

Unión Internacional de Telecomunicaciones



Universidad Blas Pascal



Tecnologías de Comunicaciones Ópticas y Normativas

Propagación

Propagación dentro de la Fibra

La fibra óptica es un medio de transmisión capaz de transportar información tanto analógica, como digital. Así, su principio de funcionamiento debería ser estudiado por medio de las *Ecuaciones de Maxwell*, para una comprensión rigurosa. Otro método, menos riguroso, para estudiar la propagación en la fibra óptica, son las *Leyes de la Óptica Geométrica*.

La fibra óptica posee dos regiones claramente distinguibles, el *núcleo* y el *revestimiento*. El núcleo es la región cilíndrica en la que se efectúa la propagación propiamente dicha. El revestimiento es una zona externa al núcleo, pero que comparte el eje con éste, que es totalmente necesaria para que se produzca la propagación del haz.

Existen tres características de las que depende la capacidad de transmisión de una fibra óptica:

Diseño Geométrico de la Fibra

Propiedades de los Materiales Utilizados en su Elaboración (diseño óptico)

Ancho Espectral de la Fuente de Luz utilizada. Cuanto mayor sea este ancho, menor será la capacidad de transmisión de la fibra.

Reflexión y Refracción

Índice de Refracción

Definición: “El índice de refracción n en un material, es el cociente de la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en dicho material”.

Mientras más denso sean los medios, menor velocidad tendrá la luz en ellos. De este modo, el índice de refracción será siempre mayor a uno, para cualquier medio.

$$n = \frac{c}{v} \Rightarrow n > 1$$

Reflexión Total

Una onda plana viajera puede experimentar dos fenómenos diferentes, al encontrarse con un plano de separación (interfaz) de dos medios dieléctricos con distinto índice de refracción:

1. Sufre una reflexión o desviación hacia el medio de donde viene. A la onda resultante de este fenómeno la llamaremos *onda reflejada*.
2. Experimenta una variación de su trayectoria original pero igualmente consigue atravesar la interfaz. Esta onda será una *onda refractada*.

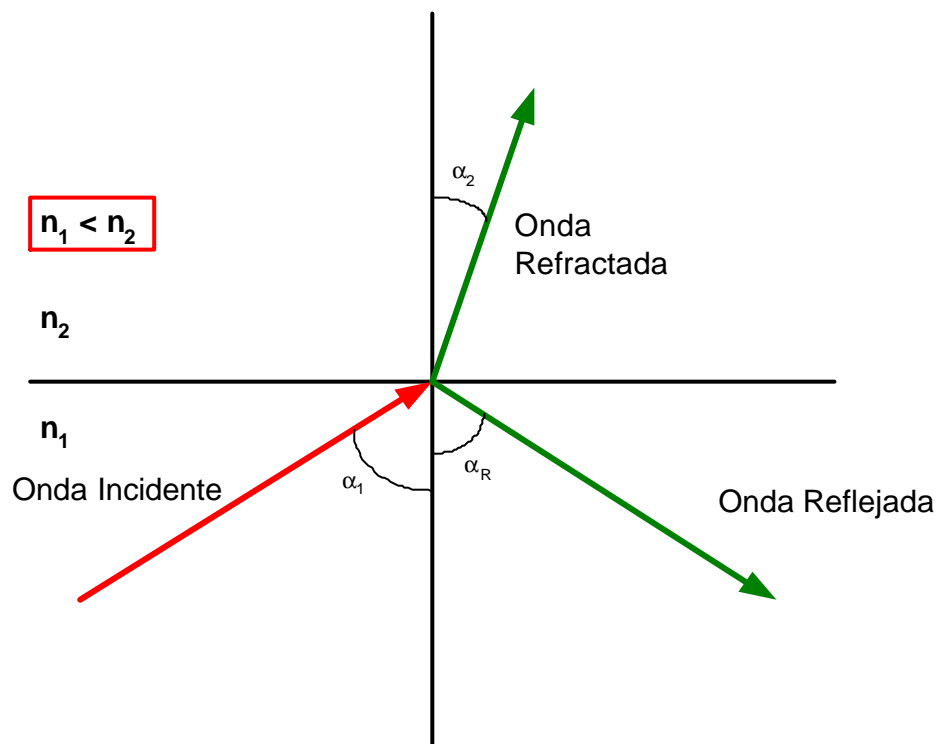
Las leyes ópticas que ligán a estas tres ondas (incidente, reflejada y refractada) son:

Ley de Reflexión: Los ángulos formados por los rayos incidentes y reflejados con respecto a la normal de la superficie de separación de los medios **son iguales**.

$$\alpha_1 = \alpha_R$$

Ley de Refracción o de Snell: Los índices de refracción de los medios están en razón de inversa de los senos de los ángulos que forma la normal a la superficie de separación con las respectivas ondas.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin(\alpha_2)}{\sin(\alpha_1)}$$



Se deben considerar algunos casos en particular, que dependerán de las magnitudes relativas de los índices de refracción:

- a) $n_1 < n_2$: Así tendremos que $\alpha_1 > \alpha_2$ y el rayo refractado se acercará a la normal al plano de separación de medios.
- b) $n_1 > n_2$: Así tendremos que $\alpha_1 < \alpha_2$ y el rayo refractado se acercará al plano de separación de medios.

Supongamos que tenemos $n_1 > n_2$, de esta forma si comienza a aumentar α_1 , también lo hará α_2 . De esta forma se puede llegar a un valor de α_1 tal que la onda refractada está contenida en el plano de separación de los medios. Este ángulo recibe el nombre de *ángulo límite*, y es definido como el ángulo de incidencia para el que la onda refractada se propague por el plano de separación ambos medios. Hay que aclarar que cualquier rayo que incida sobre el plano de separación con un ángulo superior al valor

límite, se reflejará en su totalidad, fenómeno conocido como *principio de reflexión total*, que será lo que finalmente posibilitará la propagación de luz por la fibra (o mejor dicho, el núcleo).

Así, hemos encontrado dos factores muy importantes para que exista la propagación de luz dentro de una fibra. El primer factor a tener en cuenta, es que se debe cumplir que $n_1 > n_2$, siendo n_1 el índice del núcleo y n_2 el índice del revestimiento, para que pueda existir la propagación dentro de la fibra. El segundo factor es que el ángulo de incidencia en la fibra debe ser superior al ángulo límite dictado por los índices.

Cálculo del Angulo Límite

El ángulo límite α_L será tal que α_2 valga $\pi/2$. Entonces, si llevamos estos valores a la Ley de Snell:

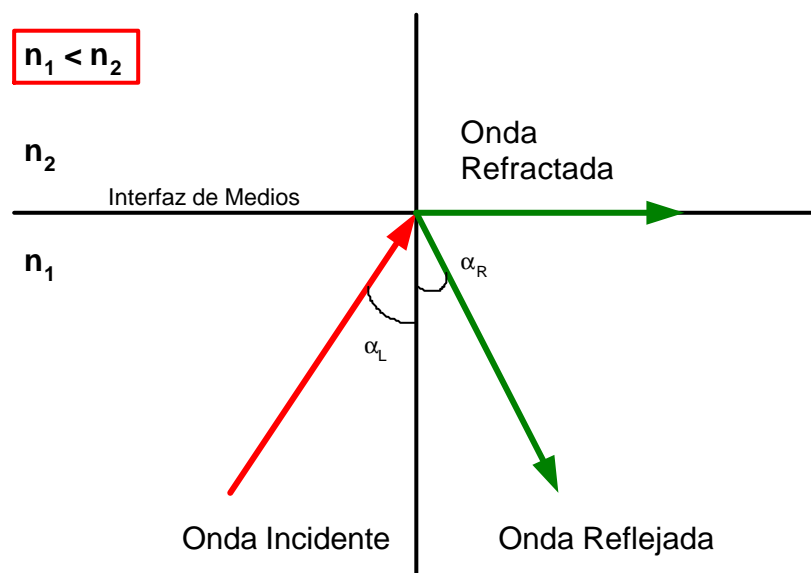
$$n_1 \sin(\alpha_{1L}) = n_2$$

$$\alpha_{1L} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Si $n_1 > n_2$, tendremos que el arcoseno será mayor a 1 y, por lo tanto, en estas condiciones siempre existirá un ángulo límite.

Si llamamos al ángulo de entrada α_0 (ángulo del rayo que viene del exterior con el eje de la fibra), obtenemos:

$$\frac{n_0}{n_1} = \frac{\sin(\alpha_E)}{\sin(\alpha_0)}$$



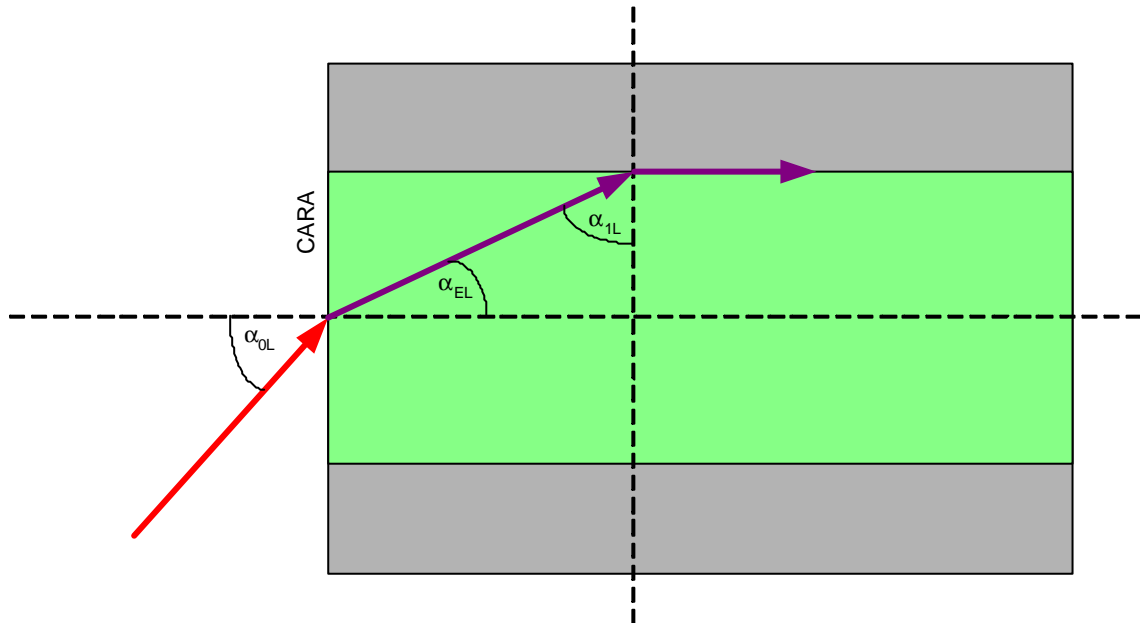
siendo α_E el ángulo del rayo luminoso con el eje del núcleo en su interior. Así,

$$\mathbf{a}_0 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_0} \sin \mathbf{a}_E\right) = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_0} \cos \mathbf{a}_1\right)$$

