

UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACION TECNICA PARA EL DESARROLLO

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO

**INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES CON MENCIÓN EN GESTIÓN
EMPRESARIAL**

TEMA

**DISEÑO DE UNA RED CON TECNOLOGÍA LASER INALÁMBRICA PARA EL
CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD CATOLICA SANTIAGO DE GUAYAQUIL.**

REALIZADO POR:

VICENTE ARMANDO BARROS CALDERON

JUAN MIGUEL GONZALEZ AGUILAR

RUTH ELIZABETH TERRELONGE VERA

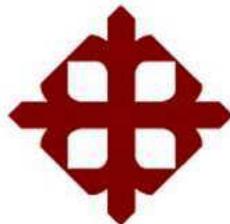
GIANCARLO VILLEGAS GONZALEZ

DIRECTOR:

ING. MANUEL ROMERO PAZ

Guayaquil-Ecuador

2010



FACULTAD DE EDUCACION TECNICA PARA EL DESARROLLO

TESIS DE GRADO

TITULO

**DISEÑO DE UNA RED CON TECNOLOGÍA LASER INALAMBRICA PARA EL
CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD CATOLICA SANTIAGO DE GUAYAQUIL.**

**PRESENTADA A LA FACULTAD DE EDUCACION TECNICA PARA EL
DESARROLLO. CARRERA DE LA UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTIAGO DE
GUAYAQUIL**

POR

VICENTE ARMANDO BARROS CALDERON

JUAN MIGUEL GONZALEZ AGUILAR

RUTH ELIZABETH TERRELONGE VERA

GIANCARLO VILLEGAS GONZALEZ

**PARA DAR CUMPLIMIENTO CON UNO DE LOS REQUISITOS PARA OPTAR POR
EL TÍTULO DE: INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES CON MENCION EN
GESTION EMPRESARIAL**

Decano

Director de la Carrera

Director de Tesis

Vocal Principal

Vocal Principal

Director de Tesis

Agradecimiento

Agradecemos a Dios y a cada uno de nuestros familiares y amigos quienes han sido de apoyo fundamental para el desarrollo de nuestra tesis y un agradecimiento muy especial a nuestro director el Master Manuel Romero Paz quien con su dedicación y paciencia ha conseguido guiarnos en el camino de la excelencia.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene por objeto el análisis y diseño de una red con tecnología láser Free-Space-Optics (**FSO**), para el campus de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil y su comparación con la red de fibra óptica existente. **FSO** es una tecnología en la que se crean enlaces ópticos inalámbricos mediante láser y es comparable con los sistemas de comunicaciones ópticas por medio de fibra. El Campus de la **UCSG** es un escenario perfecto para realizar un estudio de la tecnología **FSO** y así tener una idea clara de la ventajas y desventajas que presenta dicha tecnología en un entorno **LAN** frente a otras soluciones como es el caso de la fibra óptica. Se destacan las ventajas de esta tecnología, los factores que limitan el desempeño de los sistemas **FSO** para poder obtener resultados óptimos en la operación de los enlaces ópticos inalámbricos. Finalmente se realiza un estudio de costos entre la tecnología **FSO** y la fibra óptica donde se podrá destacar los potenciales beneficios de esta tecnología.

INDICE

1. INTRODUCCION	1
1.1 ANTECEDENTES	2
1.2 JUSTIFICACIÓN	3
1.3 DEFINICION DEL PROBLEMA	4
1.4 HIPOTESIS	5
1.5 OBJETIVOS	5
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE FSO	6
2.1 HISTORIA DEL PROCESO DE LA TRANSMISIÓN ÓPTICA	7
2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE SISTEMAS FSO	8
2.3 DESCRIPCIÓN DE UN SISTEMA FSO	9
2.3.1 TRANSMISOR	9
2.3.2 RECEPTOR	11
2.3.2.1 Diodo PIN	13
2.3.2.2 Fotodiodos Avalancha (APD)	14
2.3.2.3 Criterio de receptores para sistemas FSO	15
2.3.3 SUBSISTEMA ÓPTICO	16
2.3.3.1 Diseño de Sistemas Ópticos para FSO	17
2.3.4 RASTREO Y ADQUISICIÓN	17
2.3.4.1 Sistemas de Transmisión con haz ancho	18
2.3.4.2 Auto-Rastreo	18
2.3.4.3 Gimbals	19
2.3.4.4 Detectores QUAD	20
2.3.4.5 Arreglos CCD	20
2.4 ANÁLISIS DEL MARGEN DE ENLACE	21
2.4.1 PERDIDA ÓPTICA	22
2.4.2 PÉRDIDA GEOMETRICA	22
2.4.3 PÉRDIDA ATMOSFÉRICA	
Y SENSIBILIDAD DEL RECEPTOR	26

2.4.4	RANGO DE ENLACE	27
2.4.5	GENERALIZACIÓN DEL MARGEN DE ENLACE	28
2.5	FACTORES QUE AFECTAN LOS SISTEMAS FSO	31
2.5.1	ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA	32
2.5.1.1	Absorción Atmosférica	34
2.5.1.2	Dispersión Atmosférica	36
2.5.2	TURBULENCIA	40
2.5.2.1	Desviación del Haz	41
2.5.2.2	Cintilación	41
2.5.3	IMPACTO DEL CLIMA	43
2.5.3.1	Lluvia	43
2.5.3.3	Niebla	44
2.5.3.2	Nieve	44
2.5.4	LÍNEA DE VISTA	48
2.5.4.1	Determinación de la Línea de Vista	48
2.5.5	ANCHO DE BANDA	49
2.5.6	SELECCIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA	49
2.6	CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS FSO	50
2.6.1	DISPONIBILIDAD DE ENLACE Y CONFIABILIDAD	50
2.6.2	SEGURIDAD	51
2.6.3	SEGURIDAD VISUAL EN EL USO DE LÁSER Y EQUIPOS INALÁMBRICOS	52
2.6.3.1	Estándares y normas de seguridad	55
2.6.4	TOPOLOGÍAS PARA ENLACES FSO	58
2.6.4.1	Topología malla	59
2.6.4.2	Topología anillo con estribaciones	59
2.6.4.3	Topología estrella	60
2.6.4.4	Topología punto a punto	61
2.6.5	ESCALABILIDAD	62
2.6.6	INDEPENDENCIA DE PROTOCOLOS	62
2.6.7	DISTANCIA DE ENLACES VARIABLES Y	

VELOCIDADES DE DATOS	63
2.7 APLICACIONES DE FSO	63
2.7.1 INTERCONEXIÓN EMPRESARIAL	63
2.7.2 REDES METROPOLITANAS	64
2.7.3 APLICACIONES CELULARES	65
2.7.4 REDES POR TELEVISIÓN POR CABLES	66
2.7.5 REDES DE TELECOMUNICACIONES	66
2.7.6 ISP	67
2.8 DEMANDA Y COMERCIALIZACIÓN DE FSO	67
3. DISEÑO DE LA RED FSO PARA EL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTIAGO DE GUAYAQUIL	74
3.1 ANÁLISIS DE LA RED ACTUAL DE FIBRA ÓPTICA	75
3.1.1 TENDIDO ACTUAL DE LA FIBRA ÓPTICA	79
3.1.2 NIVELES ACTUALES DE TRÁFICO	82
3.2 CONSIDERACIONES PREVIAS AL DISEÑO DE LA RED FSO	83
3.2.1 PLANIFICACIÓN	83
3.2.1.1 ESTUDIO DEL LUGAR DE INSTALACIÓN	84
3.2.1.2 LÍNEA DE VISTA	85
3.2.1.3 POTENCIA	92
3.2.1.4 FACTOR CLIMÁTICO	94
3.2.1. SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS	95
3.3 EQUIPOS FSO PARA EL ESTABLECIMIENTO DE LOS ENLACES DENTRO DEL CAMPUS DE LA UCSG	100
3.3 DISEÑO DE LA RED DE SOPORTE FSO	101
3.4 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA RED ACTUAL DE FIBRA ÓPTICA Y LA RED DE RESPALDO FSO	103
3.4.1 CARACTERÍSTICAS DE LA FIBRA ÓPTICA	103
3.4.2 CARACTERÍSTICAS DE FSO	107
3.4.3 COMPARACIÓN ENTRE FSO Y FIBRA ÓPTICA	107
3.4.4 COMPARACIÓN DE LA RED ACTUAL DE FIBRA ÓPTICA CON LA RED DE RESPALDO FSO PARA	

EL CAMPUS DE LA UCSG.	109
3.4.5 COMPARACIÓN ENTRE COSTOS ENTRE LA RED ACTUAL DE FIBRA ÓPTICA Y LA RED DE RESPALDO PROPUESTA PARA EL CAMPUS DE LA UCSG	111
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	112
4.1 CONCLUSIONES	112
4.2 RECOMENDACIONES	114
BIBLIOGRAFÍA	116

Diseño de una red con tecnología laser inalámbrica para el campus de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil.

CAPITULO 1: INTRODUCCION

En la ciudad de Guayaquil, se encuentra la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (**UCSG**), un campus universitario ubicado en el Km. 1,5 de la avenida Carlos Julio Arosemena Tola. Esta institución de educación superior fue creada el 17 de mayo de 1962, iniciando sus actividades en 1963 con 4 facultades: Jurisprudencia, Ciencias Sociales y Políticas, Filosofía, Letras y Ciencias de la Educación y Ciencias Físicas y Matemáticas. En 1965 se aprobó la creación de la Facultad de Economía y Arquitectura y en 1967 fueron creadas las facultades de Educación Técnica para el Desarrollo y la de Medicina. Y posteriormente la Facultad de Especialidades Empresariales, contando actualmente con 9 facultades, una biblioteca general, un coliseo de deportes, un centro pastoral, una federación de estudiantes y el aula magna, ubicados como se puede apreciar en el siguiente plano (Figura 1.1):

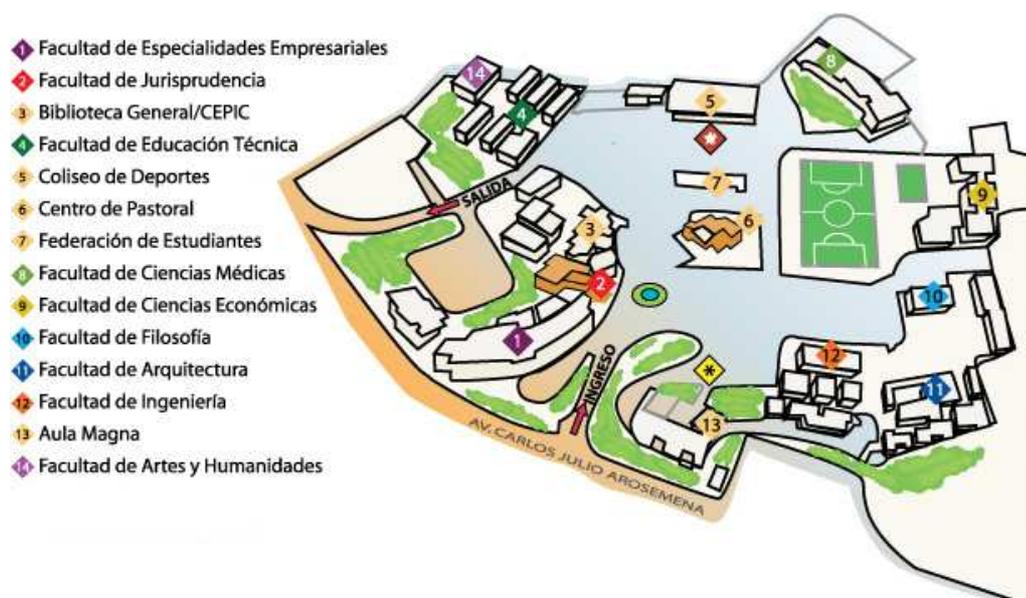


Figura 1.1 Plano de la UCSG

Las facultades antes mencionadas se conectan a la red interna de la **UCSG** a través de fibra óptica, la cual distribuye y maneja toda la información de voz y datos.

1.1 ANTECEDENTES

La Universidad Católica Santiago de Guayaquil, 21 años atrás, se encontraba buscando la oportunidad de hacer realidad un sueño que era conseguir un acceso a las redes académicas avanzadas, lo que haría dar un giro al desarrollo de la Ciencia y Tecnología en Ecuador, y que permitiría compartir recursos e información en todo el campus, tanto de los alumnos como a nivel administrativo y financiero.

El Centro de Cómputo, dirigido por el Ingeniero Vicente Gallardo Posligua, tiene a su cargo el proyecto denominado **Backbone ATM**, que interconecta todas las unidades académicas y administrativas del campus, a través de un anillo de fibra óptica que permite el tráfico de internet y datos de aplicaciones a velocidades que oscilan entre 10 y 155 Mbps. El proyecto, que, nació en 1988 como una propuesta de la comisión de Desarrollo Tecnológico de la Facultad de Ingeniería, fue concesionado a la empresa **IBM** del Ecuador, por el cual la conceptualización y marcha de este proyecto que permiten la transmisión de voz, datos y video mediante un mismo medio, fue factible con una inversión mínima.

La red de fibra óptica es la que actualmente abastece las comunicaciones internas dentro del campus por medio de la cual se transmiten todos los datos de la Universidad y se mantiene el sistema académico el cual registra asistencias, notas y datos financieros así como servicios para los estudiantes, docentes y personal administrativo.

Pero debido a que la red actual es un anillo y que al producirse algún daño en alguna de sus partes quedaría incomunicado el campus, es necesario una red de respaldo para cuando se presenten anomalías o simplemente se quiere dar mantenimiento a la red, y el campus no quedaría sin comunicación. Además se podrían brindar servicios adicionales sin ocupar ancho de banda en la red existente.

Es por esto que una red de respaldo es de gran importancia para la comunicación de voz y datos en el campus de la **UCSG**.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El tema de investigación propuesto es una alternativa de solución al problema de conectividad que afronta la **UCSG**, y constituye una mejora significativa al avance tecnológico de la Universidad ya que la tecnología a base de láser inalámbrico es considerada muy eficiente debido a sus propiedades físicas como la coherencia, la alta monocromaticidad y la capacidad de alcanzar potencias extremadamente altas.

En el desarrollo de esta tesis se realizarán todos los estudios comparativos de la red actual con la propuesta además de la elaboración del diseño de la red.

Para el diseño hay que considerar los siguientes aspectos:

- Las condiciones atmosféricas y sus efectos,
- El lugar ideal para la colocación de los equipos, donde se tiene que:
 - Estipular la altura de los edificios
 - Determinar la línea de vista
 - Determinar coordenadas
 - Escoger las alturas donde ubicaremos los equipos
 - La velocidad de datos,
 - Los requerimientos de capacidad para cada uno de los edificios,
 - La distancia entre cada uno de los edificios.
 - Servicios adicionales que se puedan implementar.

En el desarrollo de esta tesis se realizará un análisis comparativo, entre la tecnología inalámbrica Free-Space-Optics (**FSO**) y la fibra óptica, sabiendo que los

sistemas **FSO** tienen el mismo principio de funcionamiento de los sistemas de comunicaciones ópticas por medio de fibra.

Debido a que la red de la **UCSG** está basada en fibra óptica se debe realizar:

1. Un estudio de las características técnicas, funcionamiento, requerimientos, componentes básicos y aplicaciones de la tecnología inalámbrica (**FSO**).
2. Se diseñará la Red **FSO** para el campus de la **UCSG** considerando las principales variables que intervienen en el diseño de los enlaces ópticos inalámbricos como alternativa de solución al problema de conectividad, tales como las condiciones atmosféricas y sus efectos, determinación de línea de vista, la velocidad de datos y la distancia entre cada uno de los edificios.
3. Se elaborará hojas de especificaciones técnicas de los equipos considerados en el diseño de la red.
4. Se analizará los efectos que tienen las distintas condiciones climáticas sobre el desempeño de esta tecnología.
5. Se hará un análisis comparativo desde el punto de vista técnico entre la red existente y la Red **FSO** propuesta en este proyecto.
6. Finalmente se realizará un estudio de costos entre la implementación de la red diseñada con tecnología **FSO** y una nueva red de fibra óptica que podría instalarse como respaldo de la existente, considerando costos de equipos e instalación lo que permitirá tener una idea de la inversión que tendría que realizarse.

1.3 DEFINICION DEL PROBLEMA

Debido a que la red actual de fibra óptica de la **UCSG** es un anillo y que al producirse algún daño en alguna de sus partes quedaría incomunicado el campus, a causa de la carencia de una red de respaldo para cuando se presenten anomalías o

simplemente se quiere dar mantenimiento a la red, y el campus no quedaría sin comunicación.

1.4 HIPOTESIS

La implementación de una red con tecnología óptica inalámbrica para el campus de la universidad es una alternativa de solución al problema de conectividad que existe en la **UCSG** pues permitiría contar con una red de respaldo para el caso de contingencias emergentes o simplemente para trabajos de mantenimiento.

1.5 OBJETIVOS

Objetivo principal

Realizar el diseño de un enlace óptico inalámbrico con tecnología láser **FSO** como solución de conectividad para el Campus de la **UCSG**.

Objetivos específicos

- Realizar un estudio de las características técnicas, el funcionamiento, requerimientos, componentes básicos, aplicaciones de la tecnología inalámbrica **FSO**.
- Determinar los efectos que tienen las distintas condiciones climáticas sobre el desempeño de esta tecnología.
- Analizar las técnicas de modulación para redes inalámbricas aplicando espectro ensanchado.
- Diseñar la Red **FSO** para el campus de la **UCSG**.
- Comparar el proyecto con una red de Fibra óptica (**F.O.**).

CAPITULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE FSO

El objetivo de este proyecto es realizar el estudio de la tecnología **FSO**, analizando las características técnicas, funcionamiento y aplicaciones para de esta manera dar soluciones rápidas al momento de desplegar redes que necesiten de aplicaciones de gran ancho de banda.

Los sistemas de transmisión óptica en espacio libre juegan un papel cada vez más importante en la solución de comunicaciones de banda ancha en entornos empresariales e inalámbricos.

El estudio de esta tecnología dará la pauta para diseñar una red **FSO** para la Universidad Católica Santiago de Guayaquil, con el fin de compararla con la red de fibra óptica ya existente, y así determinar las ventajas y desventajas de esta tecnología inalámbrica.

La tecnología **FSO** tiene sus inicios en aplicaciones militares desarrolladas alrededor de 1940. Sin embargo no fue sino hasta la década de los 60s que los primeros avances significativos de transmitir luz a través del libre espacio empezaron a ocurrir en los Estados Unidos, Europa y Medio Oriente, donde investigadores militares, ingenieros y técnicos aplicaron el uso del láser infrarrojo en dispositivos de comunicaciones.

Los primeros sistemas eran capaces de transmitir varios kilobits a través del espacio. De hecho, investigadores europeos experimentaron en los años 60's con distintas formas de enviar dichas señales a través de tuberías subterráneas y subacuáticas, tratando de doblar el haz invisible de luz con espejos donde no se tenía línea de vista.

2.1 HISTORIA DEL PROCESO DE LA TRANSMISIÓN ÓPTICA.

La transmisión tiene que ver con comunicación, y el ser humano se ha estado comunicando por mucho tiempo. Por ejemplo, señales de humo y la presencia o ausencia de fuego se utilizaron como formas de comunicación durante el milenio pasado. La información también ha sido transmitida en la antigüedad mediante el uso de dispositivos emisores de luz, así las comunicaciones usando luz no son una ciencia nueva, por ejemplo grabaciones romanas antiguas, indican que platos de metal pulido fueron usados como espejos para reflejar la luz solar en largos rangos de señalización.

La milicia estadounidense usó dispositivos solares para enviar información telegráfica desde la cima de una montaña a otra al inicio de los años 80.

Por siglos, los navíos del mundo han usado y continúan usando luces parpadeantes para enviar mensajes de un barco a otro. En el siglo XIX Alexander Graham Bell consiguió transmitir señales de voz a través del aire con su Fotófono que usó luz solar reflejada en un espejo vibrante y una foto celda de selenio para enviar señales telefónicas sobre un rango de 200 metros.

Durante las dos guerras mundiales, se realizaron algunos experimentos con comunicaciones por medio de luz y ondas, pero los que se hicieron con radio y radar tuvieron más éxito. No fue hasta la invención del láser y el desarrollo de dispositivos conductores y fibras ópticas en los años 60 que las comunicaciones ópticas empezaron a tomar real importancia. Hoy en día, algunos dispositivos de comunicación óptica están encontrando su lugar dentro de muchas aplicaciones comunes.

2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE SISTEMAS FSO

La tecnología **FSO** consiste en la utilización de haces de luz a través de la atmósfera para la transmisión de datos a altas velocidades.

Los sistemas **FSO** trabajan en la región **IR** (infrarroja) del espectro electromagnético. Usan las longitudes de onda cerca del espectro visible, cuyos valores están alrededor de 850 y 1550 nm, que corresponden a las frecuencias alrededor de 200 **THz**. Debido a la proximidad al espectro visible, las longitudes de onda de **IR** tienen casi las mismas propiedades de propagación como la luz visible. En la Figura 2.1 se muestra un esquema del sistema de transmisión **FSO**.

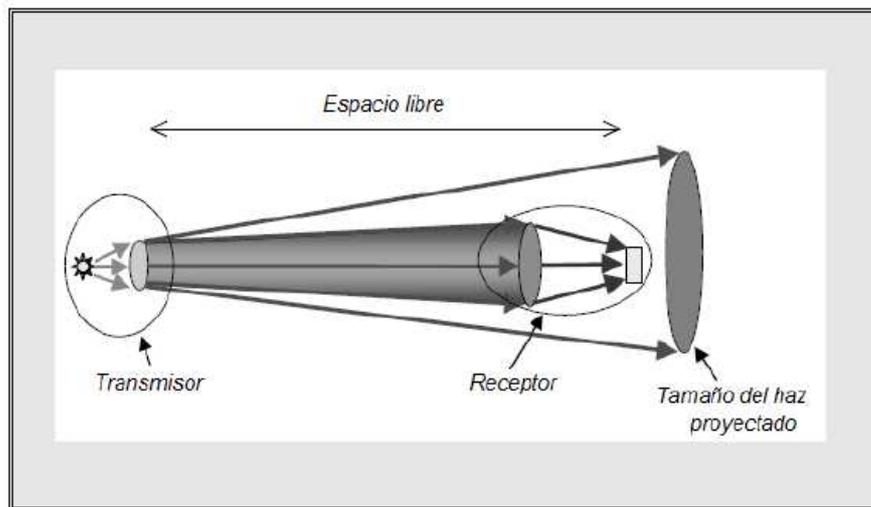


Figura 2.1 Esquema de un sistema de transmisión óptico en el espacio libre

Un sistema **FSO** consta simplemente de un transmisor y un receptor de luz infrarroja. La parte óptica del transmisor involucra una fuente de luz y un telescopio. El telescopio puede diseñarse usando lentes o un espejo parabólico para enfocar el haz del láser y proyectar dicho haz hacia el receptor. La luz transmitida se recoge al lado del receptor usando una lente o un espejo. Seguidamente la luz recibida es enfocada en un foto-detector siendo el tamaño del haz proyectado al extremo del receptor mucho más grande.

Las señales de información en formato eléctrico llegan al transmisor donde se deben convertir a un formato óptico. La modulación que se utiliza se denomina

modulación en potencia debido a que no es exactamente una modulación en amplitud (se varía la potencia de la señal óptica de forma que al transmitir un uno lógico la intensidad de la señal es mayor que si se transmite un cero lógico).

Los sistemas **FSO** no requieren licencia para su operación y es totalmente inmune a interferencias radioeléctricas o electromagnéticas. Un requerimiento principal para la operación del sistema es la línea de vista; los sistemas de **FSO** usan la luz para la comunicación, y la luz no puede viajar a través de los obstáculos sólidos como paredes o árboles. Un sistema **FSO** puede operar en modo full-duplex. Por lo tanto cada enlace **FSO** incluye un transceiver capaz de soportar dicha operación.

2.3 DESCRIPCIÓN DE UN SISTEMA FSO

Un sistema de transmisión por infrarrojo está compuesto por un dispositivo emisor, un dispositivo receptor, subsistema óptico, subsistema de rastreo y adquisición. A continuación se detalla cada uno de los elementos que son parte de este sistema:

2.3.1 TRANSMISOR

En los sistemas modernos **FSO**, una variedad de fuentes de luz son usadas para la transmisión de datos, sin embargo las fuentes de transmisión con semiconductores son las más utilizadas. Las principales diferencias entre las fuentes de transmisión son la longitud de onda, potencia y frecuencia. El uso específico de una fuente de transmisión será de acuerdo a la aplicación.

Las fuentes ópticas son transductores que generan una onda portadora óptica que será modulada por las señales eléctricas procedentes de un equipo analógico o digital, las mismas que deben cumplir con requisitos como:

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

La industria de la tecnología **FSO** está básicamente enfocada en usar el láser producido por semiconductores. Este tipo de láser es de dimensiones reducidas y pueden fabricarse en grandes cantidades a precios relativamente bajos, los cuales pueden llegar a ser tan pequeños como un gramo de sal o incluso menores. Muchos de estos láseres son utilizados en fibra óptica.

Debido a la gran dispersión de la luz y a la distribución espectral tan amplia que presenta un diodo **LED**, es usado sólo cuando se requiere realizar transmisiones a distancias cortas, con poca salida de potencia y con un requerimiento de velocidades alrededor de 155 Mbps, mientras que el láser tiene un espectro de emisión muy estrecho, por lo tanto la luz no se dispersa tanto como la luz producida por un diodo **LED**, por lo que se puede emplear eficientemente para transmisiones a mayores distancias.

La selección para una fuente láser para aplicaciones **FSO** depende de varios factores. Es importante que la longitud de onda para la transmisión esté relacionada con la ventana atmosférica. Una buena ventana atmosférica esta alrededor de los 850 nm y 1550 nm en el rango más corto de longitud de onda del infrarrojo. En un rango más grande del infrarrojo, en algunas longitudes de onda las ventanas están presentes entre 3-5 micrómetros (especialmente entre 3.5-3.6 micrómetros) y 8-14 micrómetros. Sin embargo la utilización más conveniente en fuentes de luz es la utilización de rangos de longitudes de onda grandes lo cual es bastante limitado en el este momento. Además muchas fuentes necesitan bajas temperaturas, lo cual limita el uso en aplicaciones de telecomunicaciones. Otros factores que son importantes en el uso de fuentes de luz para aplicaciones **FSO** son:

- Precio y utilización de componentes comerciales
- Potencia de transmisión.
- Tiempo de vida.
- Capacidad de modulación.
- Seguridad en el ojo humano.
- Dimensiones físicas.
- Compatibilidad con otros medios de transmisión como la fibra.

2.3.2 RECEPTOR

Además de las fuentes de transmisión los detectores de luz también tienen importancia para el diseño de un sistema **FSO**. Los receptores detectan luz por diferentes fenómenos físicos. Similar a las fuentes de láser, muchos detectores de sistemas comerciales **FSO** están basados en semiconductores.

Dependiendo del material usado estos pueden operar en rangos diferentes de longitud de onda.

Los detectores ópticos demodulan la portadora óptica recibida, recuperando la señal de información, a la que se somete posteriormente a procesos de amplificación, filtrado, etc. en el receptor los detectores han de tener:

- . Alta sensibilidad (potencia mínima necesaria en la entrada del detector para obtener una tasa de error menor que una prefijada).
- . Bajo consumo y pequeño tamaño.
- . Una baja tasa de error típicamente menos de BER: 1×10^{-10} para permitir la recuperación de la señal original.
- . Bajo ruido
- . Alta eficiencia y rendimiento en la conversión opto-eléctrica.

El detector convierte la señal óptica en señal eléctrica como primera parte del proceso de recepción; a continuación, la señal se regenera, bien para llevarla a un equipo terminal o para ser incorporada a la siguiente etapa de un repetidor óptico.

Los sistemas que operan actualmente, incorporan la detección directa de una señal que modula en intensidad a la portadora de la fuente láser; el detector se limita a obtener una fotocorriente a partir de la luz modulada incidente, por lo que esta corriente será proporcional a la potencia recibida y corresponderá a la forma de onda de la moduladora.

En sistemas con **FSO** se utilizan básicamente los fotodiodos, debido a que estos dispositivos semiconductores son pequeños, sensibles y proveen diferentes bandas de longitudes de onda que son relevantes en los sistemas **FSO**.

Por otra parte los fototransistores a pesar de poseer buena sensibilidad, no posibilitan altas velocidades de transmisión, lo que limita su aplicación.

Los fotodiodos son diodos semiconductores que operan polarizados inversamente. Durante la absorción de la luz, cuando un fotodiodo es iluminado, las partículas de energía luminosa, también llamadas fotones, son absorbidas generando pares electrón-hueco, que en presencia de un campo eléctrico producen una corriente eléctrica. Estos dispositivos son muy rápidos, de alta sensibilidad y pequeñas dimensiones. La corriente eléctrica generada por ellos es del orden de los nanoamperios (10^{-9} A) y por lo tanto se requiere de una amplificación para manipular adecuadamente la señal.

