

INDICE

1	INTRODUCCION	3
1.1	generalidades.	3
1.2	Una perspectiva Histórica.	4
1.3	Ventajas y limitaciones de las fibras ópticas.	6
1.3.1	Ventajas.	6
1.3.2	Limitaciones	8
1.4	La luz, ¿onda o partícula?.	9
1.5	La reflexión interna total (TIR)	16
1.6	Geometría de una fibra óptica.	17
1.7	Apertura Numérica.	18
1.8	Modos de la Fibra.	19
1.9	Con que esta hecha una fibra óptica?	23
1.9.1	¿Porque el vidrio es transparente?	24
1.10	Tipos de fibras ópticas.	26
1.11	Distintos tipos de fibras ópticas de acuerdo con el índice de refracción.	27
1.11.1	Fibras de índice escalonado.	28
1.11.2	Fibras de índice gradual.	28
1.11.3	Fibras con perfiles especiales.	29
1.12	Pérdidas en las fibras ópticas.	31
1.12.1	Pérdidas por curvatura.	31
1.12.2	Pérdidas por acoplamiento.	33
1.12.3	Pérdidas intrínsecas.	34
1.13	Reflexión de Fresnel.	36
1.14	Dispersión y ancho de banda de las fibras ópticas	37
1.14.1	Dispersión modal.	38
1.14.2	Dispersión material.	38

1.14.3	Dispersión de guía de onda.	41
1.14.4	Ancho de banda para una fibra óptica.	42
1.15	Generalidades sobre los emisores y detectores ópticos.	44
1.15.1	Junturas ópticas en semiconductores.	45
1.15.2	Emisores ópticos usados en sistemas de F.O.	47
1.15.2.1	Diodos emisores de luz (LEDs)	47
1.15.2.2	Diodos Láser de inyección. (ILD)	48
1.15.3	Características de las fuentes.	50
1.16	Detectores ópticos usados en sistemas de F.O.	54
1.16.1	¿Como puede convertirse una señal óptica en eléctrica ?	55
1.16.2	Fotodiodos PN.	55
1.16.3	Fotodiodos PIN.	56
1.16.4	Fotodiodos de avalancha. (APD)	57
1.16.5	Características de los Detectores.	58
1.16.6	Sensibilidad espectral (S_λ)	58
1.16.7	Eficiencia cuántica (η).	59
1.16.8	Voltaje de polarización (Bias)	60
1.16.9	Ruido.	60
1.16.10	Relación Señal/ Ruido. (SNR)	62
1.16.11	Tasa de error digital. (<i>Bit error rate : BER</i>)	62
1.16.12	Velocidad.	63
1.16.13	Montaje o encapsulado	64
1.17	Componentes para fibras ópticas.	64
1.17.1	Conexiones y empalmes para fibras ópticas.	65
1.17.2	Las causas de las pérdidas en una interconexión óptica.	66
1.17.3	Pérdidas por inserción.	71
1.17.4	Requerimientos de los conectores para fibras ópticas.	72
1.17.5	Tipos de conectores.	73
1.17.6	Conectores multimodo.	74
1.17.7	Conectores Monomodo.	76
1.18	Empalmes para fibras ópticas.	77
1.18.1	Empalmes mecánicos.	80
1.18.2	Terminación de los empalmes.	81
1.19	Medición de potencia en fibras ópticas.	82
1.19.1	Los medidores de potencia óptica.	84
1.19.2	Fuentes ópticas calibradas y estabilizadas.	86
1.19.3	Medición de extremo a extremo de pérdidas en sistemas de fibras ópticas.	87
1.19.4	Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR)	88

1 INTRODUCCION

1.1 GENERALIDADES.

Una fibra óptica es, en forma sencilla, simplemente un filamento muy fino de plástico o vidrio a través del cual la luz puede propagarse. Una fibra óptica puede ser estudiada fácilmente si se la considera como un "tubo transparente" circular en el cual los rayos de luz que entran por una punta pueden ser conducidos o guiados por el interior de la misma hasta su extremo opuesto. Las fibras son capaces de transportar señales ópticas y energía luminosa, y constituyen el equivalente óptico de un "par conductor" o un cable coaxial. El uso de fibras ópticas en lugar de estos medios tradicionales supone varias ventajas pero también se presentan algunas limitaciones. Estos aspectos serán considerados seguidamente.

Las fibras no transportan señales eléctricas, sino el equivalente óptico de las mismas. Como la mayoría de los sistemas electrónicos de comunicaciones funcionan con señales eléctricas, la información a transmitir debe ser primero convertida en una señal luminosa mediante el uso de algunos de los distintos tipos de transductores que existen, para luego ser enviada por la fibra al lugar deseado. En el destino la recuperación de la señal original supone la existencia de otros transductores que actúan a la inversa de los primeros.

Para poder abordar el estudio de los dispositivos, equipos y sistemas que hacen uso de la tecnología de las fibras ópticas, es necesario tener una idea clara de cual es la naturaleza de lo que llamamos "Luz".

Desde el punto de vista de la Física, la luz es un fenómeno que se manifiesta con un comportamiento dual, es decir, que en determinadas circunstancias se pone en evidencia como un fenómeno ondulatorio (una onda electromagnética) y en otros casos se presenta como de naturaleza corpuscular (Fotones). El problema se dirimió a principios de este siglo, abandonando dicha controversia y adoptando la postura mas práctica de elegir el modelo que mas convenga de acuerdo a las circunstancias particulares de cada caso. Así, si consideramos a un rayo de luz como un "chorro" de fotones, puede explicarse sencillamente el fenómeno de la reflexión de la luz, en cambio resulta mas fácil entender el mecanismo por el cual se produce la refracción apelando a la teoría ondulatoria de la luz. Estos conceptos son necesarios ya que, como luego se vera, la luz se propagan a través de una fibra óptica obedeciendo al fenómeno denominado Reflexión Interna Total (TIR por sus siglas en ingles) que se fundamenta en la "ley de Snell". Por otro lado la teoría corpuscular proporciona una explicación clara y convincente de los efectos fotoeléctricos que se dan en los transductores.

1.2 UNA PERSPECTIVA HISTÓRICA.

La intención de usar la luz como medio de transmitir información es en realidad bastante antiguo. Hay evidencias que pueblos antiguos (como los griegos y romanos) , usaban espejos para transmitir información en forma rudimentaria mediante la reflexión de la luz solar. Probablemente con base en esta idea es que, en 1790, Claude Chappe ideó y construyó un telégrafo óptico que estaba compuesto por una serie de torres distribuidas a lo largo de los 200 Km. que separan las ciudades francesas de Lille y París, y mediante el uso de señales ópticas y un código asociado lograba que un mensaje traspusiera esa distancia en el increíble tiempo de 15 minutos.

La posibilidad de conducir luz a través de un medio transparente por sucesivas reflexiones internas fue demostrado por el filosofo John Tyndall en 1870, quien pudo probar ante un auditorio que la luz puede seguir una trayectoria curva mediante un experimento que consistía en aplicar una fuente luminosa a un tanque del cual salía un chorro de agua que siguiendo una trayectoria parabólica iba a caer en otro recipiente colocado mas abajo del primero, el público logro verificar que los rayos de luz podían seguir un camino en forma de zigzag en el interior del chorro de agua curvado. (Algo similar es lo que sucede en una fibra óptica).

Alexander Graham Bell desarrolló en 1889 el "Photophon", con el cual transmitía señales de altavoz, con la ayuda de la luz. La influencia climática y las variaciones de la visibilidad alteraban mucho la transmisión, por lo cual este método no encontró aplicación. El sistema usaba como elemento transductor, una celda fotoeléctrica que podía convertir un haz luminoso en una corriente eléctrica (aunque por ese entonces no se conocía muy bien el mecanismo por el cual se producía dicho efecto). Se debió esperar hasta 1921 para que Albert Einstein descubriera la "Ley del efecto Fotoeléctrico". Por esta contribución le fue concedido el premio Nobel de Física de ese año.

En 1948 los laboratorios Bell, presentaron la válvula con función de control de semiconductor (el "Transistor"). En 1958, Arthur Schawlow y Charles Townes idearon el láser, llevado a la práctica con éxito por primera vez en 1960 por Theodor H. Maiman. En 1962 se inventaron los emisores láser de semiconductores, que rápidamente encontraron aplicaciones en el campo de la ingeniería, particularmente en las comunicaciones. Los Ingenieros que trabajaban en este área, pronto se dieron cuenta que un haz láser usado como portadora era capaz de llevar mas información que una señal de radio frecuencia convencional aunque presentaba el inconveniente de no ser apto para cubrir grandes distancias a cielo abierto ya que la mínima variación de las condiciones ambientales producían una gran perturbación en el enlace. Por ejemplo, resultaba mas fácil transmitir un rayo láser de la Tierra a la Luna que intentar lo propio desde el centro a un suburbio de cualquiera de las populosas ciudades industriales norteamericanas. Paralelamente se había empezado a trabajar en el desarrollo de fibras ópticas que de alguna manera podían llegar a ser una solución para el problema planteado, y se vislumbraba que la asociación entre estos dos elementos podía llegar a ser ventajosa con el tiempo. Primero se desarrollaron unos tubos huecos y espejados con un complicado sistema de lentes. En 1966 Charles Kao y Geoges A. Hockman rescataron, en Inglaterra, la idea de J. Tyndall y propusieron utilizar una fibra de vidrio como material conductor, se efectuaron los primeros ensayos y pruebas pero se decidió esperar a la aparición de fibras que tuvieran atenuaciones menores a 20dB/Km para intentar una aplicación práctica, lo cual fue conseguido por la firma "Corning Glass" en 1970. Hoy en día, las perdidas en las modernas fibras ópticas han sido reducidas a valores tan bajos como 0,2dB/Km.

También en 1976 se ensayó el primer sistema de telefonía por Fibra óptica en la planta de la Western Electric de Atlanta (EEUU), y desde ese mismo año la compañía Siemens esta utilizando en Munich (Alemania) un tramo experimental de 2,1 km para la transmisión de señales telefónicas , de TV y de videotelefonos.

En 1977, Las compañías AT&T y GTE iniciaron la instalación de sistemas de fibras ópticas para el trafico comercial de telefonía

En 1990 fue posible el tendido de un cable de comunicaciones submarino entre Europa y el Continente Norteamericano sin la necesidad de estaciones repetidoras en el océano Atlántico.

1.3 VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LAS FIBRAS ÓPTICAS.

1.3.1 VENTAJAS.

1- Gran ancho de banda. Una fibra óptica es el medio físico con mayor capacidad de transmitir información que existe en la actualidad. Esta mayor capacidad puede explicarse por dos razones, por un lado, el mayor ancho de banda que pueden soportar,, (lo cual posibilita el manejo simultáneo de gran cantidad de canales independientes) y por otro lado la gran velocidad de propagación de la señal a su través.

2- Bajas pérdidas. Las características de baja atenuación y baja dispersión de las modernas fibras ópticas permite lograr satisfactoriamente enlaces de hasta 50 km., que no necesitan estaciones repetidoras. Las estaciones repetidoras para sistemas de comunicaciones son habitualmente una de las partes mas costosas del sistema.

3- Tamaño reducido. El reducido diámetro de una fibra hace que las mismas resulten muy apropiadas cuando el espacio utilizable para disponer un canal de comunicaciones es mínimo, por ejemplo:

- Aeronaves y Submarinos.
- Conductos de telefonía urbana subterráneos.
- Salas de computadoras, para las conexiones entre el equipamiento.

4- Peso reducido. La relación entre capacidad de canales respecto del peso en una red implementada con Fibras ópticas es sumamente conveniente.

5- Inmunidad a las interferencias electromagnéticas (EMI) y de radio frecuencia (RFI). A diferencia de los conductores por los cuales circulan corrientes, Las fibras ópticas (por las cuales solo se propaga luz) no irradian ni son afectadas o interferidas por ninguna forma de energía electromagnética.

La radiación electromagnética es una forma de contaminación ambiental que se ha tornado sumamente problemática en los últimos tiempos debido a la proliferación de equipos electrónicos en todos los ámbitos de la vida cotidiana.

Algunas computadoras personales emiten radiaciones e interferencias que afectan a los receptores de radio o televisión en un radio de varios metros. Se han detectado interferencias producidas por cajas registradoras electrónicas en el canal de comunicaciones de 113 Mhz usado por la aviación comercial. Los equipos de radar de las estaciones aéreas producen emisiones de radiación de una magnitud tan importante que han ocurrido casos en los que se han borrado los registros de memoria de cajeros automáticos ubicados en los aeropuertos.

Como las fibras ópticas, no producen ni reciben radiación electromagnética, constituyen el medio de transmisión ideal en lo que concierne a la inmunidad a los ruidos (EM/RFI). Además, como a través de la fibra propiamente dicha, no circulan corrientes, existe la ventaja adicional de que se constituyen en el medio mas seguro de transmitir información en ambientes potencialmente explosivos, o entre equipamiento que trabaja con altas tensiones.

6- Seguridad: Solo es posible interferir la señal que se propaga a través de una fibra interceptándola en forma individual, lo que normalmente es fácilmente detectable.

7- Flexibilidad de los sistemas: Los sistemas que se implementen en base a canales soportados por fibras ópticas seguramente podrán, con el tiempo, ser mejorados a medida que se presenten progresos en la tecnología de los emisores y los detectores usados.

1.3.2 LIMITACIONES

1- Dificultades para la manipulación de las fibras. El equipamiento, y las herramientas que se necesitan para trabajar con fibras ópticas no es convencional y requiere de personal capacitado y entrenado para su manejo.

2- Baja eficiencia de los dispositivos que se usan como interfaz con el equipamiento electrónico.

3- La no linealidad de las fuentes ópticas y detectores, limitan las aplicaciones analógicas.

4- Sin polaridad. A diferencia de lo que ocurre con líneas conductoras, no es posible trabajar con señales de tres niveles (Positivo - Negativo - Cero).

5- Dependencia. Como las fibra óptica casi siempre esta en interfaz con equipos y dispositivos electrónicos, casi siempre se termina necesitando una línea conductora eléctrica adicional.

6- Reparación complicada. Las instalaciones de cables con fibras ópticas son muy sensibles al daño intencional (sabotaje), y su reparación puede ser complicada y costosa.

Tabla de comparación de características principales entre los distintos medios

MEDIO	DISTANCIAS (rango)	ANCHO DE BANDA	PERDIDAS (a 20MHz)	INMUNIDAD EMI/RFI	SEGURIDAD (Contra uso clandestino)	COSTO	COMENTARIOS
Cables de Fibras ópticas	2-10 km	>500 MHz	1-8 dB/km	Excelente	Muy buena	Elevado	Costos con tendencia a bajar rápidamente.
Línea telefónica (convencional, PBX)	---	< 50 KHz.	Elevado	Pobre	Pobre	Bajo	Bajos costos de instalación.
Cable multi-conductor plano.	< 100 m	<10 MHz.	Elevado	Pobre	Razonable	Elevado	Se puede conseguir blindado.
Par retorcido (blindado)	<1200 m	<100 KHz	Elevado	Muy buena	Razonable	Bajo	Económico para distancias limitadas.
Balanceado axial (Twinax)	< 1km	<200MHz	50/100 dB/km	Muy buena	Razonable	Elevado	Impedancia controlada
Cable coaxial	< 2km	<400MHz	6/60 dB/km	Razonable	Razonable	Bajo a muy elevado	
Radiación infrarroja	< 300 m	< 20 MHz	Elevado	Buena	Razonable	Habitualmente elevado. Potencialmente bajo	(Para espacio libre); sigue línea visual; rango reducido con niebla (depende de la humedad)
Microondas (radiación)	< 50 km horizontal)	< 100 MHz		Pobre	Razonable	Elevado	(Para espacio libre); sigue línea visual. Las pérdidas dependen del tamaño de la antena.

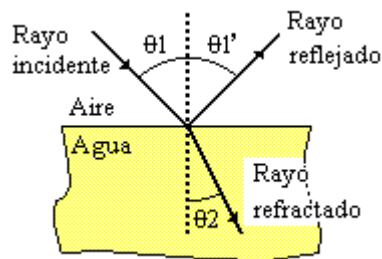
Tabla comparativa de las propiedades principales de los distintos tipos de cables.

Propiedades	Fibras Ópticas	Cable Coaxial	Par Retorcido
Inmunidad a los ruidos (RFI/EMI)	Si	No	No
Aislamiento eléctrico total	Si	No	No
Elevada seguridad de transmisión.	Si	No	No
Baja modulación cruzada	Si	No	No
Peligro de chispas o fuego	No	Si	Si

1.4 LA LUZ, ¿ONDA O PARTÍCULA?.

Tal como se ha explicado anteriormente, durante mucho tiempo ha existido una controversia entre los físicos a raíz de distintas posturas sobre la naturaleza de la luz. La Física aristotélica, postulaba a la luz como compuesta de finas partículas que se propagaban a velocidad infinita. En 1638, Galileo plantea la posibilidad de que realmente la luz se desplaza a una velocidad muy elevada pero no infinita e incluso propone un método para medirla. También a Galileo se le atribuye la invención del telescopio que se basa en la combinación de lentes de aumento, y es justamente debido a las lentes cuyas propiedades de aumento (a causa a la "refracción") no podían ser explicadas en base a la teoría de Aristóteles que se comenzó a buscar una teoría alternativa.

Es a causa de la refracción de la luz que cuando se introduce alguna cosa, tal como un palo o una vara en el agua, esta parece "quebrarse" en la superficie de la misma.



Reflexión y refracción de un rayo de luz al pasar del aire al agua

Las leyes que gobiernan la reflexión y la refracción de un rayo de luz cuando el mismo pasa por una superficie que separa un medio transparente a otro (también transparente) habían sido establecidas de manera experimental por Willebrod Snell (1591 -1626) quien agregó al principio de Euclides (Ley de reflexión), el principio de refracción, estas leyes son:

- El rayo reflejado y el rayo refractado están en el plano formado por el rayo incidente y la normal a la superficies en el punto de incidencia.

- Para la reflexión se cumple que:

$$\theta_1 = \theta_1'$$

- Para la Refracción se cumple que:

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

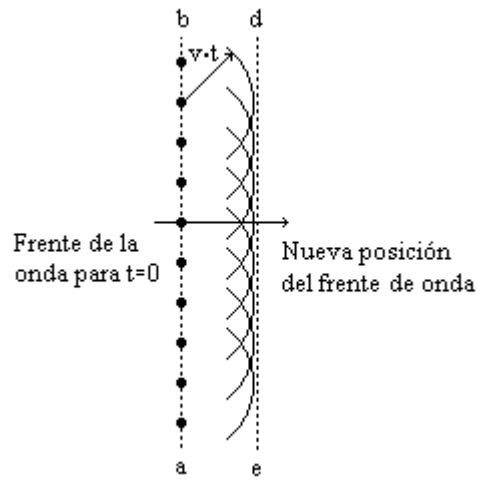
Donde n_1 y n_2 son el "índice de refracción" de cada uno de los medios transparentes.

El físico británico Isaac Newton elaboró una teoría corpuscular para la luz que requería una velocidad de propagación finita y distinta de acuerdo al "medio" y al "color" de la luz (Explicó y demostró que la luz blanca es en realidad una mezcla de luz de varios colores). El modelo explicaba el fenómeno de la refracción pero dado que se trataba de una teoría esencialmente mecanicista (Hay que recordar que Newton tenía una fuerte inclinación en ese sentido) requería que la luz viajara a mayor velocidad en medios tales como el vidrio y el agua, aparentemente mas densos, que en el aire.

En base a este modelo, Rene Descartes pudo fundamentar teóricamente la ley de Snell (por eso en Francia se la conoce como ley de Descartes). Sin embargo existía una cuestión que planteaba una contradicción, ¿Porque motivo si la luz esta formada por partículas, estas habrían de acelerarse al pasar del aire a un medio mas denso como el agua, si en cambio no sucede lo mismo con otras cosas, por ejemplo una piedra que se arroja al agua?

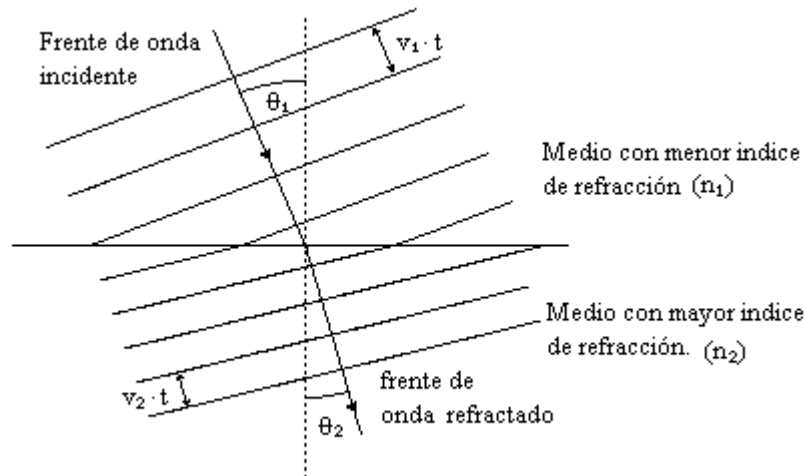
La explicación llevo a partir de la hipótesis elaborada en 1678 por el físico holandés Christiaan Huygens que postulaba a la luz simplemente como un fenómeno ondulatorio. Esta teoría no dice nada a cerca de la naturaleza de las ondas, y en particular sobre el carácter electromagnético de la luz (que fue demostrado un siglo después por Maxwell). Huygens no supo si la luz era una onda transversal o longitudinal, no supo las longitudes de onda de la luz visible, sabia poco de la velocidad de la luz. Sin embargo, su teoría fue y es una guía útil para explicar el resultado de los experimentos efectuados durante muchos años, y también para fines pedagógicos y ciertos fines prácticos.

La teoría de Huygens esta fundada en una construcción geométrica, llamada "principio de Huygens" que nos permite saber donde esta un frente de onda en un momento cualquiera en el futuro si conocemos su posición actual; dicho principio es : "Todos los puntos de un frente de ondas se puede considerar como centros emisores de ondas esféricas secundarias. Después de un tiempo t , la nueva posición del frente de onda seria la superficie tangencial a esas ondas secundarias"



Por ejemplo: Dado un frente de onda plana en el espacio libre ab , si de acuerdo al principio enunciado consideramos varios puntos en ese plano como centros emisores de pequeñas ondas secundarias que avanzan como ondas esféricas, en un tiempo t el radio de estas esferas es $v \cdot t$, (donde v es la velocidad de la luz en el medio a través de la cual se propaga) . El plano tangente a esas esferas al cabo del tiempo t esta representado por ed . Como era de esperar es paralelo a ab y esta a una distancia $v \cdot t$. Los frentes de ondas se propagan como planos a una velocidad v , y un "rayo de luz" simplemente es una representación de la dirección y sentido en el cual se produce dicha propagación.

