



## CAPÍTULO II

### MARCO TEORICO

#### 2.1 Naturaleza de la luz

La naturaleza de la luz ha sido estudiada desde hace muchos años por varios científicos y ha sido interpretada de diversas maneras:

##### 2.1.1 Teoría Corpuscular

Comienza aproximadamente en la mitad del siglo XVII, se crea una teoría acerca del inicio de la luz, la cual consistía en una corriente de corpúsculos, estos corpúsculos eran emitidos por focos luminosos, tales como el Sol o la llama de una bujía, y se alejaban del foco en línea recta, podían penetrar las sustancias transparentes y se reflejaban en la superficie de los cuerpos opacos.

##### 2.1.2 Teoría Ondulatoria

A mediados del siglo XVII, aunque la mayoría de los investigadores en el campo de la óptica aceptaban la teoría corpuscular, había comenzado a progresar la idea de que la luz era un movimiento ondulatorio de cierta naturaleza.

Christian Huygens demostró en 1678, que las leyes de la reflexión y de la refracción podían explicarse basándose en la teoría ondulatoria, y que esta proporcionaba una interpretación sencilla del fenómeno de la doble refracción, recientemente descubierto.

En 1827 mediante los experimentos Thomas Young y Agustín Fresnel sobre interferencias, y las medidas de la velocidad de la luz en los líquidos realizados por León Foucault explicaba la existencia de fenómenos ópticos para cuya explicación resultaba inadecuada una teoría corpuscular.



Los experimentos de Young le permitieron medir la longitud de onda de las ondas, y Fresnel demostró que la propagación rectilínea de la luz, al igual que los efectos de difracción observados por Grimaldi y otros, podían explicarse por el comportamiento de las ondas de longitud muy corta.

### 2.1.3 Teoría Electromagnética

El gran avance siguiente de la teoría de la luz fue el trabajo del físico escocés, James Clerk Maxwell que en 1873 demostró que un circuito eléctrico oscilante debía radiar ondas electromagnéticas.

La velocidad de propagación de las ondas pudo calcularse a partir de las medidas exclusivamente eléctricas y magnéticas y resultó ser de unos  $3 \times 10^8$  m/seg.

Dentro de los límites de los errores experimentales, este valor coincidía con el de la velocidad de propagación de la luz determinada experimentalmente. Resultaba evidentemente que la luz consistía en ondas electromagnéticas de longitud de onda extremadamente corta.

Heinrich Hertz, utilizando un circuito oscilante de pequeñas dimensiones, logró producir ondas de corta longitud de onda (que hoy se denominan ultracortas) de indudable origen electromagnético, y demostró que poseían todas las propiedades de las ondas luminosas. Podían ser reflejadas, refractadas, concentradas por un lente, polarizadas, etc., lo mismo que las ondas luminosas.

La teoría electromagnética de la luz de Maxwell, y su comprobación experimental por Hertz, constituyen uno de los triunfos de la física.



### 2.1.4 Teoría Cuántica

A finales del siglo XIX era creencia general que en el futuro muy poco, o nada, cabría añadir a nuestro conocimiento acerca de la naturaleza de la luz; pero no sucedió así.

La teoría electromagnética clásica no podía explicar el fenómeno de la emisión fotoeléctrica, esto es, la expulsión de electrones de un conductor por la luz que incide sobre su superficie.

En 1905 Einstein amplió una idea propuesta cinco años antes por Planck y postuló que la energía de un haz luminoso, en lugar de estar distribuida por el espacio en los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética, se hallaba concentrada en pequeños paquetes o fotones.

Se conservaba todavía un vestigio de la descripción ondulatoria al considerar que el fotón tenía una frecuencia, y que su energía era proporcional a ella.

El mecanismo del efecto fotoeléctrico consistiría en la transmisión de energía de un fotón a un electrón.

Los experimentos de Milikan demostraron que la energía cinética de los fotoelectrones coincidía exactamente con la dada con la fórmula de Einstein.

Otra confirmación sorprendente de que la luz está formada por fotones es el efecto de Compton. A. H. Compton, en 1921, logró determinar el movimiento de un fotón y un solo electrón, antes y después de un choque entre ellos, y encontró que se comportaban como cuerpos, materias con energía cinética y cantidad de movimiento, conservándose ambas magnitudes después del choque.

Tanto el efecto fotoeléctrico como el efecto Compton parecen, pues, exigir una vuelta a la teoría corpuscular de la luz.



### 2.1.5 La doble naturaleza de la luz

El punto de vista actual de los físicos, enfrentados con experimentos aparentemente contradictorios, es aceptar el hecho de que la luz parece tener una doble naturaleza.

Los fenómenos de propagación de la luz encuentran su mejor explicación dentro de la teoría ondulatoria electromagnética, mientras que la acción mutua entre luz y materia, en los procesos de absorción y emisión, es un fenómeno corpuscular.<sup>1</sup>

#### En resumen tenemos:

Teoría Corpuscular: (Newton - 1670) compuesta por corpúsculos que viajaban por el espacio en línea recta.

Teoría Ondulatoria: (Huygens -1678, Young, Fresnel) como ondas similares a las del sonido que requerían un medio para transportarse (el Éter).

Teoría Electromagnética: (Maxwell - 1860) Como ondas electromagnéticas al encontrar sus características similares a las ondas de radio.

Teoría Cuántica: (Plank) como paquetes de energía llamados cuantos.

Doble naturaleza de la luz: Broglie en 1924 unifica la teoría electromagnética y la de los cuantos (que provienen de la ondulatoria y corpuscular) demostrando la doble naturaleza de la luz.

## 2.2 Definiciones Preliminares

### 2.2.1 Frecuencia

La frecuencia es el número de vibraciones completas que efectúa cualquier partícula en un segundo, dentro de un medio determinado.

---

<sup>1</sup> Física General Francis Zears Frank Semaski página 747



### 2.2.2 Longitud de onda

Es la separación espacial existente entre dos puntos cuyo estado de movimiento es idéntico. Lo más sencillo para medirla es fijarse en la distancia existente dos valles de una onda. Se suele representar con la letra griega  $\lambda$ . (Lambda).

La longitud de onda es igual a la velocidad de la onda dividida por su frecuencia.

$$\lambda = v/f$$

Ecuación 2.1 Longitud de Onda

La unidad de medida de la longitud de onda de la luz es el ángstrom.

$$1 \text{ A} = 10^{-10} \text{ m}$$

### 2.2.3 Unidades de medida

Por lo general las fibras tienen un diámetro de 62.5  $\mu\text{m}$  en fibras multimodo y 9.5  $\mu\text{m}$  en monomodo.

Para mejor comprensión del tamaño de una fibra el micrómetro ( $\mu\text{m}$ ), es la millonésima parte del metro.

En lo que se refiere a la longitud de onda se mide en nanómetro (nm) que es la diezmillonésima parte del metro entonces tenemos:

$$1 \mu\text{m} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$1 \text{ nm} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

Comparando el tamaño de la fibra con el del cabello humano nos podemos dar cuenta de la dimensión de la fibra esto se muestra en la Figura 2.1.

