

## FUNDAMENTOS DE FIBRA ÓPTICA

### Composición

Una fibra óptica consiste en dos regiones concéntricas. La región interna es un filamento transparente llamado núcleo, cuyo diámetro suele estar comprendido entre 8 y 600 micras dependiendo del tipo de fibra óptica, y su índice de refracción es superior a la región externa. La región exterior consiste de un revestimiento de cuarzo o plástico al igual que el núcleo. Resultando que la luz inyectada en un extremo de la fibra, dentro de un determinado ángulo conocido como abertura numérica, es totalmente reflejada cada vez que incide en límite del núcleo/revestimiento. La luz continua reflejándose múltiples veces a través de la fibra por esta reflexión interna total, hasta que sale por el otro extremo (Figura 6).

El revestimiento se encuentra rodeado de una tercera capa, la cubierta protectora, de material plástico.

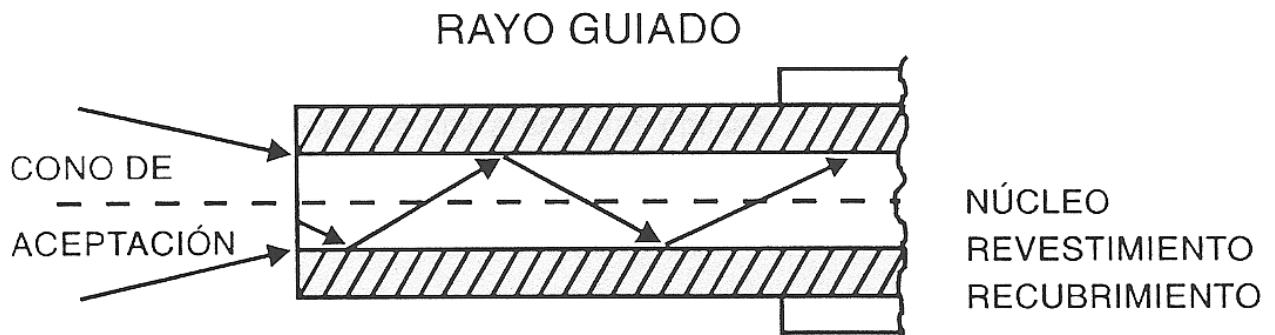
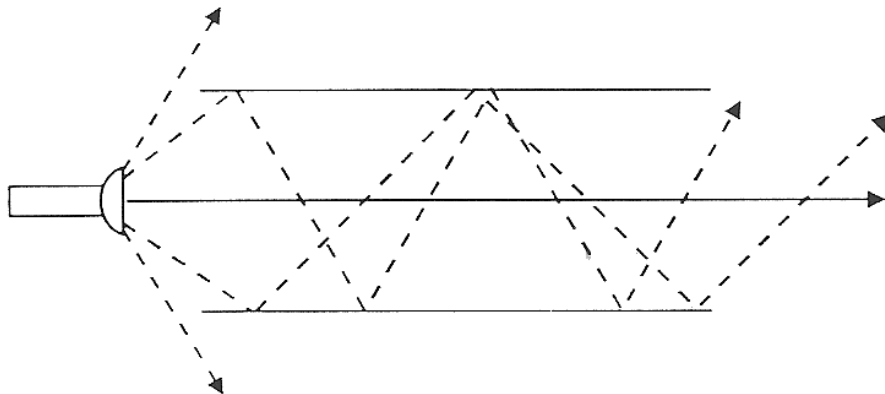


Figura 6.- Fibra óptica.

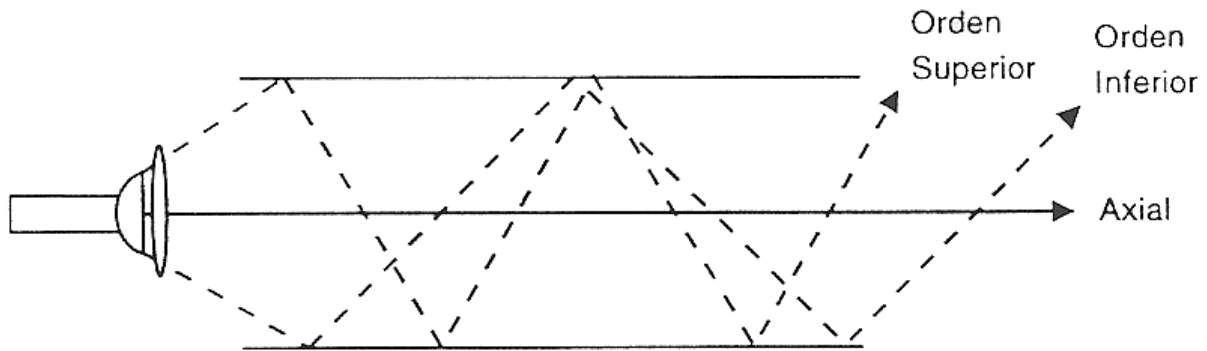
### Mecanismos ópticos básicos

La figura 7 muestra una fuente luminosa (una linterna) situada para iluminar el extremo final de un tubo, del cual asumimos que su superficie interna es reflectante. Observe que el haz luminoso es divergente, entonces no todos los rayos serán acoplados en el interior del tubo. Bajo estas condiciones hay una pérdida de energía en el extremo final del tubo.



**Figura 7**

En la figura 8 se inserta una lente entre la fuente luminosa y el tubo para enfocar la luz en un haz más estrecho. Aunque el diámetro interior del tubo no ha variado, ahora se acopla más energía dentro del tubo y llega más energía al final del tubo.



**Figura 8**

Por lo tanto, cualquier fuente luminosa que emita un haz estrecho de luz puede acoplarse dentro de una guía luminosa (o sea, el tubo) de forma eficiente. El término que describe la capacidad de recoger luz de una guía luminosa es la abertura numérica (NA) la cual se aplica en fibras ópticas.