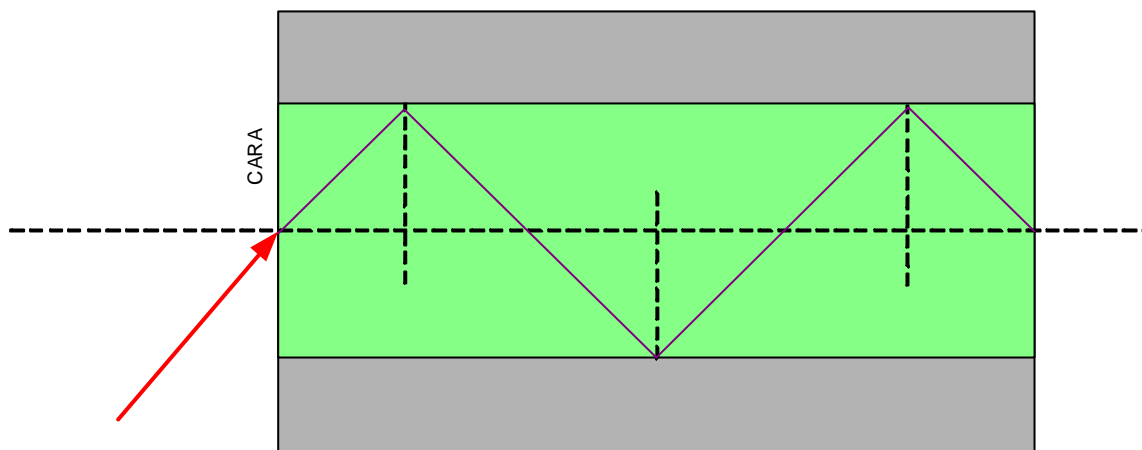
y el ángulo de entrada α_{0L} será el que permita que todo rayo que incida desde el exterior con valor menor o igual que él, sufra una reflexión total y se propague por el núcleo de la fibra:

$$\mathbf{a}_{0L} = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_0} \cos \mathbf{a}_{1L}\right)$$

En el caso de que un rayo incida en el núcleo de la fibra con un ángulo superior al ángulo límite α_{1L} , ocurrirá que no existe rayo refractado y toda la señal se reflejará hacia el medio incidente, impidiendo así la propagación por la fibra óptica.



El mismo fenómeno se repetirá dentro de la fibra, en la siguiente reflexión, si el índice de refracción es el mismo en todo el núcleo de la fibra. Así, el rayo que se propaga llegará al final de la fibra con el mismo ángulo que incidió en ella.



Así vemos que la reflexión total permite al rayo quedar confinado en el núcleo.

Parámetros Característicos de las Fibras Ópticas

En la siguiente tabla vemos los principales parámetros de las fibras ópticas:

Parámetros Estáticos	Ópticos	Apertura Numérica Perfil del Índice de Refracción
	Geométricos	Diámetro del Núcleo Diámetro del Revestimiento Excentricidad No Circularidad del Núcleo No Circularidad del Revestimiento
Parámetros Dinámicos	Atenuación	Intrínseca de la Fibra Por causas Externas
	Dispersión Temporal	Dispersión Modal Dispersión del Material Dispersión por Efecto de Guía de Ondas

Parámetros Estáticos: Son constantes a lo largo de la fibra, dentro de ciertas tolerancias propias de la fabricación.

Entre las características *ópticas* podemos nombrar:

Perfil del Índice de Refracción: define como varía el índice de refracción en el núcleo de la fibra óptica en sentido radial.

Apertura Numérica: determinante de la cantidad de luz que puede aceptar una fibra óptica y, en consecuencia, de la energía que puede transportar. Cabe aclarar que este parámetro no está ligado a la cantidad de información que se transporta.

Los **parámetros geométricos** (**diámetros y excentricidades**) dependerán exclusivamente de la tecnología utilizada en la fabricación de las fibra ópticas, y las tolerancias de cada una de ellas.

Parámetros Dinámicos: Son características de la fibra que afectan la progresión de la señal a través de la misma.

Atenuación: Si bien es análoga a la correspondiente a medios metálicos, no debemos hablar del mismo modo que en ellos. No depende de la frecuencia de cada una de las componentes espectrales de la señal, sino de la longitud de onda de la luz portadora de la misma. Los mecanismos que la provocan pueden tener origen en la misma fibra (constitución física, como irregularidades o impurezas) o en factores externos (envejecimiento, tendido).

Dispersión Temporal: Causada por las características dispersivas de la fibra sobre la señal en el transcurso del tiempo. Provoca ensanchamiento de los pulsos en el tiempo a medida que se propagan, deformándolos y limitando la capacidad de la fibra óptica.

Apertura Numérica

La energía luminosa que procede del exterior penetra en el núcleo por cada uno de los puntos de una sección perpendicular a su eje. Así la energía que se propaga por sucesivas reflexiones entre el núcleo y el revestimiento va a ser contenida por un ángulo sólido α_{0L} ; esto es, un cono cuya generatriz forma un ángulo α_{0L} con el eje de la fibra, de forma que todos aquellos rayos que incidan con un ángulo inferior a éste cumplirán con el principio de reflexión total y se propagarán por el interior del núcleo, mientras que aquellos que lo superen serán reflejados y no ingresarán a la fibra. Estas pérdidas suelen ser del 3 o 4%.

Bajo estas premisas definimos a la **Apertura Numérica** como:

$$AN = n_0 \sin(\alpha_{0L})$$

Y, por lo visto antes:

$$\begin{aligned} AN &= n_0 \left(\frac{n_1}{n_0} \cos \alpha_{1L} \right) = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_{1L}} = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2} = \\ &= \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{2n_1(n_1 - n_2)} = \sqrt{2n_1^2 d} = n_1 \sqrt{2d} \end{aligned}$$

$$AN = n_1 \sqrt{2d}$$

llamando **d** a la diferencia relativa de índices de refracción de los dos medios:

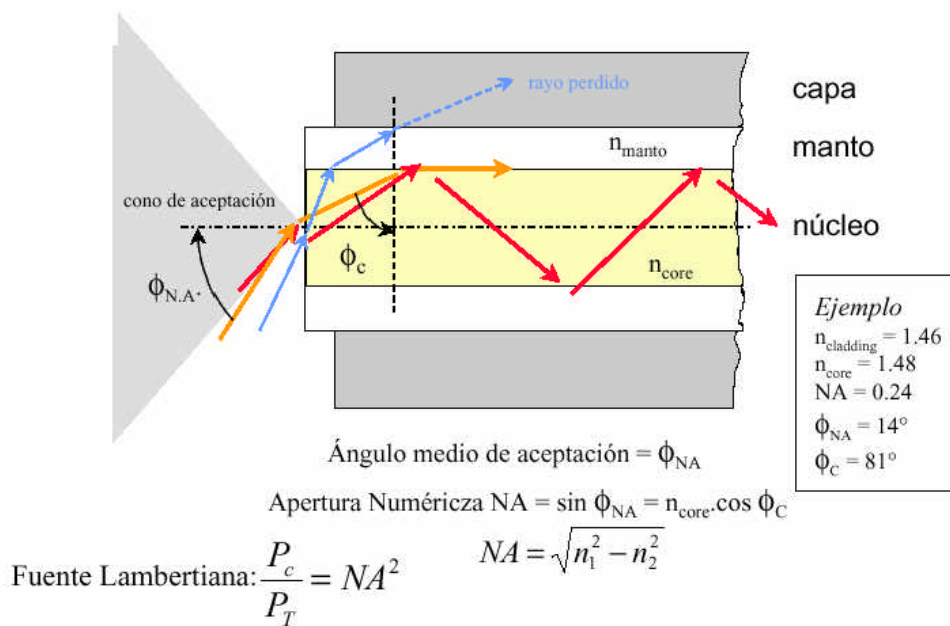
$$d = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Suponemos que n_1 es constante e igual en cualquier sección del núcleo y a lo largo de su radio (esto no siempre es así). Los valores actuales de n_1 están muy próximos a 1.45,

y los valores típicos del parámetro d para fibras de SiO_2 oscilan entre 0.001 y 0.01, y con AN entre 0.006 y 0.3.

Dicho de otro modo, para un índice de refracción externo $n_0=1$, el ángulo de aceptación oscila entre 4° y 17° .

Se ve, por lo tanto, que la apertura numérica depende exclusivamente de los materiales de que están hechos el núcleo y el revestimiento. Cuanto más parecidos sean sus índices de refracción, menor será la AN y menor el ángulo de aceptación. Mientras más parecidos sean los materiales, se requerirá una fuente de luz más estrecha.



Propagación en Guías de Ondas Cilíndricas

Si se quiere estudiar con rigor la propagación de la luz en el interior de una fibra óptica, es preciso trabajar con las ecuaciones de Maxwell. Resolviéndolas se encuentra que la ecuación de propagación de la onda tiene varias soluciones, función del diámetro de la fibra. Cada solución llamada modo, equivale a un modo o forma diferente de propagación de la onda.

Al resolver las citadas ecuaciones aparece un parámetro V , llamado *frecuencia de corte normalizada*, relacionado con el número de veces que el radio a de la fibra, contiene a la longitud de onda λ . Este factor V depende de la longitud de onda que se está propagando, del diámetro del núcleo, del índice de refracción del mismo y de la apertura numérica:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{(n_1 + n_2)(n_1 - n_2)} \approx$$

$$\approx \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{2n_1(n_1 - n_2)} = \frac{2\pi}{\lambda} a n_1 \sqrt{2d}$$

$$V = \frac{2p}{l} a n_1 \sqrt{2d}$$

donde $2p/l = b_0$ es la constante de fase de la onda

$$b_0 = \frac{w}{v} = \frac{2pf}{v} = \frac{2p}{l}$$

siendo f su frecuencia, w la pulsación u v la velocidad de propagación.

El parámetro V se utiliza para identificar el número posible de modos que se transmitirán en la guía de ondas, demostrándose que si $V < 2.405$ existe un modo única de propagación, llamado TEM_{11} , mientras que para valores superiores es posible la existencia de más modos.

Resulta evidente que para las fibras monomodo $V < 2.405$ y para las multimodo $V > 2.405$. Esta variación se logra cambiando los valores de los índices de refracción y de a . Así, una fibra de radio $a = 5\mu m$, $n_1 = 1.46$ y un índice relativo $d = 0.002$ sobre la que trabaja una longitud de onda $l = 1300\text{ nm}$, tiene:

$$V = \frac{2p}{1.3} 5 \cdot 1.46 \sqrt{2 \cdot 0.002} = 2.33$$

por lo que se comporta como monomodo. Si a esta misma fibra se la ataca con una longitud de onda de 900 nm, la frecuencia V valdrá 3.22, comportándose como multimodo. De esta forma se introduce un nuevo concepto, el de *longitud de onda de corte*. Se llama así a aquella longitud de onda para la cual un modo deja de ser transmitido y en particular, a aquella longitud de onda por debajo de la cual la fibra comienza a guiar más de una longitud de onda.

En las fibras multimodo cabe también la posibilidad de que los modos se propaguen siguiendo el plano que contiene el eje de la fibra (*modos meridionales*), o bien en planos que no contengan dicho eje (*modos no meridionales*), cuya trayectoria es poligonal.