Los fotodiodos utilizados actualmente son:

PIN (Positivo – Intrínseco – Negativo)

APD (Fotodiodo de Avalancha)

2.3.2.1 Diodo PIN

Este diodo está conformado por una capa intrínseca, casi pura, de material semiconductor, introducida entre la unión de dos capas de materiales semiconductores tipo n y p. Se aplica una tensión de polarización inversa (Figura 2.2).

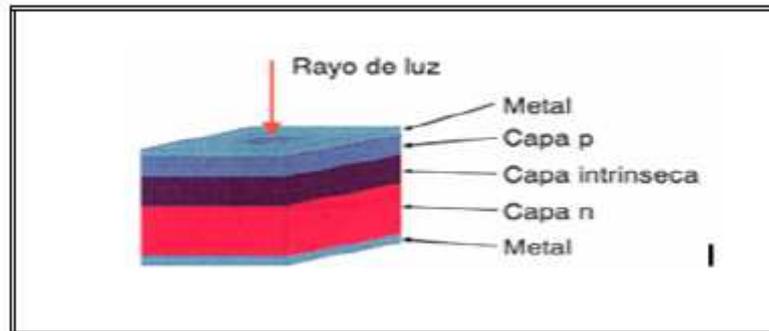


Figura 2.2 Estructura básica del diodo **PIN**

La luz entra al diodo por una ventana muy pequeña y es absorbida por el material intrínseco, el cual agrega la energía suficiente para lograr que los electrones se muevan de la banda de valencia a la banda de conducción y se generen portadores de carga eléctrica que permiten que una corriente fluya a través del diodo. Los elementos más utilizados en la fabricación de este tipo de detectores son el Germanio y últimamente se utiliza el GaAs, GaInAs, InP, con resultados muy buenos.

Los diodos **PIN** requieren bajas tensiones para su funcionamiento, pero deben utilizar buenos amplificadores. Presentan tiempos de vida relativamente altos; que podrían reducirse únicamente por factores externos y son los más indicados para el uso en la segunda y tercera ventana de transmisión (1300 y 1550 nm).

El diodo **PIN** resuelve el problema de tiempo de respuesta lento en las estructuras del semiconductor. Estos semiconductores son usados comúnmente en los receptores de sistemas **FSO**.

2.3.2.2 Fotodiodos Avalancha (APD)

Los fotodiodos de avalancha son una estructura de materiales semiconductores, ordenados en forma p-i-p-n, (Figura 2.3).

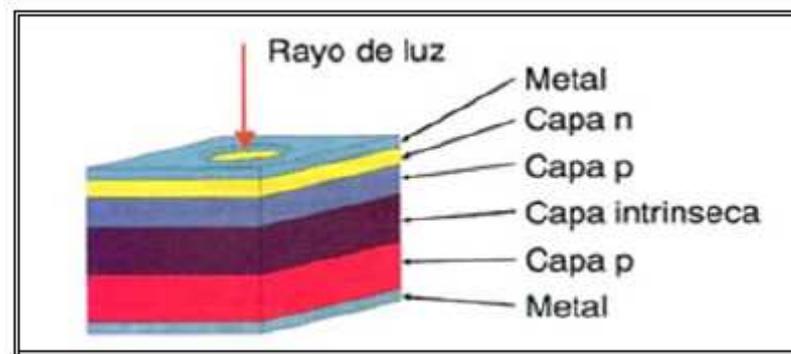


Figura 2.3 Estructura básica del Fotodiodo Avalancha

La luz entra al diodo y es absorbida por la capa n, haciendo que ciertos electrones pasen de la banda de valencia a la banda de conducción. Debido al gran campo eléctrico generado por la polarización inversa, los electrones adquieren velocidades muy altas y al chocar con otros electrones de otros átomos, hacen que éstos se ionicen. Los átomos ionizados, ionizan a su vez otros átomos, desencadenando un efecto de avalancha de corriente fotoeléctrica.

Los fotodiodos **APD** son 10 veces más sensibles que los diodos **PIN** y requieren de menos amplificación adicional. Su desventaja radica en que los tiempos de transición son muy largos y su vida útil es muy corta.

Los fotodiodos **APD** de silicio presentan ruido bajo y un rendimiento hasta del 90% trabajando en la primera ventana. Su factor de ganancia es alto y no es crítico, porque la ganancia del receptor es fácilmente controlable.

Su sensibilidad es casi inversamente proporcional a la velocidad de transmisión, típicamente de -64 dBm a 8 Mbps y -50 dBm a 140 Mbps y el tiempo medio entre fallas es de 107 horas. En cuanto a los anchos de banda obtenidos comercialmente, superan 1 GHz. Como inconveniente está su alta tensión de alimentación (200-300V).

Los fotodiodos **APD** de germanio trabajan con longitudes de onda comprendidas entre 1000 y 1300 nm y rendimientos del 70%. Se puede extender su funcionamiento hasta los 1550 nm, pero se debe tomar en cuenta que las aplicaciones para 1550nm suelen ir acompañadas de mayores velocidades de transmisión y en este sentido el **APD** de germanio es bastante limitado; en consecuencia, su sensibilidad es afectada.

En cuanto a la tensión necesaria para la polarización, es del orden de los 30 V, encontrándose en el mercado fotodiodos de este tipo cuyos anchos de banda alcanzan 1 GHz.

2.3.2.3 Criterio de selección de receptores para sistemas FSO

Similar a las fuentes de luz, la elección de un tipo específico de detector o material del detector depende de la aplicación. Las características de sensibilidad tienen que equilibrarse con la longitud de onda de transmisión y el transmisor.

Para aplicaciones que requieran longitudes de ondas cortas en la ventana de los 850 nm los detectores de silicio son indudablemente la mejor opción. Los detectores con diodos **PIN** son suficientes para aplicaciones de cortas distancias y cuando el transmisor opuesto puede proveer suficiente potencia.

Los **APD's** son mejores para aplicaciones de largas distancias. La alta sensibilidad en el diseño de los **APD's** provee adicionalmente un margen de enlace. Sin embargo, requieren un voltaje alto y estable, los cuales son más caros que los diodos **PIN**. Sin embargo los sistemas hechos a base de silicio no pueden ser usados en aplicaciones que requieran grandes longitudes de onda. Para el rango de los 1550nm el material InGaAs es el apropiado. Los diodos **PIN** de material InGaAs son muy comerciales, tienen excelentes características de modulación y puede operar a grandes velocidades (10 Gbps o más altas).

El germanio tiene una gran respuesta espectral y puede operar con longitud de onda corta y grande; sin embargo el germanio tiene el valor muy alto de corriente oscura por lo cual no es usado en aplicaciones **FSO**.

Para posibles aplicaciones en los rangos de longitud de onda de 3-5 μm y 8-14 μm , el material detector más usado es: Mercurio Cadmio Telurio (**MCT**) con respuestas en el espectro en dichos rangos de longitud de onda. Sin embargo, similar a las fuentes de transmisión estos materiales pueden ser enfriados a bajas temperaturas.

2.3.3 SUBSISTEMA ÓPTICO

Los subsistemas ópticos representan un rol muy importante en el diseño de los sistemas **FSO**. Los componentes ópticos son usados en la transmisión; es decir, al lado del transmisor del enlace óptico. En los sistemas modernos **FSO** se usan diseños diferentes tanto de lentes como espejos. Considerando que los lentes están basados en la física de la refracción de la luz y los espejos están basados en las propiedades reflectivas de los materiales, dichos diseños dependen de los requerimientos de desempeño, aplicaciones específicas y precios.

2.3.3.1 Diseño de Sistemas Ópticos para FSO

Se usan comúnmente varios diseños de sistemas ópticos en aplicaciones **FSO**. Estos diseños ópticos tienden a ser relativamente simples de costos reducidos y sistemas complejos. La óptica es usada para transmitir luz por medio de transmisores de mínima divergencia, para recoger luz a través de los detectores y acoplar la luz dentro de la fibra. Los sistemas ópticos realizan el control de la luz con un limitado ancho de banda junto a la región del infrarrojo del espectro. Para optimizar el desempeño de los sistemas hay que equilibrar el sistema óptico al tamaño del detector y la divergencia del haz transmitido.

2.3.4 RASTREO Y ADQUISICIÓN

El sistema de rastreo en un enlace **FSO** es muy importante debido a que pueden ocurrir vibraciones en las estructuras, oscilaciones en los edificios, etc.

Estos factores pueden desalinearse el haz de luz provocando errores en el medio de transmisión y en el peor de los casos la pérdida total de la señal. Esto puede llegar a suceder cuando se tienen enlaces largos ya que pequeñas variaciones angulares en el transmisor generan grandes desviaciones en el extremo remoto.

La presencia de un sistema de rastreo automático mantendrá al haz centrado y en el objetivo, manteniendo la integridad del enlace, sin el sistema de rastreo, es muy difícil mantener la integridad del enlace, incluso un ligero movimiento del edificio o de la torre pueden hacer que el rayo se desvíe varios metros.

Existen numerosos métodos de rastreo y adquisición automática los cuales usan servo-motores, stepping motors, voice coils, espejos, detectores quad, arreglos **CCD** y sistemas **MEMS**.

2.3.4.1 Sistemas de Transmisión con haz ancho

Los sistemas de transmisión de haz ancho, sin tomar en cuenta el rastreo tienen un costo efectivo y una solución fiable con una velocidad moderada sobre distancias moderadas. La utilización de un haz ancho puede causar un incremento en la pérdida de la potencia de transmisión lo que puede ser reflejado en la calidad del enlace. Cuando se usa un haz circular, la cantidad total de potencia recibida para un tamaño dado de la superficie del receptor que se localiza a una distancia fija aumentará por 6 dB cuando se corta a la mitad el diámetro del haz proyectado. Reduciendo el diámetro en un factor de dos, significa la reducción del ángulo en un factor de dos.

Los sistemas comercialmente disponibles y estandarizados son aquellos que usan un ángulo grande para la transmisión, sin operación de rastreo con un ángulo de divergencia entre 2-10 miliradianes, para dicho ángulo el tamaño del diámetro del haz corresponde a 2 y 10 m a una distancia de 1 km. Muchos proveedores de **FSO** encontraron que dicho ángulo de divergencia del haz proporciona un apuntamiento suficiente para mantener el haz en el objetivo. La clave para minimizar las dificultades de alineamiento es la selección de un lugar fijo para la instalación del sistema. Típicamente se utilizan equipos de montaje rígidos. Sin embargo, si el sistema se instala en un sitio que experimenta cambios, un sistema rastreador activo es beneficioso ya que neutraliza el desapuntamiento del haz al lado del receptor. En todo caso, la instalación de sistemas **FSO** en torres altas e inestables, postes del teléfono y otros tipos de plataformas inestables se recomienda usar un sistema activo de rastreo de haz.

2.3.4.2 Auto-Rastreo

Auto rastreo es una característica donde el haz automáticamente es alineado hacia el terminal opuesto cuando existen oscilaciones. Este tipo de rastreo automático

incorpora un mecanismo que detecta el haz al lado del receptor controlando y manteniendo el haz alineado. Muchos sistemas de rastreo utilizan un haz que sirve de rastreo separado del haz que transporta los datos, en este caso es importante que los dos haces estén alineados en la misma dirección y para distinguir los haces, estos trabajan en distintas longitudes de onda, para esto se usa un espejo dichroic el mismo que refleja la luz selectivamente según la longitud de onda que cada haz usa.

Los sistemas auto rastreadores a menudo utilizan un mecanismo de control con un lazo retroalimentador para mantener el haz apuntando al terminal opuesto.

El sistema de rastreo automático puede compensar hasta 2.4 grados de movimiento (a un alcance de 500 m). Esto es más que suficiente para compensar la oscilación típica del edificio, la vibración causada por el viento y otros factores ambientales que ocasionarán movimiento.

2.3.4.3 Gimbals

Un gimbal es un dispositivo que a menudo se usa para apoyar los cabezales de los equipos **FSO** y puede voltearse en direcciones diferentes con movimientos verticales y horizontales, hacia arriba y hacia abajo, Gimbals son útiles para realizar la adquisición automática y rastreo del lado remoto, las características más importantes pueden visualizarse en la Tabla 2.1.

CARACTERISTICAS	VALORES TIPICOS
Campo vertical	+/- 20 grados
Campo horizontal	+/-25 grados
Fluctuación	< 5 radianes rms
Slew rate ³	20 radianes/seg

Tabla 2.1 Características de los Gimbals

2.3.4.4 Detectores QUAD

Los detectores **Quad** normalmente son usados en aplicaciones para el rastreo del haz, los cuales están hechos de silicio que responden a longitudes de onda cercanas a la región visible y a longitudes de onda de rayos infrarrojos; sin embargo, estos detectores pueden fabricarse con otro tipo de materiales y responderán a otros rangos de longitud de onda en el espectro.

La luz entrante del sitio remoto está enfocada hacia el detector el cual usa lentes o espejos. El detector consta de cuatro elementos separados formando una matriz. Estos recolectan luz por separado. Si la luz se enfoca exactamente al medio del detector, la señal que sale llegará exactamente a los cuatro detectores, pero si la luz no es apuntada al medio de la matriz cada detector recogerá luz en distinta proporción y por lo tanto el rendimiento de la luz será menor. La resolución del apuntamiento en este método depende del tamaño y del espaciamiento de los cuatro detectores en la matriz; si los elementos del detector son pequeños, la resolución total es más alta.

2.3.4.5 Arreglos CCD

El detector **CCD** es un arreglo de dos dimensiones de capacitores sensibles a la luz. Cada celda del **CCD** es capaz de acumular carga eléctrica de forma proporcional a la cantidad de fotones que inciden sobre él durante un determinado tiempo expuesto a la luz. La carga acumulada es transferida hasta salir del detector donde es amplificada y digitalizada. El resultado final es una matriz numérica donde cada elemento tiene un valor proporcional a la cantidad de luz recibida por la celda asociada. Durante todo el proceso se expone el detector a la luz, se va realizando el desplazamiento de cargas en toda la matriz en sincronismo con el movimiento de la imagen y se convierte cada píxel extraído a un valor digital.

2.4 ANÁLISIS DEL MARGEN DE ENLACE

Es importante el análisis del margen de enlace en un sistema de comunicaciones. En particular los sistemas **FSO** están relacionados con un factor de pérdida en el aire entre el transmisor y el receptor que puede variar en el tiempo debido al clima, por lo tanto es importante tomar en consideración las condiciones climáticas del lugar en que se va a desplegar los enlaces **FSO**.

Por ejemplo, un enlace donde el transmisor está en el punto A y el receptor en el punto B y la señal empieza a transmitirse. En la Figura 2.4 se muestra un sistema **FSO** instalado en un edificio alto en medio de una ciudad metropolitana. Para la transmisión se necesita tomar en cuenta la potencia disponible en el receptor una vez que la señal salió del transmisor. Es importante entender como el receptor utiliza esta potencia y más importante es saber que tan fiable es el enlace de comunicación en una distancia dada. Este último factor es importante debido a que la potencia de la señal recibida puede variar significativamente en el tiempo.

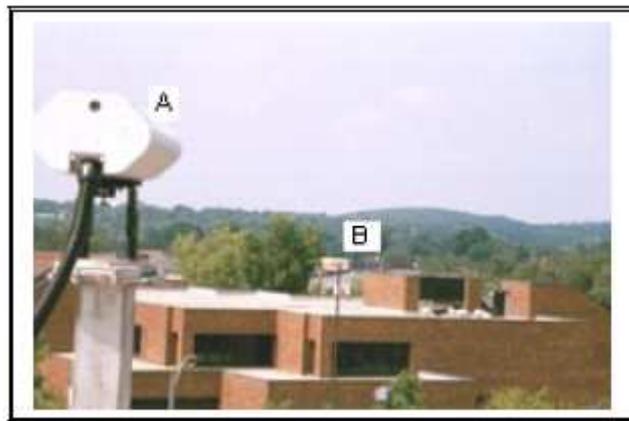


Figura 2.4 Equipo de **FSO** instalado en la azotea de un edificio en medio de la ciudad

Para cuantificar estos factores se debe planificar el enlace tomando en cuenta tanto las pérdidas como ganancias esperadas y comparar la potencia de la señal recibida con el nivel requerido por el circuito detector de señal.

Para hacer un enlace más confiable, se debe dejar un margen de enlace más grande comparado con el nivel nominal mínimo de potencia recibida, tomando en cuenta el tamaño del búfer disponible; sin embargo, con la potencia asignada al margen de enlace se podría incrementar la distancia que hay entre el transmisor y el receptor.

2.4.1 PERDIDA ÓPTICA

La primera causa de pérdida en un sistema **FSO** es debido a la imperfección en los lentes y otros elementos ópticos. Por ejemplo, el lente puede transmitir el 96% de luz y el 4% de luz se refleja o se absorbe. Para tener en cuenta este factor se mencionará una cantidad llamada “perdida óptica” en la planificación del enlace. El monto de pérdida dependerá de las características del equipo y la calidad de los lentes. Este valor necesita ser medido a partir de la fabricación de los componentes ópticos. Por ejemplo, se asume que se tiene una potencia de la señal de salida de 4 mW que corresponde a 6 decibeles por milivatio, si la pérdida óptica de la señal es de 4 dB; es decir, existe atenuación en la potencia, consecuentemente se substraerá 4 dB de la señal original (6 dB).

Para desarrollar el cálculo del enlace, es útil crear una hoja de cálculo que enliste todas las cantidades, las cuales se añaden o se sustraen en el cálculo del enlace; por ejemplo:

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Potencia de transmisión	6	dBm
Pérdida opticas	-4	dB

Tabla 2.2 Cálculo de enlace

2.4.2 PÉRDIDA GEOMETRICA

El término pérdida geométrica se refiere a las pérdidas que ocurren debido a la divergencia del haz óptico. Los rayos láser no son totalmente puntuales, estos van "abriéndose" conforme van avanzando por el medio. La divergencia nos indica

cuanto es el ángulo de apertura del láser. Este ángulo es directamente proporcional al área de cobertura en el extremo remoto, y es inversamente proporcional a la potencia recibida en el receptor del equipo remoto.

En algunos sistemas que usan un rastreador activo, la divergencia del haz es muy pequeña; en sistemas que no usan un rastreo activo o en donde los sistemas de rastreo estén en el rango de varios hertzios, la divergencia es diseñada para que cuando el haz experimente algún tipo de oscilación, alguna parte de dicho haz siempre llegará al receptor y el enlace podrá mantenerse.

El resultado de la divergencia se debe a que la luz no puede ser captada por completo por el receptor. El ángulo de divergencia está en forma de cono (Figura 2.5) por lo tanto el haz se va ensanchando conforme va llegando al extremo remoto, debido a esto no toda la luz pega en el receptor desperdiciándose mucha luz alrededor de este.

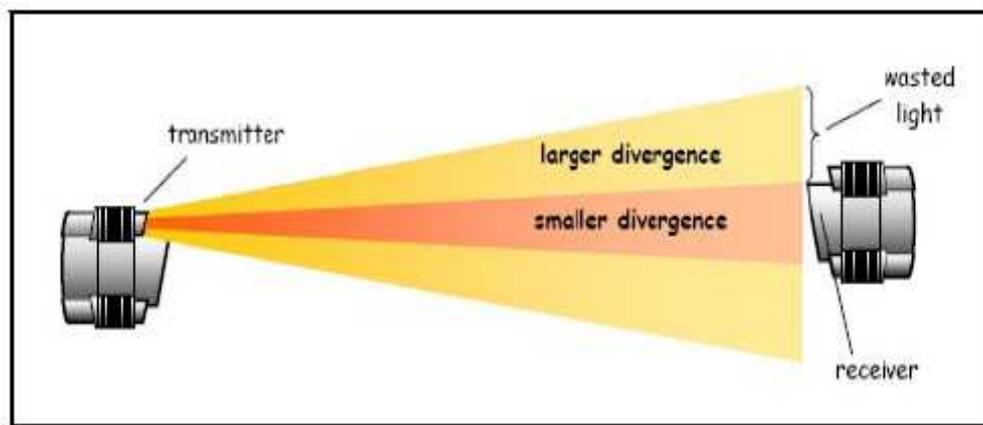


Figura 2.5 Divergencia del Haz

Minimizando la divergencia del haz, más luz puede concentrarse al lado del receptor; sin embargo con la disminución de la divergencia del haz es más difícil mantener el haz alineado entre el transmisor y el receptor. La Figura 2.6 muestra un ángulo de divergencia del haz amplio, dicho haz puede acomodarse ante cualquier oscilación causada por inestabilidad en las plataformas de montaje o el

viento, mientras que al tener un ángulo de divergencia pequeño, cualquier movimiento puede causar un desapuntamiento del haz.

Si se desea instalar enlaces **FSO** que estén completamente en paralelo, este parámetro va a determinar la distancia mínima de separación que debe de existir entre cada equipo. Mientras menor sea la divergencia, menor va a ser la distancia requerida.

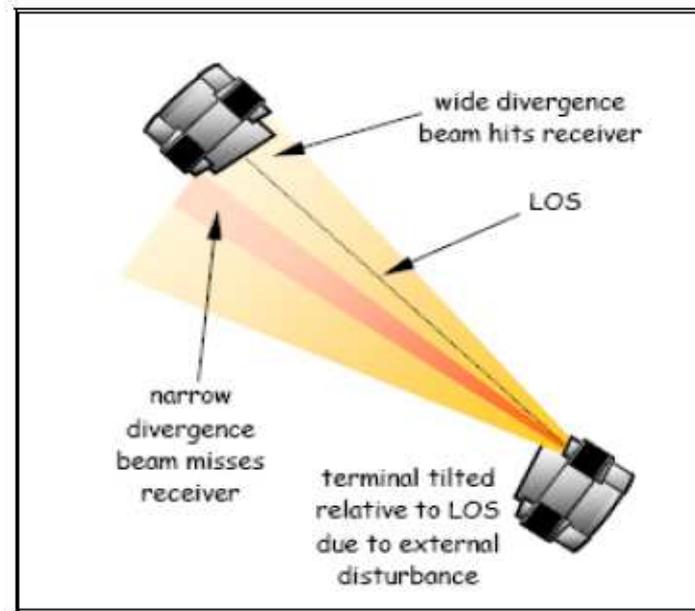


Figura 2.6 Desapuntamiento del haz

La pérdida es igual a la relación del área del receptor con el área del haz recibido. El área del haz en el receptor puede ser calculada usando una simple fórmula geométrica, asumiendo que la divergencia ocurre a una velocidad constante en cuanto el haz abandona el transmisor. En la figura 2.7 se muestra el diámetro del haz proyectado que se emite a 4 mrad a distancias de 300, 1000 y 2000 m. Para estas distancias proyectadas por el haz, el diámetro del haz se incrementa continuamente de 1.3, 4 y 8 m respectivamente.

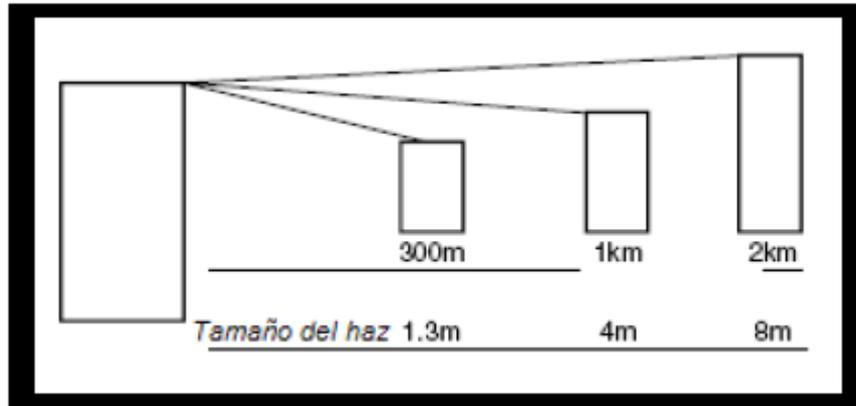


Figura 2.7 Tamaño del haz proyectado

Se asume que la propagación lineal del haz es bastante exacta. Muchos sistemas son diseñados para operar bajo condiciones donde la dispersión de Rayleigh no es tomada en cuenta, por lo tanto el tamaño del área del radio del haz proyectado y el área de la óptica recibida se calcula de la siguiente manera:

$$Radio = \left[\frac{Diámetro.de.óptica.recibida}{(Diámetro.óptica.transmitida + Distancia \times Divergencia.del.ángulo)} \right]^2 \quad (2.1)$$

Si la medida del diámetro se lo realiza en centímetros, la distancia en kilómetros y la divergencia en mili-radianes la formula será:

$$\frac{A_R}{A_B} = \left[\frac{D_R}{D_T + 100 * d * \theta} \right]^2 \quad (2.2)$$

En donde A_R es el área del receptor y A_B es el área del haz. Esta cantidad se puede expresar en dB, por ejemplo, si el diámetro del haz en el receptor es 3 cm, el lente del receptor es 8 cm y la divergencia es 2 mrad, la pérdida a un kilómetro de distancia puede ser calculada usando la Ecuación 2.2; cuyo resultado es:

$$\frac{A_R}{A_B} = 0.0015685 = -28dB \quad (2.3)$$

Para sistemas que usan múltiples haces para transmitir datos o haces que no son uniformes el cálculo de la pérdida geométrica llega a ser más complicada, sin embargo el principio básico sigue siendo el mismo.

La pérdida geométrica calculada se añade a la tabla de cálculo de enlace que se muestra en la Tabla 2.3.

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Potencia de transmisión	6	dBm
Pérdida ópticas	-4	dB
Pérdida geométrica	-28	dB

Tabla 2.3 Cálculo del enlace añadiendo la pérdida geométrica

2.4.3 PÉRDIDA ATMOSFÉRICA Y SENSIBILIDAD DEL RECEPTOR

La atmósfera causa la degradación de la señal y la atenuación en el enlace de un sistema **FSO** de muchas maneras, incluyendo la absorción, dispersión (principalmente la dispersión de Mie) y cintilación. Todos estos efectos varían a través del tiempo y dependerán de las condiciones climáticas de ese momento.

El último punto en el cálculo del enlace es saber que tan lejano se debe poner el transmisor del receptor. Si se escoge una distancia lo que se necesita conocer es el margen de desvanecimiento del enlace a una distancia dada, con dicho valor se puede estimar la fiabilidad del enlace.

La sensibilidad es una medida de cómo el circuito detector de la señal puede hacer uso del nivel de potencia recibida. En sistemas **FSO** se usa una codificación binaria simple y un código on/off, esto significa que el 1 representa presencia de luz y el 0 es ausencia de luz y el receptor es capaz de detectar estos dos estados. Para diferentes tipos de receptores existe un límite teórico para una mínima potencia de señal la misma que pueda ser visible sobre un ruido de fondo.

La sensibilidad del receptor también es una función de la frecuencia de modulación de la señal entrante, altas frecuencias (pocos bits en el tiempo) contienen pocos

fotones que pueden ser detectados y recibidos lo que causa dificultad en diferenciar los dos estados lógicos 1 y 0.

El ruido de fondo puede producirse por varias fuentes como la luz del ambiente, ruido de disparo y ruido térmico. Con un diodo **APD** el ruido puede incrementarse durante el proceso de amplificación. Para el diseño de un equipo es importante conocer la potencia de las diferentes fuentes de ruido para poder calcular la sensibilidad y se podrá comparar con las especificaciones de fabricación del equipo. Desde el punto de vista del diseño del sistema, si estos datos no están disponibles pueden ser medidos usando un medidor de potencia óptica y un probador de **BER**. Los efectos del ruido causa el incremento del **BER** hasta un umbral predefinido, dicho umbral puede ser escogido dependiendo de aplicaciones específicas y para una alta velocidad de transmisión. El umbral del **BER** que a menudo se usa es 1×10^{-10} . Por ejemplo, se tiene el fabricante de un equipo cuya sensibilidad del receptor es -43 dB con una velocidad digital de transmisión de 155 Mbps y un **BER** de 1×10^{-10} . En la Tabla 2.4 se puede apreciar el último valor para el cálculo de enlace.

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Potencia de transmisión	6	dBm
Pérdida ópticas	-4	dB
Pérdida geométrica	-28	dB
Margen de enlace	17	dB

Tabla 2.4 Cálculo del enlace añadiendo el margen de enlace

Los 17 dB del margen de enlace es un valor establecido para proteger la integridad del enlace contra eventos causados por la atmósfera.

2.4.4 RANGO DE ENLACE

Un concepto relacionado con el margen de enlace es el “rango dinámico” en un sistema **FSO**. Este es definido por la diferencia entre el máximo y el mínimo nivel

de potencia que un sistema **FSO** puede aceptar. Una señal con un nivel de potencia elevado puede causar problemas de saturación en el receptor, este evento particularmente se da en enlaces de corto alcance donde muy poca luz se atenúa en la atmósfera.

El rango dinámico es típicamente medido en dB. Un rango dinámico de 30 dB significa que el nivel de señal máxima detectable (saturación del receptor) es 1000 veces mayor que el mínimo nivel de señal detectable (sensibilidad del receptor). Un rango dinámico grande, hace más versátil y robusto a un enlace **FSO**.

