

Figura 2.3. *Angulo límite de entrada.*

El mismo fenómeno se repite en la siguiente reflexión si el índice de refracción en todo el núcleo de la fibra es el mismo. De este modo, el rayo llegará al final de la fibra con el mismo ángulo con que incidió en ella.

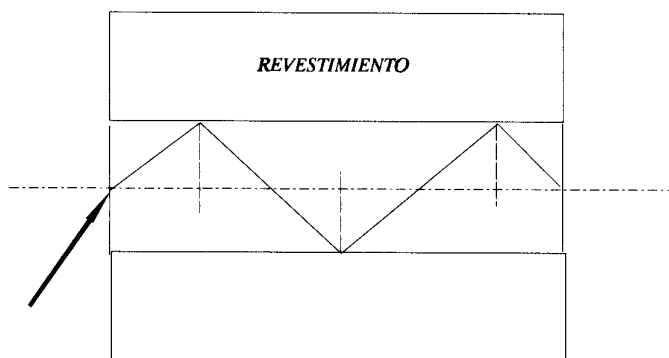


Figura 2.4. *Condiciones de reflexión total en el interior de la fibra.*

La reflexión total ha permitido, por tanto, que el rayo quede confinado en el núcleo (Fig. 2.4).

2.3. PARAMETROS CARACTERISTICOS DE LAS FIBRAS OPTICAS

La tabla 2-1 reúne los diversos parámetros que caracterizan a las fibras ópticas.

Parámetros estáticos: son constantes a lo largo de la fibra, dentro de las tolerancias propias de fabricación, y se refieren a las características ópticas y geométricas de la misma.

	Ópticos	Apertura mecánica Perfil del índice de refracción
Parámetros estáticos	Geométricos	Diámetro del núcleo Diámetro del revestimiento Excentricidad No circularidad del núcleo No circularidad del revestimiento
	Atenuación	Intrínseca a la fibra Por causas extrínsecas
Parámetros dinámicos	Dispersión temporal	Dispersión modal Dispersión del material Dispersión por efecto guíaondas

Entre las características ópticas figuran:

- **El perfil del índice de refracción**, que define la ley de variación del mismo en sentido radial, y siendo la velocidad de la luz en cada punto función de dicho índice, dará lugar a diversas velocidades en diferentes puntos.

- **La apertura numérica**, determinante de la cantidad de luz que puede aceptar una fibra y, en consecuencia, de la energía que puede transportar, no necesariamente ligada a la calidad de la información correspondiente.

* **Los parámetros geométricos** (diámetros y excentricidades) son función de la tecnología usada en la fabricación de las fibras, y las tolerancias correspondientes serán una consecuencia de la misma.

Los **parámetros dinámicos** son características de la fibra que afectan a la progresión de la señal a lo largo de la misma. Estos son:

- **La atenuación**, de la que, aun correspondiendo al mismo concepto que en los conductores metálicos, no cabe hablar del mismo modo que en ellos, por cuanto 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 provocan esta atenuación pueden tener su origen en causas intrínsecas a la propia fibra -por lo que se refiere a su constitución física- o en factores externos a la misma, tales como los procesos de fabricación, el envejecimiento, el tendido, etc.

- **La dispersión temporal**, causada por las características dispersivas de la fibra sobre la señal en el transcurso del tiempo, lo que provoca ensanchamiento en el tiempo de los impulsos a medida que progresan en su recorrido y, en consecuencia, deformación de los mismos, acarreado errores que, en definitiva, son los que limitan la velocidad de información o régimen que puede transportar la fibra.

2.4. APERTURA NUMERICA (AN)

La energía luminosa que procede del exterior penetra en el núcleo por cada uno de los puntos de una sección perpendicular a su eje. Es fácil ver que la energía que se propaga por sucesivas reflexiones en el interfaz núcleo-revestimiento va a ser la contenida en un ángulo sólido (α_{OL}); esto es, un cono cuya generatriz forme un ángulo (α_{OL}) con el eje de la fibra, pues todos los rayos que incidan con ángulo inferior a éste cumplirán el principio de reflexión total, mientras que los incidentes con ángulo mayor que el límite van a ser refractados. Para los parámetros habituales de fibras, estas pérdidas se cifran entre el 3 y el 4%.

