

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR



FACULTAD DE INGENIERÍA MAESTRÍA EN

REDES DE COMUNICACIONES

INVESTIGACIÓN PREVIA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAESTRÍA

**ESTUDIO DE LA TRANSMISIÓN OPTICA EN ESPACIO LIBRE (FSO)
COMO UNA ALTERNATIVA DE RED INALÁMBRICA PARA ENLACES
PUNTO A PUNTO.**

FABRICIO WLADIMIR TOAPANTA MEDINA

QUITO – ECUADOR

Octubre - 2015

AUTORÍA

Yo, FABRICIO WLADIMIR TOAPANTA MEDINA, portador de la cédula de identidad N°. 1718219742, declaro bajo juramento que la presente investigación es de total responsabilidad del autor, y que se ha presentado las diferentes fuentes de información realizando las citas correspondientes.

FABRICIO WLADIMIR TOAPANTA MEDINA

C.I: 1718219742

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado de manera especial a mis padres Eduardo y Lilia ya que gracias a ellos he podido realizar un nuevo logro más en mi vida profesional, de igual forma a mis hermanos Xavier y Karina y mi sobrino Giordano ya que con el apoyo de ellos y su ayuda desinteresada he realizado los proyectos que me he propuesto; y de forma general a mi familia ya que me apoyaron en todo momento y cuando lo necesitaba.

De igual forma dedico este trabajo a mis abuelos maternos Ramón Medina y Beatriz Freire, abuelos paternos María Toapanta y Reinaldo Toapanta; que ya no están físicamente pero su espíritu y sus enseñanzas me ayudan diariamente a seguir adelante a pesar de los obstáculos que se presenten.

Y por último dedico a un gran amigo especial, ya que siempre estuvo acompañándome en todo momento y todo lugar, de manera incondicional y sincera...a pesar que ya no está físicamente siempre ocupará un lugar especial en mi vida, para ti amigo Aaron en donde quiera que estés, no te olvidaré.

AGRADECIMIENTOS

Extiendo mi más sincero agradecimiento a mi tutor de tesis el Dr. Gustavo Chafla, ya que sin su ayuda y guía no hubiera podido realizar esta investigación, de igual forma agradezco de manera especial a los ingenieros Juan Francisco Chafla y Francisco Balarezo; por su gran ayuda y colaboración en la revisión del proyecto de tesis.

Así mismo agradezco a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador por haberme dado la oportunidad de seguir la carrera que felizmente estoy terminando, a la empresa TATA Consultancy Service por permitirme utilizar sus instalaciones e información para la realización de esta investigación.

Agradezco a mis compañeros de curso quienes supieron ayudarme con sus conocimientos y amistad en todo el tiempo que compartimos clases, a los docentes que supieron impartir el conocimiento de una manera ágil y dinámica.

Resumen

El presente trabajo de investigación realiza un estudio acerca de las tecnologías de comunicaciones ópticas; haciendo énfasis en las redes ópticas para el espacio libre (FSO), mediante un análisis general de las comunicaciones ópticas e inalámbricas, incluyendo una breve descripción de los principios electromagnéticos que rigen para la propagación de las ondas en el espacio libre y por medios guiados.

También se describe los diferentes fenómenos que experimentan las ondas electromagnéticas como: la atenuación, distorsión, refracción, dispersión, etc, incluyendo los principios y leyes que sustentan las comunicaciones inalámbricas que requieren de una línea de vista; de igual forma se expone las principales ventajas y limitaciones que tienen este tipo de redes, incluyendo los diferentes factores climáticos que puedan afectar a la correcta transmisión como: la neblina, lluvia, centelleo, atmosfera, etc.

Una vez entendido el funcionamiento, ventajas y desventajas de las redes FSO, se realiza el diseño del enlace óptico para la implementación de la red FSO en la empresa Tata Consultancy Services (TCS) y el banco del Pichincha, para los cuales se ha considerado los requerimientos de la empresa en referencia al ancho de banda, velocidad de transmisión, seguridad, etc. De igual forma se analiza el medio geográfico para la determinación de lugares de instalación, distancias, equipos y demás implementos necesarios para su instalación.

Y por último se realiza la comparación técnica de los diferentes equipos que oferta el mercado teniendo en cuenta sus características así como las necesidades de la empresa. Haciendo un análisis de costos detallado el cual incluye el precio de los equipos, las obras civiles, implementos y demás equipos necesarios para la instalación; así como la mano de obra y el mantenimiento del mismo.

ABSTRACT

This research work consists of a study about the technologies of optical communications; with emphasis on optical networks for the free space (FSO), through a general analysis of the optical and wireless communications, including a brief description of the principles that govern for electromagnetic wave propagation in the free space as well as guided media.

It also describes the various phenomena experienced by electromagnetic waves as: the attenuation, distortion, refraction, dispersion, and so on; including the laws and principles that support the wireless communications which require a line of sight; in the same way exposes the main advantages and limitations that have this type of networks, as well as the various climatic factors that may affect the correct transmission such as: the fog, rain, scintillation, atmosphere, and so on.

Once understood the operation, advantages and disadvantages of the FSO networks, the next step is to develop the design of the optical link to the implementation of the network in the FSO company Tata Consultancy Services (TCS) and Pichincha Bank, for this has been considered the requirements of the company in reference to the bandwidth, transmission speed, security, etc. In the same way, the geographical environment to determine installation locations, distances, and other necessary equipment for installation were analyzed.

Finally, the technical comparison of the different teams that offer the market taking into account their characteristics as well as the needs of the company. Making a detailed cost analysis which includes the price of the equipment, the civil works, implements, and other equipment needed for installation as well as labor and the maintenance of the same.

Índice de Contenido

Resumen V	i
CAPÍTULO 1	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	3
1.3. ANTECEDENTES	4
1.4. OBJETIVOS	5
1.4.1. Objetivo General.	5
1.4.2. Objetivos Específicos.	5
CAPÍTULO 2	6
2.1. INTRODUCCIÓN	6
2.2. PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN Y ARQUITECTURA	6
2.2.1. Modelo de tres capas.	8
2.2.2. Protocolo OSI/ISO	10
2.2.2.1. Capa Física.	12
2.2.2.2. Capa de Enlace de datos.	12
2.2.2.3. Capa de red.	12
2.2.2.4. Capa de transporte.	12
2.2.2.5. Capa de Sesión.	12
2.2.2.6. Capa de Presentación.	12
2.2.2.7. Capa de Aplicación.	12
2.2.3. Protocolo TCP/IP	13
2.2.3.1. Capas TCP/IP.	14
2.2.3.2. Capa de Red física.	14
2.2.3.3. Capa de vínculo de datos.	15
2.2.3.4. Capa de Internet.	15
2.2.3.4.1. Protocolo IP.	15
2.2.3.4.2. Protocolo ARP.	16
2.2.3.4.3. Protocolo ICMP.	16
2.2.3.5. Capa Transporte.	16
2.2.3.5.1. Protocolo TCP	17
2.2.3.5.2. Protocolo SCTP.	17

2.2.3.5.3.	Protocolo UDP.	17
2.2.3.6.	Capa Aplicación.	18
2.3.	TRANSMISIÓN ÓPTICA EN ESPACIO LIBRE	18
2.3.1.	Antecedentes Generales.....	19
2.3.2.	Fundamentos teóricos.....	21
2.3.2.1.	Transmisores.	21
2.3.2.2.	Receptor.....	22
2.3.2.3.	Subsistema óptico.....	24
2.3.2.3.1.	Lentes ópticos.....	24
2.3.2.3.2.	Diseño óptico de los lentes.	25
2.3.2.4.	Rastreo y Adquisición.	27
2.3.2.4.1.	Sistema de transmisión de haz amplia.....	27
2.3.2.4.1.1.	Auto Tracking.....	28
2.3.2.4.1.2.	Gimbal.	29
2.3.2.4.1.3.	Sistema de auto alineamiento basado en servomotores.....	29
2.3.2.4.1.4.	Sistema de alineamiento por espejo.	30
2.3.2.4.1.5.	Sistemas micro electrónicos	30
2.3.2.4.1.6.	Detectores cuádruplex	31
2.3.2.4.1.7.	Arreglos CCD.....	32
2.3.2.5.	Análisis del margen de enlace.	32
2.3.2.5.1.	Pérdida Óptica	33
2.3.2.5.2.	Pérdida geométrica.	34
2.3.2.5.3.	Pérdida atmosférica y Sensibilidad del receptor.....	35
2.3.2.5.4.	Rango de enlace.....	36
2.3.2.5.5.	Factores que afectan a los sistemas FSO.....	36
2.3.2.5.5.1.	Transmisión a través de la atmósfera.	36
2.3.2.5.5.2.	Dispersión.....	37
2.3.2.5.5.3.	Dispersión tipo Mie.	38
2.3.2.5.5.4.	Absorción.	39
2.3.2.5.5.5.	Ventanas atmosféricas.....	39
2.3.2.5.5.6.	Absorción atmosférica.....	40
2.3.2.5.5.7.	Turbulencia.....	42
2.3.2.5.5.8.	Variaciones del haz.	43

2.3.2.5.5.9.	Centelleo.....	44
2.3.2.5.5.10.	Esparcimiento del haz.....	45
2.3.2.5.5.11.	Impacto del clima.	46
2.3.2.5.5.11.1.	Efecto de la lluvia.....	46
2.3.2.5.5.11.2.	Efecto de la niebla.....	46
2.3.2.5.5.11.3.	Línea de vista.....	48
2.3.2.5.5.11.4.	Otros factores que afectan a la FSO.	49
2.3.2.5.5.11.5.	Factor de la visibilidad.	49
2.3.2.5.5.11.6.	Factor de la distancia.....	50
2.3.2.5.5.11.7.	Factor del ancho de banda.....	50
2.3.2.5.5.11.8.	Selección de la longitud de onda para la transmisión.....	51
2.3.3.	Estándares para FSO.	52
2.4.	TRANSMISIÓN INALAMBRICA	54
2.4.1.	Antecedentes generales.	54
2.4.2.	Protocolo de comunicaciones.....	55
2.4.2.1.	Gateway para acceso a Internet en el hogar.....	56
2.4.2.2.	Estándar IEEE 802.11/WiFi.....	58
2.4.2.3.	802.11 legacy.....	58
2.4.2.4.	802.11a.....	58
2.4.2.5.	802.11b.....	59
2.4.2.6.	802.11c.....	59
2.4.2.7.	802.11d.....	59
2.4.2.8.	802.11e.....	59
2.4.2.9.	802.11f.....	60
2.4.2.10.	802.11g.....	60
2.4.2.11.	802.11h.....	60
2.4.2.12.	802.11i.....	60
2.4.2.13.	802.11j.....	60
2.4.2.14.	802.11n.....	60
2.4.2.15.	IEEE 802.15.4/ZigBee.....	61
2.4.2.16.	Arquitectura de comunicaciones.....	62
2.4.2.17.	Modelo de red.....	63
2.4.2.18.	Arquitectura de transporte de datos.....	64

2.4.2.19.	Fiabilidad y seguridad.....	65
2.4.2.20.	ADSL.....	66
2.4.2.20.1.	Descripción.....	67
2.4.2.20.2.	Ventajas y desventajas.....	68
2.5.	TRANSMISIÓN POR FIBRA ÓPTICA	69
2.5.1.	Antecedentes generales.....	70
2.5.2.	Estándar ANSI/TIA/EIA-568-B.3/Fibra Óptica.....	73
	CAPÍTULO 3	76
3.1.	INTRODUCCIÓN	76
3.2.	ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA TECNOLOGÍA FSO Y FIBRA ÓPTICA	77
3.2.1.	Características de la fibra óptica.....	77
3.2.2.1	Fibra monomodo.....	78
3.2.2.2	Fibra multimodo.....	79
3.2.2.3	Aplicaciones de FSO.....	82
3.2.2.3.1	Aplicaciones comunes.....	82
3.2.2.3.2	Aplicaciones Especializadas.....	83
	CAPÍTULO 4	89
4.1	INTRODUCCIÓN	89
4.2	CONSIDERACIONES PRELIMINARES	90
4.2.1	Estudio del lugar de instalación.....	90
4.2.2	Determinación del lugar para la instalación.....	91
4.2.3	Determinación de la línea de vista.....	91
4.2.4	Determinación de la distancia del enlace.....	91
4.2.5	Consideraciones del montaje del equipo.....	92
4.2.6	Instalación y configuración de la infraestructura.....	92
4.2.7	Alineación de los sistemas.....	92
4.2.8	Verificación y corrección del enlace.....	93
4.3	DISEÑO DE LA RED FSO	95
4.3.1	Topología de la red.....	96
4.3.2	Jerarquía de la red.....	97
4.3.3	Línea de vista y distancia del enlace.....	99
4.3.4	Potencia de emisión de la señal y sensibilidad del receptor.....	101
4.3.5	Atenuación geométrica.....	102

4.3.6	Atenuación atmosférica.....	102
4.3.7	Análisis de la tasa de transmisión de la red actual.	103
4.3.8	Diseño para el enlace inalámbrico óptico.....	104
4.3.9	Análisis del Clima del Sector en donde se ubican los edificios a ser Interconectados con la FSO.	105
4.3.10	Determinación de los equipos.	107
4.3.11	Análisis de Costo.....	108
CAPÍTULO 5.....		111
5.1	CONCLUSIONES.....	111
5.2	RECOMENDACIONES.....	112
REFERENCIAS		114
GLOSARIO DE TÉRMINOS		117

Índice de Figuras

<i>Figura 2.1.</i> Arquitectura simplificada para la transferencia de archivos	8
<i>Figura 2.2.</i> Redes y arquitecturas de protocolos	10
<i>Figura 2.3.</i> Protocolos en una arquitectura simplificada	10
<i>Figura 2.4.</i> Capas del Protocolo OSI	11
<i>Figura 2.5.</i> Modelo de arquitectura de protocolo	14
<i>Figura 2.6.</i> Cuadro comparativo de los componentes OSI y TCP/IP	14
<i>Figura 2.7.</i> Comportamiento de un rayo de Luz	25
<i>Figura 2.8.</i> Lentes convergentes y divergentes	26
<i>Figura 2.9.</i> Transmisión atmosférica medida sobre el mar a 1820m en camino horizontal	40
<i>Figura 2.10.</i> Transmisión como función de la longitud de onda sobre condiciones en un área urbana (visibilidad = 5 km)	41
<i>Figura 2.11.</i> Transmisión en un cielo despejado como función de la longitud de onda para el agua (gráfica superior) y el dióxido de carbón (gráfica inferior)	41
<i>Figura 2.12.</i> Desviación del haz bajo la influencia de células turbulentas de menor tamaño que el diámetro del haz (ampliación del haz)	45
<i>Figura 2.13.</i> Radiación absorbida por la retina	52
<i>Figura 2.14.</i> Absorción de la luz en el ojo Humano	53
<i>Figura 2.15.</i> Capas del estándar IEEE 802.11/WiFi	58
<i>Figura 3.1.</i> Perfil y propagación de la luz en una fibra monomodo	79
<i>Figura 3.2.</i> Componentes de la fibra multimodo.....	79
<i>Figura 3.3.</i> Perfil y propagación de luz en una fibra multimodo de índice escalonado	80
<i>Figura 3.4.</i> Perfil y propagación de la luz en una fibra multimodo de índice gradual	80
<i>Figura 3.5.</i> Componentes de la fibra multimodo.....	80
<i>Figura 3.6.</i> Ventanas de transmisión de la fibra óptica	81
<i>Figura 3.7.</i> Aplicación de un FSO en una red Metropolitana	83
<i>Figura 3.8.</i> Sistema de comunicaciones ópticas en fibra vs sistema FSO	84
<i>Figura 4.1.</i> Diagrama de flujo para solucionar problemas con el Enlace	94
<i>Figura 4.2.</i> Imagen de la ubicación del Ed. Principal del Banco Pichincha y el Ed. Tecnológico de TCS sector Parque El Ejido, Quito – Ecuador	96
<i>Figura 4.3.</i> Niveles jerárquicos de los Switchs	98
<i>Figura 4.4.</i> Ejemplo de Cálculo de Distancias entre los enlaces inalámbricos ópticos	99
<i>Figura 4.5.</i> Distancia entre el Ed. Principal del Banco Pichincha y el Ed. Tecnológico de TCS	100

<i>Figura 4.6.</i> Fotografía de la azotea del edificio principal TCS el cual se observa con clima despejado y con neblina	106
<i>Figura 4.6.</i> Modelo del Equipo DT-120 de Canon CanoBeam.....	108
<i>Figura 4.7.</i> Modelo de equipo SONABeam DT-120	108

Índice de Tablas

<i>Tabla 2.1.</i> Características de los gimbal	29
<i>Tabla 2.2.</i> Tabla de cálculo de enlace	33
<i>Tabla 2.3.</i> Códigos internacionales de la visibilidad de las condiciones del clima y la Precipitación	47
<i>Tabla 2.4.</i> Estándares para la seguridad del ojo humano en sistemas	53
<i>Tabla 3.1.</i> Tabla de comparación entre fibra multimodo y monomodo	81
<i>Tabla 3.2.</i> Valores de tipos de atenuación de la fibra óptica	82
<i>Tabla 3.3.</i> Comparación entre tecnologías de acceso de Banda Ancha vs FSO	88
<i>Tabla 4.1.</i> Tabla de las áreas de Producción y Tecnología del Banco y TCS	97
<i>Tabla 4.4.</i> Mediciones de la Altura y Coordenadas Geográficas de los edificios a interconectarse	100
<i>Tabla 4.5.</i> Tasa de transmisión por áreas y en horas pico	104
<i>Tabla 4.6.</i> Parámetros importantes en el enlace propuesto	105
<i>Tabla 4.7.</i> Valores de las Precipitaciones anuales de la ciudad de Quito	106
<i>Tabla 4.8.</i> Características de los equipos CanoBeam DT-120 y SONABeam 1250-M	107
<i>Tabla 4.9.</i> Valores Unitarios y Totales de los equipos FSO	109
<i>Tabla 4.10.</i> Valores de los implementos y mano de obra para la instalación de la red FSO	110

Índice de Ecuaciones

<i>Ecuación 2.1</i> Relación entre velocidad de la luz y un medio vacío	24
<i>Ecuación 2.2</i> Ley de Snell	25
<i>Ecuación 2.3</i> Dispersión de Rayleigh	37
<i>Ecuación 2.4</i> Dispersión tipo Mie	38
<i>Ecuación 2.5</i> Cálculo de la Absorción	39
<i>Ecuación 2.6</i> Cálculo de Variaciones del Haz	43
<i>Ecuación 2.7</i> Cálculo del Centelleo	44
<i>Ecuación 2.8</i> Cálculo de la Variancia para Fluctuaciones	44
<i>Ecuación 2.9</i> Cálculo de Esparcimiento del Haz	45
<i>Ecuación 4.1</i> Cálculo de Distancias	101
<i>Ecuación 4.2</i> Cálculo de Distancia	101
<i>Ecuación 4.3</i> Cálculo de Atenuación Geométrica	102
<i>Ecuación 4.4</i> Cálculo de Coeficiente de Atenuación	103
<i>Ecuación 4.5</i> Cálculo de Transmitancia Óptica	103
<i>Ecuación 4.6</i> Cálculo de Atenuación Atmosférica	103
<i>Ecuación 4.7</i> Cálculo del Margen del Enlace	104

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación presenta un estudio acerca de las redes inalámbricas y de forma especial las Redes Ópticas de Espacio Libre, este tipo de redes en la actualidad están en constante crecimiento por su versatilidad y nivel de funcionamiento, ya que operan en el medio ambiente sin la necesidad de cables o equipos complejos tanto en su configuración como su manejo.

La transmisión óptica de espacio libre (FSO, siglas en inglés de Free Space Optical), "...es una tecnología de comunicación óptica que utiliza la propagación de la luz (visible o infrarroja) en la atmósfera para transmitir información entre dos puntos."(Harvard Broadband Communications Laboratory, 2009) Al igual que las redes de fibra óptica, esta tecnología utiliza un diodo emisor de luz o un láser como fuente de transmisión, aunque no necesita que el haz de luz sea guiado a través de cables ópticos. Para su recepción, estos haces de luz operan en la parte de los terahertz (THz) del espectro. Para recibir la señal, los haces de luz se centran en un lente de recepción conectada a un receptor de alta sensibilidad a través de un cable de fibra óptica.

Las comunicaciones ópticas, de varias formas, han sido usadas por cientos de años. Desde los antiguos griegos que pulían sus escudos para enviar señales durante la batalla a los modernos

semáforos y el telégrafo inalámbrico solar, también llamado heliógrafo que transmite señales en código para comunicarse.

La invención del láser en la década de 1960 revolucionó las comunicaciones ópticas en el espacio libre. Las organizaciones militares estaban particularmente interesadas y se impulsó su desarrollo. Sin embargo, la tecnología perdió impulso en el mercado cuando la instalación de redes de fibra óptica para uso civil estaba en su apogeo.

La óptica de espacio libre se utiliza también para permitir las comunicaciones de las naves espaciales. Los enlaces ópticos pueden ser implementados utilizando láseres de luz infrarroja, aunque también para enviar datos a bajas velocidades, y para distancias cortas se utilizan LED's. "El rango máximo de enlaces terrestres es del orden de 23 km, pero la estabilidad y la calidad del enlace es altamente dependiente de los factores atmosféricos como lluvia, niebla, polvo y calor." (Cambron, P., 2003) En el espacio exterior, el alcance de las comunicaciones ópticas de espacio libre en la actualidad es del orden de varios miles de kilómetros, pero tiene el potencial de alcanzar distancias interplanetarias de millones de kilómetros, utilizando telescopios ópticos como repetidores de haz. La comunicación infrarroja IrDA utilizada por algunos dispositivos como los teléfonos celulares es también una forma muy simple de comunicación óptica de espacio libre.

A continuación se menciona, sólo algunas de las muchas de aplicaciones de la FSO:

- Conexiones LAN a LAN en Campus con velocidades de Fast Ethernet o Gigabit Ethernet.
- Conexiones LAN a LAN en una ciudad. ejemplo, Red de área metropolitana.
- Para cruzar una vía pública u otras barreras imposibles para emisor y receptor.
- Rápido acceso a servicios de banda ancha de alta velocidad en las redes de fibra óptica.
- Conexión Voz-Datos convergentes.
- El rayo de luz puede ser muy delgado, lo que lo hace difícil de interceptar. En cualquier caso, es comparablemente fácil cifrar datos que viajan a través de una conexión FSO, lo que la hace muy segura. FSO provee inmunidad en caso de interferencia electromagnética, ya que utiliza luz en vez de microondas.

En este contexto, la presente investigación se orienta al Estudio de la Transmisión Óptica en Espacio Libre (FSO) como una alternativa de red inalámbrica para enlaces punto a punto. Partiendo de un análisis del estado del arte de la Transmisión Óptica en Espacio Libre (FSO) y de otras tecnologías inalámbricas; después, se evalúa las condiciones geográficas y ambientales mínimas para garantizar una transmisión óptica apropiada. Posteriormente, se revisa los componentes físicos que se requiere para realizar una red a nivel urbano teniendo en cuenta la geografía y las condiciones ambientales; y, finalmente, se realiza el estudio costo-beneficio requerido para la implementación de este tipo de tecnología.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto busca realizar un estudio y diseño de un enlace de transmisión óptica en el espacio libre (FSO), como una opción válida dentro del campo de las comunicaciones inalámbricas, considerando principalmente, el amplio espectro de posibilidades de explotación de esta tecnología, para este caso de estudio se requiere mantener una comunicación permanente entre los edificios del banco del Pichincha y el edificio tecnológico de TCS en el envío y recepción de gran cantidad de flujo de información.

Además que se realizará una investigación en el campo de la comunicación óptica el cual permitirá tener un mejor conocimiento de esta tecnología, que en la actualidad es poco difundido, tomando en cuenta que las comunicaciones ópticas son totalmente nuevas e innovadoras.

El enlace estará estructurado de forma que la red FSO permita el transporte de múltiples comprimidos de onda en una misma fibra, de tal forma que se pueda alcanzar la transmisión en el rango de los gigabits por segundo en cada fibra, para los enlaces de corta y larga distancia; brindando una gran velocidad de transmisión y la seguridad que una red óptica brinda.

En el país, este tipo de tecnología no está muy desarrollada, ya sea por su desconocimiento de uso, ó por falta de técnicos que puedan implementar de manera eficiente, sin embargo, también se evidencia una gran escalabilidad en las principales ciudades. Precisamente por estas razones, a través de esta investigación, se realiza un estudio minucioso de la transmisión en espacio libre, sus principales ventajas y desventajas para la implementación en el área urbana.

Con todo, es necesario reconocer que, la implementación de la FSO a nivel local, específicamente en la ciudad de Quito, resulta un gran reto, especialmente por la situación geográfica de la ciudad, que presenta espacios muy cerrados debido a las montañas circundantes, lo cual se suma a los estados climáticos cambiantes y sobre todo al crecimiento urbanístico vertical.

No obstante, la propia tecnología FSO, actualmente provee de soluciones creativas, capaces de superar con alto grado de eficiencia las problemáticas que puedan presentarse a la hora de su implementación; teniendo así una alta velocidad en la transmisión de datos, seguridad en el envío de información y con precios muy razonables en comparación a la implementación de la fibra óptica.

1.3. ANTECEDENTES

En los últimos años, la investigación sobre los medios de transmisión inalámbrica ha dado pasos agigantados, permitiendo el acceso a lugares muy lejanos con geografías muy difíciles, lo que ha dado cabida al surgimiento de nuevas formas de comunicarse, así como a mejoras las ya existentes.

La Transmisión en Espacio Libre es una de ellas y, aunque en el pasado, su implementación perdió fuerza debido a su alto costo, actualmente se ha retomado, gracias a nuevas tecnologías y a la aparición en el mercado, de nuevos aparatos con mucho menor costo.

A nivel de país se ha realizado varios estudios sobre el tema, pero la mayoría no fueron aplicados por lo manifestado en el párrafo anterior. Es así que, existen antecedentes en el sentido de que se trató de usar la transmisión en espacio libre en ciudades donde no se podía acceder mediante cable o transmisión inalámbrica por su geografía o por sus factores climáticos, lo que devela la falta de bases teóricas y metodológicas que posibiliten la implementación efectiva de la FSO.

Por esta razón, en ciertas universidades ecuatorianas, y en particular, en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, se ha creado la maestría en Redes de Telecomunicaciones, con la finalidad de preparar profesionales calificados en esta área.

En las fuentes nacionales y aún a nivel de América del Sur, se puede observar propuestas institucionales, pero sólo existen aportes teóricos, en cuanto a implementaciones a nivel urbano.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General.

“Estudio de la Transmisión Óptica en Espacio Libre (FSO) como una alternativa de red inalámbrica para enlaces punto a punto.”