2.4.5 GENERALIZACIÓN DEL MARGEN DE ENLACE

La potencia absorbida en el extremo del receptor puede ser calculada por la siguiente ecuación:

$$P_{recibida} = P_{transmitida} \times \frac{L \cdot D^2}{d^2 \cdot R^2 \cdot 1e6} \times 10^{-a \cdot R/10} \quad (2.4)$$

P: potencia (mW)

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

D: diámetro de la apertura del receptor (m)

d: divergencia del haz (radianes)

R: rango (km)

a : atenuación atmosférica

La cantidad de potencia recibida, es la mínima potencia requerida (S: sensibilidad del receptor) expresada en dB, donde el margen de enlace esta dado por:

$$\text{Margen de enlace} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{recibida}}{S} \right) \quad (2.5)$$

Se puede observar que estas ecuaciones están en función del rango de enlace y de la atenuación atmosférica.

$$\begin{aligned} \text{Margen de Enlace} &= 10 \cdot \log\left(\frac{P_{trans} \cdot L \cdot D^2}{S \cdot d^2} \cdot \frac{10^{(-a \cdot R / 10)}}{1e6 \cdot R^2}\right) \\ &= 10 \cdot \log\left(\frac{P_{trans} \cdot L \cdot D^2}{S \cdot d^2}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{10^{(-a \cdot R / 10)}}{1e6 \cdot R^2}\right) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Parámetros relacionados
con el sistema

Parámetros relacionados
con el enlace

El margen de enlace es la suma de dos factores completamente independientes. El primer factor involucra las condiciones específicas propias del enlace es decir una medida de la atenuación que el sistema debe superar para mantener activo el enlace, el otro factor que tiene que ver con parámetros que implican el rendimiento del sistema **FSO** lo que es esencialmente una medida directa de la habilidad del sistema para superar dicha atenuación.

Para definir a un sistema **FSO** con sus ventajas inherentes, mediante algunos argumentos propios del enlace, se generaliza el margen de enlace (**GLM**) el cual es independiente del rango de enlace y las condiciones atmosféricas y esta expresado en dB.

$$\text{GLM} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{trans} \cdot L \cdot D^2}{S \cdot d^2}\right) \quad (2.7)$$

El objetivo del **GLM** es proporcionar una manera imparcial para comparar un producto con otro en base al diseño de dichos productos, debido a que el rango específico del enlace y las condiciones climáticas no intervienen en el **GLM**. Por ejemplo un producto A que tiene un **GLM** de 10 dB y un producto que tiene un **GLM** de 13 dB, es decir el producto B siempre tendrá 3 dB más que el producto A en cualquier enlace (Figura 2.8a-2.8b), en otras palabras, el producto B tiene dos

veces más capacidad de rendimiento que el producto A, esto a su vez se traduce en una disponibilidad superior y un desempeño más fiable.

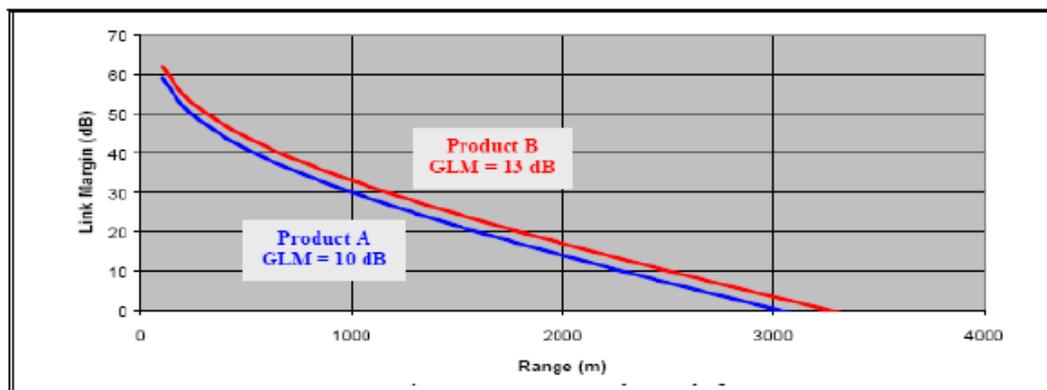


Figura 2.8a Margen de enlace vs alcance para 10dB/km de atenuación

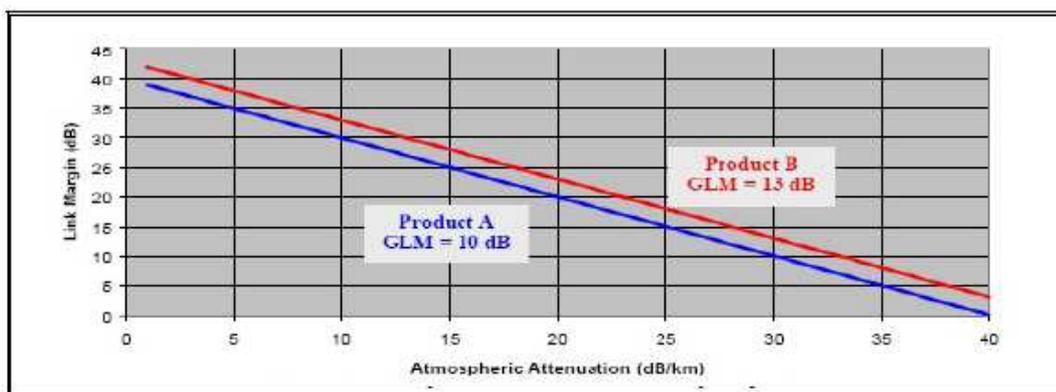


Figura 2.8b Margen de enlace vs Atenuación para 1Km de alcance

La Tabla 2.5 muestra los valores del **GLM** de varios productos, los cuales se encuentran disponibles en el mercado, en esta comparación se considera que no tienen pérdidas ópticas.

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

Tabla 2.5 Calculo del **GLM** para varios productos

2.5 FACTORES QUE AFECTAN LOS SISTEMAS FSO

Incluso una atmósfera limpia y clara está compuesta de moléculas de oxígeno, nitrógeno y gran cantidad de vapor de agua. Pueden existir otros tipos de componentes especialmente en lugares contaminados. Estas partículas pueden dispersar o absorber los fotones que están propagándose en la atmósfera (Figura 2.9). Debido a esto se debe tomar ventajas de una ventana atmosférica óptima escogiendo una longitud de onda adecuada.

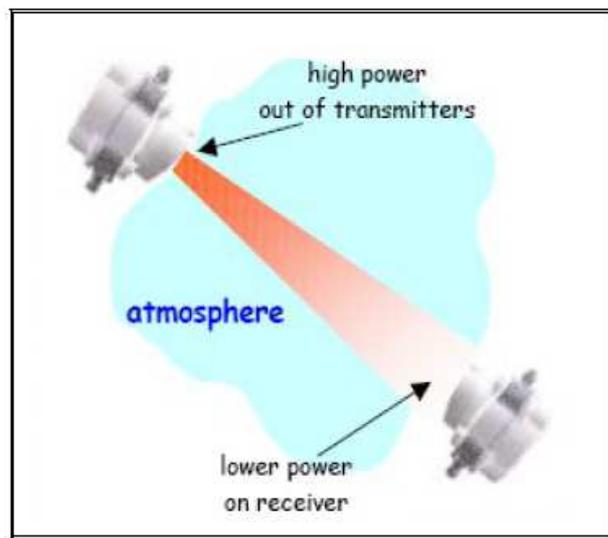


Figura 2.9 Pérdida de potencia de la señal en la atmósfera

Para asegurar un valor mínimo de atenuación, ya sea por dispersión o absorción, los sistemas **FSO** operan en la ventana atmosférica en el rango de los infrarrojos, por lo que los equipos disponibles comercialmente operan en una ventana cerca de la región del infrarrojo localizada alrededor de los 850 nm y 1550 nm. Otras ventanas existen en rangos de longitud de onda entre 3-5 μm y 8-14 μm ; sin embargo el uso comercial de estos equipos es limitado por la disponibilidad de dispositivos, componentes y dificultades relacionados con la implementación.

2.5.1 ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA

La atenuación atmosférica es descrita por la “Ley de Beer-Lambert”, la cual describe la atenuación de la luz viajando a través de la atmósfera debido a la absorción y dispersión.

Esta ley es usada para determinar la longitud máxima del enlace. La ley de Beer está dada por la siguiente expresión:

$$\frac{P_R}{P_O} = \tau(R) = e^{-\gamma R} \quad (2.8)$$

Donde:

$\tau(R)$: transmitancia a la distancia R

$P(R)$: potencia del láser a la distancia R

$P(0)$: potencia del láser en la fuente

γ : coeficiente total de atenuación (m^{-1})

El coeficiente de atenuación es la suma de cuatro parámetros individuales y cada uno de estos está en función de la longitud de onda. El coeficiente de atenuación está dado por:

$$\gamma = \sigma_m + \alpha_a + \beta_m + \beta_a \quad (2.9)$$

Donde:

σ_m : coeficiente de absorción molecular

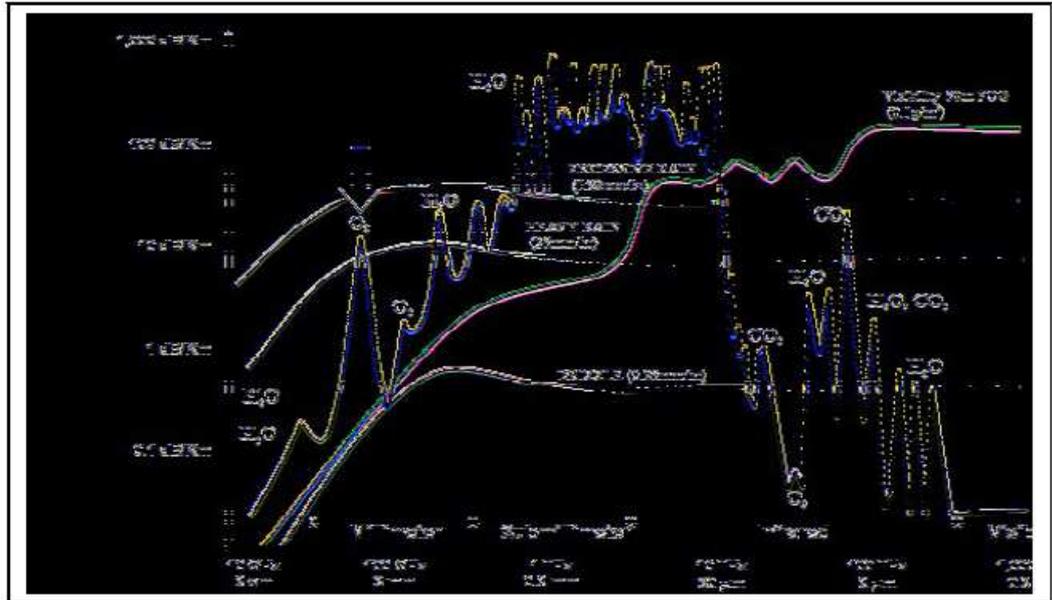
α_a : coeficiente de absorción de aerosol

β_m : coeficiente de dispersión de molecular

β_a : coeficiente de dispersión de aerosol

La Ecuación 2.9 muestra la atenuación total, representado por el coeficiente de atenuación, que resulta de varios procesos simultáneos de dispersión y absorción.

En la Figura 2.10 se puede observar la atenuación debido a la presencia de varias especies absorbentes, tales como el H₂O, O₂, CO₂.



Por otro lado el coeficiente de atenuación está en función de la visibilidad. Por lo tanto, la forma de calcular el coeficiente de atenuación atmosférico es muy fácil y esta dado por la Ecuación 2.10 para una longitud de onda dada; la cantidad de atenuación depende sólo de la visibilidad

$$\gamma = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550 \text{mm}} \right)^{-\delta} \quad (2.10)$$

Donde:

γ : coeficiente de atenuación atmosférica

V : visibilidad en km

λ : longitud de onda

δ : distribución del tamaño de las partículas dispersas

1.6 para alta visibilidad ($V > 50 \text{ Km.}$)

1.3 para visibilidad media ($6 \text{ Km} < V < 50 \text{ Km}$)

$0.585 V^{1/3}$ para visibilidad baja ($V < 6 \text{ km}$)

2.5.1.1 Absorción Atmosférica

La abundancia de especies absorbentes determina en qué medida la señal puede atenuarse, estas especies pueden descomponerse en dos clases: absorción por aerosoles y absorción molecular.

La absorción por aerosol incluye partículas sólidas dispersadas finamente y partículas líquidas como gotitas de agua, hielo, polvo y materiales orgánicos, las cuales varían en un tamaño de 20 μm de radio.

La absorción molecular es causada por diversas sustancias (gases) que se encuentran en la atmósfera, las cuales absorben ciertas bandas específicas de frecuencia del espectro electromagnético. Las moléculas que tienen mayor absorción en la banda del infrarrojo son el agua, CO_2 , ozono y O_2 .

La Figura 2.11 muestra el espectro de transmisión cuando el cielo está despejado con una concentración de aerosol urbana normal que proporciona una visibilidad de 5 km, cuyo calculo incluye la absorción por vapor de agua, dióxido de carbono, etc.

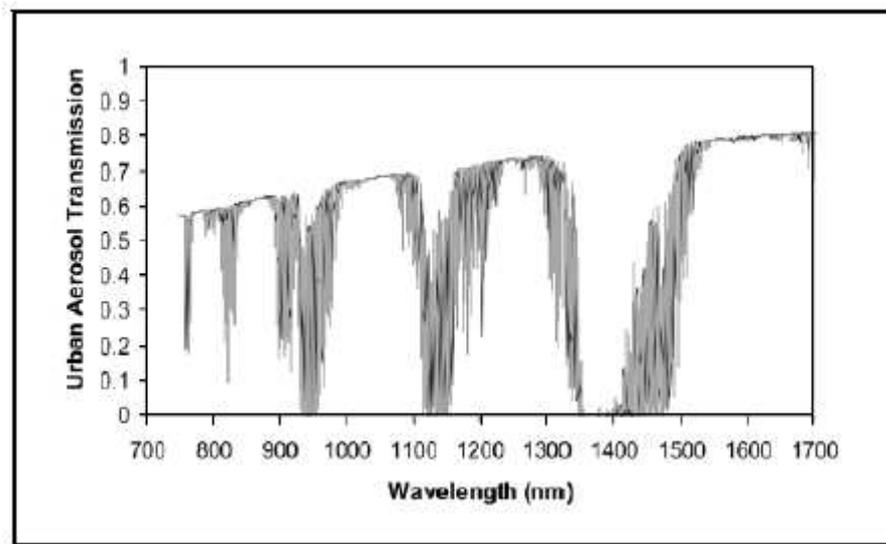


Figura 2.11 Transmisión en función de la longitud de onda en una zona urbana con concentración de aerosol normal en un cielo despejado

En la Figura 2.12 se muestra la transmisión en un cielo claro y despejado, donde el vapor de agua domina en dicha transmisión. Un número grande de líneas contribuyen a un espectro complicado con ventanas ocasionales a frecuencias de 850 y 1550 nm. La Figura 2.13 muestra la transmisión con dióxido de carbono donde se sobreponen picos ocasionales.

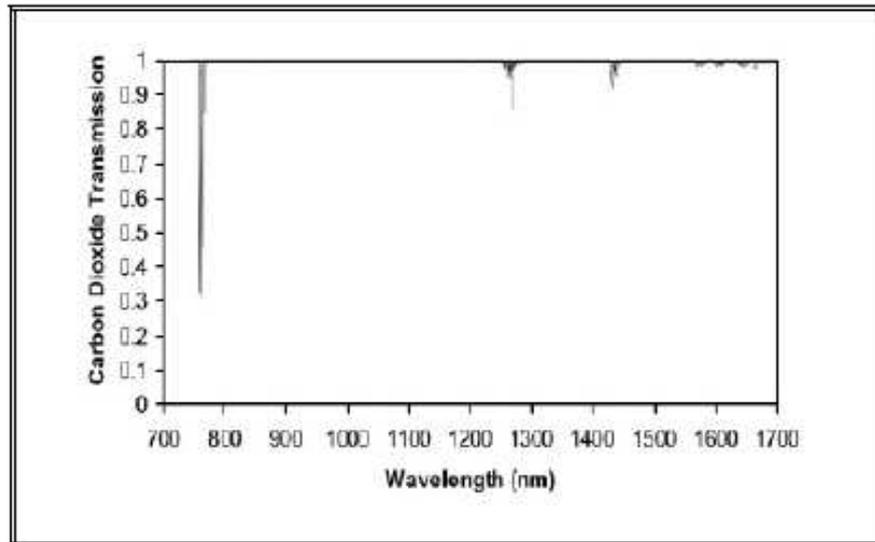


Figura 2.12 Transmisión en un cielo claro en función de la longitud de onda

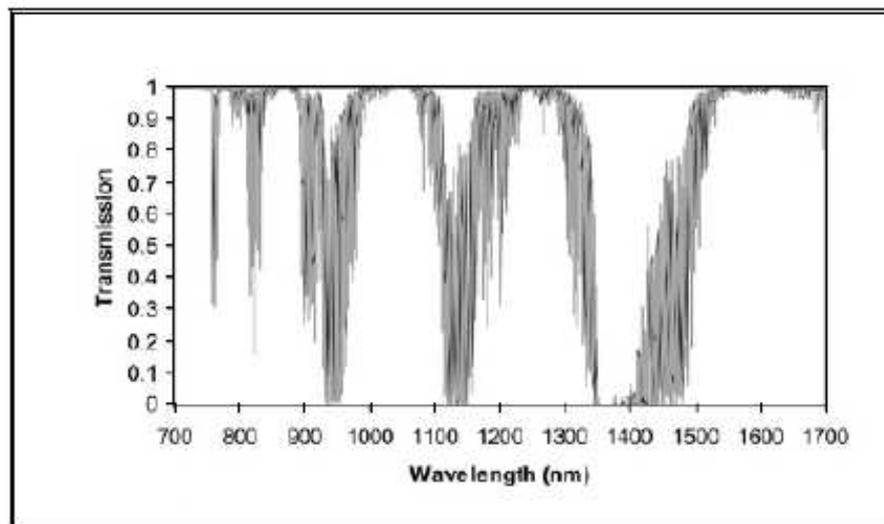


Figura 2.13 Transmisión en un ambiente con dióxido de carbono en función de la longitud de onda

Diversas partículas que se encuentran en la atmósfera absorben bandas específicas de frecuencias del espectro electromagnético, llamadas ventanas, las mismas que

actúan como filtros y crean las “ventanas atmosféricas”, a través de las cuales la energía puede pasar (Figura 2.14).

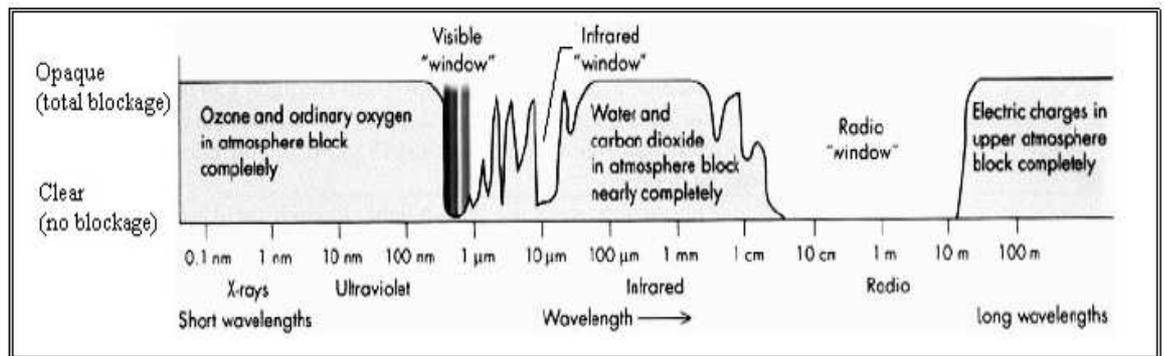


Figura 2.14 Ventanas atmosféricas

La ventana atmosférica usada más comúnmente por **FSO** está en el rango de los infrarrojos, las partículas absorbentes más comunes son: agua, dióxido de carbono y ozono. La vibración y rotación de estas partículas son capaces de absorber muchas bandas. La región que va desde 0.7-2.0 μm está dominada por la absorción del vapor de agua y la región que va desde 2.0-4.0 μm es dominada por la absorción de la combinación de agua y dióxido de carbono. Cabe destacar que la absorción atmosférica no tiene grandes efectos sobre los sistemas **FSO**.

2.5.1.2 Dispersión Atmosférica

La dispersión atmosférica es el resultado por el cual pequeñas partículas que se encuentran en la atmósfera hacen que la luz del haz se propague en cualquier dirección. La dispersión representa una redistribución espacial de la energía. La dispersión atmosférica es una función de la longitud de onda de la radiación y del tamaño (diámetro) de las partículas presentes atmósfera. La luz dispersa puede impactar drásticamente en el desempeño de los sistemas **FSO**.

Hay dos tipos principales de dispersión atmosférica: dispersión de Rayleigh y dispersión de Mie.

Dispersión De Rayleigh

La radiación incidente en los electrones de un átomo o molécula provocan un desequilibrio por lo tanto los dipolos oscilan a la frecuencia de la radiación incidente, esta oscilación de los electrones re-radian luz en forma de una onda dispersa. La formula de Rayleigh para la dispersión en una superficie transversal es la siguiente:

$$\sigma_s = \frac{fe^4 \lambda_o^4}{6\pi \epsilon_o^2 m^2 c^4} \frac{1}{\lambda^4} \quad (2.11)$$

Donde:

σ_s : coeficiente de dispersión

f : frecuencia del oscilador

e : carga del electrón

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

ϵ_o : constante dieléctrica

c : velocidad de la luz

m : masa de la entidad oscilante

Partículas tales como polvo u hollin provocan la dispersión, estas partículas tienen un diámetro más pequeño que la longitud de onda de la radiación (Figura 2.15). La intensidad de la dispersión varía con λ^{-4} , donde λ es la longitud de onda. Este tipo de dispersión es responsable por el color azul del cielo.

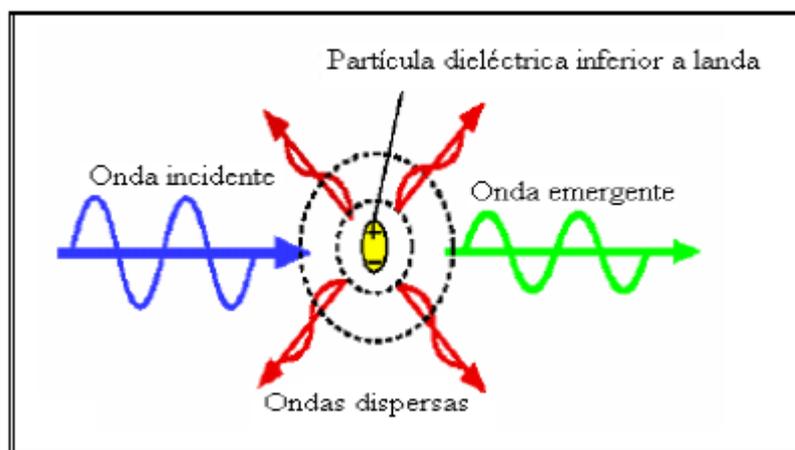


Figura 2.15 Dispersión de Rayleigh en pequeñas partículas

Sin embargo para los sistemas **FSO** que operan a longitudes de onda cerca del rango de los infrarrojos, el impacto de la dispersión de Rayleigh en la transmisión de la señal se puede omitir. La Figura 2.16 muestra la dependencia de la longitud de onda con la dispersión en una sección transversal en la región infrarroja del espectro electromagnético.

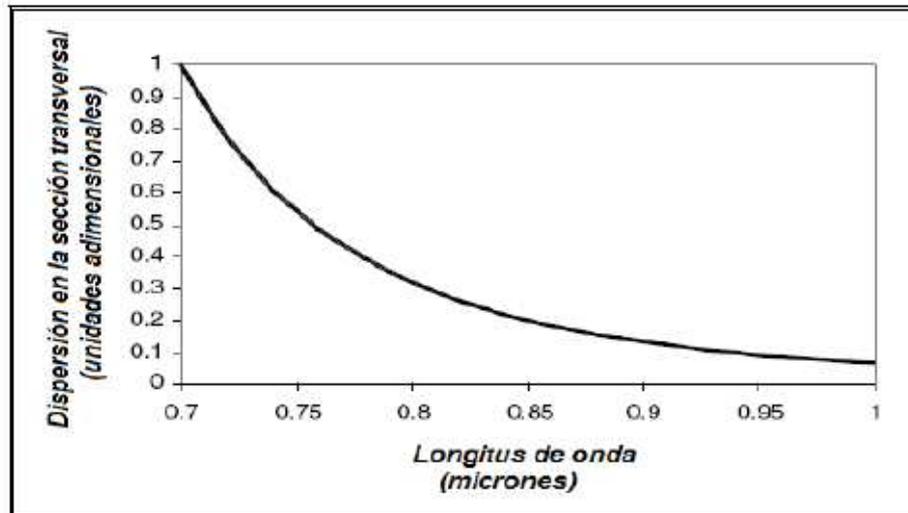


Figura 2.16 Dispersión de Rayleigh vs longitud de onda

Dispersión de Mie

La dispersión de Mie ocurre cuando las partículas suspendidas en la atmósfera tienen un diámetro igual o mayor que la longitud de onda de radiación. Este tipo de dispersión no es muy dependiente de la longitud de onda de la radiación; sin embargo, en rangos de longitudes de onda cerca de la región de los infrarrojos la niebla, neblina y partículas por contaminación de aerosoles son principales contribuyentes de la dispersión de Mie. Este tipo de absorción domina la mayor parte del espectro.

La partícula esparcida tendrá una sección transversal efectiva, la que variara dependiendo del tamaño del parámetro:

$$\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (2.12)$$

y la diferencia del índice de refracción entre la partícula dispersa y el aire.

Donde:

r : radio de la partícula dispersa

λ : longitud de onda del láser.

La Tabla 2.6 muestra partículas comunes las cuales se encuentran típicamente dispersas en la atmósfera con su radio y el valor respectivo del parámetro α , para diferentes longitudes de onda del láser.

Tipo de partículas	Radio (μm)	Valor del parámetro α	
		785nm	1550nm
Moléculas de aire	0.0001	0.0008	0.0004
Neblina	0.01 a 1	0.08 - 8	0.04 - 4

Niebla	1 a 20	8 - 160	4 - 80
Lluvia	100 - 10000	800 - 80000	400 - 40000
Nieve	1000 - 5000	8000 - 40000	4000 - 20000
Granizo	5000 - 50000	40000 - 800000	20000 - 400000

Tabla 2.6 Partículas dispersas en la atmósfera con su respectivo radio y parámetro α

La Figura 2.17, muestra las correspondientes regiones donde se produce la dispersión de Rayleigh, dispersión de Mie y dispersión Geométrica, para distintas longitudes de onda y el valor del parámetro α .

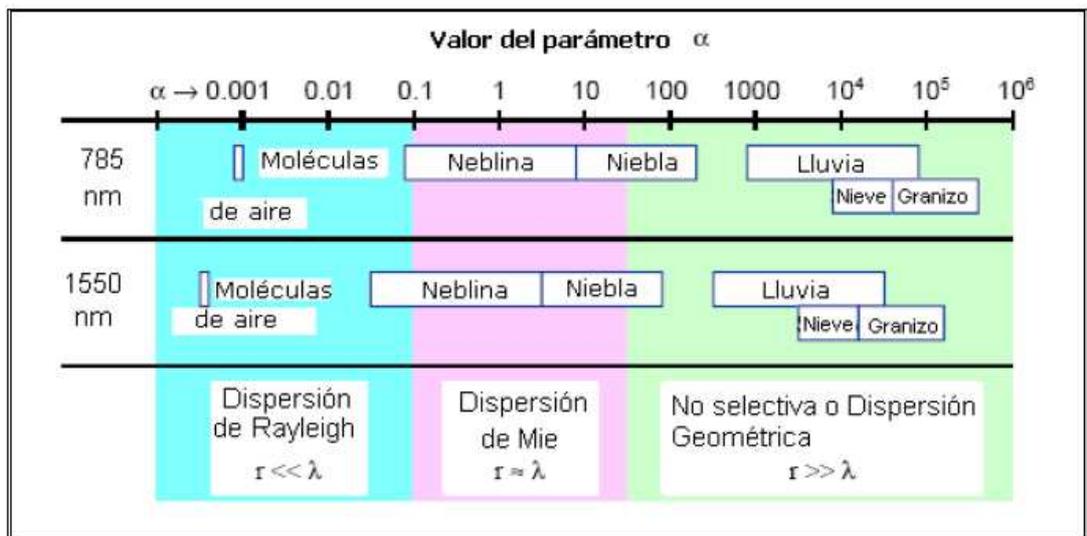


Figura 2.17 Dispersiones vs. Longitudes de onda y el valor del parámetro α

Las longitudes de onda que usan los sistemas **FSO** comparadas con el valor promedio del radio de las partículas de neblina y niebla son aproximadamente iguales. Por esta razón la niebla es el principal enemigo del haz de luz, las partículas de lluvia, nieve y granizo son partículas mucho más grandes y por lo tanto presentan menos obstáculo al haz.

Para los sistemas **FSO**, el funcionamiento en ambientes de niebla pesada requiere distancias cortas entre los terminales de los equipos, para mantener niveles altos de disponibilidad. El margen de potencia de enlace de un equipo que ofrecen los fabricantes permite tener disponibilidades el 99.99% si se guardan distancias debajo de los 200 m.