La teoría ondulatoria se puede usar para explicar de manera fácil el fenómeno de refracción en medios mas densos (como el vidrio o el agua) suponiendo que en ellos la velocidad de la luz es menor que en el aire

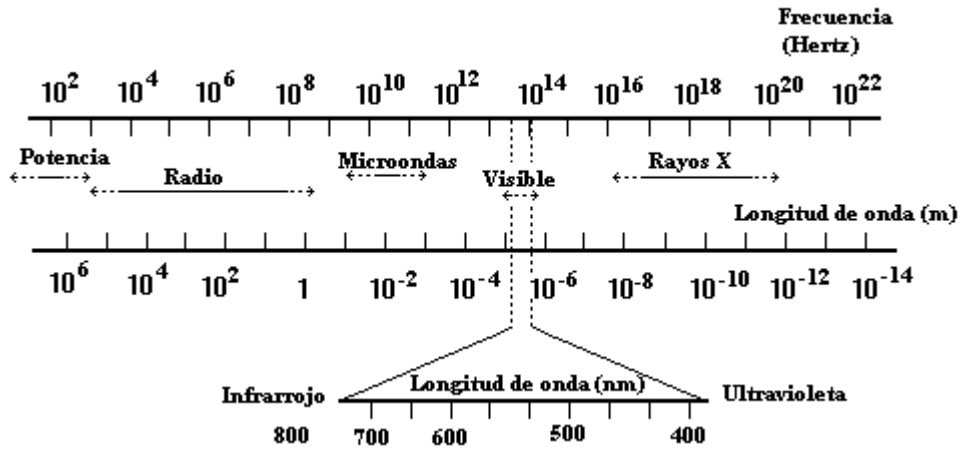


Como regla general puede decirse que cuando un rayo de luz atraviesa la frontera desde un medio en donde la velocidad de propagación es mayor a otro donde dicha velocidad es menor, el rayo se acerca a la normal a la superficie de separación. La reciproca es desde luego igualmente valida. Es decir que el índice de refracción de un material determinado es mayor a medida que menor es la velocidad de propagación de la luz en el mismo.

Posteriores comprobaciones experimentales demostraron que el índice de refracción de cualquier elemento o material (n) es la razón entre la velocidad de la luz en el vacío ($c = \text{aprox. } 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$), y la velocidad de propagación en dicho elemento (v).

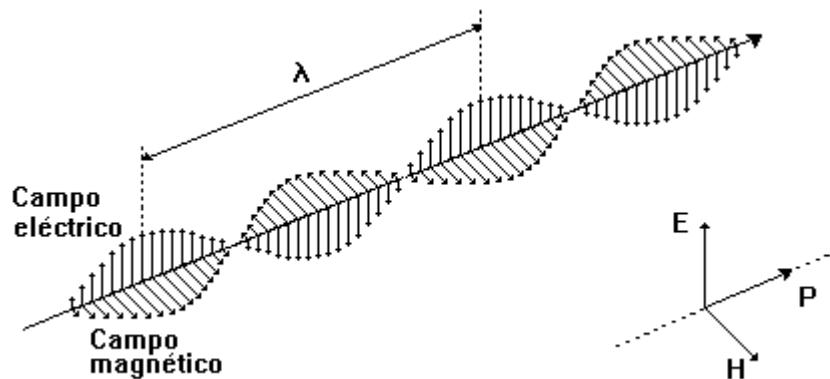
$$n = c / v$$

Como ya se ha dicho, Maxwell demostró que la luz es simplemente uno de los componentes del espectro electromagnético que se muestra en la siguiente figura.



Todas estas componentes difieren entre si solamente por la frecuencia de las mismas (y por consiguiente en su longitud de onda), y se propagan con la misma velocidad (**c**) en el espacio libre. El espectro electromagnético no tiene limites definidos, ni superior ni inferior.

Así como las ondas de radio, microondas, rayos **X**; la luz esta compuesta un campo eléctrico **E**, y un campo magnético **H**, perpendiculares entre si que se propagan en sentido perpendicular al plano formado por estos campos y en la dirección determinada por el vector de Poynting **P**.



La longitud de onda es la distancia entre los mismos puntos de dos ciclos consecutivos mientras la onda viaja en un determinado medio (λ en el dibujo precedente).

La longitud de onda y la frecuencia de una onda están en relación inversa una de otra . Así la longitud de onda es igual a la velocidad de propagación de la misma (**v**) dividida por la frecuencia (**f**).

$$\lambda = v/f$$

El espectro visible abarca aproximadamente frecuencias comprendidas entre $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz (es decir poco más o menos 750.000 Ghz) que corresponden al color violeta, hasta unos $4,28 \cdot 10^{14}$ Hz, que corresponden al color rojo. Como puede verse son valores numéricos extremadamente elevados y por ello resulta mas práctico usar para graduar el espectro de la luz su longitud de onda en el vacío (es decir tomando como velocidad de propagación $3 \cdot 10^8$ m/s). Así la luz de color rojo tiene una longitud de onda de 700 nm y la violeta 400 nm.

La teoría ondulatoria explica bastante bien todos los fenómenos asociados con la óptica, y es suficiente para entender como y porque la luz se propaga en una fibra óptica. Sin embargo presenta dificultades a la hora de intentar la interpretación de los fenómenos que tienen que ver con la fotoelectricidad.

En 1921, Albert Einstein presento una nueva teoría corpuscular para la luz, cuya innovación respecto de la antigua teoría era la postulación de la existencia de los "Fotones". Con este nuevo modelo fue posible explicar el fenómeno de la fotoelectricidad, que se conocía desde hacia algún tiempo pero que hasta ese momento no podía explicarse.

La nueva idea, postulaba a los fotones como partículas compuestas de energía pura y carentes de masa. Cuando un cuerpo emite luz, lo hace en forma de radiación electromagnética pero no de forma continua, sino en forma de "Paquetes" cuya energía es:

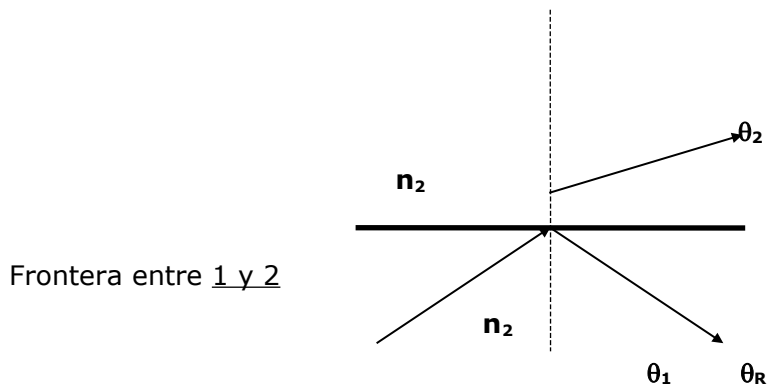
$$E = h \cdot c / \lambda$$

Donde **E** es la energía , **h** es un valor fijo denominado "Constante de Planck" (que vale $6,626 \cdot 10^{-34}$ Joules/ s) , **c** es la velocidad de propagación de la luz en el medio considerado, y **λ** es la longitud de onda de la radiación.

El comportamiento de la luz como partícula explica como las fuentes generan luz y como los detectores son capaces de convertir la luz en energía eléctrica, y estos conceptos serán importantes a la hora de considerar los transductores usados en la tecnología de fibras ópticas.

1.5 LA REFLEXIÓN INTERNA TOTAL (TIR)

Considérese el caso de un rayo luminoso que pasa de un medio de elevado índice de refracción a otro cuyo índice de refracción es menor.



De la ley de Snell

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

Puede deducirse que

$$\text{sen } \theta_1 = (n_2 / n_1) \text{ sen } \theta_2$$

Si el índice de refracción del medio 1 (n_1), es mayor que el del medio 2 (n_2), el ángulo θ_2 será en general mayor que θ_1 ; y a medida que este aumenta, θ_2 hará lo propio mas rápidamente. Existe un valor de θ_1 para el cual θ_2 es un ángulo recto, a partir de acá no existe refracción en el medio 2 y el rayo resulta

reflejado por completo de vuelta hacia el medio **1** en la superficie de frontera entre **1** y **2** . Esto se conoce como "Reflexión Interna Total" (TIR). Resumiendo:

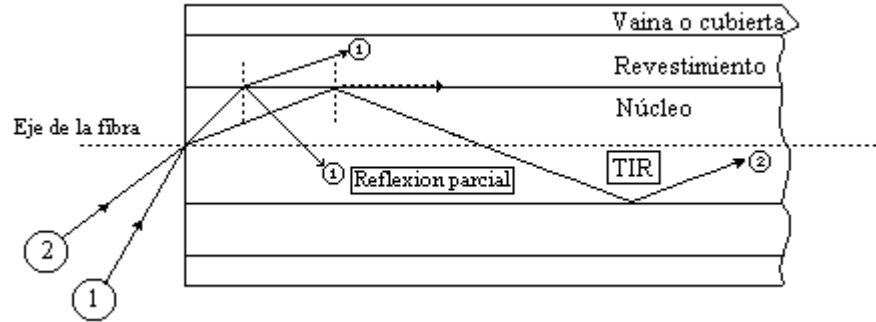
Quando: $n_1 > n_2$	\rightarrow	Siempre será: $\theta_2 > \theta_1$
Y en particular si: $\theta_2 = 90^\circ$	\rightarrow	Ocurre la TIR , es decir que: $\theta_1 = \theta_R$
y como: $\text{sen } 90^\circ = 1$	\rightarrow	en este caso: $\text{sen } \theta_R = (n_2 / n_1)$

(Ecuaciones 3-2)

1.6 GEOMETRÍA DE UNA FIBRA ÓPTICA.

Una fibra óptica consiste en un filamento de material transparente compuesto de una parte central llamada núcleo (que es la que conduce la luz), rodeado de un revestimiento que tiene un índice de refracción menor que el del núcleo y una protección externa llamada vaina o cubierta cuya función es principalmente de protección.

Todos los rayos de luz que puedan penetrar al núcleo de la fibra desde el aire buscarán curvar su trayectoria hacia el eje de la misma, ya que están pasando de un medio con bajo índice de refracción (prácticamente la unidad) hacia un medio cuyo índice de refracción es mas elevado. Una vez que los rayos han penetrado en el núcleo, solo aquellos cuyo ángulo de incidencia respecto de la normal a la superficie que separa el núcleo del revestimiento, este por encima de un valor determinado se reflejaran completamente de vuelta al núcleo (TIR). De esta manera, y por sucesivas reflexiones, estos rayos podrán viajar a lo largo de la fibra y hasta el extremo final de la misma.

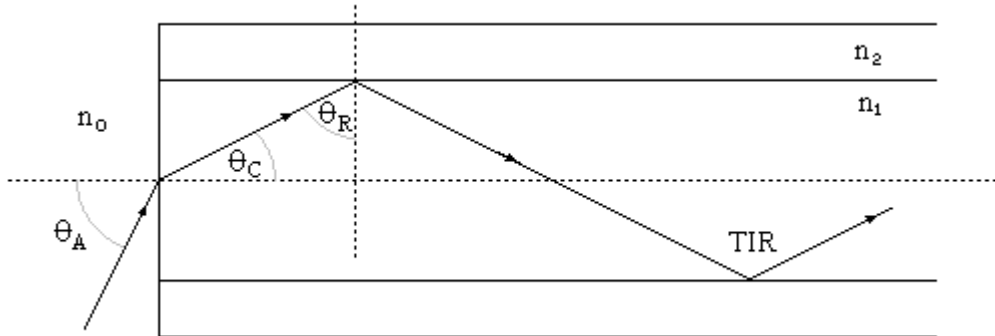


- $n_{\text{núcleo}} > n_{\text{revest.}} > n_{\text{aire}}$
- El rayo 1 se refleja parcialmente porque también se refracta.
- El rayo 2 se refleja totalmente

1.7 APERTURA NUMÉRICA.

En el dibujo precedente θ_A representa el valor del ángulo de incidencia por debajo del cual se produce el fenómeno de reflexión interna total. Este se denomina "ángulo de

aceptancia" y resulta importante determinar cuales son los parámetros que influyen en el valor del mismo.



Del esquema se puede ver que:

$$\text{sen } \theta_R = \text{cos } \theta_C$$

De la ley de Snell:

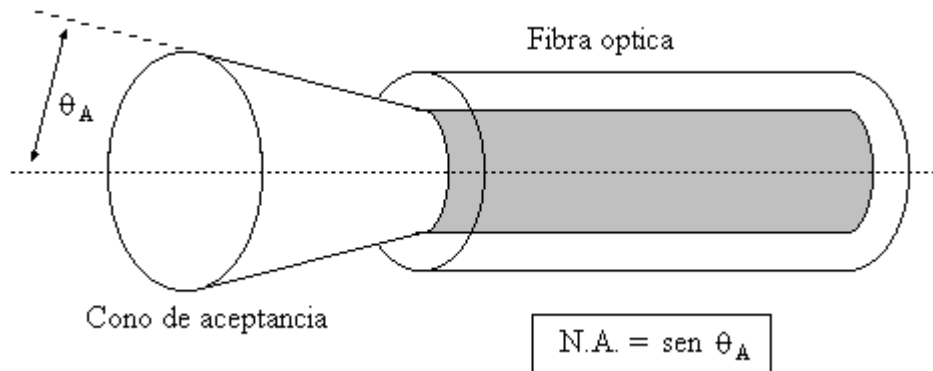
$$n_0 \text{ sen } \theta_A = n_1 \text{ sen } \theta_C$$

$$n_0 \text{ sen } \theta_A = n_1 (1 - \text{cos } 2 \theta_C)^{1/2} \quad , \quad \text{----- dado que: } \text{sen } \theta_C = (1 - \text{cos } 2 \theta_C)^{1/2} \quad \text{---}$$

$$\text{sen } \theta_A = n_1 (1 - \text{cos } 2 \theta_C)^{1/2} / n_0$$

Este valor se denomina "Apertura Numérica" (N.A),

Vale la pena aclarar que en realidad lo que existe es un "Cono de aceptación" que surge a partir de trasladar las conclusiones obtenidas de un modelo plano, a uno tridimensional.



1.8 MODOS DE LA FIBRA.

Los rayos de luz pueden propagarse por una fibra óptica siguiendo varios caminos siempre y cuando se cumpla con los límites impuestos por la apertura numérica. Cada uno de estos caminos se denomina "modo de propagación". Aquellos rayos que se propagan con pequeños ángulos respecto del eje de la fibra se denominan "modos de bajo orden", los que siguen trayectorias con ángulos grandes, se llaman "modos de orden elevado". El número de modos que pueden propagarse, que corresponde al número de diferentes caminos que un rayo de luz puede seguir para viajar a través de la fibra, depende principalmente del valor de la apertura numérica y obviamente también del diámetro del núcleo de la misma. Para valores grandes de diámetro, (y aunque el ángulo de aceptación sea pequeño), el cono de aceptación es grande, entonces más cantidad de luz puede acoplarse a la fibra y en consecuencia habrá un gran número de caminos para la propagación (modos).

Esta relación es lineal solo en apariencia, ya que en realidad la luz es una onda electromagnética, y la fibra óptica también puede ser considerada como una guía de ondas circular de material dieléctrico. La real naturaleza discontinua de la relación, se pone en evidencia cuando el diámetro del núcleo, comienza a hacerse del orden de la longitud de onda de la luz. Entonces, el número de modos que puede soportar una fibra óptica depende del "Parámetro de Frecuencia Normalizada" o "*número - V*" de la

fibra. Este parámetro viene definido en relación con el diámetro del núcleo, la apertura numérica (NA) y la longitud de onda de la luz usada , de la siguiente manera:

$$V = \pi \cdot d \cdot (NA) / \lambda$$

Donde "d" es el diámetro del núcleo

El numero de modos puede ser calculado de manera aproximada como sigue.

Para fibras de índice escalonado (*):

$$N = V^2 / 2$$

Para fibras de índice gradual (*):

$$N = V^2 / 4$$

(*) Las fibras de índice escalonado, y de índice gradual son dos tipos particulares de fibras que serán estudiadas luego.

Cuando el numero "V" de una fibra de índice escalonada se aproxima a 2,405 para una determinada longitud de onda, la fibra soportara solo un único modo. En otras palabras, cuando el diámetro del núcleo y la N.A. son muy pequeñas, la fibra solo admite un único modo de propagación, Este tipo de fibras se denominan "Fibras de modo único" o "monomodo" .

Ejercicio de ejemplo 1:

Calculemos el diámetro del núcleo de una fibra óptica que se supone solo puede soportar un único modo de propagación para una señal luminosa cuya longitud de onda es 1300 nm. Se supone que el valor de apertura numérica de la fibra es 0,12 .

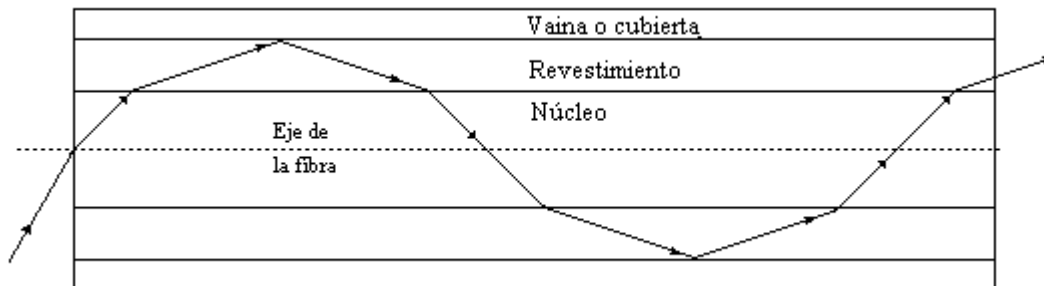
Solución:

Tal como se ha explicado, cuando el valor del parámetro V se aproxima a 2,405 (para una determinada longitud de onda, la fibra puede soportar un único modo de propagación, por lo tanto:

$$V = 2,405 = \pi \cdot d \cdot NA / \lambda$$

$$d = (2,405) \cdot \lambda / \pi \cdot NA$$

Además de los modos de orden bajo y elevado, existen también otros modos secundarios denominados modos *fugados* que se propagan parcialmente a través del revestimiento.



Modos de propagación fugados.

Los modos fugados se desvanecen y pierden rápidamente en una fibra multimodo, pero pueden propagarse por largas distancias en una fibra monomodo. La presencia de estos modos secundarios puede ocasionar errores cuando se miden parámetros tales como la apertura numérica o las pérdidas de un sistema con fibra óptica. Afortunadamente existen varios métodos prácticos para eliminar estos modos secundarios y/o los errores que se producen.

Ejercicio de ejemplo 2 (Apertura numérica y modos de una fibra):

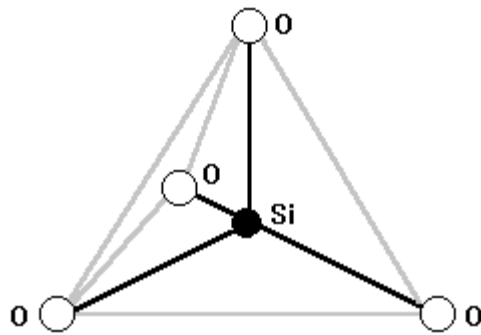
Supongamos una fibra óptica que tiene un núcleo cuyo diámetro es $50 \mu\text{m}$, y su índice de refracción es $n_{\text{núcleo}} = 1,55$, en tanto que el revestimiento tiene un índice de refracción $n_{\text{revest.}} = 1,5$.

Se pide averiguar: El valor de la apertura numérica. El parámetro V de la misma. La cantidad de modos que pueden propagarse si se supone que la fuente óptica a utilizarse emite con una longitud de onda de $632,8 \text{ nm}$.

1.9 CON QUE ESTA HECHA UNA FIBRA ÓPTICA?

Las fibras ópticas que se usan en telecomunicaciones normalmente están fabricadas con vidrio. La materia prima para estos vidrios es el cuarzo que se encuentra como principal componente en las arenas minerales (deben distinguirse de las arenas que se encuentra en playas junto al mar que son orgánicas, es decir compuestas de restos de caparzones y conchas de animales marinos). El cuarzo puro es básicamente un óxido de silicio que funde a una temperatura de $2000 \text{ }^\circ\text{C}$. Aunque la molécula de cuarzo es un cristal, el vidrio es en realidad un sólido (*) no cristalino que se obtiene como un producto de fusión que se enfría sin cristalizar debido principalmente a la presencia de impurezas que se añaden durante el proceso de fabricación (se suelen agregar óxidos de sodio, potasio o calcio). Estas impurezas también alteran el índice de refracción del vidrio, que para el cuarzo puro es $1,46$. Obviamente el índice de refracción de cualquier material transparente varía con la longitud de onda considerada, por ello cuando se lo especifica se toma como referencia una longitud de onda determinada, que corresponde a la de la luz amarilla de una llama de Sodio (589 nm). En la figura siguiente puede verse la estructura molecular del cuarzo.

() Hay quienes sostienen, con sobradas razones y pruebas a favor, que en realidad el vidrio no es un sólido, sino un líquido en estado coloidal, cuya viscosidad es elevadísima.*



Estructura de una molécula de cuarzo (Si O₄)

La fibra esta construida por dos cilindros coaxiales de vidrio de sílice, el núcleo se construye con una elevadisima pureza ya que por el mismo debe propagarse la luz, en tanto que los requerimientos para el revestimiento son un poco menos exigentes. El índice de refracción del núcleo es de un valor de alrededor de 1,5 y el del revestimiento ligeramente menor (p. ej. 1,48). La cubierta normalmente es de plástico y suele estar coloreado a los fines de identificación de la fibra. El conjunto normalmente se encuentra a su vez cubierto por una vaina o tubo plástico que puede ser holgada (la fibra se desliza dentro de la vaina) o ajustada.

También existen fibras ópticas hechas de otros materiales transparentes y en particular están aquellas que son totalmente de material plástico. Estas últimas son mas baratas que las de vidrio pero comparativamente tienen bastante mas atenuación y reducido ancho de banda.

1.9.1 ¿PORQUE EL VIDRIO ES TRANSPARENTE?

La molécula de cuarzo esta formada por cuatro átomos de Oxigeno y uno de Silicio, que forman una estructura estable en razón de la existencia de ligaduras covalentes, lo cual significa que los electrones de las ultimas órbitas de cada átomo son compartidos entre átomos adyacentes. Estos electrones están sostenidos en cada posición por lo que los químicos denominan las "fuerzas restauradoras de la ligadura". En un equivalente mecánico, esto corresponde a pequeñas masas suspendidas en el

espacio por la acción de resortes. Un sistema de este tipo posee una frecuencia natural de resonancia.

La luz es una onda electromagnética cuyo vector \hat{E} hace vibrar los electrones; si la frecuencia de la perturbación está por debajo de la frecuencia natural de los electrones, estos pueden seguir las vibraciones forzadas y la onda se propaga; si en cambio la frecuencia de la luz es mayor que la de resonancia, la onda resulta absorbida por el medio.

Esto también explica porque algunos sólidos son opacos a la luz pero transparentes para otros tipos de radiación electromagnética (Por ejemplo la madera para ondas de radio)

Entonces el vidrio, al igual que otros sólidos, es transparente porque las ondas de luz que inciden sobre el mismo, hacen que los electrones de la molécula, oscilen periódicamente en respuesta al vector campo eléctrico, que varía con el tiempo, de la onda incidente. La onda que avanza por el medio es la resultante de la onda incidente y de las radiaciones de los electrones oscilantes. La onda resultante tiene una máxima intensidad en la dirección del rayo incidente si el medio es homogéneo, o si las moléculas están muy cerca una de otra, ya que las cargas oscilantes actúan al unísono, es decir coherentemente.

Cuando la luz pasa a través de un gas transparente (como el aire), se produce normalmente un efecto de dispersión de la onda, ya que las moléculas están separadas entre sí y el medio no resulta completamente homogéneo, de manera que los electrones oscilan de modo independiente y no al unísono. Así pues, no es tan probable que se anulen por completo las perturbaciones ondulatorias que no están dirigidas en dirección distinta a la del sentido de los rayos de luz, por lo cual hay un efecto de dispersión lateral. (Lo propio sucederá en la estructura del vidrio si se presentan pequeñas imperfecciones en su disposición).

