



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

**APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA FSO EN LA EXTENSIÓN DE REDES DE  
ÁREA LOCAL, POR MEDIO DE ENLACES PUNTO A PUNTO ENTRE  
EDIFICIOS**

**Rubén Eduardo Escalante Marroquín**  
Asesorado por el Ing. Enrique Ruiz Carballo

Guatemala, octubre de 2008



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA FSO EN LA EXTENSIÓN DE REDES DE  
ÁREA LOCAL, POR MEDIO DE ENLACES PUNTO A PUNTO ENTRE  
EDIFICIOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR:

**RUBÉN EDUARDO ESCALANTE MARROQUÍN**

ASESORADO POR EL INGENIERO ENRIQUE RUIZ CARBALLO  
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO ELECTRÓNICO**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2008



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERIA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Milton de León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultan Mejia
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Duran Córdova
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
EXAMINADOR	Ing. José Aníbal Silva de los Ángeles
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

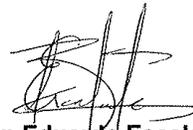


**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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:

**APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA FSO EN LA EXTENSIÓN DE REDES DE  
ÁREA LOCAL, POR MEDIO DE ENLACES PUNTO A PUNTO ENTRE  
EDIFICIOS,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 2 de noviembre de 2005.



**Rubén Eduardo Escalante Marroquín**



Guatemala, 7 de agosto de 2008

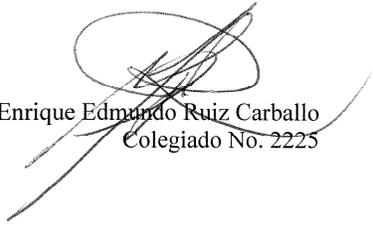
Ing. Julio Solares Peñate  
Coordinador Área de Electrónica  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
USAC

Ing. Solares

Por este medio me dirijo a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado: **APLICACIÓN DE LA TECNOLOGIA FSO EN LA EXTENSIÓN DE REDES DE AREA LOCAL POR MEDIO DE ENLACES PUNTO A PUNTO ENTRE EDIFICIOS**, que desarrolló el estudiante **Rubén Eduardo Escalante Marroquín**, en el cual, a mi criterio cumple con los objetivos propuestos.

Por ello, el autor de este trabajo de graduación y yo, como su asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones de la misma.

Atentamente,

  
Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo  
Colegiado No. 2225



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 13 de agosto 2008.

Señor Director  
Ing. Mario Renato Escobedo Martinez  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA FSO EN LA EXTENSIÓN DE  
REDES DE AREA LOCAL POR MEDIO DE ENLACES PUNTO A  
PUNTO ENTRE EDIFICIOS, del estudiante; Rubèn Eduardo  
Escalante Marroquin, que cumple con los requisitos establecidos para  
tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente

FEY ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. Juan Cesar Solares Peñate  
Coordinador Area de Electrónica



JCSF/STC



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante: Rubén Eduardo Escalante Marroquin, titulado: APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA FSO EN LA EXTENSIÓN DE REDES DE AREA LOCAL POR MEDIO DE ENLACES PUNTO A PUNTO ENTRE EDIFICIOS, procede a la autorización del mismo.

Ing. Mario Renato Escobedo Martínez

DIRECTOR



GUATEMALA, 14 DE AGOSTO 2008.



Universidad de San Carlos  
de Guatemala

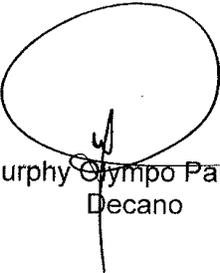


Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.360.08

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA, FSO EN LA EXTENSIÓN DE REDES DE ÁREA LOCAL, POR MEDIO DE ENLACES PUNTO A PUNTO ENTRE EDIFICIOS**, presentado por el universitario **RUBÉN EDUARDO ESCALANTE MARROQUÍN**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

  
Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, octubre de 2008



## ACTO QUE DEDICO A:

### **Dios**

Quien me permitió afrontar este reto y guió mis pasos a través de este difícil camino, manteniendo el ánimo de llegar hasta el final.

### **Mi madre**

Marietha Escalante, por su gran esfuerzo y el apoyo que en todo momento me ofreció para alcanzar este objetivo. Su ejemplo de responsabilidad, trabajo y honradez ha sido una guía durante el transcurso de mi vida.

### **Mi familia**

A todos extendiendo mi gratitud porque siempre me ofrecieron su ayuda y me alentaron para seguir dando mi mejor esfuerzo. Sus muestras de afecto siempre brindan el ánimo necesario para enfrentar cualquier dificultad.

### **Mi esposa e hija**

Flory y Daniela, quienes día a día me ofrecen su comprensión, colaboración y compañía.

## AGRADECIMIENTOS:

Ing. Rodolfo López, quien me brindó su consejo y ayuda en muchos momentos durante mis estudios.

Ing. Enrique Ruiz Carballo, por su apoyo y colaboración en la realización de este trabajo.

Universidad de San Carlos de Guatemala, por permitirnos tener acceso a la educación superior y colaborar con el progreso de nuestro país.

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	VII
<b>GLOSARIO</b>	IX
<b>RESUMEN</b>	XIX
<b>OBJETIVOS</b>	XXI
<b>INTRODUCCIÓN</b>	XXIII
<b>1. FSO</b>	<b>1</b>
1.1 Reseña histórica	1
1.1.1 Comunicaciones ópticas inalámbricas	1
1.1.2 El laser	4
1.1.2.1 Historia del laser	6
1.1.2.2 Aplicaciones del laser	9
1.1.2.3 Funcionamiento del laser	12
1.1.2.4 Propiedades de la radiación laser	17
1.1.2.5 Historia de las comunicaciones con laser	21
1.1.2.6 Aspectos de seguridad del laser	21
1.1.3 Historia del FSO	23
1.2 Funcionamiento	26
1.2.1 Subsistemas FSO	28
1.2.1.1 El receptor	30
1.2.1.2 El transmisor	33
1.2.2 Ecuación de enlace FSO	35
1.2.3 Margen del enlace	36
1.3 Características de desempeño	39
1.3.1 Distancias de transmisión	39
1.3.2 Capacidad	41

1.3.3	Seguridad	41
1.3.4	Instalación	46
1.3.5	Gestión y monitoreo de red	47
1.4	Aplicaciones	48
1.4.1	Extensiones de red metro	48
1.4.2	Acceso de última milla	48
1.4.3	Conectividad empresarial	49
1.4.4	Respaldo para fibra	49
1.4.5	Red de retorno ( <i>Backhaul</i> )	49
1.4.6	Aceleración de servicio	50
1.4.7	Recuperación de desastres	50
1.4.8	Transporte de medios digitales	51
1.4.9	Extensión de celdas celulares en edificios	51
<b>2.</b>	<b>EXTENSIONES DE REDES LAN</b>	<b>53</b>
2.1	Redes LAN y sus necesidades de extensión	53
2.1.1	LAN	53
2.1.2	Topología de las redes LAN	54
2.1.3	Métodos de acceso al medio	56
2.1.4	Tecnologías Ethernet	57
2.2	Giga bit Ethernet	60
2.2.1	Alianza Giga bit Ethernet	61
2.2.2	Capa Física	61
2.2.3	Capa MAC	63
2.2.4	Extensión de portadora	64
2.2.5	Ráfagas de paquetes	64
2.2.6	Interfaz Giga bit independiente del medio	65
2.2.7	Subcapa física PCS	66

2.2.8	Topologías	67
2.2.9	Giga bit Ethernet y ATM	71
2.2.10	Crecimiento de Ethernet y Giga bit Ethernet	73
2.2.11	Migración hacia Giga bit Ethernet	73
2.2.11.1	Estándares relacionados	73
2.3	Extensiones de redes	75
2.3.1	Punto a punto	76
2.3.2	Punto a multipunto	76
2.3.3	Multipunto a multipunto	77
2.3.4	Extensores LAN Ethernet	78
2.4	Opciones para extensiones de red	79
2.4.1	Extensiones por medio de cobre	79
2.4.2	Extensiones LAN inalámbricas	79
2.4.3	Extensiones LAN con fibra óptica	80
2.4.4	Uso de la tecnología FSO	80
<b>3.</b>	<b>FACTORES A CONSIDERAR EN UN ENLACE FSO</b>	<b>83</b>
3.1	Parámetros importantes para el funcionamiento	83
3.1.1	Potencia transmitida	84
3.1.1.1	Fuentes de amplificación	85
3.1.1.2	Máxima potencia de salida	86
3.1.1.3	Potencia de salida promedio	86
3.1.2	Divergencia del haz transmitido	87
3.1.3	Área de recepción	92
3.1.4	Sensibilidad del receptor	94
3.1.5	Pérdidas ópticas	97
3.1.6	Longitud de onda	99
3.1.7	Disponibilidad	101
3.1.8	Máximo rango de enlace teórico	102

3.1.9 Tasa de error de bit	103
3.1.10 Presupuesto del enlace	105
3.2 Retos para la tecnología FSO	107
3.2.1 Niebla	107
3.2.2 Absorción	108
3.2.3 Dispersión	108
3.2.4 Obstrucciones físicas	109
3.2.5 Estabilidad de alineación	109
3.2.6 Balanceo de edificios	109
3.2.7 Desviación del haz	111
3.2.8 Destellos	111
3.2.9 Interferencia solar	115
3.3 Mejoras en sistemas FSO	116
3.3.1 Rastreo	116
3.3.2 Control de potencia y temperatura	116
3.3.3 Seguridad para la vista	118
<b>4. PANORAMA DE FSO EN GUATEMALA</b>	<b>119</b>
4.1 Posibles usuarios de un enlace FSO	119
4.2 Disponibilidad de servicio en empresas de telecomunicaciones	123
4.3 Posibilidades de crecimiento	125
4.3.1 Funcionalidad	126
4.3.2 Velocidad	126
4.3.3 Protocolos	127
4.3.4 Despliegue	127
4.3.5 Rentabilidad	128
4.3.6 Protección de la inversión	128

4.3.7 Otros aspectos que pueden propiciar el crecimiento	129
4.4 Retorno de inversión	130
4.4.1 Beneficios que deben medirse	132
4.4.2 Costos	132
4.4.3 Medidas utilizadas para cuantificar la rentabilidad de las inversiones en tecnología	134
<b>CONCLUSIONES</b>	141
<b>RECOMENDACIONES</b>	143
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	145



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1. Emisión estimulada de un fotón	13
2. Luz blanca pasando a través de un prisma	17
3. Mono cromaticidad	17
4. Direccionalidad de luz láser	18
5. Superposición de ondas	20
6. Seguridad del laser	22
7. Enlace FSO	27
8. Subsistemas FSO	29
9. Atenuación atmosférica	32
10. Dispersión del haz transmitido	45
11. Ubicación de los protocolos LAN mas populares dentro del modelo OSI	54
12. Topología de bus	55
13. Topología de anillo	55
14. Topología de estrella	56
15. Topología de árbol	56
16. Arquitectura de protocolo Giga bit Ethernet	66
17. Conexión servidor a switch	68
18. Conexiones switch – switch	69
19. Conexión de switches a switch de columna Vertebral	70
20. Control de flujo	75
21. Divergencia del haz	87
22. Perdida de dirección del haz	88
23. Divergencia del haz FWHM	89

24. Atenuación en sistemas FSO y en cables de fibra óptica	98
25. BER versus distancia a 1.25 Gbit/s	105
26. Varianza de la fluctuación de intensidad	113
27. Efectos de los destellos	114
28. Vida útil del laser en función de la temperatura	117
29. Vida útil del laser en función de la potencia de salida	118
30. Valor presente neto vs. tasa de descuento	139

## **TABLAS**

I. Distancias soportadas por diferentes cables	62
II. Pérdidas y visibilidad en enlaces FSO	99
III. Costos de equipos FSO para diferentes requerimientos	133
IV. Tasa interna de retorno	138
V. Cálculos de valor presente neto	139

## GLOSARIO

- Acceso discado** Una conexión por línea conmutada es una forma barata de acceso a Internet en la que el cliente utiliza un módem para llamar a través de la Red Telefónica Conmutada (RTC) al nodo del ISP, un servidor de acceso (por ejemplo PPP) y el protocolo TCP/IP para establecer un enlace módem-a-módem, que permite entonces que se direcciona a Internet. Por influencia del inglés es frecuente que, también en castellano, se llame a este tipo de conexión *dial-up*. La desventaja de este tipo de conexión es que es lenta comparada con las conexiones de tipo DSL, también llamada internet flash.
- Ancho de banda** En comunicaciones análogas, el ancho de banda se refiere al ancho del rango de frecuencias asignado para la transmisión. En el mundo digital, es más común hablar de ancho de banda en términos de el numero de bits transmitidos por segundo (bps).
- ATM** El Modo de Transferencia Asíncrona (*Asynchronous Transfer Mode*) es una tecnología de telecomunicación desarrollada para hacer frente a la gran demanda de capacidad de transmisión para servicios y aplicaciones.

<b>Backbone</b>	La parte de la red de comunicaciones que conecta los nodos principales, oficinas centrales o redes de área local centrales. Al hablar de Internet, el backbone se refiere al conjunto de rutas al que las redes locales o regionales se conectan para interconexión de larga distancia.
<b>BER</b>	Tasa de error de bit. Es una forma de medir la integridad de la transmisión de datos. La tasa de error de bit es una proporción entre los bits errados y el total de bits.
<b>Bit</b>	Digito Binario.
<b>Bucle</b>	Prueba realizada para verificar de manera segmentada la transmisión entre dos puntos. Al colocar un bucle, el equipo debe recibir lo mismo que está enviando y detecta de esa forma que no existe problema en la comunicación entre él y el punto donde se colocó el bucle.
<b>Byte</b>	Ocho bits. Los bytes son utilizados para medir la capacidad de memoria.
<b>Colisión</b>	Es lo que se produce cuando dos tramas de distinta estación son emitidas a la vez en el canal y ambas tramas son incompresibles para las otras estaciones por lo que la transmisión se ve seriamente afectada.
<b>Confiabilidad</b>	Se refiere a la tasa de fallas esperada para el equipo.

<b>Directividad</b>	La directividad es un fenómeno característico de las ondas que nos proporciona información sobre el comportamiento de la radiación de la fuente en función de la dirección. Es un parámetro que se usa en el diseño de antenas como en el de transductores electros acústicos.
<b>Disponibilidad</b>	La disponibilidad del enlace es la fracción del tiempo que un enlace es utilizable en climas específicos, asumiendo que no existe ninguna caída debida a fallas en los equipos o problemas del sistema. La disponibilidad es típicamente expresada en nueves. Por ejemplo, 99.9 % o disponibilidad de tres nueves, la cual indica que en promedio, el enlace tiene la expectativa de estar no disponible el 0.1 % del tiempo, o un promedio de 43 minutos al mes. La disponibilidad de cuatro nueves (99.99%) se traduce en solo 4 minutos al mes de tiempo fuera de servicio y cinco nueves promedia solo 30 segundos al mes de caída en el servicio.
<b>DWDM</b>	Multiplexión por división densa de longitud de onda.
<b>Estándar</b>	Un estándar es una especificación que regula la realización de ciertos procesos o la fabricación de componentes para garantizar la interoperabilidad.

<b>Ethernet</b>	Uno de los protocolos de comunicación más antiguos para las redes de computadoras personales, y la tecnología más ampliamente usada en las redes de área local (LAN). Generalmente se refiere actualmente a sistemas 10 Base T, operando a 10 Mbps.
<b>Fast Ethernet</b>	Es un estándar de transmisión de red de área local que provee tasas de transmisión de 100 Mbps, lo cual se conoce como 100 BaseT.
<b>FDDI</b>	Interfaz de datos de fibra distribuida (Fiber Distributed Data Interface) es un conjunto de estándares ISO y ANSI para la transmisión de datos en redes de computadoras de área extendida o local (LAN) mediante cable de fibra óptica. Se basa en la arquitectura de anillo y permite una comunicación tipo Full Dúplex. Dado que puede abastecer a miles de usuarios, una LAN FDDI suele ser empleada como columna vertebral para una red de área amplia (WAN).
<b>Fibra Oscura</b>	Fibra oscura se refiere a una fibra sin luz y, por lo tanto sin utilizar. A menudo las empresas tienden más fibras de las que se usaran en el momento y justifican su inversión a medida de que la red va creciendo y se implementan más equipos.
<b>Fotón</b>	Unidad discreta de energía de radiación electromagnética.

- FSO** Óptica del espacio libre (*Free Space Optics*), también llamada óptica inalámbrica. Se refiere a la transmisión de haces modulados de luz infrarroja invisible a través de la atmosfera para obtener comunicaciones de banda ancha. Los sistemas FSO pueden funcionar sobre distancias de varios kilómetros siempre que exista una clara línea vista entre los dos extremos y suficiente potencia.
- Giga bit Ethernet** Tecnología de transmisión basada en el formato de la trama Ethernet y un protocolo usado en las redes de área local. Provee una tasa de datos de un billón de bits por segundo. Giga bit Ethernet es transportada principalmente sobre fibra óptica (con las distancias más cortas posibles sobre medio de cobre).
- GLM** Margen generalizado del enlace. El GLM provee una manera objetiva de comparar dos productos basada únicamente en las características de diseño de cada producto.
- GPS** Sistema de posicionamiento global. Un sistema de satélites en baja orbita sobre la tierra, usados para medir la localización en el suelo o en el aire. Un receptor de GPS contiene una computadora que triangula su propia posición al medir su distancia respecto a por lo menos tres de los 24 satélites GPS. EL resultado es la longitud y latitud del receptor con una precisión dentro del margen de 10 metros para la mayoría de los receptores.

- HDTV** La televisión de alta definición (del inglés *High Definition Television*) es uno de los formatos que, sumados a la televisión digital (DTV), se caracteriza por emitir las señales televisivas en una calidad digital superior a los demás sistemas.
- IEEE 802.1p** Es un estándar que proporciona priorización de tráfico y filtrado multicast dinámico. Esencialmente, proporciona un mecanismo para implementar Calidad de Servicio (QoS) a nivel de MAC (*Media AccesControl*).
- Infrarrojo** La radiación infrarroja, radiación térmica o radiación IR es un tipo de radiación electromagnética de mayor longitud de onda que la luz visible, pero menor que la de las microondas. Consecuentemente, tiene menor frecuencia que la luz visible y mayor que las microondas. Su rango de longitudes de onda va desde unos 700 nanómetros hasta un milímetro.
- Interfaz** Es el *puerto* a través del que se envían o reciben señales desde un sistema o subsistemas hacia otros. No existe un interfaz universal, sino que existen diferentes estándares (Interfaz USB, interfaz SCSI, etc.) que establecen especificaciones técnicas concretas (características comunes), con lo que la interconexión sólo es posible utilizando el mismo interfaz en origen y destino.
- Laser** Amplificación de luz por emisión estimulada de radiación.

<b>Mbps</b>	Megabits por segundo. Mbps se usa para millones de bits por segundo y megabits por segundo y es una medida de ancho de banda en un medio de telecomunicaciones.
<b>Multiplexion</b>	Llamada también multiplexacion. Es la combinación de dos o más canales de información en un solo medio de transmisión usando un dispositivo llamado multiplexor. El proceso inverso se llama demultiplexacion. Existen diferentes estrategias de multiplexacion según el protocolo de comunicación empleado.
<b>MTBF</b>	Tiempo medio entre fallas.
<b>OSI</b>	Modelo de referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos. Está compuesto por 7 capas, las cuales son: 1. Capa física, 2. Capa de enlace de datos, 3. Capa de red, 4. Capa de transporte, 5. Capa de Sesión, 6. Capa de presentación, 7. Capa de aplicación.
<b>Portador</b>	Empresa de telefonía o de otro tipo que presta servicios de transmisión de telecomunicaciones. Un portador de intercambio local es una empresa de telefonía local y un portador de intercambio es una empresa que transporta llamadas de larga distancia.
<b>Protocolo</b>	Es un conjunto de procesos y reglas que los equipos de telecomunicaciones usan para transferir bits y bytes.

<b>Radiación</b>	Energía emitida de una fuente en la forma de rayos u ondas.
<b>SNMP</b>	Protocolo de Gestión de Red Simple (simple Network Management protocol). Es un estándar definido por IETF para gestión de red a través de los sistemas de gestión de la red y los componentes de la red. Es un protocolo que gobierna la gestión y monitoreo de los dispositivos de la red y sus funciones.
<b>SONET</b>	Red Óptica Síncrona (Synchronous Optical Network). Propuesta por Bellcore en los años 80. Se ha vuelto un estándar ANSI (American National Standards Institute) así como un estándar internacional ITU llamado SDH que define los estándares de interface en la capa física. Permite la multiplexión de tramas de datos de diferentes tamaños. Generalmente es implementada sobre cable de fibra óptica y es a menudo configurada en anillo permitiendo que los servicios se re direccionen cuando un cable es cortado.
<b>Telco</b>	Abreviatura para compañía telefónica.
<b>Topología de red</b>	La topología de red o forma lógica de red se define como la cadena de comunicación que los nodos que conforman una red usan para comunicarse.

**VLAN**

Una VLAN (*Virtual LAN*, 'red de área local virtual') es un método de crear redes lógicamente independientes dentro de una misma red física. Varias VLANs pueden coexistir en un único conmutador físico o en una única red física. Son útiles para reducir el dominio de colisión y ayudan en la administración de la red separando segmentos lógicos de una red de área local.

**WDM**

Multiplexion por división de longitud de onda. Tecnología de multiplexion desarrollada para su uso con fibra óptica. WDM modula cada uno de varias tramas de datos en diferentes segmentos del espectro de luz.



## RESUMEN

FSO es una tecnología de línea vista en la que se usan haces de luz láser invisible para proveer una conexión óptica con un ancho de banda en el que se puede enviar y recibir voz, video y datos. Para conseguir esta conectividad óptica no se requiere de inversión en cable de fibra óptica ni en licencias del espectro de RF. La tecnología FSO requiere de la luz. Ofrece ventajas en cuanto a la facilidad de instalación, capacidad de ancho de banda, la cual está casi al lado de los sistemas de fibra óptica, estar libre de pago de licencias de espectro y de coordinación para su uso debido a que no está afectada a interferencias, y seguridad de la información transmitida por el hecho que la transmisión es muy direccionada entre el equipo ubicado en un extremo y el otro. Los principales retos que afronta el uso de estos sistemas son las condiciones climáticas, tales como la niebla que puede provocar atenuación, el viento en condiciones de tormenta o el movimiento de balanceo natural de los edificios pueden provocar que los equipos pierdan su alineación. Los fabricantes de los sistemas FSO desarrollan soluciones para enfrentar estos retos.

Actualmente en nuestro medio, no es muy común el uso de estos sistemas debido a que por aspectos de precio e incertidumbre ante las nuevas tecnologías, se prefiere el uso de la fibra óptica o de sistemas inalámbricos de microonda.



# OBJETIVOS

## General:

Presentar una descripción completa de las características y ventajas que ofrecen los sistemas FSO al aplicarse a la extensión de redes de área local, así como los principales aspectos a considerar en el desarrollo de un proyecto, usando la tecnología de Óptica en el Espacio Libre.

## Específicos:

1. Describir el funcionamiento de la tecnología FSO y los principios en que se basa.
2. Plantear comparaciones básicas de desempeño entre FSO y otras tecnologías que son aplicadas para extensiones de redes LAN.
3. Indicar los factores que se deben tener en cuenta al considerar la opción de usar la tecnología de Óptica en el espacio libre y las características comunes para que un enlace sea apto para su aplicación.
4. Presentar una descripción de las tecnologías y protocolos usados dentro de las redes de área local.
5. Señalar los aspectos que representan retos para este tipo de sistemas, así como el impacto que generan en el desempeño de los enlaces.
6. Informar respecto al panorama actual en Guatemala, en referencia a la aplicación de estos sistemas, así como las posibilidades que se incrementan la demanda de esta tecnología.



# INTRODUCCIÓN

A través de la lectura de diferentes documentos publicados en diferentes medios y de las demandas de servicio de los usuarios hacia las compañías de telecomunicaciones, se puede corroborar la gran importancia de la conectividad proporcionada por las redes LAN en el desarrollo del sector empresarial e industrial a nivel mundial. Una breve pérdida de conectividad entre dos empresas o entre dos departamentos de una misma compañía, puede traducirse en un problema de gran impacto financiero para los involucrados. La información es una herramienta fundamental en el desarrollo y crecimiento de cualquier empresa o proyecto por lo que la forma en que se maneja y se distribuye a los diferentes usuarios es también una pieza clave. A raíz de esto, las necesidades de enlaces con grandes capacidades hacia cada segmento posible de una corporación son cada vez más comunes. Se busca que cualquier persona dentro de una organización tenga el acceso en cualquier momento a la información que necesita para lograr cumplir con sus labores o para desarrollar proyectos de crecimiento y optimización.

Las nuevas tecnologías son parte del crecimiento de todos los sistemas. Ya sea que tengan éxito o no, siempre pueden ofrecer algún beneficio o colaboración en la búsqueda de soluciones. La tecnología de Óptica en espacio libre FSO, es presentada en este documento como una alternativa más para estas empresas que en determinado momento necesitan que su red de área local LAN se extienda hacia un punto ubicado en otro edificio a no más de 4 o 5 kilómetros, con capacidad para manejar grandes velocidades de información (hasta 1.25 Gbps), con gran seguridad para sus datos, facilidad y corto tiempo de instalación.

Se hace referencia también, como es el caso de cualquier sistema, de los posibles inconvenientes que pueden presentarse al usar esta tecnología. Principalmente corresponden a aspectos climáticos como la niebla y el viento. Estos aspectos no tendrán el mismo nivel de impacto en todos los lugares por lo que nuevamente como en cualquier inversión que se realice en tecnología, es muy importante realizar un estudio detallado del lugar donde se desplegara el proyecto, aspectos técnicos de la instalación y definir muy claramente las necesidades que debe cubrir el sistema a instalar.

No se tiene referencia respecto a su uso en Guatemala, pero pudo percibirse en el desarrollo de la investigación de que no es una tecnología muy conocida en nuestro medio. Ya ha sido ofrecida como alternativa por al menos una empresa de telecomunicaciones pero no tuvo gran aceptación por factores particulares que se tienen en el ámbito de las telecomunicaciones en nuestro país. No obstante se puede encontrar, a través del Internet principalmente, testimonios de múltiples usuarios de diferentes empresas y en diferentes países respecto a los buenos resultados que han obtenido al instalar un sistema FSO. Esto no hace más que confirmarnos que un sistema que ha funcionado a la perfección para alguien, no tendrá el mismo resultado necesariamente para todos los usuarios. Las posibilidades de crecimiento de esta tecnología aun están abiertas gracias a la popularidad que han tomado últimamente otros sistemas inalámbricos y a que en Guatemala aun falta ver un mayor crecimiento en cuanto a la demanda de anchos de banda muy grandes.

# 1. FSO

## 1.1 Reseña histórica

### 1.1.1 Comunicaciones ópticas inalámbricas

En la actualidad, la economía de la información depende de la transmisión de datos, voz y multimedia a través de las redes de telecomunicaciones. A pesar de la existencia de nuevas tecnologías que han habilitado mayor capacidad a las líneas telefónicas de cobre para transportar información de manera más eficiente, las redes ópticas continúan siendo el medio más idóneo para dar una verdadera conectividad en las comunicaciones de gran ancho de banda.

Existen dos distintos tipos de comunicaciones ópticas: por fibra óptica y los sistemas ópticos inalámbricos basados en la tecnología de la **Óptica del espacio libre FSO** (*Free Space Optics*). Para el desarrollo de redes de larga distancia, no existe mejor alternativa que la fibra, la cual es capaz de transportar información a velocidades de 40 Gbps cuando se combina con la tecnología DWDM (Multiplexión densa, por división de longitud de onda). Sin embargo, para realizar conexiones sobre distancias que pueden denominarse cortas en ciudades, lo que correspondería a la última milla entre la fibra y la mayoría de los usuarios finales, es tan satisfactorio el desempeño de la fibra como el de las soluciones ópticas inalámbricas. Ambas tecnologías provienen del mismo árbol familiar y tienen una gran cantidad de similitudes.

En cierto momento, muchos de los líderes de la industria de las telecomunicaciones, contemplaron la idea de llegar a tener redes absolutamente de fibra. Pero esto se ha vuelto hasta la fecha una idea poco práctica debido a diferentes factores. En ciertas ciudades el proceso de realizar un tendido de fibra consume una gran cantidad de tiempo y en ocasiones extremadamente costoso.

El cuidado y reparación de fibras en funcionamiento ante eventos de interrupción por accidente, sabotajes o desastres naturales es también un proceso que consume tiempo y presenta grandes retos técnicos. Esto repercute en la frustración de los usuarios ante cada hora que se encuentran sin tener acceso a su red.

Es innegable que la idea de redes totalmente de fibra óptica es algo promisorio, debido a sus grandes capacidades, pero aun existen obstáculos que impiden que esto sea una total realidad.

La integración de la fibra con la tecnología óptica inalámbrica permite varias ventajas, debido a sus características en común. Primero, las soluciones ópticas inalámbricas pueden usar las mismas longitudes de onda para transmisión óptica utilizadas por la fibra (850nm y 1550 nm). Segundo, las comunicaciones ópticas inalámbricas y la fibra pueden utilizar los mismos componentes, tales como láser, receptores y amplificadores. Tercero, ambas tecnologías pueden transmitir información digital utilizando un grupo de protocolos. Cuarto, la comunicación óptica inalámbrica puede entregar un ancho de banda de hasta 2.5 Gbps que es suficiente para complementar las redes de fibra.

El concepto de la transmisión de información a través del aire por medio de una pequeña señal modulada es ya bastante antiguo. A pesar de que grandes avances se han hecho durante los últimos 10 años, el concepto se mantiene relativamente simple.

Un delgado haz de luz es transmitido a través de la atmósfera y posteriormente recibido en la estación receptora. Los avances que han llevado a lo que hoy se conoce como comunicaciones ópticas en espacio libre (FSO), han sido debidos a la necesidad de aumentar el ancho de banda y mejorar los sistemas de comunicaciones.

Dado el hecho de que el FSO y los sistemas de transmisión por fibra óptica usan similares longitudes de onda en el rango infrarrojo y tienen similares capacidades en el ancho de banda, a menudo se hace referencia del FSO como la “transmisión óptica sin fibra” o la “transmisión óptica inalámbrica”. Por otro lado, dado el hecho de que el espectro óptico no se encuentra bajo licencia a frecuencias del orden de cientos de Tera hertzios, la mayoría de los sistemas FSO usan un simple código de apagado- encendido (OOK) como formato de modulación, el cual es el mismo utilizado en los sistemas digitales de fibra óptica donde normalmente los datos son transmitidos digitalmente con la luz encendida representando un uno y la luz apagada representando un cero.

Las comunicaciones ópticas inalámbricas han sido objeto de muchas investigaciones por parte de diferentes organizaciones y se han llegado a desarrollar y experimentar, a través de varios proyectos tales como el enlace óptico de uno o dos satélites estacionarios con uno orbitante de baja altura y enlaces entre una estación espacial y la tierra, los cuales fueron desarrollados por la NASA, la Agencia Espacial Europea y otras organizaciones científicas. Para este tipo de tecnologías han utilizado transmisores de diodos láser de forma directa, o conectados a un telescopio. En lado del receptor se usa generalmente fotodiodos de avalancha de Silicón o dispositivos ópticos PLL.