2.5.2 TURBULENCIA

El desierto podría parecer la situación perfecta para el funcionamiento de un sistema **FSO**. Sin embargo, el calor, el clima seco, la fuerza de la turbulencia causan problemas en la transmisión. Debido al calor del suelo causado por el sol intenso, las corrientes de aire, causan un cambio en el índice de refracción, lo que provoca que la luz que viaja cambie mientras está se propaga a través del aire.

Estas corrientes de aire no son estables en el tiempo, el cambio del índice de refracción aparece según el movimiento del aire el cual es impredecible.

El haz del láser experimenta dos efectos debido a la turbulencia, el primero es la desviación del haz y el otro efecto se genera por cambio de fase el cual varía produciendo intensas fluctuaciones o cintilación.

Una buena medida de la turbulencia es la estructura del coeficiente del índice de refracción, C_n^2 . Debido a que el aire necesita tiempo para calentarse, la turbulencia es típicamente más fuerte en el medio de la tarde ($C_n^2=10^{-13}$ m^{-2/3}) y

más débil una hora después de la salida del sol u ocaso ($C_n^2=10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$). C_n^2 normalmente es más grande cerca de la tierra, disminuyendo con la altitud.

Para minimizar los efectos de cintilación en el camino de la transmisión, los sistemas **FSO** no pueden ser instalados cerca de superficies calientes, por ejemplo en techos de alquitrán se puede experimentar altos valores de cintilación en días calientes de verano por lo que no es aconsejable la instalación en estos lugares.

2.5.2.1 Desviación del Haz

El haz puede ser desviado al azar debido a los cambios del índice de refracción. Este fenómeno se conoce como desviación del haz, debido a la refracción a través del aire, similar a lo que sucede cuando la luz pasa a través de otra clase de medio refractivo, como un lente de vidrio. La luz puede o no ser enfocada de acuerdo a como se presentan cambios en el camino de transmisión del índice.

La desviación de los rayos es causada por remolinos turbulentos que son más grandes que el haz. Cuando estos remolinos son más pequeños que el haz, el resultado es llamado esparcimiento de haz de corto término.

Estas fluctuaciones son mucho más pequeñas que los rayos desviados y típicamente no afecta la integridad del sistema.

2.5.2.2 Cintilación

La cintilación o centelleo es definida como las variaciones temporales y espaciales rápidas y de pequeña escala en el índice de refracción de la atmósfera causada por turbulencia en la atmósfera. Índices aleatorios de refracción se crean por estas fuentes de turbulencia, que incluyen viento y gradientes de temperatura formados

por bolsas de aire que se desarrollan a partir de las diferencias en la temperatura con densidades variadas.

Una onda óptica frontal viajando a través de turbulencia atmosférica podría llegar deformada debido a que las bolsas de aire actúan como prismas y lentes.

Como resultado de la cintilación ocurre una fluctuación temporal de la intensidad del haz en el receptor, estas fluctuaciones se las pueden comparar con el parpadeo de una estrella distante (Figura 2.18).

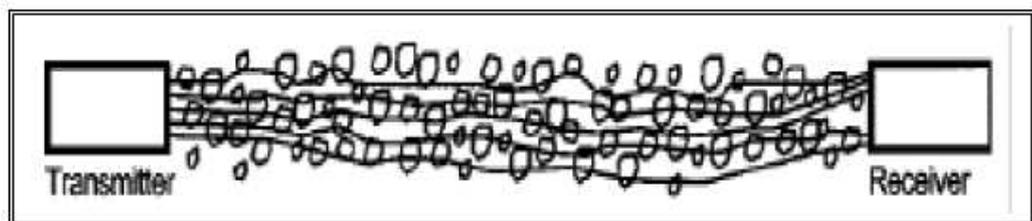


Figura 2.18 Efectos de la cintilación

Una forma de combatir el centelleo, es transmitir información redundante sobre enlaces separados espacialmente (Figura 2.19), donde los cuatro haces se empiezan a solapar a 100 m de distancia, dicha redundancia mejora el alcance y la disponibilidad.

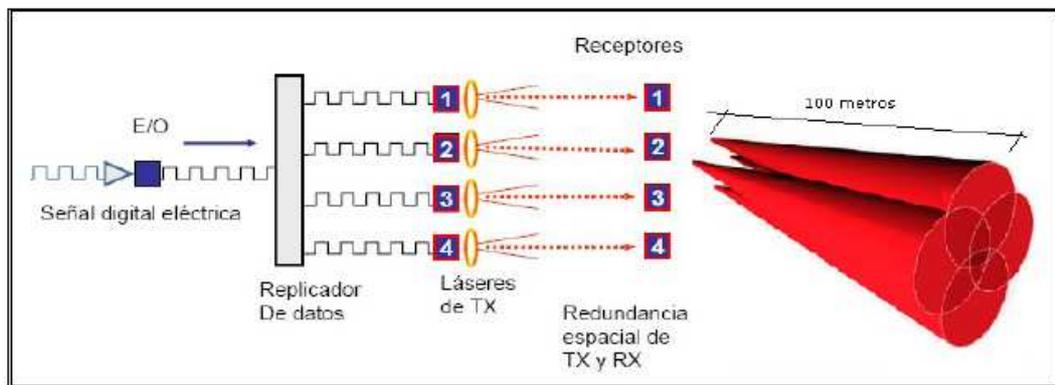


Figura 2.19 Sistema de redundancia para transmitir información

Debido a que la cintilación decrece con la altitud es recomendable la instalación un lugar alto sobre la azotea (>4 pies) y no en el borde de la pared.

2.5.3 IMPACTO DEL CLIMA

La principal desventaja de los sistemas **FSO** es la vulnerabilidad a efectos climáticos tales como es la niebla, neblina, lluvia, etc. Debido a que la tecnología **FSO** se basa en la transmisión de señales ópticas en el espacio, los haces transmitidos van a atenuándose de acuerdo a la severidad del clima. Tales efectos pueden reducir la disponibilidad en el sistema e introducir errores, hasta la indisponibilidad total del enlace.

2.5.3.1 Lluvia

El impacto de la lluvia es significativamente menor que la niebla, esto es porque la gota de lluvia tiene un radio aproximado de 200-2000 μm que es representativamente más grande que la longitud de onda de una fuente de luz de un sistema **FSO**. La atenuación causada por la lluvia depende de la naturaleza de la misma. Por ejemplo, para una precipitación de 2.5 cm/hora la atenuación de la señal es 6 dB/km; por consiguiente los sistemas **FSO** disponibles comercialmente operan con un margen de enlace de 25 dB y así la lluvia puede caer sin obstaculizar la transmisión. Otro ejemplo es cuando un sistema se lo despliega sobre distancias de 500 m bajo las mismas condiciones de lluvia. La atenuación aquí es solamente de 3 dB. Sin embargo, cuando el ritmo de la lluvia incrementa dramáticamente a un nivel mayor a 10 cm/hora, entonces ahí la atenuación llega a ser un problema crítico, aún en cortas distancias; sin embargo, este tipo de torrenciales duran un corto periodo de tiempo.

Un punto interesante que cabe mencionar son las tecnologías inalámbricas **RF** las cuales usan frecuencias sobre los 10 GHz, los cuales son impactados por la lluvia y tienen poco impacto por la niebla. Esto debido a la igualdad de la longitud de las ondas **RF** con las gotas de lluvia y ambos son más grandes que las gotas

húmedas de niebla. Las frecuencias de 2.4Ghz y 5 Ghz las cuales no son licenciadas, no son afectadas por la lluvia ni la niebla.

2.5.3.2 Nieve

Los copos de nieve son cristales de hielo que tienen una variedad de formas y tamaños. El tamaño de la nieve es más grande que la lluvia, pero en condiciones atmosféricas, donde la nieve cubre las superficies, restringiendo la visibilidad grandemente, la atenuación puede incrementarse. Pero la dispersión por la nieve no tiende a ser un gran problema en los sistemas **FSO**, porque el tamaño de los copos de nieve son grandes comparados con la longitud de onda en las que trabajan. El impacto de una ligera ventisca de nieve y una lluvia ligera con un poco de niebla es una atenuación de aproximadamente 3 dB/km a 30dB/km respectivamente.

2.5.3.3 Niebla

La niebla es el fenómeno climático más perjudicial para los sistemas **FSO** porque está compuesto de gotas de agua pequeñas que tienen un radio aproximadamente igual a la longitud de onda de una fuente de luz. En condiciones climáticas donde existe presencia de niebla los rangos de visibilidad están entre 0-2000 m. Cuando la visibilidad es mayor a los 2000 m la condición climática a menudo se la denomina bruma.

En la Figura 2.20 se ilustra los efectos de la niebla en función de la visibilidad en un edificio en Denver Colorado, cuyo alto es aproximadamente 300 m. En la fotografía de la izquierda se puede divisar claramente el edificio debido a que el día está claro y despejado donde la pérdida es 6.5 dB/km con un rango de visibilidad de 2000 m, en la fotografía del medio existe la presencia de niebla ligera donde la pérdida es de 150 dB/km con un rango de visibilidad de 113 m, en cuyo caso el edificio todavía es visible a 300 m de distancia y en la fotografía de la

derecha la niebla es sumamente espesa por lo que el edificio ya no se lo puede visualizar en este caso la pérdida es de 225 dB/km con un rango de visibilidad de 75 m.

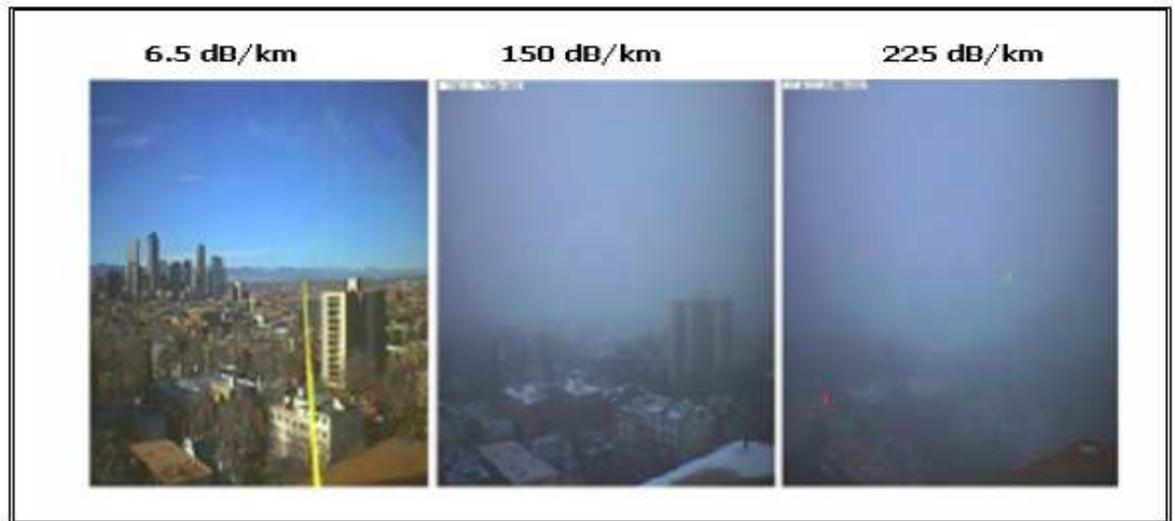


Figura 2.20 Visibilidad vs Rango de visibilidad en la presencia de niebla

En la Tabla 2.7 se relaciona la visibilidad con los diferentes tipos de condiciones climáticas. La dispersión es uno de los principales factores que se presentan bajo condiciones de niebla, incluso una niebla ligera puede atenuar a la señal sobre distancias cortas. La distribución de las partículas de niebla puede variar también de acuerdo a la altura. La atenuación en una distancia dada se mide en dB/km y su correlación con la visibilidad se muestra en la Tabla 2.7, que también ilustra claramente que la lluvia tiene menor impacto en el camino.

Condiciones climáticas	Precipitación		Visibilidad	Pérdida [dB/km]	Rango de Enlace
	mm/hr				

Niebla densa			0 m		0 m	
			50 m	-315.0	110 m	
Niebla espesa	↑ N I E V E ↓			200 m	-75.3	330 m
Niebla moderada			500m	-28.9	610 m	
Niebla ligera	Aguacero	100	770m	-18.3	780 m	
			1 km	-13.8	880 m	
Neblina tenue	Lluvia dura	25	1.9 km	-6.9	1.02 km	
			2 km	-6.6	1.03 km	
Neblina	Lluvia moderada	12.5	2.8 km	-4.6	1.08 km	
			4 km	-3.1	1.13 km	

Neblina ligera	Lluvia ligera	2.5	5.9 km	-2.0	1.18 km
			10 km	-1.1	1.22 km
Cielo despejado	Llovizna	0.25	18.1 km	-0.6	1.25 km
			20 km	-0.54	1.26 km
Cielo muy claro			23 km	-0.47	1.26 km
			50 km	-0.19	1.28 km-4km

Tabla 2.7 Códigos de visibilidad internacionales para varias condiciones climáticas y precipitaciones

La escasa visibilidad decrementará la eficiencia y la disponibilidad de los sistemas **FSO**, la misma que puede darse durante periodos específicos de tiempo ya sea en un año o tiempos definidos del día. Por ejemplo, en horas específicas en la mañana, especialmente en áreas costeras, la poca visibilidad puede ser un fenómeno localizado por la niebla costera.

Una solución para este impacto negativo de baja visibilidad es colocar a corta distancia los terminales para mantener una disponibilidad estadística específica. Esto provee un mayor margen de enlace para manejar las malas condiciones del clima, como una densa niebla. Un camino redundante puede proveer una mejor disponibilidad si la visibilidad es limitada u otra solución es usar un sistema de haz múltiple para mantener una alta disponibilidad del enlace.

La escasa visibilidad y coeficientes de dispersión altos son los factores más limitantes para el despliegue de los sistemas **FSO** sobre grandes distancias. El impacto local de niebla en la disponibilidad de sistemas de **FSO** es ciertamente uno de los desafíos más grandes para la comunidad **FSO**.

2.5.4 LÍNEA DE VISTA

El único requisito esencial para la transmisión inalámbrica óptica es línea de vista entre los dos puntos del enlace. La operación de los sistemas **FSO** requieren línea de vista, lo que significa que el transmisor y el receptor que están en ubicaciones diferentes se puedan ver. Debido a que el haz infrarrojo se propaga en modo lineal, el criterio de línea de vista es menos estricto comparado a los sistemas de microonda, los cuales requieren un camino despejado debido a que se deben tomar en cuenta las zonas de Fresnel.

2.5.4.1 Determinación de la Línea de Vista

La manera más fácil de averiguar si existe línea de vista entre dos sitios remotos es la observación visual. Para distancias mayores a una milla la determinación de línea de vista no es trivial, la utilización de lentes y telescopios podría ser necesaria en esta situación, muchos fabricantes incorporan un telescopio de alineación entre los equipos terminales para lograr esta tarea, algunos fabricantes prefieren el uso más sofisticado de mapas y trazado de mapas. Estos mapas tienen información con respecto a edificaciones con su ubicación específica lo cual determina si existe línea de vista entre dos sitios conocidos.

Aunque terraza con terraza es uno de los escenarios más típicos para la instalación de equipos **FSO**, también es posible la ubicación de transceivers junto a las ventanas en construcciones donde el acceso a la terraza no es posible. Sin embargo, el ángulo que el haz hace con la ventana es crítico, debido a que el ángulo si es posible debe ser perpendicular, aún ligeramente orientado 5 grados para evitar el rechazo del haz del propio receptor. A otro ángulo ninguna luz se transmitirá en absoluto. También algunas ventanas contienen un cristal o una capa de cristal que reducen la luz intensa, por eso estas ventanas son a menudo diseñadas específicamente para rechazar los rayos infrarrojos. Las capas pueden

reducir la señal en un 60% o aun más. A veces las instalaciones en las ventanas no son una buena alternativa ya que los equipos no pueden mantenerse tan estables.

2.5.5 ANCHO DE BANDA

En los sistemas **FSO** con norma **O-E-O** (Óptico- Eléctrico-Óptico), existen dos elementos los cuales limitan en ancho de banda en todo el sistema. Estos elementos son la fuente de transmisión y el foto-detector. Los láseres directamente modulados operan a velocidades sobre 2.5 Gbps, los cuales están comercialmente disponibles para el uso en sistemas **FSO**. A velocidades superiores a 10 Gbps se pueden usar moduladores externos en la fuente láser. Con respecto al foto-detector los diodos **PIN** y **APD** soportan velocidades de 1.25 Gbps y están comercialmente disponibles. Los detectores de InGaAs se usan en la banda de 1.5 μm de longitud de onda. Existen detectores comercialmente disponibles que soportan velocidades de 10 Gbps para usarse en sistemas **FSO**; sin embargo, a altas velocidades la cantidad de luz que puede ser recogida por el receptor y convertida en electrones es extremadamente baja y la sensibilidad del receptor llega a estar en función de la velocidad de transmisión. Los índices típicos de sensibilidad son: -43 dBm a 155 Mbps y -34 dBm a 622 Mbps, cuando los alcances de los sistemas llegan a su límite de sensibilidad, el ruido térmico impacta el **BER**.

2.5.6 SELECCIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA

Para la selección de la mejor longitud de onda para el uso de en los sistemas de comunicación **FSO**, se debe considerar varios factores. Primeramente se debe considerar que la longitud de onda seleccionada no sea fuertemente absorbida en la atmósfera. La dispersión de Mie no es un factor dominante, aunque la atenuación en las señales **IR** a través de la atmósfera es considerable; sin embargo, aplicaciones en áreas urbanas con altos contenidos de aerosol pueden beneficiar ligeramente a diferentes longitudes de onda. Otro problema se da cuando se trabaja

con longitudes de onda cercanas a los 1550 nm, debido a que las agencias reguladoras tienen un límite de potencia en los láseres para la protección del ojo humano. Otra desventaja de este tipo de láser es el costo, en comparación con láseres que operan a longitudes de onda de alrededor de 850 nm.

Escoger una correcta longitud de onda para la transmisión involucra muchos factores como es la disponibilidad de los componentes, precio, distancia requerida, seguridad del ojo. El funcionamiento en ventanas de transmisión de longitud de onda más grande entre 3-5 μm y 8-14 μm , también se ha sugerido por la comunidad **FSO**, debido a sus excelentes características de transmisión por la atmósfera. Sin embargo, estudios recientes dicen que los coeficientes de dispersión de Mie en el medio infrarrojo sugieren que no existen ventajas en el uso de longitudes de onda **IR** más grandes como 3.5 μm . En cambio, con longitudes de onda en el rango de 850 o 1550 nm las pérdidas de dispersión se neutralizan. También, la disponibilidad de los componentes como fuentes de luz y detectores son muy limitados. El ruido térmico el cual es más alto en medios infrarrojos comparado con longitudes de onda más cortas, impacta en la sensibilidad y consecuentemente en el desempeño del sistema.

2.6 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS FSO

Las características que cualquier equipo **FSO** debe ofrecer para tener un alto desempeño son las siguientes:

2.6.1 DISPONIBILIDAD DE ENLACE Y CONFIABILIDAD

Según la implementación y sitio de instalación se pueden lograr altos niveles de desempeño y disponibilidad hasta de 99.999 % aún en condiciones climáticas desfavorables y sin tener que sacrificar la distancia del enlace. La implementación de varios transmisores (tres láseres por terminal) y de receptores de alta

sensibilidad permiten obtener disponibilidades de 99 % para atenuaciones de 17 dB/Km.

Los equipos que se ofrecen en el mercado han sido probados para asegurar una confiabilidad excepcional. Cada subsistema es sometido a pruebas rigurosas de laboratorio y se les realiza pruebas de desempeño en temperaturas extremas desde los -50°C a 75°C . Cada uno de los láser del equipo cuenta con un sistema independiente de enfriamiento activo, cuya función es mantener el láser en su temperatura óptima de operación, de esta forma se asegura el mejor desempeño del equipo y se alarga el tiempo de vida de estos.

Los equipos son probados para ser montados en el exterior o interior. Es por esto que el chasis del equipo está hecho de aluminio fundido el cual sella completamente el equipo y le da un alto nivel de robustez para que pueda ser instalado y manipulado sin llegarle a causar daño alguno y poder operar en ambientes con niveles de extrema humedad.

2.6.2 SEGURIDAD

La seguridad óptica inalámbrica presenta muchas fortalezas las cuales se derivan de la naturaleza inalámbrica del canal, los pequeños terminales y del confinamiento cerrado del haz transmitido.

Un transmisor adecuadamente diseñado podría tener una divergencia de haz tan pequeña como un miliradian, sin lóbulos laterales y comenzar con un diámetro de haz de tan solo unos pocos centímetros. Es así como un haz podría expandirse tan solo un metro después de un kilómetro de camino.

El haz podría ser totalmente bloqueado por cualquier pared, de manera que la única manera de interceptar el enlace, es introduciendo un receptor dentro del camino

óptico del haz. Dependiendo de la ubicación, esto podría ser muy difícil de realizar, y más aun, de realizarlo de manera encubierta. En este proceso, existe un alto riesgo de afectar la transmisión de manera inversa mediante el bloqueo de la misma, llamando la atención del administrador del sistema debido a la operación de un intruso.

La intercepción de un sistema **FSO** operando con un haz limitado en el rango de las longitudes de onda del espectro infrarrojo es sumamente difícil. Recoger la señal desde un lugar que no se encuentra directamente ubicado dentro del camino de la luz, usando fotones de luz dispersados de un aerosol, nieve o partículas de lluvia que se pueden presentar en la atmósfera, es virtualmente imposible debido a los extremadamente bajos niveles de potencia infrarroja que son utilizados durante el proceso de transmisión **FSO**. La principal razón para excluir esta posibilidad de intrusión, es el hecho de que la luz es dispersada isotrópicamente y estadísticamente en direcciones diferentes del camino de propagación original.

Este mecanismo de dispersión específico, mantiene el número total de fotones o la cantidad de radiación que potencialmente puede ser recolectada a través de un detector que no está directamente colocado dentro del camino del haz, más allá del nivel de ruido del detector. Por lo tanto, las comunicaciones ópticas inalámbricas ofrecen un grado de seguridad de canal relativamente alto.

2.6.3 SEGURIDAD VISUAL EN EL USO DE LÁSER Y EQUIPOS INALÁMBRICOS

Todos los fabricantes emplean transmisores de láser, motivo por el cual, muchas preocupaciones han aparecido en relación a los riesgos potenciales para todo aquel que se encuentre en el camino del haz emitido.

A diferencia de las microondas y las ondas de radio frecuencia, las ondas ópticas que inciden sobre una persona, generalmente no penetran, ni se disipan en el interior del tejido corporal. Cuando estas ondas inciden en el tejido de una persona, este absorbe su potencia dado que el nivel de energía de la irradiación de un sistema óptico inalámbrico es siempre menor al del sol, ya que se encuentra contenido en el infrarrojo, y no en el ultravioleta.

Una excepción importante la constituyen los ojos. La pupila proporciona una ventana al interior del ojo, por lo que cualquier nivel de energía óptica que pase a través de ella, generalmente terminará siendo absorbido y disipado en la retina, en el fondo del ojo. La retina es un área sumamente sensitiva del ojo, y puede ser dañada por luz muy fuerte.

Se debe tomar en cuenta la longitud de onda que opera el láser, debido a que ciertas longitudes de onda (entre 400 nm y 1550 nm) pueden penetrar el ojo con la intensidad suficiente para dañar la retina. La cantidad de energía que el ojo puede tolerar sin sufrir daño varía según la longitud de onda. Esto está determinado por la absorción de luz por parte del agua (el componente principal del ojo) en distintas longitudes de onda. La Figura 2.21 muestra la respuesta del ojo a distintas longitudes de onda.

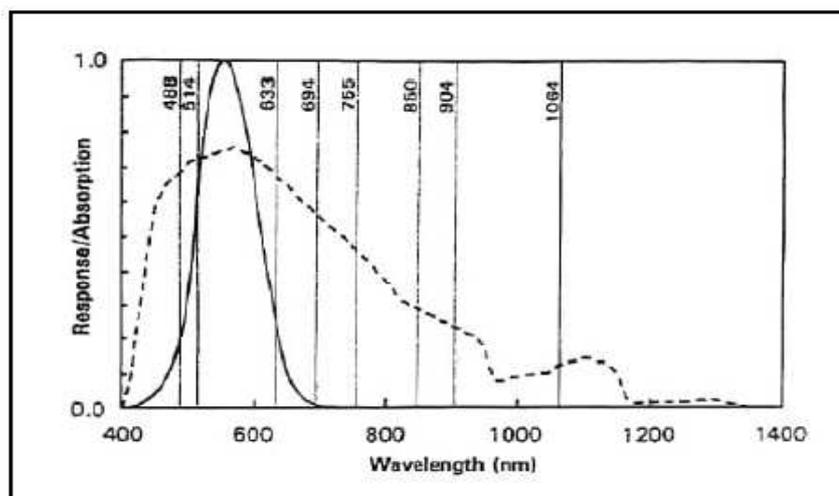


Figura 2.21 Absorción vs Longitud de Onda en el ojo humano

La línea sólida refleja la región visible y la línea punteada muestra la respuesta total a través de cercanas ondas del infrarrojo. En la Figura 2.22, la línea superior muestra que el fluido vítreo es transparente en longitudes de onda de los 400 nm a los 1400 nm. En todo caso, en el lejano infrarrojo (1400 nm y más) dicha luz no es transmitida por el fluido vítreo, por lo cual la energía tiende menos a ser transferida a la retina.

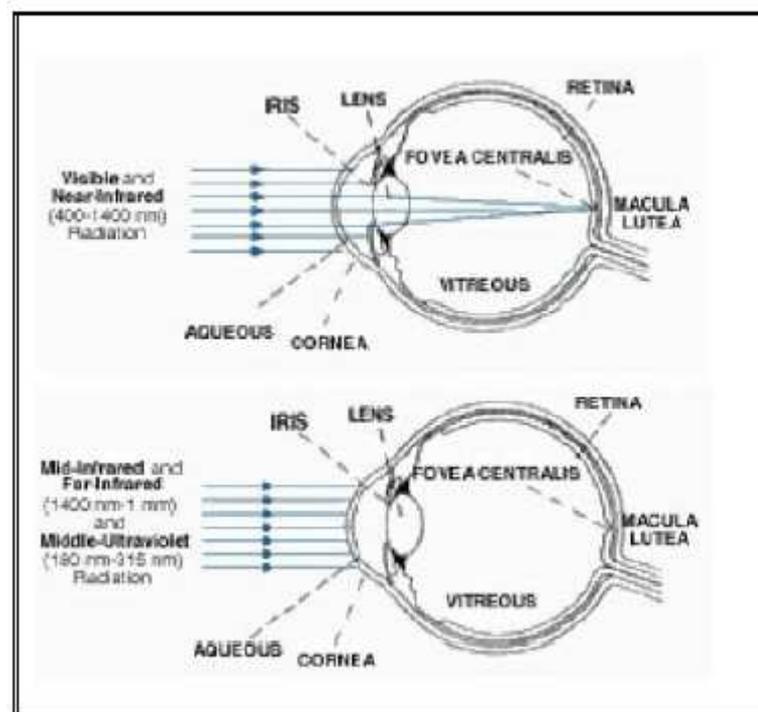


Figura 2.22 Efecto de la longitud de onda sobre el fluido vítreo

El láser es especialmente peligroso porque crea luz con un solo modo espacial. La potencia del láser dentro de un haz, puede ser enfocada hacia el límite más bajo de resolución del ojo, si este es enfocado en la distancia.

La iluminación láser es adicionalmente complicada por la naturaleza coherente y la mancha enfocada es similar a una serie de anillos concéntricos brillantes y oscuros con la intensidad de las partes brillantes siendo mayor que la intensidad promedio.

La exposición de la pupila al haz de un láser puede provocar lesiones graves en la retina, debido al calentamiento en regiones localizadas, lo que puede llevar a daños

permanentes en la vista en forma de manchas oscuras o puntos de ceguera. En la práctica esto no ocurre en forma tan grave, dado que ninguna persona puede mantener su vista absolutamente constante, el ojo siempre es sujeto de pequeños movimientos involuntarios, que pese a ser imperceptibles, son lo suficientemente continuos para desenfocar la región de la retina del láser.

2.6.3.1 Estándares y normas de seguridad

La seguridad en el uso del láser y el uso apropiado del mismo ha constituido una fuente de discusión y esfuerzos de estandarización desde que los dispositivos aparecieron por primera vez en los laboratorios, hace más de dos décadas atrás.

Las dos preocupaciones principales típicamente son:

- La exposición del ser humano a las emisiones de láser (lo cual representa mucho mayor riesgo para los ojos que para cualquier otra parte del cuerpo humano).
- Altos voltajes contenidos en los sistemas láser y sus reservas de energía.

La duración de la exposición y la energía del láser deben ser consideradas cuidadosamente. Un láser de alta potencia, puede producir un daño distinto de aquel causado por emisiones continuas de baja energía. Por ejemplo, una sola pulsación de gran energía que dure menos que un microsegundo puede causar daño permanente, mientras que una emisión de menor energía, presenta daño sólo en casos de exposición prolongada desde una distancia muy corta. Además, el área de la fuente de láser (diámetro del lente) y la distancia con relación al láser, reducen la densidad de energía del láser, disminuyendo, por tanto, el riesgo potencial para los ojos. El Centro Nacional de Dispositivos y Salud Radiológica, parte de la Administración de Alimentos y Medicinas, de los Estados Unidos, ha establecido

dichos estándares y los demás países cuentan con sus propios estándares, basados en las recomendaciones de la Comisión Internacional Electrónica. (**IEC**, 1984).