Propagación.

A las ondas luminosas se les referencia por su longitud de onda, que está relacionada con la frecuencia mediante la expresión  $\lambda = c/f$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda,  $c$  la velocidad de la luz y  $f$  es la frecuencia.

Como la luz es una forma de onda electromagnética, sus propiedades han de ser descritas a partir de las ecuaciones de Maxwell. El método riguroso de cálculo de la intensidad y la fase de una onda luminosa implica, entonces, utilizar dichas ecuaciones. Ahora bien, debido a que la longitud de ondas de las ondas electromagnéticas que se propagan (infrarrojo y visible) es muy pequeña, el estudio de la propagación en el interior de la fibra puede efectuarse con el modelo simplificado de rayos luminosos y leyes de la óptica geométrica.

De esta forma, el estudio de la llegada de la onda o rayo luminosos a la superficie de separación entre dos medios con diferente índice de refracción, se puede realizar de dos formas:

- a) Como una onda óptica, donde deberá resolverse la ecuación de onda, la cual impone las condiciones de contorno.
- b) Como un rayo luminoso, mediante la ley de Snell y la reflexión total.

En este manual, así como en las prácticas, utilizaremos el modelo de los rayos, pero no ha de olvidarse que el modelo que utilizamos es simplificado y no siempre nos lleva a las conclusiones válidas.

### Ley de Snell, índice de refracción

Cuando la luz pasa de un medio a otro cambia de velocidad. Introduciéndose una deflexión en los rayos de luz denominada refracción. El término que define esta característica de un medio es el índice de refracción. El índice de refracción de un medio se define como la relación entre la velocidad de la onda luminosa en el vacío ( $c$ ) y la velocidad de la onda luminosa propagada en el medio ( $v$ ).

El índice de refracción en el vacío es 1,0 y en el aire es 1,003. frecuentemente generalizado a 1,0. En el vidrio el índice de refracción es 1,5. Cuando la luz viaja en un medio denso, la velocidad de la luz (velocidad de propagación) disminuye pasando a ser  $v$ . Cuando se divide la velocidad de la luz en el vacío  $c$ , por la velocidad de la luz en un medio denso  $v$ , da el índice de refracción:

$$n=c/v$$

Los índices de refracción se utilizan en el diseño de las fibras ópticas. Para comprender bien los mecanismos de refracción dentro de la fibra es útil revisar el principio básico de la óptica: la ley de Snell.

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

La ley de Snell mostrada en la figura 9 afirma que cuando incide un rayo luminoso sobre una superficie de separación entre dos medios de distinto índice de refracción  $n$ , el rayo que viaja por el medio más denso (índice de refracción más alto) es parcialmente reflejado y parcialmente refractado.

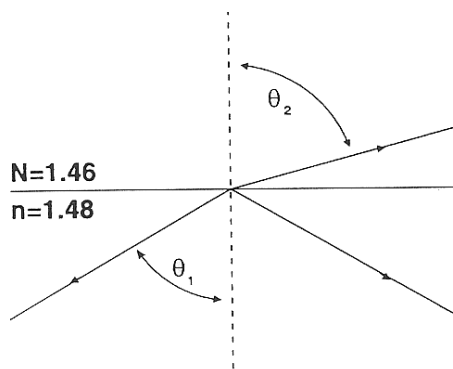


Figura 9

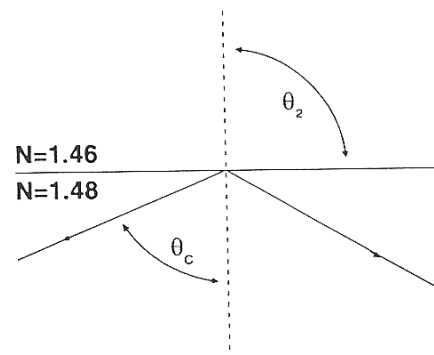


Figura 10

Si el ángulo  $\theta_1$  aumenta, el ángulo  $\theta_2$  del rayo refractado también aumenta. Habrá un ángulo de incidencia que provocará  $\theta_2$  igual a  $90^\circ$ , produciéndose la reflexión total; esto es, toda la luz refleja hacia el medio más denso y no hay refracción hacia el medio menos denso.

Así, dependiendo de las constantes de refracción de los materiales, existe un ángulo máximo  $\theta_1 = \theta_{\text{máx}}$  (determinado cuando  $\theta_2 = 90^\circ$ ) de incidencia de la luz sobre el extremo de la fibra para el cual toda la luz incidente se propaga.

Este ángulo máximo de entrada, expresado en función del ángulo complementario es:

$$\alpha_{m\acute{a}x} = \text{arc cos} \frac{n_2}{n_1}$$

denominado **ángulo de aceptación**,  $\alpha_{m\acute{a}x}$ , y su seno se conoce como **apertura numérica** (NA):

$$NA = \text{sen } \alpha_{m\acute{a}x}$$

Entonces, en el caso de la fibra óptica (compuesta por el núcleo y el revestimiento), cualquier onda que entre con un ángulo mayor que el de aceptación escapará a través del revestimiento.

### Apertura numérica

La apertura numérica denota el ángulo máximo de incidencia,  $\alpha_{m\acute{a}x}$  con el cual toda la luz incidente es propagada por el interior de la fibra sin que se produzca refracción, solo hay rayo reflejado. Es lo que se denomina el fenómeno de la reflexión total, que constituye el principio fundamental para entender el comportamiento de la fibra como una guía de ondas. Para un ángulo superior de incidencia se perderá la luz incidente por refracción.