La Fuerza Aérea Estadounidense, por su parte, se ha interesado en las comunicaciones ópticas inalámbricas como una opción viable para la comunicación aérea entre dos aeronaves de combate en formación cercana, debido a que la comunicación vía láser ofrece menos riesgo de interceptación y mayor capacidad de ancho de banda que las comunicaciones por RF debido a que la longitud de onda es mas pequeña.

### **1.1.2 El láser**

Un láser es un aparato (o dispositivo) que produce un tipo muy especial de luz que muy intensa. La intensidad es una medida de la potencia por unidad de superficie, e incluso los láser que emiten sólo algunos mili vatios son capaces de producir una elevada intensidad en un rayo de un milímetro de diámetro. En realidad, su intensidad puede ser igual a la de la luz del sol. Cualquier lámpara ordinaria emite una cantidad de luz muy superior a la de un pequeño láser pero esta es esparcida por todo el salón donde se encuentra la lámpara. Algunos láser pueden producir muchos miles de vatios continuamente; otros son capaces de producir billones de vatios en un impulso cuya duración es tan sólo la mil millonésima parte de un segundo.

Los haces láser son estrechos y no se dispersan como los demás haces de luz. Esta cualidad se denomina direccionalidad. Se sabe que ni la luz de un potente foco logra desplazarse muy lejos: si se enfoca hacia el firmamento, su rayo parece desvanecerse de inmediato. Sin embargo, se han logrado reflejar haces láser de pocos vatios de potencia sobre la luna y su luz era todavía lo suficientemente brillante para verla desde la tierra. Uno de los primeros haces láser que se disparó contra la luna en 1962 sólo llegó a dispersarse únicamente cuatro kilómetros sobre la superficie lunar.

La luz láser es coherente. Esto significa que todas las ondas luminosas procedentes de un láser se acoplan ordenadamente entre sí. Una luz corriente, como la procedente de una bombilla, genera ondas luminosas que comienzan en diferentes momentos y se desplazan en direcciones diversas. Algo parecido a lo que ocurre cuando se arroja un puñado de piedrecillas en un lago.

Lo único que se crean son pequeñas salpicaduras y algunas ondulaciones. Ahora bien, si se arrojan las mismas piedrecillas una a una con una frecuencia exactamente regular y justo en el mismo sitio, puede generarse una ola en el agua de mayor magnitud.

Los láseres producen luz monocromática. La luz común contiene todos los colores de la luz visible (es decir, el espectro), que combinados se convierten en blanco. Los haces de luz láser han sido producidos en todos los colores del arco iris (si bien el más común es el rojo), y también en muchos tipos de luz invisible; pero un láser determinado sólo puede emitir única y exclusivamente un solo color. Existen láseres sintonizables que pueden ser ajustados para producir diversos colores, pero incluso éstos no pueden emitir más que un color único en un momento dado. Además, existen numerosos láseres que proyectan luz invisible, como la infrarroja y la ultravioleta.

El láser es uno de los más significativos inventos del siglo 20. Se le puede encontrar en una gran variedad de productos que van desde lectores de discos compactos hasta redes de fibra óptica. La gama de usos de los láseres es sorprendente, hasta el punto de que alcanza una extensión mucho más amplia que la concebida originariamente, por los científicos que diseñaron los primeros modelos, y supera en mucho la visión de los primeros escritores de ciencia-ficción, quienes en la mayoría de los casos sólo supieron ver en él un arma futurista. También resulta sorprendente la gran variedad de láseres existentes.

En un extremo de la gama se encuentran los láseres fabricados con minúsculas pastillas semiconductoras, similares a las utilizadas en circuitos electrónicos, con un tamaño no superior al de un grano de sal. En el extremo opuesto se encuentran los láseres bélicos del tamaño de un edificio, con los que experimenta actualmente el ejército.

La palabra láser es realmente un acrónimo para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (Amplificación de luz por emisión estimulada de radiación).

#### **1.1.2.1 Historia del láser**

La historia comenzó en 1916, cuando Albert Einstein estudiaba el comportamiento de los electrones en el interior del átomo. Por regla general, los electrones son capaces de absorber o emitir luz. En realidad, los electrones emiten luz espontáneamente sin ninguna intervención externa. Sin embargo, Einstein previó la posibilidad de estimular los electrones para que emitiesen luz de una longitud de onda determinada. El estímulo se lo proporcionaría una luz adicional de la misma longitud de onda. A pesar de que R. Ladenberg verificó el pronóstico de Einstein en 1928, nadie pensó seriamente en construir un dispositivo basado en el fenómeno en cuestión hasta principios de los años cincuenta.

Einstein descubrió la emisión estimulada, pero para fabricar un láser se precisa también amplificación de dicha emisión estimulada. La primera propuesta conocida para la amplificación de la emisión estimulada apareció en una solicitud de patente soviética en el año 1951, presentada por V.A. Fabrikant y dos de sus alumnos. Sin embargo, dicha patente no se publicó hasta 1959, y por consiguiente no afectó a los demás investigadores.

El 26 de abril de 1951, Charles H. Townes se dio repentinamente cuenta de las condiciones necesarias para amplificar la emisión estimulada de microondas. Las microondas son ondas electromagnéticas muy cortas, como por ejemplo, las que se utilizan en ciertos tipos de hornos. No se trata de ondas luminosas, y sin embargo, la revelación de Townes tuvo una importancia sumamente trascendental para el láser.

Siguiendo el método tradicional de los catedráticos de física, formuló el problema en forma de tema para una tesis y se lo ofreció a James P. Gordon, alumno licenciado de la universidad de Columbia. Tres años más tarde, Gordon, Townes y Herbert Zeiger habían logrado construir en Columbia el primer máser (amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación).

Durante los años siguientes proliferaron los másers, pero por desgracia se encontraron pocas aplicaciones para los aparatos en cuestión. Una de sus utilidades consiste en amplificar las señales que los radioastrónomos reciben del espacio lejano, y en las comunicaciones por medio de satélite, y se usan además como medida de frecuencias en los relojes atómicos de ultra precisión.

En septiembre de 1957, Townes esbozó un proyecto para la construcción de un "máser óptico" que emitiría luz visible. Y se puso en contacto con su viejo amigo Arthur Schawlow. Entre ambos desarrollaron un plan detallado para la construcción de un láser. En noviembre de 1957, Gordon Gould comenzó a describir su propia idea para la construcción de un aparato semejante utilizando -al parecer por primera vez- el término láser. Gould asegura admitió, antes de que lo hicieran otros pioneros del láser, que sería posible conseguir densidades de energía hasta entonces inalcanzables. Puntualizó que la segunda ley de termodinámica no limita el brillo del láser. Dicha ley afirma que la temperatura de una superficie calentada por un haz procedente de una fuente radiación térmica no puede exceder la temperatura de la fuente.

Gould comprendió que el láser sería una fuente de luz no térmica y, por consiguiente, capaz de generar temperaturas muy superiores a la suya. En la práctica, esto significa que un láser que opere a temperatura ambiente es capaz de producir un haz que llegue a fundir el acero.

Un haz de luz láser debidamente focalizado podría ser utilizado para generar una fusión termonuclear, según pronosticó Gould en sus notas, además de afirmar que el láser podría emplearse para establecer comunicaciones con la luna.

Habían otros equipos que se esforzaban en construir un láser lo antes posible. En aquella época se suponía que los gases constituirían los mejores elementos para la acción del láser.

Entre quienes observaban el ajetreo reinante, se encontraba un físico de los laboratorios de investigación de la compañía aérea Hughes, en Malibu, California, llamado Theodore H. Maiman. Trabajando solo y sin ayuda alguna por parte del Gobierno, Maiman construyó un pequeño artefacto que consistía en un cristal cilíndrico de rubí de un centímetro aproximado de diámetro, rodeado de una lámpara espiral intermitente. Los extremos de la barra de rubí habían sido cubiertos con el fin de que actuaran como espejos, condición necesaria para la oscilación del láser. Cuando el cristal recibía ráfagas de luz de unas millonésimas de segundo de duración, producía breves pulsaciones de luz Láser. El 7 de julio de 1960, Maiman comunicó a la prensa que había hecho funcionar el primer láser.

El láser de Maiman producía unos 10.000 vatios de luz, pero duraba escasamente unas millonésimas de segundo en un momento dado y correspondía a un extremo tan rojo del espectro luminoso que era casi invisible.

Se precisaban delicados instrumentos para comprobar que las pulsaciones no eran simplemente fluorescentes, sino que correspondían a un tipo de luz que nadie había visto hasta entonces: la luz láser.

Después de estudiar el trabajo de Maiman, los demás investigadores dirigieron rápidamente su atención a la construcción de otros modelos de láseres. Al principio, el progreso era lento. Durante el año 1960 se construyó el primer láser de gas y dos nuevos modelos de cristal, uno de los cuales era de Schawlow. En 1961 se descubrieron dos nuevos tipos de láser, uno de ellos debido al equipo de Gould de la TRG Inc. Al igual que el de Maiman, funcionaba por bombeo óptico, pero el material activo era vapor de cesio (un metal).

El verdadero auge comenzó en 1962, y en 1965 la actividad del láser había sido observada en mil longitudes de onda diferentes, y ello sólo en los gases. Fueron muchos los que comenzaron a estudiar las posibles aplicaciones de los láseres a partir del momento en que se descubrieron. Una de ellas consistía en calcular la distancia a la que se encontraban ciertos objetos, y los militares no tardaron en aprovecharla para determinar la posición de los blancos. Los investigadores de los laboratorios Bell, entre otros, empezaron a estudiar su aplicación en el campo de las comunicaciones, como habían previsto en todo momento Townes y Schawlow.

### **1.1.2.2 Aplicaciones del láser**

Los posibles usos del láser son casi ilimitados. El láser se ha convertido en una herramienta valiosa en la industria, la investigación científica, la tecnología militar o el arte.

## **Industria**

Es posible enfocar sobre un punto pequeño un haz de láser potente, con lo que se logra una enorme densidad de energía. Los haces enfocados pueden calentar, fundir o vaporizar materiales de forma precisa.

Por ejemplo, los láseres se usan para taladrar diamantes, modelar máquinas herramientas, recortar componentes microelectrónicos, calentar chips semiconductores, cortar patrones de moda, sintetizar nuevos materiales o intentar inducir la fusión nuclear controlada (véase Energía nuclear). El potente y breve pulso producido por un láser también hace posibles fotografías de alta velocidad con un tiempo de exposición de algunas billonésimas de segundo. En la construcción de carreteras y edificios se utilizan láseres para alinear las estructuras.

## **Investigación científica**

Los láseres se emplean para detectar los movimientos de la corteza terrestre y para efectuar medidas geodésicas. También son los detectores más eficaces de ciertos tipos de contaminación atmosférica. Los láseres se han empleado igualmente para determinar con precisión la distancia entre la Tierra y la Luna y en experimentos de relatividad. Actualmente se desarrollan conmutadores muy rápidos activados por láser para su uso en aceleradores de partículas, y se han diseñado técnicas que emplean haces de láser para atrapar un número reducido de átomos en un vacío con el fin de estudiar sus espectros con una precisión muy elevada. Como la luz del láser es muy direccional y monocromática, resulta fácil detectar cantidades muy pequeñas de luz dispersa o modificaciones en la frecuencia provocadas por materia. Midiendo estos cambios, los científicos han conseguido estudiar las estructuras moleculares.

Los láseres han hecho que se pueda determinar la velocidad de la luz con una precisión sin precedentes; también permiten inducir reacciones químicas de forma selectiva y detectar la existencia de trazas de sustancias en una muestra. Véase Análisis químico; Fotoquímica.

### **Comunicaciones**

La luz de un láser puede viajar largas distancias por el espacio exterior con una pequeña reducción de la intensidad de la señal. Debido a su alta frecuencia, la luz láser puede transportar, por ejemplo, 1.000 veces más canales de televisión de lo que transportan las microondas. Por ello, los láseres resultan ideales para las comunicaciones espaciales. Se han desarrollado fibras ópticas de baja pérdida que transmiten luz láser para la comunicación terrestre, en sistemas telefónicos y redes de computadoras. También se han empleado técnicas láser para registrar información con una densidad muy alta. Por ejemplo, la luz láser simplifica el registro de un holograma, a partir del cual puede reconstruirse una imagen tridimensional mediante un rayo láser.

### **Medicina**

Con haces intensos y estrechos de luz láser es posible cortar y cauterizar ciertos tejidos en una fracción de segundo sin dañar al tejido sano circundante. El láser se ha empleado para 'soldar' la retina, perforar el cráneo, reparar lesiones y cauterizar vasos sanguíneos. También se han desarrollado técnicas láser para realizar pruebas de laboratorio en muestras biológicas pequeñas.

## **Tecnología militar**

Los sistemas de guiado por láser para misiles, aviones y satélites son muy comunes. La capacidad de los láseres de colorante sintonizables para excitar de forma selectiva un átomo o molécula puede llevar a métodos más eficientes para la separación de isótopos en la fabricación de armas nucleares.

## **Láser atómico**

En enero de 1997, un equipo de físicos estadounidenses anunció la creación del primer láser compuesto de materia en vez de luz.

Del mismo modo que en un láser de luz cada fotón viaja en la misma dirección y con la misma longitud de onda que cualquier otro fotón, en un láser atómico cada átomo se comporta de la misma manera que cualquier otro átomo, formando una "onda de materia" coherente.

Los científicos confían en las numerosas e importantes aplicaciones potenciales de los láseres atómicos, aunque presenten algunas desventajas prácticas frente a los láseres de luz debido a que los átomos están sujetos a fuerzas gravitatorias e interaccionan unos con otros de forma distinta a como lo hacen los fotones.

### **1.1.2.3 Funcionamiento del láser**

Un láser genera luz, ya sea visible o infrarroja, a través de un proceso conocido como emisión estimulada. Es necesario entender dos conceptos básicos para entender lo que es la emisión estimulada. El primero es la absorción que ocurre cuando un átomo absorbe energía o fotones. El segundo es la emisión que ocurre cuando un átomo emite fotones. La emisión ocurre cuando un átomo se encuentra en un nivel de excitación o de alta energía y luego regresa a un nivel estable. Cuando esto ocurre naturalmente, se le llama emisión espontánea porque no se necesita de nada que la active.

Figura 1 Emisión estimulada de un fotón.



Fuente: Rami Arieli , "La aventura laser"

La transferencia de energía a un átomo o desde un átomo se puede realizar de dos maneras distintas:

- › Colisiones con otros átomos, y transferencia de energía cinética como consecuencia de la colisión. Esta energía cinética es transferida como energía interna del átomo.
- › Absorción y emisión de radiación electromagnética.

Para el proceso Láser es aplicado el segundo de estos mecanismos.

### **Emisión espontánea de radiación electromagnética**

Uno de los principios físicos básicos en el cual se basa la Termodinámica es que por su naturaleza, cada sistema prefiere encontrarse en el estado de energía más bajo. Este estado es llamado estado Fundamental.

Cuando se aplica energía a un sistema se excitan los átomos del material, y se promocionan a un nivel de mayor energía. Estos electrones pueden permanecer cierto tiempo en el estado excitado, y entonces volver a los estados de más baja energía, emitiendo exactamente la cantidad de energía, que coincide con la diferencia entre los niveles de energía (delta E).

Si estos paquetes de energía se transmiten como radiación electromagnética, se denominan *fotones*.

La emisión de un fotón individual es aleatoria, realizándose individualmente por cada átomo, sin relación ninguna entre los fotones emitidos por unos átomos u otros. Cuando los fotones se emiten aleatoria mente por diferentes átomos a diferentes tiempos, el proceso se denomina ***Emisión Espontánea***. Ya que esta emisión es independiente de influencias externas, no hay direcciones preferidas para los diferentes fotones, y no hay relación entre las fases de los fotones emitidos por los diferentes átomos.

### **Emisión estimulada**

Los átomos están en el estado excitado un corto periodo de tiempo (alrededor de  $10^{-8}$  [seg]), y entonces vuelven al nivel de más baja energía por emisión estimulada. Cada nivel de energía tiene un tiempo de vida media característico, que es el tiempo después del cuál sólo  $1/e$  (alrededor del 37%) de los átomos excitados permanecen todavía en el estado excitado. De modo que es el tiempo en el cual el 67% de los átomos excitados han vuelto al nivel de más baja energía. De acuerdo con la teoría cuántica, la transición de un nivel de energía a otro viene descrita por una probabilidad estadística.

La probabilidad de transición desde un nivel de energía más alto hasta otro más bajo es inversamente proporcional al tiempo de vida del nivel de energía más alta. En realidad, la probabilidad para diferentes transiciones es característica de cada transición, de acuerdo con las reglas de selección. Cuando la probabilidad de transición es baja para una transición específica, el tiempo de vida de este nivel de energía es largo (alrededor de  $10^{-3}$  [seg]), y este nivel se convierte en un nivel "meta estable". Este nivel meta estable puede estar poblado por una gran cantidad de átomos. Como veremos, este nivel puede ser un candidato para producir acción láser.

Cuando la población de un nivel de energía más alta es mayor que la población de un nivel de energía más baja, se establece la condición de "inversión de población".

Si hay una inversión de población entre dos niveles de energía, existe una alta probabilidad de que un fotón incidente estimule a un átomo excitado a volver a un estado de más baja energía, emitiendo otro fotón. La probabilidad de este proceso depende de la coincidencia entre la energía del fotón incidente y la diferencia de energía entre los dos niveles.

La radiación electromagnética que produce el láser, puede situarse en cualquier región del espectro, incluyendo el espectro visible, el espectro Ultra-Violeta (UV), el espectro Infra-Rojo (IR), y más allá. Cada región del espectro tiene un nombre particular, al igual que su rango de longitudes de onda, frecuencias y energías. Los límites entre las regiones no son nítidos y precisos, sino que se definen, de acuerdo con las aplicaciones de la radiación en esa región del espectro.

Un láser básico utiliza una cámara o cavidad con espejos para reflejar las ondas de luz de tal manera que se puedan reforzar unas a otras.

Una sustancia excitable en estado gaseoso, líquido o sólido tal como el rubí del láser original, se encuentra dentro de la cavidad y es la que determina la longitud de onda del haz del láser. A través de un proceso llamado bombeo, se introduce energía a la cavidad excitando los átomos que se encuentran dentro y causando de esta manera que existan más átomos excitados que en estado neutral lo que conlleva a una emisión estimulada. Los fotones liberados oscilan y se reflejan entre los espejos de la cavidad, creando energía y causando que otros átomos liberen más fotones.

Uno de los espejos permite que algunos de los fotones liberados se escapen de la cavidad resultando un haz de láser emitiendo de un extremo de la cavidad.

#### **1.1.2.4 Propiedades de la radiación láser**

La " luz Ordinaria " (del sol o de las lámparas) está compuesta por muchas longitudes de onda diferentes, emitidas en todas las direcciones, y no hay ninguna relación entre las fases de las diferentes ondas emitidas por la fuente.

La radiación láser está caracterizada por ciertas propiedades que no están presentes en otro tipo de radiación electromagnética, las cuales son:

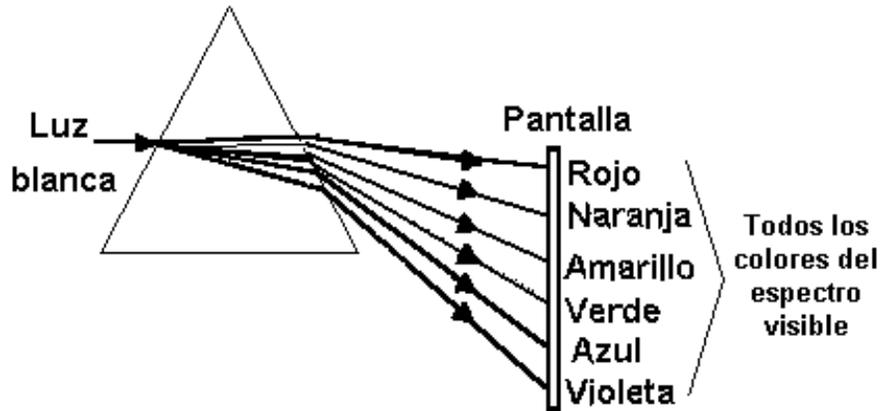
- Monocromaticidad
- Direccionalidad .
- Coherencia

#### **Monocromaticidad**

La característica de la monocromaticidad se refiere a la composición de un solo color. Para comprender este término, examinemos la " **luz blanca**" que es el color que interpreta nuestra mente cuando vemos todos los colores juntos.

Cuando la luz blanca se transmite a través de un prisma se divide en los diferentes colores que la componen, como se puede apreciar en la figura 2.

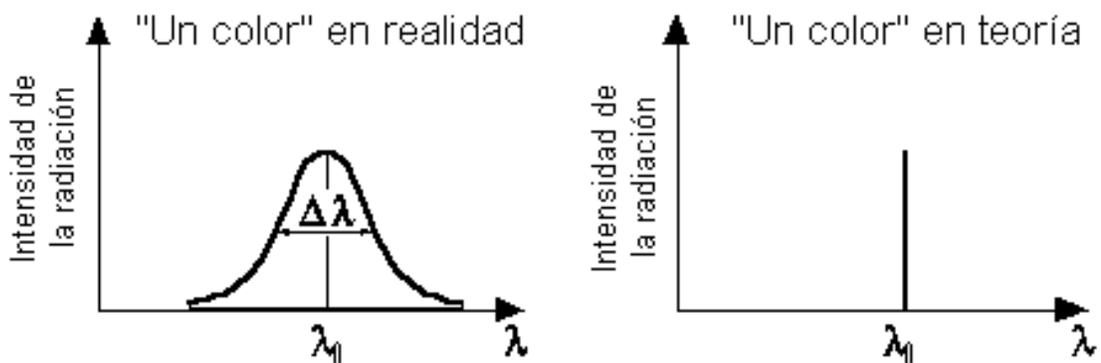
Figura 2. Luz blanca pasando a través de un prisma



En sentido teórico "un color", que recibe el nombre de " línea espectral ", significa una longitud de onda ( $\lambda_0$ ).

En la parte derecha de la figura 3 se muestra una gráfica de la intensidad de luz frente a la longitud de onda para el caso ideal de "un color". Allí se muestra una descripción ficticia del concepto real de "un color". Tiene un pico con este valor "del color", pero incluye una dispersión alrededor del pico central. En realidad, cada línea espectral tiene una anchura espectral finita ( $\Delta\lambda$ ) en torno a su longitud de onda central ( $\lambda_0$ ).

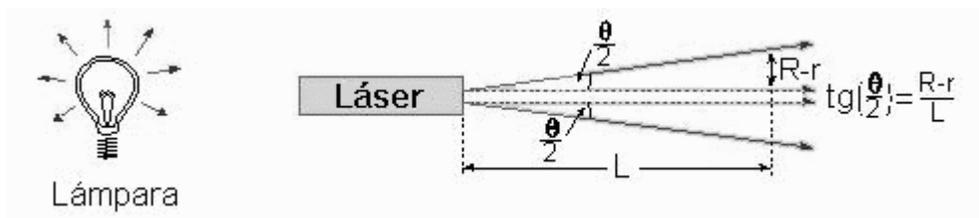
Figura 3 Mono cromaticidad.



## Direccionalidad

La radiación que sale del láser, lo hace en cierta dirección, y se dispersa con un ángulo de divergencia. Esta dispersión angular del rayo láser es muy pequeña comparada con otras fuentes de radiación electromagnética, y se describe mediante un pequeño ángulo de divergencia (del orden de miliradianes). En la figura 4 se muestra una comparación entre la direccionalidad de una luz láser y la de una lámpara incandescente.

Figura 4 Direccionalidad de la luz laser



## Ángulo de divergencia

Ángulo de Divergencia es el ángulo completo de abertura del haz. (Algunos libros emplean como ángulo de divergencia la mitad de este ángulo). La relación entre radianes y grados esta dada por:

$$360^{\circ} = 2 \pi \text{ Radianes}$$

$$1 \text{ Radián} = 57.3^{\circ}$$

$$1 \text{ mili-Radián} = 1 \text{ mrad} = 0.057^{\circ}$$

Usando la relación entre minutos y grados :  $1^{\circ} = 60'$ , tenemos que :

$$1 \text{ mrad} = 0.057 * 60' \cong 3.5'$$

Ya que la divergencia de la radiación láser es del orden de los miliradianes, el haz es casi paralelo, y la radiación láser puede enviarse a grandes distancias.

## Coherencia

Puesto que la radiación electromagnética es un fenómeno ondulatorio, cada onda electromagnética se puede describir como una suma (superposición) de ondas sinusoidales en función del tiempo. Según la teoría ondulatoria, cada onda se puede describir por una función de onda:

$$y = A \cos(\omega t + \phi)$$

$A =$  **Amplitud**

$\omega = 2\pi\nu =$  **Frecuencia Angular**

$\phi =$  **Fase Inicial** de la onda. (Describe el punto inicial de oscilación de la onda en el tiempo)

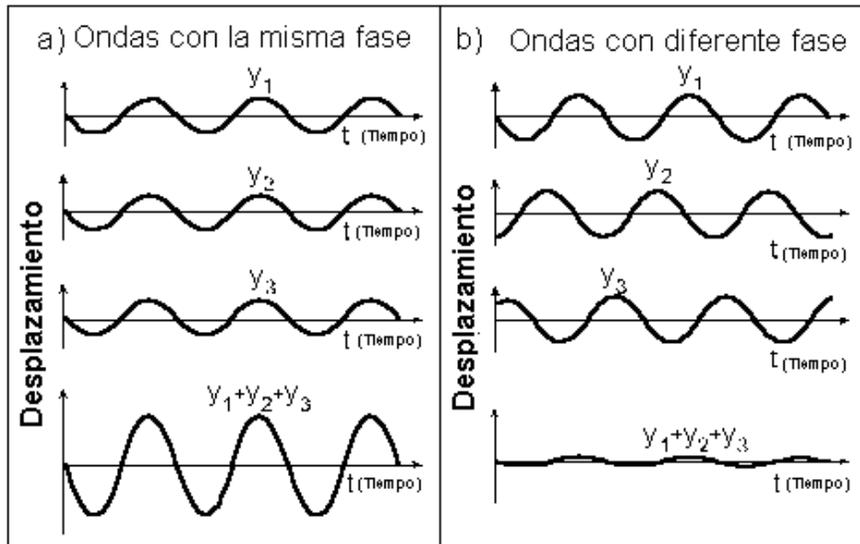
$(\omega t + \phi) =$  **Fase** de la onda.

## Superposición de ondas

Ondas coherentes son aquellas que mantienen la fase relativa entre ellas. La luz de una lámpara incandescente está compuesta de ondas de muchas longitudes de onda, y cada onda aparece aleatoriamente con una relación no sistemática entre su fase y la de las demás ondas.

La radiación del láser está compuesta por ondas de la misma longitud de onda, que empiezan al mismo tiempo y mantienen la fase relativa mientras avanzan. Por suma (superposición) de las amplitudes de onda de diferentes ondas, se encuentran mayores amplitudes para la radiación del láser como se muestra en la figura 5.

Figura 5 Superposición de ondas



#### 1.1.2.5 Historia de las comunicaciones con láser

Los primeros experimentos en las comunicaciones con láser fueron realizados por la NASA y la fuerza aérea Estadounidense. Uno de los primeros experimentos utilizaba código Morse. Un técnico simplemente cortaba el haz con su mano para enviar un mensaje hacia el receptor remoto. Las primeras patentes de las comunicaciones láser fueron llenadas durante la década de los 60. Desde esa época hasta llegar a los 80 varias organizaciones relacionadas con la defensa experimentaron con comunicaciones láser.

En esencia toda la ingeniería de las comunicaciones láser de la actualidad fue realizada durante los últimos 40 años aproximadamente.

Las actividades de investigación para propósitos aeroespaciales y de defensa establecieron fuertes fundamentos sobre los cuales se basan los sistemas ópticos inalámbricos comerciales de hoy día. Se han realizado experimentos para comunicaciones de tierra hacia aeronaves, de tierra a satélites, satélite a satélite, e incluso de satélite a submarino.

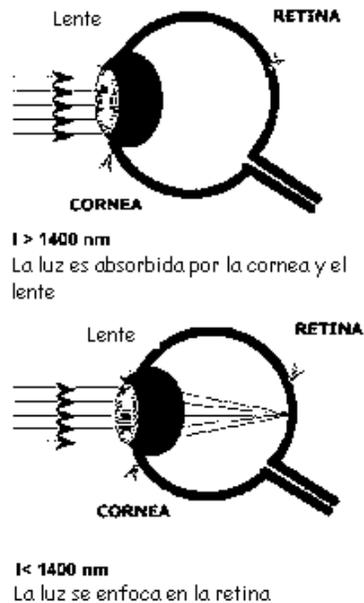
#### **1.1.2.6 Aspectos de seguridad del láser**

Los sistemas de comunicación láser pueden ser diseñados para ser seguros a la vista, lo cual significa que no conllevan un peligro para las personas que pudieran encontrarse en el curso del haz de comunicaciones.

La seguridad para la vista del láser es clasificada por la Comisión Internacional de Electrónica (IEC), que es el organismo internacional para estándares para todos los campos de la electro tecnología. Las reglas y normas de la IEC son adoptadas por las agencias regulatorias en la mayoría de los países del mundo. Un transmisor láser que es completamente seguro a la vista del ojo es designado de clase IEC 1M.

Los sistemas que trabajan a la longitud de onda cercana a los 800nm y los que trabajan cerca de los 1550 nm. Los haces de láser de 800 nm se encuentran cerca del infrarrojo y son por lo tanto, invisibles. Sin embargo, tal como las longitudes de onda visibles, la luz pasa a través de la cornea y es enfocado hacia un pequeño punto en la retina (Figura 6).

Figura 6 Seguridad del Láser



Para rangos entre los 400 los 1400 nm el haz de luz es concentrado en un factor de 100,000 cuando llega a la retina. Entonces a 800 nm la retina puede ser dañada permanentemente por algunos productos ópticos inalámbricos comercialmente disponibles, incluso antes de que la víctima se de cuenta de que esta dañina iluminación ha ocurrido. Mientras tanto, los haces láser a longitudes de onda mayores a los 1400 nm son absorbidos por la cornea y no se enfocan dentro de la retina. Debido a estas propiedades biofísicas del ojo, las longitudes de onda mayores a 1400nm son permitidas a intensidades 50 veces más grandes que las longitudes de onda cerca de los 800 nm.

Este hecho puede ser explotado al especificar una longitud de onda dentro del rango de los 1550 nm, donde el factor de potencia adicional permite que el sistema se propague sobre mayores distancias y soporte mayores velocidades de transmisión de datos.

Históricamente, muchos de las compañías que desarrollan estos sistemas, han empleado longitudes de onda dentro del rango de 780nm a 850 nm, principalmente debido a la disponibilidad que hay en esas longitudes de fuentes eficientes y confiables a base de semiconductores tipo diodo. Para los dispositivos de 780 nm, las ventajas de costo de utilizar la misma longitud de onda que es usada para los reproductores de CD. El costo es un factor importante en la selección de la longitud de onda, pero también debe considerarse varios aspectos adicionales, principalmente el de no exceder los límites de seguridad a la vista en las intensidades transmitidas bajo condiciones de altas tasas de velocidad de transmisión a través de una atenuación atmosférica muy grande.

Otro aspecto a considerar es el desempeño general y el potencial de crecimiento del sistema. Al considerar los diferentes aspectos se puede llegar a determinar que la opción más apropiada es utilizar longitudes de onda cercanas a los 1550 nm, el mismo rango que se usa en los sistemas de comunicación por fibra óptica.

