad para los sistemas FSO.

Es recomendable trabajar en equipos de 2 personas, llevar un kit de emergencia y nunca ver directamente a la apertura del enlace cuando el láser esta activo, Para una referencia en el área de seguridad en la vista ver el anexo I.

4.6 Alineamiento

Para asegurar el funcionamiento apropiado del enlace FSO, el sistema debe estar bien alineado, generalmente una persona puede realizar la instalación de un sistema FSO de corto alcance. Para un enlace de un rango mayor es recomendable que 2 personas realicen la alineación para reducir el tiempo que lleva el proceso de la instalación, estando uno en cada lado al momento de la alineación.

El proceso de alineamiento varía dependiendo del equipo, por lo general es un proceso de exactitud y de dos pasos de alineamiento.

El primer paso es por supuesto el alineamiento de curso, el propósito de este paso es la alineación hacia el equipo remoto antes de encender los equipos. El alineamiento de curso se realiza utilizando un telescopio de alineación, una cámara interna de video o simplemente con un alineamiento aproximado hacia el equipo remoto. Luego se debe encender el equipo. El segundo paso es el alineamiento fino. Después de que los equipos se han encendido, ambas estaciones transmitirán una señal óptica. Algunos equipos poseen un medidor de retroalimentación de la señal que se refleja en el equipo remoto para indicar la alineación óptima. Los equipos de FSO poseen varias herramientas para ayudar al alineamiento, una de ellas es una barra de leds para indicar la cantidad de luz recibida del equipo remoto, generalmente es llamada fuerza de la señal recibida o por sus siglas en inglés RSSI. Algunos modelos se conectan a una laptop en la cual se puede observar de una manera más sofisticada la señal de RSSI incluyendo el límite de recepción en un estado de encendido o apagado. El estado de apagado o encendido se utiliza también para sistemas multi láser, además se pueden realizar pruebas con loops o ver la temperatura interna, atenuar la señal para enlaces de corta distancia y así prevenir la

saturación, algunos diagnósticos de la lectura de voltaje y demás. En algunos modelos únicamente se incluyen switches para estas funciones.

Es importante mencionar que el equipo está leyendo la señal de recepción RSSI de su unidad receptora del foto-diodo, por lo que ésta es la medición de la alineación del equipo remoto y no del propio, es decir, la recepción del equipo no es afectada por su propio movimiento sino por el equipo remoto. En este caso la alineación es una operación de dos personas y la unidad remota mide el nivel de RSSI para el alineamiento del equipo local. El nivel de RSSI variará dependiendo del propio modelo del equipo que se esté utilizando, de la distancia y de las las condiciones climáticas.

Los equipos que se utilizan para enlaces de larga distancia frecuentemente incluyen como mínimo un sistema de alineamiento óptico con telescopio el cual rechaza la luz infrarroja para la seguridad de la vista para una alineación inicial. Algunos equipos incluyen una cámara de video que facilita de gran manera la instalación en enlaces de largas distancias.

Cuando se utilizan telescopios para la alineación, es necesario revisar las instrucciones del fabricante para las distancias mínimas de utilización del telescopio que viene incluido en el equipo.

La mayoría de equipos poseen un sistema de alineamiento fino, utilizado para realizar la alineación final. Es extremadamente importante asegurar todas las posiciones con los tornillos de sujeción cuando se ha realizado la alineación final y evitar que esta se pierda.

4.7 Conexión a la interface de red

Después de la alineación del sistema, el último paso es la conexión hacia la red y luego encender el equipo. Para realizar esto, conecte las fibras entre el equipo de la red y la interfase de datos del equipo FSO.

4.8 Verificación del enlace.

La verificación es el paso final para completar el proceso de instalación y asegurar la integridad del sistema. La verificación se puede realizar de dos maneras, por medio de la medición de la tasa de errores BER, por sus siglas en inglés, y con la transferencia de un archivo.

El método que utiliza un dispositivo para medir el BER consiste en emplear 2 equipos de medición llamados BERT, los cuales envían paquetes de información a través del sistema FSO que almacena el tiempo en el que no existe ningún error en la información transmitida. Existen dos maneras, una es colocando un BERT en cada extremo haciendo una medición punta a punta y la otra es poner un BERT en uno de los extremos y un loop en el lado remoto. De esta manera la información enviada por el equipo atravesará el enlace FSO dando la vuelta en el extremo opuesto y regresando hasta el equipo de medición. Al final la medición de la tasa de error debe ser menor a 10^{-9} .