Los láseres son clasificados en distintas clases definidas por dos órganos de estandarización. En general, ambos órganos separan a los láseres en clases, las cuales están definidas por distintos parámetros como longitud de onda, potencia promedio en intervalo específico de tiempo, pico de potencia en un pulso, intensidad del haz, y las distancias desde el láser.

La **FDA/CDRH** y la **IEC** dividen al láser en cuatro clases diferentes que van desde la I a la IV, siendo la clase IV la más potente. Adicionalmente, algunas de estas clases numéricas fueron divididas en subgrupos caracterizados por una letra alfabética, por ejemplo, Clase IIIA y Clase IIIB. Aunque la **FDA/CDRH** y la **IEC** (bajo el estándar IEC608205-1) tienen un esquema de clasificación levemente diferente, la nomenclatura resulta ser bastante similar. A manera de ejemplo, se observa como la Clase IIIA cubre las longitudes de onda infrarrojas de acuerdo con la regulación **IEC** 60825-1, mientras que de acuerdo al estándar de la **FDA/CDRH**, solo las longitudes de onda arriba de los 700 nm son cubiertas. En ambos estándares, también existen algunas diferencias leves, en cuanto a que se requieren bloqueos de llave, inter- bloqueos remotos u obturadores uniformes para el caso de sistemas láser de laboratorio o de alta potencia industrial.

Esta regulación, considera especialmente el hecho de que en los sistemas **FSO**, la potencia no es emitida por una fuente puntual. En estos sistemas, la potencia siempre es emitida desde lentes de gran diámetro, y no desde el punto estrecho del diámetro como sucede en una fuente láser típica. Para el caso de los sistemas de **FSO**, solo se utilizan la Clases I y Clase **1M** pertenecientes a los estándares **IEC** 60825-1 de clasificación para bajas potencias.

Clase 1: Láser emitiendo dentro del rango de los 302.5 nm a los 4000 nm que es seguro bajo condiciones razonablemente previsibles para todas las operaciones, incluyen el uso de instrumentos ópticos.

Clase 1M: Láser emitiendo dentro del rango de los 302.5 nm a los 4000 nm que es seguro bajo condiciones razonablemente previsibles pero que puede ser peligroso si el usuario emplea instrumentos ópticos dentro del haz. Este tipo de láser tiene dos condiciones:

- a) Para un haz divergente, si el usuario coloca componentes ópticos a 100 mm de la fuente para concentrar el haz.
- b) Para un haz con un diámetro mayor que el diámetro especificado en la Tabla 2.8 para mediciones de radiación y exposición radiante.

En la siguiente tabla, se muestran las limitaciones de potencia de acuerdo con el estándar **IEC 60825-1**, para los sistemas láser de Clase 1 y Clase 1M. Esto, para las bandas de transmisión de los 850 y 1550 nm.

Longitud de Onda	Clase de láser	Potencia [mW]	Tamaño de apertura [mm]	Distancia [mm]	Densidad de potencia (mW/cm ²)
850nm	CDRH Clase 1 (antigua)	0.76	7.0	200	0.20
			50.0		
	IEC Clase 1 (antigua)	0.44	50.0	100	0.02
	IEC Clase 3A (antigua)	2.20	50.0	100	0.11
	IEC/CDRH Clase 1 (nueva)	0.44	7.0	100	0.14
		0.78	7.0	14	2.03
		0.78	50.0	2000	0.04
		0.78	7.0	100	2.03
	IEC/CDRH Clase 1M (nueva)	500.00	7.0	14	1299.88
		500.00	50.0	2000	2548
IEC/CDRH Clase 3R (nueva)	3.90	7.0	14	10.14	
1550nm	CDRH Clase 1 (antigua)	0.79	7.0	200	2.05
			50.0		
	IEC Clase 1 (antigua)	10.00	5.0	100	0.51
	IEC Clase 3A (antigua)	500.00	50.0	100	2.55
		9.60	3.5	100	99.83
	IEC/CDRH Clase 1 (nueva)	10.00	7.0	14	26.00
		10.00	25.0	2000	2.04
	IEC/CDRH Clase 1M (nueva)	10.00	3.5	100	103.99
		500.00	7.0	14	1299.88
		500.00	25.0	2000	101.91
	IEC/CDRH Clase 3R (nueva)	50.00	7.0	14	129.99
		50.00	25.0	2000	10.19

Tabla 2.8 Clasificación de la potencia del láser según normas **IEC** y **CDRH**

Los límites de potencia y sus densidades correspondientes, se muestran en las columnas 3 y 6 respectivamente. En la columna 3, se muestra el nivel de potencia que es permitido (para la longitud de onda especificada) y para el tamaño de apertura mostrado en la columna 4. En esencia, el haz del láser es dirigido a la apertura (normalmente una placa con un hoyo en el medio). La distancia específica para un diámetro de apertura dado se muestra en la columna 5. Por ejemplo, para una longitud de onda de 850 nm y de acuerdo al estándar **IEC** Clase 1M (nuevo), a un dispositivo le es permitido tener 0.78 Mw de potencia total irradia a través de una apertura de 7 mm que se encuentra localizada a 100 mm de la apertura de transmisión.

Además de cumplir con las regulaciones existentes, se pueden tomar medidas adicionales para minimizar la exposición potencial a una irradiación infrarroja. Algunas de ellas son:

- . Limitar la potencia de salida.
- . Usar múltiples fuentes de transmisión.
- . Minimizar el acceso al láser.
- . Disponer de etiquetas de seguridad visual apropiadas.
- . Proveer indicadores visibles para el status on/off del láser.
- . Aprovechamiento para el inter- bloqueo remoto de potencia.
- . Sistemas de control apropiadamente ubicados.
- . Uso de procedimientos de alineación seguros.
- . Entrenamiento a los usuarios acerca de los procedimientos de instalación y mantenimiento adecuados.

2.6.4 TOPOLOGÍAS PARA ENLACES FSO

Un punto muy importante en el diseño de los enlaces **FSO** es el tipo de topología que va a ser desplegada en el diseño de una red. La tecnología **FSO** ha sido diseñada para operar en cualquier topología de red, tal como: punto-punto, punto-multipunto, malla, anillo y anillo con estribaciones, tal flexibilidad permite crecer a la red según la demanda y lo más importante a velocidades de la fibra óptica.

2.6.4.1 Topología malla

Una red en configuración malla (Figura 2.23) es una serie de nodos dispersos que son conectados con algún grado de redundancia. En una red en malla completamente interconectada, cada nodo es conectado con todos los demás nodos.

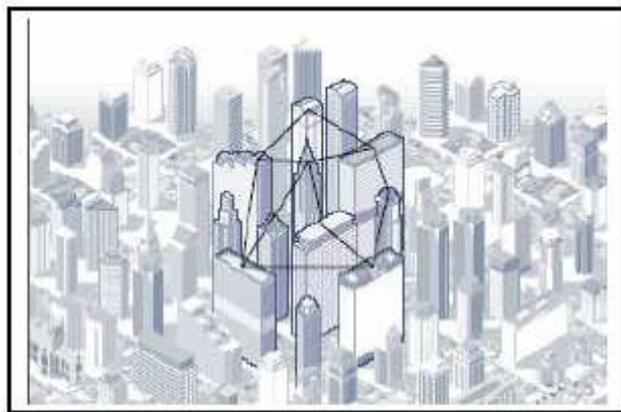


Figura 2.23 Arquitectura en Malla

Usualmente, cuando una red está siendo configurada, el nivel de redundancia determina el grado de no conectividad en una malla. Muchas redes **SDH** son un subtipo de una malla, llamadas arquitecturas de anillo con redundancia.

2.6.4.2 Topología anillo con estribaciones

Esta topología es usada mayoritariamente por los proveedores de servicios metro. En esta topología, anillos de alta velocidad se establecen en representación del núcleo, ya sea basado en fibra o en Free-Space-Optics.

En una arquitectura de anillo (Figura 2.24), se pueden conectar sub-anillos través de un enrutador de capa 3. Los clientes que son parte de un anillo son protegidos desde un solo punto de falla en la red. Cuando un nuevo cliente debe ser adherido a la red se establece un nuevo enlace desde un nodo en el anillo de backbone, llamado estribación.

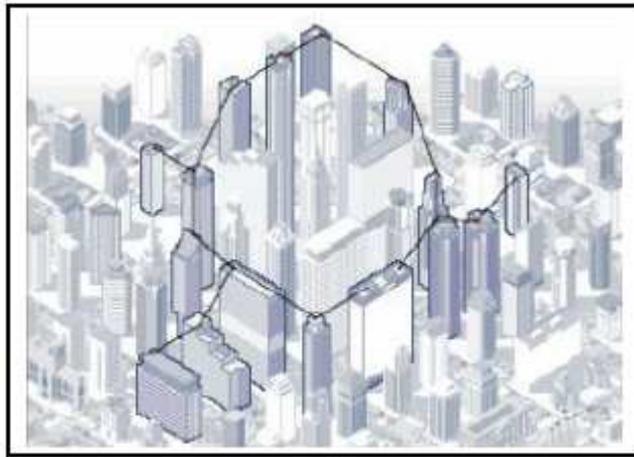


Figura 2.24 Arquitectura anillo con estribaciones

Si el cliente desea pagar por redundancia, la estribación puede ser conectada con otro nodo en la red formando un nuevo anillo. De esta manera, el proveedor de servicios brinda esencialmente un nivel de redundancia para el usuario terminal de acuerdo a sus requerimientos de disponibilidad de servicio.

2.6.4.3 Topología estrella

Esta topología consiste en múltiples enlaces originados desde un solo nodo. Existen varios métodos que pueden ser usados para lograr este tipo de arquitectura usando **FSO**. Sin embargo, el método más efectivo consiste en conectar cada enlace **FSO** con un dispositivo de capa dos o tres ubicado en un edificio cercano. Los enlaces son acoplados por fibra al switch o al router y colocados en ubicaciones arbitrarias, ya sea en el techo del edificio o en el interior de un cuarto o una oficina.

La ventaja de esta técnica es que cada puerto en el switch o en el router puede ser individualmente provisionado con una velocidad de datos específica modelando un convenio de nivel de servicio con el usuario terminal. Este método representa la manera más flexible de distribuir datos desde un solo punto a múltiples puntos (Figura 2.25).

Existen tendencias a sectorizar un haz óptico para servir a más de un cliente a la vez desde un solo nodo, como se ha hecho con los sistemas de distribución local multipunto (**LMDS**). Esta tendencia es restringida por la limitación de potencia

impuesta por las agencias de regulación del láser como la **IEC** y la **CDRH**, que es la sección ejecutiva de la **FDA**.

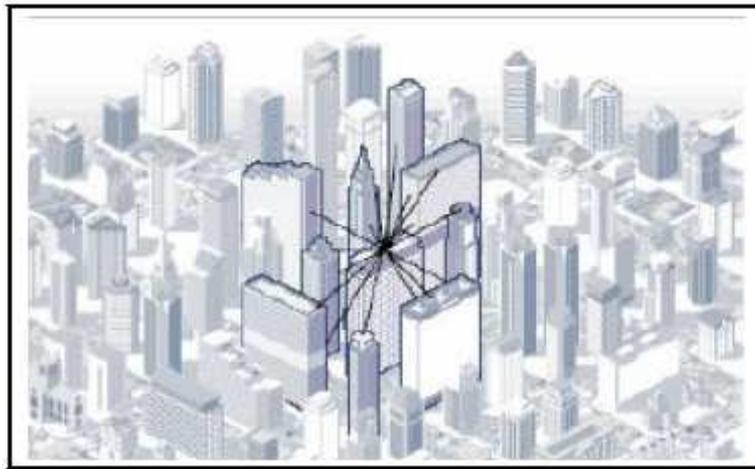


Figura 2.25 Arquitectura en estrella

2.6.4.4 Topología punto a punto

Esta topología se la utiliza en donde se requiere crear enlaces extensos los cuales podría exceder el rango límite del producto **FSO** o las condiciones climáticas recomendadas para distancias de enlaces ópticos. En estos casos, varios enlaces punto a punto pueden ser conectados sin ningún equipo intermedio para crear un enlace de fibra entre uno o más puntos (Figura 2.26).

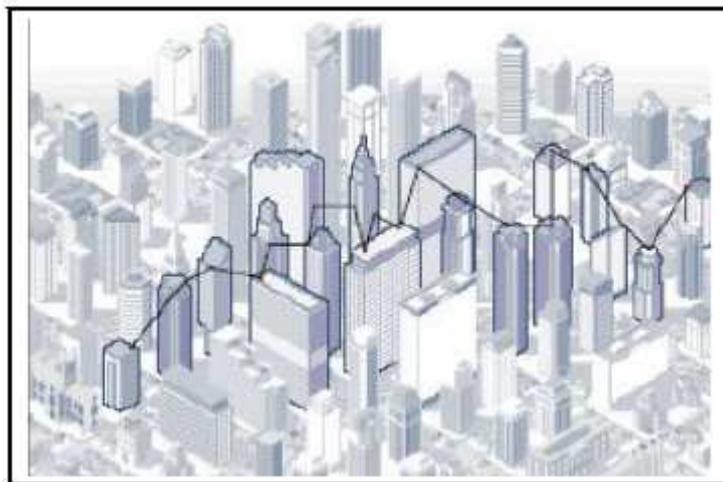


Figura 2.26 Arquitectura de varios enlaces punto a punto

2.6.5 ESCALABILIDAD

Esto es a menudo deseable para un operador que deja que la demanda del mercado marque el paso de la construcción de la red, en vez de instalar toda la infraestructura de red antes de adquirir sus clientes.

En los sistemas **FSO** se implementa solo el equipamiento absolutamente necesario para comenzar a ganar clientes. En la medida que nuevos clientes se incorporan al sistema, el equipamiento para soportarlos es instalado, y no antes. Este sistema basado en la demanda, reduce el gasto de capital requerido para hacer crecer la base de clientes y permite que los proveedores de servicio comiencen inmediatamente a recobrar los costos asociados al desembolso de capital para el equipamiento de la red. Usando este sistema, la red puede continuar creciendo de una forma prudente mientras el número máximo de usuarios se va añadiendo para la estructura de backbone planeada.

2.6.6 INDEPENDENCIA DE PROTOCOLOS

Los equipos **FSO** operan en la capa física o capa 1 del modelo **OSI**. Un enlace **FSO** puede utilizarse en conjunto con multiplexores para el traspaso de tramas de voz, datos y video de forma simultánea. Dependiendo del tipo de servicios, la conexión al receptor se proporciona sobre cobre (para interfaces como E1, Ethernet o Fast Ethernet) o sobre fibra óptica (para servicios como **ATM** o **SDH**).

Los equipos **FSO** entregan una interfaz física la cual es una fibra óptica y esta es conectada al equipo terminal. Las características de la interfaz física puede variar dependiendo del modelo, por lo tanto se pueden usar en equipos **FSO** los mismos modelos de equipos terminales que se usan cuando comúnmente se instala una fibra óptica. Inclusive, es posible extender un largo trayecto de fibra hasta de 2 Km a partir del equipo **FSO** sin necesidad de instalar repetidores.

2.6.7 DISTANCIA DE ENLACES VARIABLES Y VELOCIDADES DE DATOS

Las áreas metropolitanas son redes “caóticas” de edificios irregularmente espaciados y de distintos tamaños. Se necesita de gran cantidad de equipamiento para manejar las distintas velocidades de datos y distancias requeridas para el cliente metropolitano.

Algunos fabricantes ofrecen productos que se encuentran en el rango desde los 50 m hasta los 4000 m y soportan tasas de datos desde los 10 Mbps hasta los 2.5 Gbps; y ya trabajan en el desarrollo de **DWDM**, que podría manejar un throughput (volumen de trabajo o de información que fluye a través de un sistema) de 10 Gbps. Muchos factores vistos anteriormente pueden afectar el rendimiento, entre ellos, cintilación, absorción, esparcimiento, desvío y esparcimiento del haz y la vibración de los edificios.

2.7 APLICACIONES DE FSO

La transmisión de señales ópticas en el espacio libre cada vez juega un papel más importante en la provisión de comunicaciones de banda ancha en entornos empresariales e inalámbricos. Con la tecnología **FSO** es muy sencillo y rápido proporcionar comunicación fiable de banda ancha a pequeñas distancias. Por ser una tecnología libre de licencias gubernamentales y no requiere permiso de operación, los diseñadores están utilizando las redes **FSO** como herramienta integral para la conectividad, aprovechando las importantes ventajas en términos de tiempo y costo. Entre las principales aplicaciones de **FSO** están:

2.7.1 INTERCONEXIÓN EMPRESARIAL

Las empresas utilizan enlaces ópticos inalámbricos de alta seguridad para interconectar edificios, oficinas aisladas, etc. Contando con un enlace de alta velocidad no se genera cuello de botella en el transporte de información, logrando tener un alto desempeño y con una gran variedad de servicio como:

. Conexión de redes **LAN - LAN, MAN - LAN**, entre otros

- . Servicio de video conferencia de alta calidad
- . Transmisión de base de datos a alta velocidad.

FSO ofrece transmisión de alta velocidad igual que la fibra óptica pero a más bajo costo, con la ventaja que el enlace puede ser reubicado de forma rápida y sencilla en caso de surgir esta necesidad. En la Figura 2.27 se muestra un ejemplo de conexión **FSO** de oficinas de dos empresas ubicadas en edificios cercanos con línea de vista despejada.



Figura 2.27 Enlace **FSO** entre dos oficinas

2.7.2 REDES METROPOLITANAS

FSO brinda servicios de telecomunicaciones en aquellos casos en donde no se tenga alcance de la fibra óptica, con la ventaja de prestar el servicio en un tiempo muy corto. Al igual que la fibra óptica es posible implantar topología de bus y anillo en donde el equipo terminal utilizado puede ser el mismo que se emplea en los enlaces de fibra óptica.

La alta disponibilidad de estos enlaces puede ser usada para cerrar anillos de fibra óptica, como respaldo o para reducir el número de nodos que forman parte del anillo **SDH** y así disminuir el jitter generado. En la Figura 2.28, se muestra un ejemplo.

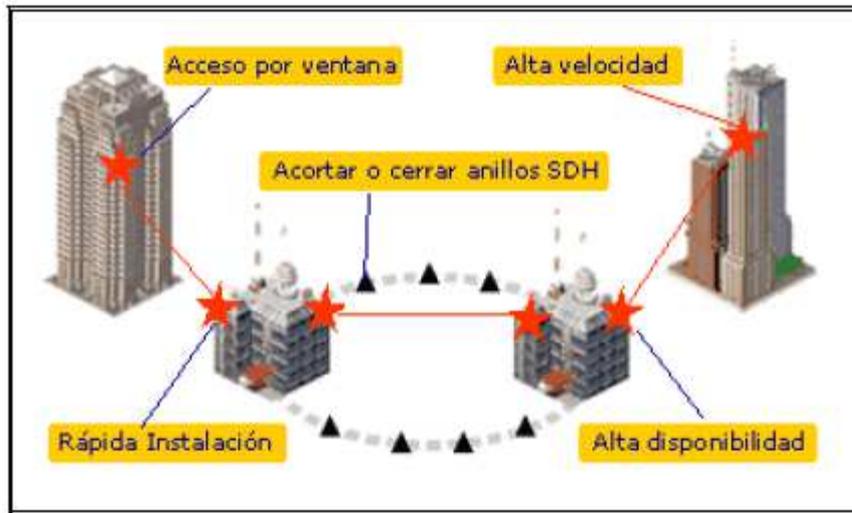


Figura 2.28 Un enlace **FSO** dentro de una **MAN**

2.7.3 APLICACIONES CELULARES

Mientras las redes celulares crecen y existen nodos fuera del alcance del cable de fibra óptica, o el espectro electromagnético se encuentra saturado, **FSO** ofrece una solución económica para llegar a sitios donde posiblemente la infraestructura no permita implantar cableados. Producto de los requerimientos de servicios de voz y videoconferencia, el ancho de banda requerido en las radio bases es cada vez mayor. La tecnología de **FSO** ofrece enlaces de $nxE1$ y pueden crecer hasta 155 Mbps (**STM 1**) y 622 Mbps (**2 STM1**) sin necesidad de cambiar el equipo de transmisión. También se pueden enlazar nodos de forma directa y de esta forma evitar la interconexión con terceros. Se pueden implantar enlaces híbridos con radios o **RF**. Como se muestra en la Figura 2.29.

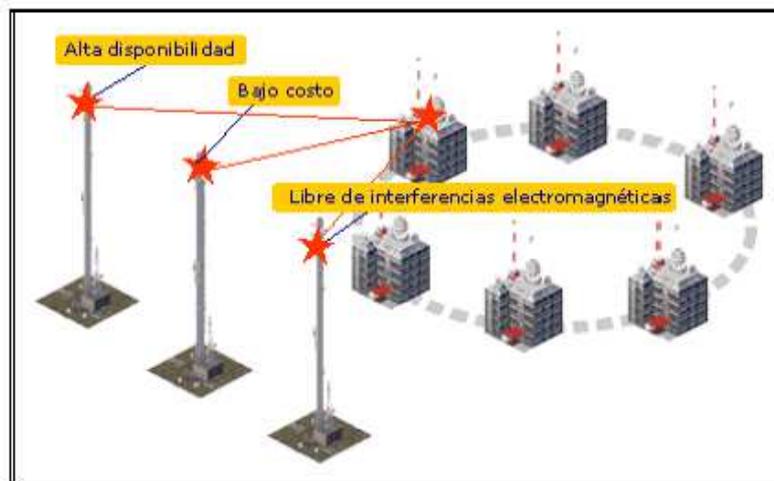


Figura 2.29 Enlace Celulares híbridos

2.7.4 REDES POR TELEVISIÓN POR CABLES

Servicios Premium por cable como Internet a alta velocidad y telefonía generan altas ganancias a operadores de televisión por cable, pero generalmente es necesario contar con redundancia en la red para así poder proveer un nivel de calidad de servicio aceptable.

Los enlaces ópticos permiten este tipo de redundancia de una forma económica, protegiendo así los sistemas de distribución por cable, cerrando anillos e incluso permite contar con enlaces paralelos en la red. En la Figura 2.30 se presenta un ejemplo.

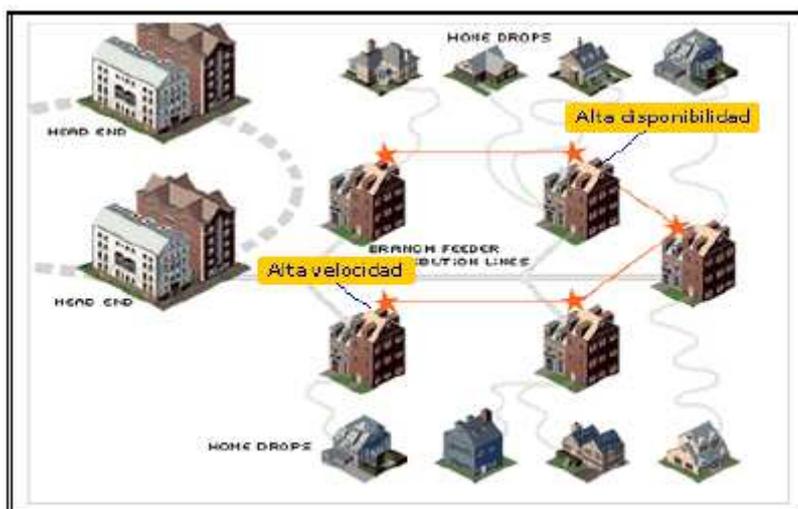


Figura 2.30 Enlace de televisión por cable con redundancia FSO

2.7.5 REDES DE TELECOMUNICACIONES

La tecnología FSO permite maximizar la utilización de los anillos metropolitanos instalando enlaces laterales hacia edificios que se encuentran fuera del enlace (Figura 2.31) a un costo bajo y un ancho de banda de alta capacidad.

Los enlaces de FSO pueden funcionar como un respaldo de los enlaces de radio ya que, a diferencia de los radios, estos son menos susceptibles a eventos climatológicos como la lluvia.

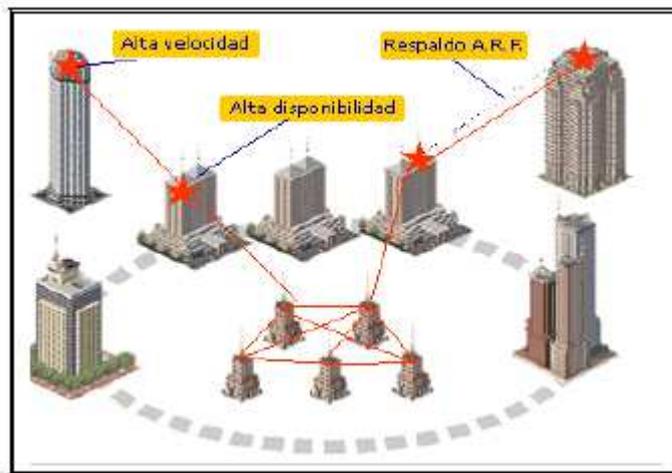


Figura 2.31 Maximización en un enlace de telecomunicaciones con el uso de **FSO**

2.7.6 ISP

FSO permite ofrecer servicios de Internet de alta velocidad al usuario final, en caso de que no se cuente con acceso por azotea es posible conectar el equipo por una ventana (Figura 2.32). También es posible conectar un equipo concentrador de servicio **ICD**, enrutador, etc. Para ofrecer servicios a varios usuarios que se encuentran dentro de un mismo edificio.



Figura 2.32 Enlaces **FSO** dentro de un **ISP**

2.8 DEMANDA Y COMERCIALIZACIÓN DE FSO

Esta sección discute algunos de los factores que habilitarán el crecimiento de **FSO** y donde puede existir un potencial mercado para dicha tecnología.

La aceptación que está teniendo **FSO** cada vez va en aumento, por lo tanto es importante conocer la demanda en el mercado y la comercialización de la tecnología **FSO**, la misma que es manejada por varios factores (Figura 2.33) que se analizan a continuación.

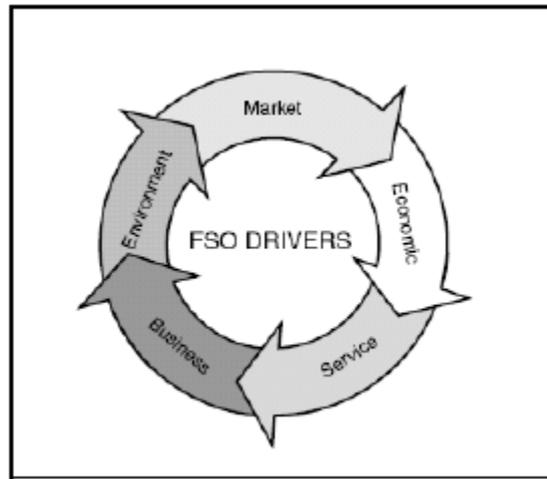


Figura 2.33 Factores que impulsan el crecimiento de **FSO**

Economía:

Los factores económicos tienen un impacto en el crecimiento de la rentabilidad de una compañía o empresa.

- Reducción de costos: **FSO** ofrece la oportunidad de reducir los costos inmediatamente a los proveedores de servicios. La razón simple es que **FSO** ofrece conectividad sin los gastos asociados con la fibra.
- Ultra- escalabilidad de ancho de banda: Con una tecnología escalable que generalmente cubre 1 Mbps a 2.5 Gbps, **FSO** ofrece un rango de velocidades suficiente para satisfacer las necesidades de cualquier cliente.
- Tiempo de instalación: La instalación fácil y el despliegue rápido de productos de **FSO** permite a los proveedores ofrecer todos los servicios en cuestión de horas. Sin duda esta gran ventaja hace que esta tecnología sea realmente competitiva en el ultra-competitivo mercado actual.

Servicio:

Los factores de servicio son los que contribuyen a la flexibilidad de **FSO**, por la facilidad de integración con el usuario.

- La simplicidad de la red, es decir existen menos elementos en la red
- Con las necesidades cambiantes de los clientes y los modelos de tráfico imprevisibles, los proveedores de servicios necesitan la habilidad de provisionar tecnologías rápidamente de acuerdo a la demanda.

Negocio:

- **FSO** puede ayudar a los proveedores de servicios a acelerar la extensión y el despliegue de sus redes ópticas metropolitanas.
- En este ambiente competitivo y dinámico, **FSO** ofrece una herramienta que ayuda a los proveedores de servicios a ser competitivos frente a otras tecnologías.
- Con las economías crecientes alrededor del mundo se ha creado una necesidad definida por una plataforma del alto ancho de banda. **FSO** ofrece una oportunidad única con su tecnología de licencia-libre, junto con su solución económica para satisfacer esas necesidades.

Entorno ambiental:

El excavado en las calles para la instalación de la fibra puede causar inconvenientes, debido a que se debe atravesar por sitios ajenos, pagando así grandes sumas por el alquiler de los mismos y en casos más extremos no tener que conseguir el permiso de utilización en propiedades privadas.