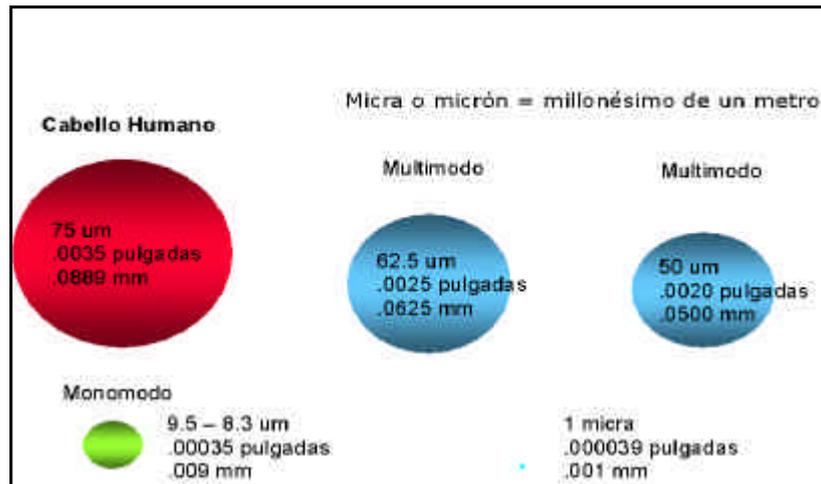


Figura 2.1 Micrón

### 2.2.3.1 El Decibel

Es la medida por la cual nos indica que hubo pérdida o ganancia al final de la emisión de una señal, es una medida adimensional y relativa.

Se calcula mediante la fórmula

$$N = 10 * \text{Log} (PS / PE)$$

Ecuación 2.2 Formula de pérdida de potencia

Donde:

PS = Potencia de salida

PE = Potencia de entrada

Se utiliza para medir la ganancia de la señal o la atenuación; decimos que existe atenuación cuando tenemos un valor negativo.

### 2.2.3.2 El dBm (decibel miliwat)

Cuando necesitamos saber un valor absoluto como la potencia que emite un láser se utiliza el dBm tomando como referencia 0 dBm a 1 mW utilizando la siguiente fórmula:

$$P[\text{dBm.}] = 10 \log P(\text{mW})/1(\text{mW})$$

Ecuación 2.3 Decibel miliwat



### 2.2.3.3 Velocidad de la luz

Es una constante fundamental de la naturaleza, se le destina un símbolo especial **c**; su valor es  $299792458 \text{ m/s} = 300.000 \text{ Km. /s}$

### 2.2.3.4 Índice de Refracción

La velocidad de la luz en un medio cualquiera no es constante y depende del material en que se propaga la luz. El índice de refracción esta dado por:

$$n = c/v$$

Ecuación 2.4 Índice de refracción

Donde:

$n$  = Índice de Refracción

$c$  = Velocidad de la luz en el vacío

$v$  = Velocidad de la luz en el medio

En la tabla 2.1 se visualizará el índice de refracción de algunas sustancias.

Medio	Índice de Refracción $n$
Aire	1.0003
Agua	1.33
Acetona	1.36
Cuarzo fundido	1.46
Benceno	1.50
Vidrio croan	1.52
Polietileno	1.59
Bisulfuro de carbono	1.63
Vidrio flint	1.66
Yoduro de metileno	1.74
Diamante	2.42

Tabla 2.1 Índices de Refracción<sup>2</sup>

### 2.2.4 Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético se refiere a un "mapa" de los diferentes tipos de energía de radiación y sus correspondientes longitudes de onda, este mapa lo podemos observar en la Figura 2.2.

<sup>2</sup> Física General de Blad página 647

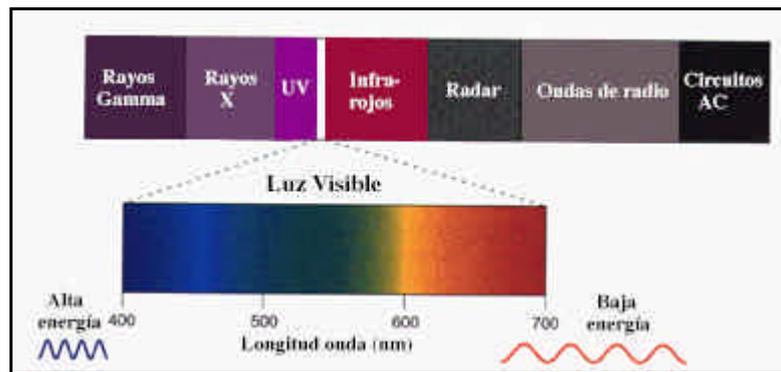


Figura 2.2 Espectro electromagnético

La parte visible del espectro es realmente muy pequeña en relación con los otros tipos de energía.

En un extremo del espectro se ubican las ondas de radio con longitudes de onda más largas que aquellos de la luz visible, en el otro extremo del espectro están los rayos gamma que tienen longitud de onda más pequeña que aquellos de la luz visible.

El espectro muestra un incremento de energía el cual es directamente proporcional a la frecuencia e inversamente proporcional a la longitud de onda es decir a mayor frecuencia menor longitud de onda.

La fibra óptica utiliza longitudes de onda entre 800 y 1600 nm que se ubican en la subdivisión del infrarrojo próximo a lo visible del espectro electromagnético como se puede observar en la Figura 2.3.

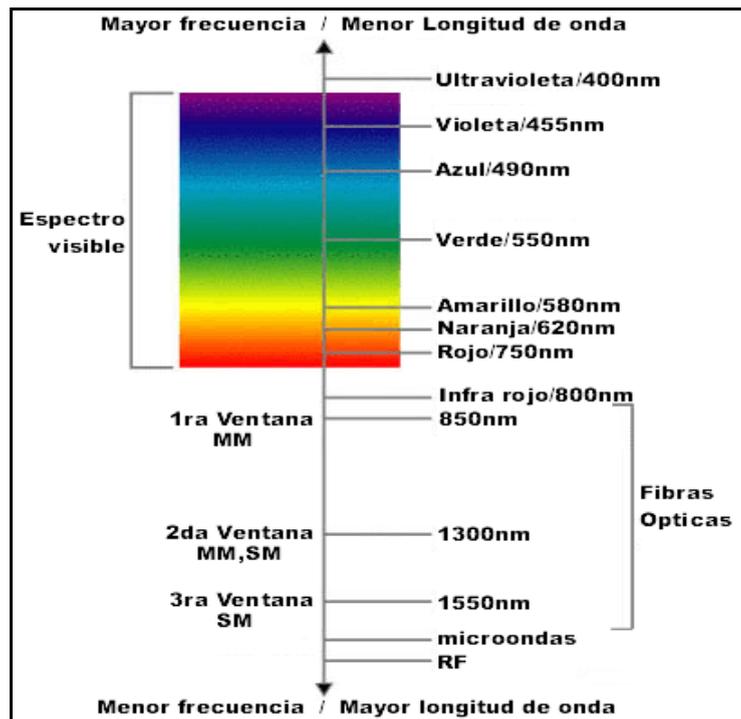


Figura 2.3 Longitud de onda de la fibra óptica dentro del espectro electromagnético.

### 2.2.4.1 Subdivisiones del Espectro Electromagnético

**Luz Visible.** La radiación visible va desde una longitud de onda de 400 a 700 nm. Las frecuencias más bajas de la luz visible se perciben como rojas y las de más alta frecuencia aparecen violetas.

**Rayos infrarrojos.** La radiación infrarroja fue descubierta por el astrónomo William Herschel en 1800, al medir la alta temperatura más allá de la zona roja del espectro visible. La radiación infrarroja se localiza en el espectro entre 780nm. hasta 1 mm. La banda infrarroja se divide en tres secciones:

- ✓ Próximas a lo visible. (780 - 2500 nm.),
- ✓ Intermedia (2500 – 50000 nm)
- ✓ Lejana (50000 - 1mm).

**Ondas de Radio.** Heinrich Hertz en el año de 1887, consiguió detectar ondas de radio que tenían una longitud del orden de un metro. La región de ondas de radio se extiende con longitudes de onda desde muchos kilómetros hasta menos de 30 cm.