En estas condiciones, se define la apertura numérica o índice de aceptación de luz como:

$$AN = n_o \cdot \text{sen } \alpha_{OL} \quad (2-3)$$

y, por lo visto anteriormente:

$$AN = n_1 \sqrt{2\delta} \quad (2-4)$$

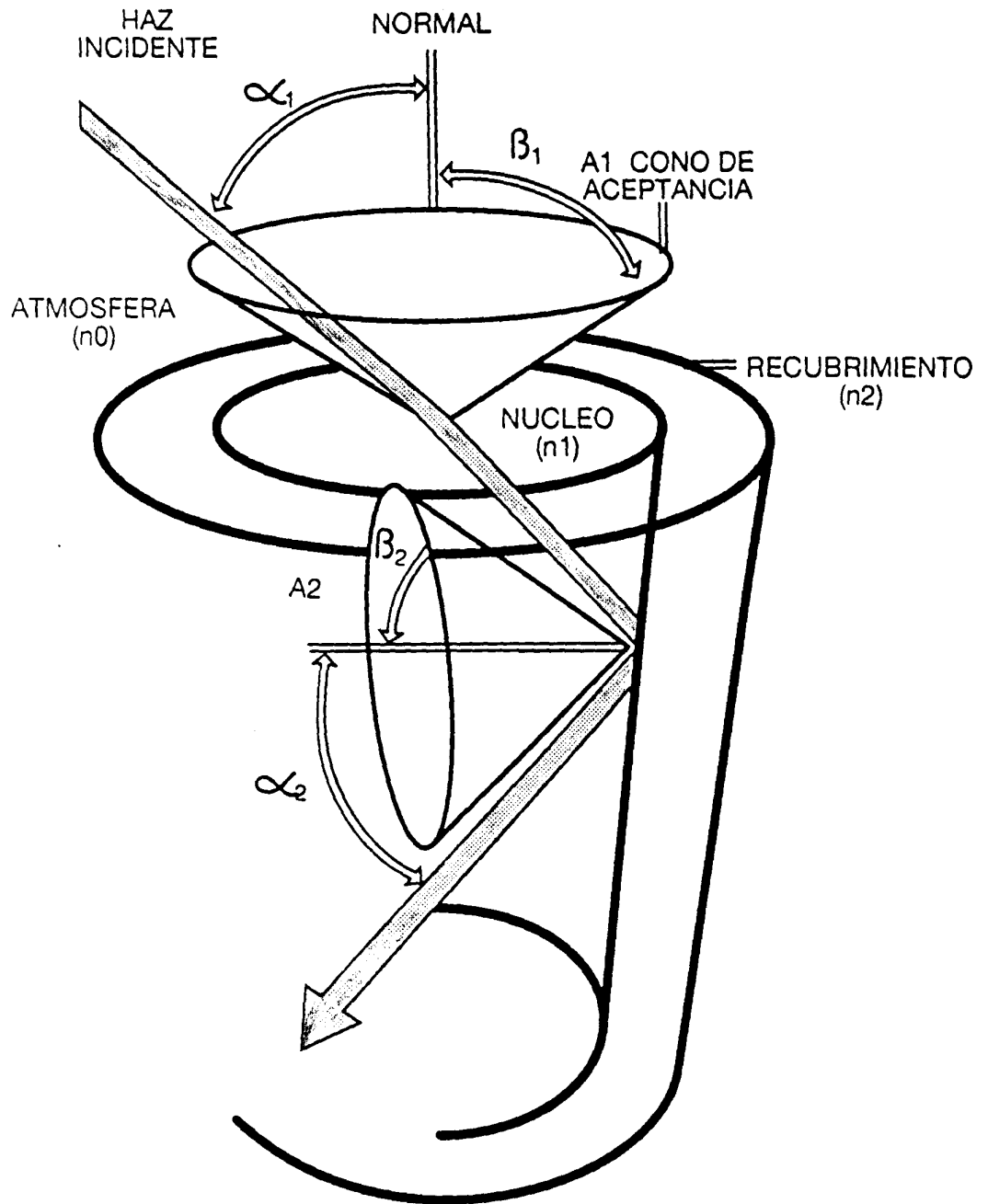
llamando δ a la diferencia relativa de índices de refracción de los dos medios:

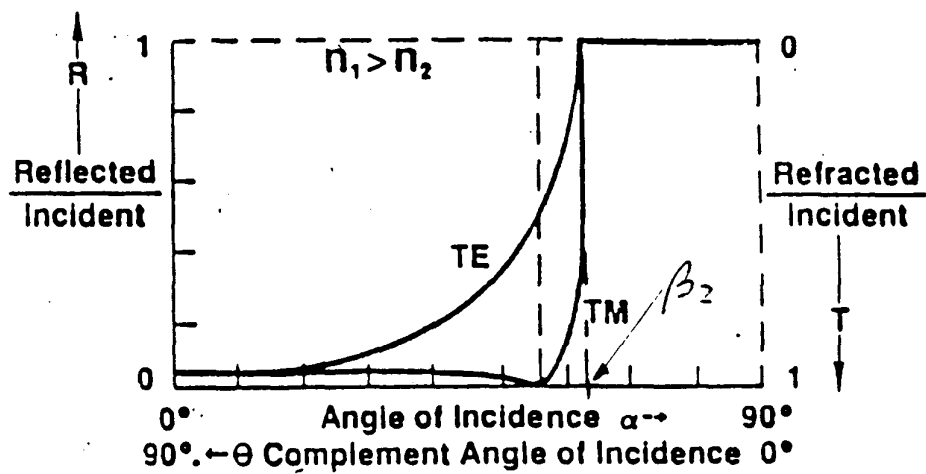
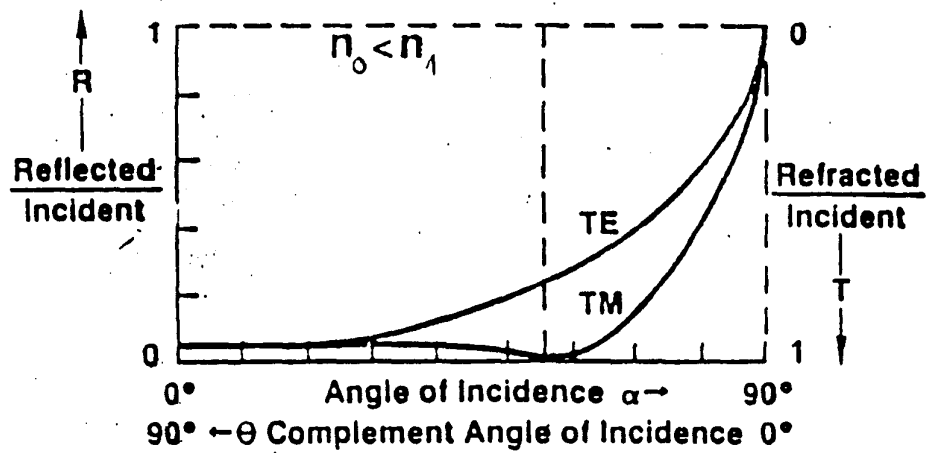
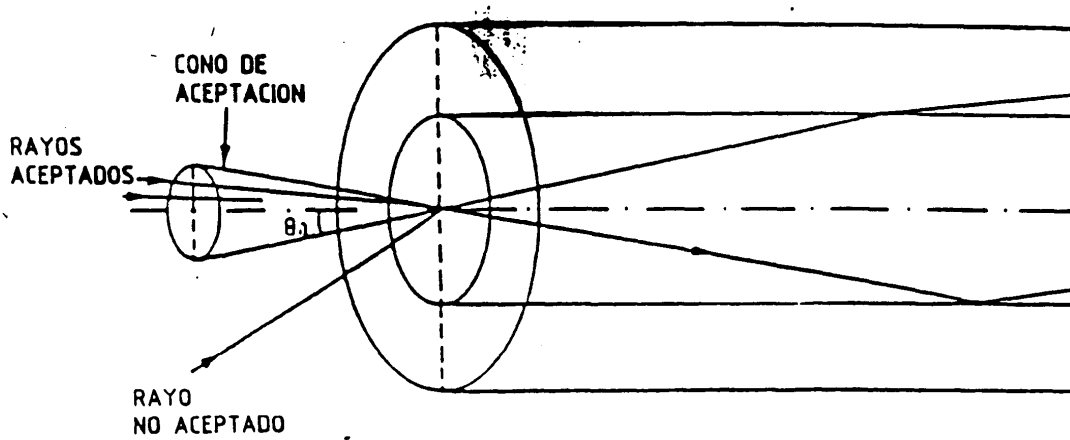
$$\delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Suponemos que n_1 es constante e igual en cualquier sección del núcleo y a lo largo de su radio, circunstancia que, de modo intencionado, no siempre se da. Los valores más usuales de n_1 oscilan en valores muy próximos a 1,45, dependiendo de la composición del núcleo.