Tecnología:

La Internet se ha vuelto una parte integrante del negocio de hoy en día. En consecuencia con el crecimiento de la Internet surge la necesidad de una conectividad de alto ancho de banda.

En conclusión los componentes básicos de la tecnología **FSO** son las fuentes de luz, un sistema para dirigir y enfocar dicha luz, un receptor y componentes que se encargan de la conversión eléctrica y óptica. La tecnología **FSO** la cual se basa en la transmisión de luz a través de la atmósfera como medio de transmisión, no requiere licencia de operación, eliminando así costos al no requerir una frecuencia licenciada y es totalmente inmune a interferencias radioeléctricas o electromagnéticas.

Esta tecnología tiene factores que limitan su desempeño, como es el caso de condiciones climáticas propias de cada ciudad, se debe tomar en cuenta principalmente la nieve y la lluvia, y con estos parámetros diseñar enlaces con distancias apropiadas para que la comunicación no sea deficiente.

¿Qué es la comunicación óptica inalámbrica?

La comunicación óptica inalámbrica, también denominada comunicación óptica de espacio abierto, consiste en el uso de enlaces ópticos entre puntos ubicados ya sea dentro de la atmósfera terrestre o en el espacio exterior. Usualmente, los enlaces ópticos utilizan radiación láser para transmisión de largo alcance y radiación infrarroja emitida por diodos emisores de luz (**LED**) para distancias cortas.

Aunque en la mayoría de los casos la transmisión óptica requiere línea de visión sin obstáculos, han sido desarrolladas técnicas como las empleadas en las comunicaciones ópticas inalámbricas difusas que permiten superar esta limitación.

Así mismo se han desarrollado técnicas híbridas de transmisión inalámbrica, utilizando alternativamente radio frecuencia y señales ópticas, con el fin de lograr alta disponibilidad en la comunicación, sacando provecho de las ventajas que ambas ofrecen.

Estándares y tipos de comunicaciones ópticas inalámbricas

En principio la comunicación óptica inalámbrica se puede clasificar según su forma de acceso como comunicación en línea de vista (**LOS**) o comunicación difusa. A su vez, según su uso es posible distinguir las redes de área local (**LAN**) ópticas inalámbricas, las redes de área personal (**PAN**) ópticas inalámbricas usualmente utilizando modelos de uso Point and Shoot, las redes de área metropolitana (**MAN**) ópticas inalámbricas, la comunicación óptica inalámbrica entre edificios y la comunicación óptica inalámbrica intersatelital. Según el tipo de señal portadora las comunicaciones ópticas inalámbricas se pueden dividir en comunicaciones láser y comunicaciones infrarrojas. Por último, existe una categoría especial que incluye comunicación óptica y radio frecuencia denominada comunicación inalámbrica híbrida.

En lo que se refiere a estándares, los más nombrados son **IrDa** para comunicación infrarroja con modelo de uso Point and Shoot y óptico que plantea una **LAN** inalámbrica utilizando comunicación infrarroja difusa.

El verdadero objetivo de esta tecnología consiste en proporcionar ancho de banda y servicios de voz y datos a precios competitivos, ofreciendo además como valor agregado una instalación extremadamente simple. Básicamente, los enlaces ópticos inalámbricos urbanos se utilizan para conectar edificios en distancias cortas, en torno a los 6 kilómetros. Estos enlaces trabajan en el margen de 750-800 nm, llegándose a conseguir velocidades de hasta 1,2 Gbps, e incluso 2,5 Gbps en pruebas experimentales. De hecho, este límite de 2,5 Gbps aparece como la meta a conseguir en sistemas comerciales. La obtención de velocidades aún mayores conlleva la utilización de emisores más sofisticados que, de momento, teniendo en cuenta el estado del mercado, no aparecen viables económicamente. Típicamente, los enlaces que se están instalando tienen una capacidad de 155 Mbps.

Al igual que en su tecnología homóloga en microondas **LMDS** (Local Multipoint Distribution Service), se necesita preservar la línea de vista entre emisor y receptor, es decir, el camino debe estar libre de obstáculos para que la señal pueda llegar desde un punto a otro. El receptor debe presentar una gran sensibilidad.

Las señales que se transmiten se encuentran en el margen de infrarrojos del espectro electromagnético, o lo que es lo mismo, se crea un haz de infrarrojos desde un transmisor situado en un punto elevado (por ejemplo, la azotea de un edificio) y se direcciona hacia el punto donde está el receptor. Los transceivers (emisores y receptores) se sitúan en ubicaciones altas en relativamente muy poco tiempo, alrededor de un par de horas. Esta facilidad de instalación se consigue gracias a que se trata de equipos compactos y ligeros, y no necesitan una estructura de soporte especial.

La alineación necesaria se obtiene a través de un dispositivo **CCD** (Charge Coupled Device), o bien mediante montajes ópticos. Hay que tener en cuenta que, en este tipo de enlaces, la alineación correcta es crucial, debido a que el haz de infrarrojos tiene que incidir exactamente en el receptor si se quiere evitar la pérdida de señales. El problema aparece, además de la orientación, en lo que se refiere a la compensación de la divergencia que presenta el propio haz. Esta divergencia oscila en torno a 1 metro cada 100.

Con todo, la tecnología óptica inalámbrica no aparece como competidora directa de la fibra óptica –ambas son combinables–, sino de las comunicaciones fijas por radio, con la que incluso también puede cooperar cuando, fundamentalmente por razones de inmunidad a interferencias o por cuestiones atmosféricas, no se aconseje el enlace óptico. El problema de las interferencias atmosféricas es uno de los puntos débiles más patentes, en concreto la niebla asociada a las heladas. La solución principal, al menos de momento, consiste en utilizar microondas a modo de sistema de soporte. Solamente las nubes reducen la eficacia de estos sistemas en un factor de 30. El aumento de la potencia de transmisión constituye una forma de tratar de compensar esta atenuación.

La seguridad es también un factor a tener en cuenta. Aunque se argumenta que los transceivers están en los tejados y, consecuentemente el acceso humano es limitado, lo que sí es cierto es que un emisor de luz suficientemente brillante asociado a un haz estrecho, con una potencia más bien elevada, produce daños oculares en torno a los 20 metros del haz. La solución, que ya está siendo aplicada en las pocas redes que actualmente utilizan esta tecnología, estriba en utilizar haces menos estrechos y menor potencia.

Hoy en día resulta muy útil para conexiones punto a punto con visibilidad directa, utilizándose fundamentalmente en interconectar segmentos distantes de redes locales convencionales (Ethernet y Token Ring). Es de resaltar el hecho de que esta técnica se encuentra en observación debido al posible perjuicio para la salud que supone la visión directa del haz. Como circuitos punto a punto se llegan a cubrir distancias de hasta 1000 metros, operando con una longitud de onda de 820 nanómetros.

CAPITULO 3: DISEÑO DE LA RED FSO PARA EL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTIAGO DE GUAYAQUIL.

En éste capítulo se presentará el diseño de la red Free Space Optics para el Campus de la UCSG, tomando en cuenta los fundamentos teóricos antes expuestos y a su vez cumpliendo con lo que requiera cada una de las dependencias que formarán parte de la red de respaldo propuesta en este capítulo.

Para realizar el diseño de la red de respaldo se analizará aspectos importantes como la capacidad y velocidad de transmisión, equipos, distancias, condiciones atmosféricas, línea de vista y alturas.

Además se comparará la red actual con la propuesta en esta investigación y a su vez se analizará la relación costo-beneficio.

3.1 ANÁLISIS DE LA RED ACTUAL DE FIBRA ÓPTICA.

La red actual de fibra óptica presente en el campus de la UCSG, esta diseñada a través de un backbone conformado por fibra multimodo de 8 hilos. (Figura 3.1).

Las unidades dentro del campus que están conectadas a esta red son las siguientes (Figura 3.2):

Facultad de Ingeniería

Facultad de Arquitectura

Facultad de Filosofía

Facultad de Economía

Facultad de Medicina

Facultad Técnica para el desarrollo

Facultad de Jurisprudencia

Facultad de Administración

Aula Magna

Centro Pastoral

Biblioteca

Coliseo



Figura 3.1 Fibra óptica de 8 Hilos

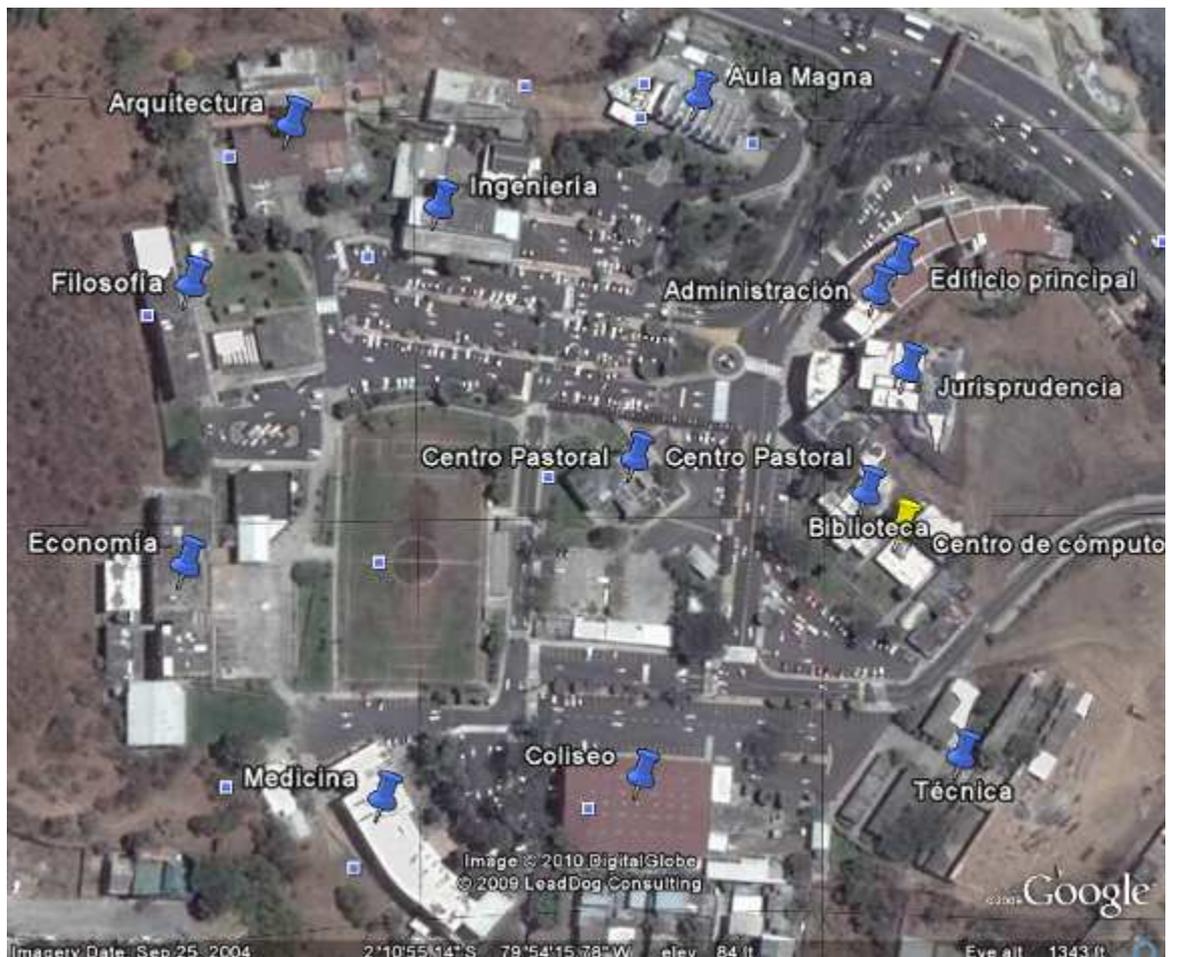


Figura 3.2 Unidades del Campus UCSG

La fibra óptica se encuentra tendida a través del campus en ducterías subterráneas. La topología es estrella, siendo el centro de cómputo el punto desde donde sale la fibra óptica a cada unidad. La velocidad del backbone de fibra es de 1Gbps. entre cada nodo y el Centro de Cómputo. El ancho de banda del acceso a Internet comercial actual es de 15 Mbps. El ancho de banda de Internet se reparte a través de subinterfaces programadas en el router del proveedor de Internet y cada Facultad cuenta con un servidor Proxy para el acceso a Internet. El proveedor actual del Internet en el campus es Global Crossing quienes se encargan de brindar el servicio y dar mantenimiento al cableado existente.

En cada edificio la fibra óptica termina en un rack principal de comunicaciones. Cada nodo de la red cuenta con un switch marca Cisco modelo Catalyst 2950 de 24 puertos 10/100 Mbps, donde se interconecta la fibra óptica y desde donde se distribuyen los puntos de red a los usuarios o a otros switches dependiendo de las necesidades de cada nodo.

En la siguiente tabla se muestra que carreras consideradas como usuarios que son cubiertas por cada uno de los edificios considerados como nodos (Tabla 3.1):

Nodos	Usuarios
 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p>	<p>Ingeniería en sistemas computacionales Ingeniería civil</p>
 <p>FACULTAD DE ARQUITECTURA</p>	<p>Arquitectura Diseño de interiores Diseño del paisaje Gestión gráfica publicitaria Ingeniería en proyectos de construcción</p>
 <p>FACULTAD DE FILOSOFÍA, LETRAS Y CIENCIAS DE LA COMUNICACIÓN</p>	<p>Educación de párvulos Psicología clínica Psicología organizacional Ciencias de la comunicación</p>
 <p>FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS</p>	<p>Economía Administración de empresas Gestión empresarial internacional Contaduría pública Ingeniería de empresas</p>
 <p>FACULTAD DE CIENCIAS MÉDICAS</p>	<p>Medicina Enfermería Odontología Nutrición, dietética y estética Urgencias médicas</p>
	<p>Agronomía, Recursos Naturales Renovables y Ambientalismo Ingeniería Electrónica en Control de Automatismos Ingeniería en Telecomunicaciones</p>

 <p>FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO</p>	<p>Ingeniería Agropecuaria Ingeniería en Eletromecánica Economía Agrícola y Desarrollo Rural Medicina Veterinaria y Zootecnia Cadenas Agroalimentarias y Agronegocios</p>
 <p>FACULTAD DE JURISPRUDENCIA</p>	<p>Derecho Trabajo Social Orientación y Terapia Familiar</p>
 <p>FACULTAD DE ESPECIALIDADES EMPRESARIALES</p>	<p>Ingeniería de Emprendedores Admin. Emp. Turísticas y Hoteleras Comercio y Finanzas Internacionales Ingeniería en Administración de Ventas Ingeniería en Marketing</p>
 <p>FACULTAD DE ARTES Y HUMANIDADES</p>	<p>Carrera de Licenciatura Audiovisual Carrera de Ingeniería Multimedia Carrera de Lengua Inglesa Carrera de Artes Escénicas Programa de Lenguas Extranjeras Carrera y Prog. de Formación Humanística Programas de Materias Electivas</p>
<p>Centro Pastoral</p> 	<p>Oficinas de pastoral</p>
<p>Biblioteca</p> 	<p>Oficinas de la biblioteca</p>

<p>Coliseo</p> 	<p>Coliseo y gimnasio</p>
<p>Aula Magna</p> 	<p>Oficinas en aula magna y cobertura en todo el salón</p>

Tabla 3.1 Nodos y usuarios

3.1.1 TENDIDO ACTUAL DE LA FIBRA ÓPTICA

El nodo más lejano de la estrella se encuentra a 40 metros aproximadamente del Centro de Cómputo, teniendo todo el cableado una longitud de 300 metros, distribuidos de la siguiente manera (Figura 3.2). En el trayecto del tendido hay 48 ductos interconectados a través de 2 tuberías paralelas de 2" de polietileno (Figura 3.3).

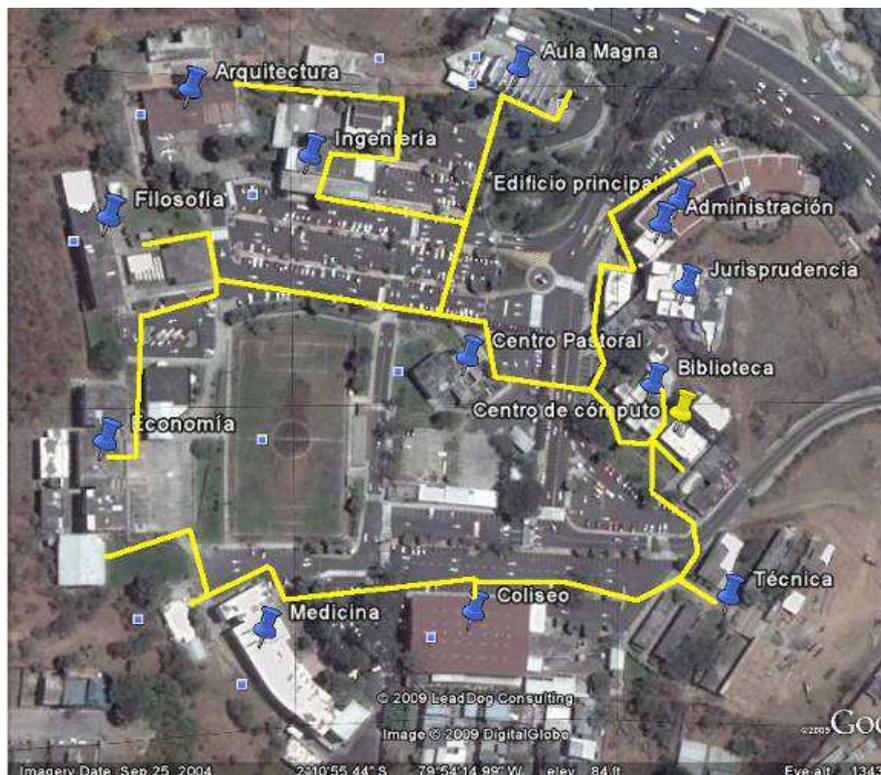


Figura 3.3 Imagen satelital del campus con el tendido de fibra actual

Cada nodo de la red se conecta a través de un Switch Cisco Catalyst 2950 (Figura 3.4) el cuál es un conmutador Ethernet inteligente, que pertenece a una línea de equipos de configuración fija e independiente posee 24 puertos Ethernet 10Base-T y Ethernet 100Base-TX, con una velocidad de transferencia de datos de 100 Mbps, que opera en la capa 2 del modelo OSI, gestionado de manera remota a través del protocolo de gestión de redes simples (SNMP) que permite realizar un control de flujo, tener capacidad duplex, concentración de enlaces y soportar redes virtuales de áreas locales (VLAN).



Figura 3.4 Switch Cisco Catalyst 2950

El tendido de actual de fibra consta del cableado de la fibra por medio de tuberías de 2" que pasan a través de ductos tal como se muestra en la figura 3.5. Los ductos son pozos donde se procede a realizar los mantenimientos de la fibra.

Sistema de Cableado Estructurado para datos

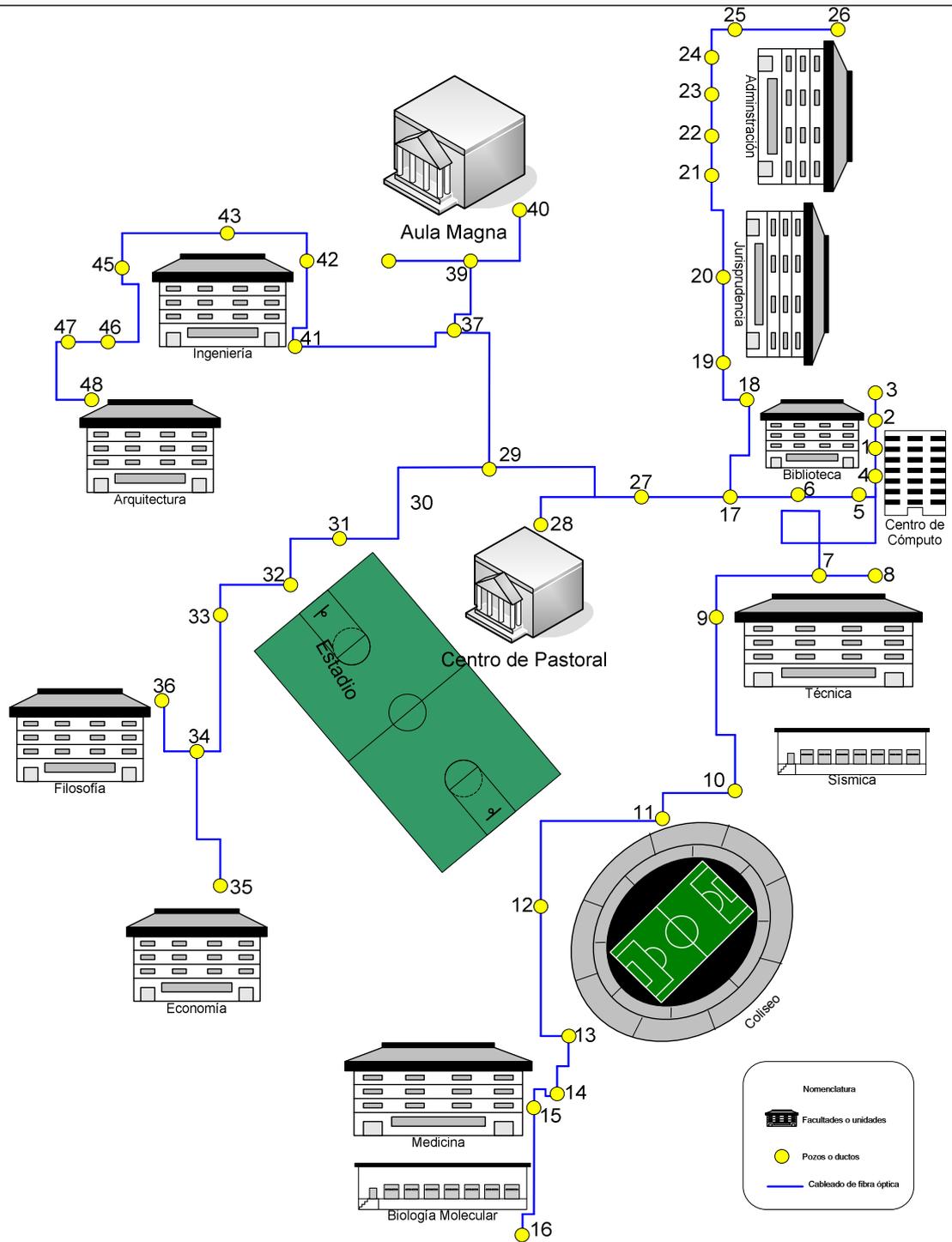


Figura 3.5 Sistema de cableado estructurado para datos con sus respectivos pozos.

Información obtenida del Centro Cómputo.

3.1.2 NIVELES ACTUALES DE TRÁFICO

El nivel de tráfico varía dependiendo de la cantidad de usuarios que se encuentren activos en cada nodo. En promedio las Facultades tiene un nivel de tráfico de 20 Mbps. download y 600 Kbps. upload. Donde los niveles más altos de tráfico lo tienen las facultades con mayor número de estudiantes. Tal como se detalla en la tabla 3.2 y está graficado en la figura 3.6

Unidad	Trafico Upload kpbs	Trafico Download kbps
Facultad de Ingeniería	500	15000
Facultad de Arquitectura	300	18000
Facultad de Filosofía	600	20000
Facultad de Economía	600	20000
Facultad de Medicina	400	15000
Facultad Técnica para el desarrollo	400	18000
Facultad de Jurisprudencia	600	20000
Facultad de Administración	400	18000
Aula Magna	200	10000
Centro Pastoral	200	10000
Biblioteca	500	20000
Coliseo	200	12000

Tabla 3.2 Niveles de tráfico. Fuente: Centro de Cómputo

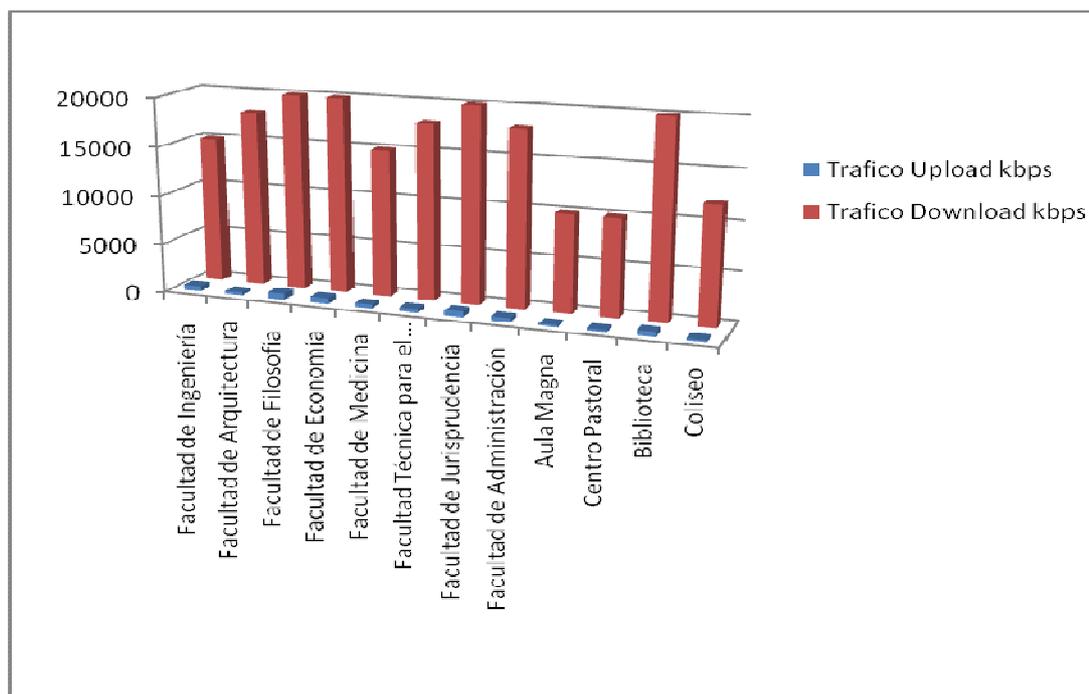


Figura 3.6 Gráfico comparativo de tráfico

3.2 CONSIDERACIONES PREVIAS AL DISEÑO DE LA RED FSO

Para establecer el diseño correcto de la red de respaldo FSO se debe considerar todos los aspectos ya que es muy importante que todos los valores a considerarse estén correctos para que se pueda asegurar un perfecto funcionamiento a largo plazo de la red de respaldo.

El procedimiento a seguir es:

3.2.1 PLANIFICACIÓN

Planificación donde se establecerán los valores de acuerdo a las necesidades que presenta la UCSG, ya expuestos anteriormente, debido a que de esto depende los equipos que tendremos que usar, velocidades de transmisión, también se debe considerar en la planificación el medio ambiente como las condiciones climáticas, distancias entre unidades a interconectar y línea de vista.

3.2.1.1 ESTUDIO DEL LUGAR DE INSTALACIÓN

Para escoger el mejor lugar para la instalación se visito cada uno de los edificios en los que se colocarían los equipos y se determinó el lugar más apropiado tanto por la altura como por su línea de vista y se recolectó la siguiente información:

En la tabla 3.2 se encuentra detallado la altura del punto más alto sobre el nivel del mar de cada uno de los edificios a interconectar y la coordenada geográfica exacta. Estos datos fueron obtenidos mediante un **GPS** (Gps Garmin 400 3d).

Unidad	Coordenadas	
	Latitud	Longitud
Facultad de Ingeniería	2° 10' 50.33"S	79° 54' 17.35"W
Facultad de Arquitectura	2° 10' 50.77"S	79° 54' 18.69"W
Facultad de Filosofía	2° 10' 53.28"S	79° 54' 20.35"W
Facultad de Economía	2° 10' 56.71"S	79° 54' 20.45"W
Facultad de Medicina	2° 10' 58.74"S	79° 54' 18.07"W
Facultad Técnica para el desarrollo	2° 10' 59.47"S	79° 54' 10.59"W
Facultad de Jurisprudencia	2° 10' 54.05"S	79° 54' 11.87"W
Facultad de Administración	2° 10' 52.71"S	79° 54' 11.62"W
Aula Magna	2° 10' 50.18"S	79° 54' 11.54"W
Centro Pastoral	2° 10' 55.49"S	79° 54' 15.07"W
Biblioteca	2° 10' 55.27"S	79° 54' 12.41"W
Coliseo	2° 10' 59.02"S	79° 54' 14.25"W
Centro de Cómputo	2° 10' 56.06"S	79° 54' 11.39"W

Tabla 3.2 Coordenadas de los puntos en los edificios a interconectar

En cada uno de los sitios donde se instalaran los equipos se deberá construir sobre la terraza una plataforma con un polo firme el cual sujetará el equipo de tal manera que se asegure que sea estable y no se produzcan problemas de alineamiento por cualquier circunstancia. Los equipos **FSO** vienen con un montaje universal, los cuales son diseñados para prevenir la corrosión por ciertos materiales (acero,

aluminio, etc.); los cuales también son montajes muy fuertes que proveen una excelente fijación.