### **1.1.3 Historia de FSO**

La madurez de la tecnología FSO es a menudo subestimada, debido a los malos entendidos respecto al tiempo que llevan los sistemas FSO en proceso de desarrollo. Históricamente, la óptica del espacio libre o las comunicaciones inalámbricas ópticas fueron demostradas inicialmente por Alexander Graham Bell en el siglo diecinueve (antes incluso que su demostración del teléfono). El experimento de Bell consistía en convertir sonidos de voz a señales telefónicas y transmitir las entre receptores a través del espacio a lo largo de un haz de luz a una distancia de aproximadamente 182 metros.

Llamó a su dispositivo experimental el fotófono (*photophone*) y considero a esta tecnología óptica como su invención más importante debido a que no requería cables para la transmisión. Este experimento demostró el principio básico de las comunicaciones ópticas a pesar de que el fotófono nunca se convirtió en una realidad comercial. Finalmente toda la ingeniería de la tecnología FSO actual se desarrollo durante los últimos 40 años.

Técnicamente, las comunicaciones ópticas incluyen todo tipo de sistemas en los que se usa luz, incluyendo las señales de espejo y los faros. Las tecnologías ópticas a base de electricidad, llamadas ópticas o electro-ópticas, se iniciaron con la introducción del láser en 1960, el cual permitió la transmisión de información digital a través de pulsos de luz. Inicialmente, la actividad militar aeroespacial estableció los más sólidos fundamentos en los que se basa la actual tecnología FSO de láser que se usa para fines comerciales.

Los trabajos para el desarrollo de la tecnología fueron realizados originalmente por la milicia y la NASA y se ha usado FSO por más de tres décadas para conseguir rápidos canales de comunicación en lugares remotos. Algunos científicos trabajaban ya en Alemania desarrollando los sistemas prototipo de FSO desde finales de los años 60's incluso antes que apareciera el cable de fibra óptica. En ese tiempo, la idea de que los sistemas FSO pudieran proporcionar conectividad de alta velocidad sobre distancias cortas, parecía demasiado futurista. Pero las investigaciones hechas en esa época, hicieron posibles los sistemas ópticos de espacio libre que permiten la transmisión de datos simultáneamente en ambas direcciones a tasas del rango de Giga bit por segundo y a distancias metropolitanas de algunas cuabras o incluso de algunos kilómetros. Como parte del proceso de desarrollo de esta tecnología, se presento un gran auge en las inversiones para su desarrollo a principios de la década de los 90's, pero luego se perdió el interés silenciosamente.

Luego casi diez años después la tecnología FSO empezó a ser noticia nuevamente. Los cambios que se produjeron en esos diez años corresponden a mejoras en los Láser, los detectores y el procesamiento de datos.

La tecnología fue usada inicialmente en la conectividad empresarial. Se observa principalmente en redes de área local que se distribuyen en varios edificios en los que el tránsito de personas o vehículos se convierte en un obstáculo para el tendido de cables de cobre o fibra óptica. Hace algunos años, la tecnología FSO ha empezado a expandirse a otras áreas y las diferentes empresas que la producen empezaron a realizar pruebas de campo con diferentes compañías de telecomunicaciones de Estados Unidos, Europa, Asia, Sudamérica y el Este Medio.

En la actualidad hay varios factores que impulsan el uso de tecnologías como esta. Entre estos se encuentran que la excavación de ductos en calles tiene un alto costo y a su vez causa congestiones de tránsito, incremento de la contaminación, deforestación y en algunos casos la destrucción o afectación de áreas históricas. En muchas ciudades en el mundo se han tomado medidas, con el fin de reducir este tipo de efectos que produce el crecimiento de las comunicaciones.

Otro aspecto a considerar es que muchas empresas de telecomunicaciones han invertido billones de dólares para interconectar ciudades y áreas urbanas pero aun se presenta el problema de que muchos de los edificios comerciales no tienen el acceso a la fibra.

Finalmente, se tiene el hecho de que se ha multiplicado la cantidad de aplicaciones que se le pueden dar así como el crecimiento sin límites de la demanda de ancho de banda por parte de los usuarios.

## 1.2 Funcionamiento

FSO es una tecnología de línea vista en la que se usan haces de luz invisible para proveer una conexión óptica con un ancho de banda en el que se puede enviar y recibir voz, video y datos. Para conseguir esta conectividad óptica no se requiere de inversión en cable de fibra óptica ni en licencias del espectro de RF. La tecnología FSO requiere de la luz.

El uso de la luz es un concepto simple tal y como el que se usa en las transmisiones por fibra óptica. La gran diferencia es el medio de transmisión. La luz viaja a través del aire a una velocidad mayor que en el vidrio por lo que se puede decir que FSO es una tecnología de comunicación a la velocidad de la luz.

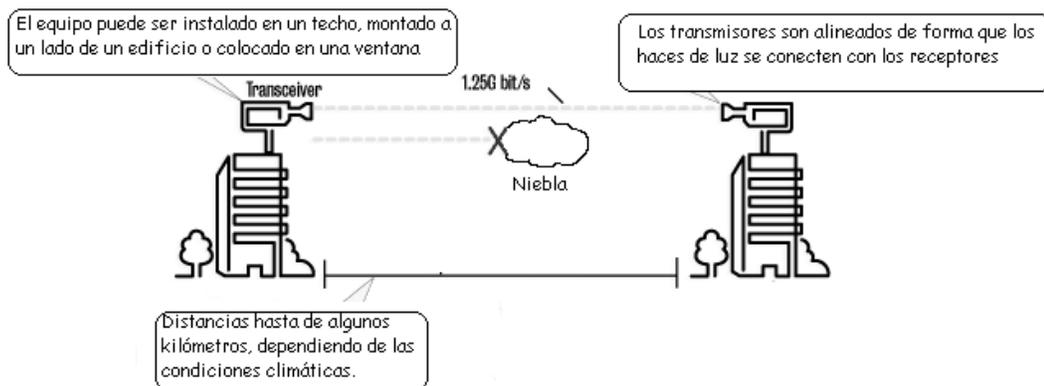
El funcionamiento esta basado en la conectividad entre dos unidades ópticas inalámbricas. Cada una consistiendo de un transmisor-receptor (*transceiver*) óptico con un transmisor y un receptor para conseguir la comunicación bidireccional. Cada unidad incluye una fuente de luz más un lente o telescopio que transmite la luz a través de la atmósfera hacia otro lente que se encuentra recibiendo la información. En el punto de recepción, el lente o telescopio receptor se conecta a un receptor de alta sensibilidad por medio de fibra óptica.

Tal como la fibra óptica, la tecnología FSO utiliza el láser para transmitir datos, pero en lugar de encerrarlos en una fibra de vidrio, los datos son transmitidos a través del aire. Los sistemas FSO disponibles, ofrecen capacidades de transmisión en el rango de los 100 Mbps hasta los 2.5 Gbps. Estos sistemas son compatibles con una gran cantidad de aplicaciones y mercados y pueden ser implementados utilizando una gran variedad de arquitecturas.

FSO transmite haces de luz invisible y segura para el ojo humano desde un telescopio a otro usando láser infrarrojos de baja potencia en el espectro de los Tera Hertzios donde la capacidad puede esperarse razonablemente que llegue a los 10 Gbps. El haz de luz puede transportar cualquier señal de transmisión óptica y cualquier trama de protocolo que un fabricante quiera utilizar.

Los sistemas FSO pueden funcionar sobre distancias de varios kilómetros, siempre y cuando exista una línea vista despejada entre el origen y el destino y suficiente potencia en el transmisor. A diferencia de las comunicaciones inalámbricas por microonda, la tecnología FSO no requiere licencias de espectro o coordinación del uso de frecuencias con otros usuarios ya que no existe el problema de la interferencia y la señal láser punto a punto es muy difícil de interceptar y por lo tanto segura. En la figura 7 se presenta un ejemplo de un enlace FSO en su uso más común.

Figura 7 Enlace FSO



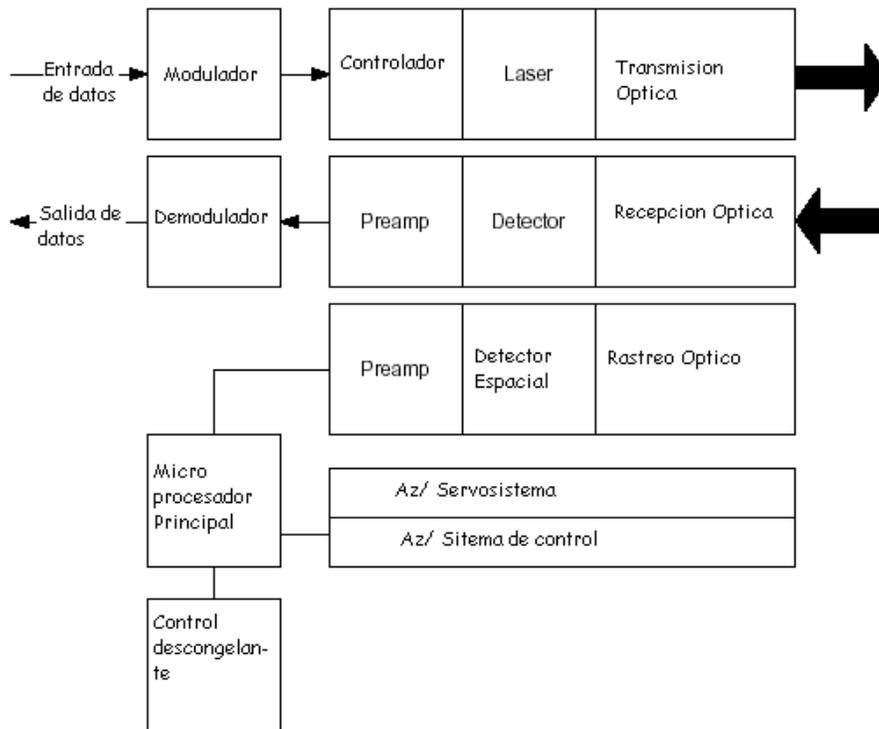
### **1.2.1 Subsistemas de FSO**

A continuación se presenta un diagrama donde se ilustran los mayores subsistemas incluidos dentro de un sistema de comunicación FSO. Las aperturas ópticas dentro de un sistema FSO pueden tener casi una infinita variedad de formas y cierta variedad de función. Pueden ser refractivas, reflectivas, difractivas o combinaciones de estas. En la ilustración, los telescopios de transmisión, recepción y de rastreo aparecen como aperturas ópticas separadas. Así mismo hay una gran cantidad de configuraciones posibles incluyendo a las que un solo dispositivo óptico realiza todas las funciones.

La calidad en el transmisor, en conjunto con el número de frecuencia y de longitud de onda, determina la divergencia mínima que se puede obtener con el sistema.

En el receptor, los aspectos más importantes son el tamaño de apertura y la frecuencia. El tamaño de apertura determina la cantidad de luz recogida en el receptor y la frecuencia determina su campo de vista. El campo de vista del sistema de rastreo óptico debe ser lo suficientemente amplio para adquirir y mantener la integridad del enlace para determinado detector y sistema de control de rastreo.

Figura 8 Subsistemas FSO



Hay varios medios disponibles para acoplar el láser a la apertura de salida. Si se usa un diodo discreto, el diodo es usualmente equipado con un micro lente para limpiar el astigmatismo del haz de salida y por lo tanto esta acoplado a la apertura de salida al colocar el láser en el foco de la apertura óptica del sistema.

El sistema de acoplamiento es muy similar para el láser de fibra debido a que el núcleo del láser de fibra y la salida de apertura de un láser Fabry Perot tienen tamaños similares. La distancia de la apertura del láser a la apertura de salida debe ser mantenida de tal forma que la divergencia del sistema permanezca dentro de las especificaciones en todos los rangos de temperatura que se encuentran en un ambiente externo como lo es el techo de un edificio. Esto se puede lograr con materiales especiales o con control termal.

Los láser de diodo son controlados con corriente DC para poner el dispositivo sobre el nivel límite y luego en un nivel superior, son modulados por corriente AC para proveer por ejemplo códigos de encendido y apagado para la transmisión de datos.

El receptor está acoplado a la apertura de recepción ya sea en espacio libre o por fibra. Dependiendo de la tasa de transmisión y del diseño de alineación óptica, las tolerancias pueden ser extremadamente restrictivas. Como ejemplo, para tasas de 1.25 G bit/s, los detectores con áreas relativamente grandes (diámetro de 50 micrones) pueden ser usados, haciendo alineación con la apertura de recepción de manera directa.

#### **1.2.1.1 El receptor**

La efectividad del receptor en un sistema FSO esta relacionada con diferentes factores tales como el tipo de detector, el rango de sensibilidad y tamaño del receptor, el tamaño y diseño del dispositivo óptico y la longitud de onda utilizada. Con el fin de establecer, la eficiencia del sistema completo, se debe tomar en cuenta el número y potencia de los láser usados para generar la señal.

Los tipos de detectores ópticos usados en la tecnología FSO son de dos tipos: PIN y APD. Los detectores PIN son de menor costo que no tienen ganancia interna, mientras que los detectores APD son más caros pero también más sensitivos con ganancia interna.

Los beneficios de usar la tecnología APD pueden variar pero los resultados en la práctica indican que se tiene una sensibilidad aproximadamente 4 veces mayor que con un detector de tipo PIN Sin embargo el desempeño de un sistema debe tomar en cuenta las características de la transmisión.

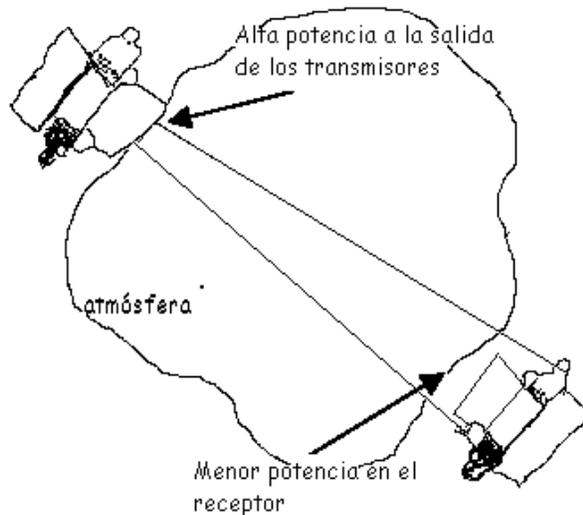
El tamaño del receptor también es muy importante. Un área mayor de recepción reduce la posibilidad de errores debido a los destellos. El destello es una turbulencia atmosférica que se debe a la carga solar y a la convección natural, lo que causa variaciones del índice de refracción del aire en el tiempo y el espacio. Cuando un haz láser se propaga a través de la atmósfera, existe una variación en el tiempo de la intensidad en el receptor debido a este fenómeno. Muy similar a lo que sucede con las estrellas o las luces de una ciudad distante cuando se les ve parpadear. El resultado de una situación de este tipo es que un receptor FSO puede experimentar ráfagas de errores debido a los picos y valles en la potencia de la señal recibida. Una forma de combatir el destello es utilizar un receptor de mayor apertura. Una apertura de recolección que es mayor que la escala espacial del centelleo, provee un efecto promediador de los picos y los valles localizados, mejorando así, la tasa de error. Esta solución de mayor apertura, es más efectiva para el destello que usar varios receptores de apertura menor.

La longitud de onda a la que se opera también contribuye con el desempeño del receptor. Es generalmente cierto que fotodiodos de mayor calidad logran comparables eficiencia tanto en 800nm como en 1550 nm. Sin embargo, las longitudes de onda mayores tienen ventaja en el receptor debido a su menor energía fotónica.

Un foton de 1550 nm tiene la mitad de la energía de uno de 800nm. Debido a esto, por la misma cantidad de energía, un haz de luz de 1550 nm tiene el doble de fotones que uno de 800 nm. Esto resulta en el doble de fotoelectrones creando corriente en el fotodiodo del receptor. Debido a que cierto número de fotoelectrones es requerido para detectar un pulso óptico, un pulso de 1550 nm se puede detectar con 3dB menos de potencia óptica.

La clave para un enlace FSO confiable es llevar toda la cantidad de luz posible de un transmisor-receptor (*transceiver*) hacia el otro. Para determinada distancia entre terminales y un tipo de condición climática, solo se tiene las siguientes preguntas básicas; cuanta luz está siendo transmitida en un extremo y cuanta luz esta siendo recibida en el otro extremo. Debe haber una diferencia entre las dos ya que la luz es atenuada en la atmósfera. Tal y como nosotros podemos ver edificios a varios kilómetros de distancia durante un día despejado, lo mismo puede hacer un sistema FSO. Sin embargo en un día de niebla, cuando es difícil incluso ver los edificios más cercanos, un sistema FSO también tendrá un momento complicado. En el lado del transmisor, lo mejor es tener una mayor potencia de salida del láser ya que eso significa que podrá tener una mayor penetración a través de la atmósfera para lograr mayores distancias (Figura 9). Mientras que en el lado del receptor, para poder recibir la mayor cantidad de luz y por lo tanto de potencia, es mejor tener un mayor diámetro. El receptor debe estar diseñado para ser capaz de trabajar hasta con el nivel de potencia más bajo posible.

Figura 9. Atenuación atmosférica



### **1.2.1.2 El transmisor**

La fuente de luz modulada, que es típicamente un láser o un diodo emisor de luz (LED), provee la señal óptica transmitida y determina todas las capacidades de transmisión para el sistema. Solo la sensibilidad del receptor juega un papel tan importante en el desempeño total del sistema. Para propósitos de telecomunicaciones sólo los láseres que son capaces de ser modulados a 20 Mbit/s hasta 2.5 Gbit/s pueden cumplir con las demandas actuales del mercado. Adicionalmente, son también importantes en la selección del equipo, la forma en que el dispositivo es modulado y cuanta potencia modulada es producida. Los láseres en las bandas de 780 – 925 nm y de 1525 – 1580 nm cumplen con los requerimientos de frecuencia.

La mayor parte de los sistemas FSO operan en las bandas de 850 nm y de 1550nm. Dentro de estas dos ventanas de longitud de onda, los sistemas FSO deben tener las siguientes características:

- Capacidad para operar a niveles de potencia muy altos para el caso de sistemas de larga distancia.
- Modulación de alta velocidad.
- Bajo consumo de potencia
- Capacidad de operar sobre un amplio rango de temperaturas sin tener mayor degradación en el desempeño.
- Tiempo medio entre fallas (MTBF) que este por encima de los 10 años.

Para cumplir con los requisitos anteriores, los fabricantes FSO usan generalmente láser VCSELs para operación en el rango de cortas longitudes de onda IR, y Fabry Perot (FP) o láseres de realimentación distribuida (DFB) para operación en el rango de las longitudes de onda IR mas largas. Muchos otros tipos de láseres no apropiados para los sistemas FSO de alto desempeño.}

## **Laser VCSEL**

El VCSEL (850 nm) es un desarrollo nacido fuera de las comunicaciones con fibra y tiene muchas características atractivas. Los VCSELs revolucionaron el Mercado de los componentes de transmisión debido a su excepcional costo y ventajas de desempeño sobre tecnologías previamente disponibles. Tienen un razonable promedio nominal de potencia de varios milivatios de salida a una operación de alta velocidad y números de Tiempo medio entre fallas MTBF de alta confiabilidad.

Debido a su alta eficiencia, la disipación de potencia no es normalmente un problema para los VCSELs, y el enfriamiento activo no es requerido. Además, los VCSELs emiten luz en la forma de un círculo en lugar de una elipse y la forma redonda del patrón del haz, se ajusta perfectamente al núcleo redondo de la fibra óptica, facilitando el proceso de acople.

## **Láser Fabry–Perot y de realimentación distribuida:**

Los láseres FP y DFB basados en la tecnología de semiconductores InGaAs/InP que opera alrededor de los 1550 nm fueron desarrollados específicamente para comunicaciones con fibra óptica debido a las características de baja atenuación de la fibra óptica en este rango. Con el desarrollo de estas fuentes láser de baja potencia vino la modulación de alta velocidad, estabilidad de longitud de onda, confiabilidad, etc.

Los actuales láseres DFB de 1550 nm de baja potencia han demostrado excelente desempeño durante toda su vida útil, satisfaciendo los estrictos requerimientos de la industria de las telecomunicaciones. Los láser DFB pueden controlar redes de fibra con capacidades de 1 – 40 Gbit/s de modulación bajo condiciones ambientales altamente controladas.

### 1.2.2 Ecuación de enlace FSO

La ecuación del enlace para un sistema FSO es muy simple a un alto nivel, es decir, al dejar fuera de consideración la eficiencia óptica, detectores de ruido, etc. La cantidad de potencia recibida es proporcional a la cantidad de potencia transmitida y del área de la apertura de recepción. Es inversamente proporcional al cuadrado de la divergencia del haz y al cuadrado de la distancia del enlace. También es inversamente proporcional al exponencial del producto del coeficiente de atenuación atmosférica por la distancia del enlace.

$$P_r = P_{trans} \cdot \frac{A_r}{(Div \cdot R)^2} \cdot \exp(-\alpha \cdot R)$$

The diagram shows the equation  $P_r = P_{trans} \cdot \frac{A_r}{(Div \cdot R)^2} \cdot \exp(-\alpha \cdot R)$  with arrows pointing to specific parts: 'Area de recepción' points to  $A_r$ ; 'Divergencia del haz' points to  $Div$ ; 'Coeficiente de Atenuación atmosférica ( $\frac{1}{km}$ )' points to  $\alpha$ .

R = distancia.

Observando esta ecuación, las variables que se pueden controlar son: la potencia transmitida, el tamaño de la apertura de recepción, divergencia del haz, y la distancia del enlace. El coeficiente de atenuación atmosférica es incontrolable en un ambiente de exterior y es independiente de la longitud de onda en condiciones de atenuación demasiado pesadas. Desafortunadamente, la potencia recibida es exponencialmente dependiente del producto del coeficiente de atenuación atmosférica y la distancia. En condiciones atmosféricas reales, para productos de clase de empresas de transporte, este término domina a todo lo demás en esta ecuación.

Esto significa que el diseñador del sistema puede elegir usar grandes potencias de transmisión láser, diseñar grandes aperturas, y emplear divergencias de haz verdaderamente estrechas, pero la cantidad de potencia recibida permanecerá sin cambios. A excepción del aire sin obstrucciones, el componente de pérdida atmosférica de la ecuación del enlace domina por varios órdenes de magnitud, esencialmente obviando cualquier elección del diseño del sistema que pudiera afectar la disponibilidad.

Los diseñadores de sistemas FSO que deben tener categoría de una compañía de transporte, deben aceptar este hecho y diseñar el sistema de acuerdo a esta situación. Básicamente, la única otra variable bajo el control del diseñador es la distancia del enlace, la cual debe ser lo suficientemente corta para asegurar que la atenuación atmosférica no sea el término dominante en la ecuación del enlace.

### **1.2.3 Margen de enlace**

Es un parámetro muy significativo al describir el desempeño de un sistema FSO. Básicamente, es la cantidad de luz recibida por un receptor por encima o por debajo del nivel requerido para mantener el enlace activo. Este margen es medido usualmente en decibeles.

$$dB = 10 \cdot \log \left( \frac{\text{Potencia}}{\text{Potencia mínima}} \right)$$

Si por ejemplo un receptor debe ver por lo menos 2 micro vatios de potencia para poder mantener el enlace activo y el transmisor emite una potencia tal que el receptor recibe 4 micro vatios, entonces el margen de enlace es de 3dB. El doble de la potencia de lo que se necesita para tener el enlace activo. Esto indica que hasta la mitad de la potencia transmitida en el haz puede ser atenuada en la atmósfera, antes de que el enlace se pierda.

Si este parámetro es manipulado de manera incorrecta, se puede llegar a tener malos entendidos. Algunos vendedores por ejemplo pueden definir el margen usando la potencia que sale directamente del transmisor en lugar de la que llega al otro lado, la cual normalmente será mas grande, y esto hará que el margen del enlace parezca mayor del que en realidad es.

Es muy importante entender que el margen de enlace de cada enlace FSO está en función directa de las condiciones atmosféricas así como de la distancia entre los dos extremos. Los transmisores serán capaces de emitir una cierta cantidad máxima de potencia, sin importar el clima o distancia, pero la cantidad de luz recibida por el receptor será variable.

Algunos fabricantes ofrecen mejorar el margen del enlace mediante transmisores capaces de emitir una potencia considerablemente mayor que la usada comúnmente. Así como el uso de varios láseres para incrementar el nivel de potencia y a la vez proveer cierto nivel de redundancia. La potencia recibida por un terminal en un extremo de un enlace FSO puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$P_r = P_{\text{transm}} \cdot \frac{L \cdot D^2}{d^2 \cdot R^2 \cdot 1e6} \cdot 10^{(-a \cdot R/10)}$$

P = potencia (mW)

L = pérdidas ópticas en transmisión y recepción (%/100)

D = diámetro de apertura del receptor(m)

d = divergencia del haz (radianes)

R = distancia (km)

a = Atenuación atmosférica (dB/km)

La relación entre la potencia recibida y la mínima requerida por la sensibilidad del receptor expresada en dB es el margen del enlace.

$$\text{Margen de Enlace} = 10 \cdot \log \left( \frac{P_r}{s} \right)$$

Se puede observar en las ecuaciones que el margen del enlace es una función bastante compleja de la distancia del enlace y de la atenuación atmosférica. De cualquier forma esta dependencia específica de las condiciones del enlace, se puede separar de los parámetros que corresponden propiamente a los equipos del sistema FSO.

$$\text{Margen del Enlace} = 10 \cdot \log \left( \frac{P_{\text{trans}} \cdot L \cdot D^2}{s \cdot d^2} \cdot \frac{10^{(-a \cdot R/10)}}{1e6 \cdot R^2} \right) = \underbrace{10 \cdot \log \left( \frac{P_{\text{trans}} \cdot L \cdot D^2}{s \cdot d^2} \right)}_{\text{Parámetros relacionados con el sistema}} + \underbrace{10 \cdot \log \left( \frac{10^{(-a \cdot R/10)}}{1e6 \cdot R^2} \right)}_{\text{Parámetros relacionados con el enlace}}$$

El margen del enlace puede ser definido como la suma de dos factores completamente independientes. Uno de ellos que incluye las condiciones específicas del enlace y el otro que incluye 5 parámetros fundamentales de desempeño que se mencionaron anteriormente. El primero se relaciona con los parámetros del enlace es esencialmente una medida de la atenuación que el sistema debe superar para un enlace en particular. El segundo término se refiere únicamente a los parámetros del Sistema es una medida de la capacidad del sistema para superar la atenuación. Este es el término que satisface el objetivo de definir un sistema FSO que vaya de acuerdo con sus características específicas, utilizando varios cálculos y medidas para llegar a una simple, clara y fácil forma de medir el desempeño. Debido a que es independiente de un rango específico de distancias o climas y debido a que es expresado en dB, se le denomina a este parámetro de medida El Margen de enlace generalizado (GLM).

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

El GLM provee una manera objetiva de comparar dos productos basada únicamente en las características de diseño de cada producto. Se le usar de la misma forma que el concepto de Margen de Enlace pero sin tener que preocuparse sobre distancias específicas o condiciones climáticas.

Por ejemplo si un producto X tiene un GLM de 10 dB y un producto Y tiene un GLM de 13 dB, el producto Y siempre tendrá 3 dB mas de margen de enlace que el producto X.

## **1.3 Características de desempeño**

### **1.3.1 Distancias de transmisión**

La tecnología FSO es aplicable en casos en los que la distancia a cubrir por el enlace es de algunas cuerdas o bien de hasta algunos pocos kilómetros (4 ó 5). Esta limitante es debida a aspectos tales como la atenuación, atmosférica, la sensibilidad del receptor, el ángulo de divergencia. A distancias mayores, la importancia de estos factores, provocaría verdaderas dificultades al sistema a pesar de que entre los dos puntos exista una clara línea vista.

En el proceso de planeacion de un sistema FSO, se recomienda que alguien revise la tabla de niebla de la ciudad y la distancia estimada de la conexión. Las especificaciones del producto hechas por el fabricante, deben ser usadas para asegurarse que el producto se desempeñara de una manera satisfactoria. Otro factor relacionado con la limitación de la distancia de las conexiones es la atmósfera en si.

A medida que el haz pasa por pequeñas bolsas de diferentes variaciones en la temperatura del aire y velocidad del viento, la luz puede ser refractada. Para compensar esto, varios fabricantes usan varios laser en paralelo dentro del sistema FSO, especialmente en diseños para largas distancias.

La niebla atenúa substancialmente las radiaciones, incluyendo las longitudes de onda usadas en los sistemas FSO. El efecto de la niebla en estos sistemas es análogo a la atenuación que se produce en los sistemas de Radio Frecuencia debido a la lluvia. No es necesariamente un problema que interrumpa por completo la comunicación, ya que el enlace óptico puede ser diseñado de manera que por un largo período, una potencia aceptable sea recibida incluso con la presencia de una densa niebla. A partir de las estadísticas de la niebla para el sitio donde se ubica el usuario, las cuales presentan porcentajes respecto al tiempo que la atenuación por niebla será mayor que cierto valor se realiza el diseño del sistema realizando cálculos para garantizar cierto valor de disponibilidad. Se realizan cálculos para determinar la cantidad del margen del enlace dedicada a la atenuación por niebla y finalmente se determina la longitud máxima del enlace, según la ecuación:

$$\text{Longitud (Km)} = \frac{\text{Margen del enlace (dB)}}{\text{Atenuacion por Niebla (dB/Km)}}$$

### **1.3.2 Capacidad**

Las comunicaciones ópticas inalámbricas basadas en FSO son un producto de la categoría de exteriores inalámbricos que proveen la velocidad de la fibra con la flexibilidad del inalámbrico. Permite la transmisión óptica a velocidades de hasta 1.25 Gbps y con el uso de WDM podría llegarse a velocidades de 10 Gbps. Esto no es posible con ninguna tecnología inalámbrica o de Radio Frecuencia.

### **1.3.3 Seguridad**

Para los que no están muy familiarizados con la tecnología FSO, la seguridad puede ser un tema para preocuparse debido a que se usan láser para la transmisión. El uso apropiado y seguro de los láseres ha sido discutido desde que los primeros dispositivos FSO aparecieron en los laboratorios hace más de 3 décadas. Las dos preocupaciones mayores se relacionan con la exposición de los ojos a los haces de luz y el uso de los altos voltajes dentro de los sistemas de luz y sus fuentes de poder. Para garantizar la seguridad de los usuarios de estos sistemas y de las personas en general se han designado estrictos estándares de seguridad y desempeño con los que los fabricantes deben de cumplir.

La seguridad de la red es otro factor muy importante para cualquier organización o empresa que traslada información delicada y confidencial a través de su red. Esta preocupación por la seguridad abarca desde el nivel más bajo de las capas de la red como lo es la capa física hasta las altas capas de software en los protocolos de red. La mayoría de las actividades de interceptación hecha por intrusos externos, se produce dentro de las capas más altas de software de protocolos. La protección de contraseñas o la encriptación de los datos son ejemplos de las medidas que existen para proteger las redes de espías externos.

La intrusión de la capa física es otra preocupación de los operadores de red, a pesar de que es una vía menos probable para tener un acceso no autorizado a los datos existentes en la red. Esto puede ser engañoso si la información es transportada en una infraestructura basada en cables de cobre que es fácilmente interceptado, pero las transmisiones ópticas inalámbricas se encuentran dentro de las más seguras soluciones de conectividad.