El método de transmisión de un archivo no requiere de equipos especiales, más bien es una transferencia de un archivo de un tamaño de 5 a 100 MB. Dependiendo de la velocidad del enlace y tomando el tiempo que le lleva transferirlo, es posible medir el desempeño del enlace. Si el sistema opera en una forma normal y tomamos en cuenta el encabezado que agregan los protocolos de transmisión, la velocidad de transmisión del archivo debe ser mayor del 80% del máximo ancho de banda del enlace, recordando siempre en convertir los MB (mega bites) en mega bits.

4.9 Mantenimiento y soporte del sistema

La mayoría de los sistemas de comunicaciones FSO son libres de mantenimiento, ya que han sido diseñados para soportar las condiciones del

clima y las variaciones de temperatura. El diseño de estos sistemas los hace durables y el tiempo medio entre fallas o MTBF de estos sistemas varia entre 15 a 23 años.

El mantenimiento se reduce básicamente a limpiar la ventana de transmisión del equipo, utilizando únicamente un paño liso y humedecido con agua, siguiendo estrictamente las recomendaciones de mantenimiento del fabricante.

No se debe abrir la caja del equipo FSO pues puede ser peligroso y además puede invalidar la garantía del equipo.

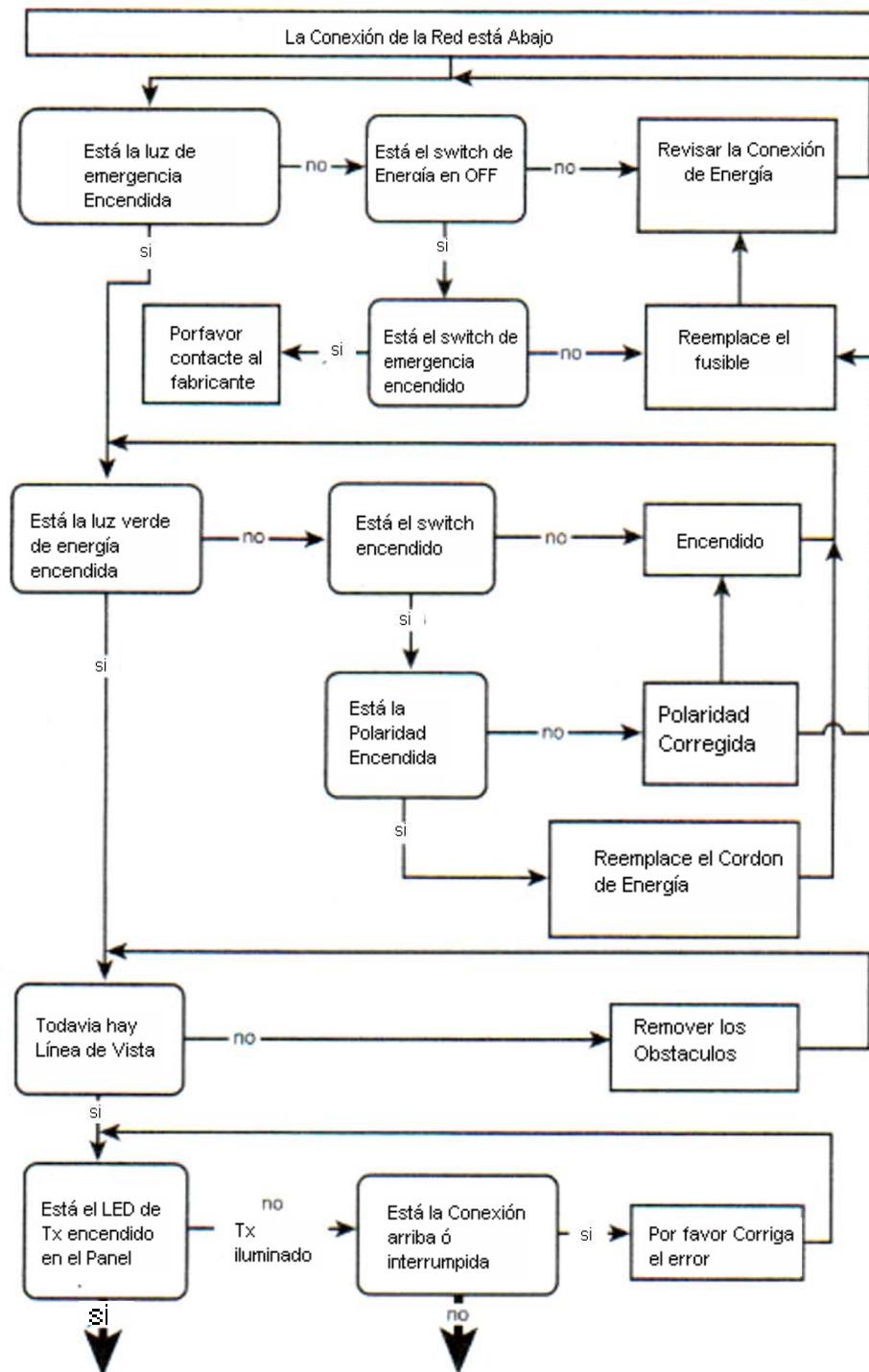
Se debe tener mucha precaución al tocar los equipos pues se requiere muy poco movimiento para desalinearse el enlace.