Un ejemplo familiar es la dispersión de la luz solar por las moléculas de la atmósfera terrestre. Si no hubiera atmósfera, el cielo se vería negro salvo cuando se dirigiera la vista directamente al Sol (así ocurre en la Luna). El color celeste del cielo es explicable por el hecho de que la frecuencia natural de los electrones de los átomos de las moléculas de la porción inferior de la atmósfera está próxima a la región que corresponde a la luz azul o violeta, por lo tanto le resulta más fácil forzar la

oscilación de los electrones a las componentes espectrales elevadas de la luz blanca del Sol. En cuanto a las radiaciones ultravioletas, estas se encuentran más allá de dicha frecuencia natural y por lo tanto el aire es un medio poco favorable para su propagación; además también son parcialmente absorbidas por las capas exteriores de la atmósfera (la por estos tiempos famosa "capa de Ozono").

Desde la década del 70 se sabe, gracias a las imágenes enviadas a la Tierra por las sondas Vikingo, que el cielo del planeta Marte, cuya atmósfera es más tenue que la de la tierra y con una composición distinta (que incluye partículas de polvo en suspensión), es de un color naranja.

1.10 TIPOS DE FIBRAS ÓPTICAS.

En este apartado se intentará hacer una clasificación básica de los tipos de fibras ópticas más comúnmente usadas en telecomunicaciones, es decir las de vidrio. Normalmente en aplicaciones prácticas reales, se utilizan conjuntos o haces de fibras ópticas, empaquetadas en un único envoltorio que se denomina "Cable de fibras ópticas". Suele ser muy común que el fabricante de Cables, no sea a su vez quien produce la fibra propiamente dicha. Una discusión y clasificación más detallada de los distintos tipos de cables se efectuará más adelante.

Las fibras ópticas se diferencian entre sí de acuerdo con las dimensiones de la misma y en relación con el índice de refracción del material empleado.

La tabla siguiente muestra cuáles son las dimensiones de los principales tipos de fibras utilizadas en telecomunicaciones.

Diámetros de una fibra óptica y de su protección. (en μm)

Tipo	Núcleo	Revestimiento	Recubrimiento	Tubo o vaina
I	4 a 10 (típicamente 8)	125	250 a 500	900 a 2000
II	50	125	250 a 500	900 a 2000
III	62,5	125	250 a 500	900 a 2000

IV	85	125	250 a 500	900 a 2000
V	100	140	250 a 500	900 a 2000

El lenguaje habitual para designar una fibra es en correspondencia con el tamaño de la misma, y normalmente se especifica con la relación "Núcleo/Revestimiento". Por ejemplo, el tipo II se conoce como fibra 50/125.

Tipo I

Las fibras 4/125 a 10/125 son normalmente monomodo. Toleran un elevado ancho de banda, son de baja dispersión (*) y atenuación, pero son las más difíciles de manipular y requieren el uso de transductores de gran calidad y conectores de alta precisión. Se utilizan frecuentemente para aplicaciones de transmisión de datos a alta velocidad o para largas distancias. Si bien la fibra en sí es más barata que las del tipo multimodo, el equipamiento que se requiere es mucho más caro.

Tipo II

Todas las fibras cuyo núcleo tiene un diámetro mayor a 50 μm son del tipo multimodo. Las fibras 50/125 fueron las primeras fibras para telecomunicaciones que se vendieron masivamente. Son de pequeña apertura numérica y por consiguiente la relación entre la potencia que se acopla a la fibra y la emitida por la fuente es normalmente reducida. Sin embargo, de todas las fibras multimodo, es la que tiene mayor ancho de banda.

Tipo III

Las fibras 62,5/125, es en la actualidad la más popular de las fibras multimodo. Tiene un ancho de banda ligeramente menor que la 50/125, pero su apertura numérica es mayor y posibilita un mejor acoplamiento de las fuentes. Posee también menos pérdidas por microcurvaturas.

Tipo IV

El tamaño 80/125 se usa principalmente en Europa, sus características son similares a la de tipo II, y como el diámetro del revestimiento es idéntico (125 μm) se pueden usar los mismos conectores y técnicas de empalme.

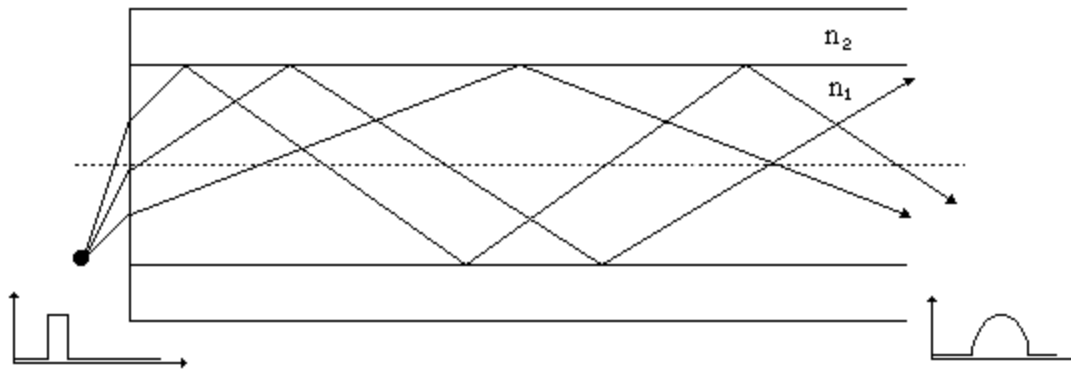
Tipo VI

El diámetro del núcleo de la fibra 100/140 , la convierte en la fibra mas fácil de manipular, es menos sensible a las tolerancias de los conectores, y a la acumulación de suciedad en los mismos. Acopla la mayor cantidad de luz de las fuentes, pero tiene un ancho de banda mas reducido que las de tamaño mas pequeño. Por esto se las utiliza principalmente en sistemas de comunicaciones de reducida longitud, con varios conectores y que no requieren elevada velocidad de transferencia de datos (por ejemplo: en instalaciones dentro de edificios). No es muy común y suele ser difícil de conseguir.

1.11 DISTINTOS TIPOS DE FIBRAS ÓPTICAS DE ACUERDO CON EL ÍNDICE DE REFRACCIÓN.

1.11.1 FIBRAS DE ÍNDICE ESCALONADO.

Respecto del índice de refracción del material empleado, existen básicamente dos tipos de fibras ópticas. Por un lado están aquellas denominadas de índice escalonado; en este tipo de fibra, el núcleo de la misma, posee un índice de refracción homogéneo en toda su sección, y lo mismo ocurre con el índice de refracción del revestimiento



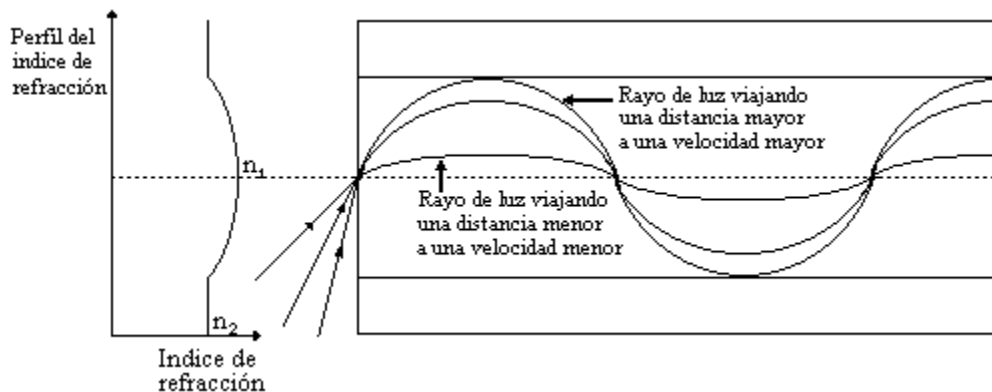
En el dibujo precedente corresponde a un esquema de una fibra multimodo de índice escalonado donde, como puede verse, los rayos de luz que parten al mismo tiempo de una fuente acoplada a un extremo de la fibra, pueden llegar a la otra punta en instantes diferentes en razón de que las distancias recorridas también son diferentes. Esto trae como consecuencia que un pulso transmitido se termine ensanchando en el tiempo. Por este motivo, las fibras multimodo de índice escalonado, que fueron las primeras fibras en fabricarse (y durante un tiempo las únicas disponibles para propósitos prácticos, han ido cayendo poco a poco en desuso, siendo sustituidas por un tipo más moderno de fibras denominadas de índice gradual; en cambio no ha sucedido así con las fibras monomodo de índice escalonado, que se continúan fabricando y utilizando.

1.11.2 FIBRAS DE ÍNDICE GRADUAL.

El índice de refracción del núcleo de una fibra de índice gradual no es de un valor homogéneo en toda la sección del mismo, sino que tiene un valor máximo en el centro que luego va decreciendo con el radio hasta hacerse igual al del revestimiento en la frontera con este.

Como consecuencia de esto, los rayos de luz siguen una trayectoria sinuosa en vez de un camino en zigzag (*), además, los caminos más largos son más rápidos, (porque el índice de refracción decrece al acercarse al revestimiento) y son más lentos en el centro del núcleo (donde el índice de refracción es más elevado). Si el perfil puede ajustarse de manera que la variación de la longitud de los caminos, sean

compensados por la correspondiente variación de la velocidad, el efecto de ensanchamiento de un pulso de luz que viaja por la fibra, se ve notablemente minimizado.

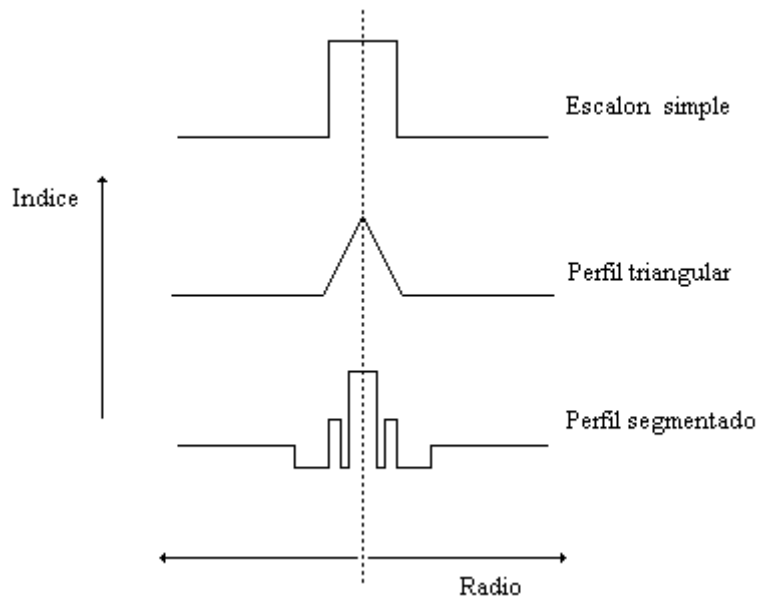


Las fibras de índice gradual (que son normalmente multimodo), aparecieron como una solución al problema del reducido ancho de banda soportado por las fibras multimodo de índice escalonado.

(*) Hay que decir que tanto en las fibras de índice escalonado como las de índice gradual, el camino seguido por los rayos de luz en el núcleo es en realidad una helicoides (los dibujos y gráficos anteriores son solamente una representación en dos dimensiones)

1.11.3 FIBRAS CON PERFILES ESPECIALES.

Hasta ahora las fibras monomodo han sido siempre de índice escalonado, sin embargo desde hace poco tiempo se han comenzado a producir también fibras monomodo con perfiles que no pueden ser catalogados estrictamente dentro de los escalonados. Se busca de esta forma lograr ciertas mejoras como por ejemplo, reducir las pérdidas por curvatura, aumentar la apertura numérica y reducir la dispersión cromática, (que ocurre como resultado de las diferentes velocidades de propagación de las componentes espectrales de una fuente de luz que no emite en una única longitud de onda).



Algunos perfiles especiales de fibras monomodos de última generación.

1.12 PÉRDIDAS EN LAS FIBRAS ÓPTICAS.

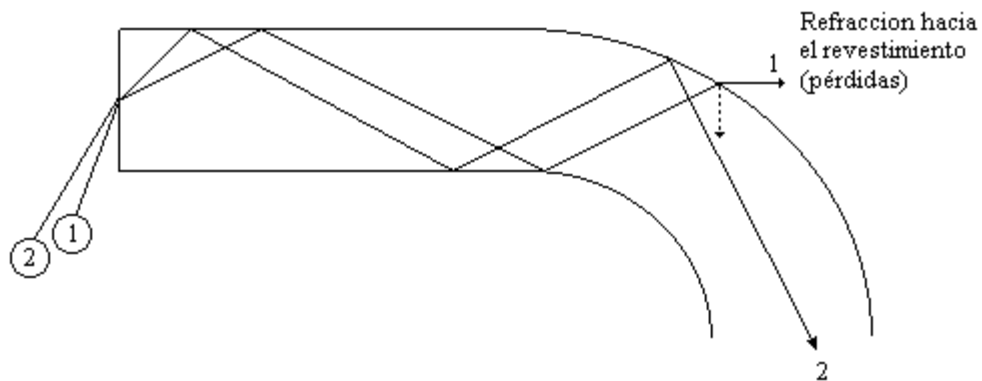
Cuando una fuente óptica se acopla a la punta de una fibra, la cantidad de luz que llega al extremo opuesto es en general menor que la original; lógicamente esto se debe a que en el camino se producen una serie de pérdidas. Por un lado es evidente que no toda la energía emitida por la fuente, puede acoplarse a la fibra, pero además, una vez que un rayo de luz ha penetrado en la misma, también puede ir sufriendo una disminución de su intensidad con la distancia a medida que viaja por el núcleo.

Las pérdidas pueden clasificarse, según las causas que las provocan, en pérdidas debidas a factores externos, y pérdidas por motivos intrínsecos de las fibras. Entre las primeras están por un lado las que se deben a los empalmes y conexiones entre

diferentes tramos de un sistema, y por el otro lado las que se producen debido a que al efectuar el tendido de un cable de fibras ópticas, es imposible seguir siempre trayectorias rectas y en algún lugar el cable debe forzosamente curvarse. Las pérdidas por causas intrínsecas son: la atenuación por absorción del vidrio; las pérdidas que se derivan de imperfecciones o defectos del vidrio y que se conocen como dispersión de Rayleigh; las pérdidas por defectos mecánicos que se producen en el proceso de fabricación (variación del diámetro del núcleo, presencia de contaminantes, etc.), y la reflexión de Fresnel en la frontera entre el vidrio y el aire que ocurre en ambos extremos de la fibra.

1.12.1 PÉRDIDAS POR CURVATURA.

El valor de apertura numérica de una fibra óptica corresponde al que se obtiene suponiendo que la misma se mantiene derecha. En el dibujo siguiente puede verse como se produce un efecto de reducción de la apertura numérica al curvar la fibra.



En condiciones normales, tanto el rayo **1** como el **2** se propagan por el núcleo. Sin embargo, cuando la fibra se tuerce, en esa zona el rayo **1** sufre una refracción hacia el revestimiento, (es decir que parte de la energía del mismo se pierde y no continúa su camino por la fibra).

Es evidente que la magnitud de la disminución de la NA, se corresponderá con el radio de la curvatura de la fibra. También el efecto puede entenderse como una anulación de los modos de propagación de orden elevado en fibras multimodo, de lo que también puede deducirse que a medida que el diámetro del núcleo es menor, el efecto de la curvatura se va reduciendo. Desde ambos puntos de vista, lo que se reduce es la capacidad de la fibra para acoplar luz del dispositivo que se use como emisor.

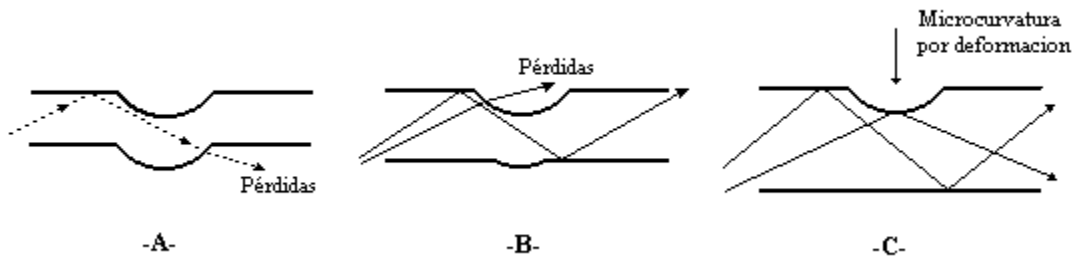
Si la fibra es monomodo, la curvatura casi no produce variación en la apertura numérica (que siempre es muy baja) sino que finalmente implica una disminución del ancho de banda de la misma.

En realidad, existe un valor mínimo para el radio de la curva, por encima del cual, las pérdidas son prácticamente despreciables, y por lo tanto ignoradas. Este radio de curvatura mínimo depende, entre otras cosas, principalmente del diámetro del núcleo y al respecto se puede decir que en general las fibras pueden ser más curvadas a medida que el núcleo es más pequeño..

Sin embargo, corresponde también diferenciar entre las curvaturas grandes (que son las que normalmente deben producirse por requerimientos de la instalación) y las "microcurvaturas", que se producen por ejemplo, por un aplastamiento o

deformación de la fibra, lo cual puede ser un defecto muy común al efectuar el montaje de conectores ya que los mismos se sujetan a la fibra mediante presión (en términos corrientes se "crimpean"), por ello se debe prestar especial atención a las herramientas utilizadas.

Estas microcurvas pueden afectar la propagación de manera distinta dependiendo de la forma de la misma, y del diámetro del núcleo de la fibra.



En la figura -A- se muestra el efecto de una microcurvatura en una fibra de pequeño diámetro donde la deformación es igual en toda la sección transversal y puede llegar el caso en que la pérdida sea total. La figura -B- muestra el caso de una fibra algo más gruesa que la anterior en la cual la deformación no es igual; algunos modos resultan atenuados, pero otros pueden propagarse igualmente. El caso -C- muestra un caso donde una fibra de sección relativamente grande comparada con las anteriores sufre una alteración mínima ya que la deformación solo está presente en uno de los lados.

1.12.2 PÉRDIDAS POR ACOPLAMIENTO.

Cuando una fibra óptica se acopla a un emisor de luz, un detector de luz u otra fibra, la unión entre la fibra y la otra entidad no es perfecta, por lo que ocurre una pérdida en la frontera. Cualquier energía de luz que entre en la fibra fuera del cono de aceptación se pierde a través del revestimiento. Como luego se verá es posible definir valores de apertura normal también para fuentes emisoras y detectores de luz. Cuando una fuente de luz tiene un cono de aceptación estrecho respecto del que tiene la fibra receptora, no existe pérdida alguna, siempre que la energía luminosa no este fuera de dicho cono. En cambio si una fibra fuente tiene un cono de aceptación amplio respecto de un detector o de una fibra receptora si hay pérdidas, y estas se calculan de la siguiente manera:

$$\text{Pérdidas} = 20 \log \frac{NA_2}{NA_1}$$

(Donde NA_1 es el valor de apertura numérica mas grande y NA_2 el valor mas chico.)

De lo expresado, puede deducirse que en general no es una buena idea intentar acoplar o empalmar fibras ópticas de distinto tamaño, y aunque este fuera el mismo, aun así habría que comprobar si los valores de apertura numérica coinciden (lo cual puede no ser así tratándose de distintos fabricantes).

1.12.3 PÉRDIDAS INTRÍNSECAS.

Tal como se ha explicado anteriormente, cuando la luz atraviesa un medio transparente como el vidrio, la perturbación ondulatoria hace que los electrones de las moléculas, oscilen periódicamente en respuesta al vector campo eléctrico. Es evidente que durante este proceso, parte de la potencia contenida en la onda luminosa, es cedida a la molécula, y transformada en otro tipo de energía (por ejemplo calor). Visto desde el exterior, en el vidrio se produce una "absorción" de energía, la magnitud de la cual guarda cierta relación con la frecuencia de resonancia molecular y con la longitud de onda de la luz considerada. Para el vidrio de sílice puro, la absorción responde aproximadamente a la siguiente expresión:

$$\text{Absorción} \propto C \cdot 10^{1/\lambda}$$

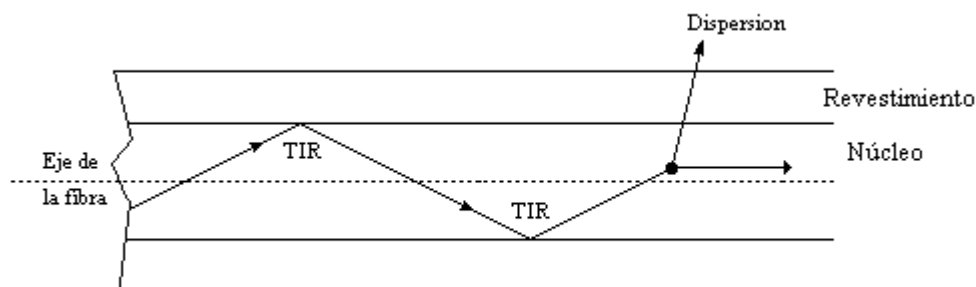
Donde C es una constante y λ es la longitud de onda de la luz considerada.

En el vidrio, hay además distintas impurezas o contaminantes, que colaboran en aumentar la absorción. Por ello la curva de absorción en función de la longitud de onda no tiene un desarrollo suave sino que presenta irregularidades que determinan ciertas bandas de absorción selectivas, entre las cuales pueden citarse:

- Banda del Ultra violeta.
- Banda del Infra rojo.
- Bandas del radical OH^-
- Bandas de iones metálicos.

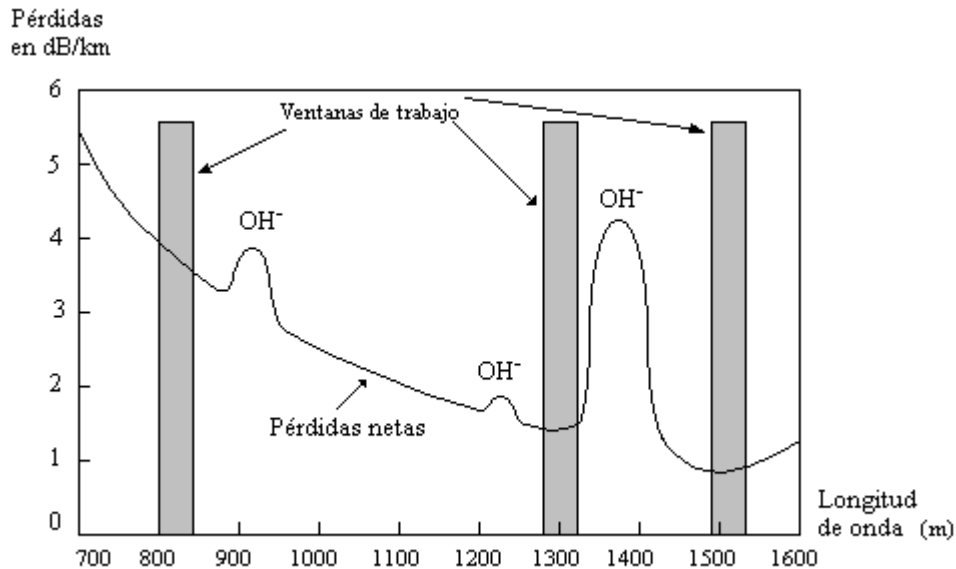
De todas estas, las bandas de absorción más importantes son las que se producen por la presencia de los radicales OH^- , que provienen del agua, y que se difunden a través del vidrio durante el proceso de fabricación, y a medida que la fibra envejece.

