

# CAPITULO 2

## FIBRA OPTICA

### Introducción

**E**n la primera etapa de estudios sobre fibras ópticas no se las consideró apropiadas como medio de transmisión, debido a los altos valores de atenuación (varios miles de decibelios/km.). En 1966 se demostró que la atenuación estaba relacionada con el material utilizado, y que era posible reducirla eliminando las impurezas de la fibra de vidrio.

Fue en 1972 cuando los laboratorios americanos de Corning Glass Works anunciaron la puesta a punto de fibras ópticas de sílice dopado monomodo, cuya atenuación no superaba los 20 dB/km. A partir de entonces ya fue posible desarrollar los sistemas de fibra óptica, y hoy día vemos con sorpresa los grandes progresos conseguidos en tan poco tiempo.

La primera generación de fibra óptica trabaja en la ventana de 850 nm, la que se está desarrollando en la actualidad usa la ventana de 1.300 nm, pues la atenuación es menor. La tercera ventana, la de 1.500 nm., permite disminuir todavía más la atenuación, pero no se dispone todavía de láseres y fotodiodos apropiados.

### Principios básicos

La fibra óptica consiste en tres partes: la interior, denominada núcleo, la exterior, llamada revestimiento y un recubrimiento de protección alrededor del revestimiento. Tanto el núcleo como el



revestimiento son de vidrio, cada uno con un índice de refracción ( $n_c$  y  $n_r$ , para el núcleo y revestimiento, respectivamente). El núcleo tiene un índice de refracción superior al del revestimiento. Debido a esta diferencia de índices, la luz transmitida se mantiene y propaga a través del núcleo, satisfaciéndose el principio de reflexión total interna.

La luz que entra en la fibra óptica se propaga a través del núcleo en modos, que representan a los diferentes caminos posibles de las ondas luminosas.

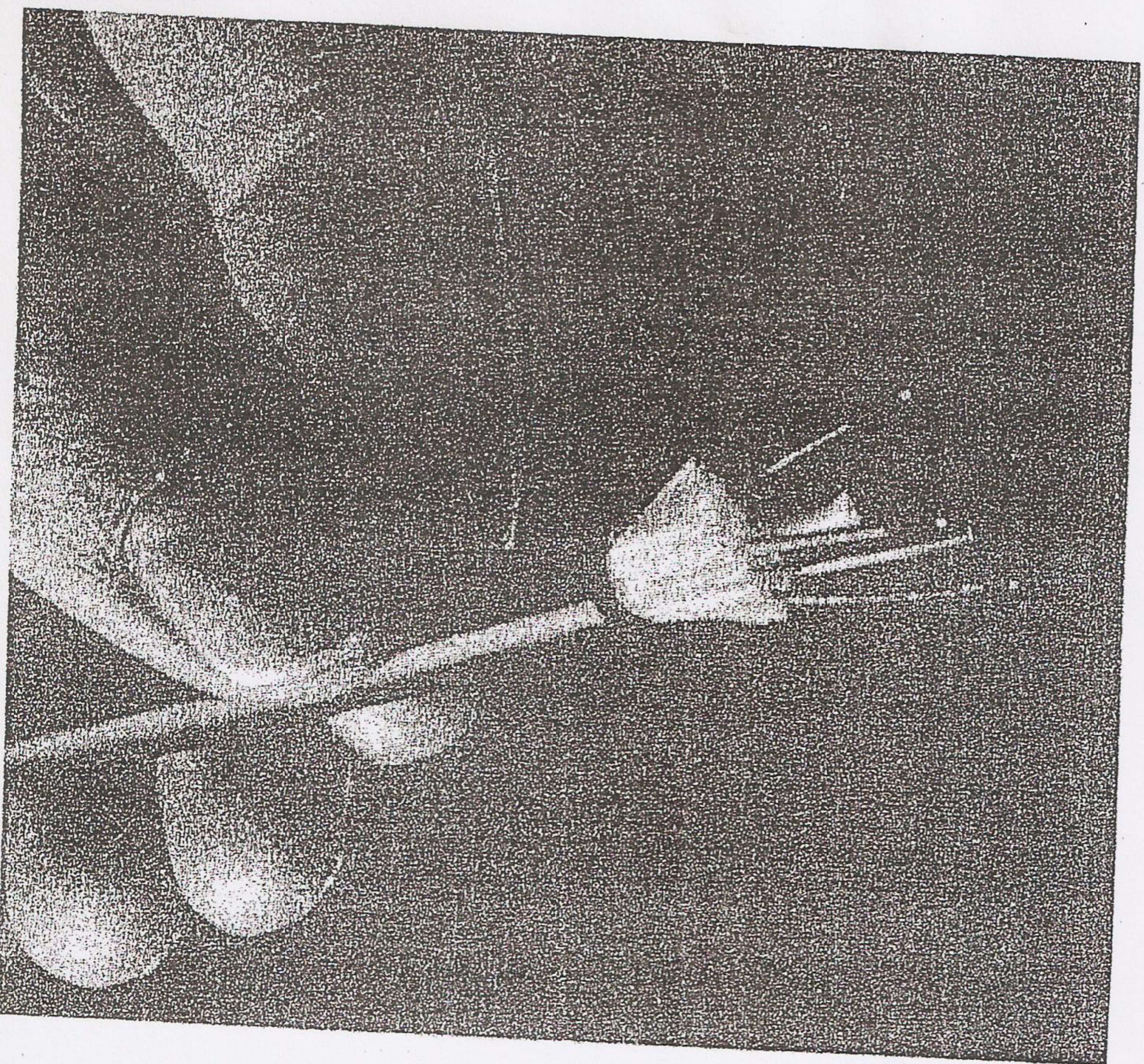


Foto 1.—Cable de fibras ópticas.