La mayoría de fabricantes proveen una garantía de un año, algunos la dan por tres e incluso dan garantías extendidas. Los términos de estas garantías varían de fabricante a fabricante, pudiendo incluir el envío del equipo para la reparación en fábrica, teniendo un equipo de repuesto o también la participación en un programa de intercambio para el reemplazo del equipo dañado por una tarifa razonable.

Como cualquier sistema este puede llegar a fallar y es muy importante que el proveedor de servicios esté preparado para cualquier tipo de falla imprevista. En la figura 22 se muestra un diagrama de flujo para resolver un problema en caso que el sistema FSO fallará.

Existen varios métodos para resolver un problema en un enlace FSO, uno de estos consiste en tener un sistema de monitoreo y la detección de errores en el sistema FSO. Estos sistemas generalmente están integrados en sistemas más completos para facilitar la administración; estos equipos se incorporan al sistema llamado SNMP o protocolo de monitoreo simple de redes que ofrece muchas herramientas para la detección de errores incluyendo el historial de las fallas detallando las horas de cada evento.

Figura 21. Diagrama de flujos para la resolución de un problema de enlace en un sistema FSO.



5. ANÁLISIS ECONÓMICO

FSO no es una nueva invención o tecnología. Durante varias décadas FSO ha sido utilizado principalmente en las comunicaciones militares de alta seguridad. Ahora ha encontrado aplicaciones comerciales influenciados por los siguientes factores:

- Su nivel costo-eficiencia y el capital relativamente mínimo comparado con otras tecnologías
- El incremento de aplicaciones de gran ancho de banda
- El incremento de la infraestructura óptica global
- Su facilidad de instalación y re-instalación

5.1 El mercado de las telecomunicaciones

Comenzaremos con los grandes carrier y empresas de acceso en el mercado, esto permitirá dar un mejor panorama y podremos entender mejor las oportunidades que existen para el sistema FSO.

5.1.1 Las redes ópticas en el mercado

El mercado óptico está creciendo mundialmente pronosticando que está llegando a \$ 57.3 billones en ventas de cable de fibra óptica, switches, routers, y otros productos relacionados. Este mercado ha crecido no solo con los proveedores de servicios sino en la adopción de tecnología e instalaciones. Algunos proveedores de servicios están a la cabeza, mientras que otros han comenzado lentamente, por que no poseen la tecnología necesaria para su instalación. Existen grandes cantidades de fibra las cuales están siendo sub-

utilizadas ya que no cursan todo el tráfico que puede proporcionar su ancho de banda.

FSO extiende las redes ópticas a un costo substancialmente menor que el cableado tradicional y lo más importante a una fracción del tiempo. FSO permite un servicio de gran ancho de banda hasta el usuario final mucho más rápido de lo esperado.

FSO no está limitado a la última milla. FSO puede jugar un papel muy importante en el inicio o en la sección intermedia de una red e incluso hasta en el acceso, logrando extensiones de red.

Sabemos que FSO es flexible y rápido con velocidades de 1Mbps hasta 2.5 Gbps, ofrece una solución costo-efectivo rápida con disponibilidad de infraestructura fácil de instalar en una hora, fácil de administrar y monitorear. Además ofrece una gran cantidad de opciones tales como distancia, velocidad, topología y flexibilidad de instalación; pudiendo hacer todo esto con un estándar de alta calidad o bien llamado Carrier-Class, de alta confiabilidad, disponibilidad y con capacidad de protocolos múltiples.

Las redes de telecomunicaciones tienen cuellos de botella que son los sitios en donde el ancho de banda es reducido con relación a la cantidad de tráfico. Estos puntos existen generalmente en la última milla y en las áreas metropolitanas en donde el alto costo por ancho de banda no resulta rentable incrementarlo para los proveedores de servicio. En el presente existe una combinación de cobre, fibra e incluso algunas microondas. Pero en el futuro estos cuellos de botella serán completamente redes ópticas. FSO permite acelerar el proceso de instalación para las redes ópticas metropolitanas y así extender su capacidad prácticamente a cualquiera que la necesite. Provee este servicio sin la necesidad de excavaciones para la ruta de cableados de fibra o cobre o la compra de licencias costosas para la transmisión en el espectro electromagnético.