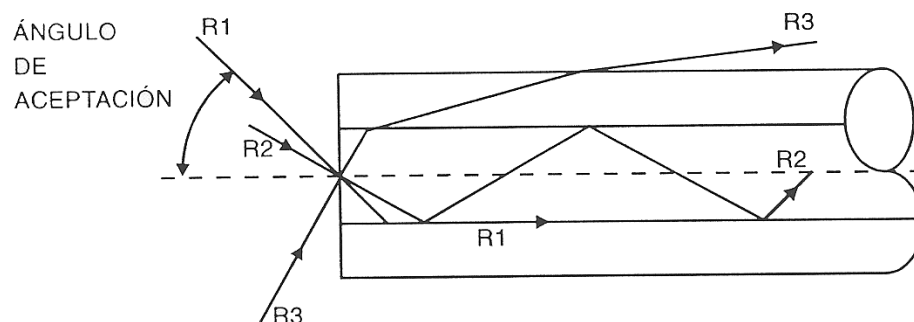
El concepto de apertura numérica se usa para describir la potencia colectora de luz de la fibra y para calcular la eficiencia de acoplo fuente/fibra. Está definido como:

$$NA = \text{sen } \alpha_{m\acute{a}x} = \sqrt{n_n^2 - n_r^2}$$

donde  $\alpha_{m\acute{a}x}$  representa el máximo ángulo de aceptación y  $n_n$  es el índice de refracción del núcleo y  $n_r$  es el índice de refracción del revestimiento.

Interesa que la apertura numérica sea grande para aprovechar mejor la fuente luminosa. Valores típicos de la apertura se encuentran alrededor de 0,2, equivalente aun ángulo máximo de  $11^\circ$  (o sea, en total: 22 grados)

En la figura 11 está representada una fibra óptica en la que inciden distintos rayos de luz. El rayo R1 incide en la fibra con un ángulo igual al ángulo de aceptación. Para ángulos mayores, caso del R3, el rayo escapa de la fibra óptica.



**Figura 11.- Sección de una fibra óptica.**

La fibra óptica está constituida por tres partes: la interior, denominada núcleo, la exterior revestimiento y un recubrimiento de protección alrededor del revestimiento. Tanto el núcleo como el revestimiento son de vidrio (o de material plástico). El núcleo tiene un índice de refracción superior al del revestimiento. Debido a esta diferencia de índice, la luz transmitida se mantiene y propaga a través del núcleo, satisfaciéndose el principio de reflexión total interna, siempre que se verifique que  $\alpha_{\text{incidencia}} \leq \alpha_{\text{máx}}$ .

Las ondas luminosas deben entrar en la fibra dentro de un cierto ángulo, llamado ángulo de aceptación. Cualquier onda que entre según un ángulo mayor escapará a través del revestimiento. Este ángulo está definido por la apertura numérica NA.

### Modos de propagación

Las figuras 7 y 8 muestran otro fenómeno óptico de las fibras ópticas. Sea cual sea la divergencia del haz incidente, algunos rayos se propagarán directamente a través del eje longitudinal del tubo. Este camino de propagación está indicado, en la figura, como una línea sólida, y la longitud del camino de transmisión a través de esta línea (el eje óptico del tubo) es la distancia más corta a través del tubo. Este camino representa un modo de propagación de la luz dentro del tubo.

La figura 7 también muestra que algunos rayos entran en el tubo con un cierto ángulo (las líneas punteadas). Si el interior del tubo es reflejante, los rayos son reflejados por la superficie reflejante interior y son propagados a través del tubo en una sucesión de reflexiones. En función del ángulo de entrada el número de reflexiones será menor o mayor, y por ello la longitud recorrida por el rayo será menor o mayor respectivamente. Los modos de propagación representan los diferentes caminos posibles de las ondas luminosas viajando a través de la fibra óptica.

En la figura 8 los modos de propagación se identifican de orden alto y bajo. Esta distinción designa a los modos de orden alto a los que tienen los caminos de transmisión más largos, ya los de orden bajo a los que tienen caminos cortos. El modo axial es el camino de transmisión más corto posible y generalmente se le denomina como modo fundamental.

### TIPOS DE FIBRA ÓPTICA

Dependiendo del tipo de propagación de la señal luminosa en el interior de la fibra, éstas se clasifican en los siguientes grupos:

- **Multimodo**
- **Monomodo**

En una fibra monomodo, la luz puede tomar un único camino a través del núcleo, que mide alrededor de 10 micras de diámetro. Las fibras multimodo tienen núcleos entre 50 y 1000 micras. Las fibras monomodo son más eficaces a largas distancias, pero el pequeño diámetro del núcleo requiere un alto grado de precisión en la fabricación, empalme y terminación de la fibra.

La fibra óptica también se clasifica en función del índice de refracción, siendo de dos tipos:

- **Salto de índice**
- **Índice gradual**

En las fibras de índice gradual, el índice de refracción es inferior en las proximidades del revestimiento que en el eje de la fibra. Las ondas luminosas se propagan ligeramente más lentas en las proximidades del eje del núcleo que cerca del revestimiento.

Atendiendo al material de la fibra, éstas pueden clasificarse:

- **Fibras de vidrio**
- **Fibras de material plástico**

Estas últimas se utilizan para comunicaciones a muy cortas distancias. Suelen emplearse para interconexión de equipos situados en un mismo edificio, conexión de equipos digitales de audio y en pequeñas redes de ordenadores.

Dentro de las dos primeras clasificaciones generales (tipo de propagación e índice de refracción), tenemos tres tipos básicos de fibra óptica:

- **Fibra multimodo de salto de índice**
- **Fibra multimodo de índice gradual**
- **Fibra monomodo**

Generalmente se utilizan las fibras multimodo en la primera y segunda ventanas, y monomodo en la segunda y tercera ventanas.

Fibra multimodo de salto de índice.