1.4.2. Objetivos Específicos.

- Analizar los estados del arte de la Transmisión Óptica en Espacio Libre FSO y otras tecnologías inalámbricas.
- Realizar un estudio comparativo de la Transmisión FSO y otras tecnologías inalámbricas que existen en el mercado.
- Analizar y Estudiar los componentes físicos que se requiere para realizar una red a nivel urbano teniendo en cuenta la geografía y las condiciones ambientales.
- Diseñar la red FSO para la empresa TATA Consultancy Services con el cual se conectará desde el edificio Principal del banco del Pichincha con el edificio de tecnología.
- Realizar el estudio de costo-beneficio que se requiere para la implementación de este tipo de transmisiones ópticas.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN

Las redes inalámbricas en la actualidad están en un crecimiento tanto como de uso, implementación y evolución; están presentes en muchas partes inclusive en lugares que resulta difícil el ingreso de las telecomunicaciones, sean estén por medio guiado como la fibra óptica que a pesar de sus enormes beneficios tiene sus limitaciones; es ahí donde se hace indispensable el uso de las redes inalámbricas en especial las de origen satelital.

Las redes FSO al igual que el resto de redes guiadas y las no guiadas tienen protocolos de comunicación los cuales se los deben conocer para su mejor aprovechamiento de las mismas; como por ejemplo los protocolos OSI, y el conjunto de protocolos TCP/IP.

2.2. PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN Y ARQUITECTURA

En el estudio de las comunicaciones entre computadores y las redes de computadores, son especialmente relevantes los siguientes conceptos:

- Protocolos
- Las arquitecturas para comunicaciones entre computadores

Para la comunicación entre dos entidades situadas en sistemas diferentes es necesario la definición y la utilización de protocolos.

Existen varias definiciones acerca de los protocolos de comunicación, y la mayoría coinciden que es un conjunto de normas que son usados por los equipos de informática para la gestión de diálogos para sus intercambios de información, es decir que *hablen el mismo idioma*.

Este conjunto de convenios se denominan protocolos los cuales permiten comunicar a dos o más equipos diferentes entre sí, sin importar la marca del fabricante ya que estos protocolos son universales y adaptados para su uso.

A lo largo del tiempo estas reglas han ido evolucionando y mejorando acorde al apareamiento de nuevas formas de comunicarse, los cuales han permitido ir usando protocolos más útiles para nuevas máquinas. Tanto así que han ido naciendo nuevos protocolos y estos han sido usados por los fabricantes para así asegurarse la compatibilidad con el resto de marcas.

Los puntos claves que definen o caracterizan a un protocolo son:

- **La sintaxis:** incluyen aspectos tales como el formato de los datos y los niveles de señal.
- **La semántica:** incluye información de control para la coordinación y el manejo de errores.
- **La temporización:** incluye la sintonización de velocidades y secuencias

Una vez que se ha dado un repaso general sobre el concepto de protocolo, se pasa a definir el concepto de arquitectura para las comunicaciones entre computadores. En lugar de implementar toda la lógica para llevar a cabo la comunicación en un único módulo, dicha tarea se divide en subtareas, cada una de las cuales se realiza por separado. A modo de ejemplo, la figura 2.1 muestra cómo empleando tres módulos, se podría implementar una aplicación de transferencia de ficheros, los dos módulos en ambos sistemas intercambian ficheros y órdenes; sin embargo en vez de exigir que el módulo de transferencia se encargue de los detalles con los que se envía los datos y órdenes; éste se encargará de asegurar que el intercambio de órdenes y datos se realicen de forma correcta.

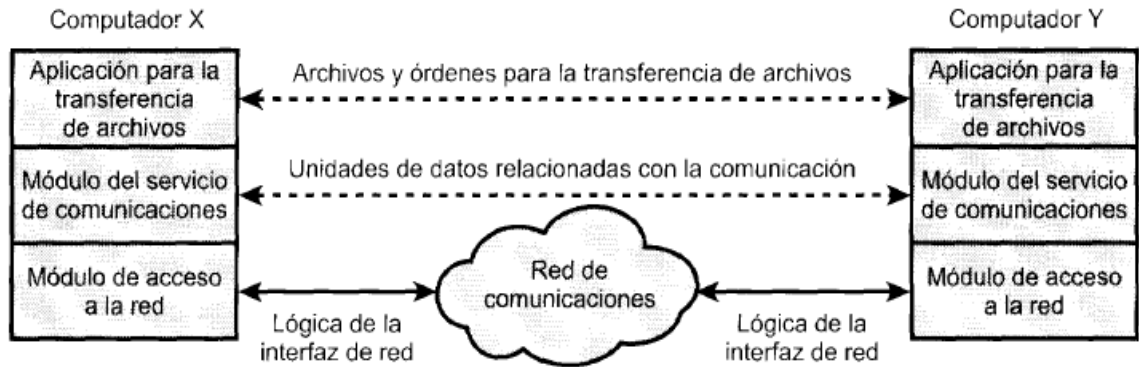


Figura 2.1. Arquitectura simplificada para la transferencia de archivos

Fuente: (Stallings, 2000)

En resumen, los tres módulos de la figura 2.1; el módulo de transferencia de ficheros contiene toda la lógica que es exclusiva de la aplicación para la transferencia de ficheros, tal como la de una palabra clave, órdenes de fichero y registros del mismo. Se necesita que esta información sea transmitida de una forma segura.

El módulo de servicios de comunicaciones trata de asegurar que entre los dos computadores estén activos, y preparados para la transferencia de datos, así como de seguir la pista de los datos que se intercambian, asegurando su envío.

No obstante estas tareas son independientes del tipo de red que se esté usando, por lo tanto la lógica encargada de tratar con la red se considera un módulo separado; de esta forma si se modifica la red que se esté usando, solo se verá afectado el módulo de acceso a la red.

2.2.1. Modelo de tres capas.

Poniendo en términos generales, se puede definir que las comunicaciones involucran a tres agentes: aplicaciones, computadores y redes, como ejemplo está la transferencia de ficheros; este tipo de aplicaciones se ejecutan frecuentemente entre computadores los cuales procesan múltiples aplicaciones simultáneas; estos se conectan a redes y los datos a intercambiar se transfieren por la red de un computador a otro. Por lo tanto, la transferencia de datos desde una aplicación a otra implica en primer lugar la obtención de los mismos y posteriormente hacerle llegar a la aplicación correspondiente.

Por lo dicho anteriormente, es natural que se organice las tareas en tres capas independientes:

- Capa de acceso a red
 - Capa de transporte
 - Capa de aplicación
- **Capa de acceso a red:** está relacionada con el intercambio de datos entre el computador y la red a la que está conectada, el computador emisor debe proporcionar a la red la dirección del destino, de tal forma que la red pueda encaminar los datos al destinatario correcto. El computador emisor necesita hacer uso de algunos servicios que son proporcionados por la red, como por ejemplo la gestión de prioridades, etc.
- **Capa de transporte:** independientemente de la naturaleza de las aplicaciones que estén intercambiando datos, es un requisito que los datos sean transferidos de una forma segura, y deseable que todos los datos lleguen a su destino y en el orden que fueron enviados, por los mecanismos que proporcionan dicha seguridad; ya que estos son independientes de la naturaleza de las aplicaciones, por lo cual es común centrar este procedimiento en una capa común que compartan todas las aplicaciones.
- **Capa de aplicaciones:** contiene la lógica necesaria para admitir varias aplicaciones de usuario y para cada distinta aplicación.

En la figura 2.2 se muestra una arquitectura sencilla con el cual se observa a tres computadores conectados a una red, cada computador tiene software en la capa de acceso a la red, de transporte y para una o varias aplicaciones; cada computador debe tener una dirección de red el cual permite a la red proporcionar datos al computador apropiado.

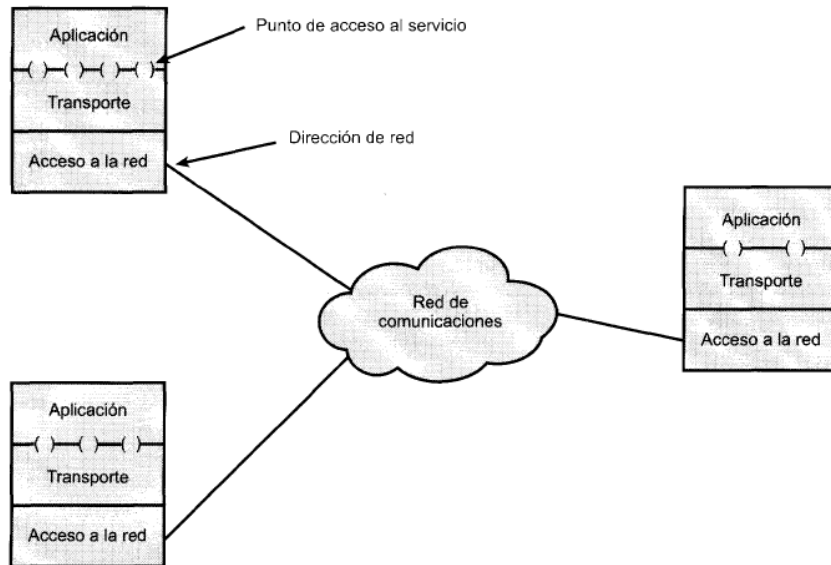


Figura 2.2. Redes y arquitecturas de protocolos

Fuente: (Stallings, 2000)

La figura 2.3 se observa cómo se comunican, mediante un protocolo, los módulos en el mismo nivel de computadores diferentes, la capa de transporte pasa el mensaje a la capa de acceso a la red, la cual proporciona las instrucciones necesarias a la red para que envíe el mensaje, se debe observar que la red no necesita conocer la dirección del punto de acceso al servicio en el destino; todo lo que no necesita conocer es que los datos estén dirigidos entre computadores.

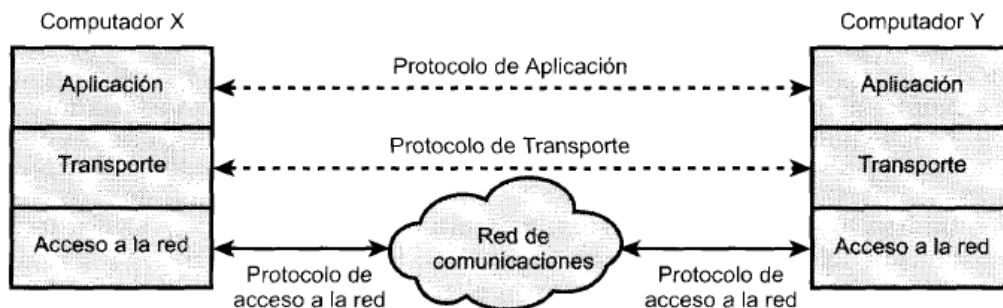


Figura 2.3. Protocolos en una arquitectura simplificada

Fuente: (Stallings, 2000)

2.2.2. Protocolo OSI/ISO

El modelo OSI (Open Systems Interconnection) se desarrolló por la Organización Internacional de Estandarización ISO (International Organization for Standardization) como

una arquitectura para comunicaciones entre computadores, con el objetivo de ser el marco de referencia en el desarrollo de protocolos estándares. OSI considera siete capas o niveles:

- Aplicación.
- Presentación.
- Sesión.
- Transporte.
- Red.
- Enlace de datos.
- Física.

En la figura 2.4 se muestra el modelo OSI y se definen brevemente las funciones que se realizan en cada capa. La intención del modelo OSI es que los protocolos se desarrollan de forma tal que realicen funciones de cada uno de las capas.

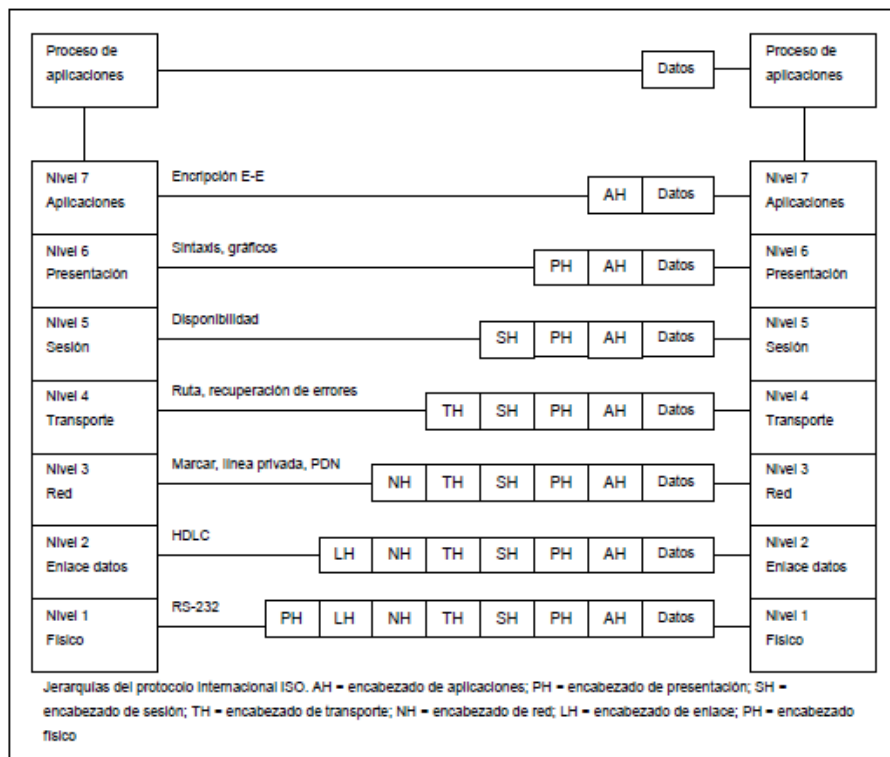


Figura 2.4. Capas del Protocolo OSI

Fuente: (Gralla, 2007)

2.2.2.1. Capa Física.

Se encarga de la transmisión de cadenas de bits, no estructurados sobre el medio físico; está relacionada con las características mecánicas, eléctricas, funcionales y de procedimiento para acceder al medio físico.

2.2.2.2. Capa de Enlace de datos.

Proporciona un servicio de transferencia de datos seguro a través del enlace físico; envía bloques de datos (tramas) llevando a cabo la sincronización, el control de errores y flujo necesarios.

2.2.2.3. Capa de red.

Proporciona independencia a los niveles superiores respecto a las técnicas de conmutación y de transmisión utilizadas para conectar los sistemas; es responsable del establecimiento, mantenimiento y cierre de las conexiones.

2.2.2.4. Capa de transporte.

Proporciona seguridad, transferencia transparente de datos entre los puntos finales; proporciona además procedimientos de recuperación de errores, y control de flujo origen-destino.

2.2.2.5. Capa de Sesión.

Proporciona control de la comunicación entre las aplicaciones; establece, gestiona y cierra las conexiones (sesiones) entre las aplicaciones cooperadoras.

2.2.2.6. Capa de Presentación.

Proporciona a los procesos de aplicación independencia respecto a las diferencias en la representación de los datos (sintaxis).

2.2.2.7. Capa de Aplicación.

Proporciona el acceso al entorno OSI para los usuarios y también proporciona servicio de información distribuida.

2.2.3. Protocolo TCP/IP

Existen dos arquitecturas que son básicas para el desarrollo de los estándares de comunicación; por un lado están el conjunto de los protocolos TCP/IP, y por el otro el modelo OSI/ISO que se lo mencionó anteriormente y como lo muestra la figura 2.6. La arquitectura que más se acopló para la interconexión de sistemas es la TCP/IP, que es el resultado del la investigación y desarrollo que se llevo a cabo en la red experimental de conmutación de paquetes ARPANET, financiada por el Departamento de Defensa de USA. Esta familia contiene una extensa colección de protocolos que se han regido como los estándares para la Internet.

De manera contraria al modelo OSI/ISO, TCP/IP no tiene un modelo de referencia, no obstante ya que es un protocolo estándar se han desarrollado (figura 2.5), todas las tareas involucradas en la comunicación se puede organizar en cinco capas relativamente independientes:

- Capa de aplicación.
- Capa origen-destino o transporte.
- Capa internet.
- Capa de acceso a la red.
- Capa física.

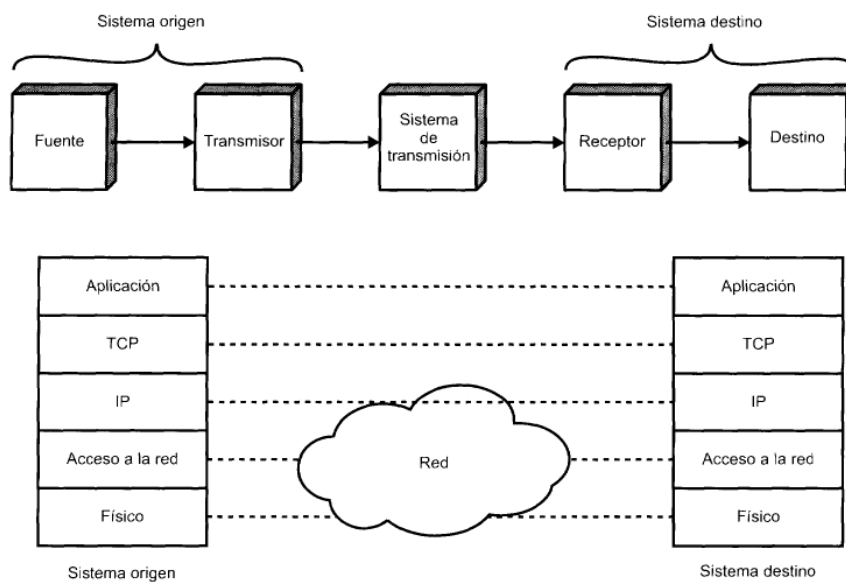


Figura 2.5. Modelo de arquitectura de protocolo

Fuente: (Weichel, 1990)

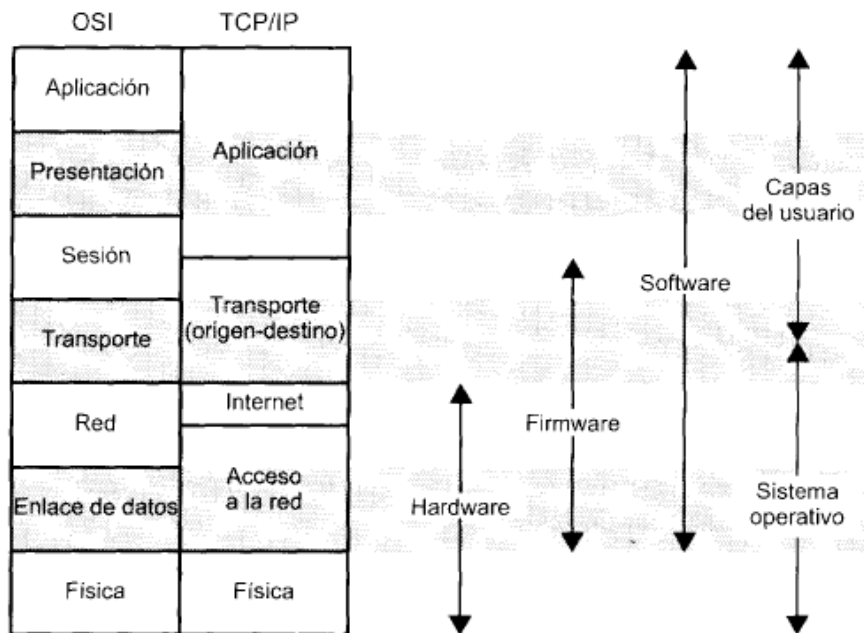


Figura 2.6. Cuadro comparativo de los componentes OSI y TCP/IP

Fuente: (Weichel, 1990)

2.2.3.1. Capas TCP/IP.

El modelo TCP/IP es una descripción de protocolos de red desarrollado por Vinton Cerf y Robert E. Kahn, en la década de 1970.

Este modelo TCP/IP describe un conjunto de guías generales de diseño e implementación de protocolos de red específicos para permitir que un equipo pueda comunicarse en una red. TCP/IP provee conectividad de extremo a extremo especificando como los datos deberían ser formateados, direccionados, transmitidos, enrutados y recibidos por el destinatario. El modelo TCP/IP y los protocolos relacionados son mantenidos por la IETF.

2.2.3.2. Capa de Red física.

La capa de red física especifica las características del hardware que se utilizará para la red. Por ejemplo, la capa de red física especifica las características físicas del medio de comunicación; la capa física de TCP/IP describe los estándares de hardware

como IEEE 802.3, la especificación del medio de red Ethernet, y RS-232, la especificación para los conectores estándar.

2.2.3.3. Capa de vínculo de datos.

La capa de vínculo de datos identifica el tipo de protocolo de red del paquete, en este caso TCP/IP. La capa de vínculo de datos proporciona también control de errores y estructuras. Algunos ejemplos de protocolos de capa de vínculo de datos son las estructuras Ethernet IEEE 802.2 y Protocolo punto a punto (PPP).

2.2.3.4. Capa de Internet.

La capa de Internet, también conocida como capa de red o capa IP, acepta y transfiere paquetes para la red. Esta capa incluye el potente Protocolo de Internet (IP), el protocolo de resolución de direcciones (ARP) y el protocolo de mensajes de control de Internet (ICMP).

2.2.3.4.1. Protocolo IP.

El protocolo IP y sus protocolos de enrutamiento asociados son posiblemente la parte más significativa del conjunto TCP/IP. El protocolo IP se encarga de:

- **Direcciones IP:** Las convenciones de direcciones IP forman parte del protocolo IP. Cómo diseñar un esquema de direcciones IPv4 introduce las direcciones IPv4 y Descripción general de las direcciones IPv6 las direcciones IPv6.
- **Comunicaciones de host a host:** El protocolo IP determina la ruta que debe utilizar un paquete, basándose en la dirección IP del sistema receptor.
- **Formato de paquetes:** el protocolo IP agrupa paquetes en unidades conocidas como datagramas. Puede ver una descripción completa de los datagramas en Capa de Internet: preparación de los paquetes para la entrega.
- **Fragmentación:** Si un paquete es demasiado grande para su transmisión a través del medio de red, el protocolo IP del sistema de envío divide el paquete en fragmentos de menor tamaño. A continuación, el protocolo IP del sistema receptor reconstruye los fragmentos y crea el paquete original.

En la actualidad ya se admite los formatos de direcciones IPv4 e IPv6, para evitar confusiones con el uso del Protocolo de Internet, se utiliza una de las convenciones siguientes:

- Cuando se utiliza el término "IP" en una descripción, ésta se aplica tanto a IPv4 como a IPv6.
- Cuando se utiliza el término "IPv4" en una descripción, ésta sólo se aplica a IPv4.
- Cuando se utiliza el término "IPv6" en una descripción, ésta sólo se aplica a IPv6.

2.2.3.4.2. Protocolo ARP.

El protocolo de resolución de direcciones (ARP) se encuentra conceptualmente entre el vínculo de datos y las capas de Internet. ARP ayuda al protocolo IP a dirigir los datagramas al sistema receptor adecuado asignando direcciones Ethernet (de 48 bits de longitud) a direcciones IP conocidas (de 32 bits de longitud).

2.2.3.4.3. Protocolo ICMP.

El protocolo de mensajes de control de Internet (ICMP) detecta y registra las condiciones de error de la red. ICMP registra:

- Paquetes soltados: Paquetes que llegan demasiado rápido para poder procesarse.
- Fallo de conectividad: No se puede alcanzar un sistema de destino.
- Redirección: Redirige un sistema de envío para utilizar otro enrutador.

2.2.3.5. Capa Transporte.

La capa de transporte TCP/IP garantiza que los paquetes lleguen en secuencia y sin errores, al intercambiar la confirmación de la recepción de los datos y retransmitir los paquetes perdidos. Este tipo de comunicación se conoce como transmisión de punto a punto. Los protocolos de capa de transporte de este nivel son el Protocolo de control de transmisión (TCP), el Protocolo de datagramas de usuario (UDP) y el Protocolo de

transmisión para el control de flujo (SCTP). Los protocolos TCP y SCTP proporcionan un servicio completo y fiable. UDP proporciona un servicio de datagrama poco fiable.

2.2.3.5.1. Protocolo TCP

TCP permite a las aplicaciones comunicarse entre sí como si estuvieran conectadas físicamente. TCP envía los datos en un formato que se transmite carácter por carácter, en lugar de transmitirse por paquetes discretos. Esta transmisión consiste en lo siguiente:

- Punto de partida, que abre la conexión.
- Transmisión completa en orden de bytes.
- Punto de fin, que cierra la conexión.

TCP conecta un encabezado a los datos transmitidos. Este encabezado contiene múltiples parámetros que ayudan a los procesos del sistema transmisor a conectarse a sus procesos correspondientes en el sistema receptor.

TCP confirma que un paquete ha alcanzado su destino estableciendo una conexión de punto a punto entre los hosts de envío y recepción. Por tanto, el protocolo TCP se considera un protocolo fiable orientado a la conexión.

2.2.3.5.2. Protocolo SCTP.

SCTP es un protocolo de capa de transporte fiable orientado a la conexión que ofrece los mismos servicios a las aplicaciones que TCP. Además, SCTP admite conexiones entre sistema que tienen más de una dirección, o de host múltiple. La conexión SCTP entre el sistema transmisor y receptor se denomina asociación. Los datos de la asociación se organizan en bloques. Dado que el protocolo SCTP admite varios hosts, determinadas aplicaciones, en especial las que se utilizan en el sector de las telecomunicaciones, necesitan ejecutar SCTP en lugar de TCP.

2.2.3.5.3. Protocolo UDP.

UDP proporciona un servicio de entrega de datagramas. UDP no verifica las conexiones entre los hosts transmisores y receptores. Dado que el protocolo UDP elimina

los procesos de establecimiento y verificación de las conexiones, resulta ideal para las aplicaciones que envían pequeñas cantidades de datos.

2.2.3.6. Capa Aplicación.

La capa de aplicación define las aplicaciones de red y los servicios de Internet estándar que puede utilizar un usuario. Estos servicios utilizan la capa de transporte para enviar y recibir datos. Existen varios protocolos de capa de aplicación. En la lista siguiente se incluyen ejemplos de protocolos de capa de aplicación:

- Servicios TCP/IP estándar como los comandos ftp, tftp y telnet.
- Comandos UNIX "r", como rlogin o rsh.
- Servicios de nombres, como NIS o el sistema de nombre de dominio (DNS).
- Servicios de directorio (LDAP).
- Servicios de archivos, como el servicio NFS.
- Protocolo simple de administración de red (SNMP), que permite administrar la red.
- Protocolo RDISC (Router Discovery Server) y protocolos RIP (Routing Information Protocol).