La demanda de ancho de banda ha crecido exponencialmente durante los últimos años y los proveedores de servicios han luchado para proveer dicha demanda. Como es de esperarse se ha hecho un gran esfuerzo para mantener los núcleos de la red pero no ha sucedido lo mismo con los usuarios finales, de hecho, estos en muchos casos se sienten abandonados. Con todo el ancho de banda que existe en los núcleos de las redes metropolitanas se debe encontrar una manera de llevarlo hasta el usuario final, FSO ofrece la oportunidad de hacerlo en una manera económica y en un corto período de tiempo más que ninguna otra tecnología pueda dar con Carrier-class.

5.1.2 El Mercado del ancho de banda

Las comunicaciones de banda ancha han sido un factor muy importante en el crecimiento de las aplicaciones en Guatemala, FSO es el resultado directo de la necesidad de acelerar el alcance de las redes de alta velocidad en el usuario final.

Los usuarios de Internet han crecido de 153 millones mundialmente en 1998 a 320 millones en el 2000, el tráfico de datos en Internet se ha duplicado cada año en ese tiempo y lo continúa haciendo. A pesar de algunos altibajos en el mercado los embarques de computadoras seguirán creciendo a un 10% o 15% anualmente.

El éxito del mundo en línea es claro, pero la expansión en el número de servicios y calidad de experiencias que el Internet provee está solamente comenzando. La clave está en proveer la banda ancha para el acceso a los usuarios finales extendiendo el alcance del núcleo de la red metropolitana óptica.

5.2 Los retos y beneficios de FSO

Para tener un completo entendimiento de una red FSO, es importante entender tanto los retos como los beneficios de la tecnología FSO.

Los retos de la tecnología FSO incluyen lo siguiente:

- La falta de conocimiento de la tecnología FSO
- La existencia de tecnología alternativa que compiten como la fibra, el cobre y los enlaces de RF.
- Condiciones atmosféricas como la niebla y la lluvia
- Limitaciones en la línea de vista
- Limitaciones en la distancia
- Disponibilidad de FSO versus las alternativas
- Proceso lento de adopción de la tecnología.

Por otro lado las ventajas que nos ofrece FSO son:

- Tecnología con ventajas costo-beneficio
- Rápida instalación y re-instalación
- Ambientalmente seguro, permitiendo el balance con el ecosistema, tecnología, negocios y comunicaciones
- Es una tecnología transparente haciéndola fácil de integrar.
- Escalable con respecto al ancho de banda de 1 Mbps hasta 2.5 Gbps
- Altamente seguro
- Minimiza el capital requerido para su instalación
- Equipo muy confiable con tiempo medio entre fallas de 23 años
- Muchos modelos funcionan como un puente a la comunicación y son independientes del protocolo

5.3 Segmentos del mercado

FSO es una parte del mercado de la red metropolitana óptica en la industria óptica. El mercado está caracterizado por el núcleo metropolitano, el acceso y la última milla. FSO con su capacidad de transmitir hasta OC192/10 Gbps califica para cualquiera de estas aplicaciones.

Para entender mejor las soluciones podemos categorizar el mercado en los siguientes segmentos: por aplicación, por tipo de cliente y por tipo de región, pero para entenderlo mejor discutiremos a continuación por tipo de región.

5.3.1 Por tipo de región

La segmentación por región nos ayudará a entender dónde hacer las instalaciones y en qué enfocarnos más para obtener el máximo retorno de la inversión. La segmentación por región está dirigida por el tipo de vida de los usuarios, lo gubernamental y otros factores de reglamentación como el estado de la infraestructura y la capacidad de alternativas.

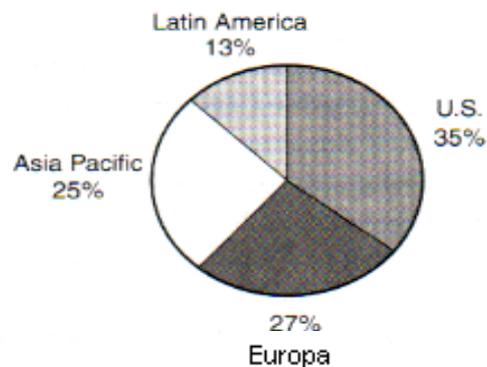
El crecimiento estará dirigido en parte por la presión que enfrentan los proveedores de servicios las cuales son las siguientes:

- Adquisición de más clientes
- Generación de ingresos rápidamente
- Oferta de servicios costo-beneficio.

