

Propiedades físicas de las fibras ópticas

(IV)

Cuarta entrega de la serie de artículos que la revista dedicará a la historia, características y aplicación de la fibra óptica.

Por Ing. Jorge Bocalandro Rivero
Especialista en Planta Exterior, Centro de Formación Nacional, ETECSA
boca@etecsa.cu

Si durante el estudio de la propagación de la luz a través de una fibra óptica, se tuvieran en cuenta únicamente sus propiedades geométricas, pudiera parecer que constituiría un medio de transmisión ideal. Pero una fibra óptica está fabricada con determinados materiales y, por lo tanto, sus propiedades físicas introducen cambios en la propagación de las señales a través de ellas.

Desde los inicios de las comunicaciones ópticas, el material básico para la fabricación de las fibras ópticas ha sido la sílice, dadas las características físicas que posee, adecuadas para la transmisión óptica. Pero, ¿cómo influye este material en dichas transmisiones? Para comprender mejor lo que le ocurre a una señal al propagarse por una fibra, se analizará el problema sobre la base de dos fenómenos a los cuales están sujetos las señales que se propagan por ella: atenuación y dispersión de los pulsos luminosos.

Atenuación

La atenuación es la pérdida de potencia de una señal al pasar por equipos, dispositivos o líneas de transmisión. A continuación se analizará la atenuación que le ocurre a los pulsos luminosos al pasar por una fibra óptica.

Antes de pasar al estudio de las causas de pérdidas en una transmisión óptica es necesario indicar que, independientemente del factor

que la provoca, la atenuación (A), como en otros campos, se expresa en decibelios. Así, la atenuación entre dos puntos T (transmisor) y R (receptor) separados una distancia L , está dada por:

$$A_{dB} = 10 \log \frac{P_t}{P_r} \quad (1)$$

Si se realiza el análisis por kilómetros se obtiene uno de los parámetros más importantes de la fibra óptica: el coeficiente de atenuación espectral de la fibra $\alpha(\lambda)$, el cual se expresa en dB/km:

$$\alpha(\lambda) = \frac{A}{L} = \frac{1}{L} \cdot 10 \log \frac{P_t}{P_r} \quad (2)$$

Los mecanismos de pérdidas de la señal en una fibra pueden agruparse en tres bloques:

1. Pérdidas por absorción,
2. Dispersión (*scattering*) o esparcimiento,
3. Pérdidas de la radiación hacia el exterior.

En la figura 1 se muestra una representación aproximada de cada una de estas pérdidas.

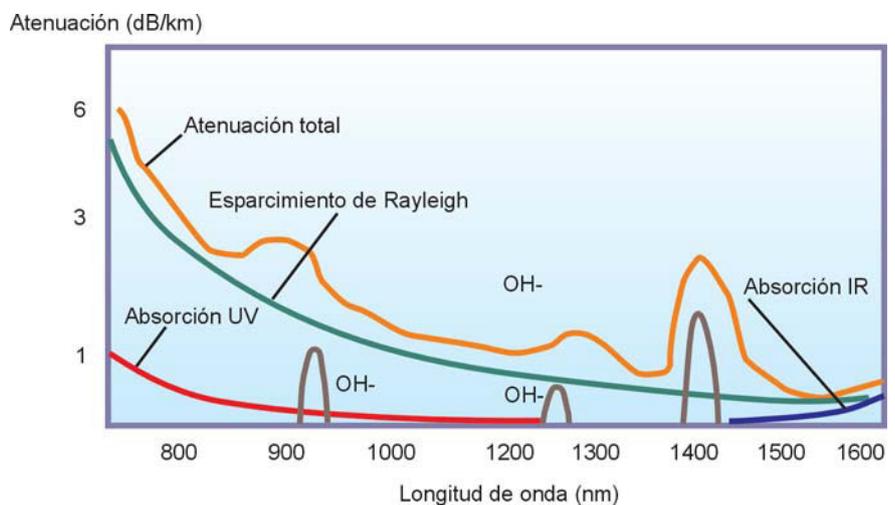


Figura 1 Característica de atenuación de las fibras de primera generación

Pérdidas por absorción

Las pérdidas por absorción son un mecanismo por el cual parte de la potencia óptica se disipa en la fibra en forma de calor. Estas pueden ser agrupadas por su origen, en pérdidas intrínsecas y extrínsecas. Sin embargo, a pesar de tener orígenes diferentes, ambas pueden ser contempladas como derivadas de una misma causa: la estructura atómica y molecular de los componentes que conforman la fibra.