2.3. TRANSMISIÓN ÓPTICA EN ESPACIO LIBRE

Un sistema óptico de espacio libre (FSO), es un sistema inalámbrico laser que utiliza luz infrarroja y está diseñado para interconexiones de dos puntos situados en una línea de visión directa (LOS), que se propagan a través del espacio libre.

En algunos países, la libertad que otorga para este tipo de tecnologías al no tener que cumplir con algunas regulaciones, ni obtener concesión de frecuencias hacen de ella una tecnología de rápida instalación y de bajo costo en su despliegue.

Dado que sus receptores y transmisores pueden recibir y transmitir en cualquier lugar de un edificio, y esto hace que no se requiera de cables ni de equipos complejos y, sobre todo ajustando su implementación en cualquier lugar donde las condiciones climáticas sean las más favorables.

2.3.1. Antecedentes Generales

En telecomunicaciones, la FSO, "...es una tecnología de comunicación óptica que utiliza la propagación de la luz (visible o infrarroja) en la atmósfera para transmitir información entre dos puntos."(Engst A. y., 2005) Al igual que las redes de fibra óptica, esta tecnología utiliza un diodo emisor de luz o un láser como fuente de transmisión, aunque no necesita que el haz de luz sea guiado a través de cables ópticos. Para su recepción, estos haces de luz operan en la parte de terahertz del espectro. Para recibir la señal, los haces de luz se centran en un lente de recepción conectada a un receptor de alta sensibilidad a través de un cable de fibra óptica.

Las comunicaciones ópticas, de varias formas, han sido usadas por cientos de años. Desde la antigüedad para enviar señales durante una batalla hasta los nuevos aparatos modernos como los teléfonos móviles, con el cual se pueden realizar video llamadas a tiempo real.

En 1880 Alexander Graham Bell y su asistente, Sarah Orr crearon el fotófono, considerado por los laboratorios Bell, su invento más importante. El dispositivo permitía la transmisión de sonido sobre un haz de luz. "El 3 de junio de 1880, Bell realizó la primera transmisión de telefónica inalámbrica entre dos edificios cercanos."(Weichel H. , 1990)

La invención del láser en la década de 1960 revolucionó las comunicaciones ópticas en el espacio libre. Las organizaciones militares estaban particularmente interesadas y se impulsó su desarrollo. Sin embargo, la tecnología perdió impulso en el mercado cuando la instalación de redes de fibra óptica para uso civil estaba en su apogeo.

La óptica de espacio libre se utiliza también para permitir las comunicaciones de las naves espaciales. Los enlaces ópticos pueden ser implementados utilizando láseres de luz infrarroja, aunque también para enviar datos a bajas velocidades, y para distancias cortas se utilizan LED's. "El rango máximo de enlaces terrestres es del orden de 2.3 km."(Gralla, 2007), pero la estabilidad y la calidad del enlace es altamente dependiente de los factores atmosféricos como lluvia, niebla, polvo y calor.

En el espacio exterior, el alcance de las comunicaciones ópticas de espacio libre en la actualidad es del orden de varios miles de kilómetros, pero tiene el potencial de alcanzar distancias interplanetarias de millones de kilómetros, utilizando telescopios ópticos como

expansores de haz. La comunicación infrarroja IrDA utilizada por algunos dispositivos como los teléfonos celulares es también una forma muy simple de comunicación óptica de espacio libre.

La transmisión Óptica de Espacio Libre se utiliza típicamente para:

- Conexiones LAN-to-LAN en Campus con velocidades de Fast Ethernet o Gigabit Ethernet.
- Conexiones LAN-to-LAN en una ciudad. ejemplo, Red de área metropolitana.
- Para cruzar una vía pública u otras barreras imposibles para emisor y receptor.
- Rápido acceso a servicios de banda ancha de alta velocidad en las redes de fibra óptica.
- Conexión Voice- Data convergente.
- Instalación de redes Temporales (para eventos o para otros fines).
- Restablecer la conexión de alta velocidad rápidamente (en caso de desastres).
- Como una alternativa o complemento de actualización a las actuales tecnologías inalámbricas.
- Como complemento de seguridad para las importantes conexiones de fibra óptica.
- Para las comunicaciones entre naves espaciales, incluidos los elementos de una constelación de satélites.
- Para comunicaciones inter e intra chip.

El rayo de luz puede ser muy delgado, lo que lo hace difícil de interceptar. En cualquier caso, es comparablemente fácil cifrar datos que viajan a través de una conexión FSO, lo que la hace muy segura, y provee inmunidad en caso de interferencia electromagnética, ya que utiliza luz en vez de microondas.

En cuanto a las principales ventajas se tiene:

- Fácil instalación.
- Licencia libre de operación.
- Altas tasas de bits.
- Bajas tasas de error a nivel de bits.
- Inmunidad a las interferencias electromagnéticas.
- Operación de dúplex completo.

- Protocolo transparente.
- Muy seguro debido a la alta direccionalidad y bajo espesor del rayo.
- No se necesita de una zona de Fresnel.

Los principales inconvenientes que enfrenta esta tecnología en aplicaciones terrestres están asociadas con la dispersión, "... la dispersión de Rayleigh, el llamado Esparcimiento de Mie, la absorción atmosférica, los fenómenos meteorológicos y, las turbulencias y fuentes de calor, entre los más importantes." (Black, 2000)

2.3.2. Fundamentos teóricos.

2.3.2.1. Transmisores.

En los sistemas modernos FSO, una variedad de fuentes de luz son usadas para la transmisión de datos, sin embargo las fuentes con semiconductores son las más utilizadas. "Las principales diferencias entre las fuentes de transmisión son: la longitud de onda; la potencia; y, la frecuencia. El uso específico de una fuente de transmisión será de acuerdo a la aplicación."(Ramasamy, 2007)

"Las fuentes ópticas son traductores que generan una onda portadora óptica que será modulada por las señales eléctricas procedentes de un equipo analógico o digital"(Weichel H. , 1990), las mismas que deben cumplir con requisitos como: bajo consumo; alta fiabilidad con los cambios de temperatura; pequeño tamaño; y, alta potencia de salida.

La industria de la tecnología FSO está básicamente enfocada en usar el láser producido por semiconductores. Este tipo de láseres, es de dimensiones reducidas y puede fabricarse en grandes cantidades a precios relativamente bajos, los cuales pueden llegar a ser tan pequeños como un grano 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 155Mbps, mientras que el láser tiene un espectro de emisión muy estrecho,

por 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 muchas distancias.

La selección para una fuente de 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 está alrededor de los 850nm y 1550nm en el rango más corto de longitud de onda del infrarrojo.”(Hill, 1997) 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 longitud de onda grandes, lo cual es bastante limitado en este momento. Además, muchas fuentes necesitan baja temperatura, lo cual limita el uso de aplicaciones en 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 del ojo humano;
- Dimensiones físicas; y,
- Compatibilidad con otros medios de transmisión como la fibra óptica.

2.3.2.2. 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 láser, muchos detectores de sistemas comerciales FSO están basados en semiconductores. Dependiendo del material usado, pueden operar en rangos diferentes de longitud de onda.

Los detectores ópticos están para demodular la portadora óptica recibida, recuperando la señal de información, a la que se somete posteriormente a procesos de amplificación, filtrado y otros, 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 tasa de error baja, típicamente menos BER: $10E^{-7}$ para permitir la recuperación de la señal original.
- Bajo ruido; y,
- 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."(Hill, 1997)

En sistemas con FSO se utilizan básicamente los fotodiodos, debido a que los fotodiodos semiconductores son pequeños, sensibles y proveen diferentes bandas 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 cambio 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 nano amperios (10^{-9} A) y por lo tanto se requiere de una amplificación para manipular adecuadamente la señal."(Belove, 1988) Los fotodiodos utilizados actualmente son:

- PIN (Positivo – Intrínseco - Negativo)
- APD (Fotodiodo de avalancha)

2.3.2.3. Subsistema óptico.

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

2.3.2.3.1. Lentes ópticos.

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

- La relación entre la velocidad de la luz en el vacío (c) y la velocidad actual de la luz en un determinado medio (v) que no sea el vacío, está dada por la siguiente ecuación: (Weichel, 1990)

$$v = \frac{C}{N} \quad (ec\ 2.1)$$

Donde $C = 3 \times 10^8$ m/s y N es el índice de refracción del medio. Se debe notar que el índice de refracción del aire y de otros gases es cercano a la unidad. Por ejemplo el índice de refracción del silicio es aproximadamente 3.5 y el vidrio tiene un índice cercano a 1.5. Este hecho es usado en las fibras ópticas para proveer estructuras capaces de guiar la luz. Los rayos de luz viajan en una dirección lineal a menos que sean reflectados por un cambio en el medio del camino de propagación.

Si la luz entra en un medio que tiene dos índices de refracción, los rayos de luz son reflejados de regreso a un ángulo igual al de incidencia.

Este ángulo está medido con respecto a la normal de la dirección que es perpendicular a la superficie. Esto se representa en la figura 2.7 con un haz de luz incidente, reflejado y transmitido en una interface entre dos materiales con diferentes índices de refracción, n_1 y n_2 .

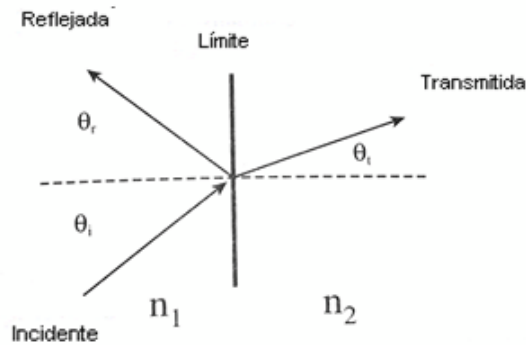


Figura 2.7. Comportamiento de un rayo de Luz

Fuente: (Fopwles, 2011)

El ángulo del haz transmitido está relacionado al ángulo del haz incidente por la Ley de Snell. (Black, 2000)

$$n_1 * \sin \phi_1 = n_2 * \sin \phi_2 \quad (\text{ec 2.2})$$

La ley de Snell tiene dos implicaciones muy importantes:

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

2.3.2.3.2. Diseño óptico de los lentes.

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

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

Un lente convergente re direcciona la luz entrante hacia el centro de su eje del camino del haz, son anchos en su centro y delgados en la parte superior e inferior. Cuando en el haz inciden rayos paralelos a este lente, la luz es enfocada en un punto. El punto donde la luz converge es llamado punto focal del lente.

Un lente divergente redirecciona la luz entrante lejos de su eje, son delgados en su centro y gruesos en sus partes inferior y superior. La figura 2.8 ilustra el comportamiento de los lentes de divergencia y convergencia.

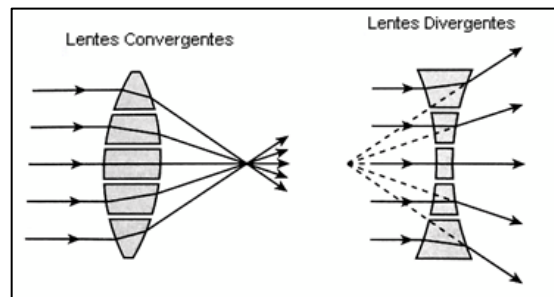


Figura 2.8. Lentes convergentes y divergentes

Fuente: (Willebrand, 2002)

Los lentes de la figura 2.8, son doblemente convexos y doblemente cóncavos respectivamente, son simétricos tanto en su eje horizontal como en el vertical.

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

2.3.2.4. Rastreo y Adquisición.

El auto alineamiento del láser ha sido uno de los temas más comentados en las conferencias, cubriendo varios aspectos de los sistemas de comunicación satelital basados en láser. Para comunicaciones entre satélites o entre satélites y terminales en tierra, la precisión de alineación del láser es de gran importancia.

Distancias entre estos puntos remotos pueden ser de kilómetros, el haz debe ser angosto de unos cuantos micros radianes para transportar toda la potencia posible al lado opuesto del receptor. Un error en el alineamiento de un haz tan pequeño puede causar una interrupción completa de la comunicación del enlace.

Para aplicaciones en el espacio, nadie puede alinear el láser hacia el lado opuesto en el satélite remoto. Numerosos métodos de rastreo fino han sido desarrollados para realizar esta tarea.

Estos métodos incluyen el uso de servomotores, motores de paso a paso, espejos, detectores cuádruples, arreglos CCD, incluso cristales líquidos y sistemas microelectrónicas. Generalmente los sistemas de rastreo sofisticado se han desarrollado para aplicaciones específicas en el espacio y no son aplicables para sistemas de bajo costo en enlaces terrestres.(Gralla, 2007)

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

2.3.2.4.1. Sistema de transmisión de haz amplia

Los sistemas de transmisión de haz amplio que no poseen un sistema de tracking son una solución económica y confiable para una operación a velocidad moderada sobre distancias cortas. El haz amplio causa un incremento en la pérdida de la potencia, esto se ve reflejado en los cálculos del margen del enlace. Cuando se utiliza un haz circular, para cierto tamaño de la superficie del receptor que está localizado a una distancia fija se incrementará el total de la potencia recibida en 6 dB cuando el diámetro del haz recibido se reduce a la mitad.

“Los sistemas FSO disponibles comercialmente utilizan un ángulo amplio de transmisión sin un sistema de tracking y operan a divergencia entre 2 a 10 mili radianes.”(Fopwles, 2011)A este ángulo de divergencia difícilmente corresponde a un haz del diámetro de 2m y 10m a distancias de 1 km. La mayoría de fabricantes han encontrado en el campo éste ángulo de divergencia que provee suficiente margen de error como para mantener el haz en su objetivo.

La clave para reducir el des-alineamiento es seleccionar un montaje y una estructura estable cuando el sistema es instalado. El montaje de paredes exteriores es preferible en superficies de madera y en las esquinas de éstos, más que en el techo de algún edificio. Si el sistema es instalado en un inmueble alto, donde se experimentan movimientos apreciables, un sistema de auto tracking es necesario para contrarrestar el des alineamiento del enlace, pues no es recomendable instalar un sistema FSO sin auto tracking.

2.3.2.4.1.1. Auto Tracking.

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

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

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

Si se utiliza el mismo haz de los datos para la alineación se emplea un divisor de luz llamado splitter que refleja parte de la luz hacia el

detector de alineamiento. Una desventaja de esto es que parte del haz que lleva los datos, se pierde cuando se utiliza para la alineación.

2.3.2.4.1.2. Gimbal.

Un gimbal "...es un dispositivo utilizado frecuentemente para soportar algunas cabezas de ciertos equipos." (Fopwles, 2011) Pueden ser girados en diferentes direcciones cubriendo el movimiento en el eje vertical y en el horizontal.

Un gimbal puede ser útil para el auto alineación y el rastreo de la señal que viene del lado remoto. En la tabla 2.1 se muestran algunas características importantes de los gimbal.

Tabla 2.1. *Características de los gimbal*

Características	Valores Típicos
Campo Vertical	± 20 grados
Campo Horizontal	± 25 grados
Jitter < 5 radianes	
Velocidad de cambio	2 – rad/seg
Aceleración	Azimut = 7 rad/seg ²
	Elevación = 12 rad/seg ²

Fuente: (Belove, 1988)

2.3.2.4.1.3. Sistema de auto alineamiento basado en servomotores.

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

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

2.3.2.4.1.4. Sistema de alineamiento por espejo.

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

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

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

2.3.2.4.1.5. Sistemas micro electrónicos

Las micro máquinas de silicón “...son el análogo mecánico de los circuitos integrados electrónicos son fabricados con métodos similares.” (Weichel, 1990) Las aplicaciones en las que se utilizan estos dispositivos están los switches ópticos y atenuadores variables, los cuales tienen gran interés para sistemas de rastreo. Son muy pequeños, de bajo consumo de potencia y tienen un tiempo de respuesta muy bueno. Pueden ser producidos en masa e integrados en el receptor en una pequeña impresión. En conjunto con un procesador de señales digitales que controla el algoritmo de rastreo, estas micro máquinas electrónicas tienen el potencial de proveer un sistema poderoso y bajo costo de rastreo para un sistema FSO.

Texas Instruments fabricó recientemente un sistema de rastreo que puede ser incorporado para FSO, este dispositivo cuenta con los siguientes datos técnicos:(Engst, 2005)

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

2.3.2.4.1.6. Detectores cuádruplex

Estos detectores son utilizados en aplicaciones de rastreo láser. La mayoría están basados en silicón y responden a la luz visible, cercana al espectro IR. Además pueden estar hechos de diferentes materiales para cubrir varios rangos espectrales.

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

Se debe tomar en cuenta que la resolución de este método depende del espaciamiento entre los detectores y su tamaño. Si los detectores son pequeños la resolución será alta. “Con una combinación apropiada de amplificadores se puede lograr detectar el movimiento de la luz en 10 μ m o incluso menos.” (Hill, 1997) Si la luz sale de la matriz el sistema de auto alineamiento pierde su capacidad de rastreo. Los detectores son utilizados para pequeños ángulos de cambio, es decir, un rastreo fino.

2.3.2.4.1.7. Arreglos CCD

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

“Los píxeles de un sistema CCD pueden ser tan pequeños como de 10 μm . Debido al gran número de píxeles el área total de detección es más grande que los de los detectores cuádruplex.” (Willebrand, 2002) Su gran área de detección se traduce en un campo amplio de vista para el rastreo. Pero debido a que estos dispositivos están basados en un registro es necesario leerlo todo para obtener la información. Los sistemas que funcionan con CCD frecuentemente tienen incorporada una computadora que controla el programa que corre en éstas, realiza la detección del posicionamiento en los campos de información y la lleva al sistema que controla los movimientos de los espejos. Este sistema de rastreo es para movimientos lentos de haz.

Una mejora en este sistema es la utilización de un procesador digital de señales o DSP para realizar el análisis y llevar la información al sistema de control. Los DSP realizan un análisis de la imagen pero siempre están limitados por el tiempo de lectura del chip CCD. Actualmente se encuentra en desarrollo sistemas de lectura directa para chips CCD. “Los componentes de un sistema FSO consisten en la fuente de luz, el sistema óptico, el enfoque, los receptores ópticos y el manejo electro-óptico de las señales.” (Willebrand, 2002) La tecnología es similar a la utilizada para enlaces de fibra óptica, a diferencia de los requerimientos para transmitir en el espacio libre.

2.3.2.5. Análisis del margen de enlace.

El análisis del margen de enlace en los sistemas de comunicaciones sean guiadas o no guiadas son muy importantes, en especial para las transmisiones inalámbricas, ya que están relacionadas con el factor de pérdida en el aire entre el

transmisor y el receptor que puede variar en el tiempo; y esto debido al clima que afectan al lugar donde están implementadas.

Para la cuantificación este tipo de factores se ha planificado el enlace tomando en cuenta las pérdidas y ganancias, y comparar la potencia de la señal recibida con el nivel requerido por el detector de la señal; Para esto se debe dejar un margen de enlace grande en comparación del margen nominal mínimo de potencia que recibe.

2.3.2.5.1. Pérdida Óptica

La primera causa de pérdida en un sistema FSO es debido a la imperfección en las 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 en la planificación del enlace, una cantidad llamada “pérdida óptica”.

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 4mW que corresponde a 6 decibeles de mili vatio, si la pérdida óptica de la señal es de 4dB; es decir, existe atenuación en la potencia, consecuentemente se substraerá 4dB de la señal original.

Para desarrollar el cálculo 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; como lo indica la tabla 2.2.

Tabla 2.2. *Tabla de cálculo de enlace*

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Potencia de transmisión	6	dBm
Pérdidas ópticas	-4	dB

Fuente: (Fopwles, 2011)

2.3.2.5.2. Pérdida geométrica.

El término pérdida geométrica se refiere a "...las pérdidas que ocurren debido a la divergencia del haz óptico." (Willebrand, 2002) Los rayos láser no son totalmente puntuales, sino que van abriéndose conforme van avanzando por el medio. La divergencia indica cuánto 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, por 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.

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.

Un ángulo amplio de divergencia del haz, puede acomodarse ante cualquier situación de oscilación causada por inestabilidad en las plataformas de montaje o en el viento, mientras que al tener un ángulo de divergencia pequeño, cualquier movimiento puede causar un desapuntamiento del haz.(Van Beijnum, 2002)

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

2.3.2.5.3. 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 del momento.

El último punto en el cálculo del enlace es saber qué 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.” (Weichel, 1990)

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 número 1 representa presencia 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 puede 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.” (Hill, 1997) 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.” (Weichel, 1990)

Los efectos de ruido causa un incremento del BER hasta un umbral definido, 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} .

2.3.2.5.4. 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.”(Engst, 2005) Una señal con un nivel de potencia elevado puede causar problemas de saturación en el receptor, este evento particularmente se da en el enlace de corto alcance donde muy poca luz se atenúa en la atmósfera.

El rango dinámico es típicamente medido en decibelio (dB). Un rango dinámico de 30dB 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.

2.3.2.5.5. Factores que afectan a los sistemas FSO.

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

2.3.2.5.5.1. Transmisión a través de la atmósfera.

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

Tomando en cuenta que no se puede cambiar las características físicas de la atmósfera, es posible aprovechar las regiones óptimas de ésta, seleccionando las longitudes de onda correctamente. “Para asegurar la mínima

atenuación en la señal por dispersión y absorción, los sistemas FSO operan en ventanas atmosféricas en el rango espectral de IF alrededor de 850nm y 1550nm.” (Gralla, 2007) Existen otras ventanas en el rango entre 3-5 μ m y 8-14 μ m, aunque su uso comercial es limitado por la disponibilidad de estos componentes y las dificultades de la implementación práctica tales como el requerimiento de sistemas de refrigeración de baja temperatura.

2.3.2.5.5.2. Dispersión.

La dispersión se refiere a la “...desviación que sufre la luz al tratar de pasar por la atmósfera. La dispersión de la luz puede causar un impacto drástico en el desempeño de un sistema FSO.” (Hill, 1997) La dispersión no está relacionada a la pérdida de energía en la atmósfera, sino al redireccionamiento o distribución de la luz. Esto implica una disminución drástica de la intensidad de la luz en el sitio del receptor. Existen varios regímenes de la dispersión dependiendo del tamaño de las partículas.

“Una descripción está dada por la fórmula $X_o = 2\pi / \lambda$, donde λ es la transmisión de la longitud de onda y r es el radio de la partícula.”(Ramamamy, 2007) Para las longitudes de onda infrarrojas que son las utilizadas en FSO, el radio promedio de las partículas de niebla es prácticamente del mismo tamaño del de la longitud de onda. La niebla es el principal enemigo del haz de luz, la lluvia y la nieve por otro lado son mayores y presentan un obstáculo menor para el haz de luz. Un haz que incide en el límite de un electrón de un átomo o molécula induce una carga desbalanceada o dipolo que oscila a la frecuencia del haz incidente. La oscilación de los electrones irradia la luz en una forma de dispersión. Esta es llamada dispersión de Rayleigh y la fórmula es la siguiente: (Fopwles, 2011)

$$\sigma_s = \frac{f \cdot e^4 \cdot \lambda_o^4}{6\pi_o^2 \cdot m^2 \cdot c^4 \lambda^4} \quad (ec \ 2.3)$$

Donde f es la fuerza de oscilación, e es la carga del electrón, λ_o es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia natural, $w_o = 2\pi c / \lambda_o$,

ϵ_0 es la constante dieléctrica, c es la velocidad de la luz y m es la masa de la entidad oscilante. La dispersión de Rayleigh es la razón por la que el cielo parece azul bajo condiciones soleadas. Para la operación de los sistemas FSO en longitudes de onda cercanas al infrarrojo, el impacto de Rayleigh, en la transmisión puede ser despreciado.

2.3.2.5.5.3. Dispersión tipo Mie.

La dispersión en este régimen ocurre para partículas del mismo tamaño, longitud de onda, rangos cercanos al infrarrojo, la niebla y contaminación (aerosoles). Estas partículas son la mayor contribución al proceso de dispersión Mie. Debido a que la absorción se encuentra en la mayor parte del espectro, los datos deben ser captados en un rango de longitud de onda que esté dentro de una ventana atmosférica. Asumiendo que únicamente ocurre la dispersión, sabiendo la distribución de las partículas para aerosoles, esta distribución depende de la ubicación, el tiempo, la humedad relativa y la velocidad del viento, etc. “La siguiente es una fórmula empírica simplificada utilizada en FSO para calcular el coeficiente de atenuación debido a la dispersión de Mie.” (Gralla, 2007)

$$\sigma = B_a = \frac{3,91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q} \quad (\text{ec 2.4})$$

Cuando $q = 0.525(V)^{1/3}$ por $V < 6 \text{ m}$

$q = 1.6$ por $V > 50 \text{ km}$

$q = 1.3$ por $6 \text{ km} < 50 \text{ km}$

$q = V - 05$ por $0.5 \text{ km} < 2 \text{ km}$

Donde V corresponde a la visibilidad y λ es la longitud de onda de transmisión. Aunque la comunidad de FSO ha encontrado que el coeficiente de atenuación s no depende completamente de la longitud de onda. Esto es cierto únicamente en el rango de IR en donde trabajan los sistemas de FSO. La conclusión que podemos sacar de esto es que la principal fuente de atenuación

y que el efecto es geoméricamente acentuado conforme se incremente la distancia, es por la niebla. Para fines prácticos las condiciones de visibilidad deben ser determinadas.

Los datos de visibilidad han sido tomados por varias décadas y están disponibles en el servicio nacional del clima y pueden ser utilizados para encontrar la dependencia de la disponibilidad según la distancia. Los resultados han sido medidos en aeropuertos los cuales están situados lejos de la ubicación de los enlaces de FSO. “Para la mayoría de enlaces comerciales FSO la operación en niebla espesa requiere mantener la distancia bastante corta para mantener altos los niveles de disponibilidad.” (Hill, 1997) El margen del límite de la mayoría de los fabricantes permite una disponibilidad tan exacta como **99.99%**, si las distancias se mantienen por debajo de los 200 metros.

2.3.2.5.5.4. Absorción.

Los átomos y las moléculas se caracterizan por el índice de refracción. El índice imaginario k de la refracción está relacionado con el coeficiente de absorción y λ es la velocidad de la luz en el vacío, a por la siguiente fórmula: (Weichel, 1990)

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} = \alpha_a N_a \quad (\text{ec 2.5})$$

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

2.3.2.5.5.5. Ventanas atmosféricas.

Las ventanas atmosféricas son utilizadas en los enlaces de FSO en el rango infrarrojo. Las partículas más comunes que producen absorción son las de agua, dióxido carbónico y ozono. Un espectro típico de absorción se

muestra en la figura 2.9, donde se puede observar que las ventanas existen entre 0.72 y 15.0 μm , algunas son angostas y la región de 0.7-2.0 μm está dominada por el vapor de agua y la absorción del dióxido carbónico.