El guiado de la señal luminosa está causado por la reflexión total en la superficie de separación entre el núcleo y el revestimiento. El índice de refracción presenta un perfil definido por la expresión siguiente:

$$n = n_0 (1 + \Delta)$$

(siendo el  $\Delta$  incremento del índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento)

En este tipo de fibra la apertura numérica, NA, puede aproximarse a la expresión:

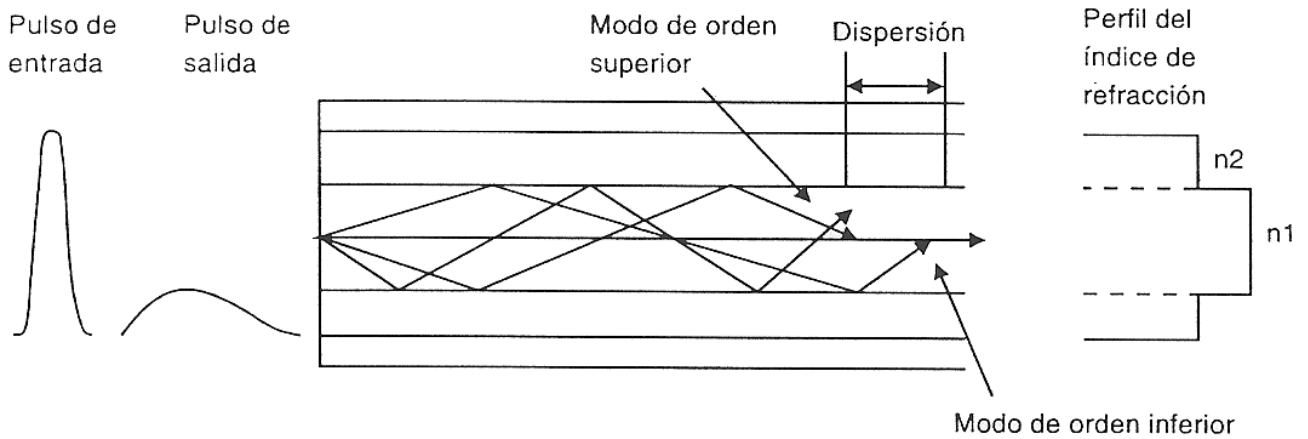
$$NA = \sqrt{2\Delta}$$

valores típicos de NA se encuentran entre 0,2 y 0,5.

Las señales incidentes con un ángulo cuyo seno sea inferior a la apertura numérica provocan la aparición de multitud de modos (o dicho de forma más intuitiva de multitud de rayos y ángulos de reflexión) propagándose por el interior de la fibra (Figuras 12 y 13). Esta es la razón del término multimodo para describir el tipo de fibra.

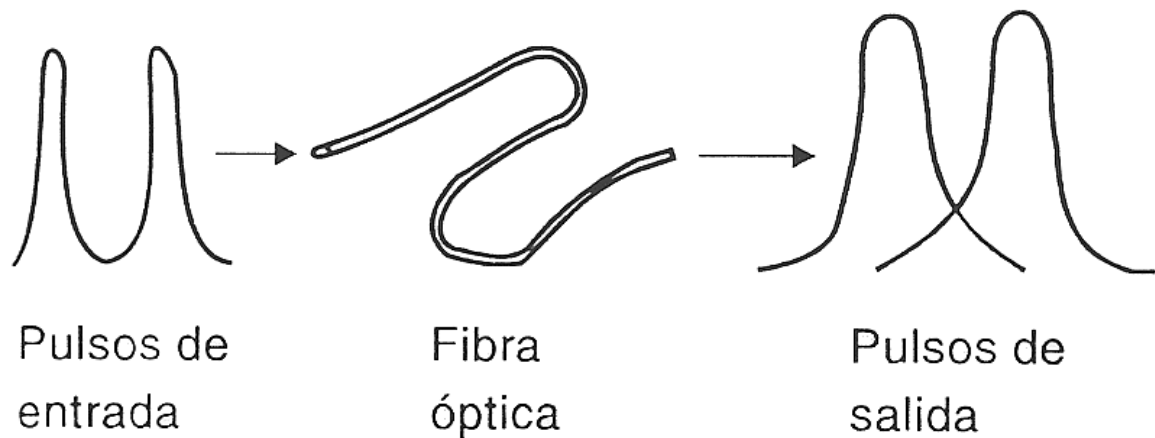
El núcleo de este tipo de fibras tiene un diámetro entre 50 a 1000  $\mu\text{m}$ . Este núcleo tan grande implica que se propaguen varios modos. Los diferentes caminos dan lugar a la

dispersión modal, o sea, el ensanchamiento temporal de la luz cuando viaja a través de la fibra. La dispersión es un mecanismo que limita el ancho de banda o la cantidad de información que la fibra es capaz de transportar.



**Figura 12 Fibra multimodo.**

### Dispersión



**Figura 13**

Estas fibras pueden clasificarse a su vez en función de su composición:

- Vidrio/Vidrio: cubierta y núcleo de vidrio.
- Plástico/Vidrio: cubierta de plástico y núcleo de vidrio.
- Plástico/Plástico: cubierta y núcleo de plástico.

Este tipo de fibras son las más utilizadas en enlaces de distancias cortas, hasta 1 km. y su aplicación más importante está en las redes locales.

Fibra multimodo de índice gradual.

En este caso el cambio de índice de refracción en el interior de la fibra es gradual, lo que provoca una propagación ondulada del rayo de luz (figura 16b).

Las fibras de índice gradual comprometen la eficiencia en el acoplo para tener mayor ancho de banda. Se hace esto dando al núcleo un índice de refracción no uniforme en todo su perfil.

La variación del índice de refracción en el perfil de la fibra da lugar a que la luz se propague según una trayectoria curva, en lugar de a tramos rectos como en las fibras de salto de índice. El mayor recorrido del rayo se compensa por la mayor velocidad de propagación ( $V=c/n$ ) en la región exterior del núcleo.