El hecho de que los sistemas ópticos envían y reciben los datos a través del aire es lo que por naturaleza preocupa a los operadores y administradores de red. Una de las razones más importantes para esta preocupación es que en las soluciones de red inalámbricas están dentro de una categoría en la cual los problemas de seguridad y de interferencia son muy comunes en los sistemas basados en Radio Frecuencia o en Microondas. Estas preocupaciones no son válidas para los sistemas FSO.

Los sistemas ópticos inalámbricos operan cerca de la longitud de onda del infrarrojo ligeramente por encima del espectro visible. Es por eso que el ojo humano no es capaz de ver el haz de transmisión. El rango de la longitud de onda cercano a un micrómetro que es usado en los sistemas de transmisión ópticos inalámbricos es el mismo que se usa en la transmisión por fibra óptica. Esta longitud de onda equivale a frecuencias de varios cientos de Tera hertzios (THz). Estas frecuencias son mucho mayores a las frecuencias más altas usadas en los sistemas de comunicación por microonda comercialmente disponibles, que se encuentran cerca de los 40 GHz. Esta diferencia en las frecuencias de operación es una de las razones principales por las que los sistemas ópticos inalámbricos pertenecen más a la categoría de equipos de comunicaciones ópticas, que a las soluciones inalámbricas por RF o microondas.

Mientras las típicas antenas de RF y microondas usadas para interconectar dos locaciones remotas de una red en una arquitectura punto a punto esparcen la radiación sobre ángulos que oscilan entre 5 y 25 grados, los sistemas ópticos inalámbricos usan haces bastante delgados que son comúnmente mucho menores a 0.5 grados. Lo anterior conlleva a que a determinadas distancias del punto de transmisión, el diámetro del haz sea mucho mayor en los sistemas de microonda que en los sistemas ópticos inalámbricos. Esta gran dispersión del haz en los sistemas por microonda, combinada con el hecho de que las antenas emiten un alto nivel de potencia es la razón primordial para la preocupación por la seguridad.

Un intruso externo podría de alguna forma llegar a interceptar el haz o potencia reflejada desde el punto destino y extraer información delicada de la red por medio del uso de un examinador de espectro sintonizado a la frecuencia específica de RF o microonda. Para evadir estas preocupaciones de seguridad, la industria de las microondas usa protocolos de encriptación inalámbricos para proteger la ruta de transmisión de ser interceptada. A pesar de que es extremadamente difícil romper un sofisticado código de encriptación, siempre existe la preocupación de que aun existe la posibilidad.

La interceptación de sistemas ópticos inalámbricos que operan con estrechos haces en el espectro infrarrojo es aún mucho más difícil. A tal punto que organizaciones militares y gubernamentales que dependen completamente de tecnologías de transmisión de extrema seguridad, han sido de las primeras en usar estos sistemas como una forma de evitar cualquier posible interceptación. Esto es razonable si se evalúa el estudio de la tecnología FSO que se ha realizado en laboratorios militares y agencias de seguridad desde hace algunas décadas.

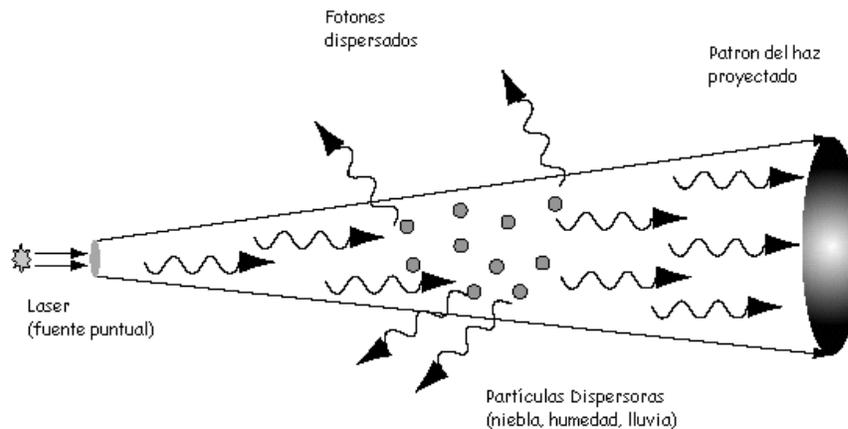
En los primeros días del desarrollo de FSO, la habilidad para transmitir información a altas velocidades era realmente un factor menos importante que el hecho de que las tecnologías FSO ofrecían uno de los modos más fáciles y seguros de intercambiar información entre sitios remotos.

El pequeño diámetro del haz que es típicamente de unos pocos metros en el sitio destino es una de las razones por las que es extremadamente difícil interceptar la comunicación en un sistema FSO. El intruso necesitaría saber el origen exacto o la localización del destino del haz infrarrojo invisible y solo puede interceptar el haz dentro del pequeño ángulo de propagación que este tiene. Aún más difícil es el hecho de que el intruso debe tener acceso libre al sitio donde está instalado el transmisor-receptor (*transceiver*) óptico y ser capaz de instalar equipo electrónico sin ser observado. En la mayoría de los casos, el sitio de la instalación no permite el acceso libre a algún potencial intruso debido a que este sitio pertenece a las instalaciones del cliente.

Como un ejemplo se puede observar el hecho en el que un haz de 4 mrad proyectado hacia un objetivo que se encuentra a 300 metros. En el destino, el diámetro es aproximadamente de 1.3 metros mientras que a una distancia de 1 kilómetro el haz se expande a 4 metros. La interceptación directa de un haz de este tipo es prácticamente imposible debido a que el haz se transmite por el aire a una altura considerable del suelo. Debido al hecho de que el haz es invisible y que cualquier intento por bloquear el haz se debe realizar en puntos cercanos al equipo óptico de los puntos terminales, el proceso de transmisión impone otro obstáculo. Recoger la señal desde un punto que no se encuentra directamente en la ruta de un haz de luz usando los fotones dispersados por elementos como el aerosol, la niebla o partículas de lluvia que pudieran estar en la atmósfera es virtualmente imposible debido a los niveles extremadamente bajos de potencia infrarroja usados durante el proceso de transmisión óptica.

La razón principal por la que se descarta la posibilidad de una intrusión de esta forma es el hecho de que la luz es dispersada de una forma isotrópica y estadísticamente en diferentes direcciones respecto a la ruta original de propagación como puede apreciarse en la figura 10. De esta forma, la cantidad de radiación que podría recibirse en un detector que no esta ubicado directamente en la ruta del haz, estaría en un nivel mucho menor al ruido recibido.

Figura 10 Dispersión del haz transmitido



Otro aspecto que podría ser causa de preocupación es el haz que se extiende por algunos kilómetros luego de haber pasado el sitio donde se encuentra el dispositivo receptor. El equipo FSO toma cerca de un pie cuadrado o menos del haz, así que en la mayoría de los casos, gran parte del haz se extiende más allá del equipo receptor. En este caso solo un lado de la transmisión de datos podría interceptarse pero podría tratarse de la parte que precisamente le interesa al intruso. La interceptación en este caso podría no ser detectada e incluso continuar por años. La solución para este problema es determinar el tamaño del haz en el punto receptor por medio de la distancia del enlace y de la fórmula de dispersión específica proveída por el fabricante.

Una vez determinado el diámetro del haz, se puede planear la instalación de tal forma que el equipo tenga una pared o superficie no reflectiva directamente detrás de él para bloquear los remanentes del haz.

#### **1.3.4 Instalación**

Los sistemas FSO pueden ser instalados en cuestión de días o más rápido si los dispositivos pueden ser instalados en ventanas de las oficinas en lugar de en el techo.

Usando FSO, un proveedor de servicio puede estar generando ingresos mientras su competidor a base de fibra está aun tramitando los permisos necesarios para realizar la excavación de un ducto, para la instalación de postes o para el uso de postes previamente instalados por otra compañía.

Las instalaciones FSO requieren disponibilidad de línea vista entre los equipos transmisor y receptor. Una minuciosa evaluación del sitio previa a la instalación se debe realizar para asegurar que las rutas entre las unidades FSO están libres y permanecerán así durante cierto número de años. El crecimiento de los árboles y la construcción de edificios deben ser considerados al mismo tiempo que cualquier asunto estético y permisos requeridos.

El hardware de instalación para sistemas FSO debe ser diseñado para fácil instalación y alineación así como proveer una base estable que mantenga la alineación con el paso del tiempo y bajo difíciles condiciones ambientales. Los ajustes angulares pueden realizarse utilizando miras telescópicas. La señal puede maximizarse viendo en la pantalla de una computadora personal, y ajustando los botones respectivos para asegurar una precisa alineación. La unidad debe estar diseñada para mantener su alineación original durante toda su vida operativa.

Para sistemas de alineación fija, el haz debe ser lo suficientemente ancho para soportar el movimiento que se produce en construcciones muy altas y para operar bajo fuertes vientos. Para sistemas de alineación activa, el equipo debe tener la suficiente sensibilidad para responder a eventos repentinos como fuertes vientos o terremotos.

### **1.3.5 Gestión y monitoreo de red**

En las redes de los proveedores modernos, es esencial que exista la capacidad de gestionar y monitorear con una interfase gráfica y fácil de usar. Muchos de los productos FSO existentes son dispositivos de la capa física completamente análogos a los cables de fibra óptica y los *transmisores-receptores*, así que la interfase de red que monitorea los dispositivos activos es fácil de alcanzar por medio de un cable CAT5 o un puerto RS-232 y de preferencia, puede recibir la asignación de una dirección IP por medio de la cual también se puede lograr una conexión para monitoreo.

Algunos proveedores prefieren que la interfase de red este combinada con la ráfaga de datos ópticos, ya sea en un canal separado o usando bits internos en una trama de datos SONET. Enviar protocolo SNMP sobre un canal de comunicación SONET requiere equipos adicionales de capa 3 que pueden estar incluidos dentro de la terminal FSO o en una sala de equipos. Como sea que habilite, la interfase SNMP debe permitir el monitoreo del estado de los componentes activos con suficiente confiabilidad para predecir problemas antes de que se conviertan en una caída total del sistema.

Son útiles los siguientes indicadores de estado:

- › Potencia de la señal recibida
- › Ajustes de potencia del transmisor (bias, corrientes de modulación) para cada láser

- Temperatura interior de locaciones claves
- Humedad interior
- Voltajes y corrientes de las fuentes de poder
- Corrientes del controlador de temperatura
- Estado del sistema de recuperación de reloj
- Estado de la señal de red, y
- Capacidad extensa de historial de eventos

Los equipos FSO permiten que el personal técnico realice pruebas al funcionamiento de un enlace en diferentes segmentos por medio de la configuración de bucles en cualquiera de los dos equipos que conforman el enlace.

## **1.4 Aplicaciones**

Las aplicaciones de FSO son muy variadas entre las que se puede citar:

### **1.4.1 Extensiones de red metro**

Las empresas de transporte pueden desplegar tecnología FSO para extender anillos de fibra metropolitanos ya existentes, para conectar nuevas redes y su infraestructura principal, para completar anillos Sonet.

### **1.4.2 Acceso de última milla**

FSO puede ser usada en enlaces de alta velocidad que conectan usuarios finales con proveedores de Internet o de otras redes. Puede también ser usada para dar continuidad a sistemas de redes locales para proveer negocios con conexiones de alta velocidad.

### **1.4.3 Conectividad empresarial**

La facilidad con la que los enlaces FSO pueden ser instalados, les hace ser una opción ideal para interconectar segmentos de una red de área local que están ubicados en edificios separados por algunas calles públicas o por alguna propiedad privada de otra persona.

### **1.4.4 Respaldo para fibra**

FSO puede ser desplegado para crear enlaces redundantes para respaldar fibra en lugar de instalar un segundo enlace de fibra.

### **1.4.5 Red de retorno (*Backhaul*)**

FSO puede ser usado para transportar tráfico telefónico celular de torres para antenas hacia las instalaciones de cableado dentro de la red de telefonía pública. A medida que las redes inalámbricas han migrado de tecnología de segunda generación a tercera generación (3G), los requerimientos de ancho de banda van a crecer dramáticamente. La red de retorno de la red celular debe tener escalabilidad suficiente para adaptarse a esta creciente demanda de ancho de banda.

Las redes de acceso actuales consisten en celdas conectadas a un concentrador o switch local con líneas de ancho de banda de E1 por fibra o radios de microonda. Esto puede ser suficiente para las redes de voz normales pero para las redes 3G se requiere un crecimiento en anchos de banda a E3/DS3 lo que genera un incremento muy grande en los costos debido a los altos cargos mensuales. Existe una opción más económica que ofrece mayor flexibilidad. Las tecnologías inalámbricas de gran ancho de banda como lo son FSO y radios microondas.

A medida que los proveedores se trasladan a redes 3G, el radio de las celdas disminuye aproximadamente a 1 kilómetro o menos. Dentro del núcleo urbano, el espaciamiento entre celdas es de algunos cientos de metros. La microonda no está muy diseñada para el núcleo urbano en distancias cortas debido a los requerimientos de licencia, planeación de frecuencias y aspectos de interferencia. Lo anterior le da cierta ventaja a FSO sobre los sistemas de microonda.

Los equipos FSO pueden ser instalados en las torres y en los techos, permitiendo una conectividad de gran ancho de banda entre celdas o hacia un concentrador central. En distancias largas o lugares con clima que es sujeto a niebla o fuertes nevadas, los sistemas FSO pueden proveer gran ancho de banda la mayor parte del tiempo y tener de respaldo líneas terrestres de RF con menor capacidad para los pequeños períodos de tiempo en los que los severos eventos climáticos ocurren. Con esto se consigue cumplir con los requerimientos de disponibilidad.

#### **1.4.6 Aceleración de servicio**

Puede usarse también FSO para proveer servicio instantáneo a usuarios de fibra óptica mientras su infraestructura de fibra está siendo instalada.

#### **1.4.7 Recuperación de desastres**

La tecnología FSO puede ser un importante componente en el plan de recuperación de desastre para una organización. Los enlaces pueden ser normalmente instalados dentro de un período de cuatro horas o menos, evitando que la compañía tenga que esperar por semanas o meses a que su proveedor instale los circuitos de cobre o fibra.

### **1.4.8 Transporte de medios digitales**

Las demandas de los consumidores de audio y video de mayor calidad y con mas opciones y programación interactiva ha impulsado a la industria de los medio dentro del mundo digital. Hoy día las compañías de medios están migrando hacia un flujo completamente digital entre la captura, pasando por el almacenaje y la edición hasta la reproducción y la transmisión. Existen muchos ejemplos de estas compañías:

- Compañías de cable y satélite: requieren gran ancho de banda para la transmisión de televisión digital en los que se incluye formatos.
- Industrias de grabación y post producción: Necesitan la capacidad de transmitir alta calidad de video sin comprimir de forma segura entre locaciones en tiempo real. La portabilidad y movilidad son esenciales
- Estudios de producción: Necesitan acceso a comunicaciones seguras de gran ancho de banda para la edición digital, procesamiento, y archivado.
- Empresas emisoras: Necesitan acceso rápido y seguro a fuentes de contribución tales como eventos especiales, deportes, anuncios, y noticias de última hora en un formato digital y en tiempo real.

### **1.4.9 Extensión de celdas celulares en edificios**

La creciente demanda de servicio móvil inalámbrico ha llevado a los proveedores a expandir sus redes a un paso sin precedentes. Sin embargo, la densidad de población de las áreas urbanas provoca que se incremente la dificultad para que la cobertura de red alcance a todos los usuarios. Existen muchas áreas como túneles, estadios cerrados, y elevadores donde la calidad de la señal es pobre o inexistente. En esas precisas áreas existen muchas veces una gran cantidad de suscriptores potenciales.

Debido a que no es práctico ni económico agregar celdas en cada sitio requerido existe la posibilidad de aplicar una extensión a una celda existente para conectarla a la construcción a la que interesa brindar cobertura. Por ejemplo, centros comerciales, parqueos subterráneos, hoteles, etc.

La señal es amplificada dentro de la construcción de interés y un sistema repetidor redistribuye la cobertura inalámbrica

## 2. EXTENSIÓN DE REDES LAN

### 2.1 Redes LAN y sus necesidades de expansión

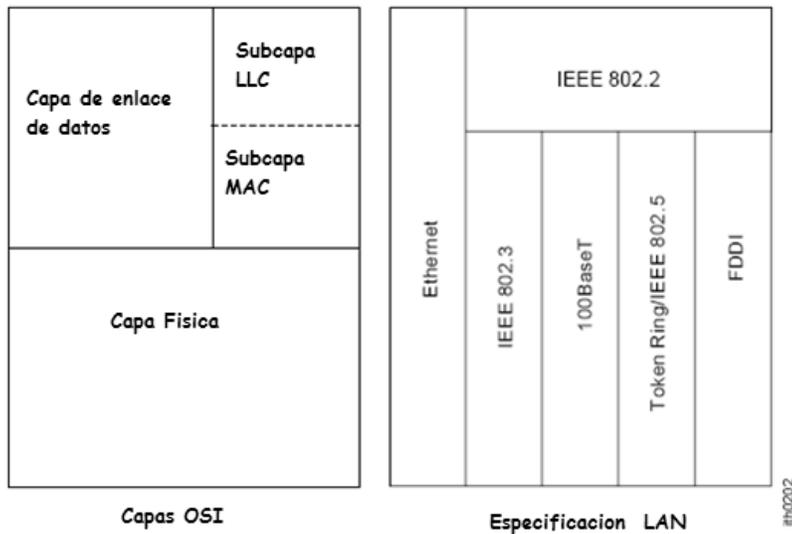
#### 2.1.1 LAN

Es una red de alta velocidad que cubre un área geográfica relativamente pequeña. Típicamente se conectan estaciones de trabajo, computadoras personales, impresoras y otros dispositivos. Las redes LAN le ofrecen a los usuarios de las computadoras, muchas ventajas, incluyendo acceso compartido a dispositivos y aplicaciones, intercambio de archivos entre usuarios conectados y comunicación entre usuarios por correo electrónico y otras aplicaciones. Las tres arquitecturas LAN más usadas son: Ethernet/IEEE 802.3, Anillo con paso de testigo (*Token Ring*)/IEEE 802.5 y FDDI (interfaz distribuida de datos de fibra). Los protocolos LAN funcionan en las dos capas más bajas del modelo de referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos OSI (Figura 11).

Es posible definir las LAN de acuerdo a algunos de los parámetros más relevantes

- Por su topología o disposición en el espacio,
- Según el método de acceso al medio
- Según el método de transmisión

Figura 11. Ubicación de los Protocolos LAN más populares dentro del modelo OSI



## 2.1.2 Topología de las redes LAN

La topología de las LAN define la manera en la cual son organizados los dispositivos de una red. Existen cuatro topologías típicas de organización:

- Bus
- Anillo
- Estrella
- Arbol

Una Topología de bus es una arquitectura de LAN lineal en la cual la transmisión de las estaciones en la red se propaga a lo largo del medio y son recibidas por todas las otras estacione (Figura 12).

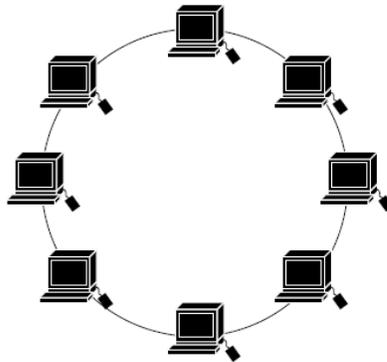
De las tres implementaciones de LAN más usadas, Ethernet/IEEE 802.3 - incluido 100 Base T- Implementa una topología de bus.

Figura 12. Topología de Bus



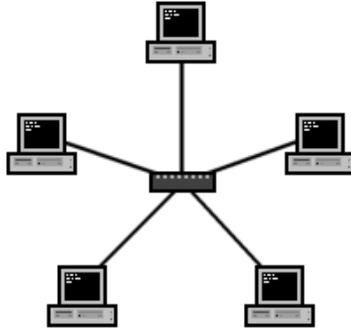
Una topología anillo es una arquitectura LAN que consiste de una serie de dispositivos conectados unos a otros por un enlace de transmisión unidireccional formando un único lazo cerrado (Figura 13). Tanto Token Ring/IEE 802.5 y las redes FDDI implementan una topología de anillo.

Figura 13 Topología de Anillo



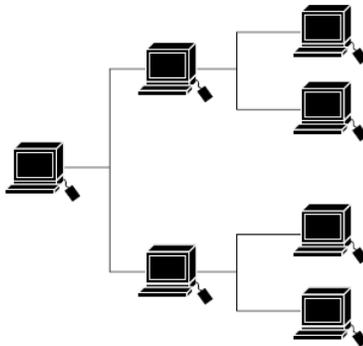
Una topología *Estrella* es una arquitectura LAN en la cual los puntos finales de una red son conectados a un concentrador central por enlaces dedicados (figura 14). Las topologías lógicas tipo bus y anillo son a menudo implementadas físicamente en una topología estrella.

Figura 14 Topología de Estrella



Una topología tipo *Árbol (Tree)* es una arquitectura LAN idéntica a una topología del tipo bus, excepto que es posible tener ramas (branches), con múltiples nodos.

Figura 15 Topología de Árbol



### 2.1.3 Métodos de acceso al medio

Contención del medio ocurre cuando dos o más dispositivos de una red tienen datos para enviar al mismo tiempo. Debido a que múltiples dispositivos no pueden hablar en la red en forma simultánea, algún tipo de método debe ser usado para que sólo un equipo acceda al “medio red” a la vez. Para esto se usan dos métodos denominados Acceso Múltiple con Escucha de Portadora y Detección de Colisiones (CSMA/CD).

En redes que usan tecnología CSMA/CD, tales como las redes del tipo Ethernet, los dispositivos compiten por el “Medio Red”. Su funcionamiento consiste en que, cuando un dispositivo tiene datos para enviar, este “escucha” la red para ver si algún otro equipo está transmitiendo datos sobre ella. Si no oye nada, este comienza el envío de información. Al terminar de transmitir, el dispositivo escucha nuevamente para verificar si ha ocurrido o no una colisión. Una colisión ocurre cuando dos dispositivos transmiten al mismo tiempo. Si ellos detectan que ha ocurrido una colisión, esperan una longitud de tiempo aleatorio para volver a reenviar sus datos. A causa de este tipo de contención de red, a mayor ocupación de la red, mayor es la cantidad de colisiones que ocurren. Debido a esto, es que la performance de una red Ethernet se degrada rápidamente a medida que aumenta el número de dispositivos conectados a ella.

#### **2.1.4 Tecnologías Ethernet**

El término Ethernet se refiere a la familia de implementaciones de red de área local (LAN) que incluyen tres categorías principales.

- Ethernet y IEEE 802.3 Especificaciones LAN que trabajan a 10 Mbps sobre cable coaxial.
- 10mm Mbps Ethernet Especificación LAN única, también conocida como Fast Ethernet, que opera a 100 Mbps sobre cable de par trenzado.
- 1000 Mbps (1Gbps) Especificación LAN única, también conocida como Giga bit Ethernet, que opera a 1000 Mbps (1Gbps) sobre fibra y cables de par trenzado.

La Ethernet ha sobrevivido como una tecnología de medio esencial debido a su tremenda flexibilidad y relativa facilidad de implementar y entender.

A pesar de que otras tecnologías han sido promocionadas como reemplazos, los administradores de red han acudido a Ethernet y sus derivados como soluciones efectivas para el rango de requerimientos de implementación de campus. Para resolver las limitaciones de Ethernet, los innovadores y las entidades encargadas de estandarizar, han creado progresivamente mayores conductos Ethernet. Algunos críticos han menospreciado a la Ethernet como una tecnología que no tiene capacidad de escalar, pero su sobresaliente esquema de transmisión continua siendo uno de los principales medios para el transporte de datos para aplicaciones de campus contemporáneas.

### **IEEE 802.3 y Ethernet**

Ethernet es una especificación LAN de banda base inventada por *Corporación Xerox* que opera a 10Mbps usando CSMA/CD para correr sobre un cable coaxial. Fue creada durante los 70's, pero el termino es actualmente usado para referirse a todas las LAN CSMA/CD. Ethernet fue diseñada para trabajar en redes con esporádicos requerimientos de tráfico pesado, y la especificación IEEE 802.3 fue desarrollada en 1980 basada en la tecnología Ethernet original. La versión 2.0 de Ethernet fue desarrollada en conjunto por *Corporación de equipo Digital*, *Corporación Intel*, y *Corporación Xerox*. Es compatible con IEEE 802.3.

Ethernet y la IEEE 802.3 son usualmente implementadas en una tarjeta de interfaz o en los circuitos del tablero de circuitos principal. Las convenciones del cableado Ethernet especifican el uso de un transmisor-receptor para agregar un cable al medio físico de la red. El transmisor-receptor realiza muchas de las funciones de la capa física incluyendo la detección de colisiones. El cable del *transmisor-receptor* conecta las estaciones finales hacia el *transmisor receptor*. IEEE 802.3 provee una variedad de opciones de cableado, una de ellas es la especificación conocida como 10Base5.

Esta especificación es la más cercana a Ethernet. El cable de conexión es conocido como una interfaz de unidad de agregado (AUI), y el dispositivo agregado a la red es llamado Unidad de agregado de medios (MAU) en lugar de un *transmisor-receptor*.

### **Operación de IEEE 802.3 y Ethernet**

En un ambiente basado en la transmisión Ethernet, todas las estaciones ven todas las estructuras que se envían a la red. A continuación de cada transmisión, cada estación debe examinar todas las estructuras para determinar si esa estación es un destino. Las tramas que son destinadas a determinada estación son pasadas a un protocolo de nivel superior.

Bajo el proceso Ethernet de acceso al medio CSMA/CD, cualquier estación en una LAN CSMA/CD puede acceder a la red en cualquier momento. Antes de enviar datos, las estaciones CSMA/CD escuchan el tráfico en la red. Una estación que quiere enviar datos, espera hasta que no se detecte tráfico antes de transmitir.

Ethernet permite a cualquier estación transmitir en cualquier momento en que la red este en silencio. Una colisión ocurre cuando dos estaciones escuchan el tráfico, no detectan ninguno, y luego transmiten simultáneamente. En esta situación, ambas transmisiones son dañadas y las estaciones deben retransmitir en algún momento posterior. Los algoritmos de respaldo determinan cuando las estaciones colisionadas deben retransmitir.

## **2.2 Giga bit Ethernet**

Desde 1970, la Red Ethernet es la tecnología más representativa de las redes de trabajo. Hay un estimado que en 1996 el 82% de todos los equipos de redes eran Ethernet. En 1995 el estándar Fast Ethernet fue aprobado por la IEEE. El protocolo Fast Ethernet provisto de un ancho de banda 10 veces mayor y nuevas características tales como transmisión Full-Dúplex y auto negociación. Se estableció Ethernet como una tecnología escalable. Ahora, el estándar Giga bit Ethernet es aceptado como una escala superior. Fast Ethernet fue publicada por una alianza de consorcio de industriales.

En mayo de 1996, se formó la alianza Giga bit Ethernet conformada por 11 compañías, poco después la IEEE anuncia la formación del 802.3z, proyecto del estándar Giga bit Ethernet.

El nuevo estándar Giga bit Ethernet es compatible completamente con las instalaciones de redes Ethernet que ya existían. Reteniendo el mismo método de acceso CSMA/CD, soporta modos de operaciones como Full-Dúplex y Half-Dúplex. Inicialmente, suporta fibra mono-modo y multi-modo y cable coaxial de corto trayecto.

Giga bit Ethernet es aceptada para ser empleada como columna vertebral en redes existentes. Estas pueden ser usadas para agregar tráfico entre clientes y granjas de servidores e interconectando switches Fast Ethernet, estos pueden ser usados para interconectar estaciones de trabajo y servidores de aplicaciones de alto ancho de banda tales como imágenes médicas o CAD.

### **2.2.1 Alianza Giga bit Ethernet (GEA)**

En marzo de 1996, el comité 802 de IEEE aprobó el proyecto estándar Giga bit Ethernet 802.3z. A la vez, 54 compañías expresaron el interés de participar en el proyecto de estandarización, la Alianza Giga bit Ethernet fue formada en mayo de 1996 por 11 compañías: *3Com, Bay Networks, Cisco Systems, Compaq Computer, Granite Systems, Intel Corporation, LSI Logic, Packet engines, Sun Microsystems Computer Company, UB Networks y VLSI Technology.*

La alianza representa un esfuerzo de múltiples vendedores para proveer sistemas abiertos e inter-operables de productos Giga bit Ethernet. Los objetivos de la alianza son:

- › Ser una extensión de soporte para las redes existentes Ethernet y Fast Ethernet que requieren la demanda de un mayor ancho de banda.
- › Proponer el desarrollo de técnicas para la inclusión en el estándar.
- › Establecer pruebas de procedimientos y procesos de inter-operatividad.

### **2.2.2 Capa física**

La capa física de Giga bit Ethernet está formada por un mixto o híbrido entre las tecnología Ethernet y la Especificación de Canales por Fibra ANSI X3T11. Giga bit Ethernet es acepta finalmente 4 tipos de medios físicos, los cuales son definidos en 802.3z (1000Base-X) y 802.3ab (1000Base-T)

## 1000Base-X

En el estándar 1000Base-X la capa física es el Canal de Fibra. El Canal de fibra es una tecnología de interconexión entre estación de trabajo, supercomputadoras, dispositivos de almacenamiento de información y periféricos. El Canal de Fibra tiene una arquitectura de 4 capas. La más baja tiene 2 capas FC-0 (Interfaz y Medio) y FC-1 (Codificador y Decodificador), estas son usadas en Giga bit Ethernet. Hay 3 tipos de medios de transmisión que son incluidos en el estándar 1000Base-X:

- ▶ 1000Base-SX: usa una fibra multi-modo, 850nm.
- ▶ 1000Base-LX: puede ser usada tanto mono-modo y multi-modo, 1300nm.
- ▶ 1000Base-CX: usa un cable par trenado de cobre (STP).

Tabla I. Distancias soportadas por diferentes cables

Tipo de Cable	Distancia
Fibra Mono modo (9 micron)	3000 m usando laser de 1300 nm (LX)
Fibra Multi modo (62.5 micron)	300 m usando laser de 850 nm (SX) 550 m usando laser de 1300 nm (LX)
Fibra multi modo (50 micrón)	550 m usando laser de 850 nm o de 1300 nm
Cobre de corta distancia	25 m

En la tabla anterior, se indican las distancias soportadas por diferentes tipos de cable.

## 100Base-T

El estándar 1000Base-T de Giga bit Ethernet emplea como medio de transmisión un cable UTP, usando 4 pares de líneas de categoría 5 UTP.

### 2.2.3 Capa MAC

La capa MAC de Giga bit Ethernet usa el mismo protocolo de Ethernet CSMA/CD. La máxima longitud del cable usado para interconectar las estaciones está limitada por el protocolo CSMA/CD. Si dos estaciones detectan el medio desocupado y comienzan la transmisión ocurrirá una colisión.

Ethernet tiene una trama mínima de 64 bytes, la razón de tener un tamaño mínimo en la trama es para prever que las estaciones completen la transmisión de una trama antes de que le primer bit sea detectado al final del cable, donde este puede chocar con otra trama. Sin embargo, el tiempo mínimo de detección de colisión es el tiempo que toma una señal en propagarse por desde un extremo a otro del cable. Este tiempo mínimo es llamado intervalo de tiempo, que es el número de bytes que pueden ser transmitidos en un Intervalo de tiempo, en Ethernet el Intervalo de tiempo es de 64 bytes, la longitud mínima de trama).