**Rayos X.** En 1895 Wilhelm Roentgen inventó una máquina que producía radiación electromagnética con una longitud de onda menor a 10 nm. a los cuales debido a que no conocía su naturaleza los bautizó como X.

**Radiación Ultravioleta.** Sus longitudes de onda se extienden entre 10 y 400 nm más cortas que las de la luz visible.

**Rayos Gamma.** Se localizan en la parte del espectro que tiene las longitudes de onda más pequeñas entre 10 y 0.01 nm.

### 2.2.5 Reflexión y Refracción de la luz

Si un rayo de luz que se propaga a través de un medio homogéneo incide sobre la superficie de un segundo medio homogéneo, parte de la luz es reflejada y parte entra como rayo refractado en el segundo medio.

La cantidad de luz reflejada depende de la relación entre los índices de refracción de ambos medios como se observa en la Figura 2.4 donde la luz se propaga en dos medios; el aire y el agua.

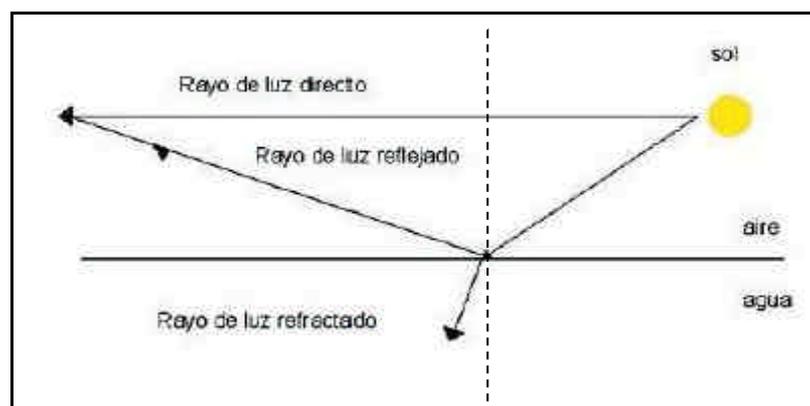


Figura 2.4 Reflexión y Refracción

### 2.2.6 Ley de Refracción.-

Se explica según la ley de Snell que tiene la siguiente ecuación:



$$n_1 * \text{sen } \theta_1 = n_2 * \text{sen } \theta_2$$

Ecuación 2.5 Ley de refracción<sup>3</sup>

Donde:

$n_1$  = índice de refracción en el medio A

$n_2$  = índice de refracción del medio B

$\theta_1$ : ángulo entre el haz incidente y la normal (perpendicular) a la superficie

$\theta_2$ : ángulo entre el haz refractado y la normal a la superficie

El producto del índice de refracción del medio A y el seno del ángulo de incidencia de un rayo es igual al producto del índice de refracción del medio B por el seno del ángulo de refracción como se puede observar en la Figura 2.5

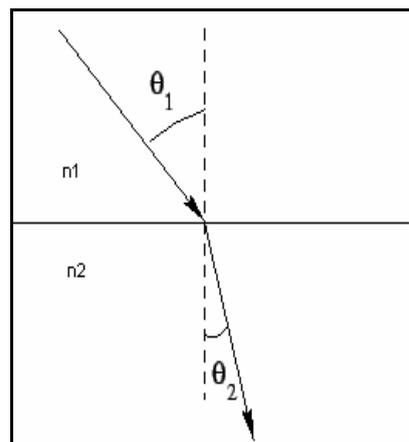


Figura 2.5 Ley de Refracción

Si un rayo incide de forma oblicua sobre un medio con un índice de refracción mayor, se desviará hacia la normal, mientras que si incide sobre un medio con un índice de refracción menor, se desviará alejándose de ella.

<sup>3</sup> Física General de Blad página 652



## 2.3 Historia de la Fibra Óptica

La fibra óptica es un medio de transmisión que utiliza la luz para enviar y recibir datos; así en la antigüedad ya se utilizaba algo parecido con la cultura Fenicia la cual se comunicaba mediante la luz del sol reflejada en espejos como podemos observar en la Figura 2.6.

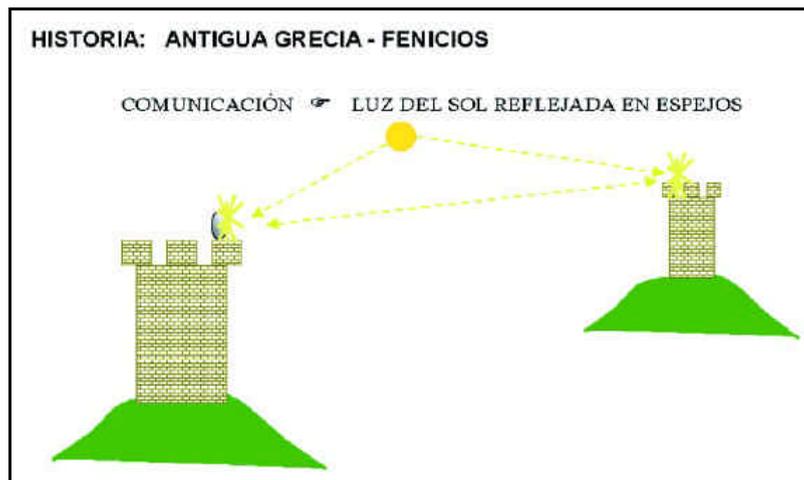


Figura 2.6 Luz del Sol Reflejada en Espejos

La fibra óptica se basa en las leyes de reflexión y refracción de la luz las cuales fueron enunciadas en 1626 por Snell.

En 1668 Isaac Newton descubre que la luz se propaga como ondas sonoras.

Rene de Reaumur hiló por primera vez el cristal en 1713.<sup>4</sup>

En 1790 Claude Chappe construye un telégrafo óptico mediante un complicado sistema de telescopios para establecer un enlace entre París y Estrasburgo el cual transmitía información a 200 Km. en 15 minutos.<sup>5</sup>

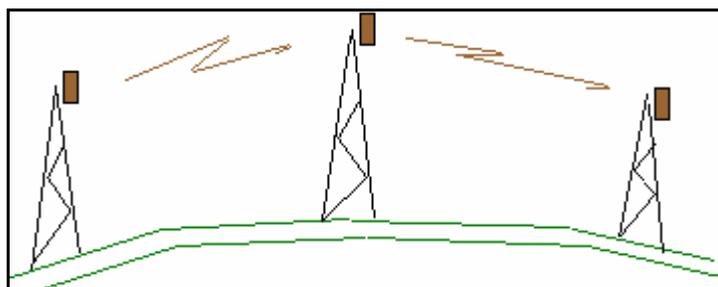


Figura 2.7 Telégrafo Óptico



En la Figura 2.7 se ve el telégrafo óptico en la cual podemos ver las antenas y al final el sistema de telescopios.

Fresnell establece las leyes matemáticas sobre propagación de ondas en 1810.

En 1854 Jhon Tindall proyecta luz a través de chorros de agua.<sup>6</sup>

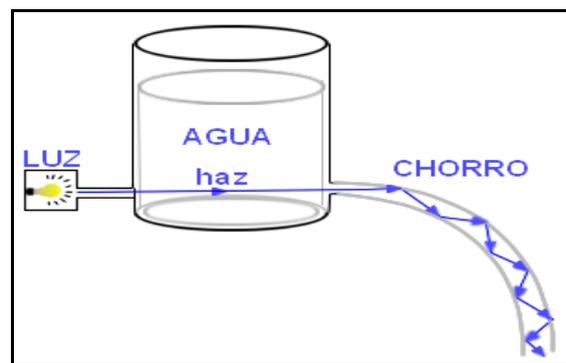


Figura 2.8 Experimento de Tindall

En la Figura 2.8 se muestra el experimento de Tindall en el cual se puede ver que la luz se puede conducir a través del agua es decir se traslada de un lugar a otro pasando por ambientes diferentes uno con mas densidad que otro en este caso el aire y agua. Esta es la base teórica que nos ayuda a comprender como la fibra óptica es un medio de comunicación y que se necesitan dos medios para guiar la luz.<sup>7</sup>

En 1874 el ingeniero Chicolev en Rusia conducía la luz solar a través de tubos metálicos huecos espejados por dentro, hacia recintos donde era peligroso el uso de antorchas o llamas, por ejemplo en fábricas de pólvora parecido a un sistema de tubería óptica la cual tenia la idea de conducir luz hasta las habitaciones a partir de una fuente central como se puede ver en la Figura 2.9.