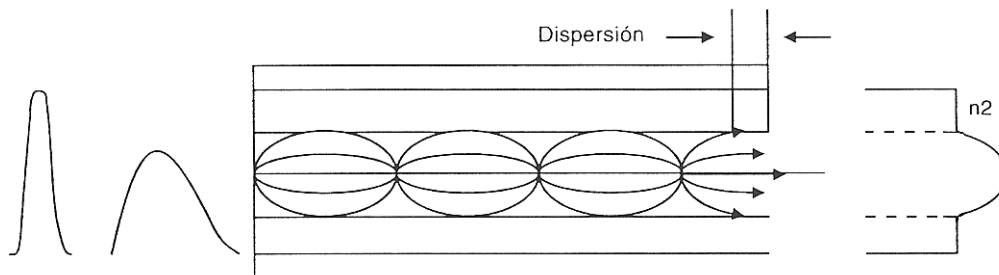
En estas fibras el ángulo de aceptación depende de la distancia al eje del núcleo, siendo máximo en el centro y cero en la frontera con el revestimiento. Sin embargo, la apertura numérica (NA) de las fibras de índice gradual se define de la misma forma que en las de salto de índice:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

la NA tiene un valor típico de 0,2 para estas fibras.

La mayoría de las fibras de índice gradual tienen un núcleo con diámetro de entre 50  $\mu\text{m}$  y un revestimiento con 125  $\mu\text{m}$  de diámetro.

Estas fibras provocan menos modos de propagación que las de salto de índice, reduciéndose la dispersión, y con ello un aumento del ancho de banda. Estas fibras son empleadas hasta distancias de 10 km.



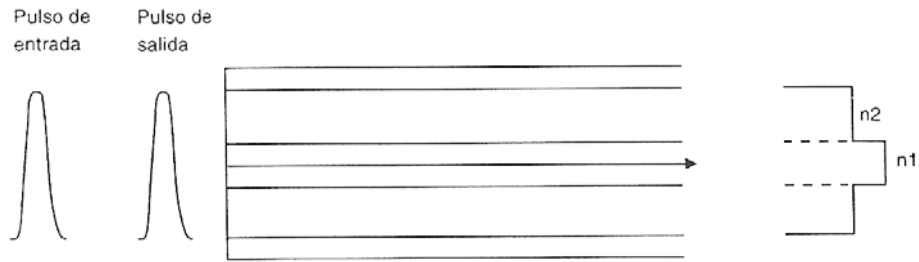
**Figura 14.- Fibra multimodo de índice gradual.**

Fibras monomodo.

Cuando se requieren anchos de banda muy grandes se usan fibras monomodo. Estas fibras, en su construcción más simple, son iguales a las multimodo de salto de índice, solo que el diámetro del núcleo es muy pequeño (5-12  $\mu\text{m}$ ), pudiéndose propagar un sólo modo.

La dispersión modal es muy baja, alrededor de solo decenas de picosegundos ( $10^{-12}$  segundos) por kilómetro, con lo que los anchos de banda son excepcionales y las pérdidas bajas, siendo adecuadas para largas distancias o comunicaciones de alta velocidad.

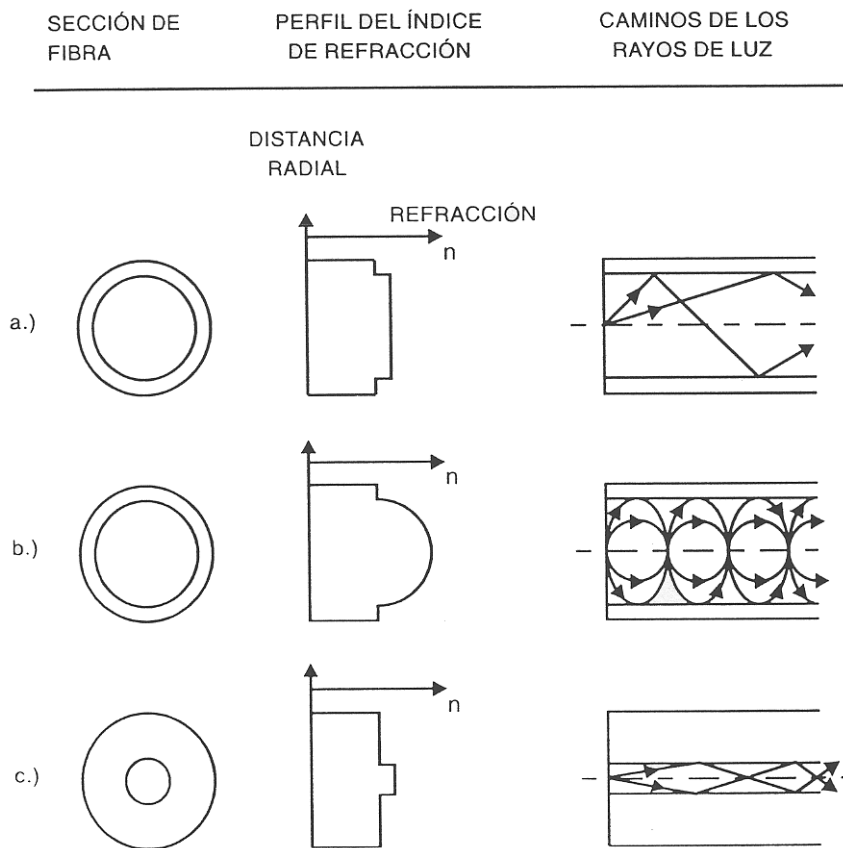




**Figura 15.- Fibra monomodo.**

Es el caso conceptualmente más simple, ya que se trata de una fibra de salto de índice pero de un diámetro del núcleo tan pequeño (inferior a 10 micras) que solo permite la propagación de un modo, el fundamental (Figura 16.c).