Tipos de Perfil del Índice de Refracción

Basándonos en la óptica geométrica, podemos calcular la relación entre las longitudes recorridas por un modo de propagación que sigue al eje de la fibra, comparado con otro que recorre la fibra mediante sucesivas reflexiones, es decir que incide con un ángulo α_0 a la cara de la fibra. Llamando l a la longitud recorrida por un rayo axial y l_m a la correspondiente al modo m , tenemos:

$$l_m = \frac{1}{\cos(\mathbf{b})}$$

$$n_0 \sin(\mathbf{a}_0) = n_1 \sin(\mathbf{b})$$

$$\mathbf{b} = \arcsin\left[\frac{n_0}{n_1} \sin(\mathbf{a}_0)\right]$$

$$l_m = \frac{1}{\cos\left\{\arcsin\left[\frac{n_0}{n_1} \sin(\mathbf{a}_0)\right]\right\}}$$

La expresión anterior cuantifica la relación entre los caminos recorridos por los diferentes modos. Resulta obvio que si el índice de refracción n_1 es constante, la velocidad de ambos modos será la misma y por lo tanto, el rayo que ingrese con menor ángulo recorrerá el menor camino. Pero si los dos impulsos salen juntos, habrá uno que alcanzará el final de la fibra un instante antes, llevando esto a un ensanchamiento temporal de los pulsos.

A este fenómeno se lo conoce como **dispersión modal** y provoca una reducción en el ancho de banda que se puede transmitir y, por lo tanto, de la capacidad binaria. Este fenómeno es particular de las fibras que transmiten en más de un modo, es decir las multimodo. En las fibras monomodo, esto no ocurrirá debido a que sólo se puede transmitir un modo por ellas.

Cabe pensar, entonces, en la posibilidad de que el índice de refracción del núcleo varíe según alguna ley, por la cual a los caminos de mayor recorrido se les dé una mayor velocidad, y así se disminuya la dispersión modal. A este criterio obedecen las fibras de *índice gradual (I.G.)*. Cuando se hable de fibras monomodo no tendrá objeto el pensar en un índice gradual, con lo que será constante en todo el radio del núcleo y saltará bruscamente en el revestimiento. Estas fibras, al igual que las primeras multimodo, son de *salto de índice (S.I.)*.

Para las fibras multimodo, no siempre es necesario un perfil I.G. Así en el caso de bajos anchos de banda o reducidas distancias, podremos utilizar las tradicionales S.I.

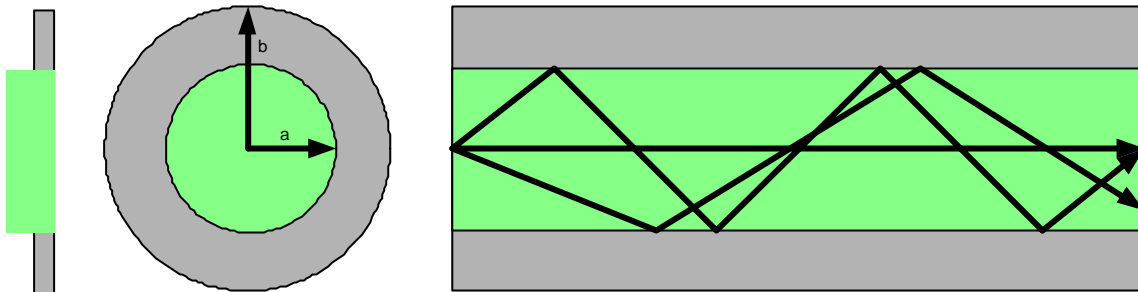
Entonces, según lo dicho las fibras ópticas pueden clasificarse en:

- Fibras Multimodo Salto Índice
- Fibras Multimodo Índice Gradual
- Fibras Monomodo

Fibras Multimodo de Salto de Índice

Estas fibras son aquellas en las que el índice de refracción del núcleo permanece invariable en toda su sección. Este tipo de fibra son las que menos se utilizan en Ingeniería de Telecomunicación, reservándolas para aplicaciones de corta distancia y bajo ancho de banda. El índice de refracción del revestimiento también es constante. El perfil del índice de refracción toma la forma que se ve en la figura.

Este tipo de fibra permita la coexistencia de varios modos de propagación, llegando cada uno de ellos en instantes diferentes al extremo del receptor de la fibra óptica, por lo anteriormente explicado.



Al ser la señal resultante la suma de los diversos modos de propagación que llegan en cada instante al receptor, y dado que llegan desfasados en el tiempo por viajar por caminos diferentes, se produce un ensanchamiento del impulso original. Esto dice a las claras, que la dispersión modal es acumulativa con la distancia. Esto origina una reducción del ancho de banda, ya que éste es inversamente proporcional al ancho del pulso de recepción. Como consecuencia, las fibras ópticas multimodo incrementarán su ancho de banda en la medida que transmitan menor cantidad de modos, a través de su núcleo.

Al ser constante el índice de refracción, también lo será la apertura numérica:

$$AN = n_1 \sqrt{2d}$$

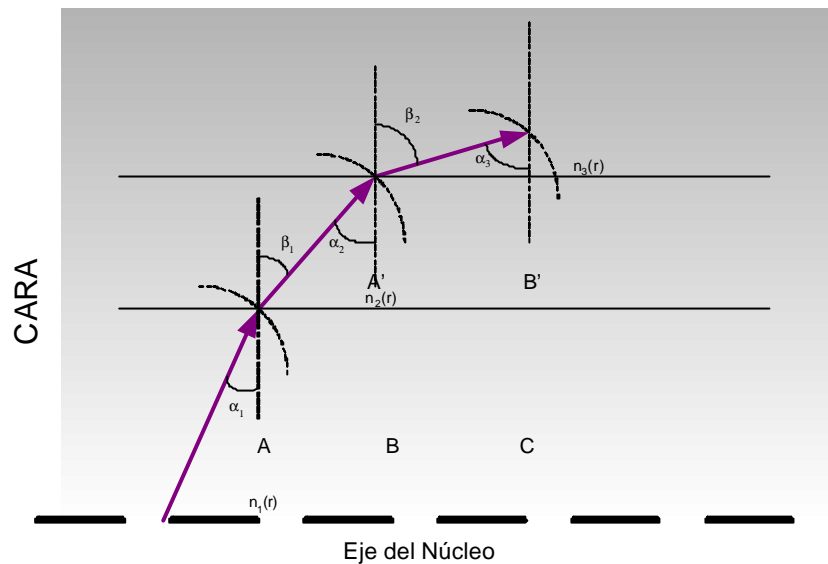
Como ventaja las fibras ópticas multimodo S.I. permiten transmitir por ellas una mayor cantidad de energía comparado con las otras fibras, esto es consecuencia de la transmisión de más modos. Desde el punto de vista de las comunicaciones, este punto no es muy interesante, si lo es para aplicaciones de electromedicina, por ejemplo.

Fibras Multimodo de Índice Gradual (I.G.)

En este tipo de fibras, el índice de refracción del núcleo es variable a lo largo del radio del mismo, siendo máximo en el centro y disminuyendo hacia la periferia. El índice de refracción del revestimiento permanece constante.

Estas fibras presentan características de transmisión mucho más interesantes. Así pues, la velocidad de propagación en un medio donde el índice de refracción en n es igual a c/n , siendo c la velocidad de la luz en el vacío. De esta forma, se es mayor el índice de refracción en el centro del núcleo, la velocidad de las ondas que se transmiten por el es menor que la de aquellas que viajan por la periferia, con lo que el menor espacio a recorrer por las primeras se compensa con su menor velocidad, permitiendo así que las ondas emitidas en una cara y en un instante determinado, lleguen casi al mismo tiempo al extremo distante. Por lo tanto, el retardo entre modos será menor y, en consecuencia, también será menor el ensanchamiento del pulso original en el receptor. Esto lleva a la posibilidad de un aumento de ancho de banda.

En las fibras con este tipo de perfil de índice las trayectorias de los modos son curvas, en lugar de rectas, como ocurre con las fibras de salto de índice, debido precisamente a la variación del índice. Esta variación ocurre, además, de tal forma que se van produciendo enfoques sucesivos de los rayos en dirección al eje de la fibra.



Las trayectorias de los modos meridionales son del tipo sinusoidal, variando su amplitud según el ángulo de incidencia. Las trayectorias de los modos no meridionales son de tipo helicoidal y dependen de la distancia al eje óptico de la fibra, el ángulo y el punto de incidencia.

Las curvas de la figura representan la ley de variación del índice de refracción, de modo que los puntos A, B, C, ... tendrán el mismo índice entre sí, así como los puntos A', B', C', ... Por lo tanto, ABC constituye un interfaz de índice constante n_1 , A'B'C' otro índice n_2 y así sucesivamente. A índices menores corresponden ángulos α_2 , α_3 sucesivamente mayores, con lo que el rayo que incidió con un ángulo α_1 se va curvando paulatinamente hacia el eje.

El retardo y el mantenimiento del ancho del pulso dependen de los factores espaciales que conforman al núcleo de la fibra; es decir, de la ley de variación del índice de refracción y del radio del núcleo. La variación del índice en función del radio está dada por:

$$n_1(r) = n_1(0) \sqrt{1 - 2A \left(\frac{r}{a} \right)^g}$$

donde

A es un parámetro que se calculará en seguida

r es la distancia del punto considerado al centro del núcleo

a es el radio del núcleo

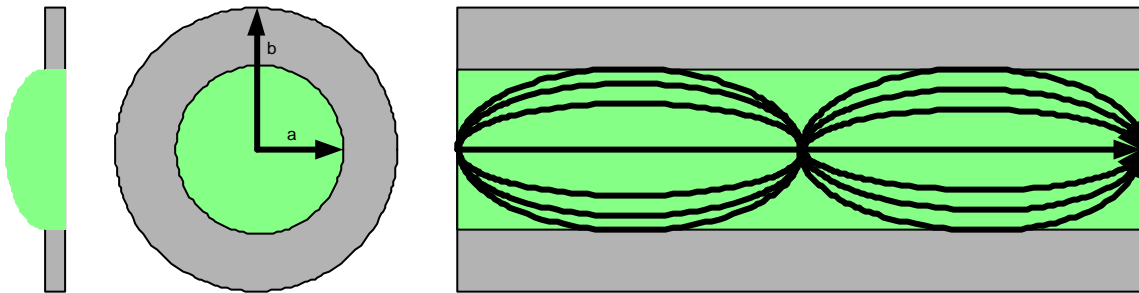
g es un parámetro dependiente de las características constitutivas de la fibra

Valores de g

Dependiendo del valor que tome g (siempre >1), se obtendrán diferentes valores de la ecuación anterior. El retardo entre modos se puede minimizar optimizando este valor. El valor de este parámetro dependerá de la longitud de onda de trabajo y de la composición del núcleo. Una expresión aproximada de su valor es:

$$g_{\text{óptimo}} = 2 \left[1 - \frac{1}{d} \frac{\partial d}{\partial l} \right]$$

Encontrándose habitualmente cercano a 2, por lo que resulta prácticamente un perfil parabólico.



Determinación del Parámetro A

Para su cálculo impondremos la condición de contorno

$$\begin{aligned} n_1(r) &= n_2 && \text{para } r = a \\ n_1(a) &= n_1(0) \sqrt{1 - 2A} = n_2 \end{aligned}$$

así

$$A = \frac{n_1(0)^2 - n_2^2}{2n_1(0)^2} \cong d$$

Los valores típicos de d son del orden de 0.01 para fibra multimodo.