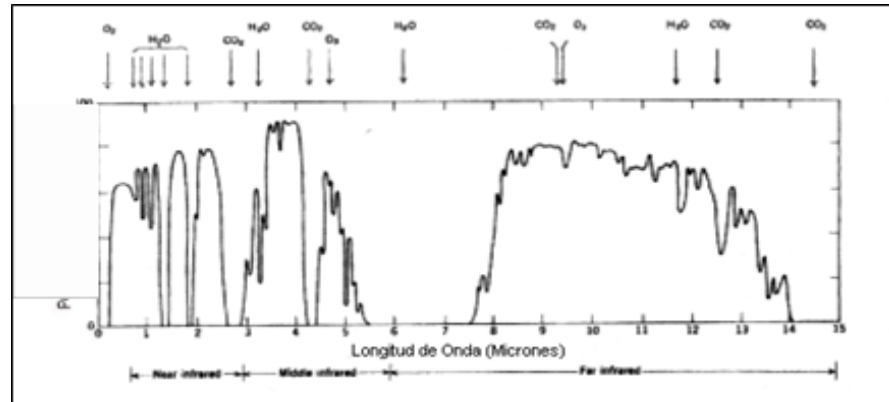


Figura 2.9. Transmisión atmosférica medida sobre el mar a 1820m en camino horizontal

Fuente: (Willebrand, 2002)

2.3.2.5.5.6. Absorción atmosférica.

La abundancia de diferentes tipos de partículas que pueden absorber las señales ópticas determinan qué tan fuerte será atenuada la señal. Estos tipos pueden ser divididos en dos clases generales: moléculas y aerosoles. La figura 2.10 muestra el espectro de transmisión para condiciones de un cielo despejado con un estándar urbano de concentración de aerosol con una visibilidad de 5km. En los cálculos se incluye la absorción del agua, el vapor, el dióxido de carbono y demás.

“En la región cercana al infrarrojo los vapores de agua son las principales moléculas que absorben la energía atenuando la señal alrededor de 2.0 μm .” (Ramasamy, 2007) Tanto el vapor de agua como el dióxido de carbono juegan un papel importante. Las transiciones vibracionales y rotacionales determinan cuál energía es fácilmente absorbida, pero el gran número de permutaciones incrementan el número de líneas de absorción.

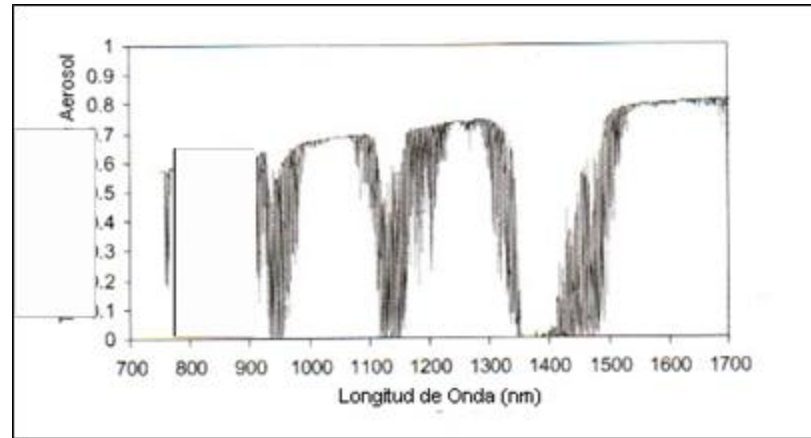


Figura 2.10. Transmisión como función de la longitud de onda sobre condiciones en un área urbana (visibilidad = 5 km)

Fuente: (Willebrand, 2002)

En la figura 2.11 se muestra la transmisión únicamente sobre vapor en un cielo claro para el espectro cercano al infrarrojo y la transmisión en dióxido de carbono. “El gran número de líneas complica el espectro con ventanas ocasionales a las frecuencias de FSO, tales como 850nm y 1550nm.” (Black, 2000) Los picos ocasionales se superponen en el ambiente generalmente plano.

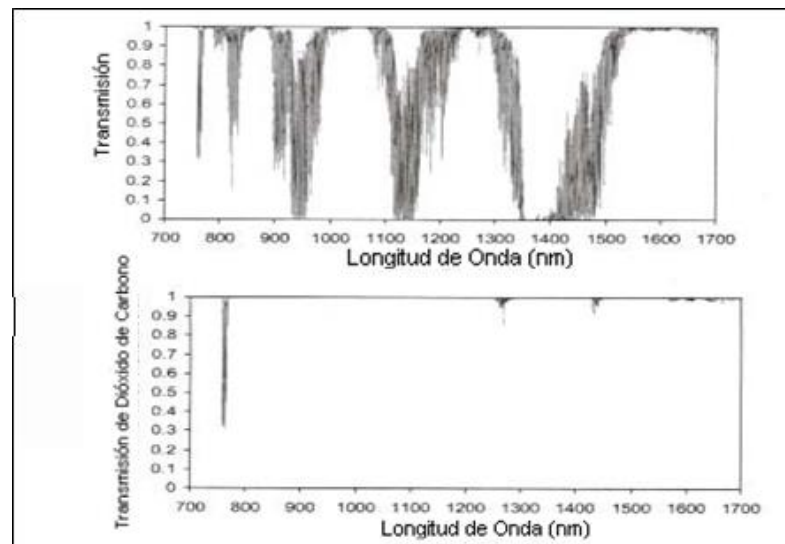


Figura 2.11. Transmisión en un cielo despejado como función de la longitud de onda para el agua (gráfica superior) y el dióxido de carbono (gráfica inferior)

Fuente: (Willebrand, 2002)

Los aerosoles se dan en forma natural por medio del polvo de meteoritos, partículas del mar, polvo del desierto y reacciones volcánicas. También pueden ser creadas por la mano del hombre, por conversiones químicas, cambiando gases de sólidos a líquidos y por desperdicios industriales. Estas partículas pueden variar en rangos y tamaños desde polvo fino menos de $0.1 \mu\text{m}$ hasta grandes partículas mayores que $10.0 \mu\text{m}$. Se estima que el 80% de la masa aerosol está contenida en las capas bajas de la atmósfera. “La tierra produce más aerosol que el océano y el hemisferio norte produce el 61% del total del aerosol en el mundo.” (Hill, 1997) Estas partículas absorben el espectro infrarrojo, por ejemplo el carbón y el hierro tienen muchas líneas de absorción pero su abundancia en la atmósfera es generalmente limitada.

2.3.2.5.5.7. Turbulencia.

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

Cuando el suelo se calienta por el sol el aire también se calienta y algunas celdas de aire o bolsa de aire caliente suben más que otras. Esto causa cambios en el índice de refracción por lo tanto cambia la dirección que tenía la luz cuando se propaga a través del aire. Debido a estas bolsas de aire que no son estables en el tiempo o en el espacio el cambio del índice de refracción toma un movimiento aleatorio. Por lo observado esto parece como un comportamiento de turbulencia.

El haz de láser experimenta tres efectos bajo las turbulencias: Primero, el haz puede ser re-direccionado aleatoriamente por las celdas de aire. Este fenómeno es conocido como haz aleatorio. Debido a la refracción el aire trabaja similar a la luz, pasando por cualquier tipo de medio refractivo como los lentes de vidrio. La luz puede ser enfocada y desenfocada

aleatoriamente, siguiendo los cambios del índice del aire. Segundo, la fase frontal del haz puede variar produciendo fluctuaciones en la intensidad o centelleo. Tercero, el haz puede dispersarse más de lo que la teoría de refracción predice. (Bartell, 2003)

Una buena medición de la turbulencia es el índice de refracción del coeficiente de la estructura, C_2 . Debido a que el aire necesita un tiempo para calentarse, la turbulencia es mayor a media tarde y más débil horas después del atardecer. Este coeficiente aumenta al acercarse al suelo y decrece con la altitud. Para minimizar los efectos del centelleo en la transición, los sistemas de FSO no deben ser instalados cerca de superficies calientes, como los techos que pueden experimentar grandes cantidades de centelleo en un verano caliente.

Debido a que el centelleo decrece con la altitud, “se recomienda que los sistemas FSO sean entablados a una distancia mayor de la altura del techo, (> 4 pies) y lejos de cualquier pared en las instalaciones que pueda tomar parte de un ambiente como el desierto.” (Engst, 2005)

2.3.2.5.5.8. Variaciones del haz.

Para un haz en presencia de grandes cantidades con celdas de turbulencias comparado con el diámetro del haz, los cálculos geométricos pueden utilizarse para describir la variación del radio, σ_r , como función de la longitud de onda y la distancia L . (Hill, 1997)

$$\sigma_r = 1.83 \cdot C_n^2 \cdot \lambda^{-1/6} \cdot L^{17/6} \quad (\text{ec 2.6})$$

Esta relación implica que entre más larga sea la longitud de onda se tendrá menos variación que las longitudes grandes. La dependencia por la longitud de onda es baja. Manteniendo el haz angosto en un sistema de rastreo éstas fluctuaciones serían un problema, el rango de fluctuaciones es bajo (menos de 1 kHz o 2 kHz). En estas condiciones es posible utilizar un sistema de rastreo.

2.3.2.5.5.9. Centelleo.

Al observar la apariencia de agua en el medio de un asfalto caliente, se ha experimentado los efectos del centelleo atmosférico. De los tres tipos de turbulencias los sistemas FSO son afectados principalmente por el efecto del centelleo. Una interferencia aleatoria con el frente de la onda causa picos bajos, resultando en la saturación del receptor pérdidas de la señal. “Puntos calientes en la sección media del haz pueden ocurrir en un tamaño $\sqrt{\lambda L}$, alrededor de 3cm para un haz de 850nm a una distancia de 1km.” (Bartell, 2003) Los sistemas FSO operan horizontalmente en la atmósfera cerca de la superficie experimentando la mayor cantidad posible del centelleo. Los efectos del centelleo de pequeñas fluctuaciones siguen una distribución normal, caracterizada por la varianza, si, para una onda plana dada por: (Engst, 2005)

$$\sigma_i^2 = 1.23 C_n^2 \cdot K^{7/6} \cdot L^{11/6} \quad (ec\ 2.7)$$

Donde $k = 2\pi/\lambda$. Esta expresión sugiere que una longitud de onda grande puede experimentar una pequeña varianza, cuando los otros factores permanecen sin cambio. Para los sistemas FSO con un haz angosto y una pequeña divergencia, la expresión del plano de la onda es apropiada para una onda esférica, incluso si el frente de onda es curvo cuando alcanza el detector el haz transmitido es mucho más grande que el área del detector y éste será prácticamente plana.

La expresión de la varianza para fluctuaciones grandes es:(Black, 2000)

$$\alpha_{high}^2 = 1.0 + 0.86 (\sigma^2)^{-2/5} \quad (ec\ 2.8)$$

Refiriéndose que una longitud de onda corta experimenta una pequeña varianza. En un despliegue FSO el camino del haz debe ser más de 5m al atravesar cualquier calle de una ciudad o aparecerán otras fuentes potenciales de centelleo. La figura 2.12 muestra el tamaño de las

heterogeneidades es grande comparado con la sección transversal del haz, y el haz se agranda.

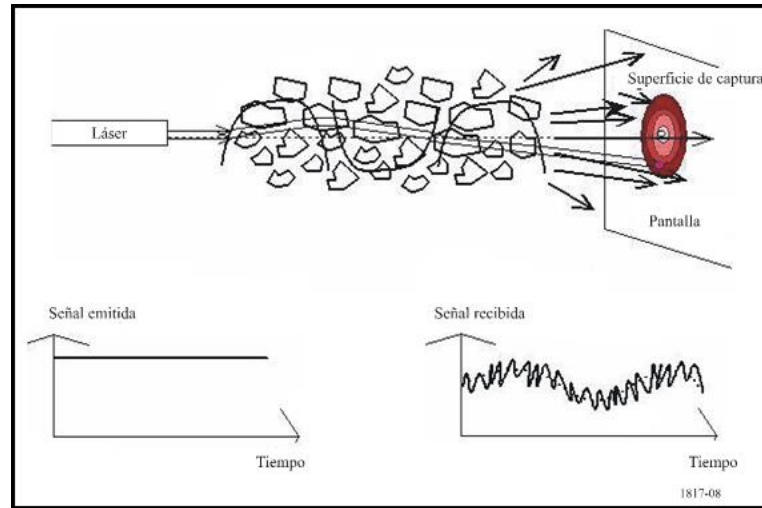


Figura 2.12. Desviación del haz bajo la influencia de células turbulentas de menor tamaño que el diámetro del haz (ampliación del haz)

Fuente: (ITU, 2010)

2.3.2.5.5.10. Esparcimiento del haz.

El tamaño del haz puede caracterizarse por el radio efectivo, α_t , la distancia del centro del haz ($z = 0$) hasta donde la intensidad ha decrecido por $1/e$. El radio efectivo está dado por: (Weichel, 1990)

$$\alpha_t = 2.01 \left(\lambda^{-1/5} \cdot C_n^{6/5} \cdot z^{8/5} \right) \quad (ec\ 2.9)$$

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

2.3.2.5.5.11. Impacto del clima.

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

2.3.2.5.5.11.1. Efecto de la lluvia.

La lluvia tiene un impacto que reduce la distancia de un enlace FSO. Aunque la lluvia sea menor que la niebla debemos tomarla en cuenta, "...debido a que el radio de las gotas de 200 a 2000 μm es significativamente más grande que el de la longitud de onda de una fuente de luz FSO." (Bartell, 2003)

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

2.3.2.5.5.11.2. Efecto de la niebla.

La niebla es el problema determinante para un enlace FSO. Compuesta por pequeñas partículas de agua y con un radio aproximado al de la longitud de onda del infrarrojo. "La distribución del tamaño de las partículas varía por los diferentes grados de niebla. Las condiciones del clima se refieren a niebla cuando la visibilidad varía entre 0 – 2,000 metros." (Willebrand, 2002) Las condiciones de niebla espesa son difíciles de describir. Se utilizan algunas

veces las fases de niebla espesa o niebla delgada; cuando la visibilidad es mayor a 2,000 metros las condiciones se describen como nebulosas.

La tabla 2.3, detalla la visibilidad, las condiciones de niebla, la atenuación esperada en dB/Km y su correlación a la visibilidad. La lluvia tiene un impacto menor en un sistema FSO comparada con la niebla. La dispersión es el mecanismo principal para las pérdidas en la niebla. Incluso una niebla modesta puede causar atenuación en una señal infrarroja sobre una distancia corta.

Tabla 2.3. Códigos internacionales de la visibilidad de las condiciones del clima y la Precipitación

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

Fuente: (Van Beijnum, 2002)

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

principalmente la visibilidad porque éstas medidas se han tomado en aeropuertos durante muchas décadas.

Estas mediciones permiten caracterizar diferentes regiones y tener ciertas figuras estadísticas de un sistema FSO. Los datos han sido promediados durante años y se observa que la resolución no es muy alta. Debido a que el ambiente micro climático como los ríos pueden inducir condiciones de niebla, los datos tomados en los aeropuertos algunas veces no son confiables. Se ha demostrado que los datos de visibilidad en aeropuertos cuentan con un buen porcentaje para la estimación mínima esperada. Esto es porque la ubicación fuera del área metropolitana y el clima inciden en la ciudad generalmente con una condición menos favorable para la niebla.

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

2.3.2.5.5.11.3. Línea de vista.

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

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

tridimensional. Estos mapas incluyen información referente a edificios y sus ubicaciones específicas, lo cual permite determinar en dónde existe la línea de vista.

Uno de los escenarios más utilizados es de terraza a terraza. Es posible instalar el transreceptor detrás de una ventana en un edificio cuando el acceso al techo no está disponible e indispensable que la línea de vista exista. “El ángulo en el que el haz atraviesa la ventana es crítico y debe ser lo más perpendicular posible, con una variación de 5 grados para reducir el haz que es reflejado hacia el mismo equipo en el receptor.” (Hill, 1997) Algunas ventanas poseen una cubierta especial que está diseñada para reflejar la luz infrarroja por lo que éstas ventanas reflejaran 60% de la señal o más.

2.3.2.5.5.11.4. Otros factores que afectan a la FSO.

Cuando se planea una instalación FSO es necesario considerar la aplicación prevista. Conociendo algunos factores, por ejemplo, si el menor tráfico se presenta por la noche, si se trata de datos de video de alta velocidad no interrumpibles, si la distancia es larga, si la ubicación se mantiene notoriamente nublada, éstos factores influyen directamente en la selección del sistema FSO más apropiado.

2.3.2.5.5.11.5. Factor de la visibilidad.

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

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

sistema en una localidad experimentará menos tiempo desconectado que en otra.

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

2.3.2.5.5.11.6. Factor de la distancia.

El impacto de la distancia sobre un sistema FSO se ocasionaría en tres maneras: Primero, en condiciones despejadas el haz diverge y el elemento detector recibe menos potencia; para un haz circular la pérdida geométrica se incrementa por 6 dB, cuando la distancia aumenta en un factor de dos. Segundo, la pérdida total de la transmisión del haz se incrementa con la distancia. Tercero, los efectos de dispersión se acumulan con distancias mayores por lo que el valor de la potencia se incrementará para mantener un valor determinado de BER. (Black, 2000)

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

2.3.2.5.5.11.7. Factor del ancho de banda.

En sistemas FSO estándar existen dos elementos que limitan el ancho de banda, estos elementos son la fuente de transmisión y el foto detector.

Cuando los LED son incorporados a un sistema FSO, el ancho de banda es de 155Mbps. Cuando se utilizan fuentes láser, la velocidad puede ser mucho más alta. Los láser modulados directamente operan hasta 2.5 Gbps y están disponibles comercialmente para el uso en sistemas FSO. Una velocidad mayor de 10 Gbps puede ser lograda con moduladores externos a la salida del láser. Con respecto a los foto detectores, algunos diodos pueden lograr hasta 1.250 Gbps para la operación con longitudes de onda de 1.5 micrómetros.

Los detectores de Ingaes se pueden utilizar y están disponibles comercialmente soportando anchos de banda de 10 Gbps e incluso más. A velocidades mayores la luz que es captada por un receptor y es convertida a electrones es muy baja y la sensibilidad está en función de la velocidad, esto significa que a mayores velocidad menor sensibilidad. “La sensibilidad varía entre -43 dBm a 155 Mbps y -34 dBm a 622Mbps. Cuando el sistema alcanza su límite de sensibilidad el ruido térmico impacta demasiado creando una tasa de error (BER) demasiado grande.” (Gralla, 2007)

2.3.2.5.5.11.8. Selección de la longitud de onda para la transmisión.

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

Seleccionar la longitud de onda correcta incluye factores como la disponibilidad de los componentes, el precio, la distancia requerida, las

consideraciones de la seguridad de la vista, entre otras. “Las longitudes de onda más utilizadas son de 850nm y de 1550nm.” (Black, 2000)

2.3.3. Estándares para FSO.

“El ojo humano es un detector óptico muy sensible y sofisticado con rango visual de 400 a 700 NM.” (Hill, 1997) Como cualquier otro tejido vivo es susceptible a daños por condiciones extremas y debido a que diferentes tejidos absorben diferentes longitudes de onda diferentes partes del ojo son más susceptibles que otras a un daño por una onda de luz determinada.

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

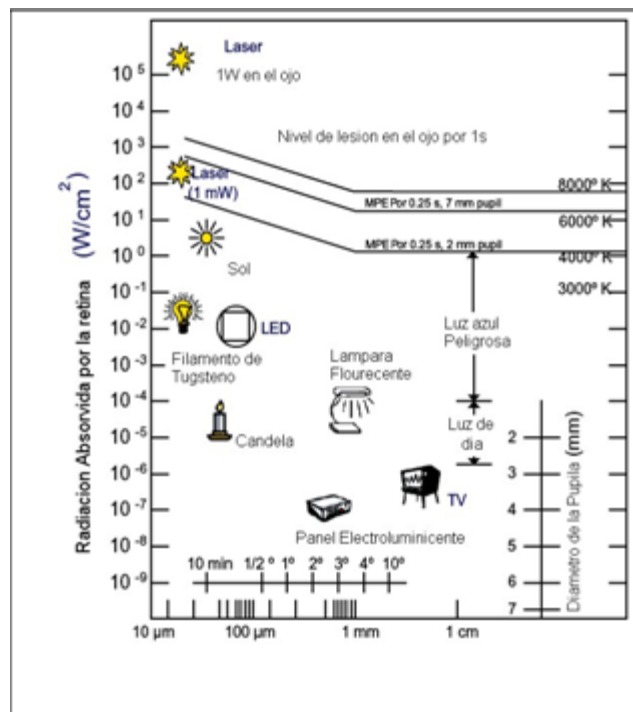


Figura 2.13. Radiación absorbida por la retina

Fuente: (Engst, 2005)

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

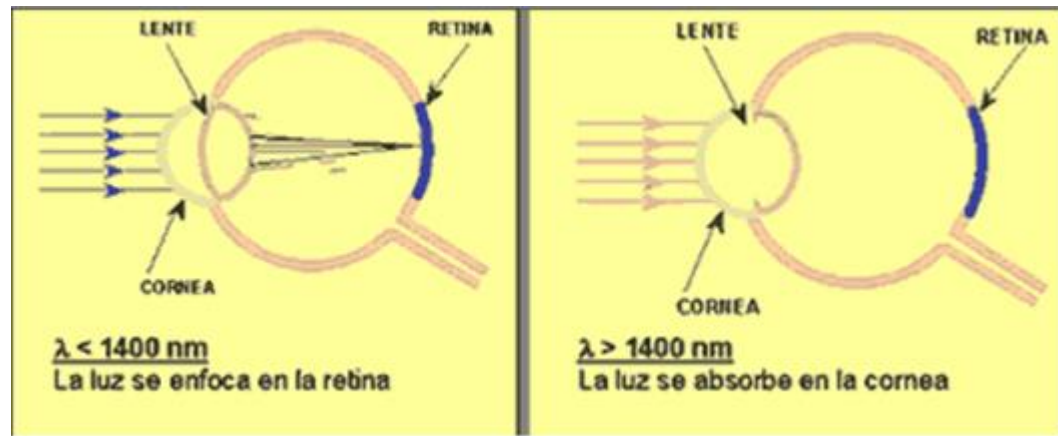


Figura 2.14. Absorción del de la luz en el ojo Humano

Fuente: (Engst, 2005)

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

Con este antecedente, es muy importante conocer que existen diversos estándares para la seguridad de la vista por lo cual en la tabla 2.4 se presentas los más importantes.

Tabla 2.4. Estándares para la seguridad del ojo humano en sistemas

Estándar	Tipo	Objetivo
ANSIZ136.1	Usuario	Usuariodelosláser,seguridadysalud
IEC60825-1	Técnico	Fabricante con distribución
21CFRCh1(4-1/97edicion) Parte1040	Regulatoria	Fabricantes en U S A

Fuente: (Bartell, 2003)

2.4. TRANSMISIÓN INALÁMBRICA

2.4.1. Antecedentes generales.

La comunicación inalámbrica o sin cables "...es aquella en la que la comunicación (emisor/receptor) no se encuentra unida por un medio de propagación físico, sino que se utiliza la modulación de ondas electromagnéticas a través del espacio." (Engst, 2005) En este sentido, los dispositivos físicos sólo están presentes en los emisores y receptores de la señal, entre los cuales encontramos: antenas, computadoras portátiles, PDA, teléfonos móviles, etc.

La comunicación inalámbrica, que se realiza a través de ondas de radiofrecuencia, facilita la operación en lugares donde la computadora no se encuentra en una ubicación fija (almacenes, oficinas de varios pisos, etc.) actualmente se utiliza de una manera general y accesible para todo público. Cabe también mencionar actualmente que las redes cableadas presentan ventaja en cuanto a transmisión de datos sobre las inalámbricas. "Mientras que las cableadas proporcionan velocidades de hasta 1 Gbit/s (Red Gigabit), las inalámbricas alcanzan sólo hasta 108 Mbit/s." (Fopwles, 2011)

Se puede realizar una "mezcla" entre redes inalámbricas y alámbricas, de manera que pueden funcionar de la siguiente manera: que las redes cableadas deban ser la red principal para equipos que no tengan la necesidad de desplazarse como las computadoras de escritorio, en cambio las redes inalámbricas faciliten el desplazamiento del usuario a cualquier lugar con la facilidad de moverse a varios campos (oficina, almacén, bodega, etc.).

Actualmente, las transmisiones inalámbricas constituyen una eficaz herramienta que permite la transferencia de voz, datos y vídeo sin la necesidad de cableado. Esta transferencia de información es lograda a través de la emisión de ondas de radio teniendo dos ventajas: movilidad y flexibilidad del sistema en general.

En general, la tecnología inalámbrica utiliza ondas de radiofrecuencia de baja potencia y una banda específica, de uso libre o privada, para transmitir entre dispositivos.

Estas condiciones de libertad de utilización sin necesidad de licencia, ha propiciado que el número de equipos, especialmente computadoras, que utilizan las ondas para conectarse, a través de redes inalámbricas haya crecido notablemente.

La tendencia a la movilidad y la ubicuidad hacen que cada vez sean más utilizados los sistemas inalámbricos, y el objetivo es ir evitando los cables en todo tipo de comunicación, no solo en el campo informático sino en televisión, telefonía, seguridad, domótica, etc.

Un fenómeno social que ha adquirido gran importancia, en todo el mundo, como consecuencia del uso de la tecnología inalámbrica son las comunidades inalámbricas que buscan la difusión de redes alternativas a las comerciales. El mayor exponente de esas iniciativas en España es RedLibre.

2.4.2. Protocolo de comunicaciones.

Un protocolo de comunicaciones es un sistema de reglas que permiten que dos o más entidades de un sistema de comunicación se comuniquen entre ellas para transmitir información por medio de cualquier tipo de variación de una magnitud física. Se trata de las reglas o el estándar que define la sintaxis, semántica y sincronización de la comunicación, así como también los posibles métodos de recuperación de errores. Los protocolos pueden ser implementados por hardware, por software, o por una combinación de ambos.

Los sistemas de comunicación utilizan formatos bien definidos (protocolo) para intercambiar mensajes. Cada mensaje tiene un significado exacto destinado a obtener una respuesta de un rango de posibles respuestas predeterminadas para esa situación en particular. Normalmente, el comportamiento especificado es independiente de cómo se va a implementar. Los protocolos de comunicación tienen que estar acordados por las partes involucradas. Para llegar a dicho acuerdo, un protocolo puede ser desarrollado dentro de estándar técnico.

2.4.2.1. Gateway para acceso a Internet en el hogar.

En comunicaciones, BGP (del inglés Border Gateway Protocol) “...es un protocolo mediante el cual se intercambia información de encaminamiento o ruteo entre sistemas autónomos.” (Belove, 1988) Por ejemplo, los proveedores de servicio registrados en internet suelen componerse de varios sistemas autónomos y para este caso es necesario un protocolo como BGP.