Otro mecanismo por el cual se produce atenuación es la dispersión de Rayleigh que se debe a defectos tales como microburbujas, concentraciones importantes de impurezas, o variaciones locales de la densidad del vidrio. Por ello los rayos de luz que encuentran en su trayectoria estos defectos, pueden cambiar de dirección, y perderse hacia el exterior a través del revestimiento de la fibra.



Lógicamente, la absorción también depende de la longitud de la fibra considerada, por ello normalmente los fabricantes de fibras ópticas acostumbran a especificar las pérdidas por absorción de las mismas en decibelios por unidad de longitud (habitualmente la unidad de longitud es el km.).

El gráfico siguiente muestra como varia la atenuación neta de una fibra óptica de vidrio de sílice típica.



Pérdidas por absorción de una fibra óptica de vidrio.

La figura anterior sugiere también la existencia de "ventanas" de trabajo (zonas grises) en las cuales es más oportuno operar. Todas ellas están en la región invisible del espectro (infrarrojo). Para transmisiones a larga distancia se utilizan las ventanas de 1300 o 1500 nm. La ventana de 800 nm (la más próxima a la luz visible) se usa en instalaciones de distancias más cortas y de costos más bajos.

1.13 REFLEXIÓN DE FRESNEL.

La reflexión de Fresnel ocurre siempre en cualquier frontera entre dos medios cuyos índices de refracción son distintos. Cuando la luz pasa de un medio al otro, parte de la energía del rayo incidente es reflejada de nuevo hacia el primer medio. La

reflexión de Fresnel se pone en evidencia particularmente en cualquiera de los extremos de una fibra óptica o en todas las partes de la misma donde exista un conector, ya que indefectiblemente se forma una frontera entre el vidrio del núcleo y el aire. Por ello sucede que al intentar acoplar un emisor a una fibra, parte de la energía de la luz es devuelta hacia el aire, y en el caso del acoplamiento con el detector parte de la energía que viaja por la fibra, es reflejada de nuevo hacia la fuente.

La cantidad de luz que se refleja en la frontera depende principalmente de la diferencia entre los índices de refracción de los dos medios, y viene dada en forma aproximada por la siguiente expresión:

$$\text{Luz reflejada (\%)} = 100 \cdot (n_1 - n_2)^2 / (n_1 + n_2)^2$$

Donde n_1 , n_2 son, respectivamente, los índices de refracción de cada medio.

Hay que tener en cuenta que en el caso del aire, su índice de refracción puede sufrir variaciones de acuerdo con la temperatura, el porcentaje de humedad, y la presencia de partículas en suspensión. A veces, cuando la terminación de la fibra no esta suficientemente protegida de los agentes externos, pueden depositarse sobre la misma, partículas de polvo o se puede condensar la humedad. Todos estos factores van a influir en el porcentaje de luz reflejada. De ahí que es muy importante la limpieza y protección de los distintos tipos de conectores que se utilizan. Para efectuar la correspondiente limpieza, se deben usar las técnicas y materiales apropiados.

1.14 DISPERSIÓN Y ANCHO DE BANDA DE LAS FIBRAS ÓPTICAS

Tal como se adelanto anteriormente, un pulso de luz que se acopla a la punta de una fibra óptica, llega al otro extremo de la misma "desparramado" o "ensanchado" en el tiempo, esto es debido al efecto conocido como Dispersión de las fibras ópticas.

La deformación de un pulso rectangular que viaja por una fibra ocurre como resultado de uno o más de las siguientes formas o maneras de dispersión.

- Dispersión modal.
- Dispersión material.
- Dispersión de guía de onda.

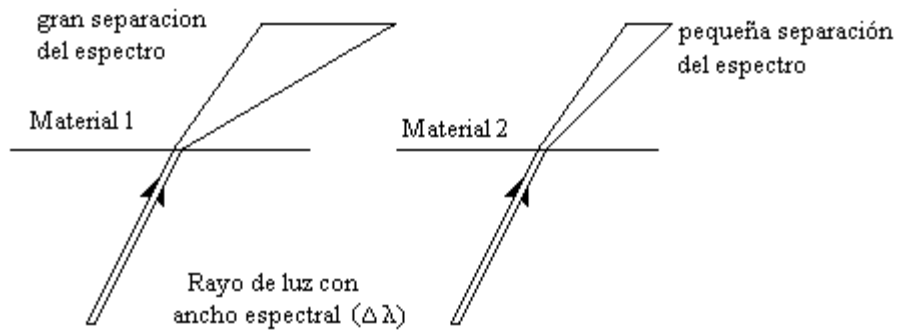
La velocidad con la cual puede transmitirse una serie de pulsos digitales (lo que en inglés se conoce como "bit rate") por una FO. dependerá en forma muy directa de la dispersión que se produzca, por lo cual resulta importante estudiar cuáles son los mecanismos por los cuales se produce la misma.

1.14.1 DISPERSIÓN MODAL.

Se presenta principalmente en las fibras multimodo, y ocurre porque que los rayos de luz que parten a la vez de un emisor no llegan, sin embargo, al mismo tiempo al extremo final de la fibra, debido a que recorren diferentes caminos, (siendo más largos los correspondientes a los modos de orden más elevados). El efecto es muy notable en las fibras multimodo de índice escalonado, pero afecta bastante menos a las fibras multimodo de índice gradual. En cuanto a las fibras monomodo, en principio podría decirse que no hay dispersión de este tipo (Luego se verá que en realidad también hay dispersión modal, pero como resultado de otro fenómeno).

1.14.2 DISPERSIÓN MATERIAL.

Es un efecto conocido que el índice de refracción de cada material varía con la longitud de onda considerada, por eso es posible separar las componentes espectrales de la luz blanca del sol mediante un prisma. La magnitud de la variación del índice de refracción en función de la longitud de onda es una propiedad característica de las moléculas de cada material.



En el dibujo precedente se representan los distintos resultados que producen dos materiales distintos sobre la separación de las componentes espectrales de un rayo de luz. Este efecto depende, como ya se ha dicho, de las características de los materiales, pero es evidente que también será consecuencia del ancho espectral del rayo de luz incidente.

Las fuentes ópticas utilizadas en los sistemas de FO emiten luz no solamente en una longitud de onda específica, sino que también lo hacen en un pequeño rango alrededor de una determinada longitud de onda central. Este rango de longitudes de onda inyectadas a una fibra se denomina "ancho espectral" de la fuente de luz.

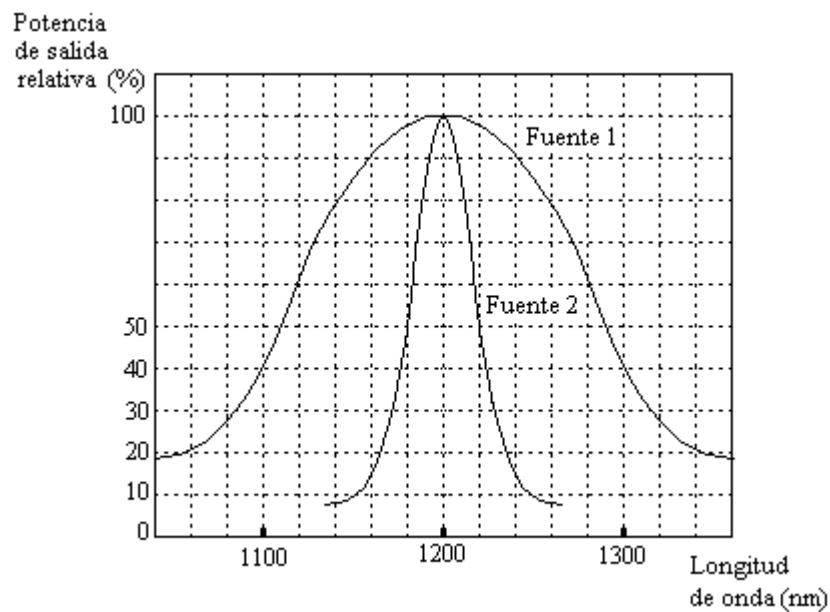
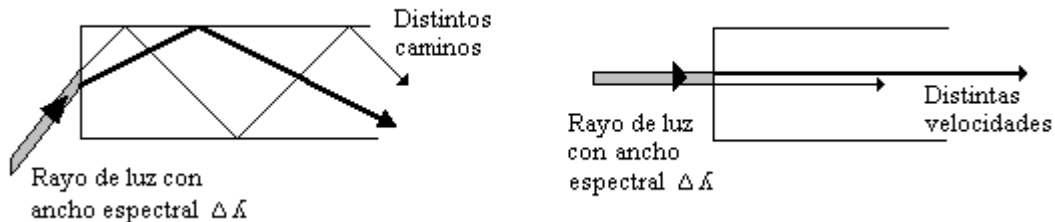


Figura 2 (Gráfica típica de distribución espectral de dos fuentes ópticas distintas)

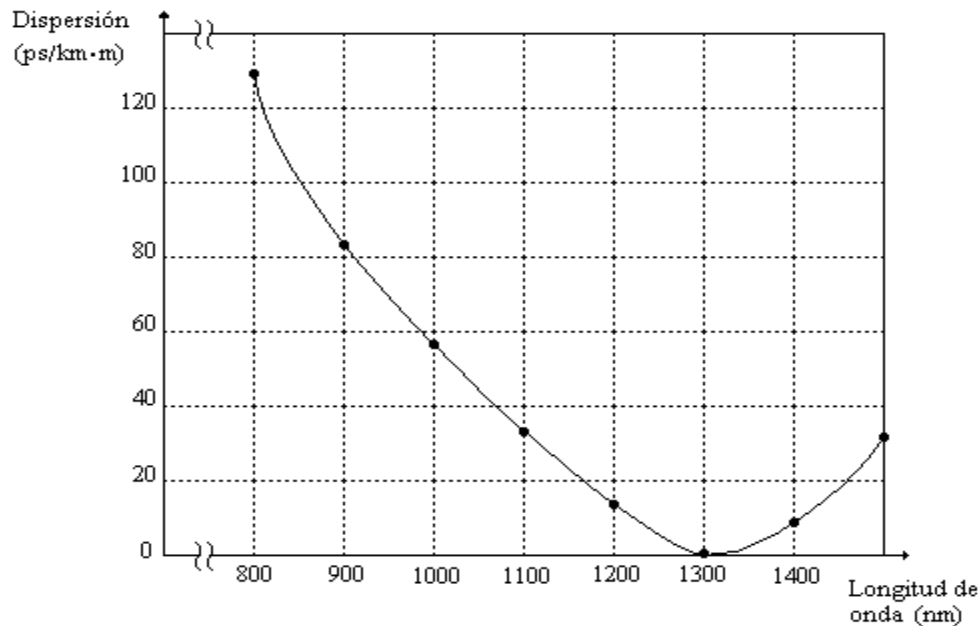
Dado que el índice de refracción del núcleo es distinto para cada una de las componentes de un pulso de luz emitido por una fuente, se originará un ensanchamiento del pulso transmitido a causa de los dos siguientes efectos:

- Las distintas componentes espectrales de la fuente, tomarán distintos caminos en razón de, la variación del índice de refracción en función de la longitud de onda distinta con un efecto similar al de la dispersión modal.
-
- Las distintas componentes viajarán además a velocidades diferentes, y como consecuencia de ello llegarán a destino en instantes distintos.



Cualquiera de estos dos efectos se verá incrementado a medida que mayor es el ancho espectral de la fuente. Por otra parte es evidente que, ya sea en el caso de la dispersión modal, como en la dispersión material, la magnitud del efecto dependerá también directamente de la longitud física de la fibra. Por esto los fabricantes especifican la dispersión de cada tipo de fibra en forma de un coeficiente normalizado, es decir con referencia a la unidad de longitud. Por razones que se explican un poco más adelante, en las fibras ópticas monomodo este parámetro se da en **ps/km . nm**. Así, por ejemplo, un valor tal como **300 ps/km.nm** significa que un pulso transmitido sufrirá un ensanchamiento de **300 ps** por cada **nm** de ancho espectral de la fuente usada luego de recorrer una distancia de **1 km** por la fibra .

Afortunadamente para el vidrio de sílice que se usa en las fibras ópticas, la variación relativa del índice de refracción respecto de la longitud de onda no es constante, por lo cual la dispersión material puede reducirse e incluso anularse si se elige convenientemente la longitud de onda de trabajo, el gráfico siguiente muestra la dispersión típica para una fibra monomodo como función de la longitud de onda.



El agregado de ciertas impurezas (dopado) permite obtener variantes de vidrios que posibilitan la fabricación de fibras monomodo con baja dispersión en un margen comprendido entre 1300nm y 1550nm (*) (se conocen como fibras "dispersion flattened").

1.14.3 DISPERSIÓN DE GUÍA DE ONDA.

Ocurre principalmente en las fibras monomodo, y sobre todo cuando el diámetro del núcleo es sumamente pequeño (y por lo tanto comparable a la longitud de onda de la luz). En estas circunstancias no puede evitarse que parte de la energía de la luz se desborde del núcleo y viaje por el revestimiento (lo que se conoce como efecto túnel). Como además, los índices de refracción del núcleo y del revestimiento son de valores distintos (aunque muy próximos) hay una diferencia en las velocidades que finalmente es causa de un efecto de dispersión. La dispersión de guía de onda es comparativamente bastante menor que las dispersiones modal y material, y solo se vuelve importante cuando estas últimas tienden a cero.

En todas las fibras ópticas la dispersión total de las mismas será el resultado de la superposición de los efectos producidos por cada uno de los mecanismos estudiados.

Por ejemplo si en una determinado tipo de fibra, hay dispersión modal y dispersión material, el ensanchamiento total será:

$$\Delta t(\text{total}) = \sqrt{\Delta t(\text{modal})^2 + \Delta t(\text{material})^2}$$

Sin embargo en cada tipo de fibra hay una forma dominante que prevalece por sobre las demás. La dispersión modal afecta grandemente a las fibras multimodo de índice escalonado, y un poco menos a las de índice gradual, donde comienza a ser importante la dispersión material (también llamada dispersión cromática). Esta última a su vez afecta a las fibras monomodo pero puede reducirse eligiendo apropiadamente la longitud de onda de trabajo y utilizando emisores ópticos altamente coherentes (con reducido ancho espectral), a partir de este punto comienza a tornarse importante la dispersión de guía de onda.

1.14.4 ANCHO DE BANDA PARA UNA FIBRA ÓPTICA.

Hemos visto que la dispersión es uno de los principales factores que condicionan la transmisión por una fibra óptica, ya que el ensanchamiento en el tiempo (Δt), de los pulsos que forman el tipo de señal digital que habitualmente se transporta por un sistema de FO impone un límite a la separación mínima que debe haber entre dos pulsos sucesivos.

El ancho de banda del sistema estará en relación directa con la capacidad del mismo para poder distinguir entre dos pulsos seguidos. Como la información concerniente al cambio de estado de una señal digital, esta en cada uno de los flancos de la misma, si se considera un hipotético pulso cuya duración es cero, se requerirá al menos el doble del tiempo de ensanchamiento Δt para transmitir la información completa (se invierte un tiempo para el flanco de subida, y otro idéntico para el de bajada), de manera que el ancho de banda máximo tolerable del sistema será aproximadamente:

$$AB \approx \frac{1}{2 \cdot \Delta t} = \frac{0,5}{\Delta t} \quad (*)$$

(*) En realidad este es un análisis simplificado, y aunque puede ser útil para una estimación práctica, no se tienen en cuenta otros factores que también influyen en el ancho de banda. Un cálculo más exacto puede hacerse con la ecuación **AB = 0,441/Δt**

La ecuación anterior sirve para la estimación del ancho de banda en fibras ópticas multimodo, y también podría aplicarse para las fibras monomodo (donde prácticamente no hay dispersión modal) si el espectro del emisor óptico utilizado fuese parejo (la misma amplitud para todas las componentes).

En cambio si la fuente usada tiene una distribución gaussiana (lo cuales muy común para emisores tipo LED), el ancho de banda debe calcularse a partir de la siguiente ecuación:

$$AB = 0,187 / D \cdot L \cdot \Delta\lambda$$

Donde **D** es la dispersión, **L** es la longitud de la fibra, y $\Delta\lambda$ es el ancho espectral de la fuente evaluado entre los puntos de potencia mitad

Por todo lo expuesto, se puede comprender ahora porque los fabricantes especifican de manera distinta la dispersión según se trate de fibras multimodo o monomodo.

Par fibras multimodo, donde la dispersión dominante es modal, la dispersión dependerá casi exclusivamente de los parámetros propios de la fibra, y se acostumbra a dar como especificación el "producto Distancia - Ancho de banda". Así, un valor para este parámetro de 500 Mhz· km significa que:

- Una señal de 500 Mhz. puede ser transmitida a 1 km
- Una señal de 250 Mhz. puede ser transmitida a 2 km
- Una señal de 1000 Mhz. puede ser transmitida a 0,5 km

En cambio para las fibras monomodo, donde la dispersión depende (además de los parámetros propios de la fibra) del ancho espectral de la fuente óptica, se la normaliza también respecto de la unidad de longitud de onda, tal como se ha ejemplificado previamente.

Tabla de especificaciones (para algunos tipos de fibras)

Tipo	Diámetro del núcleo (μm)	Diámetro del revestimiento (μm)	Apertura Normal	Ancho de banda (Mhz . km)	Atenuación (dB/km)
Monomodo	8	125		6 ps/km.nm (*)	0,5 - 1300 nm
	5	125		4 ps/km.nm (*)	0,4 - 1300 nm
Multimodo de índice gradual	50	125	0,20	400	4 - 850 nm
	63	125	0,29	250	7 - 850 nm
	85	125	0,26	200	6 - 850 nm
	100	125	0,30	20	5 - 850 nm
Multimodo de índice escalón	200	380	0,27	25	6 - 850 nm
	300	440	0,27	20	6 - 850 nm
Multimodo de plástico	200	350	0,30	20	10 - 790 nm
	400	550	0,30	15	10 - 790 nm 400 - 650 nm

(*) Dispersión para fibras monomodo.

1.15 GENERALIDADES SOBRE LOS EMISORES Y DETECTORES ÓPTICOS.

Los emisores y los detectores ópticos, son respectivamente los principales componentes de los transmisores y receptores usados en los sistemas de transmisión por F.O. Las propiedades optoelectronicas (como transductores) y ópticas propiamente dichas de estos elementos son las que en definitiva determinan en ultima instancia el comportamiento de un sistema de comunicaciones por fibras ópticas.

Las características que deben poseer los emisores y detectores están definidas por las especificaciones del sistema, es decir, ante todo por la longitud de los enlaces, y por la velocidad de transmisión requeridas.

En particular esto significa para los emisores que:

- La emisión de los impulsos luminosos, tiene que tener lugar en el margen espectral para el cual la fibra óptica adoptada, presente la mínima absorción y/o dispersión.
-
- La potencia radiada acoplada a la fibra óptica debe ser la mayor posible. Esto significa no solamente un rendimiento de transducción optoelectrica elevado sino también un reducido valor de perdidas por acoplamiento.
-
- La emisión óptica debe ser modulable en forma sencilla por la señal transmitida.

Para los detectores se pueden enumerar también de manera análoga:

- La sensibilidad de recepción debe ser lo mayor posible manteniendo las mejores condiciones de ruido. De esta forma , incluso con una frecuencia de error binaria predeterminada es detectable todavía una potencia óptica mínima.
-
- Para la velocidad de transmisión deseada, la velocidad umbral tiene que ser lo suficientemente grande.

Estas condiciones las cumplen, como emisores, los diodos electroluminiscentes (Diodos LED, Diodos Láser), y como receptores, principalmente los fotodiodos.

1.15.1 JUNTURAS ÓPTICAS EN SEMICONDUCTORES.

La conducción de corriente eléctrica en los buenos conductores (p. ej. en los metales) es posible porque en su estructura interna existen electrones libres dentro de la denominada "banda de conducción" de cada átomo, que salen sobrando de la "banda de valencia" al establecerse las uniones con átomos vecinos dentro de la estructura molecular de los mismos. En cambio en los aislantes, dicha banda de conducción esta normalmente vacía y solo es posible llevar electrones a la misma mediante un gran aporte de energía externa.

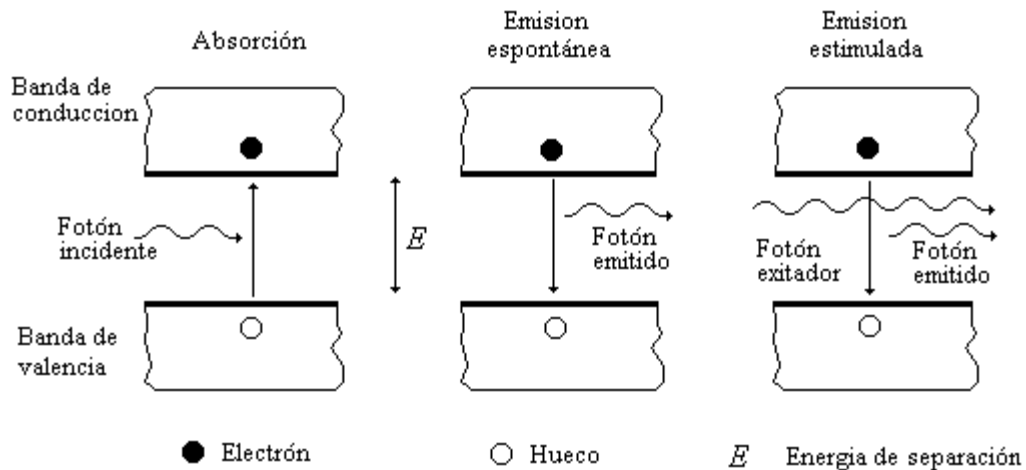
Los semiconductores están caracterizados por que los electrones de las ultimas capas que normalmente ocupan la banda de valencia pueden, merced a una moderada cantidad de energía externa, pasar a la banda de conducción. La permanencia de los

electrones en la banda de conducción depende de dos factores, uno de ellos es el aporte energético que pueda llegar del exterior y el otro es la presencia de impurezas dentro de la estructura molecular.

En una junta semiconductor (*), se consiguen llevar electrones a la banda de conducción con un aporte energético mínimo si la misma se polariza directamente, es decir si por la unión circula una corriente generada por una fuente externa (la energía necesaria para que los electrones salten a la banda de conducción se extrae del campo eléctrico que genera la corriente a través de la juntura)

El intercambio de electrones entre la banda de valencia y la de conducción se realiza mediante la absorción (paso a la banda de conducción), o mediante la emisión (regreso a la banda de valencia) de cantidades discretas de energía ($E = h.c/\lambda$), cuando esta se produce en las longitudes de onda apropiadas se produce un efecto electroluminiscente, esto es fotones.

Se pueden diferenciar tres mecanismos simples de intercambio o interacción entre formas de energía que se representan esquemáticamente en la siguiente figura:



En la **absorción** se "aniquila" un fotón que proviene del exterior, al producirse el incremento de energía necesaria para que un electrón salte a la banda de conducción, dejando un "hueco" en la banda de valencia.

Se origina una **emisión espontánea** cuando en la banda de conducción hay demasiados electrones. Estos caen espontáneamente a los niveles más bajos de la banda de valencia perdiendo una cierta cantidad de energía que se emite en forma de un fotón.

La **emisión estimulada** se produce como consecuencia de la excitación que los fotones producen sobre los electrones que están en exceso en la banda de conducción. Los fotones emitidos serán idénticos a los excitadores (la misma longitud de onda y fase). La emisión estimulada puede producirse a causa de los fotones emitidos espontáneamente dentro del mismo semiconductor, o por efecto de fotones que lleguen del exterior.