La longitud máxima de un cable en Ethernet es de 2.5 Km (con un máximo de 4 repetidores). Como la tasa de bit se incrementa hace aumente la velocidad de transmisión. Como resultado, si el mismo tamaño de la trama y la longitud del cable se mantienen, entonces la estación puede también transmitir una trama a gran velocidad y no detectar una colisión al final del otro cable. Entonces, una de las siguientes cosas se deben hacer: (i) Mantener una longitud máxima del cable e incrementar el time slot (y por eso, un tamaño mínimo en la trama) o (ii) Mantener un mismo time slot y decrementar la longitud del cable o ambos. En Fast Ethernet la longitud máxima del cable es reducida a 100 metros, dejando el tamaño de la trama en mínimo y el time slot intacto.

Giga bit Ethernet mantiene los tamaños mínimos y máximos de las tramas de Ethernet.

Dado el hecho de que Giga bit Ethernet es 10 veces más rápida que Fast Ethernet, si se mantiene el mismo tamaño del slot, la máxima longitud del cable deberá ser reducida a 10 metros, lo cual no es muy útil. En lugar de ello, Giga bit Ethernet usa un mayor tamaño del slot, siendo de 510 bytes. Para mantener la compatibilidad con Ethernet, el tamaño mínimo de la trama no es incrementado, pero el evento de portador es extendido. Si la trama es más corta que 512 bytes, entonces se agregan símbolos de extensiones. Hay símbolos especiales, los cuales no sucede en la carga útil o de valor.

#### **2.2.4 Extensión de portador**

Giga bit Ethernet debe ser inter-operable con las redes existentes 802.3. Extensión de Portador es una ruta del 802.3 que mantiene los tamaños de trama máximos y mínimos con distancias significativas de cableado. Para que el portador sea extendido dentro de la trama, los símbolos de extensión de no-data son incluidos in la ventana de colisiones (ventana de colisión), que es, la trama entera extendida considerada por la colisión y caída. Sin embargo, la secuencia de chequeo en la trama (FCS, siglas en ingles) es calculada solamente en la trama original (sin los símbolos de extensión). Los símbolos de extensión son removidos antes que el FCS sea chequeado por el receptor. Por lo que la capa LLC (Control del Enlace Lógico) no es ni siquiera alertado de la extensión de portadora.

#### **2.2.5 Ráfagas de paquetes (*Packet Bursting*)**

Extensión de portadora es una solución simple, pero gasta un ancho de banda. 448 bytes de rellenos pueden ser enviados en pequeños paquetes. Las Ráfagas de Paquetes son un agregado de la extensión de portadora.

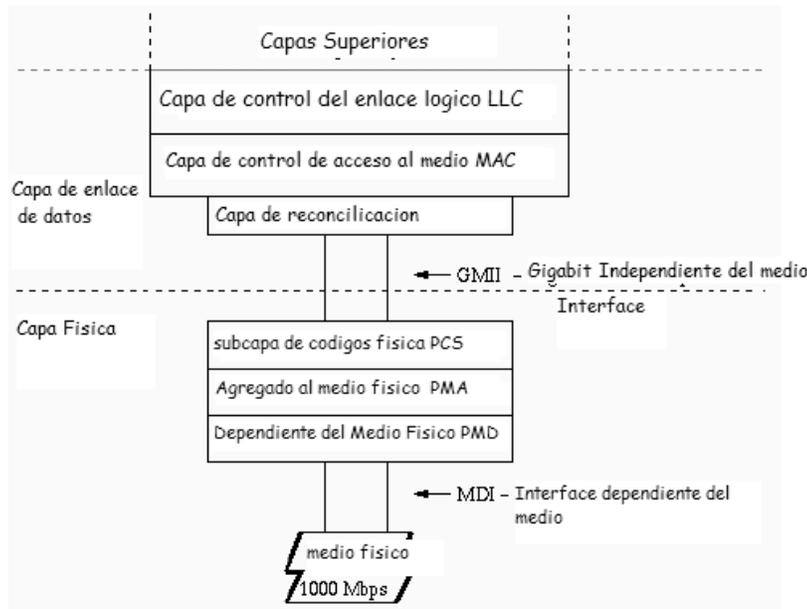
Las ráfagas de paquetes son como extensión de portadora más unos paquetes agregados" (*Burst*). Cuando una estación tiene un número de paquetes a transmitir, el primer paquete coloca al intervalo de tiempo, si es necesario usando extensión de portadora. Los siguientes paquetes son transmitidos unos detrás de otro, con el mínimo intervalo entre paquetes (IPG, siglas en inglés *inter-packet gap*) hasta que finalice el tiempo de ráfaga (de 1500 bytes). Las ráfagas de paquetes incrementan sustancialmente la tasa de transferencia.

### **2.2.6 Interfaz Giga bit independiente del medio**

La GMII es la interfaz entre la capa MAC y la capa física. Esto permite que algunas de las capas físicas ser usada con la capa MAC. Existe una extensión de la MII usada en *Fast Ethernet*. Este usa la misma interfaz de gestión como MII. Este soporta transmisión de datos de 10, 100 y 1000 Mbps. Posee separadamente un receptor de 8-bit de ancho y un transmisor que agrega datos, tal que puede soportar operaciones como *Full-Duplex* y *Half-Duplex*. Las diferentes capas de la arquitectura del protocolo *Giga bit Ethernet* se muestra en la figura 16.

La GMII posee 2 medios de señales del status: uno indica la presencia del *portador* y el otro indica la ausencia de colisión. La sub-capa de reconciliación proyecta estas señales a señalización física (PLS, *Physical Signalling*) primitivas conocida por la sub-capa MAC existente.

Figura 16. Arquitectura de protocolo Giga bit Ethernet



Con la GMII es posible conectar diferentes tipos de medios tales como cable UTP, fibra óptica mono-modo y multi-modo, mientras se sigue usando el mismo controlador MAC. La GMII está dividida en 3 sub-capas: PCS, PMA, PMD.

### 2.2.7 Subcapa física PCS

La PCS es la sub-capa de la capa GMII que provee una interfaz uniforme para la reconciliación de capas por todo el medio físico. Usa código 8B/10B empleado por canales de fibra. En estos tipos de códigos 8 bits están representados por 10 bits "grupos de códigos".

Algunos grupos de códigos representan datos simbólicos de 8 bits. Otros son símbolos de control. Los símbolos de extensión usados en la extensión de portadora son un ejemplo de símbolos de control.

Las indicaciones de escucha de portadora y detección de colisiones son generadas por esta sub-capa. Esta sub-capa también maneja los procesos de auto negociación por el cual la tarjeta de Red (NIC, siglas en Ingles) se comunica con la Red para determinar la velocidad de la misma (10, 100 o 1000 Mbps) y el modo de operación (*half- Dúplex* o *full- Dúplex*).

### **Acople al medio físico PMA**

Esta sub-capa provista de un medio independiente por la sub-capa PCS para soportar diferentes medios físicos de bit-orientados de forma serial. Esta capa forma grupos de códigos seriales por transmisión y desensambla los códigos de grupos seriales cuando los bits son recibidos.

### **Dependiente del medio físico PMD**

Esta sub-capa proyecta el medio físico para la sub-capa PCS. Esta capa define la señalización de la capa físicas usadas por diferentes medios. La Interfaz dependiente del medio MDI, la cual es parte de PMD es actualmente la interfaz de la capa física. Esta capa define la actual capa física de unión, como los conectores de los diferentes medios de transmisión.

## **2.2.8 Topologías**

En esta sección se discuten diferentes topologías en el cual Giga bit Ethernet puede ser usado. Giga bit Ethernet es esencialmente un "campo de tecnología", que es para usar como una columna vertebral en una red de gran consumo, también puede ser usado entre enrutadores, switches y concentradores o hub. Además puede ser usado para conectar servidores, granjas de servidores y estaciones de trabajo de alto poder.

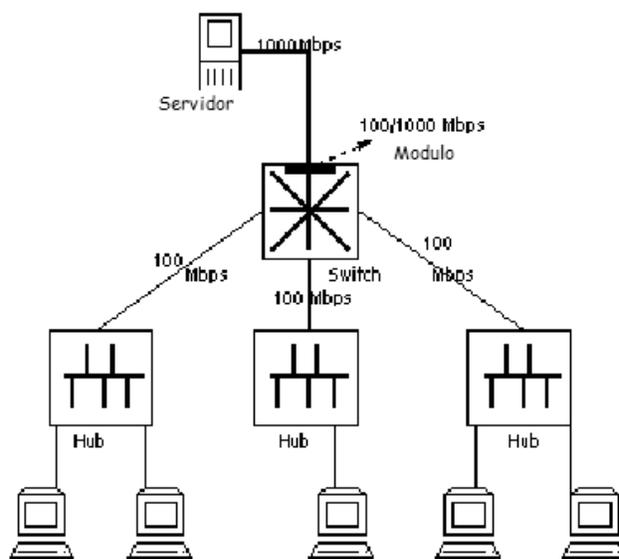
Esencialmente 4 tipos de hardware son necesarios para actualizar una red existente Ethernet/Fast Ethernet en una red Giga bit Ethernet:

- › Una tarjeta de interfaz Giga bit Ethernet (NICs)
- › Agregar switches que conecten un número de segmentos Fast Ethernet a Giga bit Ethernet.
- › Switches Giga bit Ethernet.
- › Repetidores Giga bit Ethernet (Buffered Distributor)

### Actualización en las conexiones server-switch.

Las mejores redes tienen centralizada servidor de archivos y servidor de cálculo. Un servidor da respuestas a un número de clientes, lo cual hace que necesite mayor ancho de banda. Conectando servidores a *switches* con Giga bit Ethernet (Figura 17).

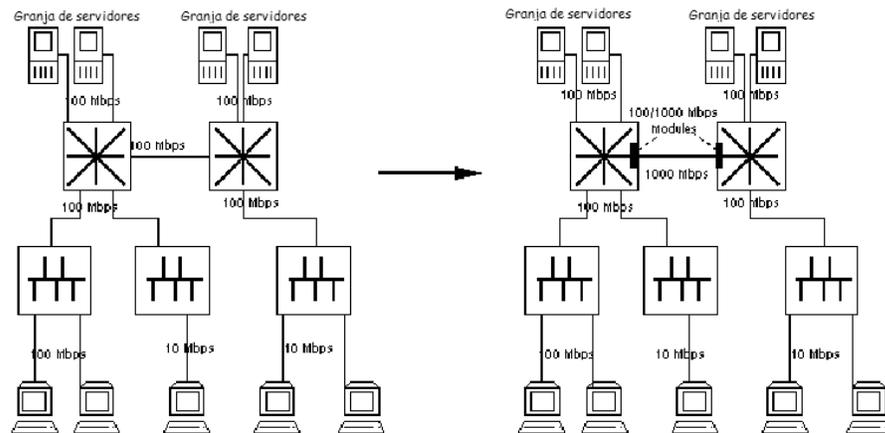
Figura 17. Conexión Servidor a switch



## Actualización en las conexiones Switch-Switch

Otra actualización se encuentra en las conexiones entre los switches Fast Ethernet y los switches de 100/1000 de Giga bit Ethernet. Ver la figura 18.

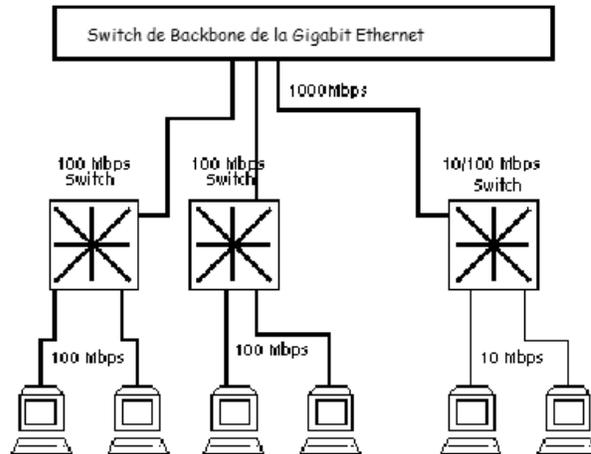
Figura 18. Conexiones switch – switch



## Actualización del *backbone Fast Ethernet*

En una columna vertebral FastEthernet podemos encontrar múltiples *switches* 10/100 Mbps. Estos pueden ser actualizados o sustituidos por un *switch Giga bit* Ethernet siempre y cuando soporte múltiples *switches* 100/1000 Mbps así como enrutadores y concentradores que tienen interfaces Giga bit Ethernet. Una vez que la columna vertebral ha sido actualizada, servidores de alto funcionamiento o arquitectura robusta pueden ser conectados directamente a la columna vertebral (Figura 19). Este incrementará la tasa de transferencia para aplicaciones que requieren mayor ancho de banda.

Figura 19. Conexión de switches a switch de Columna Vertebral



### Actualizando la columna vertebral compartida del FDDI

El FDDI es una estructura tecnológica de *columna vertebral*. Una columna vertebral FDDI puede actualizarse reemplazando concentradores FDDI o enrutadores Ethernet a FDDI por *switches* o repetidores Giga bit Ethernet.

### Actualización de un *backbone* FDDI

#### Actualizando el alto funcionamiento de una estación de trabajo

Las estaciones de trabajos son cada día más y más poderosas y necesitan conectarse a redes de grandes ancho de banda. Actualmente una Workstation pueden transmitir por el bus más de 100 Mbps Giga bit Ethernet puede ser conectado a estas estaciones de trabajo de altas velocidades.

### **2.2.9 Giga bit Ethernet y ATM**

Unos cuantos factores principales guían la escalabilidad de la red de Campus. Primero, el desempeño de ancho de banda y latencia se vuelven más importantes a medida que las aplicaciones existentes y nuevas van requiriendo mayores anchos de banda. La regla típica de 80/20 (80 por ciento del tráfico de la red es local y el 20 por ciento para la columna vertebral) se está revirtiendo de forma que el 80 por ciento del tráfico es ahora destinado para la columna vertebral. Esta configuración requiere que la columna vertebral tenga un mayor ancho de banda y mayor capacidad de conmutación.

Tanto ATM como Giga bit Ethernet resuelven el problema del ancho de banda. ATM ofrece una migración de 25 Mbps en la computadora de escritorio hacia 155 Mbps del rack de cableado hacia el canal principal, y hacia 622 Mbps en este último. Toda esta tecnología está disponible para su uso en cualquier momento. ATM también promete 2.4 Gbps de ancho de banda vía OC-48, que estaba disponible y estandarizado para finales de 1997. Ethernet provee actualmente 10 Mbps de la computadora de escritorio, con 100 Mbps hacia el núcleo. Los fabricantes han entregado Fast Ethernet como un mecanismo para escalar el ancho de banda del núcleo y proveer una migración hacia Giga bit Ethernet.

Segundo, una arquitectura de red de campus escalable debe contabilizar las computadoras existentes y los protocolos de red. Este escenario fuerza a que exista compatibilidad con las computadoras existentes, servidores, y plantas de cableado. Las redes de las grandes empresas han sido objeto de inversiones millonarias en su infraestructura. También, con el fin de asegurar una migración sin inconvenientes, los protocolos LAN existentes deben tener algún tipo de soporte con el fin de facilitar la migración.

La calidad de servicio se ha incrementado visiblemente a medida que los administradores de red requieren que algún tipo de tráfico tenga mayor prioridad para el acceso a la red que algún otro tráfico, particularmente sobre la WAN.

Ethernet promete brindar CoS (Clase de Servicio) por medio del mapeo de prioridades dentro de la red por medio de mecanismos tales como el Protocolo de Reserva de Recursos (RSVP) para IP así como otros mecanismos para El intercambio de paquetes entre redes (IPX). ATM garantiza QoS dentro de la columna vertebral y sobre la WAN por medio del uso de mecanismos como la tasa de bit disponible (ABR), tasa constante de bit (CBR), tasa de bit variable (VBR), y la tasa no especificada de bit (UBR). Tanto ATM como Ethernet tratan de resolver problemas similares de aplicación. Tradicionalmente, Ethernet y FastEthernet han sido utilizados para columnas vertebrales de alta velocidad y elevada conectividad.

Ethernet promete continuar escalando más allá en el ancho de banda. Recientemente, ATM ha sido utilizado también para construir columnas vertebrales amplias para campus a un rango de precios moderado. De cualquier forma, el beneficio clave de ATM ha sido observado en las redes de área metropolitana (MAN) y en las redes de área extendida (WAN). La integración y compatibilidad de las WAN ha sido una guiar significativa en la estalación de las redes de campus.

La importancia de integrar tipos de datos tales como voz, video y datos sobre una WAN ha sido también una guía significativa en la integración de servicios y será la clave para reducir el costo de los servicios WAN y su mantenimiento.

### **2.2.10 Crecimiento de Ethernet y Giga bit Ethernet**

En la actualidad, aproximadamente un 90% de la información de las empresas empieza y termina en LAN's Ethernet. La Giga bit Ethernet ha surgido como un estándar corporativo, debido a que es económico, muy entendido y además compatible con las redes Ethernet existentes. A pesar del reciente descenso en las telecomunicaciones, las empresas a nivel mundial siguen gastando una gran cantidad de dinero anualmente en servicios WAN y de acceso a Internet.

Las LAN corporativas y de campus están viendo un continuo crecimiento en infraestructura a medida que los requerimientos locales de ancho de banda crean cuellos de botella entre los edificios.

### **2.2.11 Migración hacia Giga bit Ethernet**

#### **2.2.11.1 Estándares relacionados**

##### **IEEE 802.1p**

La calidad de Servicio se ha vuelto de forma creciente muy importante para los administradores de red. En junio de 1998, el comité IEEE 802.1p estandarizo los medios por los que una estación terminal puede solicitar una Calidad de Servicio QoS particular a la red y que la red tenga la capacidad de responder de una forma acorde. Este estándar especifica también el manejo de grupos multipunto o multidifusión.

Un nuevo protocolo es definido en 802.1p, protocolo genérico de registro de atributos (GARP). GARP es un protocolo genérico que será usado por aplicaciones GARP específicas, como lo son el protocolo GARP de registro multipunto (GMRP), y el protocolo GARP de registro VLAN (GVRP).

GMRP está definido en 802.1p; GMRP provee servicios de registro para grupos *multipunto* de direcciones MAC.

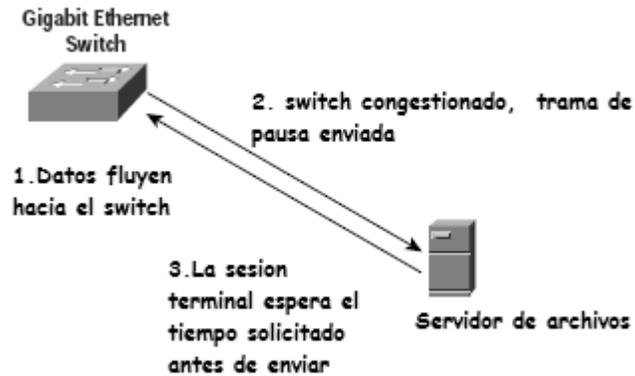
### **IEEE 802.1Q**

La introducción de LAN virtuales (VLANs) dentro de redes conectadas a switches ha creado ventajas significativas a los proveedores de servicios de redes debido a que ellos pueden ofrecer valores agregados a sus productos tales como troncales VLAN, reducción de los efectos de recálculos para Arbol de expansión (Spanning tree) y la difusión de control. El comité 802.1Q ha trabajado para crear VLANs basadas en estándares. Este estándar está basado en un mecanismo de etiquetado que trabaja sobre Ethernet, Fast Ethernet, Token Ring, y FDDI. El estándar permite el etiquetado de VLAN sobre concentradores y enrutadores y permite interoperabilidad VLAN entre proveedores. GVRP fue introducido en 802.1 Q; este protocolo provee servicios de registro para membresía VLAN.

### **IEEE 802.3x**

El comité IEEE 802.3x estandarizo un método para el control de flujo para Ethernet Full Dúplex. Este mecanismo se configura entre las dos estaciones en el enlace punto a punto. Si la estación receptora en el extremo se congestiona, puede enviar de vuelta una trama llamada, “trama de pausa” hacia la fuente en extremo opuesto de la conexión, indicando a la estación que detenga el envío de paquetes por un periodo específico de tiempo. La estación que envía espera el periodo solicitado antes de enviar más datos (figura 20). La estación receptora puede también enviar una trama de regreso a la fuente con un tiempo de espera de cero, para indicarle que inicie el envío de datos nuevamente.

Figura 20. Control de Flujo



## 2.3 Extensiones de redes

En el clima económico de rápido ritmo de la actualidad, las compañías están continuamente presionadas para hacer más con menos, de hecho están expandiendo su alcance a nivel nacional y global a un ritmo record. Las redes corporativas han sido estiradas como nunca antes. Las nuevas aplicaciones como video conferencia y monitoreo, archivos compartidos, y voz sobre IP demandan mayor ancho de banda. Los requerimientos regulatorios ponen presión en los recursos de IT, y las localidades remotas necesitan recibir el mismo soporte de aplicación y los mismos recursos que la red corporativa. Todo esto sin que exista incremento en los costos.

La red se convertido en una herramienta critica y la mayoría de los departamentos IT corporativos están buscando en la Ethernet una solución para contribuir con el cumplimiento de la creciente lista de demandas. Las extensiones LAN basadas en Ethernet permiten a las empresas eliminar costos de capital y de operaciones a sus infraestructuras de red existentes.

Las nuevas tecnologías, que entregan mayor ancho de banda a un menor costo por megabit están ahora disponibles y están siendo ampliamente desplegadas.

Las extensiones LAN le brindan a las empresas, la capacidad de conectar sus LAN entre sí de tal manera que la red es transparente a los límites físicos. Todas las LAN aparecen como si se encontraran conectadas en la misma red sin importar su ubicación. Adicionalmente, las extensiones de red LAN permiten a los gerentes de IT de las empresas, aprovechar la rapidez y simplicidad de Ethernet para ahorrar costos de capital y de operaciones en la red. Las extensiones LAN pueden ser desplegadas en tres tipos de configuración:

- Punto a punto
- Punto a multipunto
- Multipunto a multipunto

### **2.3.1 Punto a punto**

El Foro Metro Ethernet (MEF) define una conexión punto a punto como *“un servicio Ethernet E-line que está basado en una conexión Ethernet virtual punto a punto (EVC)”*. Un servicio E-Line entrega servicios LAN basados en Ethernet a través de un área de servicio local o metro de un punto a otro.

### **2.3.2 Punto a multipunto**

Una conexión punto a multipunto entrega servicios basados en Ethernet a través de un área de servicio nacional o internacional en una topología *centro y rayos (hub and spoke)*. En esta topología, un enrutador o switch en la empresa central, tendría que proveer la conectividad entre los nodos en los extremos de los rayos.

### **2.3.3 Multipunto a multipunto**

Una topología multipunto a multipunto usa etiquetas VLAN para entregar servicios Ethernet diferenciados de un único o varios usuarios sobre una LAN. EL MEF define esta topología como un servicio E-LAN, y es también conocido como topología de estrella. Una red de estrella provee conectividad multipunto a multipunto entre todos los nodos de los usuarios.

Las extensiones LAN son una fácil solución para los problemas creados por el rango limitado de los cables Ethernet. Un dispositivo para extensión LAN opera típicamente en la capa física de forma transparente para los protocolos de las capas de mayor nivel. Las extensiones reenvían todo el tráfico entre dos LAN. Cuando el origen y el destino de una transmisión de datos están muy cerca uno del otro, como con los componentes de un circuito integrado, se pueden lograr velocidades de comunicación muy altas con muy poca o ninguna interferencia.

A medida que la distancia se incrementa, la transferencia de datos se vuelve cada vez más susceptible a la interferencia del ruido y la distorsión. Cuando una computadora debe estar conectada a más de un dispositivo periférico, o computadoras, las conexiones LAN Ethernet son comúnmente usadas. EL medio de cableado Ethernet estándar, tiene sin embargo algunas limitaciones que restringen la distancia. Al usar cable estándar CAT5, la conexión entre origen y destino comienza a romperse a los 328 pies. Las situaciones en el mundo real requieren frecuentemente conexiones de red que exceden esta distancia límite para Ethernet. Para dichas situaciones, los dispositivos para extensiones LAN pueden proveer una valiosa solución. Las necesidades particulares de cada red son las que determinan el tipo de extensión LAN que es más apropiada para cada usuario.

### **2.3.4 Extensores LAN Ethernet**

Un extensor LAN Ethernet también conocido como extensor de red es cualquier dispositivo que sea usado para extender un segmento LAN Ethernet más allá de su distancia límite normal de 100 metros para la mayoría de las formas de Ethernet.

Las extensiones de red LAN permiten a los múltiples usuarios dirigir sus segmentos Ethernet, más allá de las especificaciones IEEE 802.3 para la limitación de distancia de 100 metros. Los extensores LAN Ethernet llevan comunicaciones de datos de alta velocidad a mayores distancias entre redes LAN separadas geográficamente o entre dispositivos LAN. Crean puentes para conexiones Ethernet efectivas y en cuanto a costo y desempeño. Los extensores LAN Ethernet son desplegados comúnmente en ambientes comerciales, residenciales, industriales y hospitalarios, etc.

Los extensores LAN Ethernet pueden ser identificados como extensores de red, extensores LAN y extensores de cable Ethernet. Usan una gran variedad de tecnologías de transmisión sobre medios físicos como cobre o fibra.

#### **Características buscadas en los dispositivos para extensión de redes LAN**

- El costo de los dispositivos y la implementación del sistema no debe costar una fortuna.
- La velocidad de transmisión debe ser suficiente y es un aspecto clave para una verdadera velocidad LAN completa. No es necesario conformarse o ajustarse a un pequeño ancho de banda.
- La instalación e implementación del sistema debe ser sencilla y con la posibilidad de terminarse en un tiempo corto.
- Los productos a utilizar deben ser confiables y cumplir con los estándares establecidos por la industria de las telecomunicaciones.

## **2.4 Opciones para extensiones de red**

Existen varias opciones para las empresas o instituciones que se ven en la necesidad de implementar una extensión en sus redes LAN.

### **2.4.1 Extensiones por medio de cobre**

Los extensores de este tipo usan cableado de cobre de un par incondicionado (POTS) hasta la categoría clasificada como par trenzado (CAT3... CAT6). La transmisión por cobre no permite las velocidades que la transmisión por fibra ofrece, pero permite el uso de los cableados existentes para servicios de voz y las velocidades aun podrían estar sujetas a algún crecimiento.

### **2.4.2 Extensiones LAN inalámbricas**

La proliferación de computadoras portátiles dentro de las organizaciones con una creciente necesidad de movilizar la fuerza laboral, han incrementado la demanda de redes inalámbricas. Hasta recientemente, la tecnología inalámbrica era una combinación de diferentes sistemas incompatibles de una gran variedad de fabricantes. La tecnología era lenta, cara, y usada para aplicaciones móviles en ambientes donde el cablear era impráctico o imposible. Con la madurez de los estándares de la industria y el desarrollo de hardware de red inalámbrico de bajo peso dentro de la gran variedad del mercado, la tecnología inalámbrica se ha convertido en la tecnología de actualidad. La baja en los precios y la interoperabilidad han atraído a varias organizaciones, de educación, finanzas, y salud.

La disponibilidad de redes inalámbricas puede extender la libertad y movilidad de un usuario de la red, resuelve varios problemas asociados con las redes cableadas y en algunos casos reduce los costos de desarrollo de red.

### **2.4.3 Extensiones LAN con fibra óptica**

El uso de LAN ópticas se ha incrementado rápidamente y particularmente en las nuevas infraestructuras. Las redes de cobre se mantienen como las soluciones más económicas pero el uso de la fibra proporciona algunas ventajas importantes como lo son:

- Se puede lograr la interconexión de dos LAN por medio del uso de dos equipos convertidores de medio dentro de un rango de distancias de 500 m hasta 150 Km.
- La conexión por cobre de pequeños segmentos dentro de una LAN en un campus se puede integrar directamente en la LAN principal por medio de mini conmutadores incluyendo convertidores simples o dobles.
- La fibra óptica permite conexiones a mayores velocidades y es inmune a la interferencia electromagnética.

### **2.4.4 Uso de la tecnología FSO**

El uso que más ampliamente se ha dado a la tecnología FSO es el de proveer extensiones LAN inalámbricas entre edificios de un campus.

Sin importar si la red se encuentra en el campus de una universidad, una corporación, un hospital, entidad del gobierno o militar, los sistemas FSO ofrecen desempeños de enlaces con calidad de una empresa de transporte que los usuarios requieren. A diferencia de los sistemas inalámbricos RF, la tecnología FSO es segura de forma inherente. No sufre por la interferencia electromagnética o por problemas de licencia. Es un opción importante cuando el tendido de fibra se plantea muy difícil o muy costoso. Ofrece velocidades de transmisión equivalentes a las de la fibra óptica y con un desempeño comparable de tasa de error.

La creciente demanda para conectividad de red e información en tiempo real ha resultado en que las organizaciones se vean en la necesidad de integrar partes geográficamente aisladas de la compañía o incrementar el ancho de banda de aquellas partes que ya están dentro de la infraestructura de la LAN. Un enlace FSO provee una solución de costo fijo que ofrece suficiente ancho de banda para satisfacer los objetivos de conectividad de la red empresarial y ofrece en teoría un atractivo retorno de inversión.

El uso de la tecnología FSO para extender redes se ha vuelto popular en varios países debido a diversas razones. La estabilidad y velocidad de la tecnología FSO actual, permite que los enlaces sean implementados ya sea como extensiones de la LAN primaria o como un sistema de respaldo de gran ancho de banda para la fibra.

FSO es una buena opción si se quiere entregar una conexión de gran ancho de banda sin incurrir en gastos sobre la marcha para el pago de un proveedor de transporte. La implementación de un nuevo enlace FSO habilita la interconexión de una oficina remota hacia la oficina principal.

Las soluciones Giga bit Ethernet que son ofrecidas por las empresas dedicadas al desarrollo de los sistemas FSO brindan el ancho de banda económico que es requerido en las redes actuales. El retorno de la inversión de capital tiene la posibilidad de ser justificado en menos de un año según lo plantean estos fabricantes.



### **3. FACTORES A CONSIDERAR EN UN ENLACE FSO**

#### **3.1 Parámetros importantes para el funcionamiento**

Al evaluar el desempeño de un sistema FSO, es importante tomar en cuenta varios parámetros del mismo. En general se les puede dividir en dos categorías: Parámetros internos y externos.

Los parámetros internos se relacionan con el diseño del sistema e incluyen la potencia óptica, longitud de onda, ancho de banda, ángulo de divergencia, y pérdida óptica en la transmisión y sensibilidad del receptor, tasa de bits errados (BER), diámetro del lente receptor, y campo de vista del receptor.

Los parámetros externos se relacionan con el ambiente en el que el sistema debe operar e incluyen la visibilidad y la atenuación atmosférica, centelleo, distancia, pérdida de ventana y pérdida de dirección. Es importante entender que varios de estos parámetros no son independientes sino se encuentran ligados en el desempeño global del sistema. Por ejemplo, la disponibilidad del sistema, es función no solo de la distancia sino también del clima del lugar y del diseño del transductor. Un sistema optimizado para distancias grandes mayores a 1 kilómetro, puede no estar diseñado de forma óptima para tener alta disponibilidad en distancias cortas. Sobre todo, el diseño de un sistema FSO depende en gran parte de la aplicación que se le dará, la disponibilidad que se necesita y el costo.