Este tipo de fibra es el que permite obtener mayores prestaciones y se usa en enlaces de gran distancia. Estas fibras presentan no obstante, algunas desventajas como la mayor dificultad para inyectar la señal luminosa a la fibra (apertura numérica típica de 0.1 @ ángulo de incidencia de  $12^\circ$ ), mayor sensibilidad a errores mecánicos, malos tratos, empalmes defectuosos, etc. La dificultad de inyección de señal se soluciona utilizando fuentes de luz láser.



**Figura 16.- Tipos de fibra óptica.**

## TRANSMISIÓN DE LUZ EN LAS FIBRAS ÓPTICAS

Dispersión modal. Interferencia intersimbólica. Dispersión cromática

### Dispersión Modal

Si consideramos que aplicamos a una fuente luminosa una señal digital ("1" y "0") ésta conmutará entre encendido y apagado. Interesará obtener en el extremo del sistema de comunicaciones una reproducción fiel de la señal eléctrica original. Esto significa que la señal reproducida deberá tener las mismas características de duración de los tiempos de "1" y "0", o la misma secuencia de transiciones, o ambas.

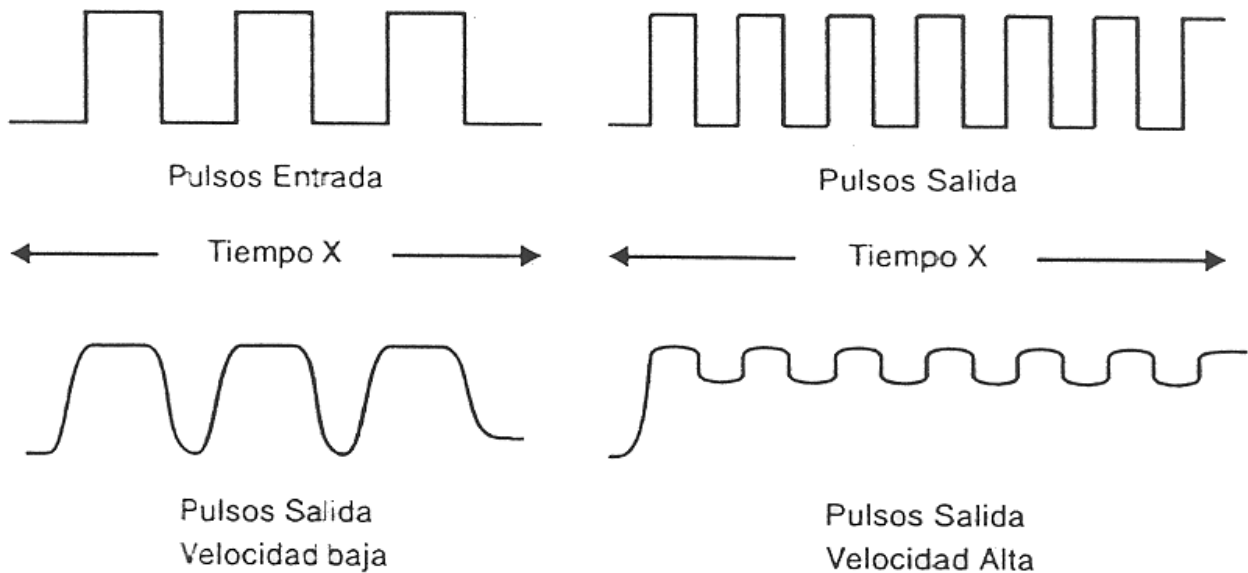
Si en un instante dado, la fuente luminosa se encuentra emitiendo (suponemos que a la entrada tenemos una señal eléctrica "1"), todos los rayos de luz de todas las frecuencias de las ondas luminosas se estarán emitiendo simultáneamente. Suponiendo, entonces, que todos los rayos se propagan por el tubo, como en la figura 8. Entonces los rayos de luz que llegan primero al final del tubo son los que se propagan en el modo fundamental y consecuentemente viajan por el camino más corto: a través del eje axial del tubo. Si en el extremo del tubo se acopla un detector óptico, el detector percibe la presencia de estos rayos y genera una señal eléctrica en su salida ("1").

Entonces, un instante de tiempo después, los otros rayos luminosos que se han propagado reflejándose a través del tubo llegarán al detector y serán percibidos por éste. Pero la señal eléctrica del detector ya está presente ("1") debido a los primeros rayos que se propagaron por el eje axial, entonces no ocurre ningún cambio en la salida eléctrica del detector.

Si ahora la señal aplicada a la fuente luminosa pasa de "1" a "0", todos los rayos de todas las frecuencias de las ondas luminosas se extinguirán en el mismo instante de tiempo. La reacción más rápida, a esta extinción, llegará al extremo final como una pérdida de luz mediante los rayos que se propagan por el eje axial (modo fundamental), son los rayos que recorren menos distancia. Pero como en el detector aún llegarán rayos luminosos de los modos más lentos, la salida del detector no cambiará inmediatamente.

Después de un cierto tiempo, después de que los rayos luminosos más lentos (los modos de propagación con un orden más alto) atraviesen el tubo, al detector no le llegará energía luminosa, por lo que no proporcionará señal eléctrica ("0").

El resultado consiste en que no se obtiene una fiel reproducción de la señal eléctrica original. La señal eléctrica proporcionada por el detector tiene más duración que la original. Entonces, se dice que el pulso entregado por el detector se ha ensanchado o dispersado.



**Figura 17.- Interferencia intersimbólica.**

Este ensanchamiento es una forma de distorsión y se denomina dispersión modal en los sistemas de transmisión de ondas luminosas. Esta dispersión es debida por la multiplicidad de caminos de transmisión o de modos en el interior del tubo.