Se anticipa que en Norte América, al principio, el crecimiento será relativamente lento principalmente por los ciclos grandes de ventas y la disponibilidad de otras alternativas. Estos factores combinados contribuyen a una adopción lenta de una nueva tecnología a larga escala.

Debido a una adopción más agresiva a la nueva tecnología y también por la falta de otras alternativas, FSO es más factible en Asia (China e India), Latinoamérica y también en Europa como lo puede apreciar en la figura 23.

Figura 22. Crecimiento del mercado par FSO por regiones globales.



Fuente: Free-Space Optics, Dr. Heinz Willebrand, pag 109.

Este crecimiento estará dirigido por los siguientes factores:

- Falta de infraestructura
- La necesidad de instalar servicios rápidamente
- Requerimientos menos restringidos
- Áreas metropolitanas más densas, resultando en distancias más cortas
- Falta de ancho de banda.

5.4 Factores del mercado para FSO

En la figura 24 se muestra un número de factores clave que toman parte de FSO, entre ellos están los factores económicos, de mercado, ambientales, de servicio y de negocios.

Figura 23. Factores que ayudan al crecimiento de FSO en el mercado.



Fuente: Free-Space Optics, Dr. Heinz Willebrand, pag 109.

5.4.1 Factores del mercado

Estos factores están dirigidos al crecimiento de FSO basados en la influencia de las condiciones del mercado:

- **Aumentando el número de usuarios de Internet:** Como se mencionó con anterioridad Internet está causando una demanda alta de ancho de banda para los usuarios finales.

- **Aumentando las actividades del comercio por Internet:** Con un creciente número de los negocios que involucran las actividades del comercio por internet se ha vuelto más rápido utilizando grandes anchos de banda. Para cumplir con el requerimiento del alto incremento en el ancho de banda los proveedores de servicios deben ofrecer acceso de gran ancho de banda en las últimas millas de la red.
- **Alta capacidad del Escritorio:** Al incrementar el despliegue de aplicaciones multimedia y el crecimiento exponencial en la velocidad de los procesadores, los usuarios finales tienen la capacidad de utilizar aplicaciones de altos anchos de banda.
- **Instalación de redes metropolitanas ópticas:** Los proveedores de servicios están invirtiendo millones de Dolares en la instalación de redes metropolitanas ópticas; la actualización de estas es el resultado directo del incremento del uso del ancho de banda en los perímetros de la red. Los proveedores de servicios se enfrentan ahora con la presión de requerimientos de rápidas instalaciones y al mismo tiempo generar ganancias. FSO cumple con ambas necesidades.
- **Edificios comerciales sin acceso de alta velocidad:** Las primeras redes que fueron instaladas, sólo llenaban la necesidad de gran ancho de banda en el núcleo de la red y la mayoría de edificios no tienen acceso de alta velocidad. FSO provee una instalación rápida y costo-efectivo.
- **La instalación de 3G y 4G (servicios digitales avanzados de telefónica):** La pronta llegada de las nuevas tecnologías de tercera y cuarta generación de telefonía celular darán paso a la necesidad de nuevas formas de conectar las celdas al núcleo de la red siendo FSO una opción viable.

5.4.2 Factores económicos

Los factores económicos de FSO crean un aumento en las ganancias de una compañía, siendo los principales:

- **Reducción de costos:** Con costos que son considerablemente más bajos que los de los equipos tradicionales, FSO ofrece a los proveedores de servicios la oportunidad de reducir sus costos inmediatamente. La simple razón de que los costos de FSO son menores que las soluciones de conectividad de otras tecnologías debido a que es óptica y sin fibra. Este crea un efecto substancial de ventaja en donde no hay la necesidad de cavar o abrir brechas, costos más bajos de instalación y del equipo.
- **Rapidez de activación del servicio:** Con tiempos más bajos de instalación, tales como 4 horas, los proveedores de servicios pueden activar servicios rápidamente generando ganancias más rápido.
- **Escalabilidad del ancho de banda permitiendo menos costos por inventario:** Con una tecnología estable generalmente entre 1 Mbps a 2.5 Gbps, FSO ofrece un rango de velocidades que se pueden escalar en apenas unas horas, logrando cumplir con los requerimientos del cliente.
- **Soporte de aplicaciones múltiples:** La utilización de productos FSO que son de capa 1, facilita a los proveedores de servicios ofrecer múltiples aplicaciones desde la misma plataforma debido a la transparencia de este producto. FSO es básicamente lo mismo que la fibra desde el punto de vista de la capa física.
- **Tiempo más rápido para el mercado:** Fácil instalación y un despliegue más rápido de los productos FSO facilita a los proveedores de servicios

habilitar nuevos servicios virtualmente en una noche. Esto puede ser la diferencia entre el éxito y la falla en el un mercado altamente competitivo.