En cualquier sistema FSO existen 5 parámetros fundamentales que determinan la cantidad de luz que llega de un extremo al otro y por lo tanto el desempeño del sistema.

### **3.1.1 Potencia transmitida**

Obviamente, si la luz sale del terminal transmisor con mayor potencia desde un principio, se puede permitir perder mayor cantidad de esta potencia en la atmósfera en su camino al otro equipo terminal. Mayor potencia significa que se puede penetrar más en la atmósfera y lograr enlaces más largos. Por otro lado para una distancia determinada, una mayor potencia puede incrementar la disponibilidad del enlace (cantidad de tiempo que el enlace esta activo) porque puede trabajar con climas más difíciles.

Debido a que la potencia de salida de un láser es normalmente establecida como una propiedad del láser en sí, la potencia transmitida se define como la potencia total máxima a la salida del láser. Si más de un láser es usado, la suma de sus salidas es la potencia total. Por lo tanto es necesario tomar en cuenta cualquier pérdida óptica del sistema de transmisión.

La fuente de luz modulada que es típicamente un láser o un LED, provee a la señal óptica transmitida y determina todas las capacidades de transmisión del sistema. Solamente la sensibilidad del receptor juega un papel de igual importancia en el desempeño total del sistema. Para propósitos de telecomunicaciones, solo los láser que son capaces de ser modulados a 20 Bit/s y hasta 2.5 Bit/s pueden cumplir con las actuales demandas del mercado. Adicionalmente, la forma en que el dispositivo es modulado y la cantidad de potencia modulada que es producida, son importantes para la selección de un dispositivo. Los sistemas que usan láser en el rango de 850 y de 1550 nm deben cumplir con las siguientes características:

- Habilidad para trabajar a potencias mayores (importante para el caso de sistemas de distancias mayores)
- Alta velocidad de modulación (importante para sistemas de alta velocidad)
- Bajo consumo de potencia.
- Capacidad para operar en un amplio rango de temperaturas sin afectar el desempeño. (para sistemas en exteriores).

Para cumplir con los requerimientos anteriores, los fabricantes de equipos FSO usan generalmente usan VCSELS para operar en el rango Infra Rojo de longitudes de onda más cortas y Fabry Perot (FP) o Láser de realimentación distribuida (DFB) para operar en el rango Infra rojo de longitudes de onda mayores. Muchos otros tipos de láser no son apropiados para el uso en sistemas FSO de alto desempeño.

#### **3.1.1.1 Fuentes de amplificación**

Las fuentes de amplificación tales como EDFA y los amplificadores ópticos semiconductores (SOAs), son usadas para elevar la potencia de fuentes láser de baja potencia. Las tecnologías EDFA y SOA también pueden amplificar tanto una longitud de onda como varias longitudes ligeramente espaciadas de forma simultánea, lo cual es conocido como WDM. Con ganancias ópticas muy grandes que exceden los 30 dB, las EDFA pueden manejar la potencia óptica de salida de un sistema óptico de 1550 nm hasta un rango entre 1 y 2 W. El uso de las fuentes EDFA tiende a estar limitado a sistemas de muy alto desempeño que operan por encima de 1 Gbit/s.

### **3.1.1.2 Máxima potencia de salida**

Se refiere a la potencia de salida máxima que permite un transmisor. El valor máximo de la potencia de salida es frecuentemente importante en operaciones con láser de pulso en las cuales un pulso láser de alta potencia es requerido por un corto periodo de tiempo. En general, el valor máximo de la potencia y la frecuencia de repetición del pulso están muy ligados, y una alta potencia es usualmente relacionada con una baja frecuencia de repetición de pulso para prevenir daños en el equipo. De cualquier forma, para la mayoría de los sistemas de comunicaciones, la característica de la máxima potencia de la fuente láser es irrelevante debido a que la mayoría de las aplicaciones no usan esquemas de modulación de pulsos de alta potencia y ciclo bajo. Para casi todos los sistemas FSO, el valor del máximo de potencia se referiría a la transmisión de potencia de un 1 y sería aproximadamente dos veces la potencia de salida promedio de la señal.

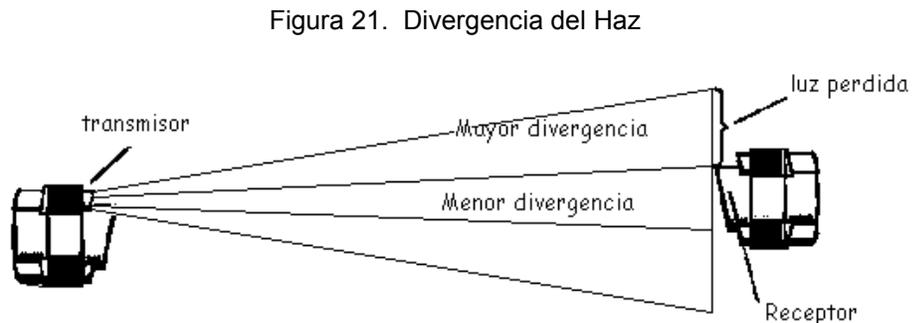
### **3.1.1.3 Potencia de salida promedio**

La potencia de salida promedio de un sistema de transmisión es un factor clave al determinar el margen del enlace debido a que, como en la mayoría de los sistemas de comunicación digital por fibra, los sistemas FSO son digitales en términos de su transmisión de bits a través del enlace. Estos sistemas de comunicación usan normalmente un esquema de código para asegurar que aproximadamente el mismo número de “1s” y “0s” son transmitidos, manteniendo entonces un ciclo de 50% de duración. En este caso, donde la potencia máxima es transmitida como un 1 y la ausencia de potencia es transmitida como un 0, la potencia promedio debe ser aproximadamente la mitad de la potencia máxima.

Esta potencia promedio es la que es usada para la clasificación de seguridad para la vista y es típicamente usada para definir la potencia transmitida por un transmisor-receptor FSO.

### 3.1.2 Divergencia del haz transmitido

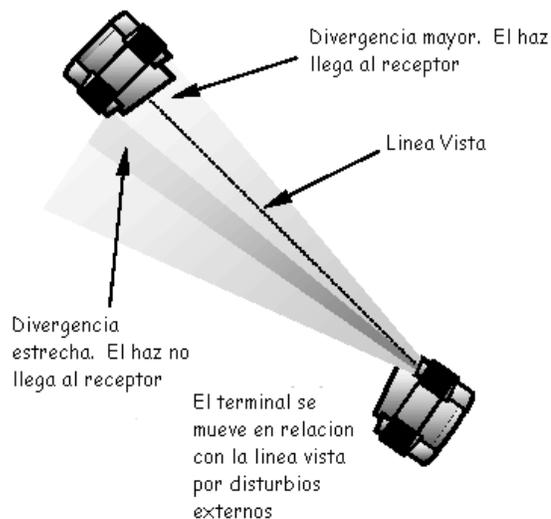
Los haces de luz que salen del transmisor no son perfectamente paralelos, tienen un ángulo cónico o de divergencia. Debido a esto la luz se dispersa a medida que se aleja del transmisor, de tal forma que la sección transversal del haz puede ser mucho mayor para cuando llega del lado del receptor por lo que no toda la luz del haz entra en la apertura de recepción y mucha de ella es perdida a los costados del equipo terminal. A minimizar la divergencia del haz, más luz se puede concentrar en la apertura de recepción del terminal opuesto. (figura 21).



En el papel esta idea es bastante directa, y de hecho es demostrable fácilmente en los laboratorios. Sin embargo, en el mundo real, reducir la divergencia del haz, conlleva a otros problemas. En particular, entre menor es la divergencia, es más difícil mantener el haz alineado con la línea vista entre las dos terminales.

Disturbios externos como el movimiento de las construcciones, vibraciones del suelo, ráfagas de viento, causan que las terminales se muevan en relación con la línea vista y que el haz transmitido no llegue al punto necesario (figura 22). Estos movimientos pueden causar errores en la transmisión y si son demasiado son suficientemente grandes, pueden causar que se mueva completamente el haz respecto al terminal opuesto y se pierda el enlace. Si la divergencia del haz es lo suficientemente ancha, se puede acomodar para cierta cantidad de movimiento sin sacrificar el desempeño.

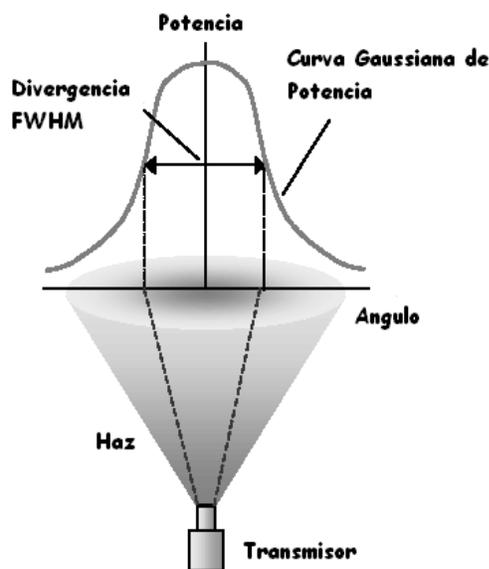
Figura 22. Perdida de dirección del Haz



La curva de potencia que define el haz no es constante a través del área transversal del haz. Es más bien una distribución Gaussiana. La forma en que se define el ancho de este haz Gaussiano, es de cierta forma arbitrario (figura 23).

Debido a que es generalmente más intuitivo de entender, la divergencia del haz se puede considerar como el ancho medido a la mitad de la potencia del pico de la curva. Esto es llamado el ángulo de divergencia FWHM del haz transmitido.

Figura 23 Divergencia del Haz FWHM



Típicamente, el ancho del haz óptico de un transmisor-receptor FSO es relativamente amplio (divergencia de 2-10 mrad, lo que equivale a una dispersión del haz de 2 a 10 m a una distancia de 1 Km), como es generalmente en el caso de las aplicaciones sin rastreo. Para tales aplicaciones, el sistema debe compensar por cualquier movimiento en la plataforma manteniendo un ancho del haz y un FOV total que es mayor que cualquier movimiento que pueda predecirse en la plataforma del transmisor-receptor.

Si el sistema provee de una alineación y rastreo automáticos, entonces el ancho del haz puede ser disminuido considerablemente (divergencia de 0.05 – 1.0 mrad, equivalente a una dispersión de haz de 5 cm a 1 m a una distancia de 1 Km), conduciendo esto a una mejora en el margen del enlace y a proveer al sistema con un mayor margen para combatir las condiciones climáticas adversas.

### **Modelos de propagación del haz (Haces Gaussianos, 1/e, 1/e2, y FWHA)**

La cantidad de divergencia del haz y la forma del haz óptico en el punto de equipo receptor, son criterios importantes al evaluar el desempeño del sistema, especialmente en términos del margen del enlace.

Normalmente son usados en FSO dos tipos de haz: El Gaussiano y sombrero de Copa (Top Hat). El haz Gaussiano típico es un producto natural de la cavidad de resonancia del láser. La mayoría de los láser producen haces Gaussianos que tienen cualidades espaciales de fuente puntual.

Para un haz Gaussiano, la intensidad a una distancia  $\rho$  radial o transversal del centro del haz está dada a continuación para un ancho de haz  $\beta$ , a una longitud de onda  $\lambda$ , y una cintura del haz  $\omega_e$ .

$$J(\text{W/m}^2) \simeq J_0/z^2 \exp[-2(\rho/\beta z)^2],$$

$$\beta = (2/\pi)(\lambda/\omega_e).$$

La potencia en el radio del haz  $\rho_0$  está dada por:

$$P(W) = 1 - \exp[-2(\rho_0/\beta z)^2].$$

Cuando la amplitud radial decae a  $0.135(\sim 1/e^2)$  de su intensidad pico, el 86 % de la energía se encuentra encerrada en este radio, definiendo entonces el ancho del haz  $\beta$ ,  $1/e^2$ . Este es el parámetro fundamental de un perfil de haz Gaussiano. De manera alternativa, el haz también puede ser caracterizado por el lugar donde su amplitud declina a  $0.368 (1/e)$  de su intensidad pico. Una tercera alternativa es caracterizar al haz por su anchura total a la amplitud media (FWHA), la cual es para el haz Gaussiano de  $0.589 \times (\beta)$ .

Una ventaja del perfil de haz Gaussiano es que en un sistema de rastreo FSO, el haz puede ser utilizado para proveer información de rastreo por medio del detector e comunicación, eliminando la necesidad de un sensor adicional de rastreo y por lo tanto, un costo adicional.

Una alternativa para el perfil de haz Gaussiano es el haz sombrero de copa el cual tiene una potencia virtualmente uniforme sobre todo su frente de onda. La proyección de tal haz requiere típicamente una fuente de tamaño finito, la cual puede obtenerse utilizando una fibra óptica multimodal como una fuente de transmisión de potencia. Un transmisor enfocado, en el cual la apertura de salida de la fibra es en foco del lente de salida, puede producir un haz de tamaño finito que tiene una distribución de intensidad casi constante a través de la mayoría del haz. Un haz de este tipo se caracteriza mejor por su FWHA, siempre que su intensidad pase por una transición rápida en este diámetro y mantenga la intensidad pico sobre el más amplio ángulo de divergencia posible.

El haz sombrero de copa resultante maximiza la energía total transportada por el haz bajo condiciones seguras para la vista. Para los mejores diseños de sombrero de copa, el FWHA es  $0.90 \times \beta$ , lo cual provee una excelente área de cobertura para el movimiento de la plataforma mientras se maximiza la potencia total del haz para determinado límite de seguridad para la vista.

El reto real con el diseño sombrero de copa consiste en llenar los modos de la fibra para producir un haz que sea de la amplitud del diámetro del núcleo de la fibra.

Debe ser notado que en rangos donde el diámetro del haz transmitido se ha expandido al punto donde el diámetro es muchas veces mayor que la apertura de recepción, existe una pequeña diferencia entre el perfil del haz recibido de un haz Gaussiano y el perfil de un haz *top-hat*.

En conclusión, es importante entender el rol de las características del perfil del haz al comparar el desempeño de sistemas FSO. Un haz de tipo Gaussiano con un ancho de  $1/e^2$  está caracterizado por una relativamente alta intensidad de potencia sobre su eje, la cual disminuye drásticamente hacia las orillas del haz. Esto puede afectar el desempeño si el sistema no incorpora rastreo o está instalado en una plataforma que se ve sujeta a una considerable cantidad de movimiento. En contraste, un haz de tipo sombrero de copa tiene una potencia menor en el eje pero una distribución radial de potencia relativamente constante que lo hace más apropiado para compensar el movimiento de los edificios.

### **3.1.3 Área de recepción**

Como se expuso anteriormente, debido a que el haz transmitido tiene cierta divergencia, mucha de la luz, realmente no cae dentro del área de recepción del terminal opuesto. Es por lo tanto beneficioso, tener un apertura de recepción grande para poder capturar la mayor cantidad de luz incidente posible. El dilema es que un receptor mayor es más caro y tiene un indeseable mayor peso.

Los transmisores-receptores pueden usar el mismo sistema óptico para transmitir y para recibir la información, pero comúnmente se usan sistemas ópticos separados para cada función. En cualquier caso, es posible para los sistemas ópticos la incorporación de más de una apertura para cualquiera o para ambas funciones de transmisión y recepción.

Existen muchas ventajas de usar diseños de aperturas múltiples, incluyendo mayor resistencia a los bloqueos, mayor compensación de centelleo, y redundancia inherente. Como siempre, al comparar sistemas, es importante tomar en cuenta, el tamaño de la apertura óptica del sistema debido a que una apertura de gran tamaño (para transmitir y recibir) puede ofrecer igual o mejor desempeño que varias aperturas pequeñas dentro de la misma área.

Una ventaja de los diseños con múltiples aperturas es que el potencial de un bloqueo momentáneo del haz debido a obstrucciones, es significativamente minimizado debido a que la probabilidad de que todas las aperturas sean bloqueadas al mismo tiempo, es reducida drásticamente. Además, desde una perspectiva operacional, el uso de aperturas múltiples con múltiples láser en la transmisión, puede proveer redundancia en el caso de que una de las fuentes láser pueda fallar. Algo importante es que desde la perspectiva atmosférica, un diseño con apertura múltiple puede ser beneficioso en la reducción de los destellos (reflejos o resplandor debido al calor). La minimización del efecto de destello es especialmente importante cuando los sistemas FSO son instalados sobre largas distancias. Una desventaja de los diseños con apertura múltiple es que incrementa la complejidad debido a que la luz debe ser acoplada efectivamente en uno o más receptores cuando se tienen varios receptores ópticos. Además puede ser muy difícil alinear múltiples aperturas de transmisión y/o recepción entre si y mantener tal alineación sobre un amplio rango de temperaturas.

Por otro lado la adición de un sistema de rastreo puede volverse más complicada cuando se usan múltiples aperturas debido a que es muy improbable que exista una porción compartida de la ruta óptica donde un solo elemento pueda conducir todos los haces de transmisión y recepción de forma simultánea. Esta complejidad hace que se incremente el costo total del sistema y dependiendo de la aplicación, las ventajas de usar múltiples aperturas pueden no ser justificables.

#### **3.1.4 Sensibilidad del receptor**

Sin importar la cantidad de luz que llega a la apertura de recepción, el receptor debe ser capaz de medir hasta la menor cantidad de señal posible. La sensibilidad del receptor está definida como la potencia mínima que puede ser detectada mientras se mantiene una tasa de errores de  $1 \times 10^{-6}$ .

De forma similar que la potencia transmitida, la sensibilidad del receptor se mide directamente en el mismo receptor, no en la apertura de recepción del terminal. Esto es principalmente por motivos de simplicidad debido a que la sensibilidad es una propiedad Standard del receptor así como la salida de potencia de un láser. Esto quiere decir que la eficiencia de la ruta óptica de recepción debe ser definida también para tomar en cuenta esas pérdidas entre la apertura de recepción y el receptor en sí. El parámetro de BER de  $1 \times 10^{-6}$  es un estándar especificado para comunicaciones satelitales y ha sido trasladado a la industria de FSO.

Comparadas con los transmisores, las opciones para receptores, son mucho más limitadas. Los dos materiales más comunes para sistemas detectores usados en las cercanías del espectro infra rojo están basados en tecnología de Si o InGaAs.

El Germanio es otro material para sistemas de detección que cubre el rango operativo de longitudes de onda de los sistemas FSO comercialmente disponibles. Sin embargo, la tecnología de Germanio no es usada muy frecuentemente debido a los altos valores de corrientes oscuras de este material.

Todos estos materiales tienen una buena respuesta en un amplio rango de longitudes de onda y a diferencia de los láseres, no están sintonizados a una longitud de onda específica. Si existe una necesidad de detectar una longitud de onda específica, como en los sistemas WDM, los filtros externos para longitudes de onda se deben incorporar al diseño.

### **Detectores de longitud de onda corta**

El material para detector más común en el rango visible y cercano a Infrarrojo es el Silicio (Si). La tecnología Si es bastante madura y los receptores, pueden detectar niveles de luz extremadamente bajos. Como la mayoría de los materiales de detector de banda ancha.

El Silicio tiene una respuesta espectral dependiente de la longitud de onda, la cual debe ser ajustada con la longitud de onda de operación del transmisor. Los detectores basados en Si tienen típicamente una máxima sensibilidad de respuesta espectral alrededor de los 850 nm, lo que hace que los detectores de Si sean ideales para el uso en conjunto con VCSEL 's de longitud de onda corta operando a 850 nm. Sin embargo, la sensibilidad del Silicio cae drásticamente para longitudes de onda más allá de 1  $\mu\text{m}$ . Como resultado de esto, 1100 nm es el límite para el uso de Si, para detección de luz. Los detectores de Silicio pueden operar en anchos de banda muy altos. Una aplicación reciente a 10 Gbit/s ha sido comercializada para uso en longitudes de onda corta de 850 nm.

Detectores de menor ancho de banda (1gbit/s) Si-PIN y Si-APD son ampliamente disponibles. Los detectores Si-PIN con transimpedancia integrada son también muy comunes. En estos detectores, la sensibilidad es una función del ancho de banda de la señal de modulación, la cual decrece a medida que el ancho de banda de detección se incrementa. Los valores típicos de sensibilidad para un diodo Si-PIN se encuentran entre -34 dBm a 155 Mbit/s. Los Si-APD son mucho más sensibles debido a un proceso de avalancha interno. Por lo tanto los detectores Si-APD son ampliamente usados para sistemas de detección FSO.

### **Detectores de longitudes de onda grandes**

El material más comúnmente usado para detectores de rangos de longitudes de onda mayores es el Indio-Galio Arsénico InGaAs. También es un material para detectores de banda ancha y su respuesta espectral o remarcable eficiencia depende de la detección de longitud de onda.

Sobre la década pasada, el desempeño de los detectores InGaAs con respecto a la sensibilidad, ancho de banda, y el desarrollo de la tecnología de la fibra óptica de 1550 nm ha ido mejorando continuamente. Casi el 100 % de todos los sistemas de longitudes de onda usan InGaAs como material para detector. Comercialmente los detectores de InGaAs están optimizados para su operación a 1310 o 1550 nm. Debido al drástico descenso en la sensibilidad a través del rango de las longitudes de onda cortas, los detectores InGaAs no son usados típicamente en el rango de los 850 nm. El beneficio principal de los detectores InGaAs es su extrema capacidad para gran ancho de banda, combinado con una alta respuesta espectral a los 1550 nm. La mayoría de los receptores InGaAs están basados en tecnología PIN o APD. Los APD son mucho más sensibles debido a su proceso de amplificación interno.

Los valores de sensibilidad para aplicaciones de mayor ancho de banda pueden ser tan bajos como -46 dBm a 155 Mbit/s, o -36 dBm a 1.25 Gbit/s.

### 3.1.5 Pérdidas ópticas

Así como la luz debe viajar a través de la atmósfera, también debe pasar a través del sistema óptico de cada terminal antes de llegar finalmente al receptor. En algunos casos, esto puede involucrar también una ventana externa. Cada componente óptico puede absorber, reflejar, o dispersar cierta porción de la luz, reduciendo la potencia total recibida. Por lo tanto es importante el diseño de un sistema óptico de transmisor-receptor muy eficiente.

Las mayores fuentes de pérdidas ópticas son las pérdidas de inserción, los lentes, geométricas, atmosféricas y de propagación. Las pérdidas geométricas ocurren debido a la divergencia del haz. Estas pérdidas pueden ser calculadas usando la siguiente fórmula.

$$\frac{A_R}{A_B} = \left( \frac{D_R}{D_T + 100 * d * \theta} \right)^2$$

$D_T$  y  $D_R$  son los diámetros de los lentes transmisor y receptor medidos en cm. La distancia entre el transmisor FSO y el receptor es  $d$ , medida en km.  $\theta$  es la divergencia del haz laser transmitido en mrad.

Las pérdidas atmosféricas son debido a la absorción, dispersión, destellos, y condiciones climáticas. Los conectores y ensamblajes del telescopio FSO en el punto de transmisión y de recepción son responsables de un significativo porcentaje de pérdidas de inserción.

Las pérdidas de inserción típicas para enlaces FSO comerciales se encuentran alrededor de los 4 dB. En la figura 24 se presenta una comparación de los sistemas FSO y de Fibra óptica en relación a la atenuación mientras que en la tabla II se indican algunos valores de referencia para las perdidas y visibilidad en enlaces FSO.

Figura 24. Atenuación en sistemas FSO y en Cables de fibra Óptica



Tabla II. Pérdidas y visibilidad en enlaces FSO

Descripción	Visibilidad	Pérdidas
Niebla densa	40-70 m	392-220 dB/km
Niebla espesa	70-250 m	220-58 dB/km
Niebla moderada	250-500 m	58-28.2 dB/km
Niebla leve	500-1000 m	28.2-13.4 dB/km
Niebla escasa	1-2 km	13.4-6.3 dB/km
Neblina	2-4 km	6.3-2.9 dB/km
Neblina leve	4-10 km	2.9-1.03 dB/km
Despejado	10-20 km	1.03-0.45 dB/km
Muy despejado	20-50 km	0.45-0.144 dB/km
Extremadamente despejado	50-150 km	0.144-0.03 dB/km

### 3.1.6 Longitud de onda

La longitud de onda a la que se opera también contribuye con el desempeño del receptor. Es generalmente cierto que fotodiodos de mayor calidad logran comparables eficiencia tanto en 800nm como en 1550 nm. Sin embargo, las longitudes de onda mayores tienen ventaja en el receptor debido a su menor energía fotónica. Un fotón de 1550 nm tiene la mitad de la energía de uno de 800nm. Debido a esto, por la misma cantidad de energía, un haz de luz de 1550 nm tiene el doble de fotones que uno de 800 nm. Esto resulta en el doble de fotoelectrones creando corriente él en fotodiodo del receptor. Debido a que cierto número de fotoelectrones es requerido para detectar un pulso óptico, un pulso de 1550 nm se puede detectar con 3dB menos de potencia óptica.

Es de notar que los límites de seguridad para la vista varían de acuerdo con la longitud de onda. Los equipos ópticos inalámbricos que se encuentran actualmente en el Mercado pueden ser clasificados en 2 grandes categorías.

Los sistemas que trabajan a la longitud de onda cercana a los 800nm y los que trabajan cerca de los 1550 nm.

Los haces de láser de 800 nm se encuentran cerca del infrarrojo y son por lo tanto invisibles, sin embargo tal como las longitudes de onda visibles, la luz pasa a través de la cornea y es enfocado hacia un pequeño punto en la retina. Para rangos entre los 400 los 1400 nm el haz de luz es concentrada en un factor de 100000 cuando llega a la retina. Entonces a 800 nm la retina puede ser dañada permanentemente por algunos productos ópticos inalámbricos comercialmente disponibles, incluso antes de que la víctima se dé cuenta que esta dañina iluminación ha ocurrido. Mientras tanto, los haces láser a longitudes de onda mayores a los 1400 nm son absorbidos por la cornea y no se enfocan dentro de la retina.

Debido a estas propiedades biofísicas del ojo, las longitudes de onda mayores a 1400nm son permitidas a intensidades 50 veces más grandes que las longitudes de onda cerca de los 800 nm. Este hecho puede ser explotado al especificar una longitud de onda dentro del rango de los 1550 nm, donde el factor de potencia adicional permite que el sistema se propague sobre mayores distancias y soporte mayores velocidades de transmisión de datos.

Históricamente, muchos de las compañías que desarrollan estos sistemas, han empleado longitudes de onda dentro del rango de 780nm a 850 nm, principalmente debido a la disponibilidad que hay en esas longitudes de fuentes eficientes y confiables a base de semiconductores tipo diodo. Para los dispositivos de 780 nm, las ventajas de costo de utilizar la misma longitud de onda que es usada para los reproductores de CD.

El costo es un factor importante en la selección de la longitud de onda, pero también debe considerarse varios aspectos adicionales, principalmente el de no exceder los límites de seguridad a la vista en las intensidades transmitidas bajo condiciones de altas tasas de velocidad de transmisión a través de una atenuación atmosférica muy grande. Otro aspecto a considerar es el desempeño general y el potencial de crecimiento del sistema.

Al considerar los diferentes aspectos se puede llegar a determinar que la opción más apropiada es utilizar longitudes de onda cercanas a los 1550 nm, el mismo rango que se usa en los sistemas de comunicación por fibra óptica.

### **3.1.7 Disponibilidad**

Un aspecto clave para una compañía de transporte al desplegar sistemas FSO, es la disponibilidad del sistema. La disponibilidad es el porcentaje de tiempo de determinado periodo que el enlace FSO se mantiene operacional.

Por ejemplo en cálculos realizados para un año:

5 nueves = 99.999 % = enlace caído por 5 minutos durante el año  
4 nueves = 99.99 % = enlace caído durante 53 minutos en el año  
3 nueves = 99.9 % = enlace caído durante 8.75 horas en el año  
99.8 % = enlace caído durante 17.5 horas por año

La disponibilidad del sistema abarca varios factores, incluyendo la confiabilidad del equipo y el diseño de la red pero estos son bien conocidos y cuantificables. La mayor incógnita es la estadística de la atenuación atmosférica.

Mientras casi todos los grandes aeropuertos alrededor del mundo, mantienen estadísticas de visibilidad (que pueden ser convertidas en coeficientes de atenuación), la escala espacial de medidas de visibilidad es muy dura (generalmente de 100 metros aproximadamente) y la escala temporal no es frecuente sino horaria en la mayoría de los casos. Con las crudas escalas espaciales y temporales, los estimados de disponibilidad para equipos de clase portador de datos (99.9 % o más) serán limitados a 99.9% o peor.

A raíz de lo anterior, estas grandes bases de datos no son útiles a excepción de que permiten el mínimo grado de servicio aceptable para un proveedor. Para que un proveedor pueda definir razonables acuerdos de nivel de servicio es necesario que exista una mejor información. Para conseguir esta información, algunos fabricantes de productos FSO han hecho uso de instrumentos tales como el nefelómetro con el cual pueden hacer mediciones de las partículas suspendidas en el aire a partir de un haz de luz y la cantidad de esta que se refleja.

### **3.1.8 Máximo rango de enlace teórico**

Para realizar una comparación con el desempeño en condiciones reales de un sistema FSO se puede realizar cálculos para el rango máximo de un enlace con sistema FSO Strawman (teóricamente perfecto pero aun no logrado). Para esto se asumen ciertos factores dentro de los se debe notar que el ruido del detector, dispositivos electrónicos y de fondo fueron establecidos con valor 0 y la apertura de recepción es capaz de recibir todos los fotones transmitidos, es decir que la divergencia del haz fue establecida en cero. Además una apertura de recepción muy grande se elige de modo que se pueda usar hasta 80 vatios de potencia de salida se puedan usar sin constituir un peligro para la vista.

Datos asumidos:

Láser seguro para la vista humana

Sin presencia de ruido de detector, de dispositivos electrónicos o de ruido de fondo.

Apertura de 25.4 cm

Potencia transmitida de 80 W

Atenuación de 200 dB/km

Relación Señal a ruido necesitada de SNR=14 para 10 BER -12

Sin pérdidas geométricas

Resultado

$$SNR = \frac{1}{2} \frac{\eta P_{señal}}{h\nu B}$$
$$80W \cdot 10^{-\frac{200 R}{10}} = 8.9nW$$

**Rango = 497 metros**

### **3.1.9 Tasa de error de Bit, tasas de transferencia y rango**

A medida que se incrementa la cantidad de niebla, se ve drásticamente disminuido el rango de visibilidad. Para los sistemas FSO, las incógnitas respecto a la tasa de error de Bit (BER) versus la distancia y de la velocidad de transmisión versus la distancia, surgen frecuentemente.

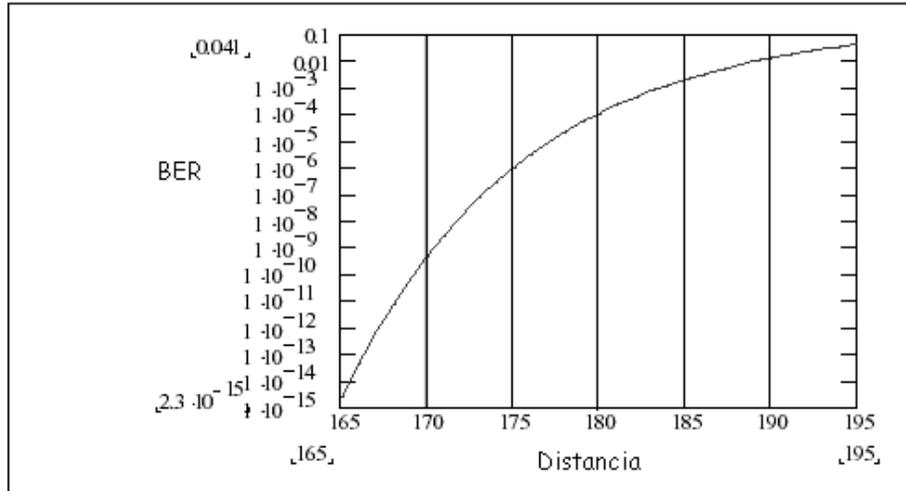
A diferencia de los sistemas de fibra óptica donde el canal es bien conocido y caracterizado, los sistemas FSO tienen varias condiciones de propagación con severa atenuación atmosférica que pueden causar que el BER se comporte de una manera casi binaria.