La absorción, y la emisión, tanto espontánea como estimulada, se presentan siempre simultáneamente; sin embargo, puede lograrse que solo un mecanismo predomine sobre los demás eligiendo apropiadamente el tipo de semiconductor, los contaminantes o impurezas que se le añaden, la estructura geométrica del dispositivo y la polarización externa. Los componentes que se corresponden con cada uno de los tres fenómenos de interacción son: 1) Los fotodiodos como receptores, cuyo funcionamiento se basa en el fenómeno de la absorción. 2) Como emisores, los diodos LED que usan el mecanismo de emisión espontánea, y los diodos Láser que funcionan por emisión estimulada.

El tipo de semiconductor que se usa para dispositivos optoelectronicos es una "aleación" llamada arseniuro de galio (As Ga). La longitud de onda de la luz que se emite esta dada por la energía de separación de bandas E_g , la cual en este caso (y cuando la aleación es pura) es igual a 1,43 eV, y permite obtener, a temperatura ambiente, una longitud de onda $\lambda = 870\text{nm}$

1.15.2 EMISORES ÓPTICOS USADOS EN SISTEMAS DE F.O.

1.15.2.1 Diodos emisores de luz (LEDs)

Un LED es un dispositivo formado por una juntura semiconductor PN, que emite luz por el mecanismo de emisión espontanea.

Existen en la actualidad, dos tipos de estructuras básicas de LEDs que se adecuan a los requerimientos de los sistemas de FO. 1) Las estructuras en **Homojunturas**, y 2) Las estructuras en **Heterojunturas**. Los LEDs de homojuntura (también conocidos como de emisión superficial) están formados por un material semiconductor simple, en tanto que los de heterojuntura (conocidos como de emisión lateral) usan mas de un material, lo cual permite un mejor confinamiento de la luz emitida además de un mejor comportamiento frente a las variaciones de temperatura.

Los materiales usados en la construcción de los LEDs tiene influencia en varios de los principales parámetros de interés, que son:

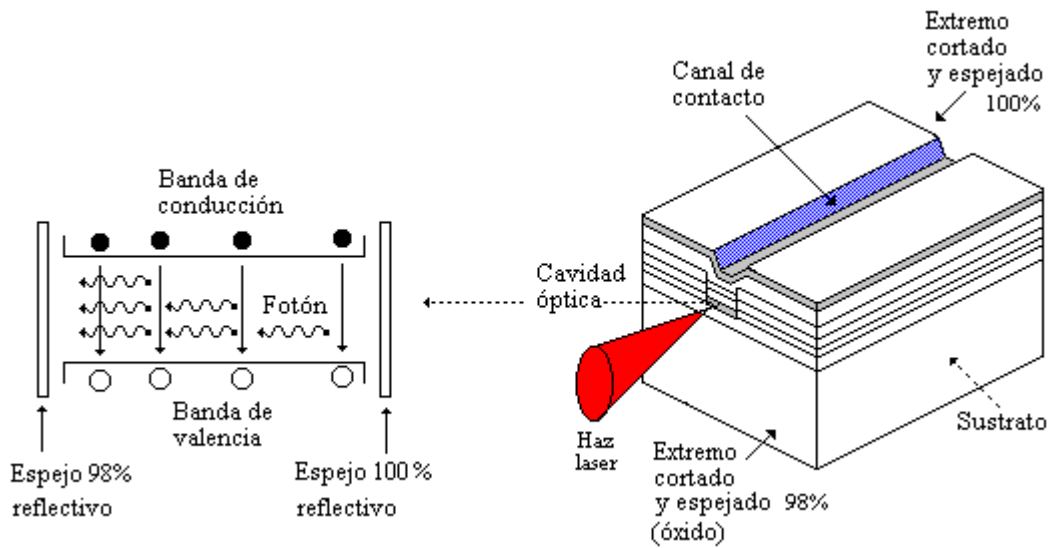
- **La longitud de onda de la luz emitida** (λ). Los LEDs que emiten en longitudes de onda comprendidas entre 820 y 850 nm se fabrican mediante el dopado del arseniuro de galio con aluminio (Ga Al As), en tanto que para conseguir longitudes de onda de 1300nm se usan como impurezas el indio y el fósforo (Ga As In P).
- **El rendimiento de potencia externo**, es decir la relación entre la potencia de la luz emitida externamente, y la potencia eléctrica consumida, que por lo general es sensiblemente menor que 1. Para dar una idea, se pueden obtener valores absolutos de potencias de luz emitidas del orden de -10 dBm con una relación lineal entre corriente y potencia o incluso magnitudes mas elevadas como 0 dBm, aunque con un comportamiento muy alineal.

- **El ancho espectral** ($\Delta\lambda$), el cual es aproximadamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda, es decir que se incrementa sensiblemente para mayores longitudes de onda, lo cual tiene gran importancia en relación con los fenómenos de dispersión. (Un orden de magnitud típica puede ser: para $\lambda \approx 800\text{nm}$, un $\Delta\lambda = 100 \text{ nm}$).
- **La frecuencia limite de modulación**, que reviste especial importancia en relación con las telecomunicaciones. La vida media de los portadores de carga en exceso (es decir el tiempo que los electrones permanecen en la banda de conducción antes de caer espontáneamente a la banda de valencia) fija un limite por debajo del cual la emisión de luz no sigue las variaciones de la corriente que atraviesa la juntura. Dichos valores de vida media están situados por lo general alrededor de algunos nanosegundos, lo que posibilita frecuencias limite de modulación de hasta algunos cientos de MHz.

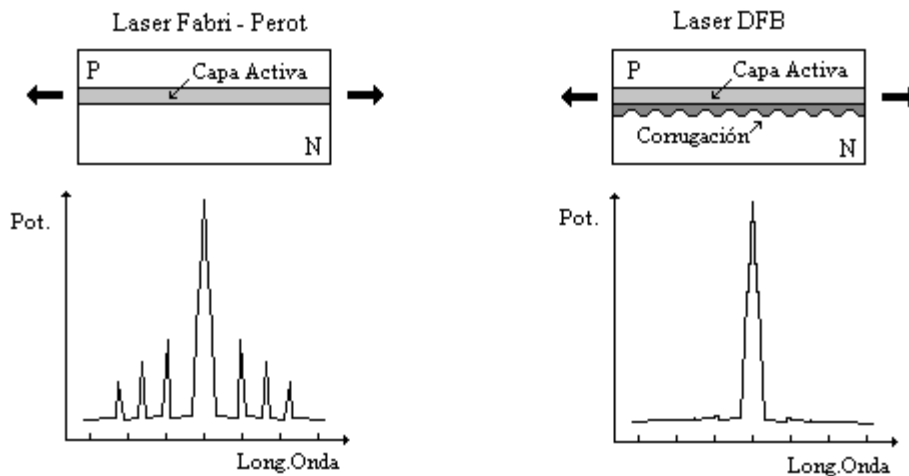
1.15.2.2 Diodos Láser de inyección. (ILD)

Al igual que los diodos LED, un diodo Láser esta formado por una juntura semiconductor, por lo cual son validas las mismas consideraciones efectuadas respecto de los parámetros de interés, pero a diferencia de aquellos tiene asociado un elemento selectivo de longitud de onda (una cavidad resonante) que hace que la luz se genere principalmente por emisión estimulada.

En el tipo mas sencillo de diodo Láser el resonador óptico , denominado de Fabry - Perot, consiste en un pequeño bloque compuesto por varias capas del semiconductor (que forman la juntura). Este chip posee una hendidura y se encuentra entre dos superficies paralelas y reflectoras, una de ellas levemente translúcida. El conjunto se comporta como una cavidad óptica y si las dimensiones de la misma son las adecuadas, la emisión espontanea de un fotón estimula a su vez la emisión de otros, de igual fase y longitud de onda, que se reflejan sucesivamente en los espejos aumentando aun mas el efecto inicial. Parte de los fotones generados pueden salir hacia el exterior a través del espejo translucido en forma de un haz de luz altamente direccional, coherente y de gran intensidad. Para que este efecto se produzca, es necesario un valor mínimo de corriente de inyección (umbral de disparo) , a través de la juntura. La magnitud de la corriente esta en el orden de los 100 mA y es bastante dependiente de la temperatura. El orden de magnitud de la potencia óptica de salida es de alrededor de 10 dBm .



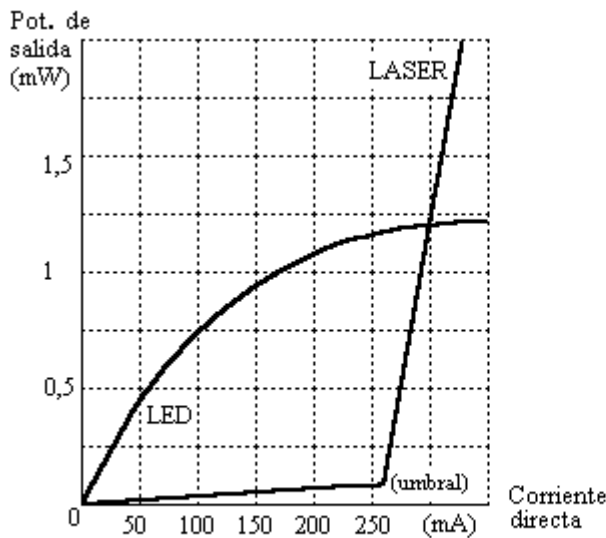
Aunque el ancho espectral de los Láser Fabri -Perot es bastante angosto, lo es aun mas en los diodos Láser de Realimentacion Distribuida (DFB Láser) , en los que se consigue una emisión en una longitud de onda prácticamente única merced a una forma especial de la hendidura, una de cuyas caras es corrugada, y a la mejora en el proceso de espejado de los extremos de la cavidad.



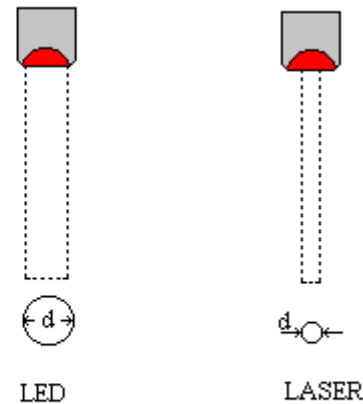
1.15.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS FUENTES.

La potencia óptica de salida de los diodos LEDs y Láser es proporcional a la corriente aplicada a la juntura. En general, la potencia de salida de los Lasers es comparativamente mayor que la de los LEDs, salvo cuando en los primeros se opera con corrientes de inyección menores que la de disparo.

El diámetro del haz así como la forma del lóbulo de la luz emitida por una fuente óptica es de fundamental importancia para la técnica de las fibras ópticas, ya que el mismo estará directamente ligado con la apertura numérica (concepto estudiado en lecciones previas). Una buena fuente óptica para los propósitos de un sistema de FO, es aquella que exhibe un buen rendimiento de potencia externo aunado a valores reducidos de apertura numérica y diámetro de emisión.



(A) Curva de corriente vs. potencia de salida



(B) Diametro del haz

Al igual que la diferencia entre los valores de apertura numérica de dos componentes que se acoplan produce pérdidas, la diferencia entre el diámetro del haz emitido por una fuente, y el diámetro del núcleo de una fibra que se acoplan disminuye la cantidad de luz que puede ser transferida del emisor a la fibra en una relación que viene dada por la siguiente expresión.

$$\text{Pérdidas (por diferencia de diámetro)} = 20 \log D_f/D_e$$

Donde D_f es el diámetro del haz emitido por la fuente, y D_e es el diámetro del núcleo de la fibra.

Habitualmente, los LEDs que son mas fáciles de usar y que además presentan una zona de trabajo lineal donde a pesar de los bajos valores absolutos de potencia emitida, comparativamente tienen mas rendimiento que los Lasers, no se usan como fuentes ópticas para fibras monomodo a causa de los elevados valores de apertura normal y diámetro de emisión. En cambio los diodos Láser, que en principio pueden usarse con cualquier tipo de fibra óptica son mas alineales, su comportamiento varia con la temperatura, y son mas difíciles de usar, se prefieren para sistemas con fibras monomodo, (es decir donde hay requerimientos simultáneos de las largas distancias con velocidades elevadas que no pueden ser satisfechos con fibras multimodos).

Como ya se explico en la lección anterior, el ancho espectral de una fuente, corresponde al rango de longitudes de onda alrededor del valor central en el cual se emite la luz. Los emisores Laser poseen anchos espectrales sensiblemente menores que los LEDs, por ejemplo para valores comparables de potencia emitida si el $\Delta\lambda$ de un diodo LED es 100 nm , el correspondiente valor para un Laser Fabri - Perot puede ser 10 nm , e incluso bastante menor (p.ej 1 nm) para un Láser DFB .

Respecto de la frecuencia limite de modulación de un diodo LED o un Láser, la misma estará en relación con las tiempos de crecimiento o de caída (se toma el mayor de los dos) de cada dispositivo. Una regla aproximada para el calculo de esa relación es:

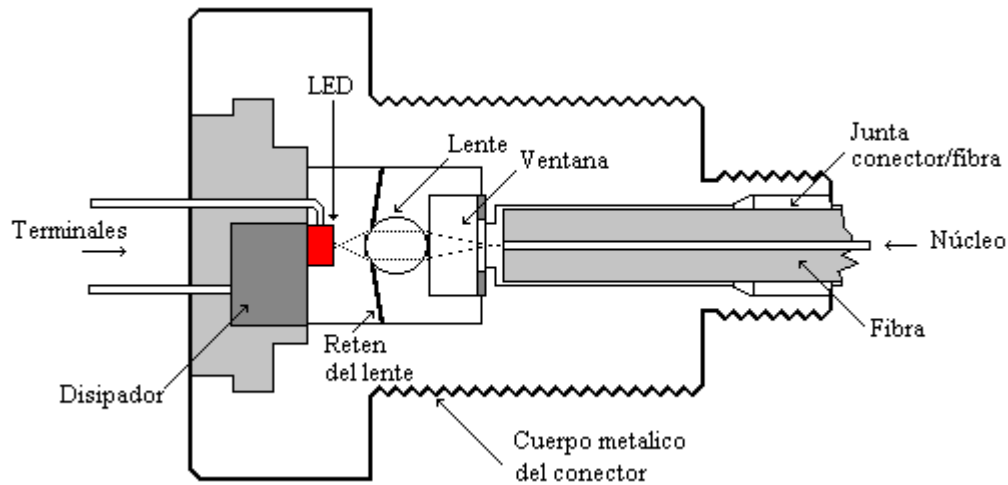
$$AB = 0,35/tr$$

Otro aspecto importante a tener en cuenta, es el "Tiempo de vida" de las fuentes que esta definido como el tiempo que transcurre desde que el dispositivo se usa por primera vez hasta que la potencia emitida baja al 50% del valor original. Por ejemplo si un LED emite una potencia óptica de 1 mW al utilizarlo inicialmente, su tiempo de vida habrá llegado al final cuando la potencia emitida sea solamente 0,5W.

La forma de la cápsula que contiene al emisor, así como las técnicas de montaje, son otro de los aspectos importantes a tener en cuenta, ya que tendrán una directa influencia en la eficiencia con que la luz se acopla a la fibra.

Existen varias técnicas de montaje entre las cuales se destacan principalmente dos de ella.

1) Montajes que usan microlentes para enfocar la luz emitida en el núcleo de la fibra.



2) Montajes "Pigtail", que consiste básicamente en un "trozo" de fibra óptica que va adherida directamente sobre el Chip semiconductor mediante una resina epoxi. Dicho chicote debe ser luego soldado o conectado por otro medio al tramo principal de fibra óptica. Tiene dos ventajas: 1) Se consigue un acoplamiento óptimo entre emisor y fibra ya que al estar tan cerca entre sí, la luz que sale del emisor no alcanza a dispersarse. 2) La potencia óptica de salida se mide sobre el extremo final del chicote, lo cual se traduce en una simplificación de los cálculos que deban efectuarse. Esto se debe a que el patrón de salida de la fibra está mejor definido, y por ello es más fácil de especificar.

Se puede ver cual es la influencia del tipo de montaje, al observar las distintas especificaciones de un mismo tipo de emisor LED que un fabricante provee con diferentes montajes.

- Pigtail con fibra 50/125 : $50\mu\text{W}$
- Pigtail con fibra 100/140 : $250\mu\text{W}$
- Sin pigtail : $300\mu\text{W}$ (*)

(*) *Téngase en cuenta que de todas maneras, finalmente no toda esta potencia podrá acoplarse a una fibra*

Los montajes para diodos Láser y LEDs de alta potencia son algo más complejos, ya que suelen incluir disipadores de calor, enfriadores termoeléctricos (por efecto

"Peltier"), y un fotodiodo de monitoreo que se usa para el sensado y control de la potencia óptica de salida.

Por ahora basta con estas pequeñas referencias, mas adelante (al tratar el tema de la conectorización) se volverá sobre el particular.

COMPARACIÓN ENTRE DIODOS LED Y LASER.

Características	LED	Diodos LASER
Potencia de salida	Baja	Elevada
Velocidad	Lentos	Rápidos
Patrón de salida (AN)	Grande	Reducido
Ancho espectral	Amplio	Angosto
Compatibilidad con FO monomodo	No	Si
Dependencia de la temperatura	Baja	Elevada
Aplicación	Fácil	Difícil
Costo	Bajo	Elevado

1.16 DETECTORES ÓPTICOS USADOS EN SISTEMAS DE F.O.

Las señales ópticas que se transmiten por una fibra, deben convertirse nuevamente en señales eléctricas en el equipo receptor. Aunque existen varios tipos de dispositivos que podrían usarse en principio como transductores "optoelectronicos" (por ejemplo: las fotoceldas resistivas , las celdas fotovoltaicas, y los fototransistores), en los sistemas de comunicaciones por FO, se utilizan principalmente los fotodiodos.

En el estado actual de la técnica, existen tres tipos de fotodiodos cuyo uso esta difundido en los sistemas de FO. Estos tipos son: 1) Los fotodiodos PN. 2) Los fotodiodos PIN. 3) Los fotodiodos de avalancha.

En este apartado se tratara el tema de los fotodiodos, con un interés principal en la interpretación de sus características y especificaciones a los fines de fijar criterios para la correcta selección de los mismos para determinadas aplicaciones.

1.16.1 ¿COMO PUEDE CONVERTIRSE UNA SEÑAL ÓPTICA EN ELÉCTRICA ?

Cuando una junta semiconductor se polariza inversamente, no circula corriente a través de la misma, debido a que los portadores mayoritarios de cada tipo de semiconductor son atraídos por cada uno de los terminales de la fuente de polarización. En la junta se crea una zona de "agotamiento" (figura A) en la que no existen portadores en cantidad suficiente, dentro de la banda de conducción de los átomos, para hacer circular corriente en forma considerable (solo existe una pequeña corriente inversa). Si a la junta llega un haz de luz del exterior con suficiente energía, los fotones pueden aniquilarse e inyectar electrones en la banda de conducción favoreciendo así el incremento de la corriente inversa.

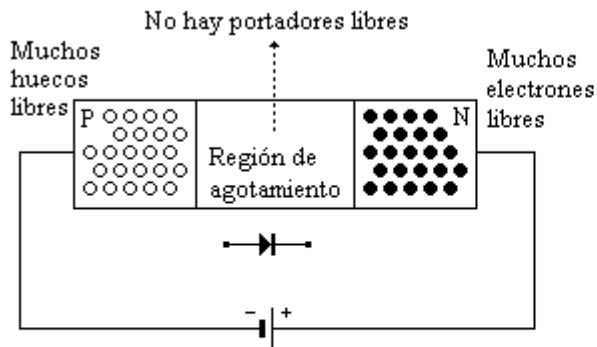
1.16.2 FOTODIODOS PN.

El mas simple de los dispositivos optoelectronicos de detección es el fotodiodo de junta PN cuyo principio de funcionamiento se ajusta casi exactamente a lo descrito en el párrafo previo. Podría decirse, en pocas palabras, que el diodo se polariza inversamente y que la corriente inversa, que normalmente es muy pequeña, puede controlarse mediante el mecanismo de absorción que se describió en la lección anterior. Dicha corriente inversa varia en forma mas o menos proporcional a la cantidad de fotones que inciden en la junta.

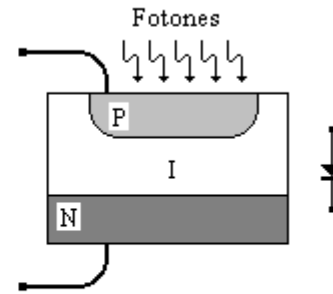
Los fotodiodos PN presentan serias restricciones en lo referente a sus características, lo cual hace que su uso este algo limitado para aplicaciones en sistemas de FO. Dichas limitaciones se originan en las siguientes causas:

1. Los fotones incidentes liberan electrones de la banda de valencia no solamente en la zona de agotamiento, sino también en regiones fuera de la misma. Si un electrón es liberado fuera de la zona de agotamiento, por ejemplo dentro del material tipo P de la junta, es mas probable que se recombine rápidamente con algún hueco, antes que contribuya a aumentar la corriente inversa. Los fotodiodos PN tienen normalmente, una zona de agotamiento bastante estrecha, y por lo tanto se requiere un haz de luz altamente colimado para crear portadores libres dentro de la misma o en su defecto gran cantidad de fotones. En otras palabras la eficiencia (relación entre el numero de fotones y el numero de portadores generados) es sumamente baja.

2. Los electrones que saltan a la banda de conducción fuera de la zona de agotamiento, y no llegan a recombinarse, finalmente contribuirán a aumentar la corriente a través de la junta, pero existirá cierto retardo entre la aniquilación del fotón y el aumento efectivo de la corriente. Esta demora en la respuesta termina produciendo una reducción en la velocidad de operación del fotodiodo.



(A) Juntura polarizada inversamente



(B) Diodo PIN

1.16.3 FOTODIODOS PIN.

Los fotodiodos PIN, fueron ideados para superar las dificultades que presenta el fotodiodo PN como detector. La designación de este tipo de diodo se corresponde con las tres capas de semiconductores que se usan para su fabricación: Capa tipo P, Capa de material Intrínseco, y Capa tipo N. (figura B).

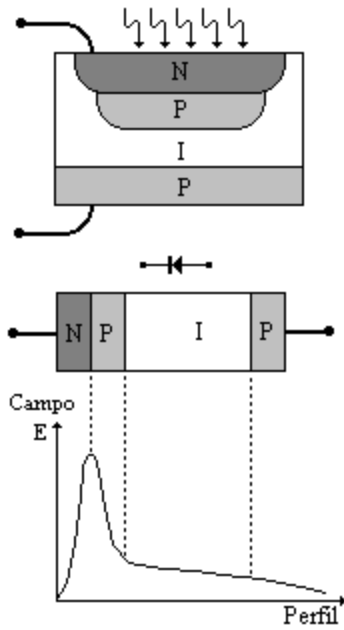
Un semiconductor intrínseco (aquel que no ha sido dopado con impurezas) se intercala entre las dos capas P y N del diodo, con lo que se produce el efecto de ensanchar la zona de agotamiento. Con esto se consigue incrementar la eficiencia del diodo como detector al aumentar la relación entre el número de fotones y el número de portadores generados. Sin embargo, un aumento excesivo del tamaño de la zona de agotamiento tendrá un efecto pernicioso sobre la velocidad de respuesta del dispositivo.