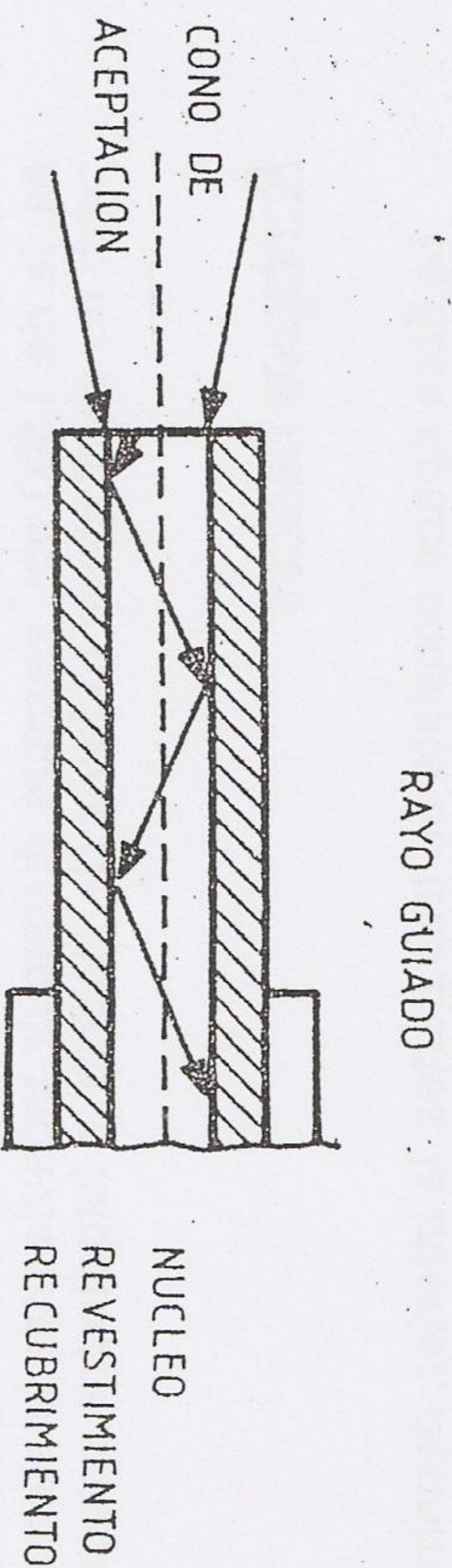


Fig. 1.—Capas de una fibra óptica. Camino seguido por un rayo de luz a través de una fibra.

Para entender los parámetros modales que determinan las características de propagación de la luz en una guía de ondas como es la fibra óptica, es necesario examinar las ecuaciones de Maxwell referidas a las condiciones de contorno cilíndricas de una fibra. Este examen es lo suficientemente complicado como para incluirlo en este libro. Como conclusión del análisis de las ecuaciones mencionadas se define un parámetro característico de las guías de ondas y que representa una constante para todos los modos. Nos referimos al denominado *parámetro V* que viene caracterizado por la expresión

$$V^2 = (2\pi a \lambda_0)^2 \cdot (n_c^2 - n_r^2)$$

en donde  $a$  es el radio del núcleo de la fibra,  $\lambda_0$  representa a la longitud de onda en el vacío,  $n_c$  es el índice de refracción del núcleo y  $n_r$  el del revestimiento.

El parámetro  $V$  puede ser utilizado para identificar el número de modos en una guía de ondas. Así, para fibras en las que la diferencia de índices de refracción entre el núcleo y el revestimiento es  $\Delta n$ , se demuestra que para valores de  $V$  interiores a 2,405 existe un único modo, denominado  $HE_{11}$ , mientras que para valores de  $V$  superiores a 2,405, otros modos son posibles dentro de la fibra. Estos modos son doblemente degenerados. Degeneración que resulta del hecho que en las guías de ondas circulares, como la fibra óptica, todas las orientaciones son equivalentes, permitiendo la coexistencia de dos modos de polarización ortogonales con el mismo número de onda. Así,  $HE_{11}$  es doblemente degenerado en polarización.

Haciendo diferentes combinaciones entre el tamaño del núcleo y la diferencia de índices entre el núcleo y el revestimiento, se pueden obtener diferentes fibras en las que existe un único modo de propagación, manteniendo la relación  $V < 2,405$ .



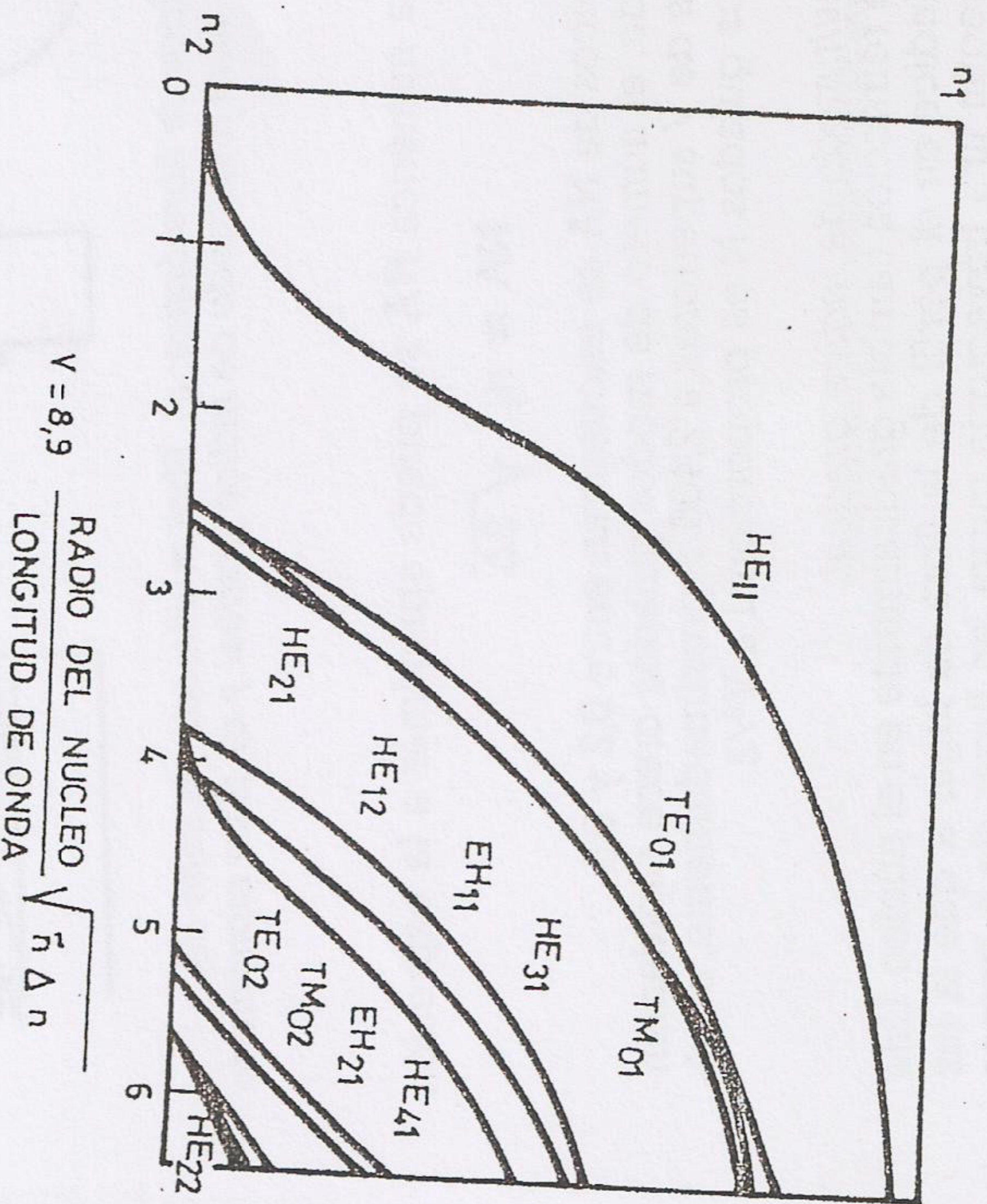


Fig. 2.—Modos posibles en una fibra de salto de índice. Para valores de  $V$  inferiores a 2,405, la fibra admite un solo modo de propagación,  $HE_{11}$ . A medida que  $V$  aumenta, el número de modos guiados se incrementa.