Apertura Numérica de las Fibras I.G.

Partiendo de la formula general:

$$AN = n_1 \sqrt{2d}$$

y a partir de la expresión

$$AN_{IG} = \sqrt{n_1^2(r) - n_2^2}$$

donde $n_1(r)$ viene dado por

$$n_1(r) = n_1(0) \sqrt{1 - 2A \left(\frac{r}{a} \right)^g}$$

y n_2 es el valor de $n_1(r)$ para $r=a$:

$$n_2 = n_1(a) = n_1(0) \sqrt{1 - 2d}$$

Operando con dichos valores se llega a:

$$AN_{IG} = n_1(0) \sqrt{2d \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^g \right]} = AN_{SI} \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a} \right)^g}$$

A partir de esta ecuación, deducimos que la apertura numérica de una fibra con índice gradual es variable con r y siempre menor que la de salto índice de iguales materiales de núcleo y revestimiento, situándose cerca de 0.1. En conclusión, transmitirá menos energía que la fibra de S.I. Llegamos a esto observando que cada modo en propagación aporta una cantidad de energía determinada, y que el número de modos guiados por una fibra multimodo es:

$$M = \frac{g}{g+2} \frac{V^2}{2}$$

Así, una fibra con índice gradual con $g=2$ admitirá la mitad de energía que otra de salto de índice ($g = \infty$) con la misma frecuencia. Esto es, con los mismos valores de n_1 , a y d .

Fibras Monomodo

Según se vio, la única opción posible para conseguir la transmisión de un único modo en la fibra es reducir su diámetro. Llevándolo a valores inferiores a 6 o 10 μm , se consigue la condición de $V < 2.405$, y estaremos ante una fibra monomodo. Los valores típicos de δ y AN , son respectivamente 0.001 y 0.1.

En este tipo de fibras, la solución de la ecuación de onda conduce a un único resultado, llamado *modo dominante*, y que constituye su única posibilidad de propagación.

Por lo tanto, en este tipo de fibras no se da el fenómeno de la dispersión modal (ensanchamiento del pulso), que es producido por la existencia de varios modos. Como consecuencia se ven características de ancho de banda notablemente superiores a las fibras multimodo, es por ello que son ampliamente utilizadas en comunicaciones; son aplicables para enlaces de largas distancias y gran flujo de datos, y hasta enlaces submarinos.

Aunque en principio se fabricaron sólo de salto de índice, actualmente se hacen también con otros perfiles, para mejorar las características de dispersión en un margen más amplio de longitudes de onda.

Parámetros Geométricos

Cualquiera sea el tipo de fibra a caracterizar, los parámetros geométricos propios de cualquiera de ellas son los siguientes:

- Diámetro del Núcleo
- Diámetro del Revestimiento

Estos diámetros, dependiendo de la tecnología de fabricación, arrastran errores. La magnitud de las tolerancias correspondientes se encuentran en las recomendaciones G.651 (fibras multimodo) y G.652, G.653 y G.655 (fibras monomodo), de la UIT. Además el propio proceso de fabricación introduce defectos en la concentricidad y circularidad del núcleo y revestimiento, lo que obliga a definir algunos parámetros adicionales:

Excentricidad

No Circularidad de Núcleo

No Circularidad de Revestimiento

Siendo d_{Nmax} y d_{Nmin} los diámetros máximo y mínimo del núcleo, d_{Rmax} y d_{Rmin} los diámetros máximo y mínimo del revestimiento, N y R los centros geométricos del núcleo y revestimiento, se definen:

Diámetro del Núcleo: Promedio de los valores máximo y mínimo del diámetro del núcleo

$$d_N = \frac{d_{Nmax} + d_{Nmin}}{2}$$

Diámetro del Revestimiento: Promedio de los valores máximo y mínimo del diámetro del núcleo.

$$d_R = \frac{d_{Rmax} + d_{Rmin}}{2}$$

Excentricidad Núcleo – Revestimiento:

$$C_{N-R} = \frac{NR}{d_N}$$

No Circularidad (elipticidad) del Núcleo:

$$N_N = \frac{d_{N\max} + d_{N\min}}{d_N}$$

No Circularidad (elipticidad) del Revestimiento:

$$N_R = \frac{d_{R\max} + d_{R\min}}{d_R}$$

En la siguiente tabla se muestran las tolerancias admitidas por las recomendaciones, advirtiéndose que en el caso de las fibras monomodo, la recomendación se refiere a diámetro de campo modal, en vez de diámetro de la fibra.

Parámetro	Fibra Multimodo	Fibra Monomodo
d_N	<± 6%	<± 10%
d_R	<± 2.4%	<± 2.4%
C_{N-R}	< 6%	< 0.5μm a 3μm
N_N	< 6%	< 6%
N_R	< 2 %	< 2%

Parámetros de Transmisión

La Atenuación en la Fibra Óptica

Existen dos fenómenos que contribuyen a degradar la información, de modo que en la recepción las características de la señal no sean idénticas a las transmitidas en el origen. Se trata de las pérdidas por atenuación en el interior de la fibra y la dispersión en el material, si bien en el caso de ésta no se atiende especialmente a las pérdidas.

Se define la pérdida o atenuación en el interior de una fibra como la relación entre las potencias luminosas de salida y entrada expresada en dB (decibell) y calculada a una determinada longitud de onda.

$$P(I)_{[dB]} = 10 \log \left(\frac{P_T}{P_R} \right)$$

El coeficiente de atenuación $a(I)$ se define como la atenuación por unidad de longitud, generalmente en km, a esa longitud de onda:

$$a(I) = \frac{1}{L} 10 \log \left(\frac{P_T}{P_R} \right)$$

Son varios los factores que contribuyen a las pérdidas en la fibras ópticas, siendo algunos de estos intrínsecos, como la composición del vidrio, y otros externos causados por impurezas, defectos de cableado, geometría de la fibra. La atenuación adicional que proporcionan estos últimos es muy variable y pueden minimizarse con el estudio de las técnicas de fabricación; mientras que los primeros vienen obligados por fenómenos físicos que ocurren en el interior de la fibra. En cualquier caso, hay que resaltar como características:

- a) La atenuación de la señal en un medio convencional, como el cobre, depende del rango de frecuencias de la señal portadora de la información a transmitir, de modo que aumenta con esta en forma proporcional. Sin embargo, la atenuación en una fibra óptica no depende del ancho de banda de modulación, debido a que la frecuencia portadora es muchas veces superior a la de modulación, cuestión que no ocurre en guías de ondas convencionales.
- b) La potencia total transmitida se distribuye entre los diversos modos que se propagan. Cuando la propagación es monomodal, la potencia transmitida se distribuye también aleatoriamente entre las diferentes líneas espectrales del modo transmitido.

Pérdidas Intrínsecas

Absorción debida a rayos UV e IR

Este mecanismo de pérdidas se debe a la interacción existente entre los fotones que viajan por la fibra y las moléculas que componen el núcleo. La energía fotónica se cede en parte a las moléculas de Si que van encontrando los fotones en su camino, produciendo vibraciones en las mismas.

La absorción debida a la componente de radiación UV de la luz transmitida decrece exponencialmente con la longitud de onda, y es casi despreciable a partir de los 1000 nm. La debida a los rayos IR se origina por las vibraciones de átomos de Si y O, creciendo exponencialmente con la longitud de onda, pero no es apreciable hasta los 1400 nm.

Dispersión de Rayleigh

Este fenómeno de dispersión se produce cuando la luz encuentra en su camino partículas extrañas al medio continuo, cuyo diámetro es mucho mayor que la longitud de onda de la señal. La difracción resultante absorbe parte de la energía de la señal y produce una pérdida de energía que decrece exponencialmente con la cuarta potencia de la longitud de onda.

$$P = \frac{K}{L^4}$$

Las pérdidas por este efecto son las de mayor influencia para longitudes de onda desde los 400 a 1100 nm. En resumen podemos ver,

L [nm]	Absorción	Rayleigh
1300	0.05	0.25
1550	0.09	0.15

Pérdidas de origen Externo

Absorción debida a Impurezas

Los tipos de impurezas más usuales en el silicio de la fibra son las metálicas (Hierro, Cromo, Cobalto, etc.) y los iones hidroxilo (OH^-). Las impurezas metálicas originan pérdidas del orden de 1 dB/km si su concentración es de 1ppm, pero al ser relativamente fácil su control en el proceso de fabricación, se pueden reducir al mínimo.

En cambio, las del tipo hidroxilo (presentes por deposición de partículas de agua durante la fabricación de la fibra) no son fácilmente controlables, y a 2272 nm se produce una resonancia de la estructura atómica de los iones con el Si, transfiriendo la energía de los fotones a los iones. Este fenómeno produce tres picos adicionales de pérdidas, correspondientes a los tres primeros armónicos de esta frecuencia, en longitudes de onda definidas.

Curvaturas de la Fibra

Siempre que una fibra se somete a una curvatura por bobinado, tendido, etc., se origina una atenuación adicional por el hecho de que la interfaz núcleo-revestimiento deja de ser geométricamente uniforme, esto es, la luz comienza a reflejarse en algunos puntos con ángulos diferentes a los calculados inicialmente, y deja de verificarse el principio de reflexión total, produciendo la fuga de algunos modos por el revestimiento.

Esta atenuación varía exponencialmente con el radio de curvatura, con lo es despreciable hasta pasar la curvatura crítica. Esta curvatura crítica es de diez a doce veces el diámetro exterior del cable.

Pérdida por curvatura

- Atenuación varía exponencialmente con el radio de curvatura:

$$\alpha_r = -10 \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

- Radio crítico:

$$R_c \approx \frac{3n_1^2 \lambda}{4\pi(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}}$$

- Fibra monomodo @ 1550 nm: $R_c \gg 15\text{mm}$

Pérdidas por Microcurvaturas

Cada proceso de fabricación tiene sus propias tolerancias y arrastra errores. Los defectos que provocan las llamadas pérdidas por microcurvaturas son irregularidades entre el núcleo y el revestimiento, las fluctuaciones de diámetro (error de elipticidad) y fundamentalmente el error de concentricidad.

Estas pérdidas presentan la particularidad que afectan a toda la banda de información y varían muy poco con la longitud de onda, y también que sólo se origina atenuación cuando las irregularidades periódicas están separadas menos de una longitud L_0 . Esta longitud es directamente proporcional al radio del núcleo, e inversamente a la diferencia relativa de índices:

$$L_0 = \frac{4a}{\sqrt{d}}$$

donde se observa que una diferencia de índice demasiado pequeña puede ser causa de pérdidas por microcurvaturas, pues al aumentar L_0 las irregularidades pueden distar entre sí longitudes menores que dicha longitud crítica.

En las fibras, las irregularidades periódicas motivan en general un trasvase de potencia de unos modos de propagación a otros, y cuando el espaciamiento es menor que L_0 , la potencia guiada se escapa por el revestimiento, originándose la atenuación.