<sup>4,5,6</sup> [www.conelectronica.com](http://www.conelectronica.com) Curso Formación Fibra Optica FiberOpt 3-5

<sup>7</sup> Física General Francis Zears Frank Semaski página 756

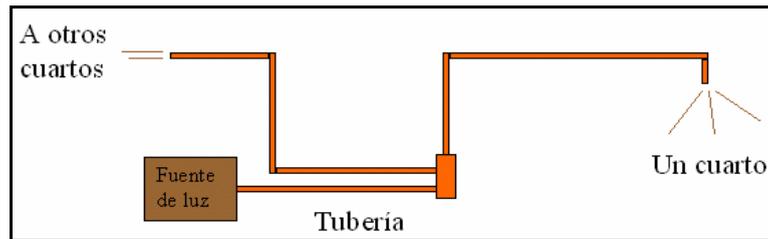


Figura 2.9 Conducción de luz a través de tubos

Después en 1873 el científico Maxwell probó sus teorías de que la luz se puede conducir mediante ondas electromagnéticas.

En 1880 Graham Bell inventa el fotófono el cual transmitía la voz; este consistía en un espejo el cual reflejaba la luz del sol llevándola hacia el receptor a una distancia de 200m. Este método de transmisión dependía de la luz solar como se ve en la Figura 2.10.

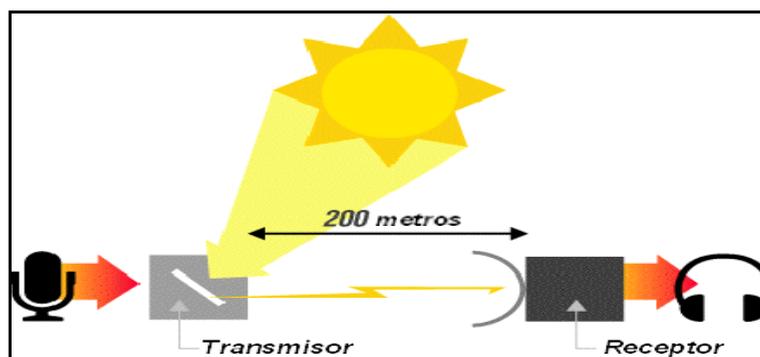


Figura 2.10 Fotófono de Graham Bell

En 1927 se crea un sistema para transmitir imágenes mediante varillas de silicio Hansell en Estados Unidos y Baird en Inglaterra.

En Estados Unidos se empieza a utilizar la fibra óptica en telecomunicaciones en el año de 1936.

En 1958 se inventa el láser el mismo que es una ampliación de luz por estimulación de radiación realizándose los primeros estudios de comunicación luminosa a través del aire. Hubo que esperar hasta estos años para que el tipo de transmisión de fibra óptica empiece a desarrollarse.



La utilización del láser era muy limitada ya que no existían canales y conductos para que las ondas electromagnéticas viajen de un lugar a otro en la fuente denominada láser. Fue entonces cuando los científicos y técnicos especializados en óptica dirigieron sus esfuerzos a la producción de un ducto o canal, conocido hoy como la fibra óptica.

En 1966 surgió la propuesta de utilizar una guía óptica para la comunicación.

En 1977, se instaló un sistema de prueba en Inglaterra; dos años después, se producían ya cantidades importantes de pedidos de este material.

## **2.4 Fundamentos de Fibra Óptica**

En los sistemas tradicionales de comunicación (no ópticas), la información es llevada por señales eléctricas o electromagnéticas. Los sistemas que utilizan la luz como portadora de información, en los últimos años, han recibido especial atención debido a las grandes ventajas que ello implica.

El elemento principal de estos sistemas es la fibra óptica, la cual contiene y guía las ondas de luz de una fuente a un destino.

### **2.4.1 Definición Fibra Óptica**

Es un filamento de vidrio u otro material transparente, flexible y de alta pureza, sumamente delgado del espesor de un cabello (de 2 a 125 micrones) extremadamente compacto como se muestra en la Figura 2.11. Llevan mensajes en los haces de luz que pasan de un extremo a otro, cuando la luz entra por uno de los extremos de la fibra se transmite con muy pocas pérdidas.



Figura 2.11 Fibra óptica.

El núcleo y la cubierta tienen vidrios de diferente composición, pero son una sola pieza de vidrio. La transmisión ocurre dentro del núcleo de la fibra por medio de un proceso de reflexión interna total. La luz es reflejada a lo largo de la fibra y es detectada en el extremo lejano.

Es un medio, que por su ancho de banda satisface las necesidades actuales y futuras.

## 2.4.2 Características de la fibra óptica

### 2.4.2.1 Características técnicas

La fibra es un medio de transmisión de información analógica o digital.

Las ondas electromagnéticas viajan en el espacio a la velocidad de la luz.

La capacidad de transmisión de información depende de:

- ✓ Del diseño geométrico de la fibra.
- ✓ De las propiedades de los materiales empleados en su elaboración. (diseño óptico)
- ✓ De la anchura espectral de la fuente de luz utilizada. Cuanto mayor sea esta anchura, menor será la capacidad de transmisión de información de esa fibra.
- ✓ Del recubrimiento que tiene un índice de refracción ligeramente menor que el núcleo, permitiendo así la reflexión total interna.



### 2.4.2.2 Características Mecánicas

Se debe tener en cuenta su sensibilidad a la curvatura y micro curvatura, la resistencia mecánica y las características de envejecimiento, que se determinan por medio de los ensayos de:

**Tensión:** cuando se estira o contrae el cable se pueden causar fuerzas que rebasen el porcentaje de elasticidad de la fibra óptica y se rompa o formen micro curvaturas.

**Compresión:** es el esfuerzo transversal.

**Impacto:** se debe principalmente a las protecciones del cable óptico.

**Enrollamiento:** existe siempre un límite para el ángulo de curvatura pero, la existencia del forro impide que se sobrepase.

**Torsión:** es el esfuerzo lateral y de tracción.

**Limitaciones Térmicas:** estas limitaciones difieren en alto grado según se trate de fibras realizadas a partir del vidrio o a partir de materiales sintéticos.

### 2.4.3 Ventajas de la fibra óptica

Las fibras ópticas poseen varias ventajas respecto a los sistemas convencionales que emplean cables de cobre o microondas; algunas de las más sobresalientes se mencionan a continuación:

#### 2.4.3.1 Ancho de banda

La fibra óptica tiene la capacidad de transmitir grandes cantidades de información a altas velocidades debido al gran ancho de banda en frecuencias ópticas (se manejan valores desde cientos de MHz hasta decenas de GHz.), lo que permite flujos muy elevados y sirve para cubrir largas distancias.



De todas formas el ancho de banda de las fibras excede ampliamente al de los cables de cobre o convencionales. Con la tecnología presente se pueden transmitir 60.000 conversaciones simultáneas con dos fibras ópticas en tiempo real voz y video.