5.4.3 Factores de servicio

Los factores de servicio son aquellos factores que contribuyen a la flexibilidad de FSO, a su fácil integración y amigables al usuario. Estos factores incluyen los siguientes beneficios:

- **Incremento de la demanda de interfaces de acceso de alta velocidad:** La flexibilidad de las interfaces que FSO provee tales como OC-48, GigE, ESCON, FICON, y demás, significan que FSO será capaz de cumplir con los incrementos de diversos tipos de aplicaciones de alto ancho de banda, rápidamente y con una alto beneficio costo–eficiencia.
- **Simplicidad de la red:** Muy pocos elementos de una red nos dan como resultado menos puntos de falla y menos puntos que gestionar.

5.4.4 Factores de negocios

En estos días los casos de negocios deben tener una infraestructura que permita el flujo de efectivo de manera inmediata. Los factores de negocios son los siguientes:

- **Aceleración de las redes metropolitanas ópticas:** FSO puede ayudar a proveer una aceleración y extender las redes metropolitanas ópticas hacia el usuario final.
- **Retención de los clientes:** En este ambiente dinámico y de gran competitividad, FSO ofrece a los proveedores de servicios una herramienta que los ayuda a mantenerse competitivos.

- **Falta de infraestructura global:** Muchos países están creciendo en sus anchos de banda, esto crea un desfase y una necesidad de plataformas de mayores anchos de banda, en donde FSO provee una oportunidad única la cual es libre de licencias en conjunto con su bajo costo.

5.4.5 Factores Ambientales

Ambientalmente FSO tiene un menor impacto que muchas otras tecnologías, estos factores son los siguientes:

- **Eliminación de la contaminación:** Para instalar fibras es necesario cavar el suelo en las carreteras, lo cual causa problemas de tráfico en la mayoría de ciudades, contribuyendo así a la contaminación. Con FSO no existe la necesidad de cavar a través de las calles ni contribuir con la contaminación que esto representa.
- En algunos sitios históricos no está permitido excavar pues esto destruiría o perjudicaría dicho sitio, en donde FSO podría ser instalado sin mayores dificultades.

5.5 Estimacion de costos

Los productos FSO de alta calidad no dependen de ningún protocolo en particular y por lo tanto, se integran fácilmente con GigE, SONET/SDH, ATM, FDDI, Ethernet, Fast Ethernet y muchos otros. Además, no dependen de ninguna topología (punto a punto, en malla, anillo, punto a multipunto).

Los productos FSO han sido ampliamente probados y están instalados en las empresas en muchos países. Clientes como Carriers, Corporaciones, Financieros, Hospitales, Educación, Gobierno, Ejercito, Minas, etc. que depende

en una solución inmediata, confiable, segura y robusto para mantener una continuación de negocio en cualquier parte del mundo que existan.

Gracias a los productos FSO, los proveedores de servicios y las empresas disponen de la libertad y flexibilidad necesarias para diseñar e instalar redes de gran calidad a un quinto del costo usual y en una décima parte del tiempo que el cable de fibra óptica toma.

A continuación presentamos un listado de precios de los diversos equipos de FSO que se pueden encontrar en el mercado, el cual nos servirá para tener un estimado del costo total de un enlace entre 2 edificios.

Tabla VI. Listado de precios, velocidad vrs costo.

Modelo	Velocidad	Distancia		Interface	SNMP	Precio Estimado
		(metros)		(Millas)		
Ethernet						
100	10/100	500	0.30	(RJ-45)	no	\$8,000
100E	10/100	1500	0.93	(RJ-45)	no	\$10,000
Enlaces E1/T1						
4 EW	4 x E1	4000	2.49	Fiber	si	\$17,200
8 EW	8 x E1	4000	2.49	Fiber	si	\$17,400
16 EW	16 x E1	4000	2.49	Fiber	si	\$18,400

Además el costo de un sistema de Gestión SNMP está alrededor de los \$1,500 dólares.