Así, en una fibra con radio $a=25\mu\text{m}$ y $d=0.01$ se producen pérdidas de radiación cuando hay irregularidades periódicas a 1mm o menos. A este tipo de pérdidas se las llama *Mie*, y pueden reducirse adoptando las siguientes medidas:

- Aumentar la diferencia de índices de refracción entre núcleo y revestimiento
- Aumentar la sección de la fibra

Atenuación por tendido, ambiente y envejecimiento

Durante la instalación, además de las curvaturas comentadas, la fibra se ve sometida a los agentes climáticos y a cierta fatiga estática provocada por el tendido, que contribuyen también en cierto grado a incrementar las pérdidas y a acortar la vida de la fibra. Las soluciones a adoptar son:

Aplicar sobre un recubrimiento primario con una sustancia rígida, en forma de segundo recubrimiento ceñido.

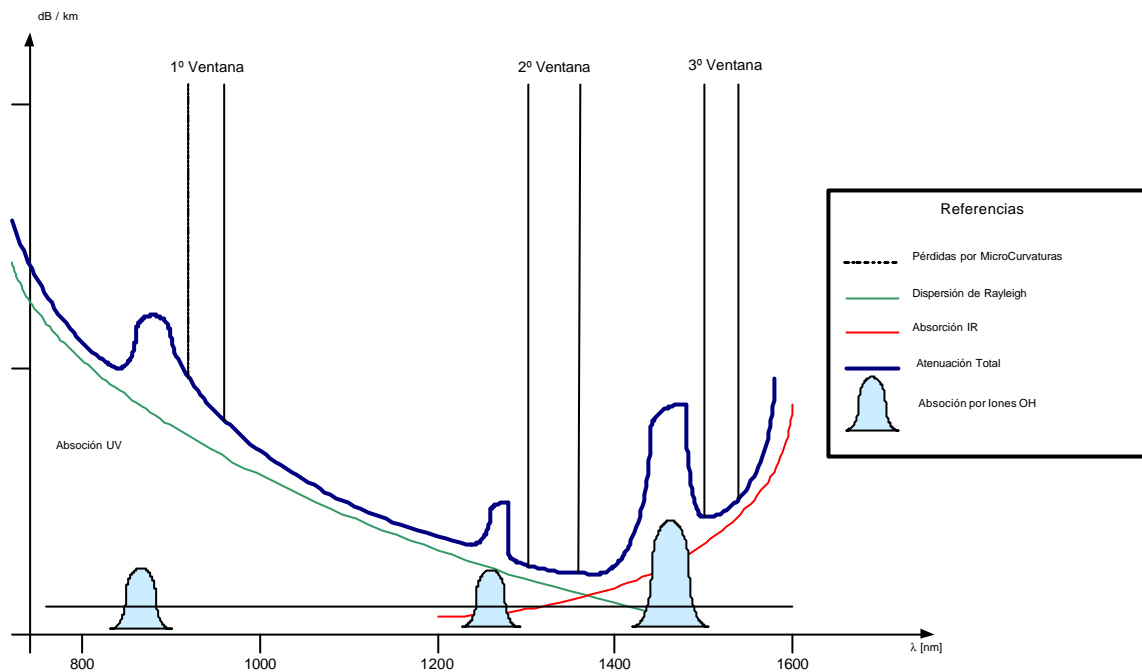
Colocar la fibra, con su primer revestimiento dentro de uno segundo, holgado, rellenando el espacio intermedio con un medio viscoso.

En lo referente al envejecimiento de la fibra, cabe resaltar que se produce en determinadas condiciones de tensión permanente, o cuando se producen fisuras superficiales.

Atenuación Total

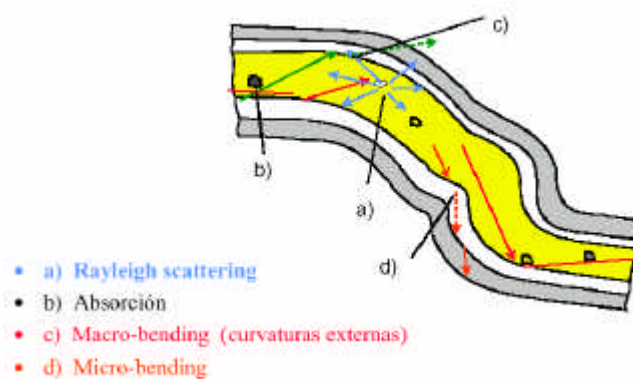
Si se suman las pérdidas antes anunciadas, se obtiene una curva como la que se ve en la figura, en la que se observa:

- Una zona por debajo de los 800 nm, que no es conveniente utilizar por su alta atenuación.
- Una zona por encima de los 1600 nm que presenta problemas por atenuación por el efecto de los rayos IR.
- Tres zonas de mínima atenuación (*ventanas*), que determinan las longitudes de onda habituales para trabajar.



Resumiendo, las causas de atenuación dentro de las fibras ópticas son:

- **Esparcimiento** (scattering):
 - Rayleigh scattering (proporcional con λ^{-4}) por fluctuaciones en la composición y anisotropía de vidrio
 - No se puede evitar
 - Dispersión (scattering) en todas direcciones
 - Dependiente de la longitud de onda
- **Absorción**
 - Absorción UV
 - Absorción IR
 - Absorción por hidrógeno (OH-)
 - Absorción por impurezas
- **Defectos físicos**
 - Microcurvaturas (microbending): pequeñas irregularidades
 - Macrocurvaturas (macro bending): $R < R_0$



Dispersión en las Fibras

Los rayos insertados en una fibra en todo momento de cierto número de grados de libertad en su progresión hacia el otro extremo. Como es posible que sigan caminos diferentes y, por otra parte, la velocidad en cada punto, y en consecuencia el índice de refracción, depende de la longitud de onda, se producirán ensanchamientos temporales de los pulsos cuyo efecto es acumulativo con la distancia.

A los efectos anteriores ha de sumarse el ensanchamiento causado por las distintas estructuras ópticas y geométricas de la fibra. Este conjunto de efectos conforman un segundo parámetro característico de las fibras: *la dispersión*. Este parámetro define la capacidad máxima que, por unidad de longitud, se puede transmitir por una fibra, por lo que puede medirse en términos de retarde relativo o de la máxima frecuencia pasante que admite.

Como el efecto de la dispersiones acumulativo con la longitud de la fibra, la capacidad de la misma se mide MHz x km, por lo que el número de circuitos que admite se puede aumentar disminuyendo el ancho de banda óptico del emisor y aumentando la longitud de onda media en que emite^{1,2}. Esto justifica la preferencia del diodo láser sobre el LED y el empleo de ventanas cada vez más altas.

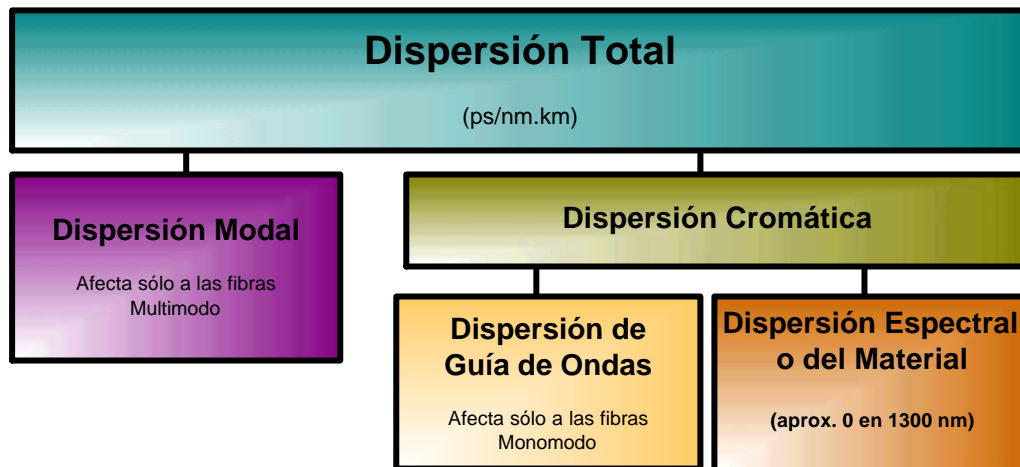
Una ventaja adicional estriba en que sobre una fibra instalada se puede aumentar la capacidad cambiando los elementos emisores y receptores por otros de mejores características. Esto permite la reutilización de la planta de fibra óptica.

El fenómeno global de la dispersión definido se debe a tres factores de los que hablaremos por separado:

- *Dispersión Modal* (o intermodal), S_m .
- *Dispersión del Material* (o intramodal, o espectral), S_e .
- *Dispersión por Guía de Ondas*, S_{go} .

¹ Menor desviación típica de las longitudes de onda presente y, en consecuencia, de las velocidades.

² El ancho de banda del emisor es porcentualmente menor con respecto a la longitud de onda al aumentar ésta.



Las dos primeras son inherentes a las fibras multimodo, pero, atendiendo a su diferente naturaleza, han de sumarse cuadráticamente. Por el contrario las dispersiones del material y de guía de ondas se refieren a cada modo, por lo que se suman en modo lineal, esta suma es llamada *dispersión cromática*. El valor cuadrático medio de la dispersión total será:

$$s^2 = s_m^2 + (s_e + s_{go})^2$$

Limitación del Ancho de Banda

Se define el ancho de banda como el valor de la frecuencia transmitida a ambos lados del valor central de la distribución para el que la potencia recibida cae a la mitad. Se supone que, siendo la excitación un impulso de Dirac, la respuesta en el tiempo y en frecuencia adoptan una distribución de Gauss cuya desviación típica, s , es la dispersión total.

La característica de transferencia de la fibra óptica puede considerarse modelada por una forma gaussiana. Es decir, ante una excitación ideal [función de Dirac, $\delta(t)$] la salida [respuesta impulsiva, $h(t)$] presenta una conformación gaussiana, obedeciendo a la expresión :

$$h(t) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2s^2}}$$

donde σ es la desviación típica, representa *la dispersión total*

$$s^2 = s_{mod}^2 + (s_e + s_{go})^2$$

Como la transformada de Fourier de una distribución gaussiana conserva la forma, la frecuencia, $H(f) = \mathcal{F}[h(t)]$, también será gaussiana :

$$H(f) = \frac{1}{\sqrt{2p}} e^{-\frac{w^2 s^2}{2}}$$

donde $w = 2 p f$.

Partiendo de la configuración en el dominio de la frecuencia, y considerando una caída de -3 db ópticos, o sus correspondientes -6 db eléctricos, se define el ancho de banda como el valor de la frecuencia de transmitida para la cual la potencia óptica recibida cae a la mitad del valor que tiene para $w = 0$.