Entre los sistemas autónomos de los ISP se intercambian sus tablas de rutas a través del protocolo BGP. Este intercambio de información de encaminamiento se hace entre los routers externos de cada sistema autónomo, los cuales deben soportar BGP. Se trata del protocolo más utilizado para redes con intención de configurar un Exterior Gateway Protocol.

“La forma de configurar y delimitar la información que contiene e intercambia el protocolo BGP es creando lo que se conoce como sistema autónomo.” (Bartell, 2003) Cada sistema autónomo (AS) tendrá conexiones o, mejor dicho, sesiones internas (iBGP) y además sesiones externas (eBGP).

El protocolo de gateway fronterizo (BGP) es un ejemplo de protocolo de gateway exterior (EGP). BGP intercambia información de encaminamiento entre sistemas autónomos a la vez que garantiza una elección de rutas libres de bucles. Es el protocolo principal de publicación de rutas utilizado por las compañías más importantes de ISP en Internet. BGP4 es la primera versión que admite encaminamiento entre dominios sin clase (CIDR) y agregado de rutas. A diferencia de los protocolos de Gateway internos (IGP), como RIP, OSPF y EIGRP, no usa métricas como número de saltos, ancho de banda, o retardo. En cambio, BGP toma decisiones de encaminamiento basándose en políticas de la red, o reglas que utilizan varios atributos de ruta BGP.

El BGP juega un papel crítico en las comunicaciones en Internet. Facilita el intercambio de información sobre redes IP, la comunicación entre sistemas autónomos (AS). Por tanto BGP es un protocolo inter dominio (entre sistemas autónomos) e intra dominio (dentro del mismo sistema autónomo).

“El protocolo BGP se utiliza para intercambiar información. El intercambio de información en la red se realiza mediante el establecimiento de una sesión de comunicación entre los routers de borde de los sistemas autónomos.” (Bartell, 2003) Para conseguir una entrega fiable de la información, se hace uso de una sesión de comunicación basada en TCP en el puerto número 179. Esta sesión debe mantenerse conectada debido a que ambos extremos de la comunicación periódicamente se intercambian y actualizan información. De modo que al principio, cada router envía al vecino toda su información de encaminamiento y después únicamente se enviarán las nuevas rutas, las actualizaciones o la eliminación de rutas transmitidas con anterioridad.

Además periódicamente se envían mensajes para garantizar la conectividad. Cuando una conexión TCP se interrumpe por alguna razón, cada extremo de la comunicación está obligado a dejar de utilizar la información que ha aprendido por el otro lado. En otras palabras, la sesión TCP sirve como un enlace virtual entre dos sistemas autónomos vecinos, y la falta de medios de comunicación indica que el enlace virtual se ha caído. Cabe destacar que esa unión virtual tendrá más de un enlace físico que conecte a los dos routers frontera, pero si una conexión virtual se cae no indica necesariamente que la conexión física se haya caído. Desde este punto de vista la topología de Internet se puede considerar como un gráfico de conexión de sistemas autónomos conectados mediante enlaces virtuales.

El protocolo BGP utiliza el protocolo de vector de caminos (path vector) para el intercambio de información de enrutamiento en la red. Se transmite una lista con identificación de los AS por los que pasa el anuncio. De esa manera se conseguirá saber cómo llegar a cualquier dirección del prefijo propagado así como se dispondrá para cursar tráfico para cualquier dirección del prefijo.

“Antes de enunciar la mecánica de selección de rutas se deben introducir las dos formas de proceder cuando se cuenta con un escenario en el que implantar BGP.” (Bartell, 2003) Se debe distinguir entre External BGP (EBGP) e Internal BGP (IBGP). EBGP hace referencia al intercambio de información entre sistemas autónomos sin embargo IBGP hace referencia al intercambio de información dentro de un sistema autónomo.

2.4.2.2. Estándar IEEE 802.11/WiFi.

El estándar 802.11 establece los niveles inferiores del modelo OSI para las conexiones inalámbricas que utilizan ondas electromagnéticas, por ejemplo:

- La capa física ofrece tres tipos de codificación de información.
- La capa de enlace de datos compuesta por dos subcapas: control de enlace lógico (LLC) y control de acceso al medio (MAC).

La capa física define la modulación de las ondas de radio y las características de señalización para la transmisión de datos mientras que la capa de enlace de datos define la interfaz entre el bus del equipo y la capa física, en particular un método de acceso parecido al utilizado en el estándar Ethernet, y las reglas para la comunicación entre las estaciones de la red. En realidad, el estándar 802.11 tiene tres capas físicas que establecen modos de transmisión alternativos como lo muestra la figura:

Capa de enlace de datos (MAC)	802.2			
	802.11			
Capa física (PHY)	<table border="1"> <tr> <td>DSSS</td> <td>FHSS</td> <td>Infrarrojo</td> </tr> </table>	DSSS	FHSS	Infrarrojo
DSSS	FHSS	Infrarrojo		

Figura 2.15. Capas del estándar IEEE 802.11/WiFi

Fuente: (Engst, 2005)

2.4.2.3. 802.11 legacy.

Protocolo que esta basadas en protocolos con mayores estándares a la IEEE 802.11x que es un estándar anterior a la norma 802.11n.

2.4.2.4. 802.11a.

De igual forma que el estándar IEEE 802.11 legacy esta utiliza el protocolo de su estándar; el estándar 802.11a funciona en la banda de los 5Gbps y utiliza OFDM, técnica de modulación que permite la tasa de transmisión de hasta 54Mbps, la cual puede usar una

selección selectiva de su velocidad; y cuando la recepción detecta errores la tasa de datos disminuye de 48, 36, 24, 18, 12, 9 y 6Mbps. Este estándar tiene 12 canales sin solapamiento, los cuales 4 de los canales están para enlaces exteriores y los 8 restantes están dedicados para uso de interiores, haciendo que 802.11a no se haga inter operable con la 802.11b

2.4.2.5. 802.11b.

El estándar IEEE 802.11b incluye mejoras de su estándar original, ya que puede soportar tasas de transmisión muy elevadas (5,5 y 11Mbps), utiliza similar método para el acceso y la técnica DSSS definidas por su estándar original. Un dispositivo de estos puede transmitir hasta 11Mbps el cual reducirá de forma automática la tasa de transmisión cuando el receptor empiece a detectar errores, sea por la atenuación del canal o la transferencia, cayendo su transmisión a 55Mbps, después se reducirá a 2Mbps y por último a 1Mbps cuando el canal sea demasiado ruidoso.

2.4.2.6. 802.11c.

Estándar que resulta de la combinación de los estándar 802.11 y 802.1d y el cual no generó mayor interés entre los fabricantes, ya que es solamente la versión mejorada del estándar 802.1d y el cual permite la combinación con dispositivos de estándar 802.11 solo a nivel de enlace de datos.

2.4.2.7. 802.11d.

Estándar que permite el uso de la comunicación por medio del protocolo 802.11 en ciertos países que tiene ciertas restricciones sobre el uso de las frecuencias, permitiendo de esta manera ser usada en cualquier parte del mundo.

2.4.2.8. 802.11e.

Este estándar tiene como propósito mejorar la calidad de servicio en el nivel de capa de enlace de datos, su principal objetivo es la definición de los requisitos de los paquetes en referencia al ancho de banda y el retardo de la transmisión para mejorar la transmisión de paquetes multimedia como audio y video.

2.4.2.9. 802.11f.

Estándar que define una buena práctica sobre el intercambio de entre AP y TR en pleno momento de registrar la red; y la información que intercambia el AP permitiendo la inter portabilidad; permitiendo el Roaming entre las diferentes redes.

2.4.2.10. 802.11g.

Estándar que permite la comunicación en la banda de los 2.4Ghz.

2.4.2.11. 802.11h.

Estándar que tiene por objetivo enlazar el estándar 802.11 con el estándar europeo HiperLAN, mediante la asignación dinámica de canales y dar cumplimiento a las regulaciones europeas referente al uso de frecuencias y del rendimiento de energía.

2.4.2.12. 802.11i.

Estándar que define la seguridad de la transferencia de datos mediante la encriptación y la autenticación utilizando en AES (estándar de cifrado avanzado) que es utilizado por WEP, que utiliza TKIP (Temporal Key Integrity Protocol)

2.4.2.13. 802.11j.

Estándar que permite la armonía entre los estándares japoneses ARIB e HISWANa.

2.4.2.14. 802.11n.

Es la última actualización de los estándares 802.11 ya que esta tiene como objetivo alcanzar una tasa de transmisión de 540Mbps que representaría un aumento de 40 veces la tasa de transmisión que el estándar 802.11b y del estándar 802.11a representaría un aumento en 10 veces. Este estándar aprovecha las actualizaciones realizadas pero la gran diferencia radica en la introducción del concepto MIMO (Multiple Input, Multiple Output); y esto implica tener varios transmisores y varios receptores para el aumento de su tasa de transmisión y de su enlace.

2.4.2.15. IEEE 802.15.4/ZigBee.

IEEE 802.15.4 es un estándar que define el nivel físico y el control de acceso al medio de redes inalámbricas de área personal con tasas bajas de transmisión de datos (lowratewireless personal areanetwork, LR-WPAN). En 2007, la actual revisión del estándar se aprobó en 2006. El grupo de trabajo IEEE 802.15 es el responsable de su desarrollo.

También es la base sobre la que se define la especificación de ZigBee, cuyo propósito es ofrecer una solución completa para este tipo de redes construyendo los niveles superiores de la pila de protocolos que el estándar no cubre.

El propósito del estándar es “...definir los niveles de red básicos para dar servicio a un tipo específico de red inalámbrica de área personal (WPAN)” (Belove, 1988) centrada en la habilitación de comunicación entre dispositivos ubicuos con bajo coste y velocidad (en contraste con esfuerzos más orientados directamente a los usuarios medios, como WiFi). Se enfatiza el bajo coste de comunicación con nodos cercanos y sin infraestructura o con muy poca, para favorecer aún más el bajo consumo.

En su forma básica se concibe un área de comunicación de 10 metros con una tasa de transferencia de 250 Kbps. Se pueden realizar compromisos que favorezcan aproximaciones más radicales a los sistemas embebidos con requerimientos de consumo aún menores. Para ello se definen no uno, sino varios niveles físicos. “Se definieron inicialmente tasas alternativas de 20 y 40 Kbps; la versión actual añade una tasa adicional de 100 Kbps.” (Hill, 1997) Se pueden lograr tasas aún menores con la consiguiente reducción de consumo de energía. Como se ha indicado, “...la característica fundamental de 802.15.4 entre las WPAN's es la obtención de costes de fabricación excepcionalmente bajos por medio de la sencillez tecnológica, sin perjuicio de la generalidad o la adaptabilidad.” (Bartell, 2003)

Entre los aspectos más importantes se encuentra la adecuación de su uso para tiempo real por medio de slots de tiempo garantizados, evasión de colisiones por CSMA/CA y soporte integrado a las comunicaciones seguras. También se incluyen funciones de control del consumo de energía como calidad del enlace y detección de

energía. Un dispositivo que implementa el 802.15.4 puede transmitir en una de tres posibles bandas de frecuencia.

2.4.2.16. Arquitectura de comunicaciones.

Los dispositivos se relacionan entre sí a través de una red inalámbrica sencilla. La definición de los niveles se basa en el modelo OSI. Aunque los niveles inferiores se definen en el estándar, se prevé la interacción con el resto de niveles, posiblemente por medio de un subnivel de control de enlace lógico basado en IEEE 802.2, que acceda a MAC a través de un subnivel de convergencia. La implementación puede basarse en dispositivos externos o integrarlo todo en dispositivos autónomos.

El nivel físico (PHY) provee el servicio de transmisión de datos sobre el medio físico propiamente dicho, así como la interfaz con la entidad de gestión del nivel físico, por medio de la cual se puede acceder a todos los servicios de gestión del nivel y que mantiene una base de datos con información de redes de área personal relacionadas. De esta forma, “PHY controla el transceptor de radiofrecuencia y realiza la selección de canales junto con el control de consumo y de la señal.” (Weichel, 1990) Opera en una de tres posibles bandas de frecuencia de uso no regulado.

- 868-868,8 MHz: Europa, permite un canal de comunicación (versión de 2003), extendido a tres en la revisión de 2006.
- 902-928 MHz: Norte América, hasta diez canales (2003) extendidos a treinta (2006).
- 2400-2483,5 MHz: uso en todo el mundo, hasta dieciséis canales (2003, 2006).

La versión original del estándar, de 2003, especifica dos niveles físicos basados en espectro ensanchado por secuencia directa (directsequence spread spectrum, DSSS): “...uno en las bandas de 868/915 MHz con tasas de 20 y 40 Kbps; y otra en la banda de 2450 MHz con hasta 250 Kbps.” (Fopwles, 2011)

La revisión de 2006 incrementa las tasas de datos máximas de las bandas de 868/915 MHz, que permiten hasta 100 y 250 Kbps. Aún más, define cuatro niveles físicos

en base al método de modulación usado. Tres de ellas preservan el mecanismo por DSSS: las bandas de 868/915 MHz, que usan modulación en fase binaria o por cuadratura en offset (offset quadrature phases hift keying, ésta segunda opcional). En la banda de 2450 MHz se usa esta segunda técnica. Adicionalmente, se define una combinación opcional de modulación binaria y en amplitud para las bandas de menor frecuencia, basadas por lo tanto en una difusión de espectro paralela, no secuencial (PSSS). Si se usan éstas bandas de menor frecuencia, se puede cambiar dinámicamente el nivel físico usado de entre los soportados.

El control de acceso al medio (MAC) transmite tramas MAC usando para ello el canal físico. Además del servicio de datos, ofrece una interfaz de control y regula el acceso al canal físico y al balizado de la red. También controla la validación de las tramas y las asociaciones entre nodos, y garantiza slots de tiempo. Por último, ofrece puntos de enganche para servicios seguros.

El estándar no define niveles superiores ni subcapas de interoperabilidad. Existen extensiones, como la especificación de ZigBee, que complementan al estándar en la propuesta de soluciones completas.

2.4.2.17. Modelo de red.

El estándar define dos tipos de nodo en la red. El primero es el dispositivo de funcionalidad completa (full-function device, FFD). Puede funcionar como coordinador de una red de área personal (PAN) o como un nodo normal. Implementa un modelo general de comunicación que le permite establecer un intercambio con cualquier otro dispositivo. Puede, además, encaminar mensajes, en cuyo caso se le denomina coordinador (coordinador de la PAN si es el responsable de toda la red y no sólo de su entorno).

Contrapuestos a éstos están los dispositivos de funcionalidad reducida (reduced-function device, RFD). Se plantean como dispositivos muy sencillos con recursos y necesidades de comunicación muy limitadas. Por ello, sólo pueden comunicarse con FFD's y nunca pueden ser coordinadores.

Las redes de nodos pueden construirse como redes punto a punto o en estrella. En cualquier caso, toda red necesita al menos un FFD que actúe como su coordinador. Las redes están compuestas por grupos de dispositivos separados por distancias suficientemente reducidas; cada dispositivo posee un identificador único de 64 bits, aunque si se dan ciertas condiciones de entorno en éste pueden utilizarse identificadores cortos de 16 bits. Probablemente éstos se utilizarán dentro del dominio de cada PAN separada.

Las redes punto a punto pueden formar patrones arbitrarios de conexionado, y su extensión está limitada únicamente por la distancia existente entre cada par de nodos. Forman la base de redes ad hoc auto organizativas. “El estándar no define un nivel de red, por lo que no se soportan funciones de ruteo de forma directa, aunque si dicho nivel se añade pueden realizarse comunicaciones en varios saltos.”(Black, 2000) Pueden imponerse otras restricciones topológicas; en concreto, el estándar menciona el árbol de clusters como una estructura que aprovecha que los RFD's sólo pueden conectarse con un FFD al tiempo para formar redes en las que los RFD's son siempre hojas del árbol, y donde la mayoría de los nodos son FFD's. Puede relajarse la estructura para formar redes en malla genéricas, cuyos nodos sean árboles de clusters con un coordinador local para cada cluster, junto con un coordinador global.

También pueden formarse redes en estrella, en las que el coordinador va a ser siempre el nodo central. Una red así se forma cuando un FFD decide crear su PAN y se nombra a sí mismo coordinador, tras elegir un identificador de PAN único. Tras ello, otros dispositivos pueden unirse a una red totalmente independiente del resto de redes en estrella.

2.4.2.18. Arquitectura de transporte de datos.

Las tramas son la unidad básica de transporte. “Hay cuatro tipos distintos (de datos, de sincronización, balizas y de control MAC), que constituyen un compromiso razonable entre sencillez y robustez.” (Gralla, 2007) Puede usarse, además, una estructura de súper tramas definida por el coordinador, en cuyo caso éstas están comprendidas entre dos balizas y proveen sincronización e información de configuración a otros dispositivos. Una

súper trama está formada por dieciséis slots de igual capacidad, que pueden dividirse en una parte activa y otra pasiva, en la que el coordinador puede ahorrar energía ya que no tendrá que realizar labores de control.

La contención se da entre los límites de la súper trama y se resuelve por medio de CSMA/CA. Toda transmisión debe finalizar antes de la llegada de la segunda baliza. Como ya se ha indicado, una aplicación que tenga unas necesidades de ancho de banda bien definidas puede utilizar hasta siete dominios de uno o más slots garantizados, sin contención, en la parte final de la súper trama. La primera parte debe ser suficiente para dar servicio a la estructura de red y sus dispositivos. “Las súper tramas suelen usarse cuando hay dispositivos de baja latencia, que deben mantener sus asociaciones incluso ante periodos extendidos de inactividad.” (Hill, 1997)

La transferencia de datos requiere una fase de sincronización por balizas, si están en uso, seguida por una transmisión con CSMA/CA (utilizando slots si se usan súper tramas) con confirmación. Las transferencias iniciadas por el coordinador suelen atender a peticiones de los dispositivos. Éstas se producen utilizando las balizas, si se utilizan. El coordinador confirma la petición y manda la información en paquetes, que los dispositivos confirman. Si no se utilizan súper tramas el proceso es el mismo, sólo que no hay balizas que puedan mantener listas de mensajes pendientes.

Las redes punto a punto pueden usar CSMA/CA sin slots o mecanismos de sincronización; en este último caso, dos dispositivos cualesquiera pueden comunicarse, mientras que si la red es más estructurada uno de los dispositivos debe ser el coordinador.

En general, el modelo sigue un patrón de clasificación de las primitivas en petición-confirmación/indicación-respuesta.

2.4.2.19. Fiabilidad y seguridad.

El medio físico es un recurso al que se accede utilizando CSMA/CA. Las redes que no utilizan métodos balizado hacen uso de una variación del mismo basada en la escucha del medio, balanceada por un algoritmo de back off exponencial aleatorio, salvo

en el caso de las confirmaciones. Las transmisiones de datos típicas utilizan slots no reservados cuando se utilizan balizas; de nuevo, la excepción son las confirmaciones.

Estos mensajes de confirmación pueden ser opcionales en algunos casos; en ellos, se realiza un supuesto de éxito. En cualquier caso, si un dispositivo es incapaz de procesar una trama en un momento dados, no confirma su recepción. Pueden realizarse reintentos basados en timeout un cierto número de veces, tras lo cual se decide si seguir intentándolo o dar error de transmisión.

El entorno de funcionamiento previsto para este tipo de redes exige que se maximice la vida de la fuente de energía (baterías, posiblemente), por lo que se favorecen los protocolos que conducen a estos fines. Para ello, se programan comprobaciones periódicas de mensajes pendientes, más o menos frecuentes según la aplicación concreta.

En lo que respecta a seguridad en las comunicaciones, el subnivel MAC ofrece funcionalidades que los niveles superiores pueden utilizar para lograr alcanzar el nivel de seguridad deseado. Estos niveles pueden especificar claves simétricas para proteger los datos y restringir éstos a un grupo de dispositivos o a un enlace punto a punto. Estos grupos se especifican en listas de control de acceso. Además, MAC realiza comprobaciones de frescura (freshnesscheck) entre recepciones sucesivas para asegurar que las tramas viejas, cuyo contenido no se considera útil o válido ya, no trascienden a los niveles superiores.

Adicionalmente, existe un modo MAC inseguro que permite el uso de listas de control de acceso únicamente como mecanismo de decisión de aceptación de tramas en base a su (supuesto) origen.

2.4.2.20. ADSL.

Línea de suscriptor digital asimétrica,¹² (ADSL, sigla del inglés Asymmetric Digital Subscriber Line), “...es un tipo de tecnología de línea de abonado digital (DSL) que consiste en la transmisión analógica de datos digitales apoyada en el cable de pares simétricos de cobre...” (Willebrand H. y., 2002) que lleva la línea telefónica convencional o línea de abonado (Red Telefónica Conmutada, PSTN), siempre y cuando la longitud de

línea no supere los 5,5 km medidos desde la central telefónica, o no haya otros servicios por el mismo cable que puedan interferir.

2.4.2.20.1. Descripción.

ADSL es una tecnología de acceso a Internet de banda ancha, lo que implica una velocidad superior a una conexión por módem en la transferencia de datos, ya que el módem utiliza la banda de voz y por tanto impide el servicio de voz mientras se use y viceversa. Esto se consigue mediante una modulación de las señales de datos en una banda de frecuencias más alta que la utilizada en las conversaciones telefónicas convencionales (300 a 3400 Hz), función que realiza el enrutador ADSL. Para evitar distorsiones en las señales transmitidas, es necesaria la instalación de un filtro (discriminador, filtro DSL o splitter) que se encarga de separar la señal telefónica convencional de las señales moduladas de la conexión mediante ADSL.

Esta tecnología se denomina “pseudo asimétrica” porque las capacidades: de descarga (desde la red hasta el usuario), y de subida de datos (en sentido inverso), no coinciden. La tecnología ADSL está diseñada para que la capacidad de bajada o descarga sea mayor que la de subida, lo que se corresponde con el uso de Internet por parte de la mayoría de usuarios finales, que reciben más información de la que envían (o descargan más de lo que suben). En una línea ADSL se establecen tres canales de comunicación, canal de envío de datos, canal de recepción de datos, y, canal de servicio telefónico normal.

Las empresas de telefonía implantan versiones mejoradas de esta tecnología, como ADSL2 y ADSL2+, con capacidad de suministro de televisión y video de alta calidad por el par telefónico, lo cual supone una dura competencia entre las compañías telefónicas y los cable operadores, y la aparición de ofertas integradas de voz, datos y televisión, a partir de una misma línea y dentro de una empresa o varias, que ofrezca estos tres servicios de comunicación por un mismo medio; Triple Play. El uso de un mayor ancho de banda para estos servicios limita aún más la distancia a la que pueden funcionar, por el par de hilos.

ADSL2 y ADSL2+ incorporan mecanismos de modulación y gestión de los recursos físicos avanzados, de modo que no sólo aumentan la capacidad del ADSL convencional de 8 Mbit/s a, 12 y 24 Mbit/s, respectivamente, sino que introducen mejoras para evitar las interferencias o ruido, y disminuir los efectos de la atenuación, de ahí que se alcancen distancias de hasta 9 km.

El ADSL es una tecnología que utiliza el par de cobre y tiene menos ancho de banda que otras tecnologías como cable módem o Metro Ethernet, cuyo cableado urbano está compuesto por hilos de fibra óptica en lugar del par de cobre implementado en su mayor parte en las décadas de 1950 y 1960.

2.4.2.20.2. Ventajas y desventajas.

La tecnología ADSL presenta ventajas e inconvenientes respecto a la conexión telefónica a Internet por medio del módem.

- Ventajas de ADSL
 - Ofrece la posibilidad de hablar por teléfono al mismo tiempo que se navega por Internet, porque voz y datos trabajan en bandas separadas por la propia tecnología ADSL y por filtros físicos (splitters y micro filtros).
 - Utiliza la infraestructura existente, de la red telefónica básica. Ventajoso, tanto para los operadores que no tienen que afrontar grandes gastos para la implantación de esta tecnología, como para los usuarios, ya que el costo y el tiempo que tardan en tener disponible el servicio es menor que si el operador tuviese que emprender obras para generar nueva infraestructura.
 - Ofrece velocidad de conexión mucho mayor que la obtenida mediante marcación telefónica a Internet; de hecho no se necesita el "marcado" tal como lo conocemos sino que se conecta independientemente de la conexión tradicional de voz. Este es el aspecto más interesante para los usuarios. En la gran mayoría de escenarios es la tecnología con mejor relación velocidad/precio.
 - Cada circuito entre abonado y central es único y exclusivo para ese usuario, es decir el cable de cobre que sale del domicilio del abonado llega

a la central sin haber sido agregado, y por tanto evita cuellos de botella por canal compartido, lo cual sí ocurre en otras tecnologías, que utilizan un mismo cable para varios abonados (p.ej.: el cable módem).

- Desventajas de ADSL
 - No todas las líneas telefónicas pueden ofrecer este servicio, debido a que las exigencias de calidad del par, tanto de ruido como de atenuación, por distancia a la central, son más estrictas que para el servicio telefónico básico. De hecho, el límite teórico para un servicio aceptable equivale a 5,5 km de longitud de línea; el límite real suele ser del orden de los 3 km.
 - Debido a los requerimientos de calidad del par de cobre, el servicio no es económico en países con pocas o malas infraestructuras, sobre todo si lo comparamos con los precios en otros países con infraestructuras más avanzadas.
 - La calidad del servicio depende de factores externos, como interferencias en el cable o distancia a la central, al no existir repetidores de señal entre esta y el módem del usuario final. Esto hace que la calidad del servicio fluctúe, provocando en algunos casos cortes y/o disminución de caudal.

Existen miles de fuentes de interferencias electromagnéticas, desde el agua hasta los motores eléctricos pasando por las instalaciones internas del cliente de los cables de corriente eléctrica o de hilo musical.

Este problema no existe en la fibra óptica donde se transmite luz láser en un medio protegido por una cubierta opaca, ya que la luz es inmune a aquéllas interferencias. Sus capacidades de transmisión son muy inferiores a otras tecnologías como HybridFibre Coaxial (HFC), comúnmente denominado cable coaxial o fibra óptica.

2.5. TRANSMISIÓN POR FIBRA ÓPTICA

La comunicación por fibra óptica es un método de transmisión de información de un lugar a otro enviando señales de luz a través de fibra óptica. La luz en forma de ondas electromagnéticas viajeras es modulada para transmitir información. Desarrollados en la década de 1970, los sistemas de comunicación de fibra óptica han revolucionado la industria

de las telecomunicaciones y han desempeñado un papel importante en el advenimiento de la era de la información. Debido a sus ventajas sobre la transmisión eléctrica, la fibra óptica ha sustituido en gran medida las comunicaciones mediante cables de cobre en las redes del mundo desarrollado. (Alwayn, 2004)

El proceso de comunicación mediante fibra óptica implica los siguientes pasos:

- Creación de la señal óptica mediante el uso de un transmisor;
- Transmisión de la señal a lo largo de la fibra, garantizando que la señal no sea demasiado débil ni distorsionada;
- Recepción de la señal, lo que consiste en la conversión de ésta en una señal eléctrica.