Los valores típicos del índice relativo δ para fibras con núcleo de SiO₂ están comprendidos entre 0,001 y 0,01, y los de la apertura numérica oscilan entre 0,06 y 0,3. Dicho de otro modo, para un índice de refracción externo $n_o = 1$ (el vacío o, aproximadamente, el aire) el ángulo α_{OL} oscila entre 4° y 17°. Se ve, por tanto, que la apertura numérica depende exclusivamente de los materiales de que estén hechos núcleo y revestimiento. Cuanto más parecidos sean sus índices de refracción, menor será el valor resultante para AN y menor, por tanto, el ángulo límite de aceptación α_{OL} . A materiales más parecidos, se exigirá, pues, a la fuente que proporcione un haz de luz más estrecho.

CONO DE ACEPTANCIA





CAPITULO 3

PARÁMETROS DE TRANSMISION

3.1. ATENUACION EN LA FIBRA OPTICA

Hasta ahora hemos supuesto que, cualquiera que fuese el tipo de fibra utilizado, se daba un mecanismo de propagación que no incluye pérdidas. En la práctica, sin embargo, existen dos fenómenos que contribuyen a degradar la información, de modo que en la recepción las características de la señal no son idénticas a las transmitidas en origen. Se trata de las pérdidas por atenuación en el interior de la fibra y de la dispersión en el material, si bien en el caso de ésta no se atiende especialmente a las pérdidas, por lo que se estudia separadamente.

Se define la pérdida o atenuación en el interior de una fibra como la relación entre las potencias luminosas a la salida y a la entrada, expresada en decibelios y calculada para determinada longitud de onda λ .

$$P(\lambda)(dB) = 10 \log \frac{P_T}{P_R}$$

El coeficiente de atenuación $\alpha(\lambda)$ se define como la atenuación por unidad de longitud, generalmente el Km, a esa longitud de onda:

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{L} 10 \log \frac{P_T}{P_R}$$

Son varios los mecanismos de degradación que contribuyen a esta pérdida de energía, siendo unos de carácter intrínseco a la fibra, tal como la composición de vidrio, y otros de origen externo, causados por impurezas, defectos de cableado, de geometría de la fibra, etc. La atenuación adicional que proporcionan estos últimos es muy variable y puede minimizarse en muchos casos con un estudio adecuado de las condiciones de fabricación, mientras que los primeros vienen obligados por los fenómenos físicos que ocurren en el interior de la fibra y dependerán del material de dopado del núcleo y de la longitud de onda de trabajo.

En cualquier caso, hay que resaltar como características generales de la transmisión por fibra:

a) La atenuación de la señal en un medio convencional, como los cables de cobre, depende del rango de frecuencia de la señal portadora de la información a transmitir, de modo que aumenta con ésta, y de modo más que proporcional.

Sin embargo, la atenuación en la F.O. no depende del ancho de banda de modulación, debido a que la frecuencia portadora es superior en varios órdenes de magnitud a la frecuencia de modulación, lo que no ocurre en las guías de onda convencionales.

b) La potencia total transmitida se distribuye entre los diversos modos que se propagan en el caso de las fibras multimodo. Cuando la propagación es monomodal, la potencia transmitida se distribuye también aleatoriamente entre las diversas rayas espectrales' del modo transmitido.

3.1.1. Pérdidas intrínsecas

Absorción debida a rayos ultravioletas e infrarrojos

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 sílice que van encontrando los fotones en su camino, produciendo vibraciones en las mismas.

La absorción debida a la componente de radiación ultravioleta 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 infrarrojos se origina por las vibraciones entre átomos de silicio y oxígeno, creciendo exponencialmente con la longitud de onda, pero no es apreciable hasta los 1400 nm.