### **2.4.3.2 Atenuación**

La atenuación que presenta la fibra es independiente de la velocidad de transmisión a la que esté trabajando, lo cual no ocurre en cables convencionales, ya que en ellos la atenuación es mayor a medida que se aumenta la velocidad de transmisión o el ancho de banda.

Es el factor que indica con que frecuencia deben colocarse los repetidores de la señal que se conduce o propaga por el medio, puede variar debido a un gran número de factores tales como la humedad, las curvaturas que sufre el cable, etc. Otro de estos factores es el tipo de fibra utilizada, ya que el método de fabricación determina la atenuación mínima que existe en ella.

Las pérdidas indican la distancia a la cual la información puede ser enviada.

### **2.4.3.3 Aislamiento**

La fibra es inmune al ruido y a las interferencias por ser un medio dieléctrico, característica muy positiva en muchas aplicaciones, sobre todo cuando el cable debe pasar al lado de conductores que transportan grandes cantidades de energía por zonas donde hay instalaciones de alta tensión o con fuertes campos electromagnéticos.

La fibra óptica no se ve afectada por la interferencia electromagnética (EMI) o interferencia de radiofrecuencia (RFI), y no genera por sí misma interferencia, ello las hace un medio de transmisión ideal.



#### **2.4.3.4 Seguridad**

La información que viaja por la fibra no se puede detectar, aunque sí interceptar, porque la luz no es sensible a ningún fenómeno de tipo inductivo por la configuración especial de su campo electromagnético.

Los rayos luminosos viajan por el centro de la fibra y pocos o ninguno pueden escapar. Incluso si la intervención resultara un éxito, se podría detectar monitorizando la señal óptica recibida al final de la fibra por ello es altamente utilizada en aplicaciones militares.

#### **2.4.3.5 Tamaño y peso reducido.**

El peso del cable de fibras ópticas es muy inferior al de los cables metálicos, aproximadamente 50 a 200 Kg./Km. y las bobinas pueden ser de una longitud que va de 2 a 6 Km. mientras que para el cable coaxial esta longitud es de unos 300 m.

El peso del orden de algunos gramos por kilómetros, lo que resulta unas nueve veces menos que lo del cable convencional.

El cable fibra óptica tiene un diámetro mucho más pequeño, al ser muy delgado es mucho más ligero y ocupa menos espacio que un cable de cobre de capacidad similar ya sea cable coaxial o cable par trenzado.

#### **2.4.3.6 Estabilidad frente a variaciones de temperatura.**

El sílice, como elemento constitutivo esencial de las fibras ópticas, tiene un amplio margen de funcionamiento en lo referente a la temperatura, pues se funde a 600 °C.

La fibra óptica tiene un funcionamiento uniforme desde -55 °C a +125 °C sin degradación de sus características, al contrario de lo que ocurre con muchos



cables metálicos, cuya atenuación depende de su resistencia y ésta de la temperatura.

#### **2.4.3.7 Material Base Abundante**

La materia prima para fabricarla, sílice, es uno de los recursos más abundantes en la naturaleza (aproximadamente 30 % de la superficie terrestre), lo cual lleva a bajar sistemáticamente los costos a medida que mejoran los procesos tecnológicos para su fabricación, al contrario de lo que ocurre con el cobre, cuyo precio depende fundamentalmente de las reservas.

#### **2.4.3.8 Fiabilidad y mantenimiento.**

La fibra óptica es un medio constante y no envejece. Los enlaces de fibra óptica bien diseñados son inmunes a condiciones adversas de humedad y temperatura y se pueden utilizar incluso para cables subacuáticos.

La fibra óptica tiene también una larga vida de servicio, estimada en más de treinta años para algunos cables. El mantenimiento que se requiere para un sistema de fibra óptica es menor que el requerido para un sistema convencional, debido a que se requieren pocos repetidores electrónicos en un enlace de comunicaciones.

Facilidad para localizar los cortes gracias a un proceso basado en la telemetría, lo que permite detectar rápidamente el lugar y posterior reparación de la avería, simplificando la labor de mantenimiento.

En la tabla 2.2 se presentan datos comparativos de un cable de 16 fibras y un coaxial de 8 tubos, donde se aprecian las ventajas de este nuevo medio de transmisión.



Características	Fibra óptica	Cable coaxial
Longitud de la bobina	2000	230
Peso (Kg/Km)	190.0	7900.0
Diámetro (mm)	14.0	58.0
Atenuación (dB/Km) para un sistema a 565 Mbps	0.4	40.0
Distancia entre repetidores (Km)	40.0	1.5
Radio de Curvatura (cms)	14	55

Tabla 2.2 Comparación entre cable de 16 fibras y un cable coaxial de 8 tubos<sup>8</sup>

## 2.4.4 Desventajas

### 2.4.4.1 Elevado costo

Costo elevadamente alto por el material utilizado en su fabricación (metro de cable), su mano de obra es costosa y debe ser de alta calidad por utilizar equipos terminales, elementos activos y equipos de Test de última tecnología. Deberían ser analizados todos los costes de operación e implementación de un servicio de fibra óptica.

### 2.4.4.2 Disponibilidad limitada de conectores

No se puede utilizar muchos conectores porque cada uno de estos presenta una atenuación dependiendo del fabricante y del tipo de conector en una instalación porque no cumpliría con las normas de certificación.

### 2.4.4.3 Conversión electro-óptica.

Antes de conectar una señal eléctrica de comunicación a una fibra óptica, la señal debe convertirse al espectro luminoso [850, 1.310 o 1(nm)], esto se realiza por medios electrónicos en el extremo del transmisor, el cual da un formato propio a la señal de comunicaciones y la convierte en una señal óptica usando un LED o un láser de estado sólido.

---

<sup>8</sup> <http://www.monografias.com/trabajos13/fibropt/fibropt.shtml#COMPARAC>



A continuación esta señal óptica se propaga por la fibra. En el extremo del receptor de la fibra, la señal óptica se debe convertir otra vez en señal eléctrica antes de poder ser utilizada.

A esto se puede unir la corta vida de los emisores láser que por ser de tecnología avanzada son muy frágiles de arruinarse con facilidad.

#### **2.4.4.4 Caminos homogéneos.**

Se necesita un camino físico recto para el cable de fibra óptica. El cable se puede enterrar directamente, situar en tubos o disponer de cables aéreos a lo largo de caminos homogéneos.

Esto puede requerir la compra o alquiler de la propiedad. Algunos derechos sobre el camino pueden ser imposibles de adquirir. Para localizaciones como terrenos montañosos o algunos entornos urbanos pueden ser más adecuados otros métodos de comunicación sin hilos.

#### **2.4.4.5 Instalación especial.**

Las fibras ópticas son muy delicadas debido a que es predominantemente de sílice lo cual requiere técnicas especiales para la ingeniería e instalación de los enlaces.

Ya no se aplican los métodos convencionales de instalación de cables de hilos como, por ejemplo, sujeción o crimpado, soldadura y wire-wrapping. También se requiere un equipamiento adecuado para probar y poner en servicio las fibras ópticas.

Los técnicos deben ser entrenados en la instalación, especializados en la realización de soldaduras, empalmes, conectorización y puesta en servicio de los cables de fibra óptica para obtener una mano de obra calificada.



#### **2.4.4.6 Reparaciones.**

Un cable de fibra óptica que ha resultado dañado no es fácil de reparar. Los procedimientos de reparación requieren un equipo de técnicos con mucha destreza y habilidad en el manejo del equipamiento. En algunas situaciones puede ser necesario reparar el cable entero.

Este problema puede ser aún más complicado si hay un gran número de usuarios que cuentan con dicho servicio. Es importante, por ello, el diseño de un sistema propio con rutas físicamente diversas, que permita afrontar tales contingencias.