2.5.1. Antecedentes generales.

Las redes de fibra óptica son un medio de comunicación de difracción de luz, el cual consiste de un hilo muy fino de material transparente sea estos de vidrio, y materiales de plásticos especiales, estos materiales deben tener la propiedad de tener un índice de refracción de núcleo; es decir, que sean capaces de reflejar el haz de luz, cuando estas sean sometidas a deformaciones mecánicas o a cambios de temperaturas y estas puedan afectar su propiedad de refracción.

En la antigüedad se utilizaban espejos para transmitir información, de forma rudimentaria, usando luz solar. “En 1792, Claude Chappe diseñó un sistema de telegrafía óptica, que, mediante el uso de un código y torres y espejos distribuidos a lo largo de los 200 km que separan a Lille de París, conseguía transmitir un mensaje en tan sólo 16 minutos.” (GBM, 1995)

Aunque en 1820, eran conocidas las ecuaciones por las que rige la captura de la luz dentro de una placa de cristal lisa, no sería sino 90 años más tarde que estas ecuaciones se ampliaron hacia los llamados cables de vidrio gracias a los trabajos de los físicos Demetrius Hondros y Peter Debye en 1910.

El confinamiento de la luz por refracción, el principio de que posibilita la fibra óptica, fue demostrado por Daniel Colladon y Jacques Babinet en París en los comienzos de la

década de 1840. “El físico irlandés John Tyndall descubrió que la luz podía viajar dentro del agua, curvándose por reflexión interna, y en 1870 presentó sus estudios ante los miembros de la Real Sociedad.” (Alwayn, 2004)

Solamente en 1950 las fibras ópticas comenzaron a interesar a los investigadores, con muchas aplicaciones prácticas que estaban siendo desarrolladas. “En 1952, el físico Narinder Singh Kapany, apoyándose en los estudios de John Tyndall, realizó experimentos que condujeron a la invención de la fibra óptica.” (Hill, 1997)

Uno de los primeros usos de la fibra óptica fue emplear un haz de fibras para la transmisión de imágenes, que se usó en el endoscopio. Usando la fibra óptica, se consiguió un endoscopio semiflexible, el cual fue patentado por la Universidad de Míchigan en 1956. En este invento se usaron unas nuevas fibras forradas con un material de bajo índice de refracción, ya que antes se impregnaban con aceites o ceras. En esta misma época, se empezaron a utilizar filamentos delgados como el cabello que transportaban luz a distancias cortas, tanto en la industria como en la medicina, de forma que la luz podía llegar a lugares que de otra forma serían inaccesibles. “El único problema era que esta luz perdía hasta el 99 % de su intensidad al atravesar distancias de hasta 9 metros de fibra.” (Alwayn, 2004)

“Charles K. Kao, en su tesis doctoral de 1956, estimó que las máximas pérdidas que debería tener la fibra óptica, para que resultara práctica en enlaces de comunicaciones, eran de 20 decibelios por kilómetro.” (GBM, 1995)

En 1966, en un comunicado dirigido a la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia, los investigadores Charles K. Kao y George Hockham, de los laboratorios Standard Telecommunications, en Inglaterra, afirmaron que “...se podía disponer de fibras de una transparencia mayor y propusieron el uso de fibras de vidrio y de luz, en lugar de electricidad y conductores metálicos, en la transmisión de mensajes telefónicos.” (Black, 2000) La obtención de tales fibras exigió grandes esfuerzos de los investigadores, ya que las fibras hasta entonces presentaban pérdidas del orden de 100 dB/km, además de una banda pasante estrecha y una enorme fragilidad mecánica.

Este estudio constituyó la base para reducir las pérdidas de las señales ópticas que hasta el momento eran muy significativas y no permitían el aprovechamiento de esta

tecnología. En un artículo teórico, demostraron que las grandes pérdidas características de las fibras existentes se debían a impurezas diminutas intrínsecas del cristal. Como resultado de este estudio fueron fabricadas nuevas fibras con atenuación de 20 dB/km y una banda pasante de 1 GHz para un largo de 1 km, con la perspectiva de sustituir los cables coaxiales. La utilización de fibras de 100 μm de diámetro, envueltas en fibras de nylon resistente, permitirían la construcción de hilos tan fuertes que no podían romperse con las manos. Hoy ya existen fibras ópticas con atenuaciones tan pequeñas de hasta 1 dB/km, lo que es muchísimo menor a las pérdidas de un cable coaxial.

En 1970, "...los investigadores Robert Maurer, Donald Keck, Peter Schultz, además de Frank Zimar que trabajaban para Corning Glass, fabricaron la primera fibra óptica aplicando impurezas de titanio en sílice" (Black, 2000) con cientos de metros de largo con la claridad cristalina que Kao y Hockman habían propuesto, aunque las pérdidas eran de 17 dB/km. Durante esta década, las técnicas de fabricación se mejoraron, consiguiendo pérdidas de tan solo 0,5 dB/km.

Poco después, los físicos Morton B. Panish e Izuo Hayashi, de los Laboratorios Bell, mostraron un láser de semiconductores que podía funcionar continuamente a temperatura ambiente. Además, John MacChesney y sus colaboradores, también de los laboratorios Bell, desarrollaron independientemente métodos de preparación de fibras. Todas estas actividades marcaron un punto decisivo ya que ahora, existían los medios para llevar las comunicaciones de fibra óptica fuera de los laboratorios, al campo de la ingeniería habitual. Durante la siguiente década, a medida que continuaban las investigaciones, las fibras ópticas mejoraron constantemente su transparencia. "El 22 de abril de 1977, General Telephone and Electronics envió la primera transmisión telefónica a través de fibra óptica, en 6 Mbit/s, en Long Beach, California." (GBM, 1995)

Un dispositivo que permitió el uso de la fibra óptica en conexiones interurbanas, reduciendo el coste de ellas, fue "...el amplificador óptico inventado por David N. Payne, de la Universidad de Southampton, y por Emmanuel Desurvire en los Laboratorios Bell. A ambos se les concedió la Medalla Benjamin Franklin en 1988." (Black, 2000)

En 1980, las mejores fibras eran tan transparentes que una señal podía atravesar 240 kilómetros de fibra antes de debilitarse hasta ser indetectable. Pero las fibras ópticas con este grado de transparencia no se podían fabricar usando métodos tradicionales. Otro avance se produjo cuando los investigadores se dieron cuenta de que el cristal de sílice puro, sin ninguna impureza de metal que absorbiese luz, solamente se podía fabricar directamente a partir de componentes de vapor, evitando de esta forma la contaminación que inevitablemente resultaba del uso convencional de los crisoles de fundición. “La tecnología en desarrollo se basaba principalmente en el conocimiento de la termodinámica química, una ciencia perfeccionada por tres generaciones de químicos desde su adopción original por parte de Willard Gibbs, en el siglo XIX.” (GBM, 1995)

También en 1980, AT&T presentó a la Comisión Federal de Comunicaciones de los Estados Unidos un proyecto de un sistema de 978 kilómetros que conectaría las principales ciudades del trayecto de Boston a Washington D. C. Cuatro años después, cuando el sistema comenzó a funcionar, su cable, de menos de 25 centímetros de diámetro, proporcionaba 80 000 canales de voz para conversaciones telefónicas simultáneas. Para entonces, la longitud total de los cables de fibra únicamente en los Estados Unidos alcanzaba 400 000 kilómetros.

El primer enlace transoceánico con fibra óptica fue el TAT-8 que comenzó a operar en 1988, usando un cristal tan transparente que los amplificadores para regenerar las señales débiles se podían colocar a distancias de más de 64 kilómetros. Tres años después, otro cable transatlántico duplicó la capacidad del primero. Desde entonces, se ha empleado fibra óptica en multitud de enlaces transoceánicos o entre ciudades, y paulatinamente se va extendiendo su uso desde las redes troncales de las operadoras hacia los usuarios finales.

Hoy en día, debido a sus mínimas pérdidas de señal y a sus óptimas propiedades de ancho de banda, además de peso y tamaño reducidos la fibra óptica puede ser usada a distancias más largas que el cable de cobre.

2.5.2. Estándar ANSI/TIA/EIA-568-B.3/Fibra Óptica.

TIA/EIA-568-B son tres estándares que tratan el cableado comercial para productos y servicios de telecomunicaciones. Los tres estándares oficiales:

- ANSI/TIA/EIA-568-B.1-2001,
- -B.2-2001, y,
- -B.3-2001.

Los estándares TIA/EIA-568-B se publicaron por primera vez en 2001. Sustituyen al conjunto de estándares TIA/EIA-568-A que han quedado obsoletos.

Tal vez la característica más conocida del TIA/EIA-568-B.1-2001 sea la asignación de pares/pines en los cables de 8 hilos y 100 ohmios (cable de par trenzado). Esta asignación se conoce como T568A y T568B, y a menudo es nombrada (erróneamente) como TIA/EIA-568A y TIA/EIA-568B.

En el protocolo más actual, TIA/EIA-568B, la terminación de los conectores que cumple para la transmisión de datos arriba de 100 Mbps es la T568A.

El estándar TIA/EIA568B-34 se desarrolló gracias a la contribución de más de 60 organizaciones, incluyendo fabricantes, usuarios finales, y consultoras. Los trabajos para la estandarización comenzaron en 1985, cuando la “Asociación para la Industria de las Comunicaciones y las Computadoras” (CCIA) solicitó a la “Alianza de Industrias de Electrónica” (EIA), una organización de normalización, que definiera un estándar para el cableado de sistemas de telecomunicaciones. EIA acordó el desarrollo de un conjunto de estándares, y se formó el comité TR-42, con nueve subcomités para desarrollar los trabajos de estandarización.

“La primera revisión del estándar, TIA/EIA-568-A.1-1991, se emitió en 1991 y fue actualizada en 1995.” (Alwayn, 2004) La demanda comercial de sistemas de cableado aumentó fuertemente en aquel período, debido a la aparición de los ordenadores personales y las redes de comunicación de datos, y a los avances en estas tecnologías. El desarrollo de cables de pares cruzados de altas prestaciones y la popularización de los cables de fibra óptica, conllevaron cambios importantes en el estándar, que fue sustituido por el actual conjunto de estándares TIA/EIA-568-B.

IA/EIA-568-B intenta definir estándares que permitirán el diseño e implementación de sistemas de cableado estructurado para edificios comerciales y entre edificios en entornos de

campus. El sustrato de los estándares define los tipos de cables, distancias, conectores, arquitecturas, terminaciones de cables y características de rendimiento, requisitos de instalación de cable y métodos de pruebas de los cables instalados. “El estándar principal, el TIA/EIA-568-B.1 define los requisitos generales, mientras que TIA/EIA-568-B.2 se centra en componentes de sistemas de cable de pares balanceados y el -568-B.3 aborda componentes de sistemas de cable de fibra óptica.” (Alwayn, 2004)

La intención de estos estándares es proporcionar una serie de prácticas recomendadas para el diseño e instalación de sistemas de cableado que soporten una amplia variedad de los servicios existentes, y la posibilidad de soportar servicios futuros que sean diseñados considerando los estándares de cableado. El estándar pretende cubrir un rango de vida de más de diez años para los sistemas de cableado comercial. “Este objetivo ha tenido éxito en su mayor parte, como se evidencia con la definición de cables de categoría 5 en 1991, un estándar de cable que satisface la mayoría de requerimientos para 1000Base-T, emitido en 1999.” (Alwayn, 2004)

Todos estos documentos acompañan a estándares relacionados que definen caminos y espacios comerciales (569-A), cableado residencial (570-A), estándares de administración (606), tomas de tierra (607) y cableado exterior (758). También se puede decir que este intento definir estándares permitieron determinar, además del diseño e implementación en sistema de cableado estructurado, qué cables de par trenzados utilizar para estructurar conexiones locales.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS ENTRE FSO Y OTRAS TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS

3.1. INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos las redes inalámbricas han sufrido cambios importantes debido a su gran desempeño y su versatilidad para implementarse en cualquier lugar del planeta; por lo que han sufrido cambios importantes para mejorar su utilidad. Los sistemas de comunicaciones ópticas en el espacio libre (FSO) son conexiones sin cable a través de la atmósfera. Estos sistemas tienen el mismo principio de funcionamiento de los sistemas de comunicaciones ópticas por medio de una fibra, excepto que el haz de luz es transmitido a través del espacio libre.

Esto nos indica, que es un elemento muy útil en la escalabilidad a nivel industrial y tecnológico. A nivel empresarial ya las empresas utilizan enlaces ópticos inalámbricos de alta seguridad para interconectar edificios, oficinas aisladas, entre otras, a través de un enlace de alta velocidad evitando con esto el embotellamiento en el transporte de información y de esta manera se logra tener un alto desempeño y una gran variedad de servicios.

3.2. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA TECNOLOGÍA FSO Y FIBRA ÓPTICA

Desde el punto de vista tecnológico la fibra óptica presenta características importantes sobre las redes FSO, en especial por su independencia a factores externos de incidencia aleatoria como la neblina, lluvia, smog, etc. Con este tipo de factores naturales hacen que la red FSO experimente pérdidas de información. Otro aspecto a ser considerado es el tiempo de despliegue del enlace, ya que la tecnología FSO es más rápido su despliegue e implementación que la red de fibra óptica.

3.2.1. 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..." (GBM, 1995) 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 eléctrica óptica.” (GBM, 1995) 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 se 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 a 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; y, fibra monomodo.

3.2.2.1 Fibra monomodo.

La fibra monomodo tiene un núcleo pequeño que permite que los rayos de luz viajen a través de la fibra por un solo modo, debido al pequeño tamaño de su núcleo, menor a 10µm le permite eliminar la dispersión modal, por lo que se puede obtener mayores tasas de transmisión en comparación a las fibras multimodo, esta fibra se clasifica en:

- *Fibra SMF.*

Conocida por sus siglas SMF (Standar Single ModeFiber), este tipo de fibra monomodo tiene como características más destacadas una atenuación de 0.2 dB/km y una dispersión cromática alta en orden de decenas de dB en la ventana 1550nm.

- *Fibra DSF*

Conocida por sus siglas DSF (Dispersion Shifted Fiber); estas fibras DSF son fabricadas para obtener una dispersión cromática nula en la ventana de 1550nm y presenta una atenuación de 0.25 dB/km.

- *Fibra NZDSF*

Sus siglas NZDSF (Non Zero Dispersion Shifted Fiber); presenta un valor de dispersión cromática muy cercana al cero en la tercera ventana. Su principal característica es la reducción de efectos de fenómenos no lineales por lo que posibilita en la utilización en sistemas WDM.,

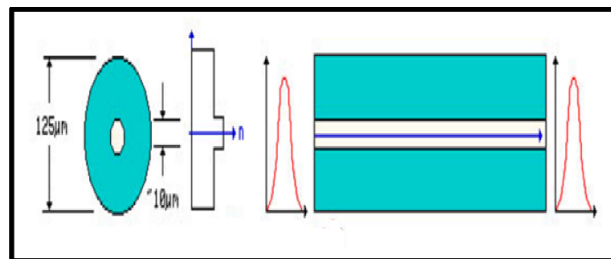


Figura 3.1. Perfil y propagación de la luz en una fibra monomodo

Fuente: (Alwayn, 2004)

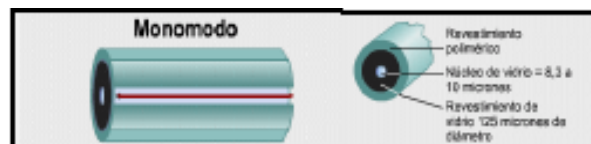


Figura 3.2. Componentes de la fibra multimodo

Fuente: (Fopwles, 2011)

3.2.2.2 Fibra multimodo

El diámetro del núcleo de la fibra es lo suficientemente grande como para permitir que la luz pueda propagar varios modos de forma simultánea, debido a su tamaño de fibra el acoplamiento de la luz es más sencillo en comparación a las fibras monomodo.

- *Fibras ópticas multimodo de índice escalonado*

Estas fibras ópticas transportan de forma simultánea varios haces de luz con diferentes ángulos de incidencia (diferentes modos), como lo muestra la figura 3.3; si bien la atenuación y la dispersión modal son mayores que a otras fibras, el mayor diámetro del núcleo hace que se requiera de una menor precisión en su fabricación.

- *Fibras ópticas multimodo de índice gradual*

Se diferencia de las anteriores, ya que el índice de refracción del núcleo disminuye radialmente hasta igualarse al revestimiento, tal como se muestra en la figura 3.4, y esto provoca que los rayos de luz se desvíen gradualmente en aparentes trayectorias curvas, generando que los modos lleguen al extremo final en tiempos casi iguales, reduciendo de este modo la dispersión modal.

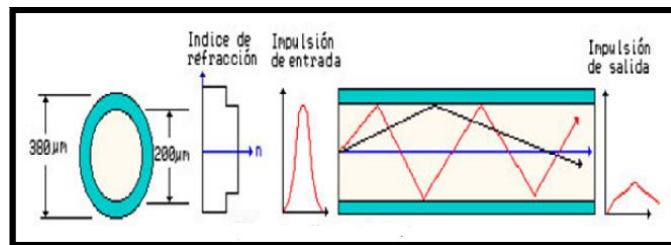


Figura 3.3. Perfil y propagación de luz en una fibra multimodo de índice escalonado

Fuente: (Alwayn, 2004)

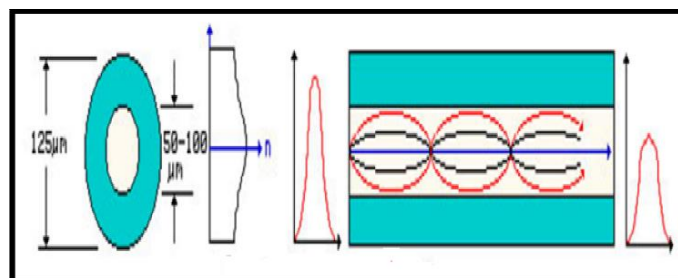


Figura 3.4. Perfil y propagación de la luz en una fibra multimodo de índice gradual

Fuente: (Alwayn, 2004)

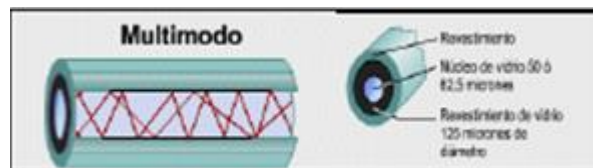


Figura 3.5. Componentes de la fibra multimodo

Fuente: (Fopwles, 2011)

En la tabla 3.1 se observa la comparación entre la fibra monomodo y multimodo.

Tabla 3.1. Tabla de comparación entre fibra multimodo y monomodo

Multimodo	Monomodo
Las ondas de luz tiene varios recorridos	La onda de luz tiene un solo recorrido
Núcleo de 50 ó 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

Fuente: (GBM, 1995)

La atenuación de la fibra puede definirse 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 3.6).

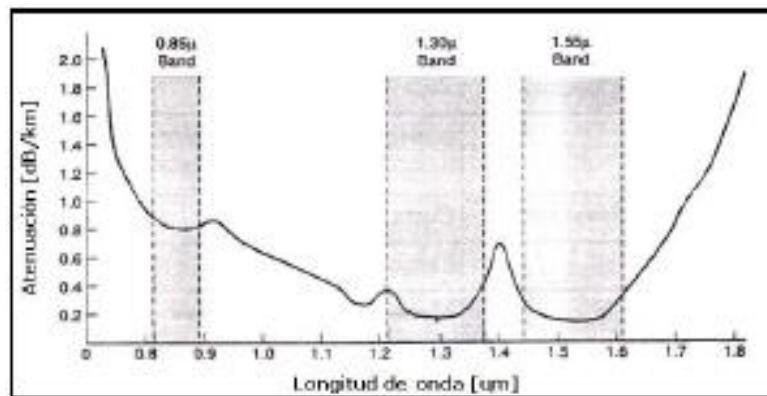


Figura 3.6. Ventanas de transmisión de la fibra óptica

Fuente: (Alwayn, 2004)

Los valores típicos de atenuación debido a sus características físicas se indican en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Valores de tipos de atenuación de la fibra óptica

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

Fuente: (Alwayn, 2004)

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

3.2.2.3 Aplicaciones de FSO.

La tecnología punto a punto de la FSO, está disponible en varias tasas de transmisión, topologías, protocolos, arquitecturas las cuales se pueden utilizar en numerosas aplicaciones, dependiendo de las necesidades que tenga los usuarios.

3.2.2.3.1 Aplicaciones comunes.

Entre las aplicaciones más comunes que tienen las FSO son las conectividades de “última milla” para aplicaciones de *carriers* u operadores, conectividad entre campus universitarios y las más comunes entre empresas de que tengan redes LAN; con un menor propósito se le ha destinado al enrutamiento de enlaces críticos en zonas metropolitanas como lo muestra la figura 3.7.

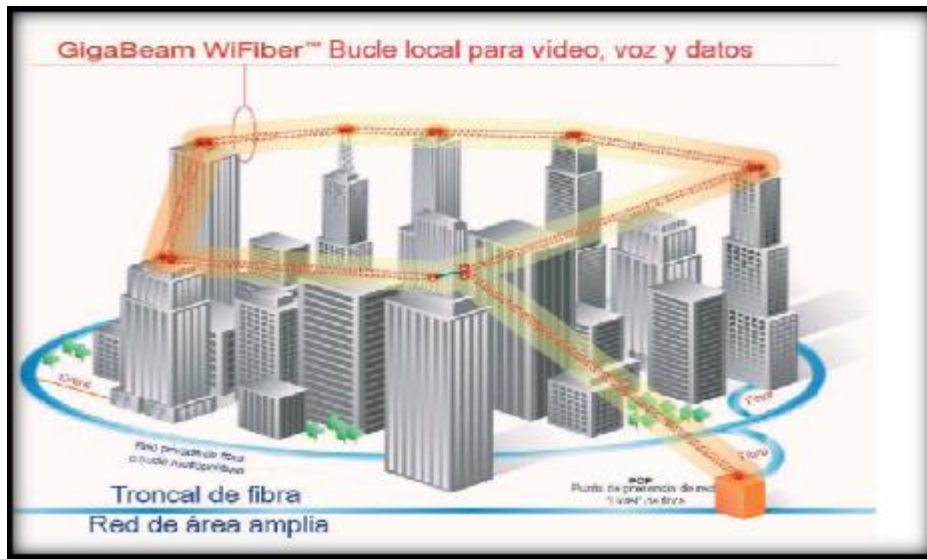


Figura 3.7. Aplicación de un FSO en una red Metropolitana

Fuente: (GBM, 1995)

3.2.2.3.2 Aplicaciones Especializadas.

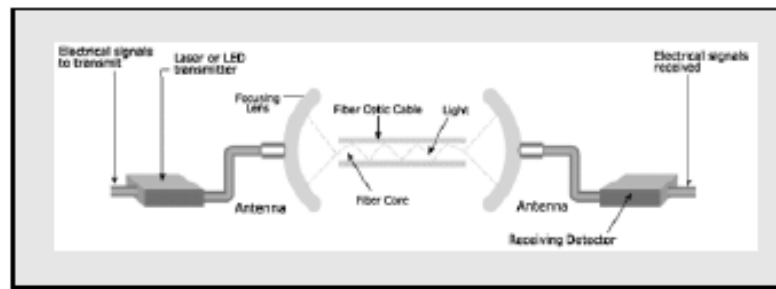
Para aplicaciones más especializadas se tiene como por ejemplo: redes de video y broadcast, conectividad para PBXs remotas, sistemas de antenas celulares distribuidas, mirco celdas y respaldos para estaciones base para redes móviles (2G, 2.5G, 3G y 4G (Lte)).

3.2.2.4 Características de FSO.

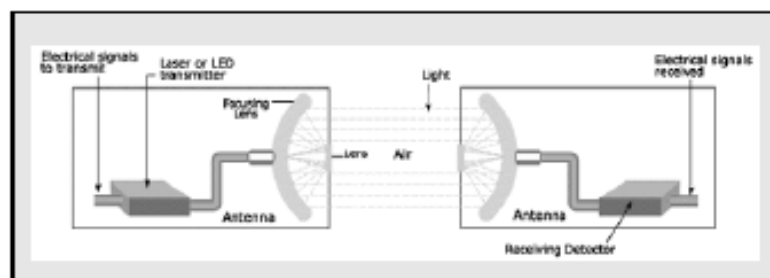
Los sistemas FSO están afectados con un factor de pérdida en el aire entre el transmisor y el receptor, el cual puede variar en el tiempo debido a las condiciones climáticas. Por otro lado se debe tomar en cuenta que existen pérdidas ópticas, por la imperfección de los lentes, pérdidas debido a la divergencia del haz, etc. Todos los factores que afectan a los sistemas FSO se analizaron en el Capítulo 2.

3.2.2.5 Comparación entre FSO y la fibra óptica.

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 3.7.



Sistema de comunicaciones ópticas en fibra



Sistema FSO (Free Space Optics)

Figura 3.8. Sistema de comunicaciones ópticas en fibra vs sistema FSO

Fuente: (Alwayn, 2004)

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 1550nm, 1330nm y 850nm. 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 u hollín.

La absorción de luz está 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" (Willebrand H. y., 2002) , 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 interface 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.

3.2.3 Tecnología de acceso.

Las comunicaciones banda ancha ofrecen a los usuarios altas velocidades de transmisión, para lo cual dichas comunicaciones deben poseer la tecnología y el equipamiento adecuado para ofrecer datos, voz y video.

Los clientes de servicios de telecomunicaciones son cada vez más exigentes en cuanto a la calidad, disponibilidad y ancho de banda ofrecido por los proveedores.

Existen muchas maneras de llegar hasta el usuario final con gran ancho de banda. A continuación se detallan las tecnologías de acceso o también conocidas como tecnologías de la última milla.

3.2.3.1 Acceso por fibra óptica.

Las redes ópticas destraban el cuello de botella del acceso aumentando el ancho de banda y la calidad de servicio. Prometen un enorme incremento en el ancho de banda de la red de acceso hasta cientos de Gbps. Se clasifican en dos tipos:

- Por la cercanía del tramo de fibra al domicilio de cliente: FTTX
- Por el uso de elementos pasivos y/o activos: Redes PON.

✓ Fibra óptica (FTTx)

Que a su vez puede ser de tres tipos:

- FTTH (Fiber to the Home) fibra directa hasta el hogar.
- FTTC (Fiber to the Curb) fibra hasta la acera.
- FTTB (Fiber to the Building) fibra hasta el edificio.