Scattering Rayleigh

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

$$P = K/\lambda^4$$

Las pérdidas por efecto Rayleigh son las de mayor influencia para las longitudes de onda comprendidas entre 400 y 1100 nm. Evitarlas favorece, por tanto, la utilización de longitudes de onda lo más altas posible.

Tabla 3.1. Pérdidas intrínsecas típicas (dB/Km)

λ (nm)	Absorción	Rayleigh
1.300	0,05	0,25
1.550	0,09	0,15

3.1.2. Pérdidas de origen externo

Absorción debida a impurezas

Los tipos de impurezas más usuales en la sílice de la fibra son las metálicas (hierro, cromo, cobalto y níquel) y los iones hidroxilo (OH). Las impurezas metálicas originan una pérdida de 1 dB/Km si su concentración es de una parte por millón, 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 vapor de agua durante el proceso de fabricación de la fibra- no son fácilmente controlables, y a 2720 nm se produce resonancia de la estructura atómica de los iones con la sílice, transfiriendo los fotones su energía a los iones OH⁻. Este fenómeno produce tres picos adicionales de pérdidas, correspondientes a los tres primeros armónicos de esa frecuencia, en longitudes de onda definidas. A la altura actual de los métodos de fabricación se considera que las impurezas iónicas no deben exceder de 30 partes por cada cien mil millones. La amplitud del pico de absorción OH⁻ no excede nunca de 1 dB/Km, habiéndose conseguido valores de 0,04 dB/Km con el método VAD.

Curvaturas de la fibra

Siempre que la fibra se somete a una curvatura por bobinado, tendido, etc., se origina una atenuación adicional por el hecho de que el interfaz núcleo-revestimiento deja de ser geométricamente uniforme: la luz se refleja en algunos puntos con ángulos diferentes de los inicialmente calculados, por lo que deja de verificarse en ellos el principio de reflexión total y, en consecuencia, se produce una fuga de modos hacia el revestimiento.

No obstante, como esta atenuación adicional varía exponencialmente con el radio de curvatura, estas pérdidas son inapreciables hasta que se sobrepasa una curvatura crítica. Por tanto, más que conocer la variación de las pérdidas con la curvatura interesa, a efectos prácticos,

conocer el radio de curvatura mínimo posible para un cable de fibras, y se establece en unas diez a doce veces el diámetro exterior del cable.

El estudio de las consecuencias de estas curvaturas es muy complejo, particularmente en fibras monomodo, por lo que únicamente haremos la observación de que aumentan mucho cuando δ es menor del 0,2% y que se presentan especialmente al trabajar en 1550 nm.

Pérdidas por microcurvaturas

Cada proceso de fabricación tiene sus propias tolerancias y arrastra los consiguientes errores. Los defectos que provocan las llamadas pérdidas por microcurvaturas son las irregularidades entre el núcleo y el revestimiento, las

fluctuaciones de diámetro (error de elipticidad) y, fundamentalmente, las tortuosidades del eje de la fibra (error de concentricidad).

Las pérdidas consiguientes presentan la particularidad de que afectan a toda la banda de información y varían poco con la longitud de onda, y también que sólo se origina atenuación cuando las irregularidades periódicas están

separadas menos de una longitud L , Esta longitud es directamente proporcional al radio del núcleo, e inversamente a la diferencia relativa de índices, según la expresión $L_0 = 4a/I$, donde se observa nuevamente que una diferencia de índices 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 acopla a modos de radiación que escapan del núcleo, originándose de este modo la atenuación.

Así, en una fibra con radio $a=25 \mu\text{m}$ y $\delta=0,01$ se producen pérdidas de radiación cuando hay irregularidades periódicas a 1 mm o menos. A este tipo de pérdidas se les llama pérdidas **Mie**, para diferenciarlas de las Rayleigh, originadas por defectos intrínsecos a la fibra y de menor tamaño que la longitud de onda.

Estas pérdidas pueden reducirse adoptando las siguientes medidas:

- * Aumentar la diferencia de índices de refracción entre núcleo y revestimiento.
- * Aumentar la sección de la fibra.
- * Embutir la fibra en un plástico blando (de baja constante de Young) y recubrirla posteriormente con un elemento de alta constante de Young, que absorberá los esfuerzos con una baja elongación.

Tomando medidas de este tipo se consiguen reducir en un 30% las pérdidas por este concepto.