#### **2.4.5 Aplicaciones de la Fibra Óptica**

Las aplicaciones de fibra óptica son muy variadas y se encuentran en un continuo proceso de expansión sin conocer hasta donde puede llegar.

Se aplica en los siguientes campos:

- ✓ Telecomunicaciones
- ✓ Medicina
- ✓ Arqueología
- ✓ Practicas militares
- ✓ Mecánica
- ✓ Vigilancia

Las aplicaciones de la fibra óptica en el ámbito de las telecomunicaciones son:

##### **2.4.5.1 Internet**

La fibra óptica hace posible navegar por Internet de una forma rápida, a una velocidad de 2 millones de bps, impensable en el sistema convencional, en el que la mayoría de usuarios se conecta a 33.600 o 56.000 bps.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> <http://www.monografias.com/trabajos13/fibropt/fibropt.shtml#APLICAC>

Revista Enter. No 20. Agosto 1997. Santa Fe de Bogotá. Colombia.



### 2.4.5.2 Redes

La fibra óptica es utilizada en las redes LAN aumentando el rendimiento de los equipos, y permitiendo la conexión de nuevos usuarios al sistema de red; se aplica en backbone de campus universitarios, backbone de alta velocidad, redes MAN Y WAN.

Para redes LAN se utiliza el tipo de fibra multimodo y en redes WAN el tipo de fibra monomodo.

### 2.4.5.3 Telefonía

Es el campo en el que la fibra óptica más se aplica ya que la fibra permite una comunicación libre de interferencia y es difícil boicotear la línea no así en las líneas de cobre; al utilizar fibra óptica se utilizan pocos amplificadores de señal

Además dentro de las telecomunicaciones la fibra óptica permite acceder a varios servicios como:

- ✓ Televisión: Recepción de una gran número de canales
- ✓ Banco en Casa: Realización de cualquier tipo de transacción bancaria,
- ✓ Telecompra: Tendrá acceso directo a anuncios por palabras con opción a compra, hasta navegar por un centro comercial con la posibilidad de adquirir el objeto que más desee.
- ✓ Web TV. Será uno de los mejores ejemplos de la interactividad que permite la fibra óptica. Facilitará el acceso a información sobre restaurantes, comercios, eventos, espectáculos...
- ✓ Radio Digital. Canales temáticos para todos los gustos musicales, pero con la mejor calidad de sonido.

## 2.5 Propagación de la luz en la fibra óptica

Básicamente, la fibra óptica está compuesta por una región cilíndrica central, por la que se efectúa la propagación de la luz, denominada núcleo, y de una



zona externa y coaxial al núcleo, que se denomina cubierta, revestimiento o manto.

La luz se propaga a través de la fibra óptica por las leyes de reflexión total la cual nos dice que al pasar la luz de un medio A al medio B y el medio B tiene un índice de refracción menor que el de A; a un ángulo determinado, denominado ángulo crítico se puede dar la reflexión interna total de la luz en el medio en el que se esta propagando; en la fibra óptica el medio A será el núcleo y el medio B el revestimiento.

Para que exista la reflexión total el índice de reflexión del núcleo debe ser mayor al de la cubierta como se observa en la Figura 2.12 donde  $n_1$  debe ser mayor que  $n_2$ .

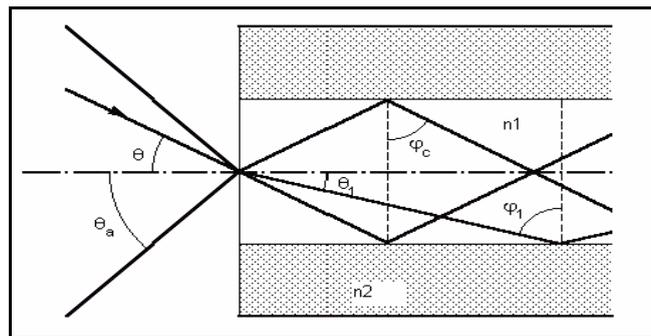


Figura 2.12 Reflexión Total en la Fibra Óptica

Para que las ondas de luz cumplan con la reflexión total el ángulo de incidencia debe ser menor o igual al ángulo límite o de reflexión total.

El ángulo límite de entrada será el que permita que todo rayo que incida desde el exterior con un ángulo menor o igual que él, sufra una reflexión total y, por tanto, sea transmitido dándose lugar así la apertura numérica.

### 2.5.1 Apertura Numérica

Es un indicador del ángulo máximo con que un haz de luz puede ingresar a la fibra para que se produzca la reflexión total interna.



Las ondas luminosas deben entrar en la fibra dentro de cierto ángulo, llamado ángulo de aceptación. Cualquier onda que entre con un ángulo mayor al de aceptación no podrá ser transmitida debido a las leyes físicas de la óptica.

La apertura numérica esta dada por:

$$NA = \text{sena}_{\text{máx}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Ecuación 2.6 Apertura Numérica <sup>10</sup>

Donde:

$\alpha_{\text{máx}}$ , representa el máximo ángulo de aceptación.

$n_1, n_2$  = índices de refracción

Como se puede apreciar de la expresión anterior, la apertura numérica es función de los índices de refracción de los materiales de la fibra como se muestra en la Figura 2.13.

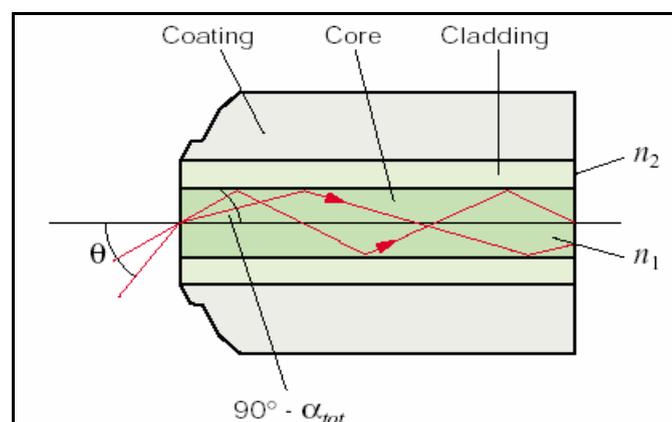


Figura 2.13 Apertura Numérica

## 2.5.2 Dispersión

La dispersión es el efecto por el cual un pulso de luz inyectado en la fibra emerge a la salida con un ensanchamiento temporal, dependiente de la distancia.

<sup>10</sup> <http://www.yio.com.ar/fo/indiceref.html>

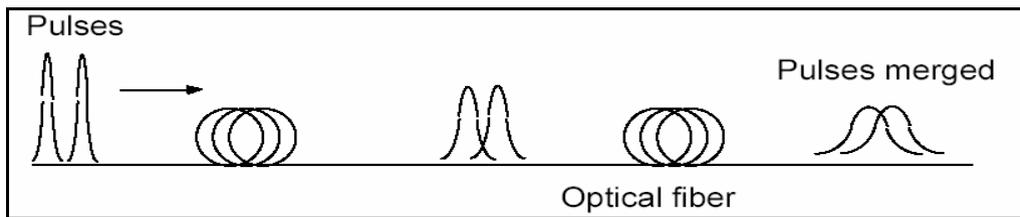


Figura 2.14 Dispersión de ondas

En el gráfico 2.14 podemos observar como el pulso es ensanchado dependiendo de la distancia que existe entre un punto y otro.

La dispersión se divide en dos tipos principales: dispersión modal y dispersión cromática como se muestra en la Figura 2.15.