Las tecnologías FTTx se basan en instalaciones de cable de fibra óptica directo hasta los hogares o edificios; utilizan fibra con DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) Algunas empresas y proveedores de servicios montan Gigabit Ethernet sobre fibra oscura arrendada.

✓ PON (Passive Optical Network)

La arquitectura PON elimina la electrónica en la planta externa. Estas redes cubren principalmente el rango de servicios entre 1,5 Mbps y 155 Mbps que otras redes de acceso no llegan a cubrir. Una Red Óptica Pasiva (PON) es una única fibra óptica bidireccional y compartida que utiliza acopladores ópticos para ramificarse formando una económica red de acceso con topología punto-multipunto hasta el usuario final.

✓ EPON (Ethernet PON)

Esta tecnología surge por la evolución de las redes LAN de Ethernet a Fast Ethernet o Gigabit Ethernet; elimina la conversión ATM/ IP en la conexión WAN/LAN; disminuye la complejidad de los equipos. EPON es más eficiente en el transporte de tráfico basado en IP. Disminuye el costo de equipos, costos operativos y simplifica la arquitectura.

3.2.3.2 Comparación entre FSO y tecnologías de acceso.

Al momento de seleccionar la tecnología se debe tomar en cuenta básicamente; Ancho de banda; Monto de inversión; y, Costos de operación.

Además, la selección de la tecnología debe estar sólidamente basada en el modelo del negocio, es decir:

- La tecnología seleccionada debe ser actual y estar disponible.
- Siempre se deben estudiar los modelos de negocio exitosos en otros países y juzgar hasta qué punto el negocio es viable.

Ninguna tecnología cumple todos los requisitos impuestos por el proveedor deservicios y el usuario final. Sin una duda, tecnologías basadas en la fibra óptica proporcionan el ancho de banda necesario. Sin embargo, la aplicación de redes de fibra en lazos locales demanda un gran tiempo de instalación y es sumamente costoso.

Acercamientos alternativos que usan la infraestructura existentes basadas en cables o las soluciones de acceso inalámbricas son menos caros y más fáciles llevar a cabo. Sin embargo; estas estrategias no proporcionan el ancho de banda para satisfacer las demandas del cliente crecientes para los servicios de velocidad superiores. En la tabla 3.3 se puede observar las ventajas y desventajas que presentan las tecnologías a base de fibra óptica y FSO.

Tabla 3.3. Comparación entre tecnologías de acceso de Banda Ancha vs FSO

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

Fuente: (Alwayn, 2004)

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.

Los sistemas 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.

CAPÍTULO 4

ESTUDIO PARA EL DISEÑO DE LA RED FSO PARA LA EMPRESA TATA CONSULTANCY SERVICES.

4.1 INTRODUCCIÓN

Para realizar el estudio del diseño de la red FSO para la empresa TCS se ha tomado en cuenta la factibilidad del lugar que en este caso está ubicado en la parte centro-norte de la ciudad de Quito. Además se ha tomado en cuenta las condiciones climáticas del sector y sobre todo el crecimiento vertical de sus edificios, ya que este sector es comercial y financiero, en donde se halla edificios gubernamentales como el edificio del Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social (IESS), los nuevos edificios que serán ocupados por la empresa T-UNO empresa adjunta a TCS la cual presta servicios tecnológicos tales como la telecomunicaciones, redes de fibra óptica, etc.

Esta empresa se ubicará a unos 100m del edificio principal de TCS y es con el cual se realizará la conexión mediante FSO.

4.2 CONSIDERACIONES PRELIMINARES

Las condiciones preliminares que se debe tener en cuenta para el diseño y despliegue de la red FSO para la empresa TCS es la valoración acerca del ambiente, como condiciones climáticas del sitio, distancia del enlace línea de vista, etc. Las condiciones climáticas que existen en el lugar de despliegue es una consideración importante para que conseguir una eficiencia máxima.

Para este caso la ciudad de Quito presenta un clima bastante irregular principalmente en las laderas del volcán Guagua Pichincha donde el frío y la neblina es un poco más espesa, el lugar donde se propone instalar el receptor de alto alcance está cerca de esta elevación geográfica que es desde la matriz principal ubicada en el Av. 10 de Agosto y Bogotá (frente al parque El Ejido), hasta el edificio de tecnología de TCS que se encuentra a unos 100m del edificio principal, por lo cual es indispensable realizar los análisis respectivos para que la red inalámbrica FSO propuesta funcione de una manera correcta.

Para la instalación de la red FSO se ha propuesto seguir los siguientes pasos:

- Estudio del lugar de instalación
- Montaje del equipo
- Instalación y configuración de la infraestructura (electricidad, cableado, etc.)
- Alineación de los sistemas
- Verificación y corrección del enlace

4.2.1 Estudio del lugar de instalación.

Analizar el lugar en donde se va realizar la instalación de la FSO es uno de los pasos más importantes, este estudio abarca la recolección de información el cual es importante antes de realizar la instalación.

Se realizará el estudio en donde se tiene una indagación para obtener respuestas a cuestionamientos importantes antes de realizar la instalación, como la línea de vista, la potencia, etc.

4.2.2 Determinación del lugar para la instalación.

Para asignar el lugar de instalación se recomienda utilizar un bosquejo del edificio, definiendo posiciones y las distancias entre ambos puntos, en puntos exactos los cuales nos servirán como puntos para medir las distancias del sitio. Una vez determinado las distancias se determinará las líneas de vista y los puntos de montajes de los equipos que para el caso específico será utilizada las tarrazas de los edificios en cuestión.

4.2.3 Determinación de la línea de vista.

La óptica en espacio libre es una tecnología que requiere de línea de vista, y para realizar este proceso es recomendable tomar fotos de la ubicación del enlace de un extremo al otro para su respectivo análisis. En estas fotografías se podrá determinar los obstáculos que se pueden presentar de un punto a otro.

De estos obstáculos algunos pueden ser despreciados ya que no tendrían alguna repercusión con la comunicación; pero si los obstáculos son considerables como edificios, montañas, etc., estos deben ser estudiados muy cuidadosamente para dar una solución correcta para una perfecta comunicación.

4.2.4 Determinación de la distancia del enlace.

La determinación de la distancia para los enlaces FSO es importante para conocer las distancias ya que el equipo es quien limita debido a sus características de fabricación. La limitación de las distancias es más aguda cuando las condiciones climáticas son adversas, en especial cuando existe neblina muy espesa. Además existe otro problema que es la potencia; hay que tener cuidado con las distancias, si estas son cortas pueden causar una saturación de la señal en el extremo del receptor quedando este sin funcionalidad; y lo contrario si las distancias son largas el enlace puede fallar debido a la disminución del margen del enlace; por lo que es recomendado por los fabricantes que las distancias estén en un rango de entre 25m a 400m eso dependiendo del fabricante.

4.2.5 Consideraciones del montaje del equipo.

Una vez seleccionado el sitio de instalación lo siguiente hacer es la instalación de los equipos los cuales las bases deben estar sujetas a plataformas sólidas y resistentes al peso de los aparatos. Para el caso de estudio los puntos escogidos son las terrazas y estas son muy rígidas para evitar cualquier fluctuación para no causar ninguna desalineación del enlace. Los fabricantes para precautelar el daño de los equipos de la corrosión, oxidación, etc., han fabricado sus piezas de metales (aluminio, acero, etc.) los cuales tiene cierta resistencia a las variantes climáticas que en la ciudad de Quito varían constantemente. Para edificaciones altas el estudio de las condiciones climáticas debe ser riguroso sobre todo por las fuertes corrientes de aire los cuales puede provocar que el edificio tenga pequeñas oscilaciones o los equipos puedan tener distintas respuestas térmicas. La dispersión del haz de luz y los mecanismos de rastreo automáticos que estos equipos proveen son usados para solucionar la desalineación de estos percances.

4.2.6 Instalación y configuración de la infraestructura.

Una vez que los aparatos usados para los enlaces FSO y posteriormente realizadas las instalaciones eléctricas apropiadas, es decir, para seguridad de los equipos que sufran algún tipo de descarga o sobre voltaje eléctrico se han realizados instalaciones especiales las cuales tienen una regulación exacta de la cantidad de voltaje y protección de UPS para cuando el nivel de energía baja o es nula. Ahora con respecto a las interfaces de red, el cableado por ejemplo es recomendable el UTP Blanco categoría 5E/CCA/Bobina con conectores RJ45, además de cable coaxial con sus respectivos conectores BNC, cable de fibra óptica con los conectores SC o ST para la fibra multimodo y monomodo respectivamente.

4.2.7 Alineación de los sistemas.

Para garantizar una correcta funcionalidad del enlace este sistema debe estar completamente alineado, este proceso puede variar de acuerdo a las características del equipo, pero generalmente se debe tener un preciso apuntamiento entre los terminales para iniciar la conexión.

Este proceso se lo puede realizar en 2 pasos:

- Es realizar una alineación aproximada, es decir, una alineación aproximada donde los equipos estén apuntados uno a otro, pero con los equipos apagados; para este tipo de alineación se lo puede realizar con el telescopio que ya viene integrado en los equipos, pero en el caso de que no esté incorporado se ubica los equipos frente a frente y se enciende los equipos.

- Para este paso es un proceso de ajuste fino, una vez que los equipos estén encendidos estos empezaran a transmitir una señal muy ligera donde un indicador con una señal de re-alimentación indicará cuando la alineación este óptima; esto se lo realizará con una lectura digital, la misma que indicará la intensidad de la señal recibida. Para esta señal se la denomina comúnmente RSSI “ReceivedSignalStrenghtIndicator”, indicador de intensidad de la señal recibida.

4.2.8 Verificación y corrección del enlace.

La verificación y la corrección del enlace es un paso importante en el final de la instalación, porque se debe asegurar la integridad del mismo. Para realizar la verificación del enlace se puede utilizar la medición del BER o mediante la transferencia de archivos.

Si es que se realiza por medio del análisis del BER este no puede ser menor a 10^{-9} ; si es por el método de transferencia de archivos no se requiere de un equipo especial como es el caso de los medidores del BER, y se lo realizará con una simple transferencia de archivos de un tamaño de 20 a 100 MB dependiendo de la velocidad del enlace; para esto se utilizará el cálculo de throughput deberá ser mayor al 80%.

Para el mantenimiento y la corrección de errores del sistema se muestra un diagrama de flujo (figura 4.1) con la finalidad de tratar de corregir el funcionamiento del sistema.

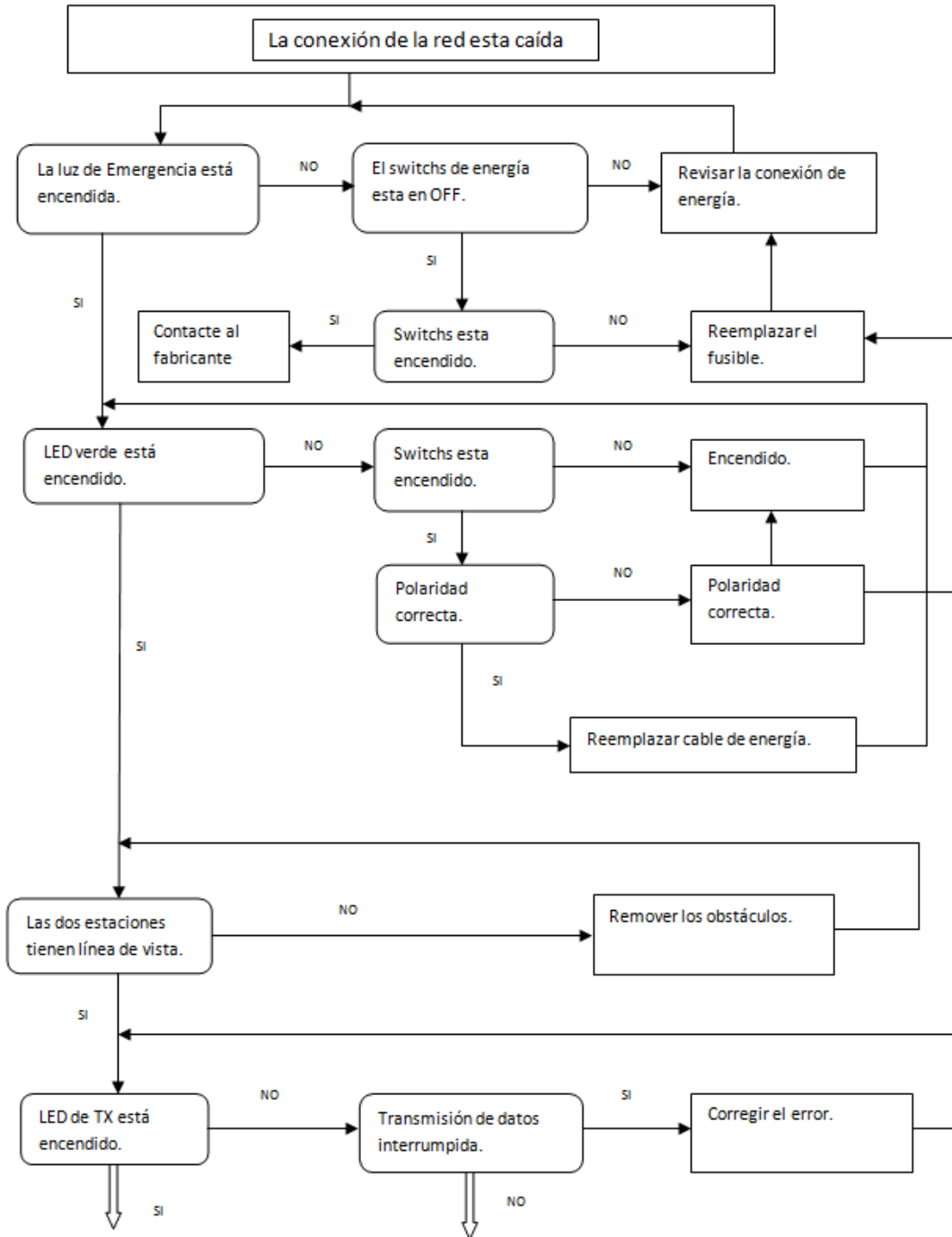


Figura 4.1. Diagrama de flujo para solucionar problemas con el Enlace

Fuente: (Mendez, 2006)

4.3 DISEÑO DE LA RED FSO

Tomando en consideración las bases anteriormente dichas, se procede a realizar el diseño de la red inalámbrica de banda ancha FSO; tomando en cuenta los requerimientos que la institución requiera así como el nivel de tráfico que necesita.

La empresa TCS viene brindando su servicios tecnológicos para el Banco de Pichincha desde el 2006 en el cual se ha implementado una red financiera de primer orden.

A lo largo de los años que TCS ha colaborado con el Banco de Pichincha se ha venido realizando nuevas renovaciones tecnológicas con respecto a la infraestructura en especial a las telecomunicaciones; ya que teniendo el banco agencias a nivel nacional e internacional estas deben ser lo más ágiles y seguras, por lo que día a día se estudia las nuevas tecnologías y las posibilidades de ser implementadas en la empresa. Una de estas es las tecnologías de banda ancha como por ejemplo la fibra óptica y las FSO.

Para determinar el sitio en donde se va a implementar los enlaces FSO, se realizó una visita al edificio de Tecnologías de TCS, con el cual se pudo determinar el lugar más apropiado por la altura y por la línea de vista con el edificio principal, además de poder realizar el cálculo exacto de la distancia que tiene los edificios desde los lugares escogidos para la instalación de los enlaces tal como lo muestra la figura 4.1.

En cada edificio se tiene redes, subredes y equipos que gestionan el funcionamiento de las mismas mediante el levantamiento realizado se pretende conocer las conexiones de los switches y la manera como se enlazan las dependencias para luego poder realizar el diseño de la red FSO.

Por lo que se tiene 3 niveles de operación de los dispositivos de conectividad los cuales se describen a continuación:

En el primer nivel se tiene los switches de Núcleo y también llamados switches de CORE los cuales están ubicados en el edificio de tecnologías de TCS, estos switches son el corazón de las conexiones del banco con la empresa las cuales son las encargadas de realizar la mayor parte de la comunicación e interconectan todas las agencias y puntos del banco.

Para este segundo nivel se tiene los switches de Distribución que son los encargados de conectar a otras dependencias del banco y de igual forma con las agencias tanto las principales como las internacionales, esta tiene una topología de Estrella extendida.

El tercer nivel son las dependencias de los switches de Distribución que para este caso son los de Acceso, en donde están los switches de Acceso que son los puntos finales de la conexión de la red los cuales se encuentran en otra dependencia que para este caso es el edificio Principal del banco donde se encuentra las oficinas de procesamiento de datos de TCS como el Área de Operaciones, Mantenimiento de Aplicaciones y el Centro de Computo, etc.

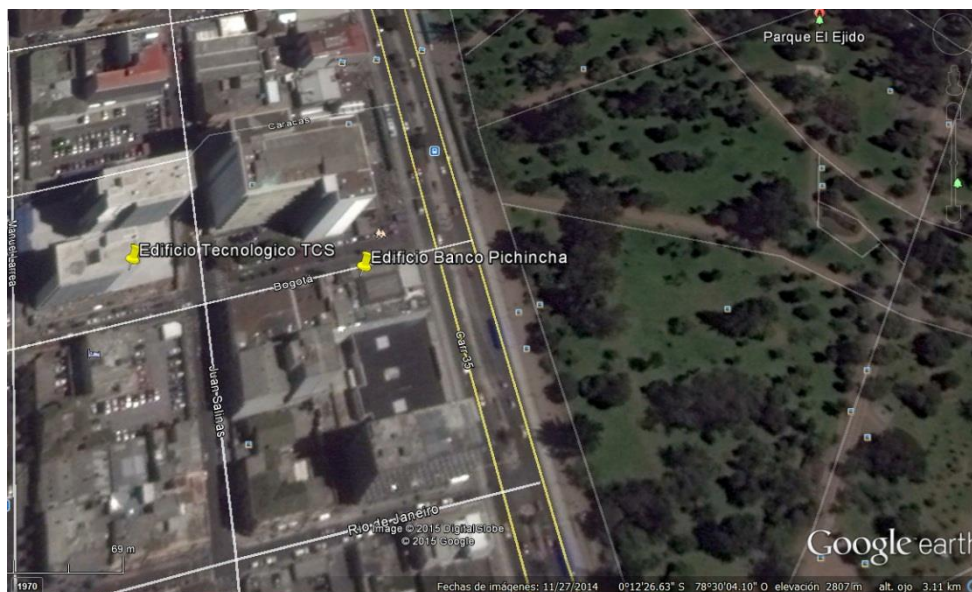


Figura 4.2. Imagen de la ubicación del Ed. Principal del Banco Pichincha y el Ed. Tecnológico de TCS sector Parque El Ejido, Quito – Ecuador

Fuente: (Google Earth, 2005)

4.3.1 Topología de la red.

En los edificios de la empresa TCS se encuentra tendido la red de Banda Ancha de Fibra Óptica las cuales enlazan con la red financiera nacional y esta a su vez esta tiene una propia la cual tiene como topología en su mayoría la topología estrella extendida, y las cuales comprenden a los departamentos pertenecientes al Área de Producción comprendida en el edificio principal y las cuales se denotan en la tabla 4.1 los cuales están especificadas las áreas de Producción.

Tabla 4.1. Tabla de las áreas de Producción y Tecnología del Banco y TCS

No.	Nombre del Área
1	Centro de Cómputo
2	Mantenimiento de Aplicaciones
3	Área de Operaciones
4	Base de Datos
5	Plataforma Centralizada
6	Plataforma Distribuida
7	Fábrica de Software
8	Procesamiento de Datos

Fuente: (TCS, 2006)

La topología estrella comprende en muchas conexiones entre pares individuales de dispositivos, permitiendo que la red interna del Banco y TCS sean ágiles y con mayor flexibilidad para el paso de la información, la cual aumenta la confiabilidad y la seguridad de la misma.

4.3.2 Jerarquía de la red.

La red del Banco y de TCS son de tipo LAN Conmutada, ya que la conmutación se la realiza mediante los switches los cuales siguen un modelo de diseño jerárquico, ya que así la red tiene una mayor oportunidad de cumplir con las necesidades de su diseño, donde se distingue los niveles de núcleo, distribución y acceso.

En la figura 4.3 se muestra una jerarquía de los switches de conmutación y la división de los niveles de núcleo, distribución y acceso de acuerdo a las características y funciones realizadas por cada uno.

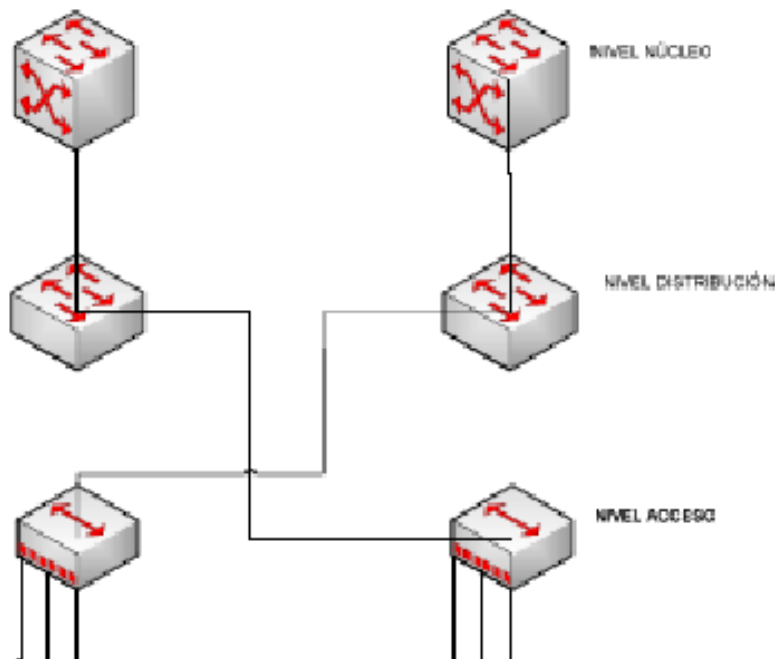


Figura 4.3. Niveles jerárquicos de los Switchs

Fuente: (TCS, 2006)

La capa del Núcleo permite el transporte óptimo entre los puntos distintos de la red, la capa de Distribución brinda la conectividad basada en las políticas de conmutación que define la empresa y la capa de Acceso proporciona acceso a la red a los usuarios.

El funcionamiento de la capa de núcleo permite la segmentación de la red de la empresa con la del banco tanto en las redes físicas y lógicas.

Los switches de la capa de Distribución son los puntos donde se concentran los switches de las capas de Acceso, las cuales se segmentan en dominios de broadcast y donde se administran las VLANS y las listas de accesos.

Para los switches de la capa de Distribución operan en la capa 2 como la capa 3 del modelo OSI, características de los dispositivos multicapas ya que al trabajar en ambas capas combinan las funciones de un router y un switch.

La capa de Acceso constituye el punto de entrada para las estaciones de trabajo y servidores de red, y para esta capa se utilizan switches o hubs.

4.3.3 Línea de vista y distancia del enlace.

Para realizar la medición del Enlace y la Línea de Vista se utilizó un sistema de posicionamiento global GPS y un telémetro para la medición y cálculo de las distancias entre ambos edificios, estos dispositivos se utilizó para tener datos más exactos entre ambos nodos de la interconexión inalámbricos ópticos.

Estas mediciones se las realizaron en ambos edificios y en los lugares específicos en donde se van a instalar los equipos.

En la figura 4.4 se muestra un ejemplo del cálculo de distancias en los enlaces inalámbricas ópticas.

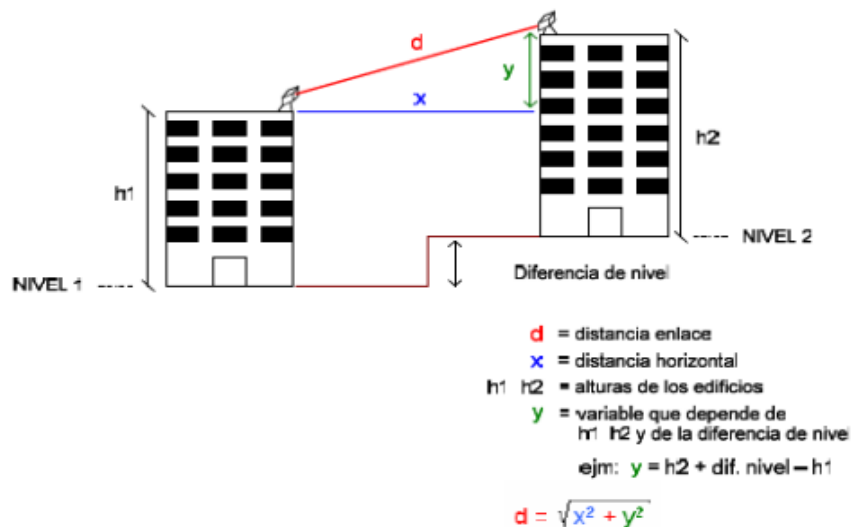


Figura 4.4. Ejemplo de Cálculo de Distancias entre los enlaces inalámbricos ópticos

Fuente: (Alwayn, 2004)

En la tabla 4.2 indican las mediciones de las alturas y las coordenadas geográficas de los edificios tanto del Banco de Pichincha y el edificio Tecnológico de TCS que son los edificios a interconectarse.

Tabla 4.4. Mediciones de la Altura y Coordenadas Geográficas de los edificios a interconectarse

Edificios	Coordenadas Geográficas	Altura
Edificio Banco Pichincha	Latitud: 0°12'32.55"S Longitud: 78°30'2.51"O	30m
Edificio Tecnológico TCS	Latitud: 0°12'30.93"S Longitud: 78°30'4.70"O	45m

Fuente: (TCS, 2006)

De igual forma se utilizó el software informático Google Earth el cual nos permite tener una múltiple visualización cartográfica del globo terrestre en base a imágenes virtuales, los cuales nos permiten tener una distancia referencial entre ambos edificios. Así mismo se utilizó un metro láser con buscador digital y sensor de inclinación y ubicación satelital con el cual se pudo confirmar los datos proporcionados por el software; la distancia medida con el metro láser es de **84,50m**. En la figura 4.5 se indica la distancia entre los edificios a conectarse.