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*. El concepto de apertura numérica es ampliamente utilizado para describir

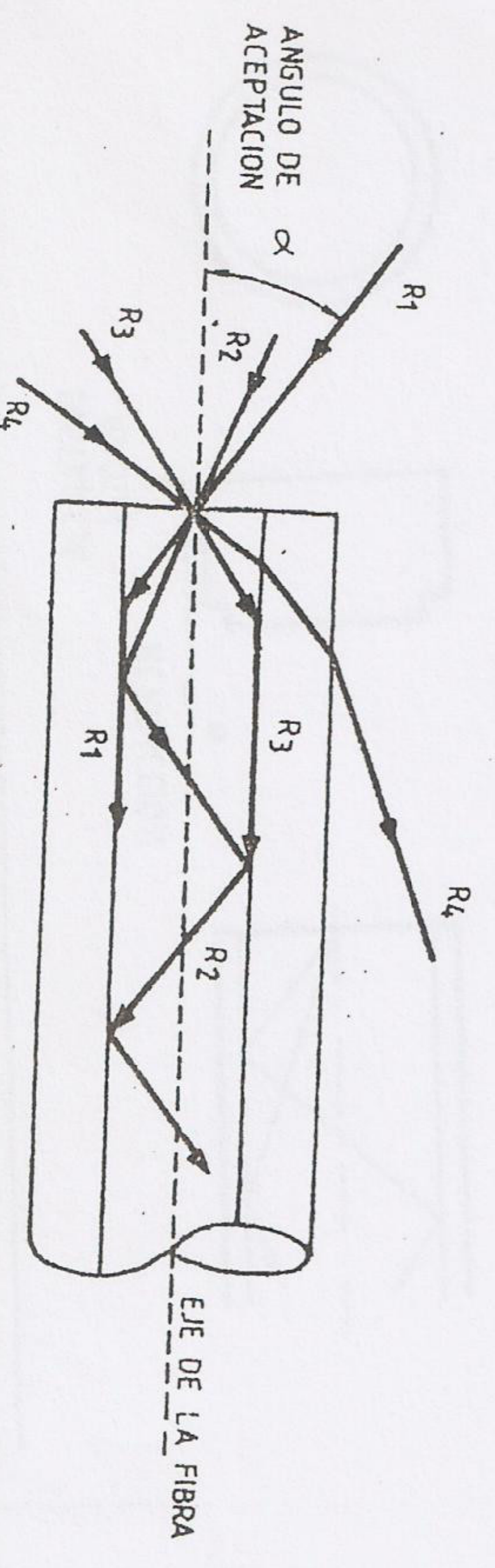


Fig. 3.—Sección lateral de una fibra óptica. Todos los rayos incidentes entre  $R_1$  y  $R_3$  (dentro del ángulo máximo de aceptación) se propagarán por la fibra.

la potencia colectora de luz de la fibra y para calcular la eficiencia de acoplamiento fuente/fibra, y está definido como

$$NA = \text{sen } \alpha_{\text{máx}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

en donde  $\alpha_{\text{máx}}$ , representa el máximo ángulo de aceptación. Como se puede apreciar de la expresión anterior, la apertura numérica es función de los índices de refracción de los materiales de la fibra.

### Clasificación de las fibras ópticas

Atendiendo a las propiedades modales de las fibras ópticas, se las puede agrupar en dos categorías: *monomodo* y *multimodo*. En una fibra monomodo, la luz puede tomar un único camino a través del núcleo, que mide alrededor de 10 micras de diámetro (1 micra =  $10^{-6}$  m.). Las fibras multimodo tienen núcleos entre 50 y 200 micras de diámetro. 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 dos los tipos: *salto de índice* e *índice gradual*. En las fibras de salto de índice, el índice de refracción es uniforme a lo largo del diámetro del núcleo. 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.

Tres son los tipos básicos de fibras ópticas, y que se engloban dentro de las 2 clasificaciones generales mencionadas anteriormente: a) Fibras multimodo de salto de índice; b) Fibras multimodo de índice gradual y c) Fibras monomodo de salto de índice.

a) *Fibra multimodo de salto de índice*

En este tipo de fibras, los rayos de luz son guiados por reflexión total en la frontera núcleo-revestimiento. El índice de refracción presenta un perfil definido, por ejemplo, por la expresión siguiente:

$$n_c = n_1 (1 + \Delta)$$

siendo  $\Delta$  el índice de refracción relativo.