Pérdidas intrínsecas

Están directamente relacionadas con las propiedades físicas del material base —la sílice—, y pueden clasificarse como absorción en el ultravioleta y absorción en el infrarrojo.

Absorción en el ultravioleta

Todo átomo puede absorber radiación electromagnética mediante el paso de un electrón desde un determinado nivel de energía a otro superior a él que se encuentre desocupado. Cada uno de estos posibles saltos da lugar a una absorción de energía y, como consecuencia, a pérdidas. Si se tiene un material constituido por un conjunto de átomos distribuidos, no de forma cristalina sino amorfa, el equivalente a los anteriores niveles atómicos serán unas bandas de energía entre las que podrán tener fenómenos análogos a los del caso atómico, los saltos de electrones serán ahora entre bandas y ocurren mayormente a frecuencias dentro del margen del ultravioleta. Para su borde inferior —el que colinda

con el visible— el valor de estas pérdidas puede describirse mediante la siguiente ecuación empírica:

$$\alpha_{UV} = C e^{E/E_0} \quad (3)$$

Donde:

C – constante empírica relacionada con el por ciento molecular

E_0 – constante empírica

E – energía del fotón

Al ser E inversamente proporcional a la longitud de onda, disminuirá considerablemente en la medida que esta última aumente. Los valores más altos se ubican en la ventana de trabajo alrededor de 850 nm, mientras que para longitudes de onda superiores a 1 μm , su influencia es prácticamente nula.

Absorción en el infrarrojo

En la región del infrarrojo ocurre otro fenómeno derivado de las vibraciones de los enlaces entre los átomos que constituyen el material, en este caso las moléculas de SiO_2 .

Esta absorción puede alcanzar valores relativamente altos debido al gran número de enlaces presentes en la fibra (Figura 2).

$$\alpha_{IR} = D_1 e^{-D_2/\lambda} \quad (4)$$

Donde:

D_1 y D_2 son constantes que dependen de las masas de los átomos situados en los nudos de la red cristalina.

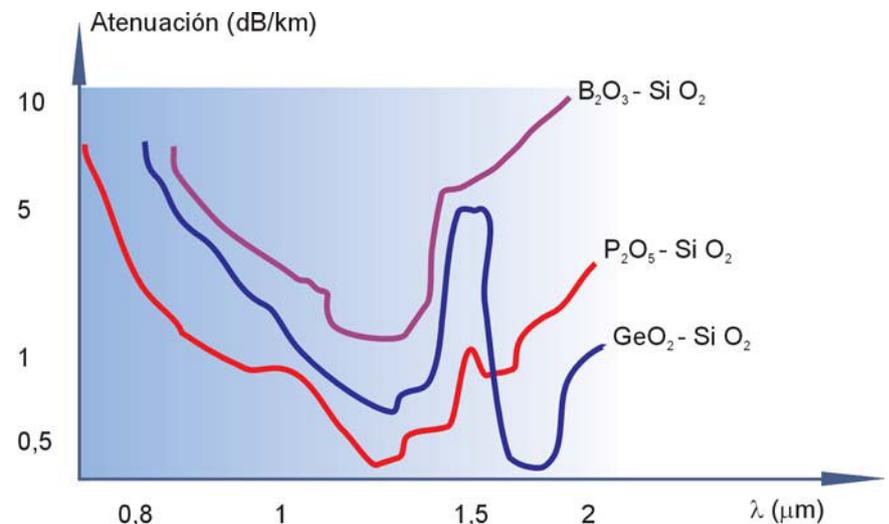


Figura 2 Representación de los valores de pérdidas por absorción en el infrarrojo para un vidrio dopado con diferentes compuestos Boro (B), Fósforo (P), Germanio (Ge)

Pérdidas extrínsecas

Estas pérdidas están relacionadas con impurezas de otros materiales y defectos estructurales surgidos durante el proceso de fabricación de la fibra. Dentro de las mismas, se encuentra la absorción por los iones OH y la absorción por los metales de transición.