Debido a que los sistemas FSO en general, bajo las condiciones donde se necesita el mejor desempeño, se comportan ya sea totalmente libres de errores, o bien con demasiados errores cuando se encuentran con severas atenuaciones atmosféricas, no tiene sentido realizar diseños para operar con tasas de error moderadas.

Si se observa la grafica de BER versus distancia para un sistema Giga bit Ethernet de la figura 25, se puede observar que si se disminuyen los requerimientos de BER, de  $10^{-12}$  a  $10^{-6}$  por ejemplo, se logra un aumento en la distancia del enlace de 10 a 15 metros únicamente. Lo mismo se puede observar al analizar el tema de la tasa de transferencia. Si se reduce la velocidad de un enlace de 1Gbit/s a 100 Mbit/s, manteniendo el mismo requerimiento de tasa de error, solo se obtiene la capacidad para extender el enlace 30 metros más.

Para las empresas de telecomunicaciones, el mejor diseño para sistemas FSO es el que lleva a los componentes hasta su límite en términos de velocidad y tasa de error. La reducción de los requerimientos para cualquiera de estos dos factores, no consigue un crecimiento significativo en el desempeño para la distancia del sistema.

Figura 25. BER versus distancia a 1.25 Gbit/s. Fuente: Física de la óptica en el Espacio Libre.



### 3.1.10 Presupuesto del enlace

Uno de los métodos clave para determinar que tan bueno es el desempeño de un enlace FSO, es el cálculo de un presupuesto de enlace. Como mínimo, un presupuesto de enlace es usado para predecir la cantidad de margen o potencia extra, que estará disponible en un enlace bajo cualquier tipo de condiciones operativas. Este margen puede ser integrado con un modelo de atenuación atmosférica para calcular la disponibilidad esperada sobre la base de pérdidas por dispersión y destellos. Típicamente, un presupuesto de enlace FSO incluye entradas de datos para potencia transmitida, sensibilidad del receptor, pérdidas del sistema óptico, pérdidas geométricas, y pérdidas por pérdida de alineación.

La potencia transmitida es la cantidad de energía óptica transmitida por el sistema FSO; sensibilidad de recepción es la cantidad mínima de energía óptica que debe ser recibida por el sistema FSO para determinada tasa de error. Ambas son medidas típicamente como potencia típica o promedio.

Adicionalmente, ambas pueden ser medidas en la apertura del transmisor o el receptor, en los láseres o en los detectores. Si las medidas son tomadas inmediatamente enfrente de los detectores o láser, es necesario incluir las pérdidas del sistema óptico que ocurrirán a medida que la energía óptica pase a través del sistema. Las pérdidas del sistema óptico incluyen dispersión, reflexiones de superficie, absorción, y saturación. Las pérdidas geométricas son las que ocurren debido a la dispersión del haz transmitido en el trayecto entre el transmisor y el receptor. Típicamente, el haz se dispersa a un tamaño mayor que la apertura de recepción y esta saturación de energía es perdida.

En general, las aperturas de recepción grandes y las divergencias de transmisión pequeñas, dan como resultado una menor pérdida geométrica para determinada distancia. La pérdida por desalineación representa la imperfecta alineación del transmisor y receptor y resulta a raíz de que la mayoría de los sistemas FSO transmiten un haz con distribución de potencia Gaussiana y que solo una porción del haz coincide con el receptor.

En general, un sistema es perfectamente alineado cuando el centro de la distribución de potencia Gaussiana se encuentra en el centro del receptor. Si este no es el caso, el receptor no estará colectando la energía de los bordes del haz, donde la intensidad de energía es menor. La pérdida por alineación es causada primordialmente por el movimiento de la base. Los sistemas FSO que incorporan alineación y rastreo automáticos tienen de forma inherente una menor cantidad de pérdidas por desalineación porque se encuentran constantemente ajustándose para conseguir la alineación óptima, pero aun experimentan alguna cantidad de pérdidas debido a que existen limitaciones para los sistemas automáticos de alineación y rastreo para realizar correcciones con todos los tipos de movimiento.

## **3.2 Retos para la tecnología FSO**

Mientras que los cables de fibra óptica y la tecnología FSO comparten muchos atributos, también enfrentan diferentes retos debido a la forma en que se transmite la información. La fibra óptica está sujeta a disturbios externos, la tecnología FSO también está sujeta a sus propios potenciales disturbios externos. Las redes ópticas inalámbricas basadas en tecnología FSO deben ser diseñadas para combatir cambios en la atmósfera que pueden afectar la capacidad de desempeño. Debido a que FSO es una tecnología de línea vista, los puntos de interconexión deben estar libres de obstrucciones físicas y ser capaces de verse entre sí.

Todos los potenciales disturbios pueden ser enfrentados por medio de un profundo y apropiado diseño de la red así como una buena planificación. Dentro de los asuntos a considerarse en el desarrollo de sistemas FSO están:

### **3.2.1 Niebla**

La niebla densa es el reto primordial para las comunicaciones basadas en FSO. La lluvia y la nieve tienen poco efecto en la tecnología FSO, pero la niebla es diferente. La niebla es vapor compuesto por pequeñas gotas de agua, las cuales solo tienen unos pocos cientos de micrones de diámetro pero pueden modificar las características de la luz o bloquear completamente el paso de la luz por medio de una combinación de absorción, dispersión, y reflexión.

La principal respuesta para contrarrestar la niebla cuando se desarrollan productos ópticos inalámbricos basados en FSO es el diseño de redes que acorten las distancias de los enlaces y agreguen redundancias de red.

### **3.2.2 Absorción**

La absorción ocurre cuando las moléculas de agua suspendidas en la atmósfera terrestre extinguen sus fotones. Esto causa un decrecimiento en la densidad de potencia o atenuación en el haz de FSO y afecta directamente la disponibilidad del sistema. La absorción ocurre más fácilmente en unas longitudes de onda que en otras. De cualquier forma, el uso de la potencia apropiada, basada en condiciones atmosféricas, y el uso de la diversidad espacial (múltiples haces dentro de unidad basada en FSO) ayuda a mantener el nivel requerido de disponibilidad de red.

### **3.2.3 Dispersión**

La dispersión es causada cuando las longitudes de onda chocan contra el elemento dispersor. El tamaño del elemento dispersor determina el tipo de dispersión. Cuando el dispersor es más pequeño que la longitud de onda, esto se conoce como dispersión de Rayleigh. Cuando el dispersor es de tamaño comparable a la longitud de onda, se le conoce como dispersión Mie. Cuando el dispersor es mucho más grande que la longitud de onda, se conoce como dispersión no selectiva. En la dispersión a diferencia de la absorción, no existe una pérdida de energía, solo una redistribución direccional de la energía que puede tener una reducción significativa en la intensidad del haz para largas distancias.

### **3.2.4 Obstrucciones físicas**

Pájaros volando o maquinarias de construcción pueden llegar a bloquear temporalmente el haz FSO, pero esto tiende a causar solo pequeñas interrupciones, y las transmisiones son fácilmente y automáticamente restablecidas. Al usar sistemas con haces múltiples (dispersión espacial) se logra enfrentar el problema de las obstrucciones temporales.

### **3.2.5 Estabilidad de la alineación**

Un reto clave para los sistemas FSO es mantener la alineación de los transmisores-receptores. Los *transmisores-receptores* FSO transmiten haces muy delgados y diseccionados que deben llegar a la apertura de recepción del que está ubicado al otro extremo del enlace. Un transmisor-receptor típico de un sistema FSO transmite uno o más haces de luz, cada uno con un diámetro de 5 a 8 cm los cuales se dispersan hasta 1 a 5 metros de diámetro a una distancia de 1 Km. Adicional a este reto está el hecho que los receptores tienen un campo de vista limitado, que puede ser considerado como un “cono de aceptación” y es similar al cono de luz proyectado por el transmisor.

Para que un sistema FSO funcione es muy importante que el haz de luz transmitido y el cono del campo de vista de recepción se acoplen en el transmisor-receptor en el otro extremo del enlace.

### **3.2.6 Balanceo de Edificios**

El movimiento de los edificios puede perjudicar la alineación del receptor y del transmisor. Algunos fabricantes ofrecen un haz divergente para resolver el problema y mantener la conectividad.

El movimiento de los edificios se produce por el viento o por actividades sísmicas. Las tormentas o los terremotos pueden provocar que los edificios se muevan lo suficiente para causar que los equipos pierdan su alineación. El problema puede ser enfrentado con la combinación de dos maneras que se complementan. A través de la divergencia del haz y del rastreo activo. Las técnicas son efectivas. Con la divergencia del haz, la transmisión del haz es intencionalmente habilitada para divergir o expandirse de forma que cuando llega al receptor, forma un cono óptico de tamaño considerable. Dependiendo del diseño del producto, el típico haz de luz FSO se subtiende en un ángulo de 3 a 6 mili radianes y tendrá un diámetro de 3 a 6 metros después de haber viajado un kilómetro. Si el receptor es posicionado inicialmente en el centro del haz, solo la divergencia puede tratar con muchas de las perturbaciones.

Si los dispositivos del enlace están montados en los techos de edificio extremadamente altos o torres. Un sistema de rastreo activo puede ser requerido. Es más sofisticado y costoso que la divergencia de haz. El rastreo activo está basado en espejos móviles que controlan la dirección en la que los haces están siendo lanzados. Un mecanismo de retroalimentación ajusta continuamente los espejos de tal forma que los haces permanecen en su objetivo. Cuando se combina con el rastreo, los sistemas FSO de haces múltiples proveen aun mejor desempeño y simplicidad de instalación.

Estos sistemas de lazo cerrado son valiosos también para enlaces de alta velocidad que se extienden por largas distancias. En esas aplicaciones, la divergencia del haz no es una buena alternativa. Por su propia naturaleza, reduce la potencia del haz precisamente en los casos en que los receptores que son menos sensitivos a velocidades más altas, necesitan toda la potencia que pueden recibir.

El balanceo de los edificios es generalmente referido como movimiento de la base. En la mayoría de las circunstancias el movimiento angular (azimut y elevación), a diferencia de los movimientos lineales, conforma el mayor reto para la alineación de los transmisores receptores. Se puede asignar 3 clases de movimiento de base: frecuencia baja, moderada y alta. El movimiento de base de baja frecuencia es definido como un movimiento de minutos a meses y es dominado por las variaciones de temperaturas del día y de las estaciones. El movimiento de base de frecuencia moderada tiene períodos de segundos e incluye movimiento de edificios debido al viento. EL movimiento de base de alta frecuencia tiene períodos menores a 1 segundo y es referido generalmente como vibración, la cual incluye movimientos inducidos por grandes maquinarias, así como actividad humana.

### **3.2.7 Desviación del haz**

A desviación del haz surge cuando remolinos de turbulencia de mayor tamaño que el diámetro del haz, causan desplazamientos lentos pero grandes del haz transmitido. Esto no ocurre mucho en las ciudades como en los desiertos en distancias muy largas. Cuando ocurre, sin embargo, el haz desviado puede fallar completamente su receptor objetivo. A semejanza del balanceo de los edificios, la desviación del haz está siendo enfrentada por medio del rastreo activo.

### **3.2.8 Destellos**

El aire calentado subiendo de la tierra o de dispositivos hechos por el hombre como ductos de calentamiento crea variaciones de temperatura entre bolsas de aire diferentes.

Esto puede causar fluctuaciones en la amplitud de la señal lo que conlleva a una imagen en movimiento el extremo del receptor FSO.

Algunos fabricantes ofrece contrarrestar este efecto mediante el uso de haces múltiples. El efecto de los destellos es llamado “Turbulencia Refractiva”. Esta causa dos efectos primarios en los haces ópticos.

Los destellos atmosféricos pueden ser considerados como intensidades de luz cambiantes en el tiempo y espacio en el plano de un receptor detectando la señal de un transmisor a cierta distancia. El nivel de la señal recibida en el detector varía debido a los cambios inducidos por la temperatura en el índice de refracción del aire a lo largo de la trayectoria de transmisión. Los cambios en el índice causan que la atmósfera actúe como un grupo de pequeños prismas y lentes que reflectan el haz de luz dentro y fuera de la ruta de transmisión. La escala de tiempo de estas fluctuaciones es aproximadamente el tiempo que le toma a un volumen de aire del tamaño del haz para moverse a lo largo de la ruta del haz por lo que se sabe que está relacionada con la velocidad del viento. Existen muchos documentos teóricos respecto a este efecto, principalmente para aplicaciones de la tierra al espacio, y en general, son bastante complicados.

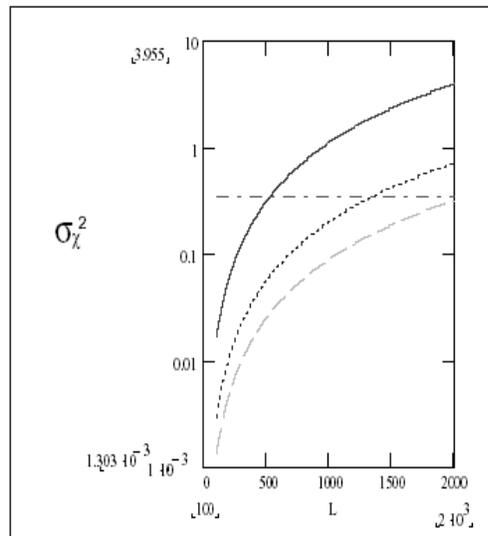
Se ha observado que para fluctuaciones débiles, la distribución de las intensidades recibidas es cercana a un registro de distribución normal. Para el caso de FSO, que implica una ruta de propagación horizontal y por lo tanto un efecto de destellos más fuerte, la distribución tiende a ser más exponencial.

Un parámetro que es frecuentemente usado como medida de la intensidad de los destellos es el parámetro de estructura atmosférica  $C_n^2$ . Este parámetro, que está directamente relacionado con la velocidad del viento, mide que tan turbulenta es la atmósfera. Una característica interesante de los datos colectados al medir este parámetro es que el parámetro cambia en un orden de magnitud en el transcurso del día con las mediciones de mayor destello ocurriendo durante el medio día cuando la temperatura es más alta.

- La variación de  $C_{n^2}$  es interesante porque puede usarse para predecir la varianza en las fluctuaciones de intensidad en el receptor usando la fórmula:

Figura 26. Varianza de la fluctuación de intensidad

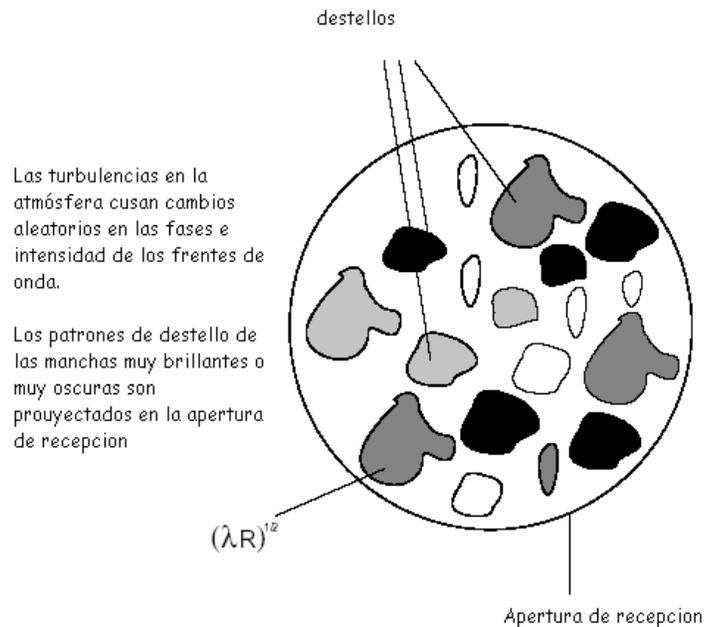
$$\sigma_x^2(C_{nsq}, k, L) := 0.31 \cdot C_{nsq} \cdot k^{\frac{7}{6}} \cdot L^{\frac{11}{6}}$$



La varianza es linealmente proporcional a  $C_{n^2}$  (figura 16) casi proporcional a  $1/\text{longitud de onda}$ , y casi proporcional al cuadrado de la distancia del enlace. De lo anterior se puede inferir que los sistemas de longitud de onda más corta tienen proporcionalmente una mayor varianza en la intensidad de destellos. Por ejemplo un sistema trabajando a 780 nm tiene casi el doble de varianza que uno trabajando a 1550 nm. Se observa que el efecto se incrementa severamente con la distancia. A una distancia del doble, la varianza es 4 veces mayor.

En la siguiente figura se muestran los efectos de los destellos. La figura representa una apertura de receptor con motas oscuras y claras distribuidas aleatoriamente dentro de la apertura. A mayores longitudes de onda, mayores son las motas, Esto no es bueno para el desempeño del sistema debido a que entre menos motas haya en la apertura del receptor, se realizara menos promedio de apertura sobre las diversas intensidades de cada mota. Si la apertura de recepción está detectando solo una mota, por ejemplo, entonces se necesita un gran incremento en la potencia transmitida por el sistema para asegurar que el BER se mantenga incluso para una mota oscura. Por otro lado, el tamaño varía en relación a la raíz cuadrada de la distancia del enlace por lo que enlaces más largos implican motas más grandes.

Figura 27. Efectos de los Destellos



### **3.2.9 Interferencia solar**

Un sistema FSO usa un receptor altamente sensible en combinación con un lente de gran apertura, por lo tanto la luz de fondo natural puede interferir potencialmente con la recepción de la señal FSO. Esto es el caso especialmente de los altos niveles de radiación de fondo asociados con la luz del sol intensa. En algunas circunstancias, la luz solar directa puede causar interrupciones en el enlace por períodos de varios minutos cuando el sol está dentro del campo de vista del receptor. De cualquier modo, los tiempos en los que el receptor es más susceptible a los efectos de la iluminación solar directa pueden ser fácilmente predichos. Cuando la exposición directa del equipo no puede ser evitada, se puede mejorar el desempeño del sistema haciendo más delgado el campo de vista del receptor y / o usando un filtro de luz de ancho de banda estrecho. Es importante recordar que la interferencia solar debida a la reflexión en una superficie de vidrio también es una posibilidad.

## **3.3 Mejoras en sistemas FSO**

### **3.3.1 Rastreo**

Un problema que es debatido entre los diferentes fabricantes de sistemas FSO es la necesidad de tener un sistema de rastreo. La pregunta es si el equipo necesita compensar las pequeñas cantidades de movimiento de baja frecuencia en los edificios, usualmente inducidas por la temperatura, o si es suficiente ampliar más la divergencia del haz transmitido a un tamaño suficiente para abarcar todas las amplitudes de movimientos posibles para los edificios. En base a la ecuación del enlace se puede observar que el ampliar la divergencia del haz impacta en el margen del enlace en relación al inverso cuadrado de la cantidad que se amplía.

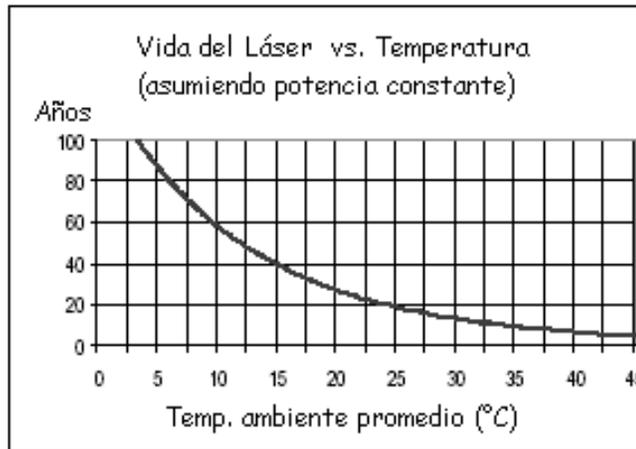
En otras palabras, cada vez que se duplica la divergencia del haz, se impacta negativamente el margen del enlace en 6 dB. Adicionalmente, aun si el haz es ampliado lo suficiente para acomodarse a los movimientos del edificio, el margen del sistema completo fluctuara negativamente o se degradara debido a que por diseño, la alineación precisa de los sistemas FSO no se conseguirá todo el tiempo y con todas las temperaturas.

### **3.3.2 Control de potencia y temperatura**

La confiabilidad del láser es un tema para los sistemas FSO con características de empresa portadora de datos que debe tener un tiempo medio entre fallas (MTBF) de 8 años o más. Hay básicamente dos factores que influyen la vida útil de un láser de diodo semiconductor: la temperatura de operación promedio del contenedor del diodo, y la potencia óptica de salida promedio del diodo.

Para láser de Arseniuro de Galio-Aluminio AlGaAs, la energía de activación es de alrededor de 0.65 eV, lo que implica que la vida útil del diodo se incrementa por casi un factor de 2 por cada disminución de 10°C en la temperatura promedio de operación del contenedor del diodo (figura 28). Para equipos de exteriores la regla general para la mayoría de lugares en el mundo, es que una temperatura promedio de 25 – 30 °C puede ser usada para predecir lo efectos térmicos en la vida útil.

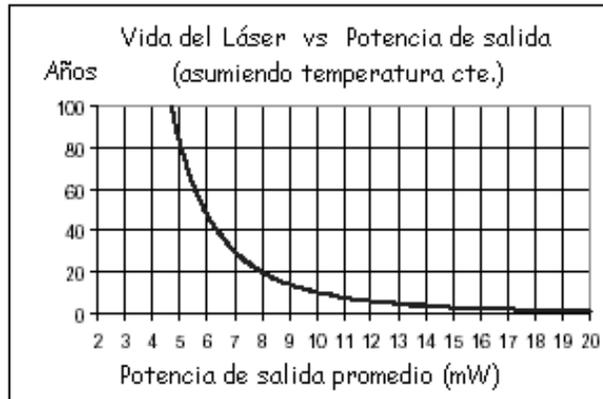
Figura 28. Vida útil del laser en función de la temperatura



Fuente: Bloom, Scott. Física de la Óptica en Espacio Libre, página 21

Más importante que los efectos térmicos es la potencia promedio de salida del láser. En este caso la vida útil varía inversamente con el inverso del cubo de la potencia (figura 29). Esto significa que incrementos significativos en la vida útil pueden obtenerse en sistemas que usan un control automático de la potencia de salida del láser debido a que la mayoría del tiempo, un determinado enlace transmite a través del espacio despejado y la potencia de salida puede disminuirse substancialmente. Es de notar que se hace una distinción entre el control automático de la potencia de salida del láser y la atenuación de potencia usando un filtro, lo cual no conlleva las mismas ventajas para la vida del láser.

Figura 29. Vida Útil del laser en función de la potencia



Fuente: Bloom, Scott. Física de la Óptica en Espacio Libre, página 21

### 3.3.3 Seguridad para la vista

La seguridad para la vista también es una preocupación entre los grandes proveedores de servicios. Existen dos clases primarias de seguridad que los fabricantes de tecnología FSO usan. Clase 1 y clase 1M. Básicamente, la clase 1 certifica que el haz puede ser visto bajo cualquier condición excepto por medio de un dispositivo de ayuda visual, tal como unos binoculares o cualquier otro instrumento óptico. En términos de la longitud de onda, los reglamentos IEC60825 permiten que los dispositivos de 1550 nm entreguen 50 veces el nivel de flujo de los dispositivos cercanos al infra rojo como los láseres de 780 nm. Mientras esto puede ser una ventaja, los detectores de 1550 nm son más ruidosos, entonces, a nivel de sistema, aunque existe una leve ventaja para el margen del enlace, es usualmente a un incremento substancial en el costo, especialmente en sistemas de grado de portador de datos donde la atmósfera es la variable limitante en la ecuación del enlace.

## 4. PANORAMA DE FSO EN GUATEMALA

### 4.1 Posibles usuarios de un enlace FSO

Al hablar del mercado empresarial, es importante definir quién está incluido. Luego especificar cuáles son las necesidades, porque se deben llenar esas necesidades y finalmente, usar el tiempo necesario para definir como se hará, o las diferentes alternativas para llenar esas necesidades. El mercado empresarial está formado por negocios y organizaciones de todos los tamaños, estructuras y modos de operación. Existen algunos pocos calificativos claves que caracterizan a los posibles usuarios para un enlace FSO:

- Dos o más sitios con una distancia no mayor a 3 o 4 kilómetros entre sí, con una línea vista despejada.
- Necesidad de más de 1 Mbps de conectividad.
- acceso a sitios de montaje apropiados.

Las necesidades de conectividad empresarial, son generalmente satisfechas con enlaces de 10 a 100 Mbps. El asunto es que una vez excedidos los 100 Mbps, en la fibra terrestre es mucho más fácil justificar los costos de velocidades Giga que de 10 o hasta 100 Mbps. El concepto es simple, la fibra de 10 Mbps cuesta lo mismo que la de 1000 Mbps. Por lo tanto en términos de Costo/Mbps, la fibra es más cara a 10 Mbps y más barata a 1000 Mbps. Debido a que las empresas portadoras de datos y las grandes compañías deben usar cada vez velocidades más altas, ellos se deciden por la fibra. Las pequeñas y medianas empresas, son frecuentemente complacidas con 100 Mbps o menos, y tienen menos disponibilidad de presupuesto para velocidades Giga y fibra terrestre, por lo que se inclinan por Fast Ethernet y son mejores prospectos para el uso de FSO.

En Guatemala, las necesidades de la mayoría de las empresas aun pueden ser cubiertas de algún modo con anchos de banda, menores a los 10 Mbps para el caso de redes WAN y de 100 Mbps para el caso de extensión de redes LAN. A medida que los requerimientos crecen y la utilización de las redes corporativas se expande, la necesidad de conectar con gran ancho de banda sectores que están fuera de la red, se incrementa. Como en muchos otros lugares, en Guatemala, la tecnología FSO podría ser aplicable en enlaces para comunicar edificios dentro de las instalaciones de compañías industriales, fabricas, hospitales, colegios, universidades y el aeropuerto.

Entre las opciones disponibles para las empresas para conectar de un punto A a B están:

- Acceso Discado (*Dialup*)
- Red digital de Servicios Integrados ISDN (*Integrates services DigitalNetwork*)
- Telco “Líneas Privadas” (T1, DS3, OC3, OC12, etc.)
- Retransmisión de tramas (*Frame Relay*)
- Fibra Propia
- Fibra oscura
- Proveedores de Acceso Alternos
- Línea de suscriptor digital (DSL)
- Satélite
- Radio frecuencia
- FSO

Y las alternativas se incrementan cada día. Banda ultra ancha, la nueva Radio Frecuencia sin línea vista, microonda milimétrica, celular 3G, etc.

Las guías para la mayoría de las decisiones empresariales son: costo, disponibilidad y simplicidad. Es cierto que la redundancia integrada es una pieza clave que le hace falta a FSO para competir exitosamente en el mercado empresarial. Debido a su bajo costo se podría usar RF para tal propósito.

Entre las razones por las que las empresas buscan conexiones de alta velocidad se encuentran más comúnmente las extensiones de redes de área local y /o extensión de telefonía IP debido a la expansión de sobre flujo hacia un nuevo sitio.

En Guatemala, se tiene un panorama particular para esta tecnología debido a que los sectores industriales y empresariales se encuentran relativamente centralizados en ciertas zonas en las que ya todas las empresas de telecomunicaciones tienen presencia con la infraestructura necesaria, por lo que implica menos costos el adquirir un enlace punto a punto a través de la red de alguna de estas empresas.

Adicionalmente, las empresas de telecomunicaciones no se han visto hasta la fecha bajo restricciones respecto a la forma en que deben construir sus redes. Con esto se hace referencia a que pueden expandir su red para llevar servicios hasta determinado punto sin la necesidad de realizar excavaciones para tender fibra en ductos, con lo cual se deja sin efecto posiblemente la principal ventaja de FSO respecto a los enlaces de fibra. Una gran parte de los servicios de telecomunicaciones, ya sean de cobre o fibra óptica, son instalados de forma aérea por medio de postes en la vía pública y/o complejos industriales o residenciales.

Es muy común en Guatemala que si una empresa se ve en la necesidad de establecer conectividad entre dos puntos ubicados a unas pocas calles o algunos cientos de metros, se decidan por la contratación de un enlace de fibra oscura, el cual consiste en un servicio que proveen las empresas de telecomunicaciones en el cual rentan únicamente el medio de transmisión sin tener ninguna intervención en cuanto al proceso de transmisión y recepción ni en cuanto a la gestión del servicio. La fibra propia también es una opción pero no es muy factible que sea la elección debido a que de cualquier forma necesitarían la contratación de una empresa para la instalación y para el soporte de mantenimiento ante posibles cortes. En todo caso el tiempo de respuesta de una empresa contratada para solución de eventualidades no es de esperar que sea muy bueno.

Debido a que las empresas que fabrican los productos FSO no tienen presencia directa en Guatemala ni un distribuidor oficial, los usuarios que podrían estar interesados en usar esta tecnología se ven sin el respaldo que desearían para realizar una inversión en un sistema de este tipo. Las empresas de telecomunicaciones actualmente se enfocan mas a entregar servicios para enlazar redes WAN que para extensión de redes LAN. Esto debido posiblemente a que en los servicios que actualmente se entregan, se hace necesario el paso por la red del proveedor, logrando así ofrecer también el servicio de gestión y monitoreo del enlace, por lo cual también obtienen ingresos. Por otro lado, en estos servicios, el equipo terminal o CPE (*Customer Premises Equipment*) es instalado en las oficinas del cliente pero sigue siendo propiedad de la empresa de telecomunicaciones, lo cual disminuye el costo inicial de los enlaces debido a que el usuario no tiene que pagar aparentemente por adquirir el equipo aunque dentro de la cuota mensual, si está pagando por el derecho de tenerlo.

Para la aplicación que se presenta en este trabajo, la tendencia sería a que los usuarios adquieran los equipos FSO como parte del costo total del sistema debido a que estos estarían formando parte de su red interna.

Las empresas interesadas en ofrecer el montaje de este tipo de sistemas tienen la opción de obtener ganancias en la venta del producto, la instalación y desarrollo del sistema, así como un posible contrato de soporte y mantenimiento para posibles eventualidades y/o modificaciones que quisieran realizar los usuarios con el transcurso del tiempo.

De lo anterior, se percibe que las necesidades que hasta la fecha han tenido las empresas en Guatemala, no han sido tan amplias como para iniciar una demanda sólida en el mercado para este tipo de tecnología. Aun así, en los casos en que se pudieran surgir proyectos con el perfil adecuado para utilizar FSO, lo más probable es que se use fibra, ya sea por el hecho de que en nuestro medio no es tan complejo el proceso de instalación de la misma, o porque es un sistema muy conocido y de eficiencia comprobada.