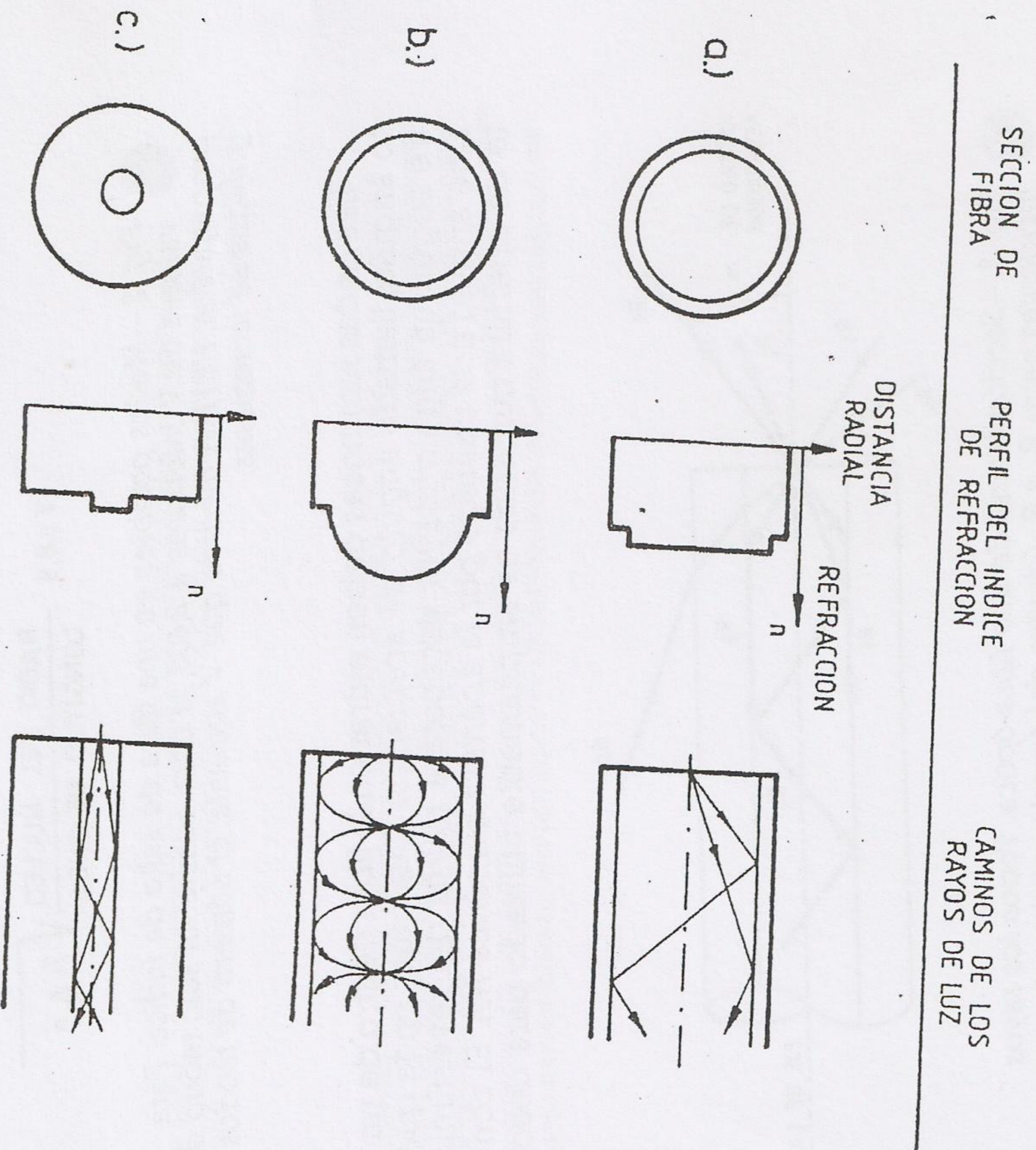


Fig. 4.—Tipos de fibra óptica: a) fibra multimodo de salto de índice, b) fibra multimodo de índice gradual y c) fibra monomodo.

La apertura numérica NA se puede aproximar a la expresión

$$NA \approx n_c \sqrt{2\Delta}$$

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

Por otro lado, el número de modos guiados crece rápidamente para valores de V superiores a 2,405. Aproximadamente, el número de modos guiados N es proporcional a  $V^2/2$ .

b) *Fibra multimodo de índice gradual*

El índice de refracción cambia gradualmente en el núcleo. Esta variación del índice 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. Mientras más alto es

el índice de refracción; más baja es la velocidad de propagación, según se desprende de la expresión siguiente

$$v = \frac{c}{n}$$

donde  $v$  es la velocidad del haz luminoso y  $c$  representa a la velocidad de la luz en el vacío.

Teniendo en cuenta esta relación es posible hacer iguales los tiempos de propagación a través de cada trayecto de luz, controlando el índice de refracción.

De lo anterior se desprende que la fibra de índice gradual actúa como un medio óptico que continuamente enfoca el haz de luz que viaja a lo largo de la fibra.

Un perfil de índice de tipo parabólico vendría expresado por

$$n_c = n [1 - \Delta (r/a)^\alpha] \quad "0 \leq r \leq a$$

donde  $\alpha$  toma un valor próximo a 2 para el máximo ancho de banda de la fibra.

La apertura numérica NA de las fibras de índice gradual es una función que depende de la posición a lo largo del núcleo y no es una constante como el caso de una fibra de salto de índice. Paralelo a la óptica geométrica se deduce que la luz incidente sobre el núcleo de la fibra en una posición  $r$  se propagará como un modo guiado, sólo si se encuentra dentro de la apertura numérica NA( $r$ ), que se define como

$$NA(r) = NA(0) \cdot \sqrt{1 - (r/a)^\alpha} \quad " r \leq a$$

donde  $a$  es el núcleo del radio,  $\alpha$  es el coeficiente del índice gradual y  $NA(0) = n_c \cdot \sqrt{2\Delta}$ . La apertura numérica decrece a medida que uno se aleja del eje de la fibra.

El número de modos en una fibra de índice gradual viene determinado por la expresión

$$N = (k \cdot a \cdot n_c)^2 \cdot \frac{\Delta \alpha}{2 + \alpha}$$

Una fibra de salto de índice, con unos  $\Delta$  y radio determinados, tendrá el doble de modos que una fibra de índice gradual ( $\alpha = 2$ ), con el mismo valor de pico de  $\Delta$  e igual radio.

c) *Fibras monomodo de salto de índice*

Estas fibras, en su construcción más simple, son iguales a las multimodo de salto de índice, sólo que el diámetro del núcleo es mucho más pequeño, pudiéndose propagar un sólo modo.



La propagación monomodo se consigue diseñando fibras con núcleos cuyos tamaños sean equivalentes a pocas longitudes de onda, y con pequeñas diferencias entre los índices de refracción, de tal manera que se mantenga el valor de  $V$  por debajo de 2,405.

### Propiedades de las fibras ópticas

Además de las propiedades modales ya mencionadas, existen otras que caracterizan a las fibras ópticas. Ahora nos referimos a aspectos relacionados con la atenuación y la capacidad de transmisión de información, íntimamente ligada con las propiedades dispersivas y el ancho de banda de la fibra.

#### a) Atenuación

La primera característica de interés es la atenuación, particularmente en fibras de bajas pérdidas. La atenuación es debida, en