Absorción por el ión OH

Los iones OH provienen de la llama empleada para las reacciones de hidrólisis requeridas durante el proceso de fabricación de la fibra. Constituyó la principal causa de pérdidas por absorción en la fibra al principio de las comunicaciones ópticas, su influencia no fue uniforme en todo el espectro (Figura 1). El principal pico de absorción del OH se encuentra cerca de 2700 nm y los armónicos, denominados sobretones, están en 725 nm, 950 nm y 1400 nm, en estas zonas es donde se producen las principales absorciones. Para tener una idea de la influencia de este ión sobre las señales ópticas, una concentración de 0,003 partes por millón (ppm) conducen a pérdidas de 20 dB/km.

En la actualidad, los procesos modernos de fabricación de las fibras han reducido notablemente el contenido de OH, y ha llegado a ser inferior a 0,001 ppm, e incluso, a eliminarlo.

Absorción por los metales de transición

Para la constitución de la mezcla inicial de lo que será la fibra se emplean metales de transición como el hierro (Fe), el cobre (Cu), el cromo (Cr), el manganeso (Mn),

el níquel (Ni) y el cobalto (Co). Cada uno de ellos produce picos máximos de absorciones a diferentes longitudes de ondas y depende del dopado del vidrio. Estos metales en concentraciones tan reducidas como 0,001 a 0,01 ppm, dan lugar a pérdidas que van desde 1 hasta 10 dB/km.

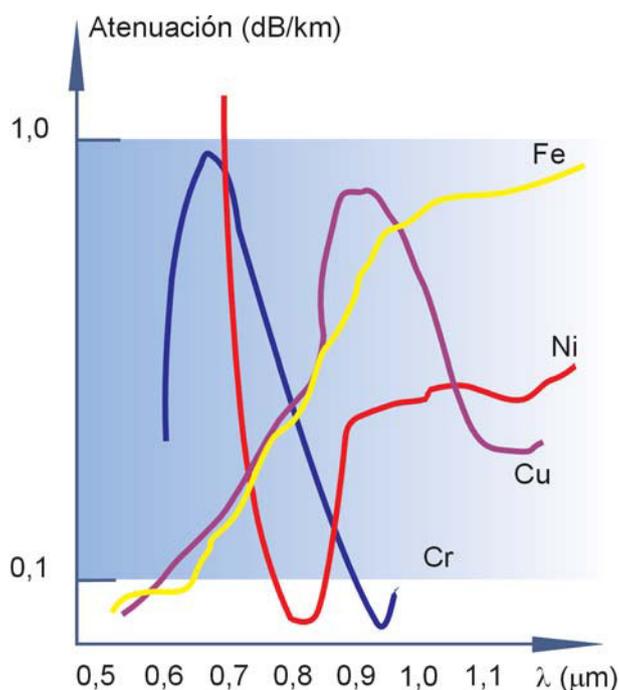


Figura 3 Influencia de los metales de transición a diferentes longitudes de onda

Pérdidas por dispersión (*scattering*) o esparcimiento

En este punto es necesario aclarar que la palabra dispersión —en inglés, *scattering*— puede confundirse con otro fenómeno, que será abordado más adelante, relacionado con distorsiones de las señales, las cuales tienen un sentido totalmente diferente. En alguna bibliografía se emplea el término esparcimiento y, a pesar de que no se ha considerado la traducción más idónea, se utilizará por dos razones fundamentales: primero, refleja mejor el sentido físico de lo que le ocurre a la señal durante su paso por la fibra y, segundo, como se aclaró anteriormente, para evitar confusiones con otro fenómeno presente en la transmisión de las señales ópticas.

Estas pérdidas pueden ser por dispersiones no lineales como el esparcimiento de Raman y el de Brillouin —estudiados en el artículo anterior—, y dispersiones lineales causadas por el esparcimiento de Rayleigh y de Mie.

Tanto el esparcimiento de Rayleigh como el de Mie están relacionados con la ausencia de homogeneidad —burbujas, diferencias de densidad o composición del material— en la fibra. El tipo de interacción variará según la relación existente entre la longitud de onda de la radiación incidente y el tamaño de la irregularidad, no así de la intensidad de la radiación incidente.

Esparcimiento de Rayleigh

Tipo de esparcimiento cuando las irregularidades del material tienen dimensiones menores de $0,1 \mu\text{m}$. En este caso la radiación resultante surge en todas direcciones, como se muestra en la figura 4. Las variaciones con relación a la uniformidad dependen de las fluctuaciones de la densidad del material y de su composición. Ambas provienen del proceso de fabricación y son difíciles de eliminar.