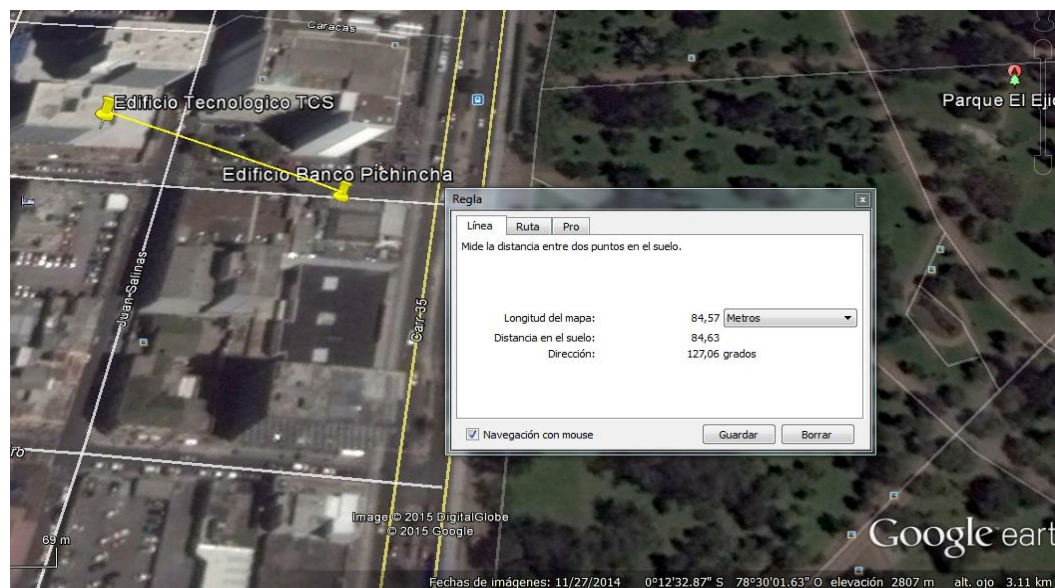


Figura 4.5. Distancia entre el Ed. Principal del Banco Pichincha y el Ed. Tecnológico de TCS

Fuente: (Google Earth, 2005)

Una vez evaluado el sector y sobre todo la ubicación de los edificios se tiene que no hay obstáculos entre ellos, es decir no existe ningún otro edificio el cual impida tener una buena Línea de Vista; por lo que no hay necesidad de realizar ajustes mayores para que la conexión sea excelente.

Tomando en consideración estos datos se realizan los cálculos correspondientes así:

$$y = h_2 + \text{diferencia nivel} - h_1 \quad (\text{ec 4.1})$$

$$y = 45 + 2 - 30$$

$$y = 17m$$

Reemplazando datos tenemos:

$$d = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (\text{ec 4.2})$$

$$d = \sqrt{84.57^2 + 17^2}$$

$$d = 373.57m$$

La distancia real del enlace que recorrerá el haz de luz óptico es 373.57m que es el equivalente a **0.37357km**; el cual se encuentra entre el rango permitido para las comunicaciones ópticas de espacio libre (FSO) que actualmente se halla hasta los 10km, el cual no tiene serias complicaciones en lo que respecta a las distancias.

4.3.4 Potencia de emisión de la señal y sensibilidad del receptor.

Con respecto a la potencia de señal del emisor y a la sensibilidad del receptor, estos son proporcionados por el fabricante del FSO en sus especificaciones técnicas, para los enlaces inalámbricos ópticos entre los edificios, se analizan para su instalación los equipos CanoBeam DT-120 y 1250-M SONABeam cuya potencia de emisión y la sensibilidad son similares:

$$P_e = 140mW$$

$$S_r = -33dBm$$

Estos equipos tienen características multihaz, lo que permite disminuir considerablemente efectos como la dispersión atmosférica, en este caso los modelos antes mencionados utilizan 3 haces; la potencia calculada sería la siguiente:

$$P_e = 3 * 140mW = 420mW$$

$$P_e = 26,23\text{dBm}$$

4.3.5 Atenuación geométrica.

El valor de la divergencia del haz para equipos de tecnología FSO de acuerdo a las características técnicas de los distintos fabricantes tienen un valor de 3mrad; el área de captura tiene un valor de 0.025m^2

Para este enlace entre los edificios de TCS Tecnología y el edificio principal la distancia que tiene que recorrer el haz es de 373.57m, por lo que el cálculo de atenuación geométrica será:

$$A_{geo} = \frac{\pi(d.\theta)^2}{4.S\text{ captura}} \text{ (ec 4.3)}$$

$$A_{geo} = \frac{\pi.(373,57\text{m} * 0,003\text{rad})^2}{4 * 0,025\text{m}^2} = 39,458 = 15,9614 \text{ dB}$$

Una vez realizado los cálculos se observa que la atenuación para el enlace es de 15,96dB haciendo que este valor no sea tan elevado para el enlace.

4.3.6 Atenuación atmosférica.

Para el cálculo de la atenuación atmosférica se tiene que considerar la distancia entre ambos edificios, la dispersión que experimenta la partícula al recorrer la distancia entre el transmisor y el receptor.

Para este en el enlace la distancia a recorrer es de 373,57m y basados en los valores de dispersión de la partícula de acuerdo a la Dispersión de Mie (Capítulo 2) la ecuación es:

$$q = V - 0,5$$

$$q = 0,37357 - 0,5$$

$$q = -0,12643$$

Con el dato de la dispersión de la partícula se procede a realizar el cálculo del coeficiente de atenuación.

$$\sigma = B_a = \frac{3,91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q} \quad (\text{ec 4.4})$$

$$\sigma = B_a = \frac{3,91}{0,37357} \left(\frac{1550}{550} \right)^{0,126}$$

$$\sigma = B_a = 11,9261$$

Sustituyendo el valor en la ecuación de transmitancia óptica se tiene:

$$\tau(d) = e^{-\sigma \cdot d} \quad (\text{ec 4.5})$$

$$\tau(d) = e^{-11,92 \cdot 0,373}$$

$$\tau(d) = 2,718$$

Por lo tanto:

$$A_{Atm}(dB) = 10 * \log_{10} \left(\frac{1}{\tau(d)} \right) \quad (\text{ec 4.6})$$

$$A_{Atm}(dB) = 10 * \log_{10} (0,367)$$

$$A_{Atm}(dB) = -4,353 \text{ dB}$$

4.3.7 Análisis de la tasa de transmisión de la red actual.

Para dimensionar el canal de comunicaciones, como primer parámetro referencial es determinar el valor de la velocidad de transmisión utilizada por las aplicaciones de la empresa con la actual red y su proyección con la implementación de la red FSO. Por lo que esta red constituirá una red de respaldo o redundancia para el enlace cableado actual del edificio principal y el edificio tecnológico de TCS.

De acuerdo al análisis que se realizó por áreas y sobre todo a las agencias a nivel nacional que tiene el banco se pudo tener una velocidad aproximada por departamento de TCS es de 5851 Mbps, y por agencia se midió que en las horas pico para las transacciones en línea la velocidad es de 2940 Kbps.

En la tabla 4.5 se encuentra resumido las velocidades en las horas pico por agencias de la ciudad de Quito y por las áreas de TCS.

Cabe resaltar que no está considerado el tráfico de voz y video ya que para este servicio la empresa cuenta con una red específica para ello por lo que no se ve afectado en las transacciones bancarias.

Tabla 4.5. Tasa de transmisión por áreas y en horas pico

Área	Hora Pico	Aplicaciones	Velocidad Transmisión (Mbps)
Centro de Cómputo	14:00 - 15:00	Software de Monitoreo de Transacciones	3950
Mantenimiento de Aplicaciones	11:00 – 13:00	Aplicaciones de mantenimiento de software	5060
Área de Operaciones	14:00 – 15:00	Plataforma de Monitoreo y prevención de fraudes	4912
Base de Datos	09:00 – 12:00	Software de Monitoreo de flujo de transacciones de la Base de Datos	2090
Plataforma Centralizada	16:00 – 18:00	Software de Monitoreo de la plataforma del banco	1720
Plataforma Distribuida	16:00 – 18:00	Software de Monitoreo de ATM, Internexo y Banca Virtual	1730
Fábrica de Software	10:00 – 12:00	Plataformas para el desarrollo de nuevas tecnologías	1650
Procesamiento de Datos	18:00 – 20:00	Software para procesamiento de datos que provienen de agencias de otras provincias	4210

Fuente: (TCS, 2006)

4.3.8 Diseño para el enlace inalámbrico óptico.

Para realizar el diseño del Enlace Inalámbrico Óptico se utilizará la ecuación del margen del enlace dado por la ecuación 4.1

$$M_{link} = P_e + |S_r| - A_{f_{Geo}} - A_{f_{Atm}} - P_{Sist} \text{ (ec 4.7)}$$

Donde:

M_{Link} : Margén de enlace o link margin

P_e : Potencia de emisión de la señal (dBm)

S_r : Sencibilidad del receptor (dBm)

Aff_{Geo} : Atenuación geométrica del enlace (dB)

Aff_{Atm} : Atenuación atmosférica del enlace afectada por la niebla (dB)

P_{Sist} : Pérdidas del equipo, conectores de fibra óptica y desalinamiento (dB)

Para garantizar el perfecto funcionamiento del sistema, el valor del Margen de Enlace M_{Link} no debe de ser negativo.

Tabla 4.6. Parámetros importantes en el enlace propuesto

Enlace	Distancia (m)	Potencia de emisión (dB)	Sensibilidad (dBm)	Atenuación geométrica (dB)	Atenuación molecular (dB)	Pérdidas del sistema (dB)	Margen del enlace (dB)
Edificio central – Edificio tecnológico TCS	373,57	26,23	-33	15,96	-4,35	3	44,62

Fuente: Autor

4.3.9 Análisis del Clima del Sector en donde se ubican los edificios a ser Interconectados con la FSO.

Sabiendo que la ciudad de Quito se encuentra en la línea Equinoccial o Ecuatorial esto hace que tenga una fuerte incidencia del Sol, y esto hace que las variaciones térmicas sean pequeñas, especialmente en estaciones de invierno que es donde se nota más la incidencia de la neblina que la luz solar.

“Estando en medio de la línea Equinoccial hace que las temperaturas permanezcan constantes de forma anual, este valor por lo general suele estar entre un promedio de 15,8° C; teniendo un valor mínimo promedio de 15,1° C y un máximo promedio 16,7° C”.

Los valores máximos de temperaturas suelen presentarse en las temporadas secas del año (verano) y en casos muy aislados suelen aparecer en los meses de enero y febrero situación atribuida a que en estos meses el Ecuador térmico coinciden con el Ecuador geográfico. (De la Torre, 2002)

En la figura 4.6 se muestra unas imágenes de la azotea del edificio principal con diferentes estados climáticos.

Para las precipitaciones anuales en Quito medias son de 103mm tal como lo indica la tabla 4.7.



Figura 4.6. Fotografía de la azotea del edificio principal TCS el cual se observa con clima despejado y con neblina

Fuente: (TCS, 2006)

Tabla 4.7. Valores de las Precipitaciones anuales de la ciudad de Quito

Meses	Precipitación Total Media (mm)	Número días de Precipitación
Enero	73,6	10
Febrero	114,1	11
Marzo	126,9	15
Abril	149,3	15
Mayo	98,2	13
Junio	37,1	7
Julio	26,2	5
Agosto	32,0	5
Septiembre	79,3	11
Octubre	115,3	14
Noviembre	78,9	11
Diciembre	82,9	11

Fuente: (INAMHI)

4.3.10 Determinación de los equipos.

Para la determinación de los equipos se ha tomado en cuenta dos marcas, las cuales son las más reconocidas en el mercado tanto local como internacional; la primera es la empresa Canon y el equipo de preferencia es DT-120, la segunda es la marca FSONA cuyo modelo de preferencia es el SONABEAM 1250-M; estos equipos están ofertados por la empresa ecuatoriana Dynacom, los cuales son los distribuidores mayoristas y autorizados para la venta de estos equipos.

Debido a que las características son similares se ha tomado la decisión de utilizar el equipo de marca Canon, el modelo DT-120; principalmente por su detector de sensibilidad que es de tipo APD (avalancha) por tener mayor sensibilidad a largas distancias, y sobre todo por su mayor influencia en el ancho de banda que para este caso es importante.

Las características de estos dos equipos son similares y esto nos proporciona una buena referencia de los mismos; y para determinar el modelo de los equipos se tomó en cuenta que solo se realizará un enlace óptico dentro de la empresa; de acuerdo al diseño presentado en capítulos anteriores.

En la tabla 4.8 se presente las características principales de ambos modelos y en los cuales se refleja las especificaciones técnicas del modelo CanoBeam DT-120 de Canon y SONABEAM 1250-M de FSONA.

Tabla 4.8. Características de los equipos CanoBeam DT-120 y SONABeam 1250-M

Características	DT-120	1250-M
Fuente de luz	Láser	Láser
Potencia de emisión	4 x 140 mW	2 x 160 mW
Detector	APD	PIN
Sensibilidad	-50 dBm	-41 dBm
Velocidad de Tx.	1448 Mbps	1500 Mbps
BER	10^{-9}	10^{-9}
Fuente de Poder	± 12 V	±12 V
Ventana (Longitud de láser)	1550nm	1550nm
Apertura del Receptor	0,025m ²	0,025m ²
Divergencia	3mrad	3mrad
Distancia de Tx. (m)	100 - 2000	100 - 1700
Potencia salida láser	±11mW	640mW (4 transmisores de 160mW)

Fuente: (FSO, 2008)

En la figura 4.6 y 4.7 se indican los modelos de los equipos seleccionados con los cuales se pretende realizar la conexión inalámbrica óptica.

DT-120 Type SFP
DATA



Figura 4.6. Modelo del Equipo DT-120 de Canon CanoBeam

Fuente: (CanoBeam, 2012)

SONAbeam™ 1250-M



Figura 4.7. Modelo de equipo SONAbeam DT-120

Fuente: (SONAbeam, 2012)

4.3.11 Análisis de Costo.

Aquí se realizará un análisis de los costos que se estimará para la implementación de la red FSO en la Empresa TCS, el cual se realizará entre el edificio Principal del Banco del Pichincha y el edificio Tecnológico de TCS el cual están separados en 84,50m en la misma calle.

Esto hace que sea fácil la implementación del Enlace Inalámbrico Óptico en el Espacio Libre ya que no se utilizará implementos costosos, y esto mejorará las actuales características de la conexión actual. Se mencionarán los equipos, implementos y demás requerimientos necesarios para realizar la instalación del diseño del enlace.

La información presentada es obtenida de información de las páginas web oficiales de los proveedores, principalmente de la empresa que TCS tiene relaciones comerciales y los cuales pueden ayudar con la importación, la implementación, el mantenimiento de los equipos los cuales es una gran ventaja ya que en el mercado nacional no hay muchas empresas que ofrezcan este tipo de equipos y sobre todo a un precio razonable y garantizado.

Tabla 4.9. Valores Unitarios y Totales de los equipos FSO

Equipos/Características	Cantidad	Valor Unitario	Total
Cabecera FSO Marca: FSONA Modelo: SONABeam 1250-M Longitud de Onda de Espacio Libre: 1550nm Velocidad Tx Max: 1500Mbps Alcance: 1700m Núcleo Haces: 4	2	\$5420,30	\$10840,60
Equipos/Características	Cantidad	Valor Unitario	Total
Cabecera FSO Marca: CanoBeam Modelo: DT-120 Longitud de Onda de Espacio Libre: 1550nm Velocidad Tx Max: 1448Mbps Alcance: 2000m Núcleo Haces: 4	2	\$4750,68	\$9501,36

Fuente: (Dynacom, 2015)

Teniendo en cuenta que la tecnología FSO trabaja en una banda no licenciada, no requiere de pago de concesión o de licencia para el uso del espectro; teniendo una ventaja que el sistema operará libremente con respecto a otras tecnologías inalámbricas.

Para la adquisición de los implementos necesarios para la red como los conectores, cables y demás implementos necesarios estos serán proporcionados por la empresa cuyos valores se detallan en la tabla 4.10 en el cual está ya incluido la mano de obra para la instalación de los equipos.

Tabla 4.10. Valores de los implementos y mano de obra para la instalación de la red FSO

Implementos	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Conectores ST Plástico (Transmisión y Recepción)	4	\$2,08	\$8,32
Fibra Óptica Multimodo 6 Hilos MM	100 m	\$4,50	\$450
Uniones Adaptadores para fibra óptica	8	\$5	\$40
Instalaciones y mano de obra por punto	2	\$350	\$700
	TOTAL	\$361,58	\$1198,32

Fuente: (DIM, 2015)

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 CONCLUSIONES

- Las altas velocidades de transmisión de un sistema de red FSO en la actualidad son mayores a 2.5Gbps, hacen de esta, una red inalámbrica de alta velocidad, por lo que puede ser tomado en cuenta como un soporte secundario de red, o incluso como la conexión principal de la red (backbone).
- Para este caso de estudio la red FSO fue diseñado para desempeñarse como soporte de una red secundaria, para la interconexión entre dos puntos, debido a que se necesita de una gran velocidad, y sobre todo, este sistema opera en un intervalo entre los 700nm y 1550nm de longitud de onda, lo que permite obtener un gran ancho de banda.
- Debido a que las redes FSO trabajan en capa física, esto permite tener independencia del protocolo para el uso de capas superiores; haciendo fácil el acoplamiento de la red y equipos que actualmente utiliza la empresa.

- Por el lugar geográfico donde se realizó el estudio, se verifica que estos cumplen con los estándares para poder implementar la red FSO, ya que las disponibilidades climáticas son las más eficientes.
- Estos sistemas no requieren el pago para el uso de licencia del espectro electromagnético, a entidades de control como la SUPERTEL; haciéndolo un sistema económico y muy útil; cabe resaltar que para ocupar tecnologías ópticas se requiere obtener un permiso especial de la ARCOTEL para el funcionamiento como una red privada.
- Debido a que la ciudad de Quito suele tener lluvias muy densas y en casos muy remotos suele haber granizada para mantener la disponibilidad se realizara un enlace secundario por medio de fibra pero esta será compartida de la fibra óptica del banco.
- Las tecnologías de enlace ópticas son poco utilizadas, y la principal razón es que no existe personas ni empresas que tengan una capacitación en la implementación de esta tecnología, además otra razón y quizá la más importantes es el clima cambiante de la ciudad de Quito, especialmente en lo que respecta a las lluvias y densas neblinas.
- Por políticas propias de la empresa, una de las limitaciones que se tiene es que no permitieron un estudio más profundo en referencia a la implementación de esta red, ya que es una empresa dedicada al mercado financiero y por políticas de seguridad solo permitió utilizar su nombre, alguna información sobre las áreas y sus funciones, el espacio físico y algunas conexiones y redes.

5.2 RECOMENDACIONES

- Considerando que en los últimos años las redes inalámbricas han evolucionado, y sobre todo las ventajas que ofrece las redes FSO en el ámbito local, se debería profundizar el estudio de las tecnologías ópticas inalámbricas; de manera especial en las universidades donde se ofrecen carreras en telecomunicaciones.
- Emplear la tecnología FSO en lugares donde exista saturación de cables eléctricos o de telecomunicaciones; ya que por utilizar haz de luz no afecta al ornamento de la ciudad.
- Realizar un estudio para analizar la posibilidad de interconectar varios edificios a una sola red inalámbrica; suprimiendo pesados cables en los postes y sobre todo empleando tecnología de última generación.
- La capacitación de personal para la implementación de redes FSO e inalámbricas, ya que en la actualidad en país no cuenta con institutos o empresas que ofrezcan este servicio profesional.

REFERENCIAS

- ✓ Alwayn, V. (2004). *Fiber-Optic Technologies*. Cisco Press.
- ✓ Bartell, M. y. (2003). *BGP Desing and Implementation*. Indiana: Cisco Press.
- ✓ Belove, C. (1988). *Enciclopedia de La Electronica Ingenieria Y Tecnica*. Grupo Oceano.
- ✓ Black, U. (2000). *IP Routing Protocols: RIP, OSPF, BGP, PNNI, and Cisco Routing Protocols*. Prentice Hall.
- ✓ Cambron, P. (04 de Diciembre de 2003). *Sistemas de comunicación óptica*. Recuperado el 10 de Mayo de 2015, de <https://prezi.com/1vtqhrqni-6s/comunicaciones-opticas/>
- ✓ CanoBeam, D.-1. (01 de Enero de 2012). *Support & Drivers DT-120*. Recuperado el 15 de Agosoto de 2015, de http://www.usa.canon.com/cusa/support/professional/dt_120_type_sfp#Specifications
- ✓ De la Torre, F. (2002). *Estudio de Impacto Ambiental del nuevo Aeropuerto de Quito*. Quito.
- ✓ DIM, A. (2015). *Presupuesto de equipose instalacion*. Quito.
- ✓ Dynacom. (2015). *Presupuesto equipos FSO*. Quito.
- ✓ Engst, A. y. (2005). *Introducción a las redes inalámbricas*. Anaya-Multimedia.
- ✓ Fopwles, G. (2011). *Introduction to Modern Optics*. New York: Dover publications, Inc.
- ✓ FSO, A. (01 de Enero de 2008). *CanoBeam*. Recuperado el 15 de Agosto de 2015, de FSOBeam: http://www.usa.canon.com/cusa/support/professional/dt_120_type_sfp#Specifications, <http://www.fsona.com/company.php>

- ✓ GBM. (1995). *Conceptos de transmisión por fibra Optica*. Guatemala: GBM Educativa.
- ✓ Google Earth, A. (01 de Enero de 2005). *Google Earth*. Recuperado el 15 de Agosto de 2015, de www.googleearth.com
- ✓ Gralla, P. (2007). *How the Internet Works*. Eighth Edition.
- ✓ Harvard Broadband Communications Laboratory. (19 de Abril de 2009). *Free-Space Optical Communications*. Recuperado el 10 de Mayo de 2015, de <http://web.archive.org/web/http://www.seas.harvard.edu/hbbcl/fsoc.html>
- ✓ Hill, S. y. (1997). *The essence of optoelectronics Salford University*. Liverpool: Prentice Hall.
- ✓ INAMHI. (s.f.). *Información del clima para Quito*. Recuperado el 15 de Agosto de 2015, de <http://wwsi.inm.es/137/c00291.html>
- ✓ ITU, U. I. (01 de Enero de 2010). *Datos de propagación necesarios para el diseño de enlaces ópticos*. Recuperado el 15 de Agosto de 2015, de <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1817/es>
- ✓ Mendez, F. (2006). *ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ENLACE ÓPTICO INALÁMBRICO PUNTO A PUNTO FSO*. Guatemala: Universidad San Carlos.
- ✓ Ramasamy, K. (2007). *Network routing: algorithms, protocols, and architectures*. Morgan Kaufmann.
- ✓ SONABeam. (01 de Enero de 2012). *Support & Drivers SONABeam*. Recuperado el 20 de Julio de 2015, de <http://www.fsona.com/product.php?sec=1250m>
- ✓ Stallings, W. (2000). *Comunicaciones y Redes de Computadores*. Granada: Prentice Hall.
- ✓ TCS, A. (2006). *Informe de áreas de producción de TCS*. Quito.

- ✓ Van Beijnum, I. (2002). *BGP*. California: O'Reilly & Associates, Inc.
- ✓ Weichel, H. (1990). *Laser Beam Propagation in the Atmosphere*. Washington: SPIE, The International Society for Optical Engineering.
- ✓ Willebrand, H. y. (2002). *Free space optics : enabling optical connectivity in today's networks*. Indianapolis: SAMS.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ADSL:Asymmetric Digital Subscriber Line, línea de abonado digital asimétrica

Appletalk: conjunto de protocolos creados por la empresa Apple Inc.

ARCOTEL: Agencia de regulación y control de las Telecomunicaciones, organismo gubernamental que regula las telecomunicaciones en el país.

ATM:Asynchronous Transfer Mode, modo de transferencia asíncrona

Backbone: Refiere a las principales conexiones troncales de Internet

BER: Bit Error Rate, tasa de error de bit

BGP:Border Gateway Protocol, protocolo de puerta de enlace de frontera

CDDI:CopperDistributed Data Interface, interfaz de distribución de datos por cobre.

CIDR:Classless Inter-DomainRouting, enrutamiento entre dominios sin clases

CTS: Clear toSend, listo para enviar

dB: Decibelio, unidad relativa empleada en acústica, electricidad y telecomunicaciones para medir la intensidad del sonido y otras magnitudes

DECnet: Grupo de productos para las comunicaciones

DFS:Distributed File System, sistema de archivos distribuidos

Ethernet: Estándar de redes LAN

FDDI:FiberDistributed Data Interface, interfaz de datos distribuidos por fibra

FrameRelay:Frame-ModeBearerService, transmisión de datos en ráfagas

Fresnel: Volumen de espacio entre el emisor de onda electromagnética

FSO: Free-SpacesOptics, óptica de espacio libre

GB:GigaBytes, equivalente a 10⁹ bytes

GPS: Global Positioning System, sistema de posicionamiento global

HDLC: High-Level Data Link Control, control de enlace de datos de alto nivel

HFC: Hybrid Fibre Coaxial, Híbrido de Fibra coaxial, define una red de fibra óptica que incorpora tanto fibra óptica como cable coaxial para crear una red de banda ancha

IETF: Internet Engineering Task Force, Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet

IGP: Internal Gateway Protocol, protocolo de puerta de enlace interno

IPX/SPX: Internetwork Packet Exchange/Sequenced Packet Exchange, intercambio de paquetes interred/intercambio de paquetes en secuencia

IrDA: Infrared Data Association, Asociación de Datos Infrarrojos

ITU: International Telecommunication Union, Unión Internacional de Telecomunicaciones

LAN: Local Area Network, red de área local

LED: Light Emitting Diode, diodo emisor de luz

LTE: Long Term Evolution, evolución a largo plazo

MAN: Metropolitan Area Network, red de área metropolitana

MB: MegaBytes, equivalente a 10⁶ bits

NetBEUI: NetBIOS Extended User Interface, interfaz extendida de usuario de NetBIOS

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing, multiplexación por división de frecuencias ortogonales

OSPF: Open Short Path First, camino más corto primero

RF: Radio Frequency, radio frecuencia

RIP: Routing Information Protocol, protocolo de información de enrutamiento

RTS: Request to Send, solicitud de envío

SPLITTER: Repetidor, dispositivo electrónico de interconexión

SUPERTEL: Superintendencia de Telecomunicaciones del Ecuador, organismo gubernamental encargado del monitoreo, control de los servicios de telecomunicaciones y el espectro de radio frecuencias del país

TCP/IP: Transmission Control Protocol/Internet Protocol, protocolo de control de transmisión/protocolo de internet

TCS: TATA Consultancy Services empresa de la India la cual se dedica a prestar servicios tecnológicos a empresas financieras

Token Bus: Redes implementadas en topología bus

Token Ring: Redes implementadas en topología anillo

UDP: User Datagram Protocol, protocolo de datagrama de usuario

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System, Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles

VLAN: Virtual LAN, red de área local virtual

WAN: Wide Area Network, red de área amplia

WiMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access, interoperabilidad mundial para acceso por microondas

WLAN: Wireless Local Network, red inalámbrica de área local

X.25: Estándar ITU-T para redes de amplia conmutación de paquetes