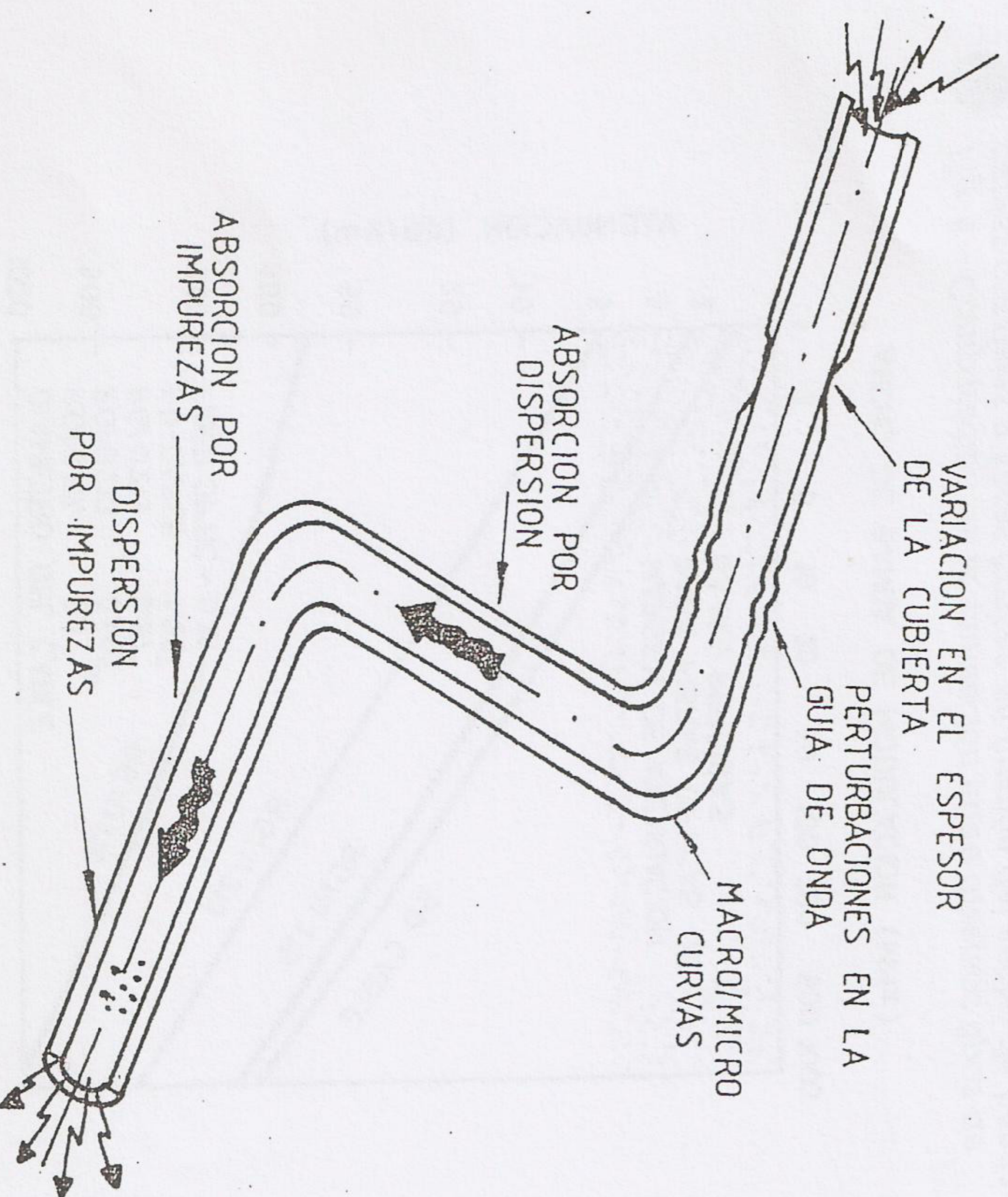


Fig. 5.—Fuentes de atenuación en una fibra óptica.

parte, a la absorción intrínseca a los átomos que constituyen la fibra, absorción por defectos atómicos en los centros de color y por la absorción de impurezas extrínsecas. El otro factor que contribuye a la atenuación es la *difusión o dispersión (scattering)* debida a las inhomogeneidades en el índice de refracción y en la forma de la fibra.

Las bandas de absorción intrínseca limitan las ventanas transparentes del material y establecen la región espectral de trabajo.

Trabajando dentro de la región intrínseca, los centros de color y las impurezas deben eliminarse tanto como sea posible, con el fin de minimizar las pérdidas. La absorción por impurezas crece, principalmente, debido a iones metálicos como hierro, cromo, cobalto y cobre, y por iones  $\text{OH}^-$  resultantes de las impurezas de agua. Si se quiere que la contribución a la atenuación producida por estas causas sea pequeña, el nivel de impurezas no debe ser superior a unas cuantas decenas por cada mil millones.

La atenuación debida al scattering se atribuye, principalmente, a la *dispersión de Rayleigh*. Un rayo de luz se dispersa parcialmente en muchas direcciones y se pierde energía luminosa. La atenuación causada por este efecto decrece cuanto mayor es la longitud, siendo proporcional a  $(1/\lambda^4)$ . Su magnitud varía de un tipo de vidrio a otro, haciendo que en unos casos las pérdidas sean menores que en otros. Entre los 400 nm. y 1.100 nm., la atenuación en la fibra se debe principalmente a la dispersión de Rayleigh. De acuerdo con esto, la dispersión de Rayleigh favorece la utilización de longitudes de onda lo mayores posibles.

Una fuente adicional de pérdidas en las fibras es la resultante de las *microcurvas o micropliegues* causados por el cableado de la fibra o por el arrollamiento de fibras alrededor de tambores. Este tipo de pérdidas son producidas por el acoplamiento entre los modos guiados y por la radiación de los modos.

Lo anteriormente expuesto indica que las pérdidas en las fibras no son necesariamente estáticas en su naturaleza (intrínsecas), sino que pueden ser afectadas por factores externos a las fibras. Una segunda causa externa de pérdidas puede atribuirse a la radiación existente en el entorno en que se encuentra la fibra. Se estima que las guías de ondas ópticas pueden ser vulnerables a la *radiación nuclear*. En general, fibras dopadas con silicio y de alta pureza tienden a ser más resistentes a la radiación que los compuestos de vidrios silicatados.

Una característica importante en la atenuación de las fibras es su no dependencia con la frecuencia en el rango de las frecuencias de las frecuencias de información de interés. Así, en transmisión de UHF y VHF, la atenuación en las fibras ópticas no depende del ancho de banda de modulación, al contrario de lo que ocurre en las guías de ondas coaxiales convencionales. Esta indepen-