La dispersión modal es función del número de modos de propagación en el interior del tubo y de la longitud del tubo.

#### Interferencia Intersimbólica.

La distorsión de los pulsos, que se evidencia como un pulso de mayor período que el original, puede considerarse como que el pulso se ha extendido un período de tiempo muy corto. Esto es cierto en el caso de velocidades de transmisión muy bajas. Una leve extensión del período cuando tenemos luz, con relación al período cuando no tenemos luz es insignificante.

Pero en los sistemas de transmisión ópticos, la luz es pulsada a unas velocidades muy altas. En un sistema operando a 90 Mb/s. Por ejemplo, el período del pulso en que tenemos luz es solo de 6 a 10 ns, y esto que 90 Mb/s no es una velocidad muy alta hoy en día. La distorsión del pulso introducida puede consecuentemente ser un porcentaje significativo del período del pulso en tales aplicaciones.

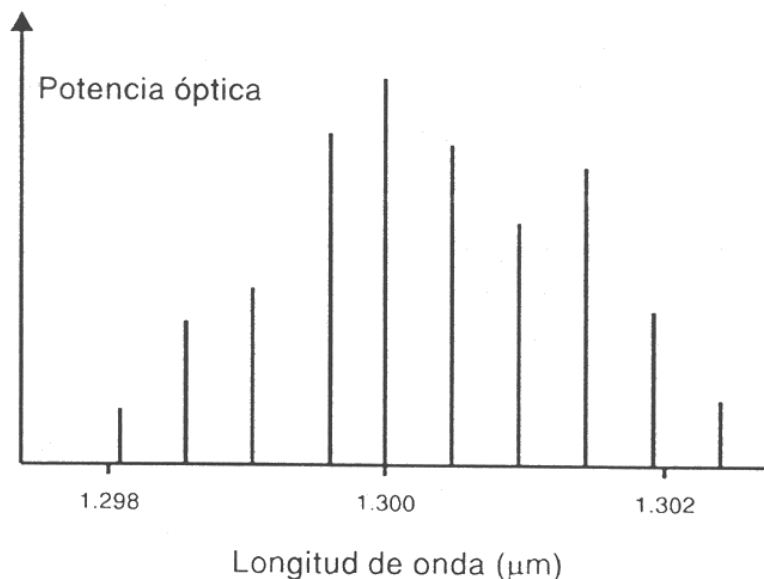
En las transmisiones de alta velocidad, más bits (pulsos) se transmiten por unidad de tiempo. Los pulsos tienden a ensancharse, como se ha indicado en el apartado de dispersión modal, y un pulso individual empieza a entrometerse en el espacio destinado a la "no presencia de pulso". Esto complica el proceso de determinar, en unos determinados instantes, si un pulso está presente o no. La intrusión de un pulso en el período de tiempo adyacente se llama interferencia intersimbólica, y se puede apreciar en la figura 17. Dicha distorsión puede provocar errores en los datos transmitidos.

## Dispersión cromática o del material.

La dispersión modal limita el ancho de banda y con ello la velocidad de los datos. Adicionalmente a la dispersión modal, la dispersión cromática ocurre cuando la energía óptica se ensancha sobre un rango de  $\lambda$ , como ocurre con las fuentes LED. Este tipo de fuentes no tiene una única  $\lambda$ , sino que tiene un determinado ancho, espectral. Así, dentro de cada modo, las diferentes  $\lambda$  (de la misma fuente luminosa) viajan por el mismo camino, pero con diferentes velocidades de propagación (el índice de refracción varía con la  $\lambda$ ), lo cual vuelve a causar un ensanchamiento de los pulsos. Este ensanchamiento será mayor a mayor longitud de la fibra. La dispersión cromática se puede reducir utilizando fuentes con un espectro muy estrecho. Incluso en las fibras monomodo, las velocidades de propagación varían en función de la longitud de onda.

Muchas fuentes luminosas producen luz que contiene energía en un número de  $\lambda$  alrededor de la  $\lambda$  central. La figura siguiente muestra el espectro típico de una fuente luminosa láser. Aunque la salida está centrada en  $1,3 \mu\text{m}$ , hay contenido energético en las  $\lambda$  superiores y en las  $\lambda$  inferiores. Este elemento tiene un ancho de banda finito. Los diodos láser tienen unos anchos espectrales de alrededor de  $4 \text{ nm}$ , mientras que los LED tienen un espectro significativamente mucho mayor, del orden de  $40$  a  $100 \text{ nm}$ .

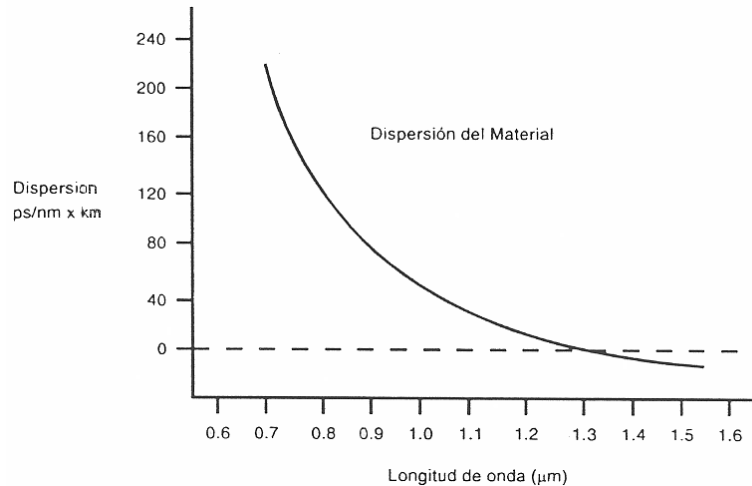
Aunque la fibra soporte solo un modo de propagación, la energía lanzada en el interior de la fibra incluye varias  $\lambda$ . A pesar de la uniformidad del índice de refracción núcleo de la fibra, las diferentes  $\lambda$  transitan en la fibra óptica a velocidades diferentes; así, un pulso de luz en el extremo final de la fibra se dispersará en el tiempo, o ensanchará, de la misma manera que las múltiples reflexiones ensanchan un pulso en una fibra multimodo.