Con estos precios de referencia y con el procedimiento para la instalación podemos tener un costo estimado del total del enlace. Para esto

plantearemos el caso más común que podríamos encontrar en el mercado, el cual se describe a continuación:

5.5.1 Caso de acceso de ethernet:

Una empresa de transporte de datos ha firmado un contrato con un cliente que le solicita interconexión entre sus diferentes oficinas con anchos de banda de entre 1 Mbps a 10 Mbps, pero en uno de estos puntos no es posible instalar fibra óptica ya que el edificio es patrimonio nacional, además se comprobó por medio de un estudio de radio frecuencia que el espectro está lleno y hay demasiadas interferencias, teniendo en cuenta que el punto más cercano del proveedor está a una distancia de 500 metros.

Según el panorama que se nos presenta para este enlace la mejor opción es instalar un enlace óptico inalámbrico FSO, después de hacer el estudio de campo y comprobar que existe línea de vista procedemos con el cálculo de los costos de instalación que se desglosan a continuación.

Tabla VII. Costos de instalación y equipos.

CANTIDAD	DESCRIPCION	COSTO	TOTAL
1	Manode Obra	\$ 500.00	500.00
50 mts	Cable de FibraOptica	5.00	250.00
1	Software de Gestion	1,500.00	1,500.00
2	Equipos FSO	\$ 8,000.00	\$16,000.00
2	Herrajes para el montaje del equipo	\$ 300.00	\$ 600.00
	TOTAL		\$18,850.00

Con esto podemos comprobar el costo del enlace FSO varia dependiendo de las necesidades de distancia y ancho de banda requeridos, como referencia un enlace de Microondas inalámbrico que tenga la misma capacidad esta alrededor de los \$ 30,000 Dolares que es mayor que el costo del enlace FSO, ademas de necesitar licencias para poder utilizar el espectro en Guatemala.

CONCLUSIONES

1. Los sistemas FSO poseen un tiempo corto de instalación por lo cual pueden servir muy bien para solucionar cualquier emergencia para levantar un enlace de alta capacidad.
2. Sabemos que dependiendo de la topología y la distancia entre los puntos, los costos de las diferentes tecnologías como la Fibra Óptica o los enlaces de microondas pueden variar su costo por lo que es necesario comparar los de otras opciones antes de proceder con la instalación del enlace FSO.
3. Los enlaces FSO proveen una comunicación segura, ya que, el haz de luz que emiten es muy direccional haciendo muy difícil que otros dispositivos puedan detectar la señal si están fuera del rango de recepción.
4. Uno de los factores más importantes para la implementación de esta tecnología es que no requiere de licencias para su utilización, con lo cual se reducen los costos mensuales de operación, pudiendo llevar grandes cantidades de información en distancias de hasta 4 Kilómetros.

RECOMENDACIONES

1. Antes de instalar cualquier enlace es necesario hacer un estudio de los sitios para verificar que exista línea vista, una estructura sólida donde instalar y verificar que no haya ningún problema con la ruta de la conexión de energía y los datos hacia el cuarto de equipos donde se conectarán los equipos FSO.
2. También, es aconsejable evaluar y comparar otras opciones como enlaces de Fibra Óptica y Microondas pues los costos pueden variar de caso en caso
3. Una de las sugerencias más importantes cuando se lleva a cabo la instalación es cerciorarse de que la base del equipo quede instalada en un punto sólido y que no existan oscilaciones, ya que esto podría provocar que con el tiempo el enlace pierda su alineación y que quede fuera de servicio.
4. A pesar de que todos los equipos FSO cumplen con las normas de seguridad óptica, es preciso que el personal técnico lea cuidadosamente las recomendaciones de cada fabricante antes de la instalación para evitar cualquier accidente con los ojos de los técnicos y de terceras personas que estén presentes en el momento de la instalación.

BIBLIOGRAFÍA

- 1. Dr.HeinzWillebrand Bakksheesh S.Ghman. Free-Sapace Optics: Enabling Optical Connectivity in Toda´sNetworks**
- 2. Grant R. Fopwles INTRODUCTON TO MODERN OPTICS DOVER PUBLICATIONS, INC., NewYork.**
- 3. Introuduction to Internetworking.** Cisco Systems. SF.8pp
- 4. Kathryn Boot Seven Hill, The essence of OPTOELECTRONICS** Salford University, UK
- 5. Charles,Belove. Enciclopedia dela electronica, ingenieria técnica.** España: Grupo Editorial Océano, 1998.
- 6. GBM.Conceptos de transmisión por fibra Optica. Guatemala: GBM Educacional, 1995**

7. MONTENEGRO, Raquel. **Especificaciones formales para la elaboración del informe final de tesis. Guatemala:** Departamento de Reproducciones de la Facultad de Ingeniería, 1997