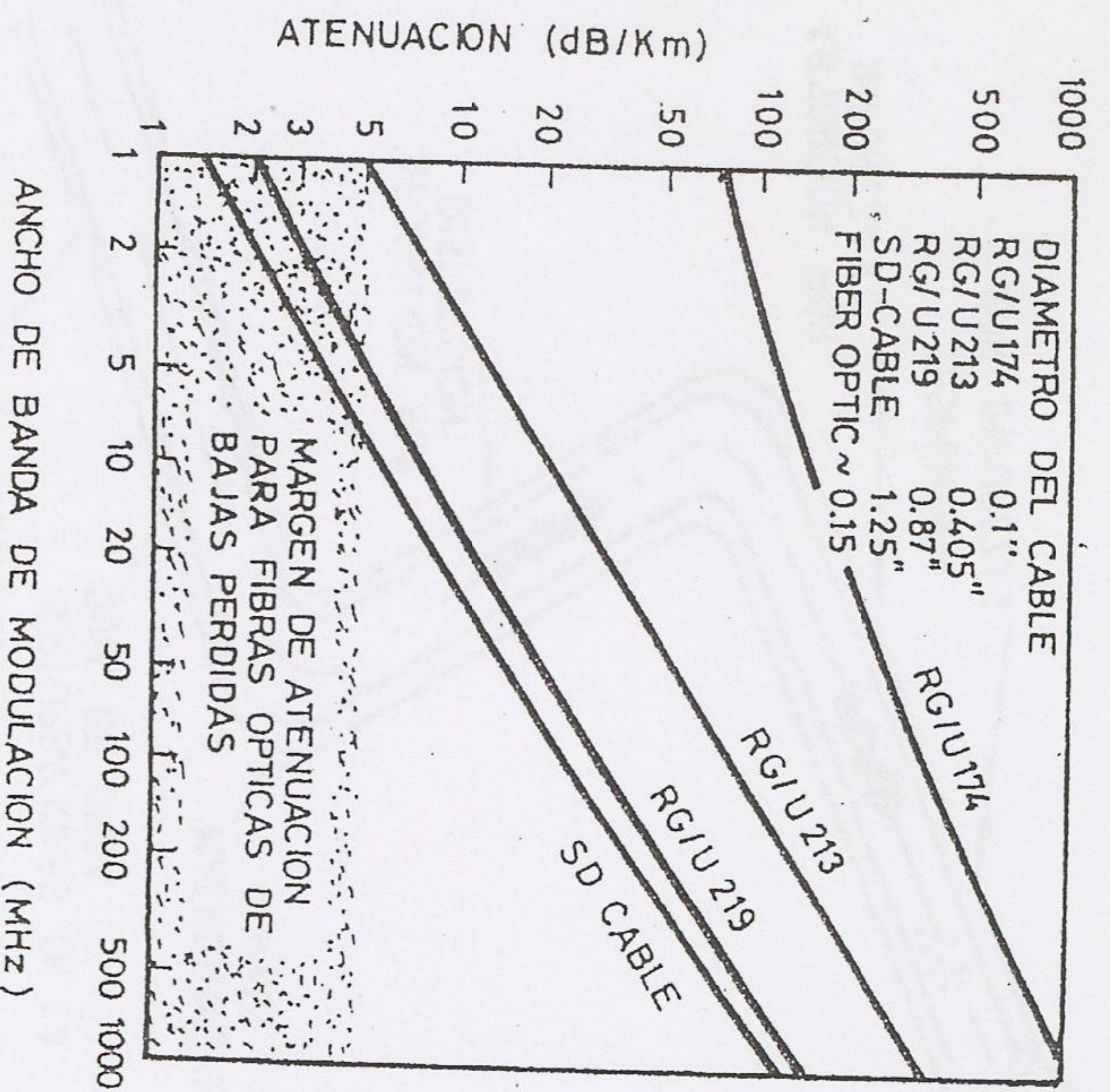


Fig. 6.—Comparación de la atenuación entre diversos tipos de cables coaxiales y fibras ópticas, en función del ancho de banda de la señal. En los primeros se aprecia la fuerte dependencia, mientras que en las fibras ópticas es prácticamente independiente en este rango de frecuencias.

dencia se extiende hasta la región de las microondas y es debida al hecho de que la frecuencia portadora es varias órdenes de magnitud superior a las frecuencias de modulación.

b) *Capacidad de información y ancho de banda de las fibras*

La capacidad de información de las fibras ópticas está limitada por la distorsión de la señal, que se manifiesta como ensanchamiento del pulso transmitido. Este ensanchamiento es un resultado de las características dispersivas del material de una fibra, de la estructura de las imperfecciones mecánicas dentro de la fibra, y de las discontinuidades inducidas de fatiga que pueden surgir en el proceso de cableado. Ambos efectos, mecánico y de fatiga, incrementan la mezcla modal y las pérdidas por radiación que pueden causar una dispersión, que no depende linealmente de la longitud y es sensible a las condiciones de partida.

Un pulso de luz, a medida que viaja por la fibra, se va ensanchando. Este fenómeno se denomina dispersión del pulso y limita la cantidad de información que se puede transmitir. Hay tres causas principales de dispersión en una fibra: efectos en la guía de onda, dispersión en el material y dispersión modal. Todos los efectos de la dispersión pueden ser caracterizados en el dominio del tiempo ( $ns/km = 10^{-9} s/km$ ), o en el dominio de la frecuencia ( $MHz \times km$ ).

b.1 *Dispersión en la guía de onda*

Esta causa de dispersión en una fibra óptica surge del hecho de que el número de modos  $V$  depende de la longitud de onda. La dispersión en la guía de onda para modos guiados en una fibra multimodo es sensiblemente pequeña para todos los modos alejados del corte (la longitud de onda de corte es aquella a partir