Los Fotodiodos PIN se utilizan ampliamente en los sistemas de FO, y están diseñados específicamente para estas aplicaciones. El espesor de la capa intrínseca

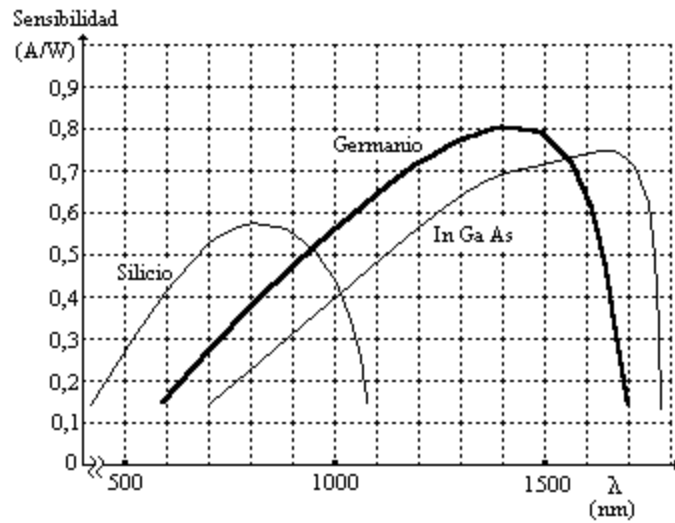
se fija buscando, en cada caso, una relación de compromiso entre la eficiencia, η , y la velocidad de respuesta necesarias.

1.16.4 FOTODIODOS DE AVALANCHA. (APD)

Los fotodiodos de avalancha presentan una elevada eficiencia en la relación de conversión entre fotones y portadores debido a que su operación se basa en el fenómeno de "foto multiplicación". Los diodos APD se fabrican con una estructura que genera un campo eléctrico muy fuerte en una porción de la región de agotamiento (figura C). Los portadores que se crean por la incidencia de fotones (llamados portadores primarios) son acelerados por este campo y colisionan con los electrones de los átomos de la región intrínseca. La energía cinética que acumulan los electrones al acelerarse debido al campo eléctrico, es cedida a los electrones de la banda de valencia de los átomos neutros causando su salto a la banda de conducción (estos son los portadores secundarios), lo cual incrementa la corriente a través del diodo. En pocas palabras, un único fotón incidente puede generar varios portadores, que a su vez aumentan la corriente. Por este motivo, un diodo APD es bastante mas eficiente que un diodo PIN. El numero de electrones que se transforman en portadores depende del factor de multiplicación del fotodiodo. Un factor de multiplicación de 50 significa que por cada fotón incidente se generan 50 electrones de conducción.



(C) Estructura básica de un diodo de avalancha



(D) Sensibilidad (Responsivity)

1.16.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS DETECTORES.

Las principales características de los fotodiodos dependen tanto del tipo de dispositivo que se trate como del de semiconductor que se usa para su fabricación, y en menor medida de las características de los circuitos asociados.

También son importantes, desde luego, las características que tiene que ver con el encapsulado o montaje de los detectores para su utilización y aplicación.

1.16.6 SENSIBILIDAD ESPECTRAL (S_λ)

La sensibilidad espectral (*) de un fotodiodo es una de sus características mas importante. Viene definida por la relación entre la corriente que se induce en el detector y la potencia de la luz incidente, y se mide en A/W. Por ejemplo, una sensibilidad de 1,2 A/W , significa que un rayo de luz incidente cuya potencia óptica es 1 W producirá una corriente de 1,2 A.

La sensibilidad espectral de un fotodiodo depende del material empleado para su fabricación y cambia con la longitud de onda de la luz incidente. En la figura (D) pueden observarse tres gráficas distintas de sensibilidad en función de la longitud de onda para tres tipos de semiconductores. Allí puede notarse que los fotodiodos de silicio no son apropiados para trabajar con longitudes de ondas elevadas. Como se ha estudiado previamente, en las fibras ópticas de vidrio, la atenuación de material es mínima alrededor de 1500 nm, en tanto que la dispersión material se reduce prácticamente a cero para 1300 nm. Para estos valores de longitud de onda los fotodiodos fabricados con germanio o con arseniuro de galio, son mas convenientes.

() Algunos fabricantes de componentes (Motorola o Fujitsu), denominan a esta característica "Responsivity", otros (Siemens) le llaman "Spectral sensitivity". Aquí se prefiere esta ultima por ser de mas fácil traducción al castellano.*

1.16.7 EFICIENCIA CUÁNTICA (η).

En los párrafos previos se ha hecho referencia a la relación entre fotones incidentes y portadores generados, esta relación es justamente la "eficiencia cuántica" del fotodiodo, que puede darse en términos de relación entre la cantidad de fotones que pueden crear un par electrón -hueco y los que no producen tal efecto. Su expresión es simplemente:

$$\eta = \frac{\text{N}^\circ \text{ de fotones que crean un par electrón - hueco}}{\text{N}^\circ \text{ de fotones incidentes}}$$

Una eficiencia cuántica de 1 (o 100 %) significa que cada fotón que logra incidir sobre el diodo, generara un portador. Una eficiencia cuántica de 0,5 significa que solo la mitad de los fotones que inciden generan un portador cada uno. La eficiencia

cuántica de un fotodiodo esta relacionada con la Sensibilidad espectral (S_λ) y también puede expresarse así:

$$\eta = (S_\lambda) \cdot h \cdot c / q \lambda \quad (1)$$

Donde:

η : eficiencia cuántica

S_λ : Sensibilidad espectral

h : Constante de Planck = $6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s

c : velocidad de la luz = $3 \cdot 10^8$ m/s

q : Carga eléctrica de un electrón = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

λ : Longitud de onda de los fotones incidentes

Las expresiones anteriores son válidas para cualquiera de los tipos de detectores estudiados, pero en el caso de los fotodiodos de avalancha se debe hacer la salvedad que solo indica la eficiencia en la generación de portadores primarios.

1.16.8 VOLTAJE DE POLARIZACIÓN (BIAS)

Los fotodiodos necesitan un voltaje de polarización inversa para la creación del campo eléctrico en la zona de agotamiento de la junta (recordar que todos estos dispositivos se polarizan inversamente) . Dicho voltaje de polarización esta comprendido entre 3 V y 15 V para los fotodiodos PN y PIN, en cambio los fotodiodos de avalancha requieren valores de voltajes bastante mas elevados pudiéndose llegar en algunos casos al orden de los cientos de volts.

Esta polarización inversa se aplica a través de una resistencia de carga (RI) cuya función es además transformar las variaciones de corriente en variaciones de voltaje. El valor de la resistencia de carga se fija teniendo en cuenta varios factores, entre los cuales una de los mas importantes es el que tiene en cuenta el ruido térmico que se genera sobre la misma.

1.16.9 RUIDO.

El propósito de un detector es producir una corriente eléctrica en respuesta a la excitación generada por los fotones incidentes. Sin embargo siempre existe un pequeño monto de corriente no deseada que se genera aunque no exista luz incidente. Esta corriente indeseada se denomina ruido, y aunque existen muchos tipos de ruido, en los fotodiodos que se usan en los sistemas de FO los dos principales tipos son: El ruido de "granalla" (Shot noise), y el ruido térmico (Thermal noise).

El ruido de granalla se produce debido a la naturaleza discontinua de la luz y de los portadores generados por la misma. Debido a ello la corriente inducida sufre pequeñas fluctuaciones de valor impredecible. Además cuando la luz que incide sobre el fotodiodo se corta abruptamente, aun así puede seguir circulando una pequeña corriente debida a los pares electrón - hueco generados previamente que se denomina "corriente de oscuridad" (Dark current, I_R). La expresión matemática para el ruido de granalla es:

$$I_{sn} = \sqrt{2 \cdot q \cdot i \cdot B}$$

Donde:

I_{sn} : Corriente de ruido de granalla

q : Carga eléctrica del electrón = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

i : Corriente promedio (Incluye la corriente de señal y la corriente de oscuridad)

B : Ancho de banda del receptor (al que esta conectado el detector).

El ruido térmico se debe a las fluctuaciones de la resistencia de carga del detector. Los electrones se mueven debido al campo eléctrico, pero también se agitan debido a la temperatura, y como resultado de este movimiento aleatorio se produce una corriente que se superpone a la corriente de la señal produciendo una distorsión en la misma. La corriente de ruido térmico es:

$$I_{tn} = \frac{4 \cdot K \cdot T \cdot B}{\sqrt{Ri}}$$

Donde:

I_{tn} : corriente de ruido térmico.

K : Constante de Boltzman = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/°K

T : Temperatura en °K

B : Ancho de banda del receptor (al que esta conectado el detector).

R_l : Resistencia de carga.

1.16.10 RELACIÓN SEÑAL/ RUIDO. (SNR)

La relación señal - ruido (signal - noise) de un detector, es una medida de la calidad de la señal que el mismo entrega. Se expresa simplemente como la relación, en decibeles, entre el valor promedio de la potencia de la señal disponible en relación con el promedio de la potencia de ruido generado.

$$\text{SNR} = 10 \log (S/N)$$

La relación señal ruido se usa principalmente para caracterizar la bondad de los sistemas analógicos.

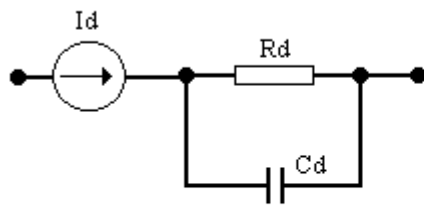
1.16.11 TASA DE ERROR DIGITAL. (BIT ERROR RATE : BER)

En un sistema de comunicaciones digital, el BER se usa para determinar la calidad del sistema. El BER es la relación entre la cantidad de bits correctamente recibidos y la cantidad de bits recibidos con error. Un valor de BER de 10^{-9} significa que por cada 10^9 bits transmitidos por un sistema, 1 bit es recibido con error. Un error de esta magnitud, o incluso de algunos ordenes mas elevados, puede ser insignificante si se esta considerando la transmisión de la voz por un sistema telefónico, pero en cambio puede ser muy importante en la transmisión de datos entre computadoras. El BER y la relación señal ruido guarda estrecha relación entre si; un valor grande de SNR se traduce en un mejoramiento del BER.

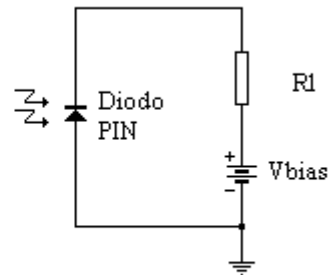
La tasa de error digital depende de varios y casi todos los componentes de un sistema de comunicaciones. Los fotodiodos constituyen una de las partes principales de un sistema de FO, y por ello es muy importante tener en cuenta su contribución al valor total del BER.

1.16.12 VELOCIDAD.

La velocidad de operación de un fotodiodo, esta determinada por el tiempo de crecimiento del dispositivo. El modelo eléctrico de un fotodiodo PIN se muestra en la siguiente figura.



Modelo equivalente eléctrico de un diodo PIN



Circuito de polarización externo

Cuando un diodo se polariza inversamente, se comporta eléctricamente como un condensador, por eso el modelo usado consiste en un condensador (C_d) en paralelo con una resistencia (R_d). El valor de la capacidad interna del diodo es un dato sumamente importante porque su valor afectará directamente al tiempo de crecimiento del dispositivo:

$$T_{Cd} = 2,19. R_l . C_d$$

Donde:

T_{Cd} : tiempo de crecimiento del fotodiodo.

R_l : Resistencia de carga exterior (Debido a que normalmente $R_l \ll R_d$)

C_d : capacidad interna del diodo.

El ancho de banda de un fotodiodo puede aproximarse con la siguiente expresión:

$$AB = 0,35/Tcd$$

Desde luego es posible encontrar una relación entre el ancho de banda de un fotodiodo y la constante de tiempo determinada por su capacidad y la resistencia de carga.

$$AB = 1 / (2.\pi . RI Cd)$$

1.16.13 MONTAJE O ENCAPSULADO

Al igual que los emisores, los detectores para fibras ópticas son suministrados por los fabricantes en varios tipos de montajes y encapsulados (Packaging), siendo los más populares el "pigtail" y el receptáculo con microlentes. También, de manera análoga, estos encapsulados presentan pérdidas de acoplamiento que ocurren debido a diferencias de diámetro y apertura normal, que en principio pueden ser calculadas mediante las ecuaciones estudiadas en las lecciones anteriores. Sin embargo, normalmente los fotodiodos se fabrican con valores de AN y "área efectiva" comparativamente grandes respecto de las fuentes y fibras ópticas más populares, de manera que las pérdidas por acoplamiento son sensiblemente menores que las que se presentan con los emisores.

El tipo de encapsulado o montaje también tiene influencia en las "pérdidas por retorno" que ocurren debido al efecto de reflexión de Fresnel (estudiado previamente). Las pérdidas por retorno se especifican dando la relación entre la potencia óptica que llega al detector y la cantidad que se devuelven a la fibra en dB y se dan para un valor de longitud de onda específica, (p.ej. : un valor de -20 dB de pérdidas por retorno significa que el 1 % de la potencia incidente es devuelta a la fibra).

Una especificación también importante, y que no suele ser tenida en cuenta, es el tiempo y la temperatura máxima de soldadura, que es particularmente crítico en los montajes en Pigtail, (una temperatura o un tiempo excesivos pueden alterar la unión entre chip y la fibra de manera irreversible).

1.17 COMPONENTES PARA FIBRAS ÓPTICAS.

Este tema introduce al tema general de los componentes usados para la interconexión e implementación de sistemas de comunicaciones y de distribución de datos mediante fibras ópticas.

Para la instalación de un sistema con FO, se utilizan algunos pocos elementos y técnicas que son idénticos a los usados en sistemas con conductores de cobre, Hay otro grupo que tiene ciertas similitudes pero que requieren un tratamiento y manipulación especial, en tanto que existe un tercer conjunto de componentes que son decididamente diferentes en su concepción, fabricación e instalación. En este tema se prestara especial interés a este ultimo grupo.

El tema general de la conectorización juega un rol muy importante en el comportamiento final de un sistema de transmisión por FO, y por lo tanto debe ser tenido en cuenta durante el diseño del mismo. Las fibras se conectan a las fuentes, detectores, y otras fibras mediante conectores y empalmes. Los conectores se usan principalmente en lugares donde se requiere la posibilidad de desconectar y conectar fácil y rápidamente un determinado componente o sistema, como puede ser los extremos finales de una línea con los detectores o emisores, en tanto que los empalmes se destinan a la unión de tramos de fibras en reparaciones o en tendidos de varios kilómetros de largo (los fabricantes suministran la fibra óptica en rollos de longitudes determinadas que casi nunca coinciden exactamente con la longitud física necesaria para cada caso en particular). Los empalmes pueden hacerse básicamente de dos maneras distintas, por un lado están los empalmes por fusión, en los cuales se requiere de una herramienta o maquina especial que suelda las fibras mediante el uso de un arco eléctrico, y por el otro lado existen los empalmes mecánicos. Ambos tipos de uniones están destinadas a ser permanentes, si bien algunos fabricantes ofrecen también cierto tipo de empalmes mecánicos que pueden desconectarse y volver a usarse, aunque, desde luego, un número reducido de veces.

También existen como componentes usados para distribución de señales ópticas en sistemas de múltiples fibras, el equivalente óptico de acopladores , llaves selectoras y distribuidores.

1.17.1 CONEXIONES Y EMPALMES PARA FIBRAS ÓPTICAS.

La conectorización en el campo de las fibras ópticas es bastante más complicada que en sistemas tradicionales que usan conductores de cobre, ya que se requiere no solamente la unión física de las fibras, sino el perfecto alineamiento óptico de los componentes a fin de que se produzca una mínima pérdida de potencia óptica.

En la actualidad existen varios tipos de conectores y empalmes cuyo diseño se ha efectuado teniendo en cuenta las principales causas que ocasionan pérdidas con el fin de minimizarlas.

En la elección apropiada de un tipo de conector, o una técnica de empalme adecuada para cada caso en particular intervienen varios factores, entre los cuales hay aspectos técnicos y económicos. Respecto de los aspectos técnicos el tema pasa por el conocimiento de cuáles son los factores que influyen en los efectos que las interconexiones producen sobre un sistema. El principal efecto es, desde luego, la atenuación; pero también hay otras consecuencias que se derivan, y que se estudiarán seguidamente.

1.17.2 LAS CAUSAS DE LAS PÉRDIDAS EN UNA INTERCONEXIÓN ÓPTICA.

Podría decirse que en general las pérdidas de potencia óptica en la interconexión de fibras o componentes, obedecen a tres diferentes factores:

1. Factores intrínsecos.
2. Factores extrínsecos.
3. Factores del sistema.

Los factores intrínsecos: son principalmente aquellos que se derivan de las pequeñas variaciones en la geometría y composición de una fibra que producen alguno de los efectos que se muestran a continuación.

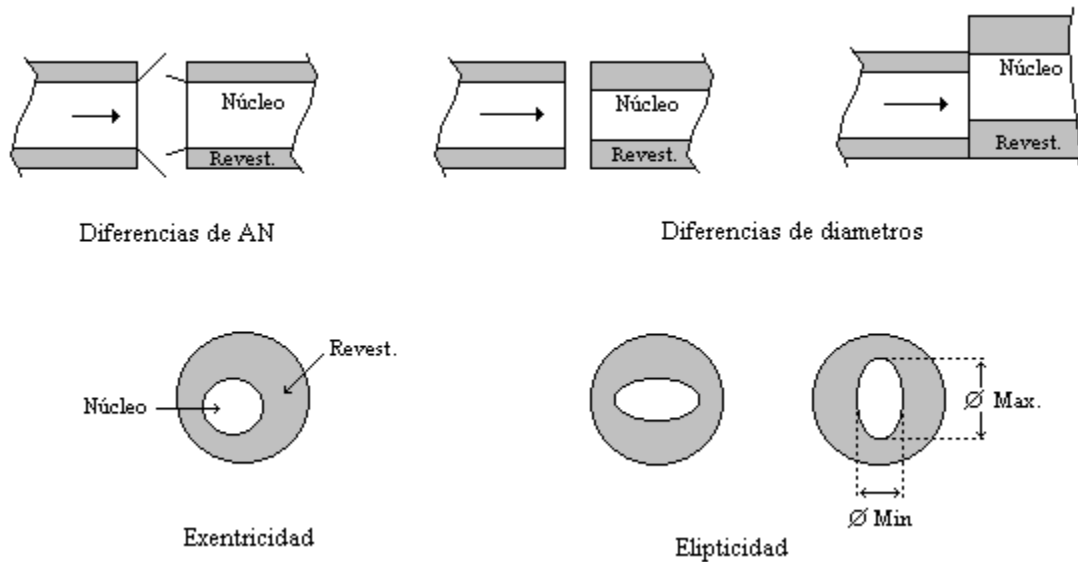


Figura 9-1

Las pérdidas por diferencias de apertura numérica y diferencias de diámetros: responden esencialmente a la misma causa estudiada previamente en lecciones anteriores al considerar los detectores y emisores.

Las pérdidas por exentricidad: ocurren cuando el núcleo de la fibra no está perfectamente centrado en el revestimiento. Idealmente los ejes del núcleo y el revestimiento deberían ser los mismos, pero siempre existe una pequeña desviación que depende de la calidad de la fibra.

Las pérdidas por elipticidad: se deben a que las secciones del núcleo y/o el revestimiento no son perfectamente circulares sino que presentan cierta deformación. Por este motivo el monto de las pérdida que pueden darse en la interconexión dependerá de la orientación entre sí de las fibras.

Las pérdidas por diferencias en el diámetro del revestimiento: se producen cuando el diámetro externo de este último es diferente entre las dos fibras que se acoplan.

Los factores intrínsecos que causan pérdidas en las interconexiones de fibras ópticas dependen sobre todo de las tolerancias en las dimensiones mecánicas de las mismas. Estas tolerancias quedan definidas principalmente durante el proceso de fabricación empleado y en menor medida por las condiciones de almacenamiento, y

manipulación posterior de la fibra. La siguiente tabla muestra algunos valores típicos de tolerancias que influyen en los factores intrínsecos para las fibras ópticas actuales.

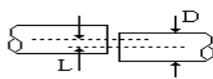
Tabla 1. Tolerancias de factores intrínsecos.

Factor intrínseco	Tolerancia
Diámetro del núcleo (50 μm)	$\pm 3 \mu\text{m}$
Diámetro del revestimiento (125 μm)	$\pm 3 \mu\text{m}$
AN (0,26)	$\pm 0,015$
Excentricidad (*)	$\leq 3 \mu\text{m}$
Elipticidad del núcleo (**)	$\leq 0,98$
Elipticidad del revestimiento (**)	$\leq 0,98$

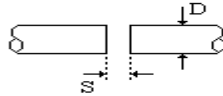
(*) La excentricidad es la diferencia entre el eje del revestimiento y el eje del núcleo

(**) La elipticidad del núcleo, o del revestimiento esta definida por la relación entre los valores del menor diámetro y el mayor diámetro de las secciones respectivas.

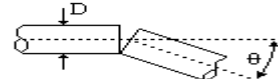
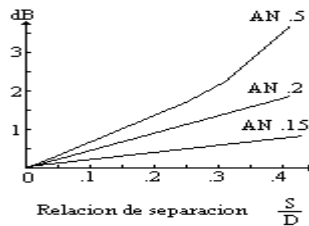
Los factores extrínsecos: son debidos a las variaciones de orientación o separación de la fibra dentro de un conector o un empalme. Siempre que dos componentes de un sistema de FO que se conectan no están perfectamente alineados ocurren pérdidas de potencia óptica. La siguiente figura ilustra sobre los distintos factores extrínsecos de pérdidas.



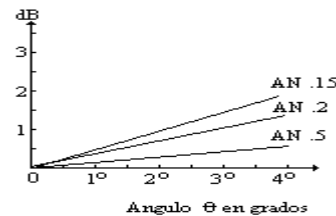
Pérdidas por desplazamiento



Pérdidas por separación



Pérdidas por desadaptación angular



Las pérdidas debidas a desplazamiento lateral ocurren, por ejemplo, cuando en un conector no existe una perfecta alineación de los ejes centrales de los dos

componentes a unir. (El efecto que se produce es esencialmente el mismo de las pérdidas por excentricidad.)

La relación entre el valor del desplazamiento lateral entre los dos ejes de las fibras a unir, y el diámetro del núcleo de las mismas, se conoce como "Relación de desalineamiento lateral"

$$\text{Relación de desalineamiento lateral} = \mathbf{L/D}$$

(Donde **L** es el desplazamiento lateral, y **D** es el diámetro del núcleo).

La separación entre bordes de dos fibras produce pérdidas debido principalmente a dos causas:

a) Algunos de los rayos luminosos se reflejan de vuelta hacia la fibra de salida en la frontera núcleo-aire de la misma, otros se reflejan en la frontera aire-núcleo de la fibra de entrada. Este efecto fue estudiado en lecciones previas y se conoce "pérdidas por reflexión de Fresnel".

b) En el caso de fibras multimodo, los rayos correspondientes a los modos de orden superior, simplemente no alcanzan a entrar en la fibra de entrada debido a que se pierden en el espacio de separación.

La magnitud de las pérdidas por separación dependen del valor de apertura numérica de la fibra y se reducen notablemente a medida que la AN es menor.

Si el espacio de separación está ocupada por aire, el valor de las pérdidas por reflexión de Fresnel que se produce es de alrededor de 0,34 dB. Este valor de pérdidas puede parecer despreciable, pero para un sistema en el que existan varias uniones (conectores o empalmes) puede terminar transformándose en un dolor de cabezas, por este motivo se suele usar un "fluido de adaptación de índice" para rellenar el espacio y reducir así las pérdidas. El fluido de adaptación es normalmente un gel transparente cuyo índice de refracción es el mismo o está muy próximo al del núcleo de la fibra, y también contribuye a reducir las pérdidas de modos de orden superior en fibras multimodo.