A partir de tal definición resulta: $H(w_{0,5}) = 0,5 H(0)$

y $w_{0,5} = 2 \pi f_{0,5} s$, donde $f_{0,5}$ es la frecuencia de corte, de acuerdo con la definición dada, la fibra es capaz de transmitir, por lo que representa el ancho de banda que caracteriza a dicha fibra:

$$f_{0,5} = B_{0,5} = B$$

Dado que las funciones $h(t)$ y $H(f)$ están relacionadas por la transformada de Fourier, se deduce que:

$$B = \frac{0.374}{2s} = \frac{0.187}{s}$$

Expresando el ancho de banda en función de la anchura temporal al 50 %, t , resulta :

$$B = \frac{0.44}{t}$$

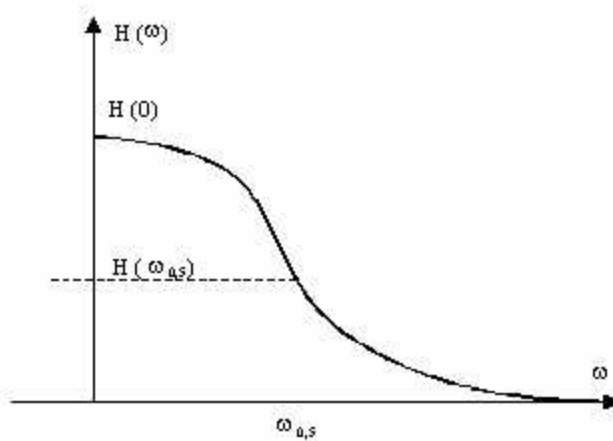
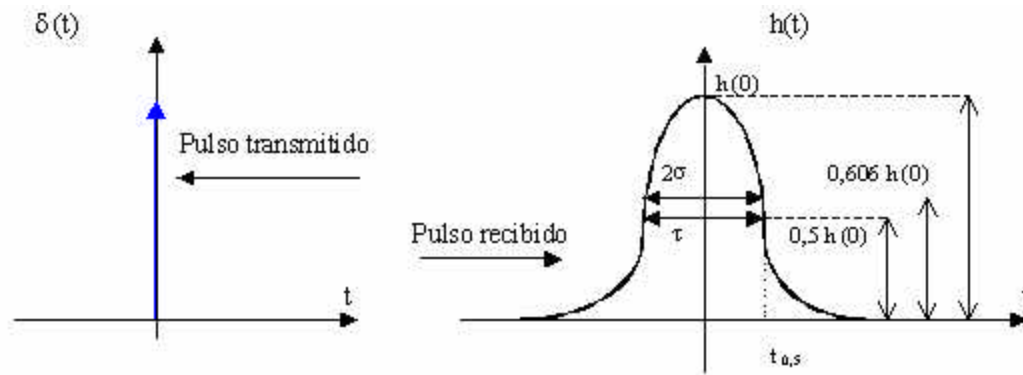
Comparando ambas expresiones se deduce que

$$s = \frac{t}{2.35}$$

Es usual expresar el ancho de banda en Ghz Km. El significado de tal expresión es “el ancho de banda por unidad de longitud”. No obstante, la interpretación será diferente según se trate de fibras monomodo o multimodo:

- para fibras multimodo el ancho de banda expresado en Ghz Km solo puede interpretarse como la frecuencia de corte intermodal, B_0 .
- en las fibras monomodo, donde tanto la dispersión total como el ancho de banda varían linealmente con la longitud (por no acusar dispersión modal), el ancho de banda expresado en Ghz Km es el resultado del producto ancho de banda G (Ghz)

por la longitud L (Km) para el cual se calculó, supuesta una fuente óptica determinada.



Característica de transferencia de la fibra óptica

$$h(t) = \frac{1}{s\sqrt{2p}} e^{-\frac{t^2}{2s^2}}$$

$$H(f) = \frac{1}{\sqrt{2p}} e^{-\frac{w^2 s^2}{2}}$$

$$H(f) = f[h(t)]$$

Dispersión Modal

Hemos visto que las distintas velocidades y direcciones asociadas a las longitudes de onda que entran en la fibra pueden permitir la propagación en diferentes modos y que el número de ellos es tanto mayor cuanto mayor sea la libertad de recorridos y el diámetro del núcleo (2a). Esto implica que los rayos de la misma longitud de onda que incidan

Dispersión Modal

Hemos visto que las distintas velocidades y direcciones asociadas a las longitudes de onda que entran en la fibra pueden permitir la propagación en diferentes modos y que el número de ellos es tanto mayor cuanto mayor sea la libertad de recorridos y el diámetro del núcleo (2a). Esto implica que los rayos de la misma longitud de onda que incidan simultáneamente, pero en direcciones distintas, llegarán en instantes diferentes al extremo receptor.

Este efecto es conocido como *dispersión modal*, por afectar las relaciones entre los modos, y es un parámetro característico de las fibras multimodo.

Si tenemos, por ejemplo, tres modos que parten en un mismo instante del transmisor y que a consecuencia del diferente recorrido llegan al receptor en instantes diferentes, de esta forma el pulso sufre un ensanchamiento debido al aporte de cada modo.

Dispersión Modal en Fibras de Salto Índice

En estas fibras, el retardo máximo se produce entre el rayo que accede en la dirección del eje de la fibra y el que entra con un ángulo igual al límite. La diferencia entre los tiempos invertidos en recorrer la unidad de longitud por ambos rayos se deduce del valor l_m :

$$t_m - t = \frac{1}{v_1} (l_m - l) = \frac{n_1}{c} \left(\frac{l}{\sin(\alpha_{1L})} - l \right) = \frac{n_1}{c} l \left(\frac{1}{\sin(\alpha_{1L})} - 1 \right)$$

La dispersión modal por unidad de longitud será

$$s_{mSI} = \frac{n_1}{c} \left(\frac{1}{\sin(\alpha_{1L})} - 1 \right) = \frac{n_1}{c} \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) = \frac{n_1}{c} \frac{(n_1 - n_2)}{n_2}$$

La apertura numérica resulta

$$AN = n_1 \cos(\alpha_{1L}) = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2}$$
$$n_1 - n_2 = \frac{AN^2}{n_1 + n_2}$$

Introduciendo este valor en la dispersión modal, y teniendo en cuenta que $n_1 \gg n_2$:

$$s_{mSI} = \frac{n_1}{c} \frac{AN^2}{(n_1 + n_2)n_2} = \frac{AN^2}{2n_1 c} \quad \left[\frac{ns}{km} \right]$$

cuando c está dado en km/ns. Un valor típico de la dispersión modal en este tipo de fibras es 20 a 50 ns/km. El ancho de banda debido exclusivamente a la dispersión modal, o *ancho de banda intermodal*, y que define la frecuencia de corte, es

$$B_{m_{SI}} = \frac{0.187}{s_{m_{SI}}} = \frac{0.374n_1c}{AN^2}$$

La dispersión resultante de una longitud l , procedente de la unión de varias secciones, es:

$$s_{m_{SI}} = \frac{0.187l^g}{B_{m_{SI}}} ns$$

donde g , es el *factor de concatenación o acoplamiento*, expresa el acople entre modos. Al aumentar este acople o transferencia de energía de unos modos a otros, se provoca cierta ecualización de sus características, lo que disminuye la dispersión.

Dispersión Modal en Fibras de Índice Gradual

Para deducir el retardo relativo de los modos en estas fibras debemos acudir a las ecuaciones de Maxwell. Aquí es donde adquiere todo su significado la elección de un perfil de índice a partir del parámetro g , para hacer mínima la diferencia de tiempos invertidos en su recorrido por diferentes modos.

El valor de la dispersión para g_{optimo} es:

$$s_{m_{IG}} = \frac{AN(0)^4}{8n_1^3(0)c} 140 \left[\frac{n_1(0) - n_2}{n_1(0)} \right]^2 \left[\frac{ns}{km} \right]$$

Como el valor de g_{optimo} presenta una acusada dependencia de la longitud de onda, $s_{m_{IG}}$ dependerá de la misma. En resumen, las fibras de índice gradual presentan una dispersión modal mucho menor que las de salto índice, una 50 a 100 veces, como podemos ver

$$s_{m_{IG}} = s_{m_{SI}} \frac{AN(0)^2}{4n_1^2(0)} \approx s_{m_{SI}} \frac{d}{2}$$

pero su dependencia de la longitud de onda es muy acusada

$$B = \frac{0.187}{s_{m_{IG}}} \approx \frac{1.5n_1^3(0)c}{AN(0)^4} \quad [GHz.km]$$

la dispersión modal en una fibra de longitud l es, lo mismo que en el caso anterior:

$$S_{mIG} = \frac{0.187 l^g}{B_{mSI}} ns$$

y los valores del coeficiente g están entre 0.7 y 0.8.

Como se ve hay dos formas de reducir la dispersión modal: reducir el valor de d , muy difícil de conseguir, puesto que depende de los índices de refracción de los medios, o bien reducir el diámetro del núcleo para que la frecuencia normalizada se acerque al valor umbral de 2.405 y se transmitan menos modos. Esta solución implicará una disminución de la energía transportada. Entre los valores típicos de estos parámetros para fibras multimodo, encontramos:

	S.I.	I.G.
σ_M (ns/km)	20	0.15 a 0.2
B_0 (MHz km)	10 a 100	1000 a 1500
γ	0.5 a 0.6	0.7 a 0.8

Dispersión del Material

Al analizar cada modo de propagación, observamos que, al no ser nulo el ancho espectral de la fuente óptica, cada modo propaga todas las líneas espectrales correspondientes a las longitudes de onda del emisor. Como a cada longitud de onda le corresponde una velocidad de propagación diferente, tendremos dentro de cada modo una velocidad distinta para cada longitud de onda transmitida, lo que origina una nueva dispersión que, por ser causada por el ancho del espectro, se denomina *espectral o del material* y también intramodal, por referirse a lo que ocurre dentro de cada modo. Por tanto afecta a fibra monomodo y multimodo.

Si la fuente emite con una longitud de onda λ y un ancho igual a $\Delta\lambda$, la máxima dispersión en cada modo se producirá entre las componentes del espectro correspondientes a $\lambda - (\Delta\lambda/2)$ y $\lambda + (\Delta\lambda/2)$. Se demuestra que el ensanchamiento Γ del impulso depende de la longitud l considerada y del ancho espectral del emisor y vale:

$$\Gamma = \frac{l \cdot \Delta I \cdot I}{c} \frac{\partial^2 n}{\partial I^2} = M(I) \Delta I \cdot l [ns]$$

siendo $M(I)^3$ el *coeficiente de dispersión del material* definido por:

$$M(I) = \frac{I}{c} \frac{\partial^2 n}{\partial I^2} \left[\frac{ns}{km \cdot nm} \right]$$

³ El cálculo del coeficiente $M(\lambda)$ se adjunta en el Apéndice A, junto con el de σ_e .

Este coeficiente resulta ser la derivada del retardo de grupo T respecto de la longitud de onda. La dispersión espectral, es entonces:

$$s = \frac{\Gamma}{2.35} = \frac{M(I)\Delta I \cdot l}{2.35}$$

Como siempre, la dispersión aumenta con la longitud de la fibra. Se puede minimizar, por otra parte, acudiendo a fuentes de espectro estrecho. Por sobre todo hay que destacar que el coeficiente $M(I)$ se anula para longitudes de onda próximas a 1300 nm en núcleo de SiO_2 y, en consecuencia, también la dispersión. En valor representativo de $M(I)$ para la primera ventana es de 80 a 100 ps/km.nm, admitiéndose hasta 120. en las proximidades de la tercer ventana la dispersión es del orden de la 4 o 5 ps/km.nm.

Dispersión de Guía de Ondas

La dispersión debida a parámetros ópticos y geométricos de la fibra sólo tiene relevancia en las fibras monomodo, ya que en las multimodo la dispersión es pequeña para los modos alejados de la frecuencia de corte porque en ellas el radio es mucho mayor que λ , y los modos próximos al corte transportan una fracción pequeña de energía total y se pueden despreciar.