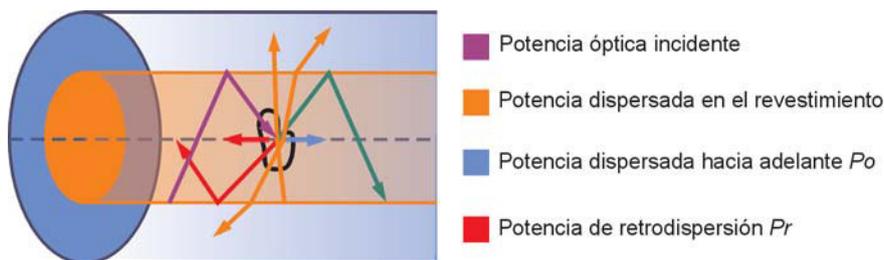


Figura 4 Esparcimiento de una señal luminosa al toparse con inhomogeneidades en la fibra

La atenuación por esparcimiento de Rayleigh puede obtenerse a través de la siguiente expresión:

$$\alpha_R = 8\pi^3 (n^2 - 1)^2 K T_f \beta_T / 3\lambda^4 \quad (5)$$

donde:

n – índice de refracción del material

K – constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K

T_f – temperatura

β_T – comprensibilidad isotérmica del material

λ – longitud de onda de la señal

Como puede apreciarse en la expresión anterior hay una dependencia de la atenuación de $1/\lambda^4$. En relación con estas pérdidas es conveniente trabajar a una longitud de onda lo más alta posible. El comportamiento de la dispersión de Rayleigh con la longitud de onda se muestra en la figura 1.

Dispersión de Mie

Este fenómeno ocurre para inhomogeneidades con una magnitud igual o mayor que la longitud de onda de la radiación. Proviene de pequeñas alteraciones en la geometría de la fibra a lo largo de la longitud de esta o en la diferencia de los índices de refracción entre el núcleo y el revestimiento. Pueden ser también pequeñas burbujas o tensiones mecánicas en el material. Como dichas imperfecciones pueden eliminarse con una fabricación bien controlada, esta dispersión no suele tenerse en cuenta. En caso de que exista, lleva el mismo sentido de propagación de la luz, por lo tanto, su influencia sobre la señal transmitida es muy reducida.

Pérdidas de la radiación hacia el exterior

Estas pérdidas pueden estar originadas por curvaturas o microcurvaturas.

Pérdidas por curvaturas

El curvado de una fibra óptica es causado por la manufactura del cable, también por dobleces durante la instalación y variación en los materiales del cable, debidos a cambios de temperatura.

Los esfuerzos que provoca la torcedura de las fibras son básica-

mente una fuerza transversal y un esfuerzo longitudinal. El esfuerzo longitudinal no provoca torcedura cuando trabaja para alargar la fibra, no hay cambio en las pérdidas ópticas. Sin embargo, cuando trabaja para contraer a la fibra, este esfuerzo provoca que la fibra forme bucles y se curve, de modo que la pérdida óptica se incrementa. Por lo tanto, al evaluar los diseños de los cables debe prestarse especial atención a la carga transversal que trabaja en la fibra durante el cableado, instalación y utilización; y al esfuerzo de contracción que ocurre a bajas temperaturas debido al encogimiento de los elementos del cable.

El eje de la fibra puede curvarse severamente y elevar las pérdidas ópticas. Para prevenir esta situación se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- ♦ Mantener un radio de curvatura determinada, al seleccionar el radio y la longitud del cableado.
- ♦ Reducir variaciones técnicas de las fibras protegidas con pequeños coeficientes de expansión térmica que las disponen alrededor de un elemento con buenas propiedades térmicas.

Existe un radio, para el cual no debe curvarse más la fibra, llamado radio crítico, es decir, cuando el radio de curvatura de la fibra R es menor que R_c aparecen las pérdidas por curvaturas. El radio de curvatura crítico puede determinarse por la siguiente expresión:

$$R_c = 3n_1^2 \lambda / \pi (n_1^2 - n_2^2)^{3/2} \quad (6)$$

Como puede apreciarse a medida que se aproximan los valores de los índices de refracción, el radio

mínimo de curvatura aumenta y depende directamente de la longitud de onda de la radiación transmitida.