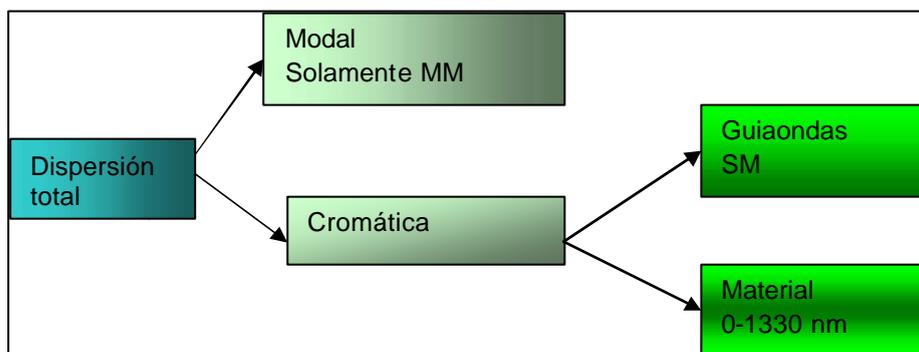


Figura 2.15 Tipos de Dispersión

### 2.5.2.1 Dispersión Modal

Existe únicamente en fibras multimodo ya que los modos diferentes de luz tienen que viajar diferentes distancias, debido a diferentes rutas bajo el núcleo.

Este tipo de dispersión se da debido a que todos los diferentes modos de un pulso en una fibra multimodo viajan a lo largo del canal con diferentes velocidades de grupo. El ancho del pulso a la salida de la fibra es dependiente del mayor y el menor retardo que tengan los diferentes modos que se propaguen en las fibras como se observa en el gráfico 2.16.



Este mecanismo de dispersión genera las diferencias fundamentales entre los diferentes tipos de fibra, la fibra con menor dispersión modal es la de índice gradual.

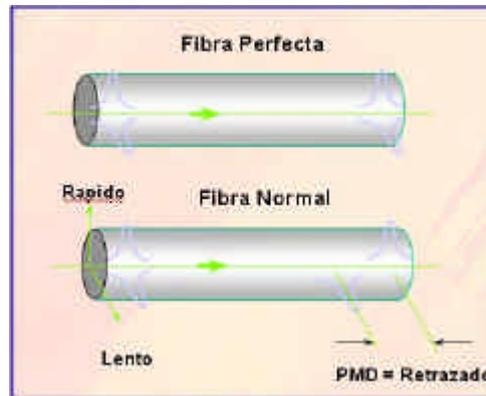


Figura 2.16 Dispersión Modal

### 2.5.2.2 Dispersión Cromática

Este tipo de dispersión ocurre en todo los tipos de fibra. Cuando el emisor no emite una sola frecuencia, entonces puede haber tiempos de propagación diferentes para las diferentes frecuencias transmitidas.

Los Leds no tienen una única longitud de onda, a diferencia de láser. Longitudes de onda diferentes viajan a velocidades ligeramente diferentes, causando dispersión en la distancia.

En un medio distinto al vacío la velocidad de propagación de la luz depende de su longitud de onda. Por ende dos pulsos de luz de distinta longitud de onda, que sea enviada al mismo tiempo a través de una fibra óptica no llegarán al mismo tiempo.

Estos retardos pueden ser causados por el material de la fibra (Dispersión de material) o por los efectos de transporte dentro de la fibra óptica (dispersión por guía de onda).

La dispersión se mide en pico segundos por kilómetro y por nanómetro (ps/Km\*nm)



### 2.5.2.3 Dispersión por Material

Ocurre cuando en una onda plana la velocidad de fase no varía linealmente con la longitud de onda. Existe una región en la cual la dispersión por material es nula, en esta longitud de onda el alcance de la fibra será mayor debido a la poca dispersión.

En el proceso de la fabricación de la fibra es posible lograr que ese punto quede en una ventana específica, cuando esto sucede la fibra se conoce como fibra desplazada (DSF).

### 2.5.2.4 Dispersión de Guía de Onda

Se produce en las fibras monomodo cuando, debido al reducido tamaño del núcleo, la luz viaja tanto por el núcleo como por el revestimiento. De aquí surge el MFD (Mode-Field Diameter) el cual es el diámetro mínimo del núcleo de una FO para que la luz propagada no lo exceda y circule también por el revestimiento.

### 2.5.3 Atenuación

Es la medida de pérdida de potencia que sufre una señal transmitida mediante fibra óptica, esta se da debido a que la señal interactúa con el vidrio.

Presenta dos características fundamentales que la diferencian de otro tipo de tecnología:

La potencia se reparte entre los varios modos propagados, cada uno con una atenuación diferente. Las varias medidas darán valores distintos, según las condiciones de inserción de la luz. En las fibras monomodos hay variaciones en las medidas porque una parte de la potencia puede propagarse o desaparecer por el revestimiento.

La atenuación es constante en todo el espectro de la señal.



Es el parámetro más importante de la fibra y determina la máxima distancia de transmisión para que la señal pueda ser restaurada.

Las pérdidas en la fibra óptica se dan debido a factores intrínsecos y extrínsecos

### **2.5.3.1 Factores Intrínsecos**

Al hablar de factores intrínsecos se refiere a las características de la fibra como es la composición del vidrio, impurezas y no se pueden eliminar.

#### **2.5.3.1.1 Absorción Infrarroja y Ultravioleta**

Se presenta por las interacciones entre fotones que viajan por la fibra y moléculas que se encuentran en el núcleo.

De estas interacciones se presentan bandas de absorción para el infrarrojo: picos de muy alta absorción, para longitudes de onda  $> 6 \mu\text{m.}$ , presentan colas decrecientes en forma exponencial. Este tipo de atenuación se debe tomar en cuenta especialmente en la 2ª y 3ª ventanas.

En el caso de la ultravioleta aparece cuando la energía de los fotones es suficiente para provocar transiciones de electrones a niveles más altos del átomo. Es considerada en la 1ª ventana.

#### **2.5.3.1.2 Esparcimiento Rayleigh**

Es un fenómeno de esparcimiento que se produce cuando la luz encuentra en su camino partículas extrañas cuyo diámetro es mucho menor que la longitud de onda de la señal. Estos difunden la luz, según una ley: esparcimiento Rayleigh. Esto significa que existe la presencia de algunos centros de difracción, los cuales dispersan o esparcen el rayo en muchas direcciones incluso con retardos.



La difracción resultante absorbe parte del espectro energético de la señal y produce una pérdida de energía que decrece exponencialmente con la cuarta potencia de la longitud de onda

### 2.5.3.1.3 Atenuación por tramo

Es debida a las características de fabricación propia de cada fibra (naturaleza del vidrio, impurezas, etc.) y se mide en dB./Km. lo cual nos indica cuántos dB se perderán en un kilómetro.



Figura 2.17 Atenuación por tramo <sup>11</sup>

En la Figura 2. 17 se puede apreciar la atenuación en fibra que es de 3 dB./Km. como esto afecta a la potencia de la señal inicial.

### 2.5.3.2 Factores Extrínsecos

Estos factores extrínsecos vienen dados por el mal cableado de la fibra así como conexiones y empalmes.

<sup>11</sup> [www.conelectronica.com](http://www.conelectronica.com) fiberopt curso de formación de fibra óptica Nro 26



### 2.5.3.2.1 Perdidas por Impurezas

En el proceso de fabricación del vidrio se pueden depositar impurezas dentro del núcleo de la fibra. Estas impurezas pueden ser de naturaleza metálica como: hierro, cromo, cobalto y níquel y los iones hidróxilo (OH).

Existe también un tipo de absorción particular originado por infiltraciones de hidrógeno desde el exterior de la fibra hasta su núcleo. Es un fenómeno lento que aparece después de la fabricación de la fibra y modifica sus características luego de su implementación. Sucede especialmente en la 2ª y 3ª ventanas.