La reflexión de Fresnel también causa que parte de la energía que viaja por la fibra sea devuelta hacia el emisor y si la potencia reflejada es considerable puede llegar a interferir con el funcionamiento del mismo, esto puede ser particularmente grave en las fibras monomodo, donde se usan emisores Láser. Un recurso usado en este caso para disminuir la potencia reflejada es el que se pone en práctica en los conectores

llamados de contacto físico, PC por sus siglas en inglés, (que se estudiarán un poco más adelante)

La desadaptación angular entre dos fibras también introduce pérdidas al sistema. Las terminaciones de dos fibras que van a ser acopladas deben ser perpendiculares al eje de las mismas y paralelas entre sí. Por este motivo, el pulido y acabado plano de la sección de las fibras que se cortan para conectarse es de fundamental importancia en orden a minimizar la pérdida de potencia óptica.

Desde luego que la limpieza de las superficies de los cortes es otro de los factores extrínsecos que más contribuyen a las pérdidas en los conectores. Existen técnicas de limpieza así como solventes apropiados para tal fin cuya utilización es corriente y debe formar parte del juego de herramientas del operario calificado para esta tarea.

Los factores del sistema también contribuyen sobre las pérdidas que una unión o interconexión producen en el propio sistema, ya que el valor de las mismas depende en cierta medida del lugar donde la interconexión está efectuada. Por ejemplo, supongamos que en un determinado sistema se usa una técnica de empalmes que genera modos fugados (que se propagan a través del revestimiento). Si un empalme se efectúa cerca del receptor, aumentará la dispersión debido a la presencia de dichos modos fugados. El mismo empalme hecho cerca del emisor no tendrá el mismo efecto, ya que los modos fugados se atenúan rápidamente con la distancia y casi con seguridad no alcanzarán a llegar al detector. Por otro lado, las pérdidas por retorno serán más perjudiciales si el empalme o conector que las generan están cerca del emisor, ya que en caso contrario (si están alejados del mismo) la potencia reflejada se atenuará naturalmente debido al trayecto.

1.17.3 PÉRDIDAS POR INSERCIÓN.

La pérdida de potencia que se produce al intercalar un conector o un empalme en un tramo de fibra óptica determinado se conoce como "pérdidas de inserción". Para determinar las pérdidas por inserción de una unión, los fabricantes usan técnicas y métodos de medición normalizados, siendo la norma más comúnmente usada, la fijada por La "Electronic Industries Association" (EIA). En forma simplificada la medición se efectúa determinando la diferencia entre los niveles de potencia obtenidos en el extremo de una fibra óptica de longitud determinada antes y después de efectuar un corte en la misma e intercalar el conector o la unión correspondiente.

$$\text{Pérdidas por inserción} = 10 \log (P1/P2)$$

(Donde **P1** es la potencia medida con la fibra entera y **P2** la potencia medida con el conector intercalado) .

Pero debe tenerse en claro que la pérdida especificada es válida para fibras idénticas, de lo contrario deben agregarse las pérdidas por diferencias de diámetro y de apertura numérica (mediante las expresiones estudiadas en las lecciones previas).

También hay que tener en cuenta que puede existir un valor adicional de pérdidas por reflexión de Fresnel .

Los valores típicos de pérdida de inserción de un buen conector moderno para fibras ópticas de vidrio están en torno a los 0,3dB, lo cual está bastante por debajo del valor de 0,75dB permitido como máximo por varias normas de interconexión de redes. En cuanto a las pérdidas que se producen en los empalmes, estas varían de acuerdo a si el mismo es mecánico (pérdidas no menores a 0,1 dB) o si es por fusión (menores de 0,1 dB)

El reducido valor de pérdidas por inserción que se logran hoy en día se ha dado como resultado de una mejora permanente en la tecnología de fabricación. Inicialmente, cuando aparecieron las primeras fibras ópticas comerciales, se consideraban razonables pérdidas de hasta 1,5dB, paulatinamente las mejoras permitieron superar la barrera de 1dB hasta llegar a los valores actuales de alrededor de 0,3dB.

Se agrega además que en la actualidad existen varios tipos de conectores, pero estos diferentes tipos, que son de uso popular en Europa, Japón y los Estados Unidos, normalmente difieren entre sí, y en un país como el nuestro, que no genera su propia tecnología sino que la adopta de acuerdo a la conveniencia, no es descabellado pensar

que el ingeniero proyectista o de mantenimiento, deba enfrentar situaciones donde haya una mezcla de normas, y la elección acertada para una aplicación específica dependerá en gran medida del conocimiento de las características principales de cada tipo.

1.17.4 REQUERIMIENTOS DE LOS CONECTORES PARA FIBRAS ÓPTICAS.

Se pueden listar por lo menos seis características principales que son deseables y deben ser tenidas en cuenta a la hora de seleccionar un conector para una aplicación determinada. Dichas características o requerimientos son:

- Bajo valor de pérdidas de inserción.
- Buena estabilidad ambiental.
- Facilidad de instalación.
- Mínima dispersión de las tolerancias (Mínima variación del valor de las pérdidas entre dos conectores del mismo tipo).
- Alta repetibilidad (Número de veces que un conector puede ser desconectado y vuelto a conectar sin degradarse).
- Bajo costo.

1.17.5 TIPOS DE CONECTORES.

En líneas generales, casi todos los conectores usados para fibras ópticas consisten en:

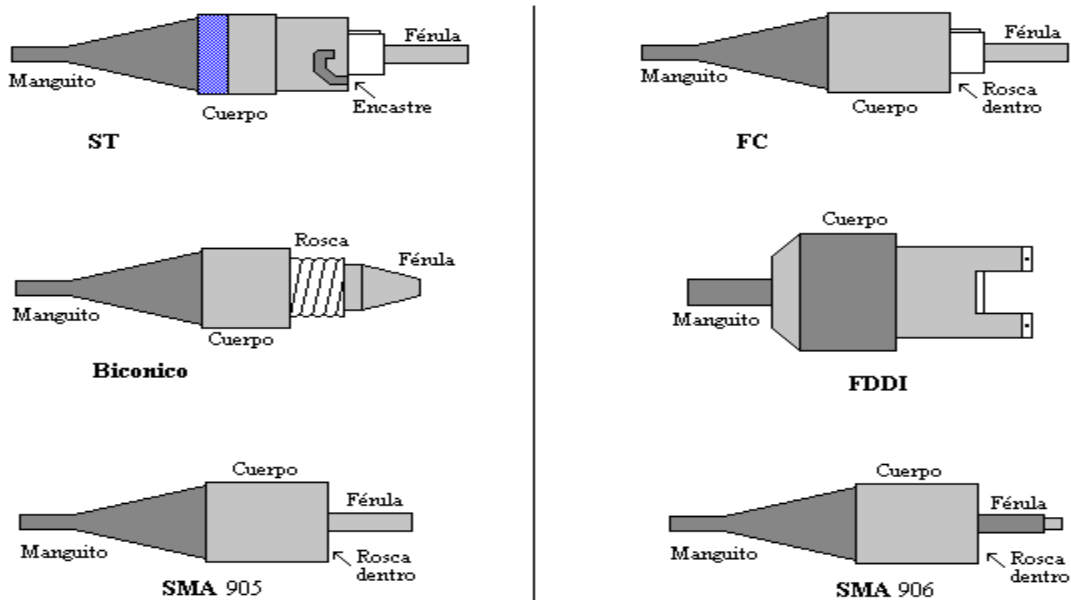
- Un "casquillo" o férula, cuya función es fijar y alinear la fibra propiamente dicha. La fibra se inserta mediante la técnica apropiada en la férula, y el conjunto se asegura mediante una gota de resina epoxi, lo cual permite el pulido y acabado del borde frontal.
- Un "cuerpo" o cápsula, con su correspondiente sistema de encastre o rosca que sirve para mantener el conector en su sitio.
- Un "manguito" o refuerzo para la descarga de tensiones mecánicas.

Sin embargo la múltiple variedad de conectores que existen son, fuera de estas similitudes, radicalmente diferentes, por lo cual se hace necesario establecer una clasificación a fin de diferenciarlos. Pueden seguirse varios criterios para establecer dicha clasificación y no hay una regla que sea mejor que la otra.

Por una parte puede establecerse una diferenciación teniendo en cuenta el material que se emplea para su fabricación; así se tienen por un lado los conectores de "plástico moldeados" y por el otro lado los de "metal maquinado". (Los conectores de plástico son mas baratos que los de metal).

También podría clasificarse los conectores teniendo en cuenta el material de que esta construida la férula o casquillo, desde este punto de vista los hay de cerámica, de acero, y de plástico. (La férula de acero es la que permite mayor repetibilidad, le sigue la de cerámica y por ultimo la de plástico).

Otra pauta podría ser dividirlos, de acuerdo al tipo de fibra para el que están fabricado, en conectores multimodo, y conectores monomodo. En este texto se seguirá este criterio.



(Conectores típicos para fibras ópticas)

1.17.6 CONECTORES MULTIMODO.

Tipo SMA: Hasta el presente, aproximadamente el 80 % de los sistemas implementados en base a fibras ópticas multimodo instalados en los EE.UU. se han realizado con un tipo de conectores denominados SMA (Sub miniature Style A) que fueron desarrollados por la firma Amphenol alrededor del año 1970. Tiene altas pérdidas, aproximadamente 0,7 dB, y por esta razón paulatinamente va siendo reemplazado por tipos más modernos. No es recomendable para la implementación de sistemas nuevos (salvo circunstancias que lo justifiquen). El tipo de conectores SMA se consigue en varios estilos, siendo los más populares:

1. Estilo 905.
2. Estilo 906.
3. Estilo SMA cerámico.

El estilo 905 fue ideado para ser usado con un tipo de fibra de núcleo más grande que las actuales cuya difusión finalmente no prosperó y se usan principalmente en sistemas de comunicaciones punto a punto para pequeñas distancias, es decir donde no existen empalmes ni repetidores.

El estilo 906 se diseñó para fibras multimodo (Tipos III, IV y V). Tiene mejor comportamiento que el estilo 905 pero es ligeramente más costoso. La principal diferencia respecto de aquel es que el casquillo es escalonado en lugar de ser recto.

El estilo SMA Cerámico se diferencia de los anteriores precisamente porque el casquillo es de material cerámico, lo cual le confiere un comportamiento muy superior con pérdidas menores a 0,5 dB pudiendo llegar a ser tan pequeñas como 0,1 dB. (La técnica de alineamiento mediante casquillos cerámicos se usa corrientemente para fibras monomodo). Es, desde luego, más caro que los tipos 905 y 906.

Tipo Biconico: Es un tipo de conector algo anticuado que fue desarrollado en Japón. Tiene una repetibilidad pobre, es susceptible a las vibraciones y tiene altas pérdidas (valores mínimos 1dB). No se recomienda su utilización.

Tipo ST: Es un tipo de conector más moderno que ha ido sustituyendo al tipo SMA. Se usa también para conexiones con fibras monomodo. Tiene pérdidas promedio menores que 0,5 dB. El cuerpo tiene un sistema de encastrado con medio giro y resorte

(similar a los conectores BNC para coaxiales) que es bastante bueno para ambientes con vibraciones. Es fabricado por y para varias firmas (AMP, 3M AT&T) con algunas diferencias físicas entre si, (Férula de acero y/o de cerámica) pero sin perder la compatibilidad.

Tipos de plástico: Otro tipo de conectores usados para fibras multimodo son los de férula plástica simple y los DNP (Dry No Polish). En los primeros el conector es completamente de plástico y la fibra se asegura a la férula mediante resina epoxi y un sistema de sujeción mecánica (crimpeado). En cambio el conector DNP no requiere el uso de pegamento y la fijación de la fibra se hace solo mediante presión. Son conectores de muy bajo costo, pero tienen elevadas pérdidas (entre 2 y 4 dB). Se usan principalmente con fibras multimodos de plástico, y son apropiados para enlaces de longitudes no mayores a 50 m y con velocidades por debajo de los 30 Mbits/seg.

1.17.7 CONECTORES MONOMODO.

La principal diferencia entre los conectores monomodo y los multimodo, son las tolerancias permitidas, que son mucho mas estrictas en los primeros. En realidad hay algunos tipos de conectores que pueden ser usados indistintamente para uno u otro caso en función precisamente de las tolerancias especificadas, como por ejemplo el Tipo **ST**, o alguno de los siguientes:

Tipo FC: También conocido como tipo FCN, fue desarrollado por la NTT de Japón. Tiene, por ejemplo, tolerancias menores al 1% para la excentricidad, y pérdidas de inserción por debajo de 0,4 dB. Es muy común en la industria de la televisión por cable, y existen versiones denominadas de contacto físico que se identifican por el agregado de la sigla PC (Physical Contact).

La técnica del contacto físico consiste básicamente en un acabado redondeado del borde frontal de la férula y fibra, con esto se consiguen dos efectos. Primero los dos elementos (fibras o transductores) pueden entrar en contacto de manera mas efectiva. Segundo El borde redondeado hace que la luz reflejada de vuelta hacia el núcleo de la fibra lo haga en una dirección distinta de la incidente con lo cual se

termina dispersando a través de la cubierta, (lo cual es muy conveniente a fin de no saturar el emisor).

Tipo SC: Es un nuevo tipo de conector modular de plástico de alta densidad con sistema de encastre que permite el adosado de dos conectores en un conjunto que solo puede conectarse en un sentido, lo cual lo hace muy útil para el caso de un dúplex (cada fibra lleva información en un único sentido). Tiene bajas pérdidas, debajo de 0,5 dB.

Tipo FDDI: Es un conector duplex (doble) con llave de uso estándar en sistemas full duplex. Es muy similar al conector tipo **ESCON** usado por la firma IBM para sus sistemas. No son compatibles entre si.

1.18 EMPALMES PARA FIBRAS ÓPTICAS.

Los empalmes se usan cuando se necesita lograr una unión permanente o semi-permanente entre dos fibras ópticas. Los métodos que se aplican para efectuar la unión son básicamente de dos tipos:

- Empalmes por fusión.
- Empalmes mecánicos.

Cada tipo de empalme ofrece ventajas y desventajas dependiendo de las circunstancias en que debe efectuarse la unión. Entonces, para la elección apropiada de una de las técnicas, se requiere por lo menos conocer en que consiste cada una. Lo que sigue es un resumen de las principales características de cada método.

Empalmes por fusión.

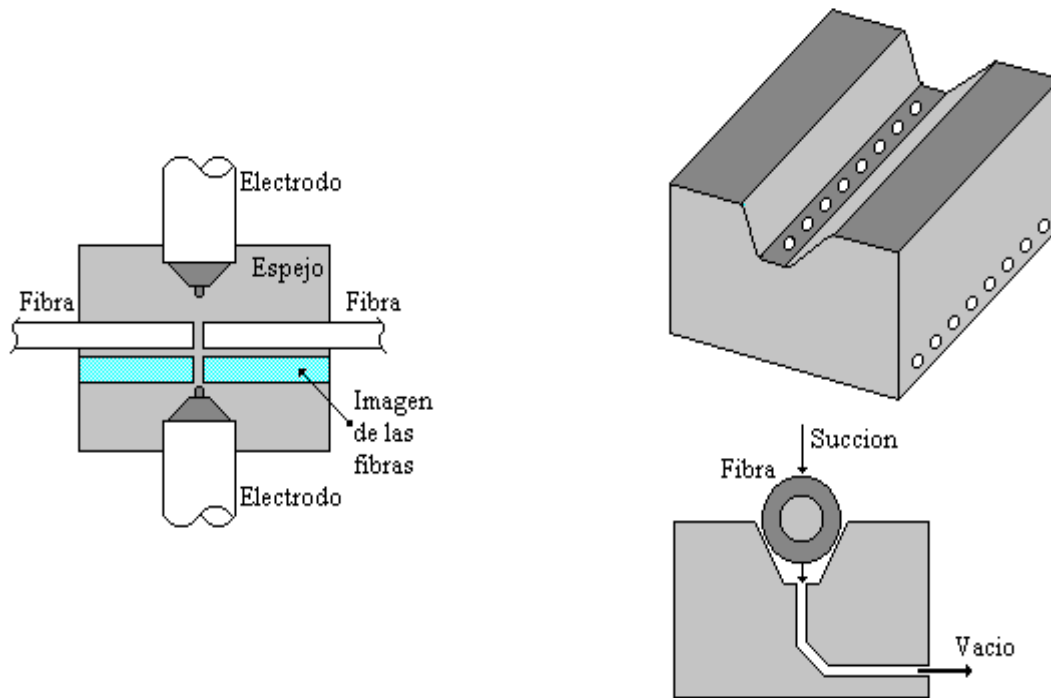
Un empalme por fusión entre dos fibras ópticas es análogo al procedimiento de soldadura entre dos conductores de cobre. Esta técnica es ampliamente usada en

situaciones en que se requiere un gran número de empalmes con bajas pérdidas. El principio básico del empalme por fusión consiste en alinear en forma lo más perfecta posible, los núcleos de las fibras a unir para luego fundir el vidrio mediante el empleo de un arco eléctrico.

Una empalmadora por fusión está compuesta básicamente por tres partes principales:

- 1) El sistema de visualización del punto de soldadura.
- 2) El sistema de alineado de las fibras.
- 3) El sistema de soldadura.

La figura siguiente muestra la estructura fundamental de dicho sistema



- Empalme por fusión -

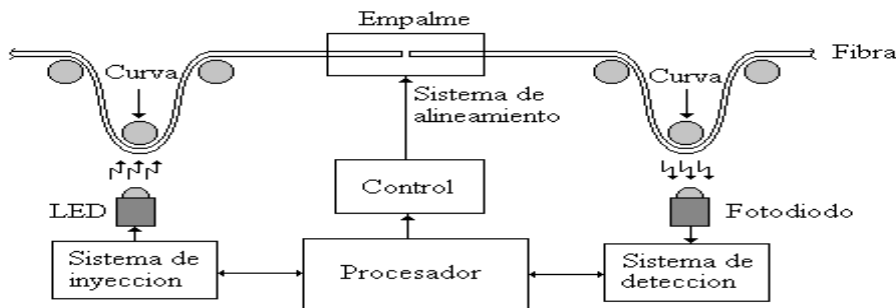
- Soporte con "ranura en V" -

Los dos extremos de las fibras a empalmar son primeramente alineados y fijados mediante un "micro-posicionador", el cual posee un sistema de visualización. El visor consiste en un microscopio y un sistema con espejos que permite obtener una vista de las fibras sobre un sistema de ejes ortogonales.

El sistema de alineado esta compuesto básicamente por dos soportes o bases en cada una de las cuales hay una "ranura en V" que gracias a unos agujeros practicados en el fondo de la misma, por los que se aplica presión negativa mediante un sistema de vacío, mantienen la fibra en posición firme.

Hay además un sistema de posicionamiento que mueve los soportes en las direcciones X,Y,Z a fin de lograr el alineado.

Algunas maquinas de soldar de gran calidad usan, para verificar la perfección del alineado, un sistema de "inyección y detección local". Cuando una fibra óptica esta curvada por debajo de un cierto radio, una cierta cantidad de luz puede escapar del núcleo hacia el revestimiento y perderse hacia el exterior, (recordar el problema de las pérdidas por microcurvaturas). En los sistemas de inyección y detección local, este efecto se usa en forma inversa a fin de verificar el alineado del empalme. Las fibras se doblan cuidadosamente (sin llegar a deformarla en forma irreversible) sobre una plataforma ajustable siguiendo una curva bastante cerrada y en una de ellas se inyecta luz al núcleo por el mismo camino que seguiría para escapar del mismo. La luz inyectada de esta manera se acopla a la segunda fibra a través del punto de empalme y escapa hacia afuera en la otra curvatura practicada. Un sistema de detección mediante un fotodiodo sirve para medir la potencia óptica de salida, que será máxima cuando las perdidas en el empalme sean mínimas. De esta forma es posible lograr un alineado prácticamente perfecto.



Sistema de alineado con inyección y detección local

El sistema de soldadura propiamente dicho consiste en un juego de electrodos conectados a una fuente de alimentación controlable. Luego de que se consigue el alineado apropiado, se aplica una alta tensión a los electrodos para crear el arco que

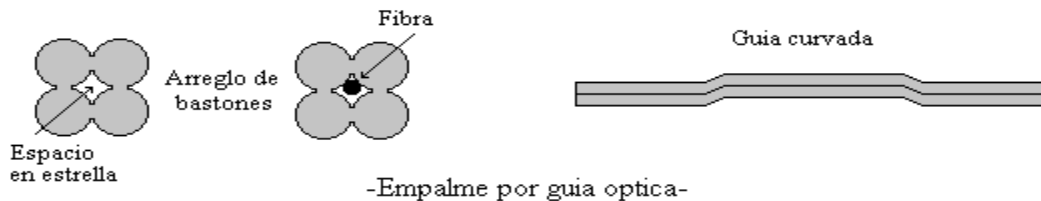
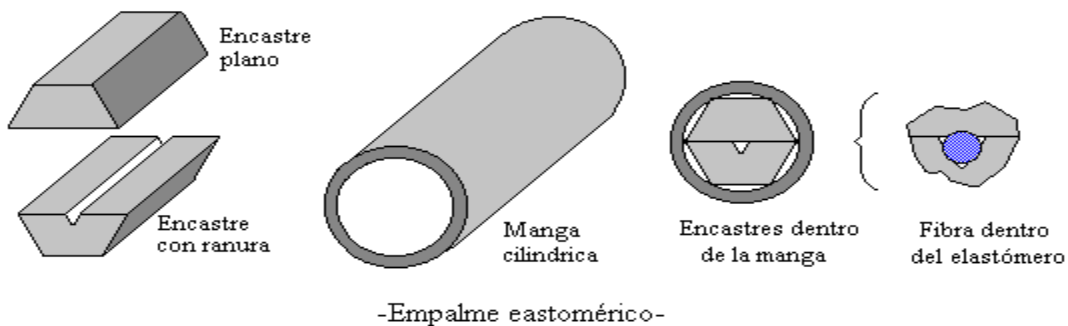
funde las fibras y las une permanentemente. Se pueden conseguir de esta manera uniones con pérdidas menores a 0,1dB, (por ejemplo 0,05 dB).

El sistema de electrodos también suele usarse para efectuar un ciclo de limpieza previa. Para ello se aplica inicialmente una tensión menor que genera un arco cuya temperatura no es suficiente para fundir el vidrio pero si libera las superficies de partículas extrañas y de humedad. Luego se aplica el arco para la soldadura definitiva, la cual requiere temperaturas del orden de los 2000 °C.

1.18.1 EMPALMES MECÁNICOS.

El empalme mecánico para fibras ópticas se consigue mediante el uso de un soporte físico externo preparado para lograr simultáneamente el alineado y posterior fijación de las fibras. Hay en la actualidad varios fabricantes y técnicas disponibles. Algunas de las más populares son:

- El empalme elastomérico.
- El empalme de guía óptica.
- El empalme por ranura V de silicio.



En la técnica de empalme elastomérico (desarrollada por GTE.) se utilizan dos encastres de elastómero (material plástico deformable), uno de los cuales posee una ranura en forma de V a lo largo del eje central; el otro encastre es plano (ver figura). Las dos piezas se ubican dentro de una manga cilíndrica que mantiene centrado el

conjunto y en los extremos de la cual hay dos guías que sirven para centrar y sujetar cada una de las dos fibra a unir.