Para radios de curvaturas por encima de R_c , las pérdidas son prácticamente despreciables y, por lo tanto, ignoradas. Este radio de curvatura mínimo depende, entre otras cosas, principalmente del diámetro del núcleo y puede decirse que, en general, las fibras pueden ser más curvadas mientras que el diámetro del núcleo sea más pequeño.

Pérdidas por microcurvaturas

Las microcurvaturas son desviaciones microscópicas del eje de las fibras producidas por fuerzas laterales localizadas a lo largo de la fibra. Este fenómeno puede ser provocado por esfuerzos durante la manufactura e instalación y, también, por variaciones dimensionales de los materiales del cable debido a cambios de temperatura. La sensibilidad a las microcurvaturas es función de la diferencia del índice de refracción, así como de los diámetros del núcleo y del revestimiento. Las microcurvaturas incrementan las pérdidas ópticas.

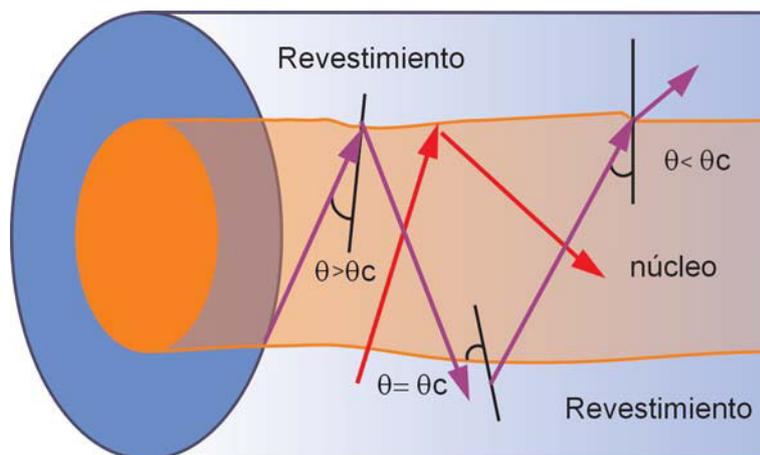


Figura 5 Influencia de las microcurvaturas en una fibra sobre las trayectorias de diferentes rayos

Dispersión

Durante la transmisión de señales con información a través de las fibras ópticas se requiere mantener las características de dicha señal a la mayor distancia posible. Idealmente la forma temporal del pulso de luz debía mantenerse sin alteraciones independientemente de la distancia recorrida. Sin embargo, esto no es posible porque existen fenómenos que distorsionan la forma del pulso. Si dicha distorsión no se controla, puede

que en la recepción sea difícil reconocer la verdadera información transmitida. La magnitud de la distorsión dependerá de las características de la fibra, tanto geométricas como del material, y repercutirá sobre el ancho de banda disponible y, por lo tanto, limitará la velocidad máxima a la que pueda transmitirse.

El fenómeno de dispersión es el ensanchamiento temporal del pulso luminoso durante su paso por la fibra y se expresa en unidades de tiempo, normalmente en picosegundos. La misma puede clasificarse en dos grandes grupos: dispersión intermodal (modal) y dispersión intramodal (cromática).

Dispersión intermodal o modal

Es la dispersión característica de las fibras multimodos. La potencia introducida en una fibra multimodo se reparte entre los diferentes modos que pueden propagarse. Cada uno de ellos necesitará un tiempo diferente para recorrer una distancia en la fibra, es decir, su detección en el final del enlace será en momentos diferentes. El pulso inicial que tenía una duración concreta ha pasado a tener otra, lo que significa que se habrá ensanchado temporalmente.

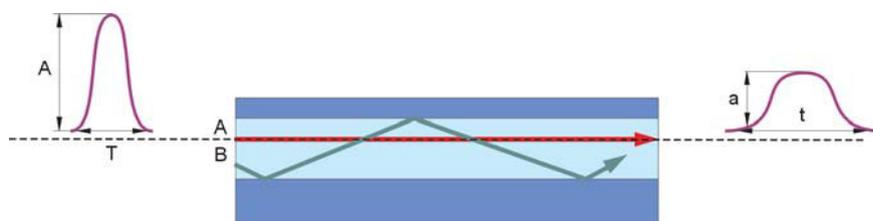


Figura 6 Trayectoria de dos rayos que determinan la dispersión modal

En la figura 6, el rayo A que corresponde al modo fundamental sigue una trayectoria paralela al eje de la fibra y es el rayo más rápido. En el otro caso, el rayo B realiza una trayectoria en forma de zigzag y forma un ángulo muy próximo o igual al ángulo crítico con la superficie de separación entre el núcleo y el revestimiento. La diferencia de tiempos entre uno y otro modo será:

$$\Delta t = T_{max} - T_{min} = Ln_1^2/cn_2 - Ln_1/c = L n_1(n_1 - n_2)/c n_2 \quad (7)$$

donde:

L – longitud óptica del enlace

n_1 y n_2 – índices de refracción del núcleo y del revestimiento, respectivamente

C – velocidad de la luz

Si se tiene en cuenta que:

$$\Delta n = (n_1 - n_2)/n_1 \quad (8)$$

donde:

Δn – índice de refracción normalizado o diferencia relativa de índices de refracción con valores usuales comprendidos entre 0,01 y 0,002.

$$\text{Entonces, la ecuación (7) quedaría } \Delta t = \Delta n L n_1^2 / c n_2 \quad (9)$$

Esta relación pudiera escribirse también en función de la apertura numérica NA , si se conoce que esta es igual a:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (10)$$

$$\Delta t = L (NA)^2 / 2 n_1 c \quad (11)$$

De la expresión 11 puede obtenerse el ensanchamiento del pulso por unidad de longitud, la cual será:

$$\Delta t/L = (NA)^2 / 2 n_1 c \quad (12)$$

Por otro lado, el efecto de dispersión modal no es lineal con la longitud del enlace y se expresa con la siguiente fórmula:

$$\sigma_m (L) = \sigma_{mo} L^E / L_0 \quad (13)$$

donde:

σ_m – dispersión modal del sistema

σ_{mo} – dispersión modal para un kilómetro de fibra

L – longitud total del enlace

E – factor de concatenación relacionado con la mezcla y equilibrio modal (0,5 – 1)

$E = 0,5$ mezcla total de modos

$E = 1$ ausencia de mezcla de los modos

$E = 0,85$ valor verificado normalmente

L_0 – longitud de un kilómetro de fibra

Como este tipo de dispersión está determinado por los modos de propagación, a medida que se propaguen por la fibra más modos, mayor será el valor de esta dispersión. Al mismo tiempo la cantidad de modos está asociada con varios parámetros como el diámetro de la fibra, la apertura numérica, el perfil del índice y la longitud de onda de trabajo por la expresión:

$$N = v^2/2 g/g+2 \quad (14)$$

$$v = \pi 2a NA / \lambda$$

donde:

v – frecuencia normalizada

g – exponente relacionado con el perfil del índice

a – radio del núcleo de la fibra

NA – apertura numérica

λ – longitud de onda de trabajo

Para una fibra multimodo de índice gradual, que son las que se emplean actualmente en redes de cortas distancias como las redes LAN y donde $g = 2$, el número de modos puede determinarse de la siguiente forma:

$$N = 0,25 (\pi d AN)^2 / \lambda^2 \quad (15)$$

Conclusiones

La atenuación de la señal durante su paso por la fibra está originada por varias causas, algunas de ellas son los problemas por absorción en el UV e infrarrojo, por la influencia del ión OH, o por las curvaturas y microcurvaturas que pueden disminuirse o eliminarse. La atenuación por absorción se reduce al trabajar los sistemas en longitudes de ondas donde no hay influencia del UV e infrarrojo; y por el ión OH, al mejorar el proceso de fabricación; mientras que la atenuación por curvaturas y microcurvaturas se reduce teniendo cuidado durante el proceso de instalación de las fibras. Queda una causa de atenuación que es el esparcimiento de Rayleigh, la cual puede disminuirse cuando se trabaja a determinadas longitudes de ondas, pero no eliminarse por la naturaleza de su origen.

La dispersión modal es característica de las fibras multimodos y sólo debe prestársele atención cuando se trata de redes de muy cortas distancias, porque en las redes de telecomunicaciones, tanto de acceso como de transporte, se emplean fibras monomodos donde las causas de dispersión son otras; que serán tratadas en el próximo artículo acerca de las propiedades físicas de las fibras. 

Bibliografía

Izquierdo Bedmar, Juan. *Telecomunicaciones a través de fibras ópticas*. Madrid, España: Ediciones AHCIET, 1996.

Martín Pereda, José Antonio. *Sistemas y redes ópticas de comunicaciones*. Madrid, España: Pearson Prentice Hall, 2004.