## **4.2 Disponibilidad de servicio de las empresas de telecomunicaciones**

Actualmente la mayoría de las empresas de telecomunicaciones en Guatemala ofrecen dentro de sus servicios corporativos los enlaces punto a punto para conectar dos o más puntos a nivel metropolitano, nacional o internacional por medio de transmisión por cobre, fibra óptica, e inalámbrica. No presentan opciones a los usuarios para situaciones tales como la expansión de una red LAN como tal, aunque en la práctica muchos de los servicios que entregan con protocolo Ethernet son eso básicamente, si se trata de algún enlace entre dos oficinas ubicadas en el mismo sector de la ciudad.

Existe otro segmento de empresas en el país que se enfoca más hacia el diseño y soporte de las redes LAN y WAN que son usadas dentro de las corporaciones industriales y comerciales, entidades educativas, etc. Estas empresas ofrecen dentro de sus servicios, el diseño y análisis de redes, configuración y actualización de equipos, mediciones y estudios de redes, estudios e implementaciones de redes inalámbricas, análisis de los sistemas eléctricos y de protección, contratos de mantenimiento y soporte, etc. Adicionalmente pueden cumplir con la función de asesoría para buscar alternativas y soluciones apropiadas para las necesidades de comunicación de sus clientes.

Es en este punto donde se puede presentar formalmente la tecnología FSO como una alternativa a los posibles usuarios en Guatemala. De hecho, se tiene referencia de que al menos una de estas empresas, ya ha desarrollado en su momento, proyectos utilizando esta tecnología y la ha contemplado como una de las alternativas para ofrecer a sus clientes. Sin embargo la aceptación no fue tan buena y no se popularizó, lo cual no permitió un incremento en la demanda de estos sistemas. Esto pudo darse de ese modo debido a que en ese momento los precios con que se podía ofrecer el producto eran demasiado elevados para nuestro medio, agregado a que en nuestras ciudades el costo de la instalación de fibra no es tan grande puesto que no existe la obligación de realizar excavaciones para instalarla de forma subterránea. Es necesario tener siempre presente que la inversión que se realizará deberá estar de acuerdo con las necesidades que se tienen. No tiene ninguna utilidad una inversión de varios miles de dólares en un sistema de gran capacidad, alta disponibilidad, fácil instalación, entre otras ventajas, si lo que se necesita es una capacidad menor y sin expectativas de crecimiento. Es decir que se puede cumplir con lo que se necesita a un costo mucho menor.

Por otro lado, las empresas del sector telecomunicaciones existentes en el mercado guatemalteco, tienen las capacidades necesarias para desarrollar, implementar y brindar mantenimiento y soporte a sistemas FSO tal y como lo hacen otras empresas en diferentes lugares del mundo.

Con la capacitación ofrecida por los fabricantes, se podría ofrecer los siguientes servicios:

- Estudio de factibilidad del enlace
- Implementación
- Soporte para posibles cambios e incrementos en la capacidad del sistema
- Ajustes en la alineación por posibles movimientos debido al viento, al oscilación de los edificios, o a alguna otra eventualidad.
- Soporte en el diagnóstico de fallas por medio de conexión remota a una terminal dentro de la red del cliente.
- Contrato de soporte y mantenimiento abarcando las 24 horas los 7 días de la semana durante todo el año. Lo cual ya es parte de los servicios que ofrecen todas las compañías de telecomunicaciones y que los fabricantes de los productos FSO también ofrecen a sus clientes y empresas asociadas.

### **4.3 Posibilidades de crecimiento**

Con la gran cantidad de tecnologías que compiten en la actualidad, cuales son las características que justifican la permanencia de FSO en el mercado empresarial en otros países alrededor del mundo tales como Canadá, Estados Unidos, México, España, Inglaterra, Colombia, Argentina, Australia, Nueva Zelanda, etc.

A continuación se describen algunas de estas características y que a su vez son las que podrían llegar en determinado momento a propiciar que se popularice el uso de sistemas FSO.

#### **4.3.1 Funcionalidad**

Las tecnologías que están presentes en cualquier enlace FSO son el secreto para su éxito. Se puede ver de esta manera: un simple convertidor de medio 100BTX/100BFX contiene todas las tecnologías que residen en un transmisor-receptor (*transceiver*) FSO a excepción de una. Tiene una interfaz de red para comunicarse con la LAN, una luz capaz de generar pulsos de luz que representen 0's y 1's , y una fuente de poder. Lo único que falta son los telescopios necesarios para enfocar la luz entrante y saliente.

El punto es que FSO no es una ciencia espacial y no incorpora nada que no pueda ser provisto a un costo bajo, una vez que los proveedores destinados a hacerlo pasen por la etapa de desarrollo y alcancen las apropiadas escalas de operaciones.

#### **4.3.2 Velocidad**

En cuanto a velocidad, FSO podría considerarse el líder de los servicios inalámbricos. Debido a la modulación por amplitud FSO, y al potencial para trabajar con DWDM, las oportunidades son muy grandes.

Mientras las soluciones de Radio Frecuencia disponibles se limitan a 420 Mbps, los enlaces FSO de 2.5 Gbps se encuentran operando actualmente, y se tiene ya en camino la disponibilidad de enlaces de 10 Gbps. La ventaja de esto está en función de que los posibles usuarios tengan una verdadera necesidad de estas grandes velocidades de transmisión.

### **4.3.3 Protocolos**

Como reemplazo para la fibra óptica, la independencia de protocolo de algunos modelos FSO o la capacidad multiprotocolo es un valor que se adjunta en las características de simplicidad.

La mayoría de los productos de Radio Frecuencia son únicamente Ethernet. Lo mismo aplica para los Telco's. Los requerimientos para los equipos locales en instalaciones del cliente, pueden agregar sustanciales costos no recurrentes. Dicho esto, la gran mayoría de los enlaces en las empresas son desplegados como FastEthernet, y por lo tanto, en el ámbito empresarial, la independencia de protocolo es un buen atributo, pero no es necesario en la mayoría de las implementaciones.

### **4.3.4 Despliegue**

La simplicidad de despliegue puede ser una gran ventaja para FSO en el Mercado empresarial y permitir acceso efectivo al canal por medio de la distribución. Aproximadamente existe un empate con los enlaces Radio Frecuencia para enlaces de la misma distancia. La simplicidad de instalación aun puede ser mejorada grandemente por los equipos FSO y esta es una fortaleza potencial que necesita ser totalmente explotada para maximizar la penetración en el mercado. A menudo, la decisión de ocupar un nuevo local o sitio se realiza solo unas semanas o días antes del momento del movimiento o traslado. Por lo anterior, el rápido despliegue del sistema FSO se convierte en un factor importante para la decisión.

Una fortaleza de FSO es que podría ser hecho auto instalable, pero aun no se ha llegado a ese punto. Para capturar el espacio del mercado, la fácil autoinstalabilidad es necesaria. Características como adquisición automática de objetivo, sistema de apuntamiento activo, herramientas de retroalimentación mejoradas en el tablero, y transmisores-receptores más pequeños y de menor peso, son datos importantes para considerar. Cualquier equipo de montaje que toma más de 60 segundos para ensamblarse se encuentra fuera de las necesidades actuales. En producción a volumen, estas características no son costosas y pueden permitir la distribución efectiva de canal.

#### **4.3.5 Rentabilidad**

Los bajos costos de instalación y la no necesidad de arrendamientos de infraestructuras a terceros, pueden proporcionar grandes ventajas a nivel financiero para quien instala FSO en su red ya que el retorno de la inversión es mucho más rápido y seguro. Adicionalmente, los bajos tiempos de instalación ( aprox 1 ½ hora ) permiten a quienes utilizan FSO ahorrar dinero representado en personal, desplazamientos, parque automotor, etc.

Es fácilmente actualizable, y su interfaz abierta soporta equipos de varios fabricantes, lo que ayuda a las compañías e ISP's a proteger su inversión generando convergencias rápidas y estables.

#### **4.3.6 Protección de la inversión**

El diseño modular de transmisión inalámbrica que permite FSO significa que todo el equipo se puede fácilmente actualizar para el mayor ancho de banda o distancia. (Sujeto a especificaciones técnicas). No requiere de actualizaciones del software de seguridad.

#### **4.3.7 Otros aspectos que pueden propiciar el crecimiento**

La aparición de nuevas tecnologías como *Wi-Fi* supone a constantes revoluciones en el campo de las comunicaciones de empresa (IT). Sin embargo cuando el responsable de comunicaciones de una gran empresa u organismo público se encuentra ante la situación de conectar dos sedes con más de cien puestos de trabajo ( voz y datos ) además de compartir la tele vigilancia se da cuenta que *WiFi* no es la solución más apropiada. Se necesita una solución de mayor ancho de banda, y que sin embargo sea tan rápida de implementar y eficaz como los equipos *Wi-Fi*.

Aunque parezca una contradicción, la aparición de las redes inalámbricas, su gran competidor, ha sido de gran ayuda para su crecimiento, ya que por un lado han creado una serie de expectativas o necesidades que no han sido capaces de cubrir y por otro lado han obligado a los fabricantes de sistemas ópticos a dar un salto cualitativo y una reducción de precios de más de un 60%.

La ventaja que supone para un sistema inalámbrico la utilización de bandas de uso común (2.4 ó 5.4 Ghz) es a su vez uno de sus puntos débiles, ya que afecta directamente a la seguridad e integridad de los datos (nivel de interferencia saturación de espectro o hackers). Sin embargo, un sistema FSO tampoco requiere licencia para su utilización y es totalmente inmune a interferencias radioeléctricas o electromagnéticas. Por su directividad, la seguridad en la transmisión (tanto desde el punto de de la integridad de los datos como desde el punto de vista de la salud de los usuarios) es total.

Únicamente otro cabezal o transmisor-receptor FSO situado en mitad de determinado enlace, sería capaz de interceptar la señal, situación a que resulta imposible, al notar que el hecho de colocar un terminal en dicho enlace, llevaría consigo la caída de este, y la más mínima revisión alertaría a los usuarios. Es probable que enumerar todas estas ventajas técnicas no fuesen una razón suficiente para considerar los sistemas FSO como solución viable si no añadiésemos que hoy en día es posible enlazar dos oficinas a 155 Mbps por poco más de \$10,000.00.

#### 4.4 Retorno de inversión

Es una medida de desempeño usada para evaluar la eficiencia de una inversión o para comparar la eficiencia de determinado número de inversiones. Para calcular el ROI (*Return on investment*), el beneficio o ganancia de una inversión es dividida dentro del costo de la inversión; el resultado es expresado como un porcentaje o proporción.

$$\text{ROI} = \frac{(\text{Ganancia de la Inversion} - \text{Costo de la Inversion})}{\text{Costo de la Inversion}}$$

El retorno de inversión es una métrica muy popular debido a su versatilidad y simplicidad. Si una inversión no tiene un ROI positivo o si existen otras posibilidades con un ROI más alto, entonces la inversión no debe ser realizada.

Debe tenerse en mente que el cálculo del retorno de inversión puede ser modificado para ajustarse a determinada situación. Todo depende de lo que se incluya como retorno y costos. El término en el sentido más amplio solo trata de medir lo apropiado de una inversión y por lo tanto no existe un único cálculo correcto.

Por ejemplo, un mercadólogo puede comparar dos productos diferentes al dividir las ganancias que cada producto a generado dentro de sus respectivos costos. Un analista financiero, sin embargo, podría comparar los mismos dos productos usando un cálculo de ROI completamente diferente, probablemente dividiendo los ingresos netos de una inversión dentro del valor total de todos los recursos que se han empleado para hacer y vender el producto. Esta flexibilidad tiene una desventaja, los cálculos de ROI pueden llegar a ser manipulados fácilmente para ajustarse a los propósitos del usuario y el resultado puede ser expresado en muchas formas diferentes. Al usar esta métrica, se debe asegurar de que se entiende que datos se están usando como entrada.

Tradicionalmente, cuando los profesionales de la tecnología de la información y las altas gerencias discuten respecto al retorno de inversión de una inversión IT, estaban pensando principalmente en los beneficios financieros. Actualmente, los líderes empresariales y los tecnólogos también consideran los beneficios no financieros de las inversiones IT.

Los beneficios financieros incluyen impactos en el presupuesto y finanzas de la organización tales como reducción de costos e incrementos de ingresos. Los beneficios no financieros incluyen impactos en el desempeño y resultados de las operaciones o misión. La valoración de una inversión en productos tecnológicos implica el análisis de factores que van más allá de los aspectos meramente económicos, debido a que en numerosas ocasiones la implantación de una tecnología conlleva cambios en los procesos y maneras de operar que dan lugar a nuevas capacidades. Así, la valoración debe abarcar aspectos relacionados con la estructura organizativa de la empresa, la capacitación de la mano de obra, los costes de cambio de pasar de un sistema a otro, etc.

#### **4.4.1 Beneficios que deben medirse**

Normalmente, los estudios sobre el retorno de una inversión en tecnología hacen referencia a los beneficios económicos, como la reducción de los costes. Los beneficios comúnmente incluidos en el análisis son el ahorro en mano de obra (debido a la automatización de los procesos); el ahorro en gasto de capital; las ganancias en productividad del usuario (reducciones del “tiempo muerto” del sistema o aumentos de la eficacia en la ejecución de tareas específicas); y el incremento de ingresos debido a mayores ventas.

Sin embargo, es necesario considerar las ventajas intangibles generadas por las nuevas tecnologías, como el impacto en los resultados y el desempeño operativo. Algunos ejemplos son la mejora de la satisfacción del cliente, una mayor disponibilidad y accesibilidad de la información, reducciones de tiempo, etc.

#### **4.4.2 Costos**

Los costos de capital de las inversiones en tecnología son fáciles de identificar y están relacionados con los costes de hardware, software, herramientas de desarrollo; sin embargo existen una serie de costos cuya consideración está sujeta a interpretaciones de los tomadores de decisión, como por ejemplo los costos de mantenimiento o los de formación del personal. Varios estudios han demostrado que estos costes tienen un peso importante sobre el total de la inversión, y pese a las posibles discrecionalidades en la decisión, estos costes suelen tener impactos tangibles sobre los resultados de la empresa. Por ello, es importante estimar cuan tangibles son estos resultados.

Un enlace FSO según lo indican los fabricantes, puede ser obtenido e instalado hasta por una décima parte del costo de tender un cable de fibra y hasta por la mitad del costo de un sistema inalámbrico de microondas o Radio Frecuencia. Al transmitir los datos a través de la atmósfera, los sistemas FSO se deshacen de los costos sustanciales de excavar en calles y banquetas para instalar un enlace de fibra, lo cual como se ha planteado anteriormente, no es un estándar de instalación en nuestro medio, con lo que se anula esta ventaja ofrecida por FSO.

A diferencia de las tecnologías inalámbricas, con FSO se elimina la necesidad de obtener costosas licencias del espectro o cumplir con requerimientos regulatorios más drásticos.

El precio de los productos puede variar entre 2,000 y 51,000 dólares según las distancias a cubrir, la capacidad requerida en el enlace y las características especiales que se elijan para mejorar el desempeño como lo son la operación con múltiples láser y los sistemas de auto rastreo para mantener la alineación entre los equipos terminales. En la tabla 3 se muestran algunos costos de referencia según requerimientos de ancho de banda y de distancias.

Tabla III. Costos de equipos FSO para diferentes requerimientos

<b>FSO- Tabla de Costos para presupuestos</b>					
Ancho de Banda Full Duplex	20-200m	200-500m	500-1000m	1000-2000m	2000/4000m
10Mbps	\$2,000	\$5,000	\$5,000	\$9,000	\$13,000
100Mbps	\$5,000	\$6,000	\$10,000	\$10,000	\$25,000
155Mbps	\$4,000	\$7,000	\$10,000	\$18,000	\$30,000
1.25Gbps	\$12,000	\$15,000	\$20,000 - \$28,000	\$30,000 - \$55,000	\$70,000

Fuente: Sistemas Pacific Datacom

Los costos típicos de instalación para cableado, montaje, energía, alineación y pruebas se pueden encontrar dentro del rango de los \$2500 a los \$6000 dependiendo de los requerimientos específicos.

#### **4.4.3 Medidas utilizadas para cuantificar la rentabilidad de las inversiones en tecnología**

La naturaleza de las inversiones en tecnología impide contar con una metodología única para su valoración. Sin embargo, todo proyecto de inversión debe contar con alguna justificación financiera. Existe un amplio número de medidas financieras que pueden ser utilizadas para este fin. Las más comúnmente utilizadas son el Retorno de la Inversión (ROI), que se define como el ratio entre ingreso neto y costos; el Valor Presente Neto (VPN), es decir, el valor actual de la diferencia entre ingresos y gastos del proyecto; la Tasa Interna de Retorno (TIR), que es la tasa que hace que el VPN sea igual a cero; el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI), que es el tiempo necesario para que el proyecto recupere el capital invertido; y el Coste Total de Propiedad (TCO), que se define como el costo promedio de propiedad sobre un período de tiempo (por lo general de tres a cinco años) sin considerar los beneficios de posesión o uso de activos.

Los problemas de medición de la rentabilidad de las inversiones en la tecnología de la información y la comunicación provienen de dos aspectos: el periodo de espera necesario para percibir el retorno de la inversión y la medición de beneficios y costos.

La forma de financiación dependerá del tiempo que tarda en generar retornos, que varía dependiendo de su naturaleza y del grado de absorción de las nuevas tecnologías por parte de la empresa.

Generalmente, los beneficios de la inversión tecnológica llegan a los dos o tres años. Errores al reconocer este periodo de espera pueden conducir a una toma de decisiones errónea y, en ocasiones, a sub invertir en TIC.

Por otro lado, a diferencia de los costes de inversión, más fáciles de cuantificar, el cálculo de los beneficios no es sencillo: las inversiones en tecnología generan tanto beneficios tangibles como intangibles. Además, dado que el uso de tecnología se aplica a todos los procesos de negocio, resulta difícil separar los beneficios procedentes de una inversión específica en TIC de aquellos que se derivan de otras inversiones.

Para determinar una decisión de inversión, una empresa utiliza el valor presente neto (VPN) del ingreso futuro proveniente de la inversión. Para calcularlo, la empresa utiliza el valor presente descontado (VPD) del flujo de rendimientos netos (futuros ingresos del proyecto) tomando en cuenta una tasa de interés, y lo compara contra la inversión realizada. Si el valor presente descontado es mayor que la inversión, el valor presente neto será positivo y la empresa aceptará el proyecto; si el valor presente descontado fuera menor que la inversión la empresa lo rechazaría.

El procedimiento técnico para computar el valor actual de una empresa es semejante al que se emplea para computar el valor actual de una inversión en bonos u obligaciones. Los factores que deben emplearse al computar el valor actual de una empresa son:

- 1.- Importe de las actividades futuras.
- 2.- Tiempo o fecha de las actividades futuras.
- 3.- Importe de los desembolsos futuros.
- 4.- Tiempo o fecha de los desembolsos futuros.
- 5.- Tasa de descuento.

Los administradores computan el valor actual descontado para evaluar los proyectos de operaciones dentro de la empresa y las posibles compras de otras empresas. En ciertos casos, el cálculo puede servir para valorar equipos especiales, aunque solamente cuando la ganancia prevista provenga de ellos y pueda determinarse y medirse en dinero.

El valor presente neto es el valor actual de los flujos de caja netos menos la inversión inicial. Podemos decir que la fórmula de valor presente se puede escribir como:

$$X = C1 / (1 + r)$$

Donde C1 es el flujo de efectivo en la fecha 1 y r es la tasa de interés apropiada.

Una empresa con la necesidad de conectar a una velocidad de 10 Mbps dos oficinas ubicadas en diferentes edificios a una distancia aproximada de 100 metros puede lograr el objetivo con un enlace FSO a un costo aproximado de \$6000.00. Para lograr el mismo fin podría contratar 6 servicios T1 concatenados para alcanzar el ancho de banda requerido lo cual representaría un costo aproximado mensual de \$6000.00 lo cual es mucho más elevado al considerar que la opción anterior consistía de un monto único.

Por otro lado podría optar también por contratar un servicio de fibra oscura a un costo inicial de \$1500.00 por la instalación de la fibra y la compra de los equipos de transmisión-recepción, mas una cuota mensual de \$200.00 por la renta de la fibra. Esto conllevaría a un costo de \$3900.00 el primer año y de \$ 2400.00 por cada año adicional, lo cual puede resultar desfavorable si el contrato se hace por varios años.

La ventaja de esta última opción estaría en que, si las necesidades del usuario lo ameritan, puede adquirir equipos nuevos y utilizar el enlace a una capacidad mucho mayor a los 10 Mbps sin que su cuota mensual sufra ningún aumento.

Si se toma de ejemplo este caso, se puede usar como un beneficio cuantificable, la cuota mensual que se dejaría de pagar a la empresa proveedora con lo cual se estaría obteniendo un retorno de inversión en un tiempo de 2.5 años. Si se a este cálculo se agrega cierta proporción de los beneficios o ganancias totales que se generan en la empresa, el periodo de tiempo para lograr obtener el retorno de inversión puede llegar a reducirse hasta un año, lo cual es lo que plantean las empresas que actualmente promueven el uso de los sistemas FSO.

### **Tasa interna de retorno (TIR)**

El Valor presente neto estima el valor actual de los retornos que vengan en el futuro menos el costo de la inversión. Si el resultado del VPN es menor que el costo, entonces la inversión no parece conducir a una ganancia neta.

El cálculo de la tasa interna de retorno conduce al mismo tipo de resultado por una ruta diferente. Usando la misma información básica que el cálculo del valor presente neto, el cálculo de la Tasa Interna de retorno produce la tasa de retorno de la inversión asumiendo un negocio sin pérdidas ni ganancias o un valor presente neto igual a cero, lo que corresponde al punto de equilibrio. Si la tasa interna de retorno es menor que la tasa actual de interés, esto indica que poner la inversión en una cuenta bancaria dejaría una recompensa mayor que la inversión en el proyecto.

Si se toma el mismo caso expuesto anteriormente para realizar el cálculo de la tasa interna de retorno para un periodo de 4 años tenemos los resultados de la tabla IV.

Tabla IV. Tasa Interna de Retorno

<b>Año</b>	<b>Costos</b>	<b>Retornos</b>
1	\$ 6000.00	\$ 2,400.00
2		\$ 2,400.00
3		\$ 2,400.00
4		\$ 2,400.00
Total	\$ 6,000.00	\$ 12,000.00
Tasa Interna de Retorno		<b>22.0%</b>

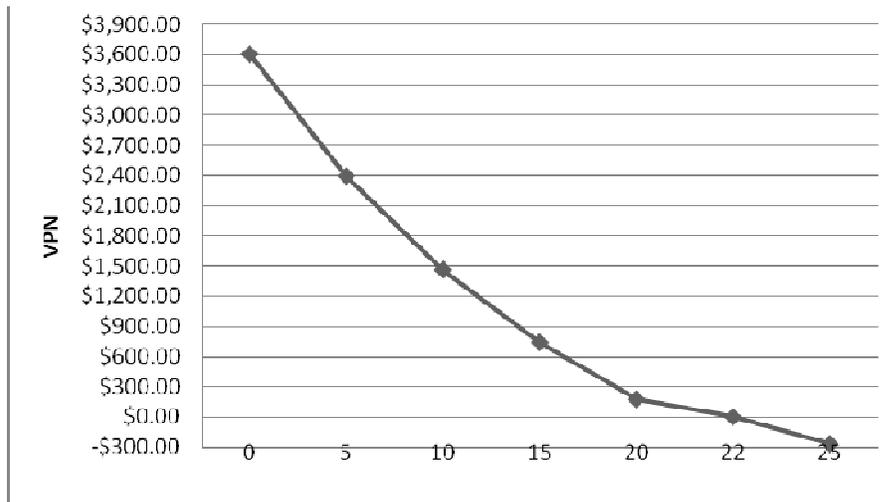
Si la inversión a realizar tiene una tasa de descuento mayor al 22 %, entonces dicha inversión no es favorable.

La mejor manera de dar a conocer la relación que existe entre el valor presente neto y la tasa interna de retorno es mediante un grafico en el cual se utilicen los datos usados anteriormente. Los valores del VPN se colocan en el eje vertical, mientras que los de la tasa interna de retorno se colocan en el eje horizontal. En la tabla V se presentan diferentes valores de tasas de descuento y el correspondiente Valor Presente Neto.

Tabla V. Cálculos de valor presente neto

Tasa de Descuento (%)	VPN
0	\$3,600.00
5	\$2,390.74
10	\$1,461.52
15	\$740.82
20	\$177.47
22	\$0.00
25	-\$265.73

Figura 30. Valor presente neto vrs. tasa de descuento



Como se puede observar en la gráfica, cada vez que aumenta la tasa de descuento, el valor presente disminuye. En el punto donde el valor presente neto corta al eje "x" se encuentra la TIR. En este caso cuando la tasa sea mayor que 22, no es favorable realizar la inversión debido que el VPN es negativo.

Las reglas de la tasa interna de retorno y del valor presente neto conducen a decisiones idénticas, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones. La primera, los flujos de efectivo de el proyecto deben ser convencionales, por lo que el primer flujo de efectivo (inversión inicial) será negativo, después los demás serán positivos. La segunda, el proyecto debe ser independiente, lo que significa que la decisión de aceptar o no este proyecto, no influya en la decisión que se vaya a tomar en cualquier otro proyecto.

### **Punto de equilibrio**

El Punto de Equilibrio, Punto de Ruptura o Punto de Quiebra es el punto donde el importe de las ventas netas o ingresos generados por determinado proyecto, absorbe los costos variable y los costos fijos, es decir, es el momento económico donde se produce un equilibrio entre los ingresos y los costos totales, en ese punto se ha dejado de tener pérdida y no se ha empezado a tener beneficios. En nuestro caso, el punto de equilibrio se alcanza luego de 30 meses asumiendo como ingresos o beneficios únicamente el costo mensual que se deja de hacer en la renta de un enlace con una empresa externa.

## CONCLUSIONES

1. FSO utiliza la luz para enviar y recibir datos a través del aire entre dos puntos con línea vista despejada por lo que son de mucha importancia los niveles de potencia con que la luz transmitida alcanza el otro extremo y el grado de alineación entre los dos equipos de transmisión-recepción.
2. La Óptica de Espacio Libre es una tecnología de comunicaciones que ofrece mayor facilidad de instalación que la fibra óptica y mayores anchos de banda y seguridad que los enlaces inalámbricos por medio de microondas o radio frecuencia.
3. Los sistemas FSO pueden ser una buena opción en los casos donde se necesita comunicar dos puntos ubicados a una distancia no mayor de 4 o 5 kilómetros, con un gran ancho de banda, y donde se necesite realizar una instalación en el menor tiempo posible y donde la instalación de fibra requiere demasiados tramites y trabajos.
4. Las tecnologías Fast Ethernet y Giga bit Ethernet son las usadas normalmente en las redes de trabajo actuales y son completamente compatibles con los equipos FSO, lo que permite la aplicación de estos últimos en la extensión de redes LAN.

5. Los factores climáticos como la niebla y el viento muy fuerte constituyen los más grandes retos para el uso de la tecnología FSO, debido a que tienen impacto en la potencia que logran recibir los equipos así como en su alineación.
6. En Guatemala, hasta el momento no se ha despertado mucho interés por este tipo de enlaces y se percibe que cuando se necesita anchos de banda relativamente grandes, se opta por utilizar fibra óptica. Aun así, aun se podría incrementar su demanda debido a que la tecnología FSO continua aumentando su popularidad en varios países gracias a su aplicación exitosa y buenos resultados obtenidos.

## RECOMENDACIONES

1. Es de gran importancia que el usuario interesado en adquirir una solución para comunicar algún sitio determinado con el resto de su red, defina muy claramente sus necesidades de ancho de banda, disponibilidad, costo, etc. Esto con el propósito de no adquirir una solución a un costo demasiado elevado, cuando los resultados esperados se pudieron conseguir con una alternativa competitiva de menor costo.
2. Un análisis de campo debe realizarse cuando se ha optado por la implementación de un sistema FSO. Esto con el fin de tener los datos exactos en cuanto a la distancia, ubicación de los equipos de transmisión-recepción, visibilidad, y determinar el tipo de equipo más apropiado para el enlace. Es también posible también tener un aproximado de los niveles de visibilidad esperados a través de la adquisición de datos estadísticos de años anteriores los cuales son recolectados normalmente en los aeropuertos. Estos estudios deben ser realizados por la empresa que se encargara de desarrollar el proyecto.
3. Para sistemas que se instalaran en edificios de bastante altura, se debe tener en cuenta el movimiento de balanceo que normalmente estos presentan y que hace que sean más apropiados los equipos FSO con capacidad de auto rastreo, la cual les permite mantenerse alineados aun cuando su posición física no es del todo constante.

4. Si la seguridad de los datos que se estarán transmitiendo en un enlace de extensión de red es de gran importancia para la empresa, es aconsejable que el método de transmisión sea FSO o bien fibra óptica y no un enlace inalámbrico tradicional ya que las frecuencias utilizadas por estos son de uso común y el rango de propagación de la señal no es tan dirigido como lo es con FSO, por lo que se corre riesgo que esta información sea interceptada por alguien externo y sin que se pueda notar.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Herrera, Enrique. Introducción a las telecomunicaciones modernas. México: Editorial Limusa 1998. 403 pp.
2. Bloom, Scott y otros. Entendiendo el desempeño de la Óptica del espacio Libre, Revista de las conexiones de red ópticas, (Sociedad Óptica de América), (6): páginas 178- 199, 2003.
3. Rockwell, David A. y G. Stephen Mecherle. "Comunicaciones Inalámbricas Ópticas: Acceso Óptico de bajo costo y Banda Ancha.fsona" Corporación fsona comunicaciones. Canadá, 2007, 9 pp.
4. Activo vs. Pasivo. <http://www.freespaceoptics.com>. 10 de diciembre de 2007.
5. Bloom, Scott. Física de la óptica en espacio libre. <http://mtf.etf.bg.ac.yu>, 2,002. 22 pp.
6. Breve Ingeniería. <http://www.lightpointe.com>  
Corporación LightPointe Comunicaciones, 10 de diciembre 2007
7. Carr, David F. Óptica del Espacio Libre. Baseline. El centro de gestión de proyectos, Marzo 2005. <http://www.baselinemag.com>. 08 de noviembre de 2007.
8. FSO. <http://www.systemsupportolutions.com>. 8 de Enero 2008
9. FSO . <http://www.opticsreport.com>, 14 de diciembre 2007
- 10.FSO híbrido más RF. <http://www.freespaceoptic.com>. 10 de diciembre de 2007.

11. Grupo Strategis, Óptica del Espacio Libre: Tendencias globales, posicionamiento, y proyecciones, Septiembre 2001.  
<http://www.lightpointe.com>, 12 de febrero 2008.
12. Haces múltiples vs. Simples. <http://www.freespaceoptics.com>. 10 de diciembre de 2007.
18. Modelo OSI. <http://www.cisco.com/> 10 de diciembre de 2007.
13. Rami Arieli: "La Aventura Láser" Capitulo 1, pagina 1, Versión en español por A. Requena, C.Cruz, A. Bastida y J. Zúñiga. Universidad de Murcia. Spain. [www.um.es](http://www.um.es). 10 de diciembre 2007.
14. Seguridad. <http://www.freespaceoptics.com>. 10 de diciembre de 2007.
15. Sistemas FSO. <http://www.networkworld.com>, 14 de diciembre de 2007
16. Soluciones ópticas inalámbricas basadas en tecnología FSO.  
<http://www.lightpointe.com>. 12 de febrero 2008.
20. Tasa interna de retorno. <http://www.monografias.com> 30 mayo 2008
19. Valor presente neto. <http://www.monografias.com> 30 mayo 2008