Las impurezas de tipo hidroxilo no son fácilmente controlables, y a 2720nm se produce resonancia, los fotones transmiten su energía a los iones de OH<sup>-</sup>, no así las impurezas metálicas pueden ser controladas en su proceso de fabricación

### 2.5.3.2.2 Perdidas por Curvatura

Se producen cuando se le da a la fibra una curvatura excesivamente pequeña dándole un radio menor a 4 o 5 cm. permitiendo que los haces de luz escapen del núcleo debido a que se supera el ángulo máximo de incidencia admitido para la reflexión total interna que como se sabe es lo que permite que la luz sea transmitida de un lugar a otro.

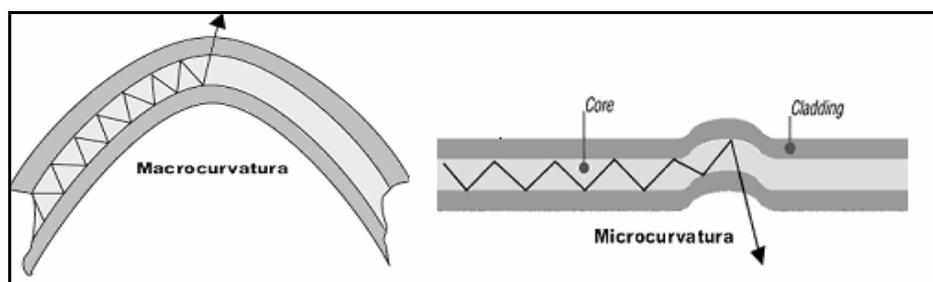


Figura 2.18 Pérdida por curvatura

En la Figura 2.18 podemos observar que la luz se desvía del núcleo hacia la cubierta ya que no se produce la refracción total por no tener un ángulo adecuado.



Otra manera de pérdida por curvaturas se da cuando las fibras se curvan dentro del tubo debido al aumento de temperatura y diferencias entre los coeficientes de dilatación térmica entre fibras y buffer como se puede observar en la Figura 2.18 por no tener el ángulo adecuado para reflexión total el haz de luz se desvía.

### 2.5.3.2.3 Atenuación por empalme

Cuando empalmamos una fibra con otra, en la unión se produce una variación del índice de refracción lo cual genera reflexiones y refracciones, y sumándose la presencia de impurezas, todo esto resulta en una atenuación.

Se mide en ambos sentidos tomándose el promedio. La medición en uno de los sentidos puede dar un valor negativo, lo cual parecería indicar una amplificación de potencia, lo cual no es posible en un empalme, pero el promedio debe ser positivo, para resultar una atenuación.

La pérdida de la señal se puede dar por:

**Inserción:** es la atenuación que agrega a un enlace la presencia de un conector o un empalme.

**Retorno o reflectancia:** es la pérdida debida a la energía reflejada, se mide como la diferencia entre el nivel de señal reflejada y la señal incidente, es un valor negativo y debe ser menor a  $-30$  dB (típico  $-40$ dB). En ocasiones se indica obviando el signo menos.

### 2.5.3.2.4 Empalmes atenuados

En algunos casos se debe provocar una atenuación en un empalme; esto se debe hacer cuando la atenuación de un tramo de fibra óptica es tan baja que al final la señal es demasiado alta y se puede llegar a saturar o dañar el receptor. Esto se hace con la misma empalmadora, con la función de empalme atenuado.



Entonces, para realizar empalmes atenuados una empalmadora puede desalinearse los núcleos o darle un ligero ángulo a una de las dos fibras.

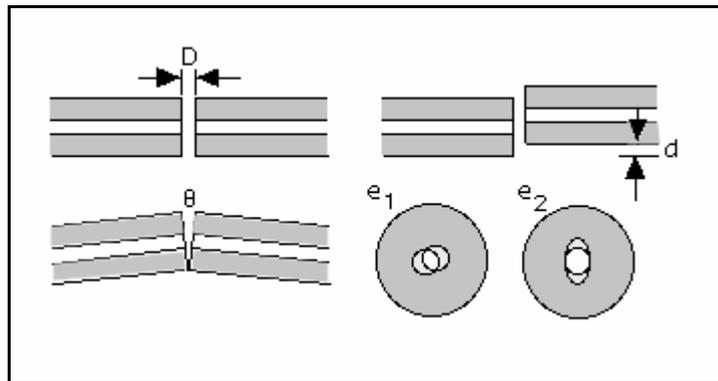


Figura 2.19 Causales de atenuación geométrica en Empalmes

En la Figura 2.19 se puede ver las causas que provocan una atenuación por empalme; se supone que la fibra debe quedar recta y se ve que en el gráfico existe una que está más arriba que la otra; o sea no sigue una línea recta.

Un empalme en fibra óptica introduce entre 0.3 y 0.5 dB de atenuación.

Pérdida En dB	% de potencia óptica transmitida recibida
1	0.8
2	0.63
3	0.5
4	0.4
5	0.32
10	0.1
20	0.01
30	0.001
40	0.0001

Tabla 2.3 Pérdida de la potencia de señal óptica<sup>12</sup>

En la tabla 2.3 se puede demostrar en una parte la pérdida en dB. y la potencia de salida en una comunicación como podemos observar mientras más grande es la pérdida la potencia óptica recibida al final es menor.

Los valores de atenuación están permitiendo al máximo por estándares y pueden ser usados por diseñadores para calcular las pérdidas de un sistema aceptable apuntando anterior a la instalación o un experimento aceptable.

<sup>12</sup> Curso Diseño de Redes de Fibra Óptica del CEC Escuela Politécnica Nacional pag. 19



### 2.5.4 Ventanas ópticas

Son zonas donde la longitud de onda obtiene una mínima atenuación; La transmisión de información a través de fibras ópticas se realiza mediante la variación de un haz de luz invisible al ojo humano, que en el espectro electromagnético se sitúa por debajo del infrarrojo.

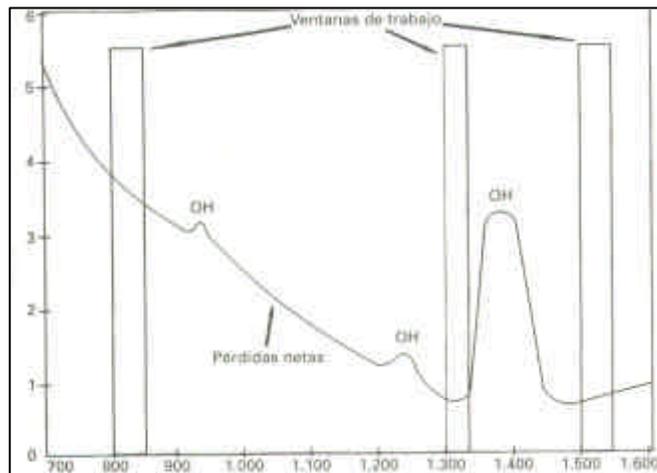


Figura 2.20 Ventanas ópticas<sup>13</sup>

La zona por debajo de los 800 nm no es conveniente utilizar por ser de alta atenuación; mientras que la que está sobre los 1600 nm presenta problemas de atenuación por efecto de la absorción de los rayos infrarrojos.

Actualmente se trabaja en las tres bandas de frecuencia marcadas en la Figura 2.20, que son:

- ✓ 1ª ventana: 800 – 900 nm; se utiliza en 850 nm.
- ✓ 2ª ventana: 1250 - 1350 nm; se utiliza en 1300 nm.
- ✓ 3ª ventana: 1500 – 1600 nm; se utiliza en 1550 nm.

<sup>13</sup> <http://platea.pntic.mec.es/~imartil/optral/cap2/fibra-y.htm>