Cuando los extremos de las fibras se insertan suavemente en el encastre, se van deslizando por el espacio de sección triangular formado en el centro de los mismos. El empalme puede abrirse y volver a cerrarse algunas veces, y si se quiere que sea definitivo, se fijan las fibras a cada una de las guías mediante una gota de resina epoxy.

En el empalme de guía óptica, (cuya patente pertenece a TRW) se usa un sistema formado por cuatro bastones cilíndricos de cuarzo unidos entre si a lo largo del eje de manera de forma en el centro un espacio en forma de estrella de cuatro picos. El conjunto esta ligeramente curvado en dos partes de manera que al insertar las fibras por cada uno de los extremos son obligadas a ubicarse contra uno de los picos de la estrella hasta entrar en contacto en el centro del empalme.

El empalme por ranura V de silicio desarrollado por AT&T es similar al de elastómero, pero usa dos guías fabricadas sobre un sustrato de silicio en los cuales se ha practicado una ranura en V de alta precisión. En todas estas técnicas de empalme es habitual el uso de fluido de adaptación para reducir la reflexión de Fresnel.

1.18.2 TERMINACIÓN DE LOS EMPALMES.

Tan importante como realizar correctamente y mediante la técnica apropiada un empalme para un propósito determinado, es la adecuada terminación final que se consigue mediante el uso de las cajas de empalmes y/o bandejas de empalmes. Estas se usan para proteger del entorno, tanto el cable de fibra óptica pelado (es decir desprovisto de su cubierta protectora), como el empalme propiamente dicho.

Existen cajas aptas para uso exterior e interior. Las primeras deben ser a prueba de los efectos de la intemperie y con un sellado impermeable. También hay cajas preparadas solo para empalmes mecánicos y otras que sirven únicamente para empalmes por fusión y normalmente no son intercambiables. Es común que los empalmes se cubran también con una funda termocontraible, la cual además de proteger la fibra, permite la descarga de tensiones mecánicas.

Las cajas de empalme pueden contener una o varias bandejas de empalmes y además suelen estar dotadas de las guías y zunchos para la sujeción de los cables , así como los agujeros de entrada y salida con el correspondiente sistema de protección y amarre.

Las cajas y bandejas de empalme pueden ser sensibles a la longitud de onda óptica, ya que es común la practica de arrollar el cable de fibra óptica dentro de la misma a fin de sujetarlo mas efectivamente mediante abrazaderas. Como el radio de curvatura mínimo permitido depende en gran medida de la longitud de onda de la luz usada, puede resultar que una caja de empalmes que, por ejemplo, es apta para 810 nm puede causar una atenuación adicional a una longitud de onda de 1550 nm. Por este motivo es importante consultar las especificaciones del fabricante antes de la compra de una caja de empalmes para una determinada aplicación.

Las bandejas de empalme normalmente pueden contener hasta 12 uniones, y cuando se necesita empalmar un cable que contenga un mayor numero de fibras, se recurre al uso de cajas con varias bandejas o incluso mas de una caja. En este ultimo caso es importante usar algún tipo de tubo de protección con un divisor adecuado a fin de que las fibras individuales no queden de ninguna manera, sin protección fuera de las cajas.

1.19 MEDICIÓN DE POTENCIA EN FIBRAS ÓPTICAS.

Como ya se ha estudiado, la luz puede considerarse como paquetes discretos de energía llamados fotones. Para la luz monocromática , que es la que normalmente se utiliza en los sistemas de comunicaciones por FO, cada fotón contiene la misma cantidad de energía, la cual es igual a : $E = h \cdot c / \lambda$. La potencia óptica (**Po**) de una fuente es proporcional a la cantidad de energía en forma de fotones que dicha fuente emite en la unidad de tiempo:

$$P_o = \frac{N \cdot h \cdot c}{\lambda \cdot t} \quad (11-1)$$

Donde "**N**" representa el numero de fotones y "**t**" el tiempo

Estas ecuaciones sirven como definiciones, pero no tienen gran utilidad práctica porque la cantidad de energía contenida en un único fotón es sumamente pequeña y resulta imposible medir la cantidad de energía luminosa o la potencia de un solo fotón, o discriminar un cambio de energía igual a un fotón. Por lo tanto, cuando se mide la energía luminosa o la potencia en un sistema de fibras ópticas, las mediciones aparecen continuas y no cuantizadas.

La potencia de la fibra óptica se mide con un fotodiodo. Puede obtenerse una relación sencilla entre la potencia incidente en el diodo y la corriente inversa que circula por el mismo si se parte de la ecuación (11-1), que puede reordenarse:

$$\frac{P_o \cdot \lambda}{h \cdot c} = \frac{N}{t}$$

Multiplicando ambos miembros por la eficiencia cuántica η

$$\frac{P_o \cdot \lambda \cdot \eta}{h \cdot c} = \frac{N \cdot \eta}{t}$$

Si tenemos en cuenta que la cantidad de electrones que se inyectan en la banda de conducción es igual al producto del numero de fotones por la eficiencia cuántica del fotodiodo, el segundo miembro de la expresión anterior es el numero de electrones generados por unidad de tiempo, que puede expresarse como intensidad de corriente si se multiplica por la carga del electrón.

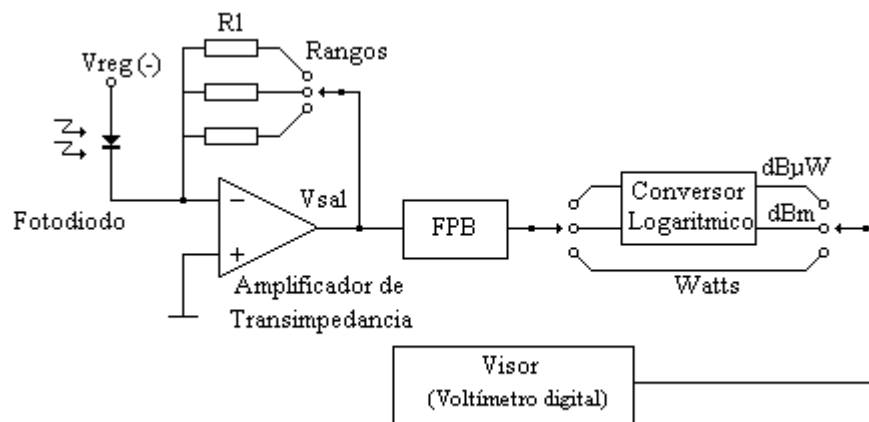
$$P_o \cdot \frac{\lambda \cdot \eta \cdot q}{h \cdot c} = I$$

De esta expresión se desprende que la corriente inducida (a la que podríamos llamar "fotocorriente"), es en realidad proporcional a la potencia óptica incidente en el fotodiodo multiplicada por una constante que incluye, entre otras cosas, la longitud de onda de la luz (El estudiante podrá notar que esta constante es precisamente la sensibilidad cuántica que se introdujo como definición en la lección anterior). Como consecuencia de ello los medidores de potencia óptica se deben calibrar para una longitud de onda específica.

El área activa de un fotodiodo es mucho mayor que el diámetro del núcleo de una fibra óptica típica; además su apertura numérica es casi siempre bastante grande y próxima a 1, por lo tanto es valido suponer que toda la energía luminosa de una fibra se acopla al detector. Este no es el caso de los emisores, donde un porcentaje considerable de la energía luminosa se pierde en el proceso de acoplamiento.

1.19.1 LOS MEDIDORES DE POTENCIA ÓPTICA.

La corriente inversa de un fotodiodo es única en el sentido de que es proporcional a la potencia óptica incidente. (Por lo general se tiene la noción que, para una impedancia constante, la potencia debe ser proporcional al cuadrado de la corriente o de la tensión). Esta comportamiento poco común se utiliza como una ventaja en los medidores de potencia óptica. La corriente inversa del fotodiodo se convierte en un voltaje y el resultado se presenta en un visor. La figura siguiente muestra el esquema en bloques básico de un medidor de potencia óptica para fibras ópticas.



Esquema en bloques de un medidor de potencia óptica.

El fotodiodo se usa en el circuito de entrada de un amplificador de "transimpedancia", el cual convierte la corriente del diodo en un voltaje de salida. Dado que la eficiencia cuántica de un fotodiodo puede variar ligeramente en función del voltaje de polarización, el mismo se conecta a una fuente de tensión regulada. El circuito se implementa mediante un amplificador operacional de alta ganancia directamente después del diodo, de manera que la impedancia de salida del amplificador de

transimpedancia presente un valor bajo y constante. El voltaje de salida del amplificador de transimpedancia, respecto de la corriente de entrada , esta dado por:

$$V_{sal} = R1 \cdot I$$

Debido a que los valores absolutos de potencia óptica son bajos, se requiere un valor elevado de ganancia para detectar las variaciones de la corriente inversa del fotodiodo, por lo cual el voltaje de ruido generado por el propio amplificador, e incluso el detector, pueden causar lecturas inestables. Por lo tanto, el circuito necesita un filtro pasa bajos a la salida del amplificador de transimpedancia para reducir un poco el voltaje de ruido.

Dado que el rango de potencias que normalmente se encuentran en un sistema de FO puede abarcar varias décadas, la ganancia del amplificador de transimpedancia se cambia por pasos. Algunos instrumentos requieren un ajuste manual del rango, otros (al igual que los multímetros autorango) ajustan automáticamente el alcance. Es habitual que la presentación para su lectura del valor de potencia se haga con un cierto numero de cifras significativas mas un exponente.

También es sumamente conveniente medir la potencia en fibras ópticas usando notación en decibeles como dBm o dB μ W , por lo cual algunos instrumentos utilizan un circuito convertidor logarítmico entre la salida del filtro pasa bajos y el dispositivo indicador de salida, pudiendo el operador optar por la forma de lectura mas conveniente de acuerdo al caso.

Cuando se instala un sistema de comunicaciones con fibras ópticas o cuando se busca algún fallo, la atenuación de la luz es uno de los parámetros importante que deben medirse. Por lo general la atenuación se evalúa midiendo la potencia de la fuente óptica antes y después de la atenuación. Las pérdidas de energía óptica en el dispositivo se calculan mediante la diferencia entre los niveles de potencia.

En general la potencia óptica se mide básicamente de dos maneras distintas. La primera forma de medir, no tiene en cuenta la longitud de onda de la luz emitida y en el caso de una fuente que emita varias componentes (por ejemplo luz blanca) proporciona el valor de la intensidad luminosa total, siendo la unidad de medida usada

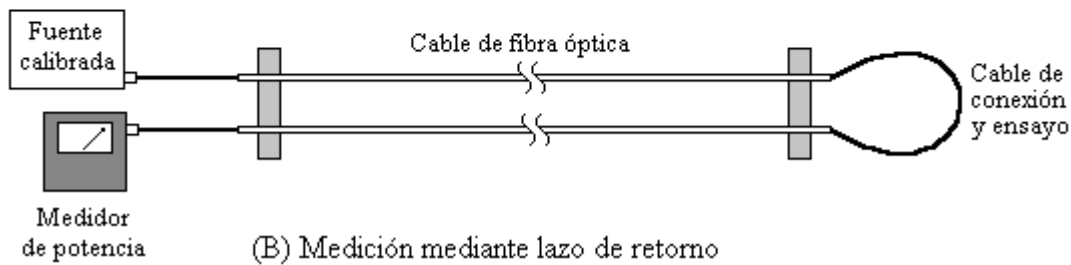
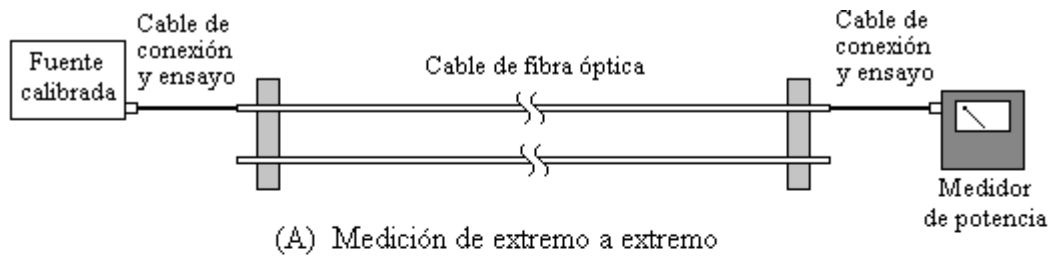
el "Lux" . La otra forma de medir es teniendo en cuenta la longitud de onda y normalmente permite obtener el valor de la potencia óptica, que se mide en "Watts", por separado para cada componente espectral. El primero de los métodos, que suele ser mas fácil de implementar, es el que se usa en luminotecnia, en cambio el segundo método, que es normalmente mas complicado ya que requiere separar las componentes espectrales, predomina en la técnica de las fibras ópticas ya que prácticamente termina simplificándose bastante debido al uso de fuentes ópticas monocromáticas.

1.19.2 FUENTES ÓPTICAS CALIBRADAS Y ESTABILIZADAS.

Una fuente de luz estabilizada es el equivalente óptico de un generador de señales, y al igual que este, se puede utilizar como herramienta de medición y localización de fallas en los sistemas de comunicaciones por FO. Las fuentes de luz calibradas usan normalmente un diodo láser, aunque también es viable la utilización de diodos LED. también hay oportunidades en que se necesita usar una fuente óptica de banda ancha, y para ello se usa una simple lampara incandescente.

En cualquiera caso que se trate, una fuente estabilizada y calibrada requiere algún tipo de control para mantener la salida dentro de los niveles especificados principalmente ante las variaciones de temperatura (lo cual es particularmente importante para fuentes que usen un láser), para ello se utiliza un fotodetector para muestrear la luz emitida y por reglamentación ajustar la corriente de excitación del emisor.

la figura siguiente muestra el diagrama en bloques de una fuente de luz estabilizada que usa un diodo láser como emisor. El monitor de salida es un fotodiodo PIN que se encuentra encapsulado junto con el emisor.



Una fuente óptica estabilizada, como la que se ha descrito en el párrafo anterior, puede usarse para generar la señal conocida aplicada en una de las puntas del sistema, mientras que la potencia en el final de la misma se puede medir con un medidor de potencia óptica. Este método se esquematiza en el dibujo anterior (figura A).

Sin embargo este método se torna poco práctico cuando los dos extremos del sistema están separados por varios kilómetros. En estas circunstancias puede usarse un método de lazo cerrado aprovechando que todo sistema de comunicaciones por fibras ópticas de tipo duplex dispone de dos grupos idénticos de dispositivos de modulación y detección en sentido opuesto además de dos fibras (una para la transmisión y otra para la recepción) para formar un sistema bidireccional completamente funcional. (Figura B)

De todas maneras, ya sea que se use el método directo o el método de lazo cerrado, resulta poco menos que imposible determinar las causas que originan pérdidas no deseadas por el simple echo de medirlas. (No puede saberse, por ejemplo, si las pérdidas se deben a fallos en conectores, rupturas, curvaturas menores que las tolerables, o una dispersión de Rayleigh excesiva). Tampoco hay manera de determinar el lugar donde ocurren las pérdidas, dato muy importante para la reparación y mantenimiento de un sistema.

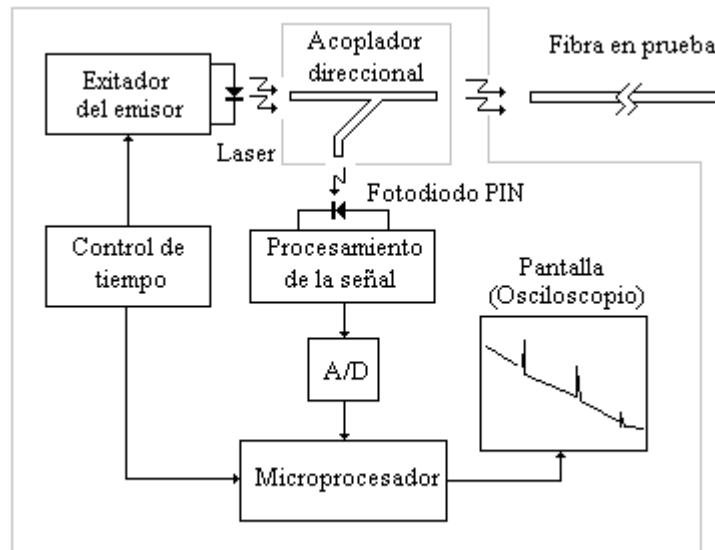
Cuando se necesitan determinar pérdidas y las causas que las originan en sistemas cuyos extremos están alejados, se cuenta con otros métodos de medición, como el de

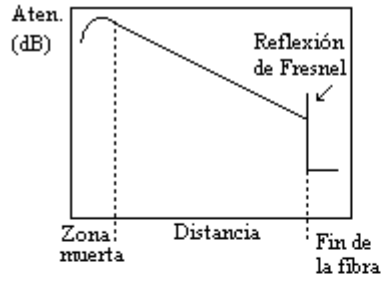
reflectometría óptica en el dominio del tiempo. Los instrumentos que funcionan siguiendo este método se conocen por sus siglas en inglés OTDR.

1.19.4 REFLECTOMETRO ÓPTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (OTDR)

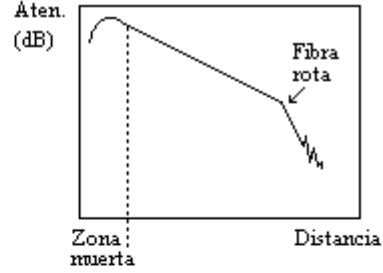
Una herramienta muy poderosa para el mantenimiento e instalación de un sistema de fibras ópticas es el OTDR. Este instrumento analiza la energía óptica reflejada en una instalación de FO para establecer la existencia y localización de discontinuidades en la fibra, pérdidas en uniones y conectores y las pérdidas totales del sistema. Un operador hábil puede, con el tiempo, reconocer el lugar y el tipo de fallo en un enlace, dado que la magnitud de la cantidad de energía que se refleja de vuelta hacia el generador en una fibra óptica tiene que ver con el tipo de discontinuidad que la produce. Una reflexión muy grande corresponde directamente a una ruptura de la fibra, Una reflexión de valor mediano se produce normalmente por pérdidas en conectores y uniones, en tanto que las reflexiones de menor valor obedecen a causas tales como la dispersión de Rayleigh y/o la reflexión de Fresnell.

La figura siguiente muestra un diagrama en bloques de un reflectómetro óptico típico.

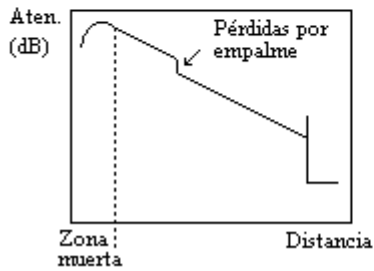




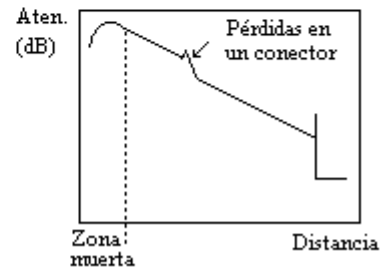
1- Fibra en buen estado



2- Corte pobre o fibra rota

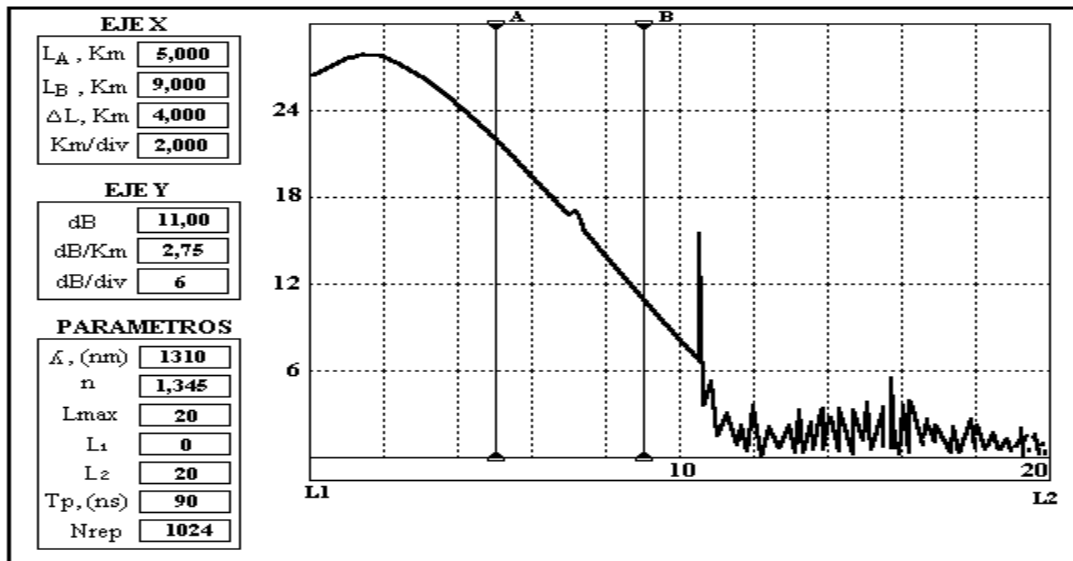


3- Pérdidas por empalme, mal doblado u otras



4- Pérdidas en un conector

Trazados de curvas típicas de un OTDR.



Panel frontal típico de un OTDR

Significado de los parámetros:

Los principales parámetros que deben ajustarse para la correcta utilización de un OTDR son:

La longitud de onda de operación (λ); que debe coincidir con la ventana de trabajo de la fibra óptica bajo pruebas.

El índice de refracción del núcleo de la fibra (n). Su valor debe obtenerse de las especificaciones del fabricante de la fibra. Para una medida de gran exactitud se requiere conocer el valor del índice de refracción con la mayor resolución posible (p.ej. con cuatro cifras decimales por lo menos).

La duración del impulso óptico emitido (T_p). Que debe mantenerse lo mas breve que sea posible en consonancia con la longitud de la fibra ensayada.

El ancho del pulso tiene importancia en el tamaño de la "zona muerta", que siempre se observa en el comienzo del trazo sobre la pantalla del OTDR. Ya que el instrumento no puede determinar valores a distancias menores que aquella cuyo limite viene impuesto por la duración del pulso y la velocidad de propagación del mismo en la fibra.

Para resolver este problema, es habitual que el instrumento cuente entre sus accesorios, con un tramo de fibra óptica de 1 Km de longitud, sin recubrimiento, que esta bobinada sobre un pequeño carrete. Este accesorio se denomina "Fibra para zona muerta", y la longitud de fibra que se añade debe ser luego descontada para el calculo final, cosa que la mayoría de los instrumentos realiza automáticamente por si mismo.

El numero de muestras tomadas para la medición (N_{rep}): Este parámetro tiene importancia en la relación que se da entre la velocidad de la medición, y la resolución requerida. Una prueba inicial rápida puede hacerse con un pequeño numero de muestras, en cambio la prueba final (para la certificación del sistema) se debe hacer con la mayor exactitud posible.

La determinación exacta del lugar donde existe una anomalía en un cable, depende desde luego de la exactitud con la cual se conoce la longitud total de la fibra. Hay que tener en cuenta que la longitud de la fibra no siempre es exactamente igual a la del cable, ya que es habitual que si el cable contiene un manojo de fibras, estas estén trenzadas, con lo cual la longitud de las mismas es ligeramente mayor que la del cable (el efecto mas notable aun en los cables de estructura holgada). Normalmente los fabricantes de cables especifican esta diferencia mediante un coeficiente que debe usarse para corregir la medida efectuada.