Al referirla a fibras monomodo tendrá carácter intramodal, pero lo mismo que la dispersión espectral era provocada por las diferentes velocidades de las componentes de cada modo, ***ahora la dispersión nace del hecho de que correspondiendo a cada longitud de onda un índice de refracción diferentes, el ángulo que forma la trayectoria asociada a ellas será distinto, y también los caminos recorridos por esas componentes espectrales.*** La dispersión correspondiente a este efecto viene dada por:

$$s_{go} = \frac{\Gamma}{2.35} = \frac{-G(I)\Delta I \cdot l}{2.35}$$

con

$$G(I) = \frac{l}{4p^4 a^2 n_1 c}$$

medido en ns/km.nm.

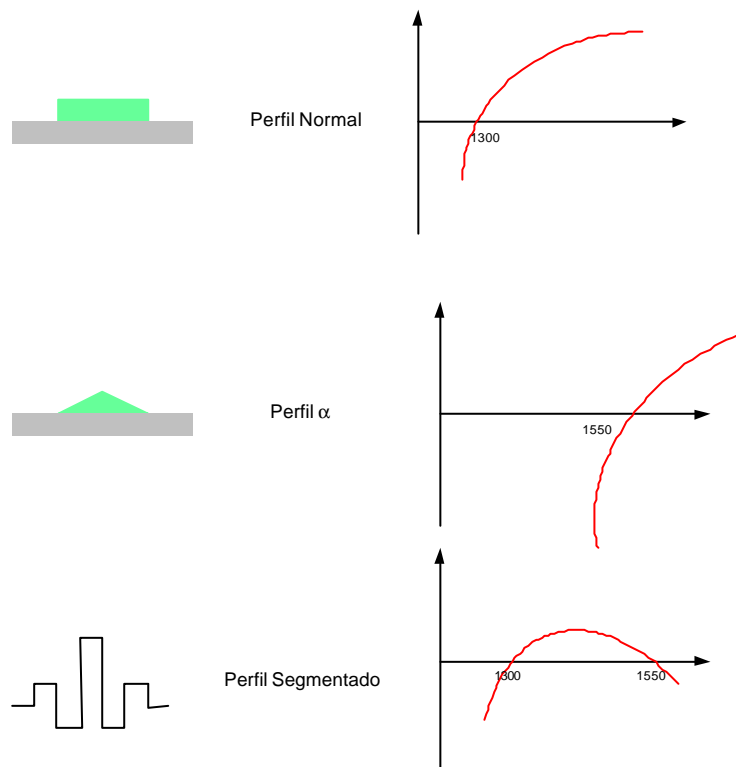
El signo (-) pretende indicar que esta dispersión actúa en sentido contrario a la espectral; es decir, que la dispersión temporal total asociada a cada modo será algebraicamente $\sigma_e + \sigma_{go}$. Este coeficiente es del orden de los 0.5 ps/km.nm.

Optimización de las Características de Transmisión

Hemos visto que, por una parte, las atenuaciones mínimas produce, salvo picos provocados por los iones OH^- , en longitudes de onda que van de 1200 a 1600 nm. Por otro lado, para longitudes de onda próximas a 1300 nm, la dispersión cromática es mínima y siendo la de efecto guía de ondas de signo contrario, puede resultar fácil cancelar la suma de ambas, con lo que la dispersión total sería mínima.

Esto sugiere la posibilidad de optimizar la transmisión uniendo en una misma longitud de onda de mínima atenuación y la mínima dispersión temporal. Ello se intenta, con nuevos diseños de fibra, de dos modos posibles:

- Desplazando el punto de mínima dispersión hacia la el de mínima atenuación (*técnica de dispersión desplazada*) y cuyos puntos de trabajo se sitúan ya en la tercera ventana (1550 nm). Ello se consigue a base de alterar el perfil de índice del núcleo (perfiles α , W o de doble entalladura) y las condiciones de dopado del mismo, si bien esto aumenta la atenuación sobre el valor mínimo planteado en principio, por lo que ha de buscarse una solución de compromiso. Los mejores resultados se consiguen con perfiles segmentados, ya que con ellos aparecen, no ya uno, sino dos puntos de dispersión nula
- Diseñando la fibra de modo que su curva de dispersión sea lo más plana posible y casi nula en la región de mínima atenuación, *técnica de dispersión aplanada*.



Ancho de Banda Total

En todos los casos, el ancho de banda total asociado a una fibra es

$$B = \frac{0.187}{\sigma}$$

donde σ es la dispersión total. En fibras multimodo es:

$$B = \frac{0.187}{\sqrt{\sigma_m^2 + (\sigma_e + \sigma_{go})^2}} [GHz.km]$$

cuando la dispersión está en ns/km.

En las fibras monomodo vale:

$$B = \frac{0.187}{\sigma_e + \sigma_{go}} = \frac{0.44}{|M(I) - G(I)|\Delta I} [GHz.km]$$

Las Fibras Ópticas

Según sus parámetros sean ópticos, geométricos o dinámicos, las fibras ópticas se pueden clasificar como sigue:

- Por la aplicación a la que se destinen, precisando el uso de fibras de alta y media calidad.
- Por el perfil del índice de refracción: constante o variable. Entre estos últimos están los de índice gradual, perfil a, doble entalladura, segmentado, etc., atendiendo en cada caso a las características de transmisión que deseen mejorar.
- Por el número de modos transmitido: multimodo o monomodo.
- Por los materiales del núcleo y el revestimiento y su composición

A la hora de elegir una fibra, habrá que atender a varias de estas características. Dependiendo del tipo de aplicación a que se destine la fibra, y siempre en función de su frecuente uso (las comunicaciones) se pueden considerar dos grupos:

1. Fibras de alta calidad para enlaces de telecomunicación.
2. Fibras para enlaces de corta y media distancia.

Lo más frecuente en estos casos es que la fibra sea de vidrio, o al menos con el núcleo de vidrio. En resumen, para fibras de alta calidad se utiliza el sílice, mientras que para el resto se emplean fibras de núcleo de vidrio policomponentes.

		Fibra de Sílice	Fibra de Vidrio policomponente
Composición	Núcleo	Oxidos de silicio, germanio, boro y fósforo.	Oxidos de silicio, sodio, calcio y germanio.
	Revestimiento	Oxidos de boro, sílice y fluoruros de silicio.	Misma composición que el núcleo.
Materiales	Núcleo	Tetracloruros de germanio y silicio y tricloruros de fósforo y boro.	Tetracloruro de silicio y nitratos de calcio y sodio.
	Revestimiento	Tetracloruro de silicio, tetrafluoruro y hexafluoruro de silicio.	

Dentro de cualquiera de los tipos indicados se distinguen las fibras monomodo y multimodo, éstas últimas de índice gradual. Por su mayor ancho de banda, las fibras monomodo se aplican a enlaces de larga distancia y gran flujo de información.

Fundamentos de diseño

Para realizar un diseño de un sistemas de fibra óptica, se deberá considerar varios factores, incluyendo la atenuación del enlace, la velocidad de transmisión, tipos de fibra, empalmes, conectores, equipamientos, y otros.

Como primera aproximación , nos centraremos en los cálculos para poder hacer la selección de la fibra óptica adecuada para la instalación.

Régimen máximo del sistema.

La dispersión temporal del sistema provoca un ensanchamiento de los impulsos. A medida que se ensanchan, van ocupando el espacio entre dos impulsos consecutivos y llega un momento en que el receptor no puede distinguir un “uno” de un “cero” (ISI).

Esto constituye una limitación en el ancho de banda. Esta interferencia entre símbolos implica una degradación de la tasa de error del receptor. Habiendo definido la sensibilidad del receptor, en términos de potencia, como la mínima necesaria para que la tasa de error sea de 10^{-9} (hasta 10^{-12}) , es evidente que tal degradación se puede interpretar como una disminución de la potencia recibida, por lo que la potencia necesaria para restaurar la tasa de error será:

$$S = S_0 + \Delta S$$

Donde:

S = sensibilidad real (dbm)

S_0 = sensibilidad en ausencia de dispersión temporal (dbm)

ΔS = penalización en potencia por interferencia entre símbolos.

Se tiende, en los proyectos, a obtener una penalización en potencia no superior a 2 db, y para valores inferiores a 5 db es válida la expresión:

$$\Delta S = C \left(\frac{R}{B} \right)^2$$

Siendo:

C una constante comprendida entre 0,4 y 1,5

R la velocidad binaria en la línea.

B el ancho de banda del sistema.

El valor de la constante C es de 0,4 para fibras multimodo y llega a 1,5 en fibras monomodo cuando se usan en sistemas de gran capacidad.

Adoptando el criterio de 1db de penalización, resulta:

$$1dB = C \left(\frac{R}{B} \right)^2$$

y la dispersión temporal del sistema será:

$$s = \frac{187}{B[MHz]} = \frac{187}{\sqrt{CR}}$$

quedando :

$$\text{para } C = 0,4 \quad \sigma = 296 / R$$

$$\text{para } C = 1,5 \quad \sigma = 152 / R$$

Si la penalización se establece en 2 db, aplicando los mismos criterios resulta:

$$\text{para } C = 0,4 \quad \sigma = 210 / R$$

$$\text{para } C = 1,5 \quad \sigma = 107 / R$$

En resumen, para fibras multimodo y sistemas de pequeña capacidad sobre fibras monomodo , es válida la expresión:

$$s[ns] = \frac{300}{R[Mbps]}$$

que expresa la limitación de la velocidad de transmisión por efecto de la dispersión en la fibra.

Para sistemas monomodo de gran capacidad, el máximo régimen admisible se reduce sobre el valor anterior, resultando:

$$\frac{100}{R[Mbps]} \leq s[ns] \leq \frac{150}{R[Mbps]}$$

Sección de Regeneración.

La máxima distancia entre regeneradores de un equipo de línea puede calcularse con dos criterios:

- a) La máxima atenuación que permite el conjunto del sistema o pérdidas admisibles en el mismo.
- b) Dispersión temporal máxima que el sistema admite para una tasa de error prefijada.

Criterio de pérdidas admisibles.

El balance de pérdidas en el sistema se puede establecer del siguiente modo:

$$P_F - [M_E + 2a_c + Na_e + M_C + \sum a_f L_I] = S_0 + \Delta S + P_P$$

Donde:

- P_F : potencia inyectada en la fibra. Variable aleatoria.
- M_E : margen del equipo (6 a 8 db). Variable aleatoria
- α_C : atenuación por conector
- N : número de empalmes
- M_C : margen de seguridad del cable. Cubre las pérdidas por envejecimiento y la aparición de grietas superficiales. Suele tomarse un valor:
2 db para $L \leq 20$ km.
- L : longitud total del enlace
 $2 + (L - 20) 0,1$ para $L > 20$ km.
- α_F : atenuación de la fibra db/km
- L_I : distancia entre los empalmes
- S_0 : sensibilidad del receptor para una velocidad y una tasa de error determinadas.
- ΔS : penalización por interferencia entre símbolos.
- P_P : pérdidas por partición de modos (solo para fibras monomodo). Normalmente se establece que :

$$\Delta S + P_P = 1dB$$

Supuesto un valor constante de α_F , la longitud máxima que admite una sección de regeneración si sobrepasar la ganancia del sistema es:

$$L_I \leq \frac{\{P_F - [M_E + 2a_c + Na_e + M_C] - S_0 - \Delta S - P_P\}}{a_f}$$

Criterio de la máxima dispersión

Este criterio da la máxima longitud de la sección de regeneración por limitación del ancho de banda que es posible transmitir a causa de la dispersión .