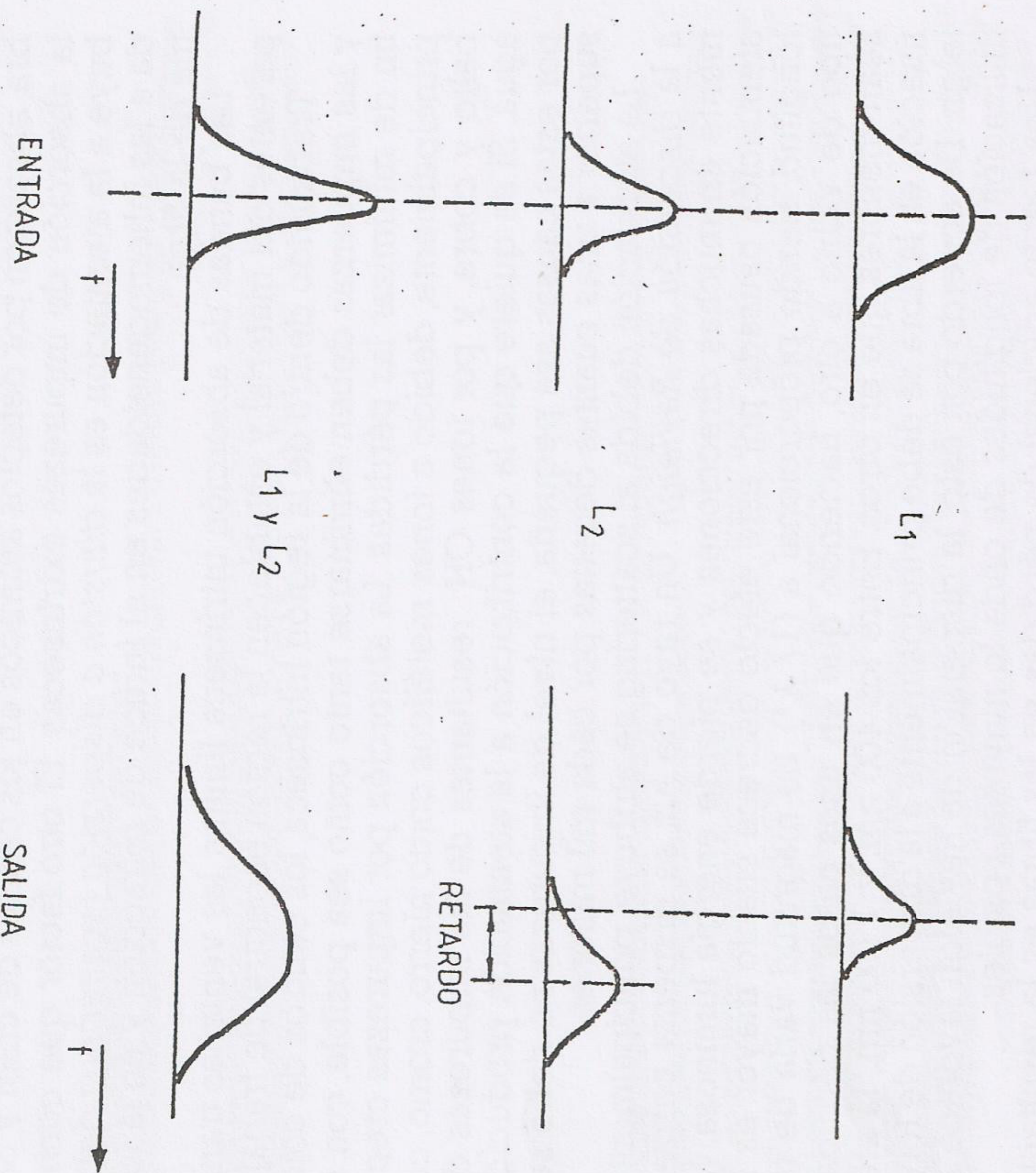


Fig. 7.—Cada componente de una fuente de luz viajará a diferente velocidad, por lo que se producirá un retardo entre unas longitudes de onda y otras, provocando la dispersión en el material.



de la cual se transmite más de un modo). Ya que los modos próximos al corte, generalmente, transportan una fracción pequeña de la potencia total y suelen sufrir pérdidas más elevadas, la contribución a la dispersión por esta causa puede ser omitida.

### b.2 Dispersión en el material

La dispersión en el material, denominada también *dispersión intramodal*, es particularmente significativa en las fibras monomodo. Este tipo de dispersión se debe al conjunto de longitudes de onda contenido en un pulso. Puesto que el índice de refracción varía con la longitud de onda, la velocidad de grupo  $v_g$  de un modo será función de la longitud de onda. Ya que las fuentes de luz tienen diferentes componentes en su espectro, cada una tardará distinto tiempo en la transmisión, debido a las diferentes velocidades a las que viajan, lo que producirá un ensanchamiento del pulso emitido.

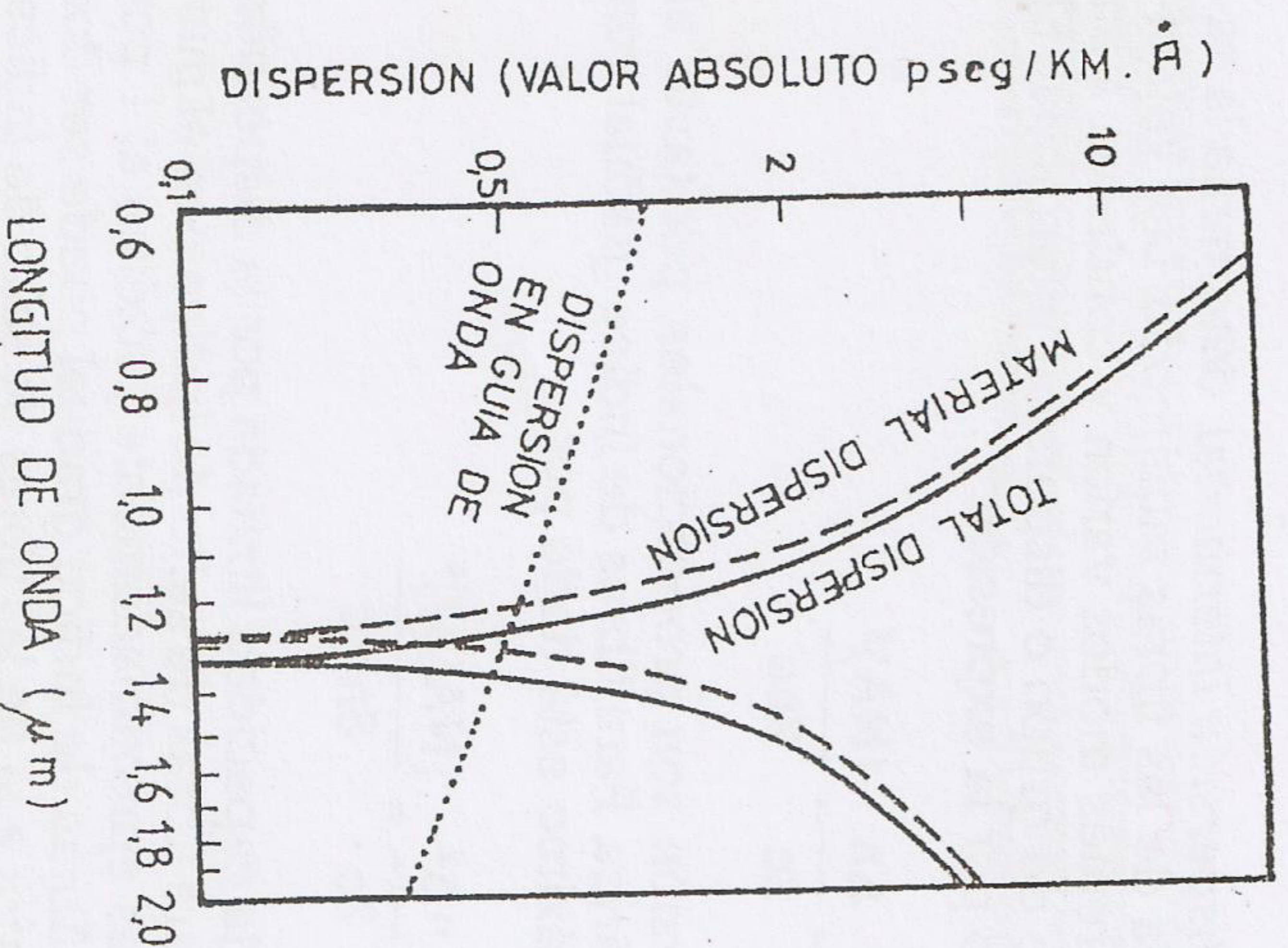


Fig. 8.—Dispersión en la guía de onda y en el material para una fibra monomodo ( $V = 2,4$ ) de núcleo de silicio. A 1.320 nm. la dispersión es significativamente pequeña.

El ensanchamiento del pulso sobre una fibra de longitud  $L$  puede aproximarse por la expresión siguiente:

$$\tau = \frac{1}{v_g} = \frac{1}{c} \cdot \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \cdot \lambda^2 \cdot \frac{d^2 n}{d \lambda^2}$$

donde  $\Delta \lambda / \lambda$  representa el ancho espectral relativo de la fuente de luz, y el término  $\lambda^2 \cdot d^2 n / d \lambda^2$  caracteriza a la dispersión en el material.