**Figura 18.- Espectro de una fuente luminosa láser.**

La figura 19 muestra una curva típica de la dispersión de una fibra monomodo. Como en la dispersión modal, la dispersión cromática, o del material, no es la misma para todas las  $\lambda$ , siendo posible manipular los índices de refracción de los materiales del recubrimiento y del núcleo para minimizar la dispersión. También es posible seleccionar que las  $\lambda$

emitidas coincidan con el mínimo de dispersión de la fibra en cuestión. La dispersión cromática puede reducirse (e incrementar la velocidad de transmisión de datos) cuando se utiliza una fuente luminosa monocromática muy estable con la frecuencia.



**Figura 19.- Curva de dispersión de una fibra monomodo**

### Atenuación

La dispersión modal y la dispersión cromática limitan el ancho de banda y con ello la velocidad de los datos, debido al ensanchamiento que provocan en los pulsos. A mayor longitud de la fibra mayor ensanchamiento.

A diferencia de los cables de cobre, la atenuación en la fibra óptica no se incrementa con la frecuencia, esta es constante dentro del rango frecuencia utilizable o ventana. La atenuación es proporcional a la longitud de la fibra y depende de las  $\lambda$  propagadas.

Hay que tener presente que en las fibras multimodo no puede hablarse de atenuación en el mismo sentido que en un portador metálico, debido a que la potencia óptica se distribuye entre los diferentes modos de propagación, que presentan diferentes atenuaciones.

Las pérdidas que se producen en una fibra óptica se pueden agrupar en dos grandes grupos pérdidas intrínsecas y pérdidas extrínsecas, las cuales se pueden subdividir de la forma siguiente:

### PÉRDIDAS INTRINSECAS

- Son propias de la fibra
- Dependen de Su construcción
- No se pueden eliminar

Dentro de este tipo de pérdidas hay:

- Absorción:
  - Picos de absorción en infrarrojos y ultravioletas, se trata de energía que se transforma

en calor.

- Dispersión por efecto de Rayleigh:

- Fluctuaciones en la composición del vidrio, serán fluctuaciones en el índice de refracción originadas por la agitación térmica (serán del orden de  $\lambda$ ).

- Es proporcional a  $\lambda^{-4}$

## PÉRDIDAS EXTRÍNSECAS

- No son propias de la fibra
- Dependen del proceso de producción

A este tipo de pérdidas pertenecen:

- Impurezas:

- Hidrógeno  
- Algunos iones metálicos  
- Sobre todo a los grupos OH que se producen durante la fabricación. estos son los más difíciles de eliminar. Presentan picos de absorción a 950, 1250 y 1380 nm.

- Defectos Físicos.

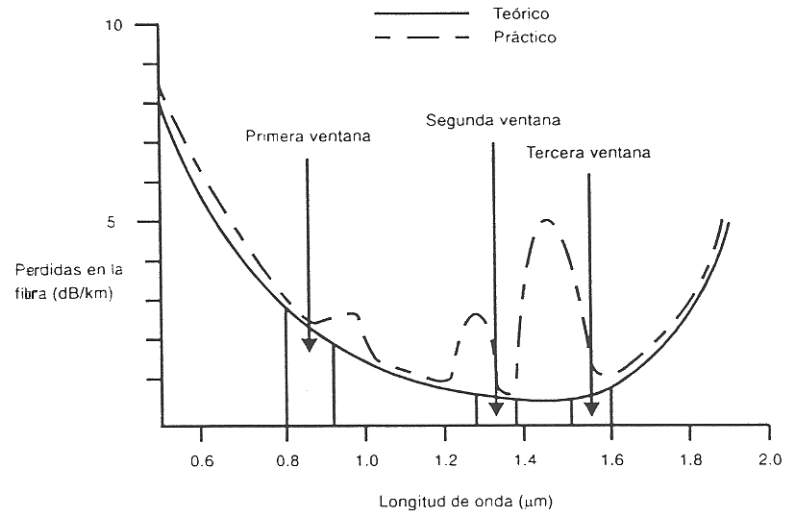
- Irregularidades geométricas:

- Curvaturas originadas, por ejemplo, por la fatiga estática que se produce si se guarda durante mucho tiempo en bobinados, o bien ocasionadas en la fase de instalación. conviene que el radio de curvatura sea más grande a 10 veces el radio de la fibra.

- Microcurvaturas, es decir, irregularidades geométricas entre el núcleo y el revestimiento. Son pérdidas por radiación.

- Microfisuras, causadas por:

- Fatiga
- Presión
- Humedad



**Figura 20. Atenuación de la fibra.**

En las fibras de vidrio, el mecanismo dominante de atenuación es la dispersión de Rayleigh, la cual disminuye gradualmente cuando incrementa la  $\lambda$ . Las pérdidas debidas a la absorción de los grupos OH se han reducido en el transcurso de los años, siendo significativo un pico en 1380 nm. La atenuación aumenta fuertemente por encima de 1550 nm debido a la absorción de los infrarrojos. Las  $\lambda$  altas son de interés debido a que la dispersión es también baja, las fibras de vidrio manifiestan un cero de dispersión cromática alrededor de 1300 nm.

Aunque la atenuación en las fibras comerciales está próxima a los límites teóricos, dos regiones de  $\lambda$  han sido comúnmente utilizadas debido a los mínimos de atenuación que presentaban las primeras fibras ópticas. Estas regiones centradas alrededor de 850 nm y 1300 nm se conocen como la primera y la segunda ventana respectivamente.