8. H.Eichel, **Laser Beam Propagation in the atmosphere.** Bellingham, WA, 1990

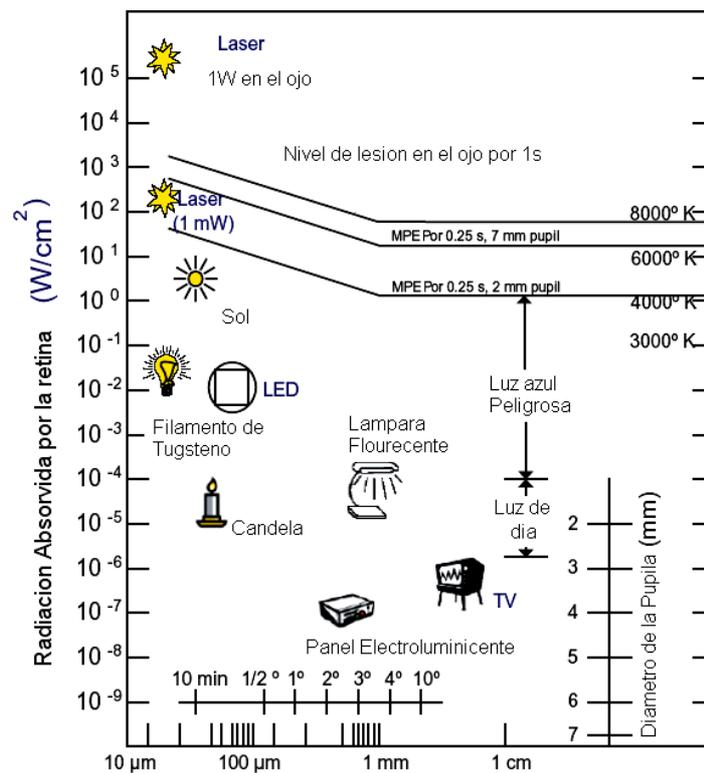
ANEXO 1

Luz seguridad y potencia

El ojo humano es un detector óptico muy sensible y sofisticado con rango visual de 400 a 700 NM Como cualquier otro tejido vivo es susceptible a daños por condiciones extremas y debido a que diferentes tejidos absorben diferentes longitudes de onda diferentes partes del ojo son mas susceptibles que otras a un daño por una onda de luz determinada.

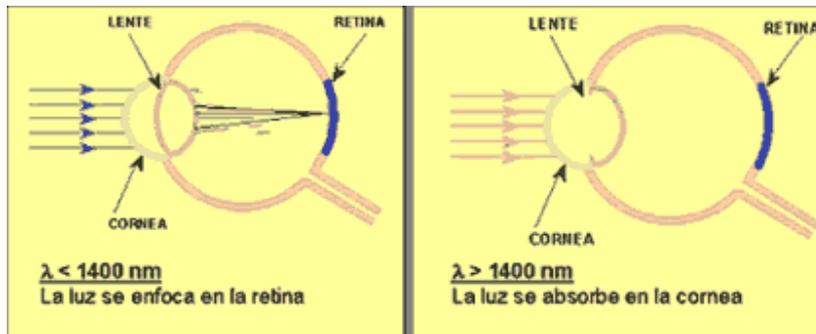
Además debemos de tomar en cuenta que los daños a los tejidos del ojo pueden ser causados por temperatura, fotomecánicos, y termo acústicos. Por todo esto los láser pueden ser una fuente muy peligrosa para la vista. A continuación presentamos una tabla en donde se compara la radiación de diferentes fuentes de luz.

Figura 24. Radiación absorbida por la retina



En algunos productos FSO se utilizan longitudes de onda en el espacio mayores a los 1400 nm, las cuales no logran penetrar la retina del ojo humano, cumpliendo con las normas internacionales de seguridad **"Eye-Safe Class 1M"**

Figura 25. Absorción del de la luz en el ojo Humano.



De esta forma, es posible transmitir con niveles de potencia hasta de 50 veces más alto !! que los sistemas que operan en las longitudes de onda menores a los 1400 nm, permitiendo así contar con un mejor desempeño en el servicio. **Gracias a esto los equipos pueden penetrar niveles de neblina más densos y por ende lograr un alto nivel en la disponibilidad del enlace.**

Es muy importante saber que existen diversos estándares para la seguridad de la vista por lo cual en la tabla VIII se presentan los más importantes.

Tabla VIII. Estándares para la seguridad del ojo humano en sistemas FSO.

Estándar	Tipo	Objetivo
ANSI Z136.1	Usuario	Usuario de los láser, seguridad y salud
IEC 60825-1	Técnico	Fabricante con distribución Global
21 CFR Ch1 (4-1/97edición) Parte 1040	Regulatoria	Fabricantes en los Estados Unidos