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 mayor o menor grado a incrementar las pérdidas y acortar la vida de la fibra. Para resolver estos problemas hay dos soluciones de carácter general:

- * Aplicar sobre un recubrimiento primario una sustancia rígida, tipo nylon, en forma de segundo recubrimiento ceñido.
- * Colocar la fibra, con su primer revestimiento, dentro de un segundo revestimiento holgado, rellenando el espacio intermedio con un medio viscoso, como el petrolato.

Ambas alternativas presentan sus respectivas ventajas: la primera muestra una buena estabilidad en un amplio rango de temperaturas; la segunda presenta un incremento de pérdidas despreciable durante el cableado. En el caso de los cables submarinos, ambas soluciones pueden ser idóneas.

Por último, y en lo referente al envejecimiento de la fibra, cabe resaltar que se produce en determinadas condiciones de tensión permanente o cuando la tensión de tendido excede de determinada fracción de la permanente, así como por la presencia de fisuras superficiales. Todo este asunto se tratará con más detenimiento al estudiar los cables de fibras.

Radiaciones nucleares

Otro factor adicional de pérdidas son las radiaciones nucleares, sobre todo si no se trata de fibras dopadas con silicio sino vidrios silicatados.

3.1.3. Atenuación total

Si se suman todas las pérdidas antes enunciadas, se obtiene una curva como la de la figura 3.1, en la que se observa:

- Una zona por debajo de los 800 nm, que no es conveniente utilizar por ser de alta atenuación.
- Una zona por encima de los 1600 nm que presenta problemas de atenuación por el efecto de los rayos infrarrojos. Además, la tecnología de emisores y fotodetectores para esta longitud de onda es muy reciente.

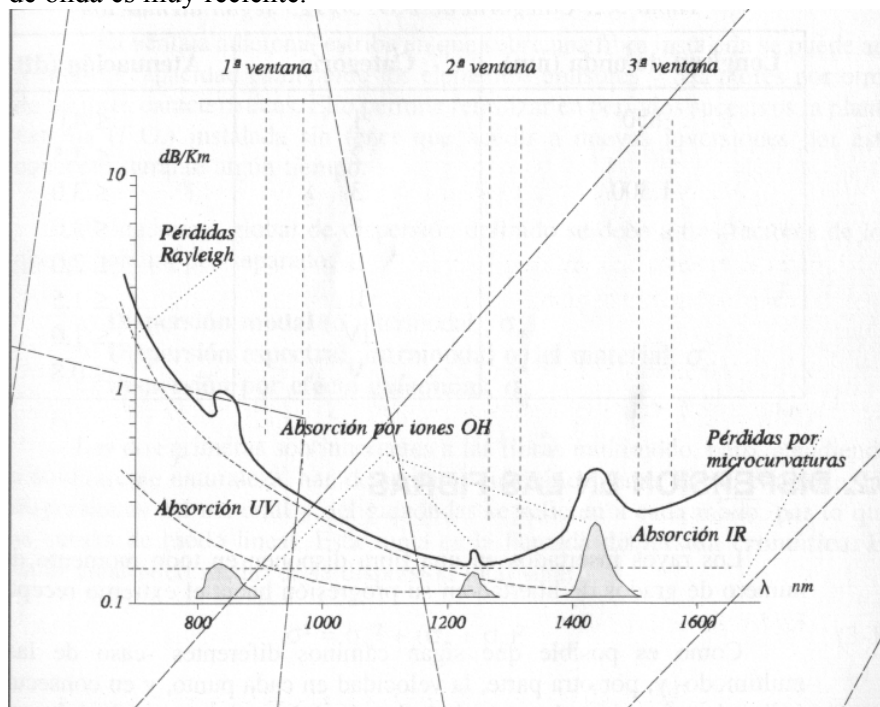


Figura 3.1. Atenuación en una fibra.

- Tres zonas de mínima atenuación, denominadas ventanas, que determinan las longitudes de onda habituales para trabajar. Los primeros sistemas de fibra trabajaron en la primera ventana (850 nm). En este momento la zona de trabajo más habitual es la segunda ventana, en torno a los 1300 nm.

La tendencia actual es la utilización de láseres en la tercera ventana, en torno a los 1550 nm. La ventaja de esa utilización radica en una mayor vida del láser a medida que aumenta su longitud de onda.