Para un ancho de banda a transmitir , resulta:

$$S(ns) = \frac{0.187}{B[GHz]}$$

Si no se dispone del ancho de banda, la relación a emplear será:

$$S(ns) \leq \frac{K_0}{R[Mbps]}$$

donde Ko es un valor entre 200 a 300 para fibras multimodo, y debe reducirse hasta un límite de 100 a 150 en las monomodo.

Lo mismo que en el caso de la atenuación, podemos establecer un límite en el caso más desfavorable :

$$\sqrt{S_m^2 + (S_e + S_{go})^2} \leq \frac{K_0}{R[Mbps]} = \frac{0.187}{B[GHz]}$$

donde B (en Ghz) es el ancho de banda del sistema y R es la velocidad (Mbps)

Apéndice A - LA DISPERSIÓN ESPECTRAL

La longitud de onda asociada a un medio de índice de refracción n , que permite una velocidad de propagación v de propagación en su interior tal que $v = c / n$, se deduce las siguientes consideraciones:

$$I_0 = \frac{c}{f} \quad I_n = \frac{v}{f}$$

y de aquí:

$$v = I_n f = \frac{I_n c}{I_0} \quad (1)$$

donde λ_0 es la longitud de onda correspondiente a la misma frecuencia en el vacío, y c la velocidad de la luz en éste. También se deduce de las ecuaciones anteriores que:

$$I_n = \frac{I_0}{n}$$

así, las velocidades de propagación son directamente proporcionales a las longitudes de onda asociadas a la propagación en cada medio.

Cada modo de propagación tiene una anchura espectral $\Delta\lambda$; es decir, no se trata de una emisión de una sola longitud de onda. De acuerdo con la expresión (1), las intensidades espectrales asociadas a las mayores longitudes de onda se propagarán más rápidamente que las correspondientes a longitudes de onda más pequeñas. Quiere esto decir que esa diferencia de velocidades va a ser causa de retardo dentro de cada modo en propagación; o sea que habrá dispersión intramodal.

Supongamos una fuente emitiendo en una longitud de onda λ_0 . Cuando el rayo incide en el núcleo de índice de refracción n , la constante de fase correspondiente vale

$$b = \frac{2p}{I_n} = \frac{2p}{\frac{I_0}{n}} = \frac{2pn}{I_0} \quad (2)$$

La velocidad de grupo correspondiente a esta propagación es;

$$v_g = \frac{\partial w}{\partial b}$$

que coincide con la velocidad de propagación en el núcleo de la fibra. Sí éste tiene una longitud L , el tiempo empleado por el impulso en cubrir esa distancia es:

$$t = \frac{L}{v_g} = L \frac{\partial b}{\partial \omega} = L \frac{\partial b}{\partial I_0} \frac{\partial I_0}{\partial \omega}$$

por lo que se deberá buscar el valor de estas dos últimas derivadas.

Para la primera partimos de la expresión de la longitud de onda de emisión:

$$\frac{\partial b}{\partial I_0} = 2p \left[\frac{\partial \left(\frac{n}{I_0} \right)}{\partial I_0} \right] = 2p \left[\frac{1}{I_0} \frac{\partial n}{\partial I_0} - \frac{n}{I_0^2} \right]$$

La segunda derivada se obtiene a partir de la expresión de la longitud de onda de emisión:

$$I_0 = \frac{c}{f} = \frac{2pc}{2pf} = \frac{2pc}{\omega}$$

$$\frac{\partial I_0}{\partial \omega} = -\frac{2pc}{\omega^2} = -\frac{2pc}{\left(\frac{2pc}{I_0} \right)^2} = \frac{I_0^2}{2pc}$$

El retardo correspondiente al pulso luminoso será entonces :

$$t = \frac{L}{v_g} = L \frac{\partial b}{\partial \omega} = \frac{L}{c} \left[n - I_0 \frac{\partial n}{\partial I_0} \right]$$

Cuando la fuente emite con un ancho de banda espectral $\Delta\lambda_0$, el ensanchamiento producido por el impulso es :

$$T = \frac{\partial t}{\partial I_0} \Delta I_0$$

derivando y operando se obtiene :

$$T = -\frac{L}{c} \left[I_0 \frac{\partial n^2}{\partial^2 I_0} \Delta I_0 \right]$$

Así cada longitud de onda emitida, λ_0 , sufrirá un retardo temporal dependiente de su ancho espectral y de la longitud de la fibra, lo que permite asociarle un coeficiente $M(\lambda)$ característico de la fibra y de la longitud de onda incidente tal que:

$$M(I) = -\left[\frac{I_0}{c} \frac{\partial n^2}{\partial^2 I_0} \right]$$

El ensanchamiento del pulso es entonces:

$$T = M(I)L\Delta I_0$$

Teniendo en cuenta que la dispersión espectral σ_c es:

$$s_e = \frac{T}{2.35}$$

su valor, tal como se expresa habitualmente en función del coeficiente de dispersión espectral y de la longitud de fibra considerada, se obtiene :

$$s_e = \frac{M(I)L\Delta I_0}{2.35}$$

Anexo B – Definiciones según Recomendación G.650 de la UIT-T

Definiciones generales

Perfil de índice de refracción: Índice de refracción a lo largo de un diámetro de la fibra.

Supresor de modos de revestimiento: Dispositivo o material que favorece la conversión de los modos de revestimiento en modos de radiación.

Filtro de modos: Dispositivo diseñado para aceptar o rechazar un modo o unos modos determinados.

Características mecánicas

Recubrimiento primario: Una o más capas de material de recubrimiento de protección aplicadas al revestimiento de la fibra durante el proceso de estirado o después para preservar la integridad de la superficie del revestimiento y proporcionar una cantidad mínima de protección requerida (por ejemplo, un recubrimiento de protección de 250 μm).

Recubrimiento secundario: Una o más capas de material de recubrimiento aplicadas sobre una o más fibras con recubrimiento primario para dar una protección adicional necesaria o disponer las fibras juntas en una estructura particular (por ejemplo, un recubrimiento «tampón» de 900 μm , «envoltura apretada» o un recubrimiento de cinta).

Nivel de prueba de resistencia mecánica: Valor especificado de resistencia a la tracción o de deformación a la que se somete un largo completo de fibra durante un breve periodo de tiempo especificado. Esto se hace normalmente de manera secuencial en todo el largo de la fibra.

Parámetro de corrosión por tensión: El parámetro n de corrosión por tensión (susceptibilidad) es un coeficiente adimensional relacionado empíricamente con la dependencia del crecimiento de las grietas respecto a la tensión aplicada. Depende de la temperatura ambiente, de la humedad y de otras condiciones ambientales.

Para este parámetro puede darse un valor estático y un valor dinámico.

El valor estático n_s es el valor, con signo menos, de la pendiente del gráfico en coordenadas doblemente logarítmicas de la fatiga estática, representada por la relación entre tiempo de fallo y tensión aplicada.

El valor dinámico es n_d , siendo $1/(n_d + 1)$ la pendiente del gráfico en coordenadas doblemente logarítmicas de la fatiga dinámica, representada por la relación entre tensión de fallo y tasa de tensión aplicada.

NOTA – n no tiene por qué ser un valor entero.

Características del campo modal

Campo modal: El campo modal es la distribución de campo monomodal que produce una distribución de intensidad espacial en la fibra.

Centro del campo modal: El centro del campo modal es la posición del centroide de la distribución espacial de intensidad en la fibra.

Error de concentricidad del campo modal: Distancia entre el centro del campo modal y el centro de la superficie del revestimiento.

Características del revestimiento

Revestimiento: Región más externa de índice de refracción constante en la sección transversal de la fibra.

Centro del revestimiento: En una sección transversal de la fibra óptica, centro del círculo que mejor corresponde al límite exterior del revestimiento.

Diámetro del revestimiento: Diámetro del círculo que define el centro del revestimiento.

Desviación del diámetro de la superficie del revestimiento: diferencia entre los valores real y nominal del diámetro del revestimiento.

Campo de tolerancia del revestimiento: En una sección transversal de la fibra óptica, región entre el círculo que circunscribe el límite exterior del revestimiento y el mayor círculo, concéntrico con el primero, que corresponde al límite exterior del revestimiento. Ambos círculos tendrán el mismo centro que el revestimiento.

No circularidad del revestimiento: Diferencia entre los diámetros de los dos círculos definidos por el campo de tolerancia del revestimiento, dividida por el diámetro nominal del revestimiento.

Definiciones relativas a la dispersión cromática

Dispersión cromática: Diseminación de un impulso luminoso por unidad de anchura espectral de la fuente causada en una fibra óptica por las diferentes velocidades de grupo de las diferentes longitudes de onda que componen el espectro de la fuente.

NOTA – La dispersión cromática puede deberse a una o más de las siguientes contribuciones: dispersión debida al material, dispersión debida al guionondas, dispersión debida al perfil de índice.

Coefficiente de dispersión cromática: Dispersión cromática por unidad de anchura espectral de la fuente y unidad de longitud de la fibra. Suele expresarse en $\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$.

Pendiente de dispersión nula: Pendiente del coeficiente de dispersión cromática en función de la curva de longitud de onda a la longitud de onda de dispersión nula.

Longitud de onda de dispersión nula: Longitud de onda a la que desaparece la dispersión cromática.

Desplazamiento de la longitud de onda de la fuente (sólo para las fibras de la Recomendación G.653): Diferencia absoluta entre la longitud de onda de trabajo de la fuente y 1550 nm.

Desplazamiento de la dispersión (sólo para las fibras de la Recomendación G.653): Desplazamiento absoluto de la longitud de onda de dispersión nula con respecto a 1550 nm.

Otras características

Longitud de onda de corte: La longitud de onda de corte es la longitud de onda mayor que aquella para la cual la relación entre la potencia total, incluida la de los modos de orden superior inyectados, y la potencia del modo fundamental disminuye hasta alcanzar un valor inferior a cierto valor especificado, estando los modos excitados de manera prácticamente uniforme.

Atenuación: La atenuación $A(\lambda)$ a una longitud de onda λ entre dos secciones (1 y 2) transversales de una fibra, separadas por una distancia L , se define como sigue:

$$A(\lambda) = 10 \log [P_1(\lambda) / P_2(\lambda)] \quad (\text{dB})$$

donde $P_1(\lambda)$ es la potencia óptica que atraviesa la sección transversal 1, y $P_2(\lambda)$ la potencia óptica que atraviesa la sección transversal 2 a la longitud de onda λ .

Para una fibra uniforme, es posible definir una atenuación por unidad de longitud o un coeficiente de atenuación:

$$a(I) = \frac{A(I)}{L} \quad (\text{dB/unidad de longitud})$$

que es independiente de la longitud de la fibra.

Recomendaciones a consultar:

G. 650; G. 651; G. 652 ;G.653 ; G 654 y G 655. de la UIT-T.