3.2.1.2 LÍNEA DE VISTA

En todos los puntos donde se instalarán los equipos hay total línea de vista, es decir no presenta en ninguno de los enlaces obstrucción por parte de árboles a alguna edificación ya que una de las desventajas de ésta tecnología es la vulnerabilidad a la posibilidad de obstrucción del enlace, por ejemplo, por pájaros. Dado que éste es un hecho inevitable, la única solución es la redundancia en los equipos transmisores y receptores. En el siguiente reporte fotográfico se puede corroborar la línea de vista existente en cada uno de los nodos donde se ha considerado la ubicación de los equipos.

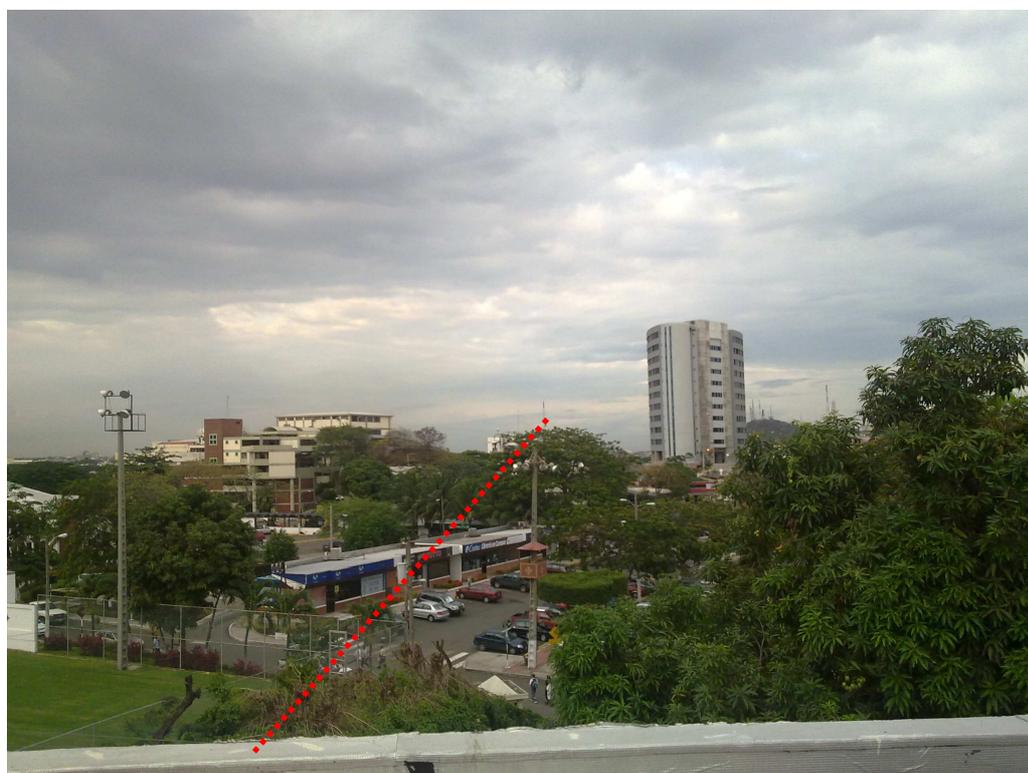
Link: Centro de Cómputo – Facultad Técnica



Link: Coliseo – Centro de cómputo



Link: Medicina – Centro de cómputo



Link: Facultad de Economía – Centro de cómputo



Link: Facultad de Filosofía – Centro de cómputo



Link: Facultad de Arquitectura – Centro de cómputo



Link: Facultad de Ingeniería – Centro de cómputo



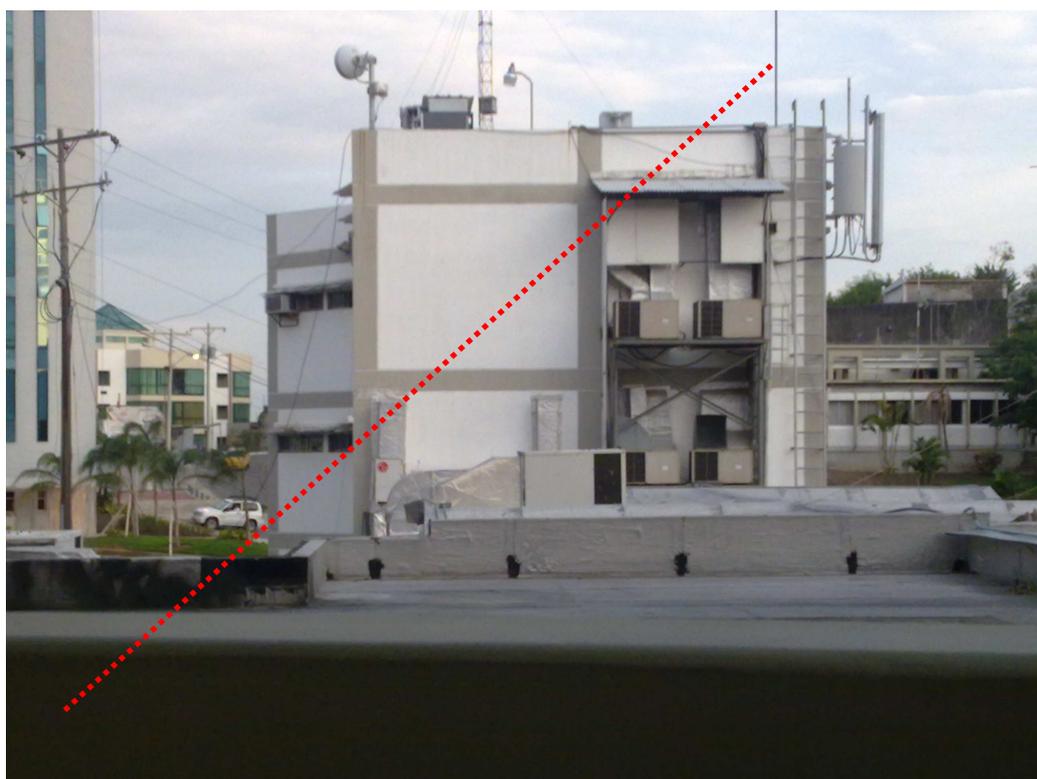
Link: Aula Magna – Centro de cómputo



Link: Facultad de Administración – Centro de cómputo

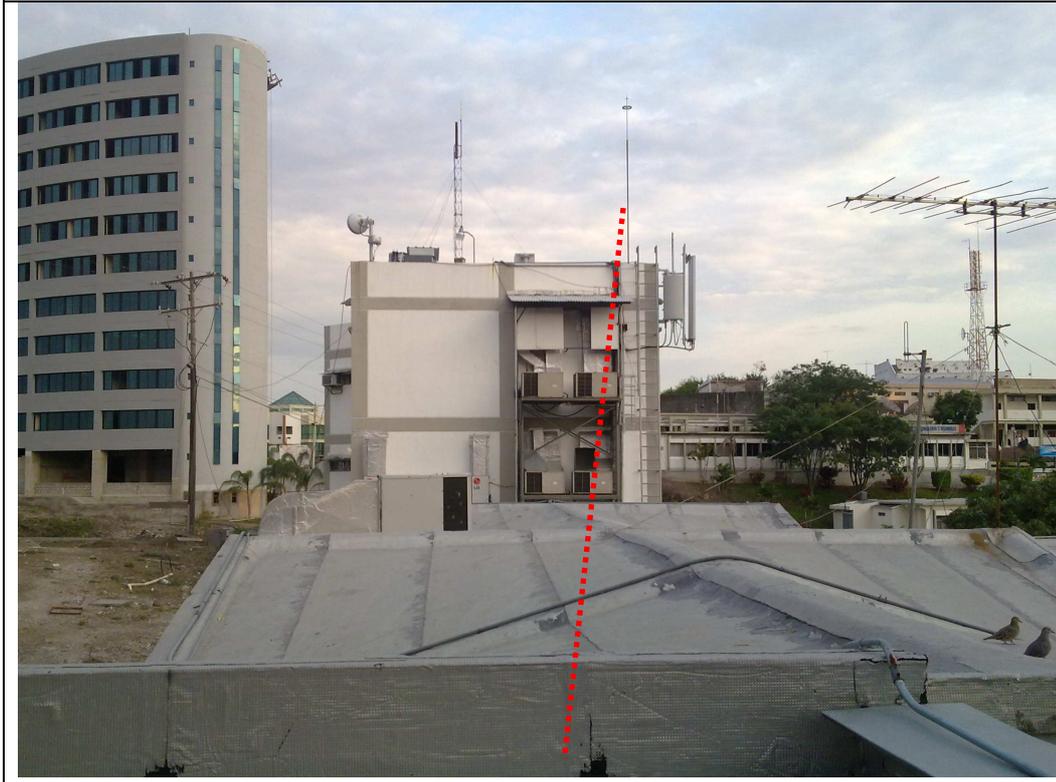


Link: Facultad de Jurisprudencia – Centro de cómputo



Link: Centro de Pastoral – Centro de Cómputo





La red **FSO** está compuesta por dispositivos emisores, receptores de luz infrarroja y equipos eléctricos para energizar todos los equipos. Se colocaran un total de 24 equipos cada uno con su respectivo cable de poder y **UPS**.

Para establecer el diseño de la red se han considerado 12 links, la distancia entre cualquiera de los puntos no excede los 200 metros ya que la distancia entre dos equipos terminales es un factor determinante al momento de escoger el equipo apropiado.

En la tabla 3.3 se observa a quien corresponde el link, la descripción del equipo, distancia del enlace.

Link	Equipos a instalarse	Distancia del enlace
Técnica - Centro de Cómputo	SONABEAM 1250-S	90.92 m.
Coliseo - Centro de Cómputo	SONABEAM 1250-S	140.14 m.
Medicina - Centro de Cómputo	SONABEAM 1250-S	221.74 m.
Economía - Centro de Cómputo	SONABEAM 1250-S	268.10 m.
Filosofía - Centro de Cómputo	SONABEAM 1250-S	288.65 m.
Arquitectura - Centro de Cómputo	SONABEAM 1250-S	284.86 m.
Ingeniería - Centro de Cómputo	SONABEAM 1250-S	210.63 m.
Aula Magna - Centro de Cómputo	SONABEAM 1250-S	193.555 m.
Administración - Centro de Cómputo	SONABEAM 1250-S	100.02 m.
Jurisprudencia - Centro de Cómputo	SONABEAM 1250-S	56.90 m.
Pastoral - Centro de Cómputo	SONABEAM 1250-S	105.27 m.
Biblioteca - Centro de Cómputo	SONABEAM 1250-S	17.78 m.

Tabla 3.3 Links con su respectivo equipo, distancia y capacidad.

3.2.1.3 POTENCIA

Una vez comprobado la disponibilidad y distancia a los puntos eléctricos para energizar los equipos terminales (tabla 3.4) se ha considerado colocar en cada nodo un **UPS** para exteriores que tiene 3 horas de duración lo que permitirá que en el momento de un corte de energía la red se vea afectada. El **UPS** más conveniente es el TSi Power, que proporciona de 1 a 24 horas de protección y alimentación mediante una batería de 120 V de CA (para 100 a 1540 watts) el equipo más usado en sistemas de WiFi, WiMax, satélite, microondas, radio, **CCTV**, detección de movimiento, radar, seguridad infrarroja y vigilancia y control industrial, entre otros. El modelo escogido OutdoorXUPS-600B mostrado en la figura 3.7 con salida de 120 V de CA con 3 horas de duración de batería para una carga de 200 W que tiene un costo de \$, estos modelos de **UPS** incluyen baterías que pueden trabajar en un amplio rango de temperaturas y diversas condiciones climáticas.



Figura 3.7 UPS outdoor.

En la siguiente tabla se muestra la disponibilidad de puntos eléctricos y la distancia desde éstos hasta el sitio donde se ubicarán los equipos.

Unidad	Puntos eléctricos	Distancia
Facultad de Ingeniería	Si	5 m.
Facultad de Arquitectura	Si	2 m.
Facultad de Filosofía	Si	7 m.
Facultad de Economía	Si	8 m.
Facultad de Medicina	Si	3 m.
Facultad Técnica para el desarrollo	Si	2 m.
Facultad de Jurisprudencia	Si	9 m.
Facultad de Administración	Si	2 m.
Facultad de artes y humanidades	Si	5 m.
Aula Magna	Si	4 m.
Centro Pastoral	Si	4 m.
Biblioteca	Si	6 m.
Coliseo	Si	12 m.

Tabla 3.4 Puntos eléctricos disponibles y distancia desde el punto eléctrico al lugar de instalación del equipo FSO.

3.2.1.4 FACTOR CLIMÁTICO

El clima de Guayaquil es el resultado de la combinación de varios factores. Por su ubicación en plena zona ecuatorial, la ciudad tiene una temperatura cálida durante casi todo el año. No obstante, su proximidad al Océano Pacífico hace que las corrientes de Humboldt (fría) y de El Niño (cálida) marquen dos períodos climáticos bien diferenciados. Uno lluvioso y húmedo, con calor típico del trópico, que se extiende de diciembre a abril (conocido como invierno que corresponde al verano austral); y el otro seco y un poco más fresco (conocido como verano que corresponde al invierno austral), que va desde mayo a diciembre.

La precipitación anual es del 80% en el primero y del 20% en el segundo. La temperatura promedio oscila entre los 20 y 27 °C, un clima tropical si consideramos la latitud en que se encuentra la ciudad. En la Figura 3.8 se muestra el diagrama de variación anual tanto de precipitaciones como de temperatura. La combinación de varios factores da como resultado el clima de Guayaquil. Debido a su ubicación en plena zona ecuatorial, la ciudad tiene una temperatura cálida durante casi todo el año tal como se muestra en la tabla 3.4 en la que está tabulado los promedios de temperatura durante el año 2009 en la ciudad de Guayaquil.

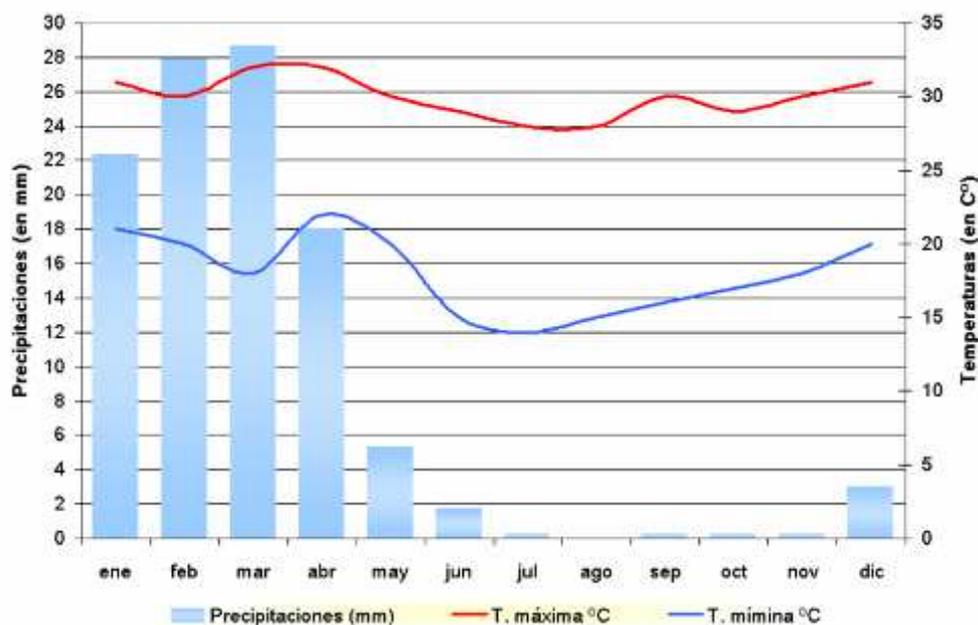


Figura 3.8 Variaciones climáticas en la ciudad de Guayaquil. Año 2009

Parámetros climáticos promedio de Guayaquil													
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
Temperatura máxima media (°C)	31	30	32	32	30	29	28	28	30	29	30	31	30
Temperatura máxima media (°F)	88	87	89	89	87	85	84	84	86	85	86	88	86
Temperatura mínima media (°C)	21	20	18	22	20	15	17	15	16	17	18	20	15
Temperatura mínima media (°F)	74	75	76	75	74	72	70	69	70	71	72	73	72
Precipitaciones (mm)	22,35	27,94	28,70	18,03	5,33	1,77	0,25	0,00	0,25	0,25	0,25	3,00	108,45

Fuente: Weatherbase

Tabla 3.4 Promedios de temperatura durante el 2009 en la ciudad de Guayaquil

3.2.1. SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS

A continuación se expondrán diversos equipos y los costos estimados del diseño de la Red de **FSO**, que ha sido diseñada para brindar respaldo a la red de **UCSG**.

Las informaciones presentadas han sido obtenidas de fuentes internas como es el caso del Centro de cómputo, y de información de proveedores que se encuentran en la Web. Los equipos más costosos como se verá son precisamente los de tecnología **FSO** que se requieren para conectar los enlaces

Los equipos a ser instalados deben tener características para soportar las aplicaciones que requiere la **UCSG**, su capacidad y los niveles de tráfico que cada enlace requiere para un buen dimensionamiento de la red y evitar el colapso de la misma.

En el Ecuador no existe un proveedor directo de los equipos, debido a esto se contactó con Fsona cuya empresa tiene años diseñando y fabricando productos **FSO**. Los precios de los equipos **FSO**, son variables en función de los fabricantes y de las características de los mismos. Para el diseño de los enlaces, se han seleccionado los equipos que proporcionen el mejor desempeño y que provean el rango de alcance necesario entre los nodos analizados.

Se han considerado equipos **FSO** de una marca comercial, y sus características de operación se muestran a continuación. Figura 3.9



Figura 3.9 Equipos FSO de marca comercial

SONABEAM

El SONAbeam es un equipo de tecnología **FSO** el cual transmite señales ópticas láser por un medio inalámbrico, full duplex. Para la implementación de estos enlaces no se requiere licencia de operación, únicamente línea de vista y contar con una plataforma estable para el montaje. Figura 3.10



Figura 3.10 Equipo SONAbeam

Este es el equipo ideal para interconectar redes Gigabit Ethernet a su máxima capacidad. La familia de equipos Sonabeam cuenta con uno de los desarrollos tecnológicos mas adelantados a los sistemas **FSO** tradicionales, gracias a su innovación de poder trabajar en la interfaz aérea con una longitud de onda de 1550 nm le permite transmitir con una potencia hasta 50 veces superior a la de un equipo convencional y de esta forma lograr distancias mayores con un alto desempeño aun en condiciones climatológicas desfavorables.

Modelos SONAbeam

Toda la línea de productos SONAbeam está diseñados para contar con un excelente nivel de disponibilidad ya sea en enlaces cortos (S) medianos (M) o de largo alcance (L). Todos operando bajo la tecnología **FSO** 1550nm logrando así penetrar la neblina y ser inmune a condiciones atmosféricas como las tormentas de lluvia.

Todos los modelos SONAbeam ofrecen una solución de banda ancha económica y de alta confiabilidad. La línea de productos SONAbeam están clasificados en tres grupos:

SONAbeam-E

Excelente solución costo-beneficio para velocidades desde 1 hasta 16 x EIs, Ethernet, FE y 155 Mbits para distancias de hasta 3.4 Kms dependiendo el ancho de banda. Los equipos cuentan con redundancia en los transmisores, gestión completa, y es posible configurarlos con -48 Vdc y 110 Vac.

SONAbeam-S

Este modelo está enfocado para distancias de hasta 2 Kms aproximadamente. Dependiendo de la aplicación puede ser utilizado para longitudes mayores. Los equipos cuentan con dos transmisores láser transmitiendo así una potencia hasta 30 veces mayor que los equipos FSO convencionales. Diseñado para su montaje tanto en exterior como interior, en plataformas estables como mástiles, torres

autosoportadas, detrás de ventanas, etc. Su alimentación de 110 Vac pero es posible contar con un adaptador para -48 Vdc.

SONAbeam-M

Este modelo está enfocado para distancias de hasta 4 Kms aproximadamente dependiendo de la velocidad. Puede ser utilizado para longitudes mayores o menores de acuerdo a la aplicación. Los equipos cuentan con cuatro transmisores láser transmitiendo así una potencia hasta 50 veces mayor que los equipos FSO convencionales y cuentan con el receptor más grande en la industria. Se recomienda su montaje en plataformas estables como mástiles, torres autosoportadas, detrás de ventanas, etc. Su alimentación es de -48 Vdc pero es posible contar con un adaptador para 110 Vac.

A continuación se presentan los diferentes modelos de acuerdo a su rango de alcance y ancho de banda.

SONAbeam-1250S

Ventajas

Velocidad de transmisión hasta 1250 Mbps Full Duplex

Independiente del protocolo de transmisión (GE, SDH, SONET, FE, n x E1s, DS-, etc)

Redundancia en el medio de transmisión al contar con 2 láseres

Equipo sumamente robusto, soporta vientos de hasta 120 Kms /hr

Gestión completa del equipo de forma local y remota

Cumple con la norma de láser Clase 1M lo cual lo hace seguro para el ojo humano (eye safe)

No requiere licencia de operación

Características Técnicas

Especificaciones interface aérea

Velocidad de transmisión desde 100 hasta 1,448 Mbps

Distancia de operación recomendada:

Hasta 3.600 Kms con operación en un ambiente despejado (3 dB/Km)

Hasta 1.710 Kms con operación bajo lluvia extrema (10 dB/Km)

Potencia de transmisión total: 280 mW

Longitud de onda FSO: 1550 nm

Apertura del receptor: 10 cm

2 filtros espectrales y 2 solares

Láser Clase 1M

Especificaciones interface física

Interfaz física: 1310 nm Monomodo o Multimodo

Conector SC/PC

Especificaciones gestión

Interfaces RS-232 y Ethernet

Gestión local y remota a través del SW de gestión STC (Windows)

Verificación de errores y alarmas

Generación de loopbacks hacia la red LAN y WAN

Almacenamiento de históricos

Generación de alarmas preventivas

Especificaciones generales

Alimentación: 110 Vac (-48 Vdc opcional)

Consumo de potencia

40 Watts máximo en los transeivers

200Watts máximo en los enfriadores

Aplicaciones

Conectividad de alta velocidad en la última milla

Interconexión de edificación a velocidad Gigabit Ethernet (1250 Mbps totales y Full Duplex)

Repetidor de radiobases celulares

Conexión de enlaces en puntos donde no es posible llegar con fibra óptica

Alternativa a enlaces RF donde solo se cuenta con línea de vista óptica

Generación y cerrar anillos Gigabit Ethernet

Servicios de Voz, Internet y Video Conferencia

Protección de enlaces de microondas, recuperación de desastres, etc.

3.3 EQUIPOS FSO PARA EL ESTABLECIMIENTO DE LOS ENLACES DENTRO DEL CAMPUS DE LA UCSG

Para el establecimiento de los enlaces internos dentro del campus de la **UCSG**, se ha seleccionado a los equipos **FSO** de la marca **FSONA** modelo **SONABEAM 1250 – S**

Los enlaces inalámbricos ópticos dentro de la universidad seran dirigidos hacia el centro de cómputo. La tabla 3.5 detalla las características y el precio del equipo **FSO** mencionado.

Equipos/Características	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Cabecera FSO Marca: FSONA Modelo: SONABEAM 1250-S Longitud de onda: 1.550 nm Capacidad: 1.4 Gbits/s Alcance: 1.700m	24	\$3.214,40	\$77.145,60

Tabla 3.5 Valores de Equipos FSO para conexión UCSG

Como se puede apreciar, el equipo recomendado cumple con los requerimientos de ancho de banda y distancia de los enlaces inalámbricos ópticos diseñados dentro del campus de la **UCSG**; valores correspondientes a 1.309,5 Kbits/s en lo que respecta a la capacidad de transmisión y de 253,71 metros respecto a la máxima distancia a cubrir.

LICENCIAS

Como se ha venido explicando la tecnología FSO trabaja en una banda no licenciada, es decir que no requiere del pago de concesiones o licencias por el uso del espectro. Esta ventaja le permite al sistema operar libremente y reducir los costos de operación frente a otras alternativas inalámbricas.

3.3 DISEÑO DE LA RED DE SOPORTE FSO.

En el siguiente gráfico (Figura 3.11) se muestra como se establecerá la red de respaldo **FSO** para el campus de la **UCSG**. De cada uno de los nodos escogidos se deberá cablear dependiendo de las interfaces de la red, el cableado hacia los switches que puede ser cobre **UTP**, con conectores **RJ45**, cable de fibra óptica con conectores **SC** o **ST** para fibra multimodo o monomodo. Para la red de respaldo se ha escogido cables de fibra óptica con conectores **SC** debido a que se necesita que el cableado hacia los switches tenga la misma capacidad que la de los equipos **FSO**.

La red diseñada tiene una duración de alrededor de 20 años antes de que se necesiten cambiar equipos ya que esta es la garantía de fábrica de los equipos. Los mantenimientos se deben realizar anualmente, para evitar que ocurra algún daño y en ese momento se trate de solucionar algún inconveniente.

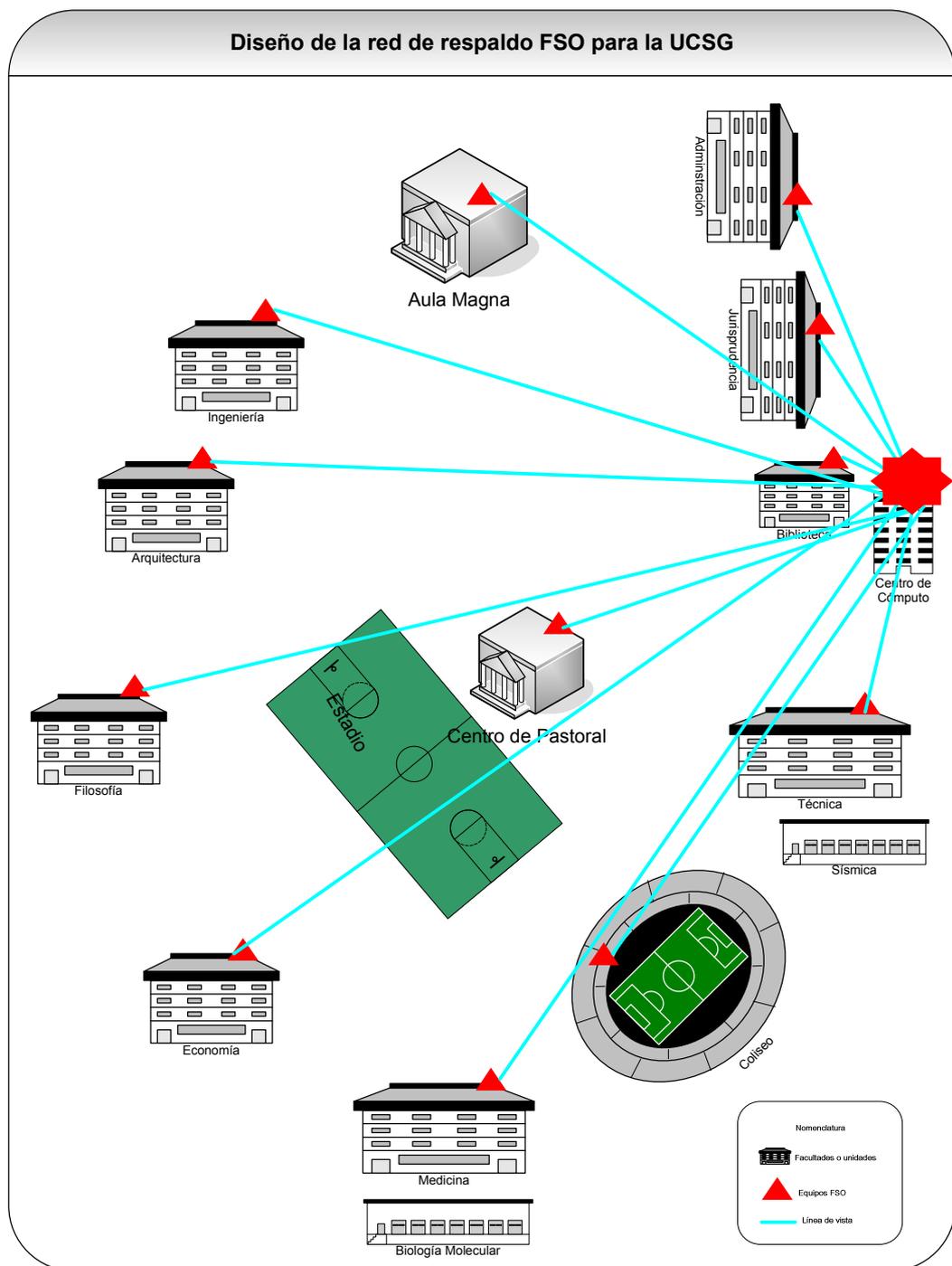


Figura 3.11 Diseño de la red FSO

3.4 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA RED ACTUAL DE FIBRA ÓPTICA Y LA RED DE RESPALDO FSO

La tecnología Free Space Optics y la de fibra óptica tienen características similares como el hecho de que proporcionan un gran ancho de banda en la transmisión, satisfaciendo las necesidades que hoy en día son requeridas por el mercado. Se recalcará la manera en que ambas tecnologías transmiten la información, ventajas y desventajas y costos.

Los sistemas de comunicaciones basados tanto en fibra óptica y sistemas **FSO** comparten algunas características, por lo que es importante realizar un breve estudio sobre las características que presenta la fibra óptica.