A título de ejemplo, para láseres de inyección monomodo el valor de  $\Delta \lambda / \lambda$  es menor que 10<sup>-3</sup> ns/km, lo que indica que señales en banda base dentro de la región de las microondas pueden transmitirse sobre fibras monomodo a longitudes determinadas por la atenuación y no por la dispersión.

La dispersión en el material es el principal factor inhibidor del uso de velocidades dentro del margen de 1 y 2 Gb/s. Para lograr estas altas velocidades se requiere un láser que emita con un ancho de banda estrecho.

### b.3 Dispersión modal

La dispersión modal, o *dispersión intermodal*, determina la capacidad de ancho de banda de las fibras multimodo. Las velocidades de grupo de los diferentes modos varían y conducen a un ensanchamiento del retardo de grupo o dispersión intermodal. El máximo retardo viene dado por la expresión:

$$\frac{\tau}{L} = \frac{\Delta n}{2c} = \frac{(NA)^2}{2nc}$$

Los límites de la dispersión son proporcionales, por tanto, al cuadro de la apertura numérica. Para fibras de índice gradual con perfil parabólico, el valor máximo está dado por

$$\frac{\tau}{L} = \frac{n \Delta^2}{2c} = \frac{[NA(0)]^4}{8n^3 \cdot c}$$

Para este tipo de fibras, la capacidad limitada por la dispersión es  $2/\Delta$  veces mayor que para fibras de salto de índice con el mismo valor de  $\Delta$ . Ya que  $\Delta$  es aproximadamente próximo al 1 por ciento, la capacidad de las fibras de índice gradual puede ser dos órdenes de magnitud superior a la de las fibras de salto de índice. Las capacidades expresadas para fibras multimodo representan el peor de los casos estimados. La pérdida modal diferencial y el acoplamiento modal son causas que hacen improbable el



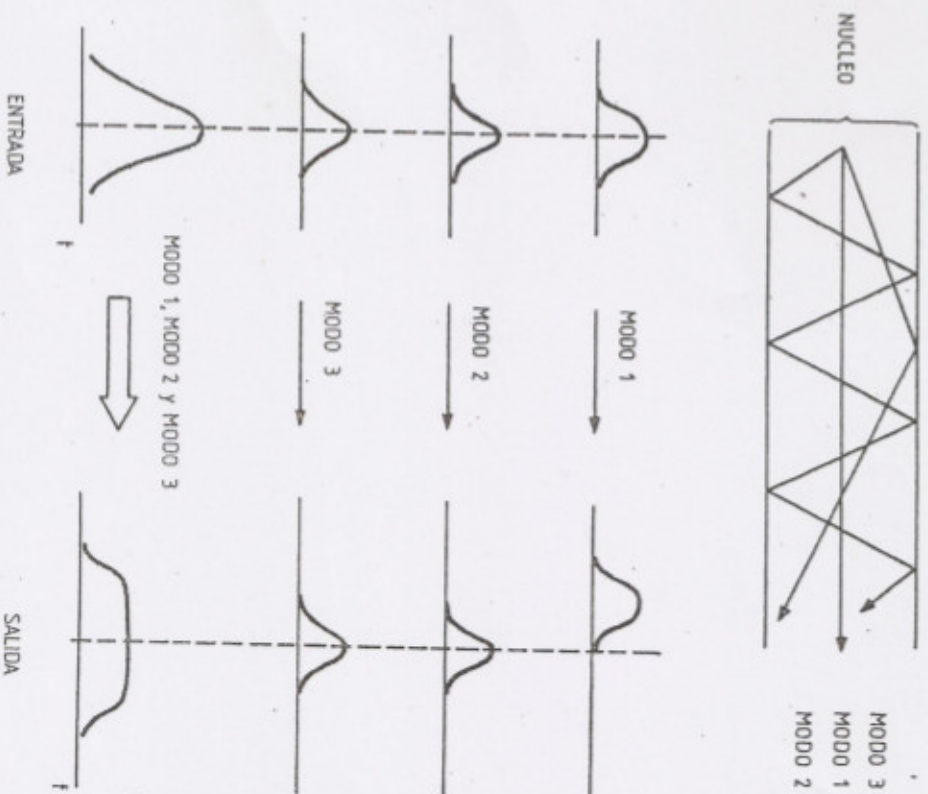


Fig. 9.—Distorsión intramodal para una señal óptica que se transmite por tres modos.

cumplimiento de las expresiones mencionadas. Los modos de orden superior sufren una atenuación diferencial mayor debido a la mayor radiación del acoplamiento de modos. Esto reduce la apertura numérica efectiva, disminuyendo la dispersión modal. La mezcla de modos es un efecto debido a las imperfecciones estructurales, inhomogeneidades del índice de refracción, fluctuaciones en el diámetro y extrañas birefringencia, y todo ello conduce a una

ecualización de la velocidad modal. El acoplamiento modal reduce el ensanchamiento de las velocidades en la medida en que los modos acoplados tienden a poseer una velocidad promedio común de propagación. En las fibras de índice gradual, las velocidades modales están casi ecualizadas. La mezcla modal y las pérdidas diferenciales tienen un pequeño efecto sobre la expresión que representa a la dispersión.

#### c) Material de las fibras

La elección de los materiales para las fibras es un factor importante en el aspecto de la atenuación.

Los principales materiales utilizados son la sílice de alta pureza, el vidrio compuesto y los compuestos moleculares de orden elevado. Entre estos materiales, la sílice se beneficia de técnicas de refinamiento más avanzadas. Por tanto, la sílice de alto grado se considera generalmente el material más adecuado para fibras ópticas en telecomunicaciones. A esta base de sílice se añaden boro, germanio, fósforo y aluminio, en el núcleo y en el revestimiento, para controlar el perfil de índice de refracción.

#### Proceso de fabricación

La deposición de vapor químico (CVD) fue uno de los primeros métodos para producir fibras de bajas pérdidas. Un segundo método, fibras es aquél que implica la utilización de un doble crisol. El método CVD se utilizó por Corning Glass para demostrar bajas pérdidas de propagación en las fibras cuando, en 1970, se realizó la primera fibra con 20 dB/km. Una versión modificada del CVD (MCVD) se utiliza actualmente en la que la deposición de vapor químico se realiza en el interior de un tubo de silicio de alta calidad.

a) Proceso de deposición de vapor químico modificado (MCVD). La fabricación de fibras ópticas consta esencialmente de dos etapas: la fabricación de la preforma y el estirado y recubrimiento de la fibra.

El proceso comienza con un tubo de sílice de unos 2 metros de largo y 4 cm de diámetro. El tubo se hace rotar y se calienta, mientras se hace pasar por él una mezcla de gases de alta pureza. Cerca de la zona caliente tiene lugar una reacción química y se deposita material muy puro. Desplazando dicha zona a lo largo del tubo, queda adherida una capa uniforme a su superficie interior. Mediante sucesivos pasos se consiguen capas con el espesor y composición requeridos.