3.4.1 CARACTERÍSTICAS DE LA FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica es considerada como el medio de transmisión de información más idóneo en los procesos de telecomunicaciones. Entre sus principales características se pueden mencionar bajas pérdidas de señal, alta confiabilidad debido a la inmunidad al ruido y la interferencia, baja atenuación, seguridad en el transporte de información; además, ofrece más ancho de banda en relación a otros medios de transmisión. Sus dimensiones reducidas y su peso se traducen en economía de transporte.

Los cables de fibra óptica son más resistentes a los cambios ambientales, funcionan sobre una variación más grande de temperatura en comparación a otros medios guiados como es el caso del cobre, la fibra es menos afectada por líquidos corrosivos y gases, pueden usarse en condiciones peligrosas de alta tensión, ya que no poseen componentes conductivos, es decir, tienen la capacidad de tolerar altas diferencias de potencial sin ningún circuito adicional de protección. Por lo tanto, todas estas ventajas han hecho que este medio de transmisión sea considerado como una de las mejores alternativas para solucionar los cuellos de botella en las redes de acceso que hacen que el usuario tenga un gran ancho de banda disponible y pueda tener acceso a nuevos servicios. Las redes ópticas pasivas (**PON**, Passive Optical Network) se han convertido actualmente en una de las mejores opciones tecnológicas para redes de acceso.

La fibra óptica presenta un gran ancho de banda. Se manejan valores desde cientos de Mhz hasta decenas de Ghz. Teóricamente su ancho de banda podría permitir capacidades por encima de los 50.000Gbps, pero en la práctica se limita a velocidades de transmisión de 10Gps, por la conversión eléctricaóptica.

En las fibras monomodo se puede alcanzar distancias de 30Km a varios Gbps. En las comunicaciones por fibra óptica se utilizan las longitudes de onda del infrarrojo cercano del espectro electromagnético, entre 800nm a 1600nm. Los sistemas de comunicaciones ópticas emplean como medio típico de transmisión la fibra óptica la cual puede ser de vidrio, plástico o sílice; tiene un núcleo por el cual viaja un haz de luz y una cubierta óptica que rodea al núcleo llamada revestimiento. Con las leyes de reflexión y de refracción se diseñan una fibra que guíe las ondas de luz a través de la fibra con una mínima pérdida de energía por lo tanto toda la luz que incide en la fibra se refleja dentro de ella, a esto de lo denomina “reflexión interna total”, que es la base sobre la que se construye una fibra óptica. La reflexión interna total hace que los rayos de luz dentro de la fibra reboten en el límite entre el núcleo y el revestimiento y que continúen su recorrido hacia el otro extremo de la fibra. La luz sigue un trayecto en zigzag a lo largo del núcleo de la fibra.

Básicamente la fibra óptica se la clasifica por el número de modos transmitidos, es decir por las diferentes formas de propagación de los rayos de luz.

Fibra multimodo: El diámetro del núcleo de la fibra es lo suficientemente grande como para permitir que la luz pueda recorrer varios trayectos a lo largo de la fibra (Figura 3.12).

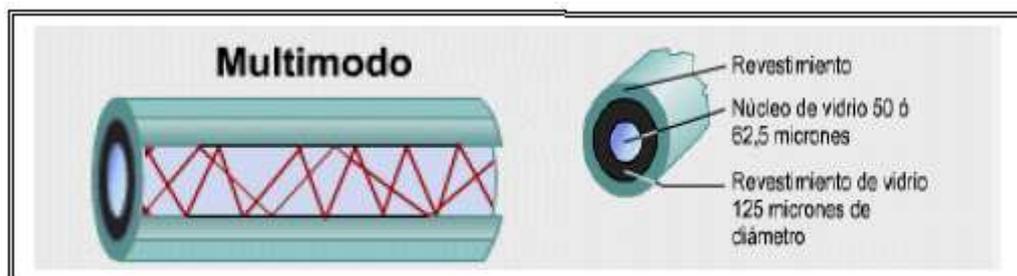


Figura 3.12 Componentes de la fibra multimodo

Fibra monomodo: La fibra monomodo tiene un núcleo mucho más pequeño que permite que los rayos de luz viajen a través de la fibra por un solo modo (Figura 3.13).

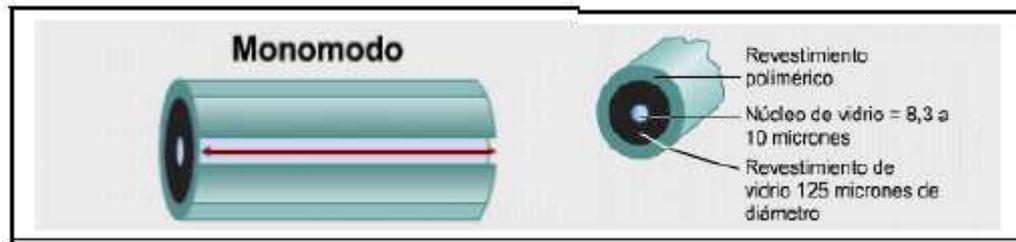


Figura 3.13 Componentes de la fibra monomodo

Multimodo	Monomodo
Las ondas de luz tienen varios recorridos	La onda de luz tiene un solo recorrido
Núcleo de 50 o 62.5 μm o mayor	Núcleo pequeño de 8.3 a 10 μm
Permite mayor dispersión, por lo tanto pérdida de la señal.	Menor dispersión
Se usa para aplicaciones de larga distancia, hasta 2km.	Se usa para aplicaciones de larga distancia, hasta 3km.
Usa LED como fuente de luz, en entornos LAN.	Usa láser como fuente de luz.

Tabla 3.6 Comparación entre la fibra multimodo y monomodo

La atenuación de la fibra se define como la disminución de la potencia lumínica en función de la distancia. Los valores de atenuación en la fibra óptica varían con la longitud de onda y tiene distintos valores de acuerdo a la longitud de onda, llamadas ventanas de transmisión situadas en las zonas de 800-900nm, 1200-1300nm y 1500-1600nm (Figura 3.14).

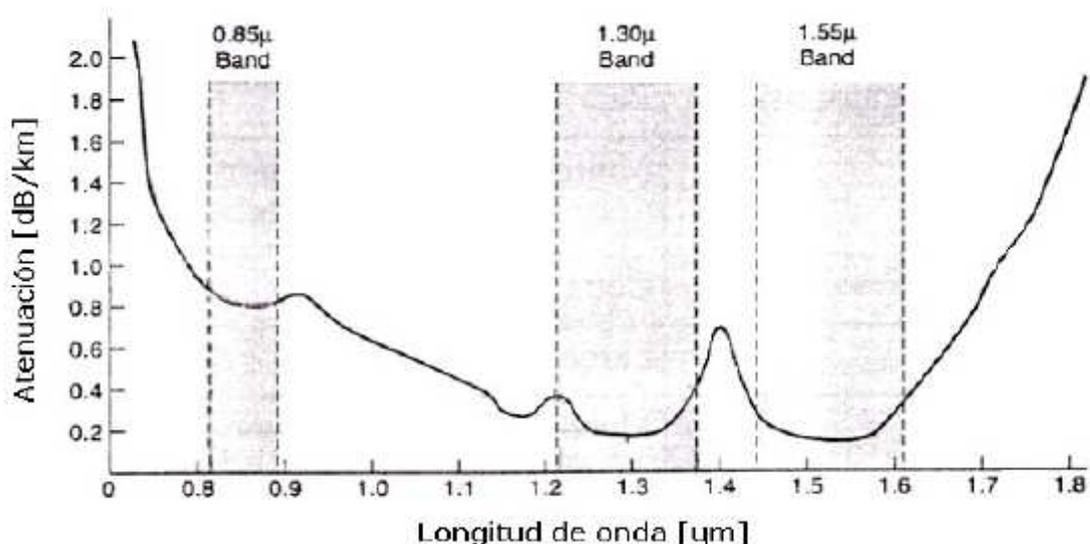


Figura 3.14 Ventana de transmisión de la fibra óptica

Los valores típicos de atenuación debido a sus características físicas se indican en la Tabla 3.7

<i>Tipo de FO</i>	<i>Longitud de Onda</i>	<i>Coefficiente de atenuación del cable</i>	<i>Pérdida por conector</i>	<i>Pérdida por empalme</i>
62.5/125μm	850nm	3.75 dB/km	0.75 dB	0.3 dB
62.5/125μm	1300nm	1.5 dB/km	0.75 dB	0.3 dB
50/125μm	850nm	3.75 dB/km	0.75 dB	0.3 dB
50/125μm	1300nm	1.5 dB/km	0.75 dB	0.3 dB
Monomodo	1310nm	1.0 dB/km	0.75 dB	0.3 dB

Tabla 3.7 Valores de atenuación de la fibra óptica

La atenuación que presenta la fibra óptica es independiente de la velocidad de transmisión, por lo que este medio de transmisión es totalmente adecuado para transmitir a elevadas velocidades.

Existen otros factores de origen externo causados por impurezas en la fibra o por la geometría en la misma los cuales son:

Dispersión de Rayleigh

Absorción de luz

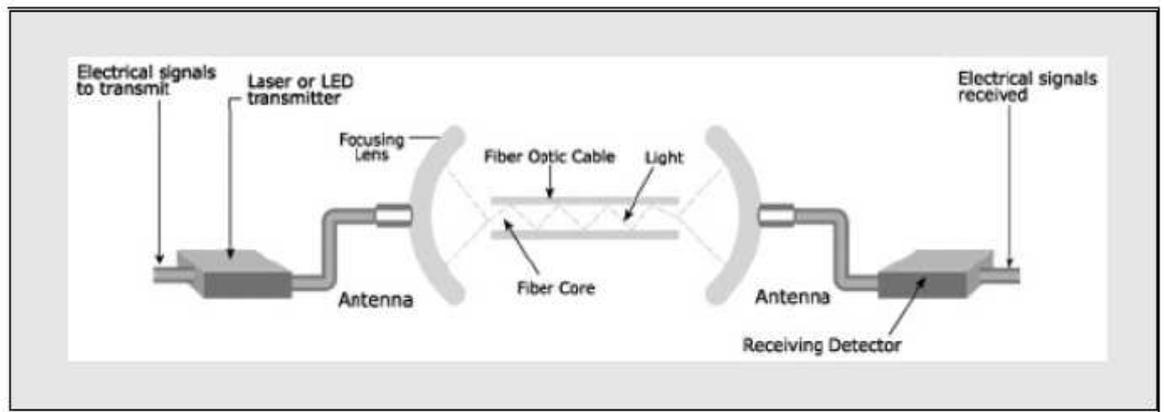
Curvaturas de la fibra

3.4.2 CARACTERÍSTICAS DE FSO

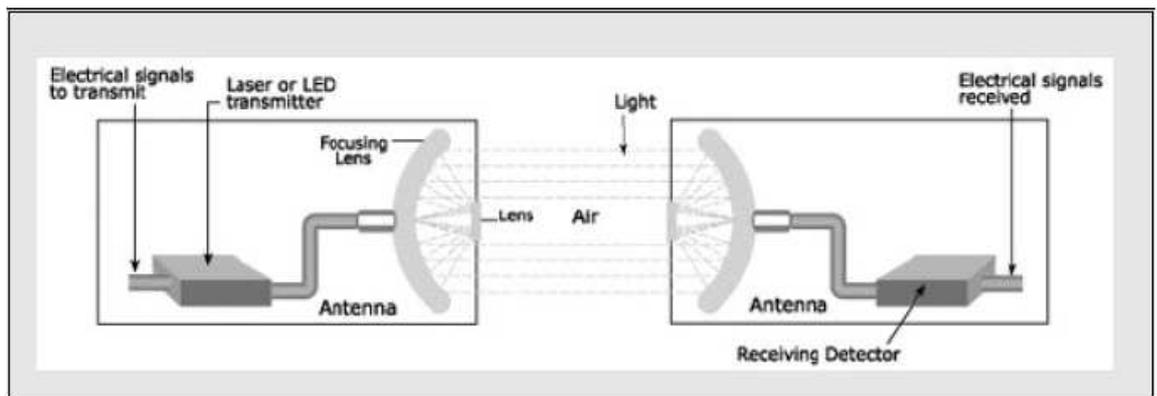
Los sistemas **FSO** están afectados con un factor de pérdida en el aire entre el transmisor y el receptor, el cual puede variar en el tiempo debido a las condiciones climáticas. Por otro lado se debe tomar en cuenta que existen pérdidas ópticas, por la imperfección de los lentes, pérdidas debido a la divergencia del haz, etc. Todos los factores que afectan a los sistemas **FSO** se analizaron anteriormente.

3.4.3 COMPARACIÓN ENTRE FSO Y FIBRA ÓPTICA

Una vez analizadas las características que presenta tanto la fibra óptica como la tecnología **FSO**, se puede realizar una comparación entre dicha tecnologías. Los sistemas **FSO** comparten muchas características con la fibra óptica. Por ejemplo, ambos sistemas utilizan los mismos componentes, como láser, receptores y amplificadores, pero distintos medios de transmisión, mientras la fibra óptica utiliza una finísima fibra de vidrio, **FSO** utiliza la atmósfera como se puede ver en la Figura 3.15.



Sistema de comunicaciones ópticas en fibra



Sistema FSO (Free Space Optics)

Figura 3.15 Sistema de comunicaciones ópticas en fibra vs. Sistema FSO

Los sistemas de transmisión de información basados en el envío y recepción de señales ópticas, ya sean guiados o inalámbricos, funcionan en la zona infrarroja (IR) del espectro electromagnético.

Los sistemas basados en Fibras Ópticas, propagan luz infrarroja en zonas de baja atenuación y alta linealidad de tal medio de transmisión, las cuales se encuentran en las regiones de las longitudes de onda centrales 1550 nm, 1330 nm y 850 nm. A diferencia de los sistemas ópticos por fibra puesto que, los sistemas de transmisión ópticos por espacio libre **FSO** no utilizan medio guiado de propagación de la señal lumínica, los diseñadores no se preocupan por utilizar energía infrarroja en las longitudes de onda mencionadas arriba, sino que sus objetivos de diseño a nivel físico se centran en alcanzar la mayor distancia recorrida sin que la potencia del haz infrarrojo disminuya por debajo de la que el sistema detector puede observar.

Tanto en la fibra óptica como en la tecnología **FSO** se adolece de atenuación o disminución de la potencia lumínica en función de la distancia. En las dos tecnologías la Dispersión de Rayleigh tiene presencia, mientras en la fibra óptica es un fenómeno físico el cual se produce cuando el haz choca con impurezas o atraviesa zonas con defectos en la homogeneidad del núcleo de la fibra. En la tecnología **FSO** se produce dicho fenómeno cuando el haz choca con impurezas suspendidas en la atmósfera tales como el polvo. La absorción de luz esta presente en las dos tecnologías, en la fibra óptica se produce cuando una fracción de la potencia lumínica que se propaga por la fibra óptica es absorbida por el dióxido de silicio presente en el núcleo de la fibra, en cambio en la tecnología **FSO** existe la absorción atmosférica, debido a la abundancia de especies absorbentes tales como gotitas de agua, hielo, polvo, materiales orgánicos, aerosoles, etc.

Algunos sistemas **FSO** incluyen conexiones para fibra dentro de sus conectores de transmisión, para separar los componentes electrónicos y los ópticos. Una característica de los equipos **FSO** es que la mayoría de estos sistemas llevan a cabo los pasos de conversión de óptico a eléctrico y de vuelta a óptico (O-E-O) durante los procesos de enviar y recibir información a través del aire y de conectar de nuevo con la interfase de fibra de la red adjunta. Esto no constituye automáticamente una limitación de rendimiento, pero la conversión (O-E-O) puede impactar la habilidad de escalar fácilmente un sistema **FSO** a capacidades de ultra alto ancho de banda.

3.4.4 COMPARACIÓN DE LA RED ACTUAL DE FIBRA ÓPTICA CON LA RED DE RESPALDO FSO PARA EL CAMPUS DE LA UCSG.

El tendido de fibra óptica actual que posee la **UCSG** que interconecta las principales dependencias de la universidad comprende un tendido de fibra que contienen 8 hilos de 62.5/125µm multimodo, canalizado, y tiene 48 ductos de revisión distribuidos a lo largo de todo el campus. De lo revisado se puede ver que se necesita una planificación minuciosa para diseñar el tendido de la fibra y tener todo controlado en caso de existir fallas.

El diseño puesto a consideración en este proyecto, interconecta igualmente los mismos nodos. Básicamente se propone 12 enlaces **FSO**, cuyos edificios tienen

línea de vista, sin embargo; no todos los edificios pudieron formar parte de la tecnología **FSO**, debido al requerimiento de línea de vista. La topología desplegada es variada, con configuraciones punto-punto, punto-multipunto.

Las dos tecnologías satisfacen la necesidad de capacidad en cuanto a las aplicaciones requeridas por la Red, sin embargo **FSO** permite hacer un despliegue rápido en cuestión de horas para que los enlaces estén operando, mientras el tendido subterráneo de la fibra debió requerir algunos meses, en consecuencia cada tecnología tiene sus ventajas y desventajas (Tabla 3.8).

Tecnología	Ventajas	Desventajas	Velocidad
Acceso por Fibra óptica	Liberan el cuello de botella del acceso aumentando el ancho de banda y la calidad de servicio. Incremento en el ancho de banda de la red de acceso hasta cientos de Gbps.	Costos altos, por la necesidad de ductería. Requerimiento de gran tiempo para el despliegue.	Cientos de Gbps.
FSO	Solución alternativa a fibra óptica. No requiere licencia. Inmune a la Interferencia de radio frecuencia. Seguridad en la transmisión.	Requiere línea de vista. Baja eficiencia en condiciones climáticas adversas. Limitación de distancias.	Velocidades de hasta 1.25 Gbps

Tabla 3.8 Ventajas y desventajas de la tecnología FSO y fibra óptica

Los sistemas de **FSO** tienen las limitaciones en la distancia y como cualquier otra tecnología que opera en frecuencias muy altas. Sin embargo; las distancias en los ambientes de acceso de lazos locales están típicamente menos de una milla; por consiguiente, la limitación en la distancia no podría ser un problema real.

Otro rasgo que hace **FSO** atractivo en comparación con soluciones de microonda inalámbricas es el hecho que los sistemas de **FSO** no necesitan una licencia para el funcionamiento.

FSO son sumamente confiables y no están sujetos a la interferencia electromagnética. Proveedores de servicios que empiezan a desplegar los sistemas **FSO** como un aumento de fibra o una estrategia de reemplazo de fibra como una estrategia de acceso. Similar a un pedazo de fibra óptica, **FSO** representa la conectividad de la capa física; por consiguiente, se satisface para acelerar el

despliegue de redes de acceso perfectamente o ampliar las redes integrando FSO en la infraestructura existente.

3.4.5 COMPARACIÓN ENTRE COSTOS ENTRE LA RED ACTUAL DE FIBRA ÓPTICA Y LA RED DE RESPALDO PROPUESTA PARA EL CAMPUS DE LA UCSG

Analizar los costos estimados del despliegue de la tecnología **FSO** en el campus de la **UCSG**, considerando costos de equipos, costo de instalación y gastos imprevistos, para de esta manera dar una idea de la inversión que tendría que realizarse.

También se realiza una comparación en cuanto a costos de **FSO** vs. Fibra óptica, comparando el diseño propuesto en este Proyecto con el tendido actual de fibra que conecta los diferentes nodos de la red de la Universidad, destacando así las ventajas y desventajas de desplegar esta tecnología en un ambiente **LAN**.

La tecnología **FSO** aunque un poco más costosa, tiene muchas ventajas con respecto a las facilidades de implementación, montaje, y pagos por derechos de paso, arriendos de postes y licencias por uso del espectro.

CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de todo el proceso realizado en el diseño de la red **FSO** podemos deducir:

4.1 CONCLUSIONES:

Entre las ventajas que un sistema **FSO** nos ofrece destacan su capacidad, seguridad en la transmisión y su alta disponibilidad. Desde el punto de vista de la capacidad de transmisión, un enlace óptico es la solución ideal para aplicaciones de banda ancha (voz, datos y video) ya que en la actualidad existen equipos capaces de transmitir 1,25 Gbps a 1180 metros con total garantía o 155 Mbps a 2700 mts. para una atenuación de 10 db/Km. Los sistema **FSO** son Full Duplex (Tx / Rx simultáneamente) frente a los sistemas WiFi que son Half-Duplex. Al tratarse realmente de un cambio de medio en la transmisión (continuidad de fibra) un sistema **FSO** no introduce ningún tipo de código y su throughput es el 100% de la velocidad transmitida en el aire.

La tecnología **FSO** es útil y práctica ya que al transmitir luz a través de la atmósfera alcanzando altas velocidades ya que su único limitante las pérdidas producidas por las condiciones climáticas extremas. Mas los esfuerzos por conseguir los equipos indicados por parte de los fabricantes han sido satisfactorios ya que actualmente estos equipos tienen un alto grado de confiabilidad.

La tecnología **FSO** cuenta con muchas ventajas para quienes proveen servicios y aplicaciones en redes **LAN**, pero aún no tiene mucha trascendencia debido a que requiere de línea de vista para operar. Todas las ventajas brindadas por la tecnología **FSO** como la velocidad de transmisión que puede conseguir a pesar de la distancia puede permitir realizar un diseño de una red con distancias bastantes lejanas.

Para el proyecto presentado esta tecnología es muy ventajosa como red de respaldo ya que si ocurriese algún corte en el tendido de fibra o se requiera realizar mantenimiento se puede usar la red de respaldo **FSO** brindando todos los servicios que se ofrecen en la red de fibra.

La fibra óptica, sin duda, es hasta ahora el medio más fiable de comunicaciones ópticas pues ofrece una gran capacidad en ancho de banda. Pero el costo de la obra civil, en el caso de requerirse un subterráneo, es un factor limitante. Además, después de la colocación de la fibra, se vuelve un costo perdido; si el cliente ya no requiere de este servicio o si se cambia de instalaciones, es casi imposible recuperar ese monto.

A pesar de la demanda de un gran ancho de banda, **FSO** sufrirá un período de despliegue gradual enfrentando el desafío de ganar la aceptación del mercado. Este desafío no es único a **FSO**, pero es característico de la mayoría de las nuevas tecnologías. Es necesario dar a conocer todas sus potenciales aplicaciones como; última milla, la extensión de la red metropolitana, la redundancia de la red, o un relleno de huecos ópticos, o donde se requiere un despliegue rápido

A medida que las empresas en el Ecuador conozcan las ventajas de esta tecnología empezarán desplegando **FSO** en sus redes, desarrollando una infraestructura de apoyo global que asegure interoperabilidad e integración con sus sistemas.

Dado que los enlaces ópticos inalámbricos operan en una banda de frecuencia muy alta, la señal portadora no restringe la velocidad de transmisión. Esto indica que la tasa de transmisión teóricamente sólo se encuentra limitada por el desempeño y sensibilidad de los transmisores y receptores.

Si bien es cierto que las emisiones ópticas no son sensibles a la interferencia electromagnética, existen ciertos factores que ocasionan su atenuación. Entre ellos se encuentran la lluvia, la nieve, la niebla y los relámpagos. Particularmente, la radiación infrarroja también es afectada por la iluminación fluorescente y la luz solar. Sin embargo, es posible evitar este problema utilizando la transmisión óptica en espacios cerrados o en el espacio exterior dado que no están expuestos a dichas variaciones climáticas.

Una ventaja bastante notable de la comunicación óptica inalámbrica es que su banda de frecuencia no se encuentra regulada ni requiere de licencias para su uso. Así mismo, dado que las emisiones ópticas no pueden atravesar paredes, los transmisores ubicados en habitaciones distintas no pueden interferir entre sí. Por

las mismas razones, las transmisiones de corto alcance resultan bastante seguras ante intrusiones.

En lo que respecta a la eficiencia en potencia, la transmisión óptica resulta no ser muy ventajosa en comparación con la transmisión en radio frecuencia. En el caso específico de la emisión infrarroja los alcances son bastante reducidos debido a estas limitaciones, de lo contrario los equipos transmisores serían muy costosos o de volúmenes poco adecuados para su uso en dispositivos portátiles.

Por último un aspecto importante a considerar es la seguridad para la visión humana con respecto a las radiaciones infrarrojas y láser. La exposición de la córnea a las radiaciones infrarrojas intermedia y baja puede causar fotokeratitis y cataratas, mientras que las radiaciones infrarrojas altas pueden llegar a quemar la retina ocasionando daños severos a la visión. Así mismo los láseres son potencialmente peligrosos para la visión humana por sus altos niveles de brillo. Sin embargo, los daños ocasionados dependen de su longitud de onda, potencia y apertura. Particularmente se considera que la radiación láser es segura para su visión directa sin un dispositivo de aumento (como binoculares) por debajo de los 5 mW.

4.2 RECOMENDACIONES:

La tecnología **FSO** se debe considerar como una manera eficiente para desarrollar aplicaciones empresariales que requieran de alto ancho de banda, permitiendo así la diversificación del mercado nacional emergente.

Se requiere el desarrollo de pruebas de campo de manera que se pueda determinar con mayor precisión la operabilidad de los sistemas **FSO** en un ambiente climático tan particular como el que presenta nuestro país.

Se espera que una vez que la tecnología haya ganado aceptación en el mercado en consecuencia los precios sigan bajando. La **UCSG**, debería plantearse la posibilidad de adquirir equipos **FSO**, para cubrir los enlaces mas importantes con el propósito de tener un respaldo en el momento en el que ocurra alguna falla o ruptura en la fibra óptica, lo cual ayudaría enormemente a tener una Red muy

segura y con un altísimo grado de confiabilidad o equipos para cubrir un enlace con el edificio recién construido para las carreras de Administración ya que hacia este no hay tendido de fibra el cual si tiene línea de vista tal como se muestra en la Figura 4.1

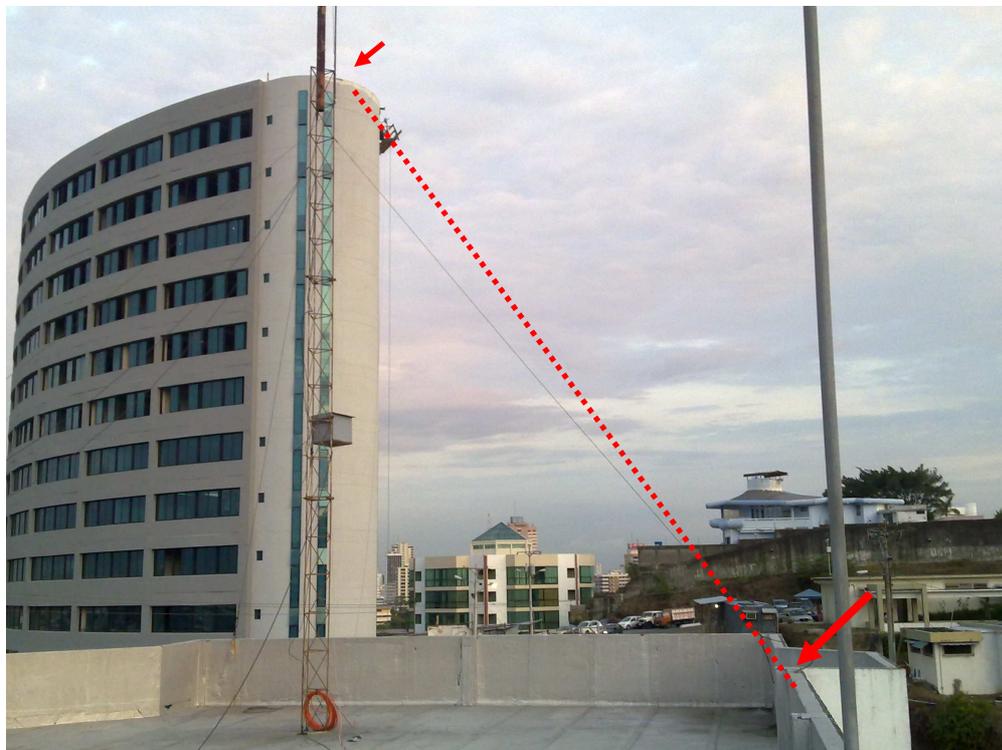


Figura 4.1 Foto del Centro de Cómputo con línea de vista al edificio para Facultad de Administración.

Bibliografía

<http://bdigital.ulpgc.es/digital/visualizar/propiedad.php?accion=tesis&id=2244&vol=no> , Noviembre 2 de 2009

<http://catalogo.unican.es/cgi-bin/abnetopac/O7063/ID29868739?ACC=161>,
Noviembre 10 de 2009

<http://www.idg.es/Comunicaciones/articulo.asp?id=121620>, Noviembre 10 de
2009

<http://bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/bitstream/123456789/1073/2/T10883CAP6.pdf>,
Diciembre 12 de 2009

<http://www.monografias.com/trabajos43/redes-inalambricas/redes-inalambricas.shtml>,
Diciembre 16 de 2009

<http://oa.upm.es/425/01/09200418.pdf>, Enero 4 de 2009

<http://www.ldc.usb.ve/~figueira/Cursos/redes2/EXPOSICIONES/OpticalWireless/contexto.html>,
Enero 8 de 2009

<http://es.wikipedia.org/wiki/Guayaquil#Clima>, Enero 10 de 2009