

Unidad 8

Fibras Ópticas

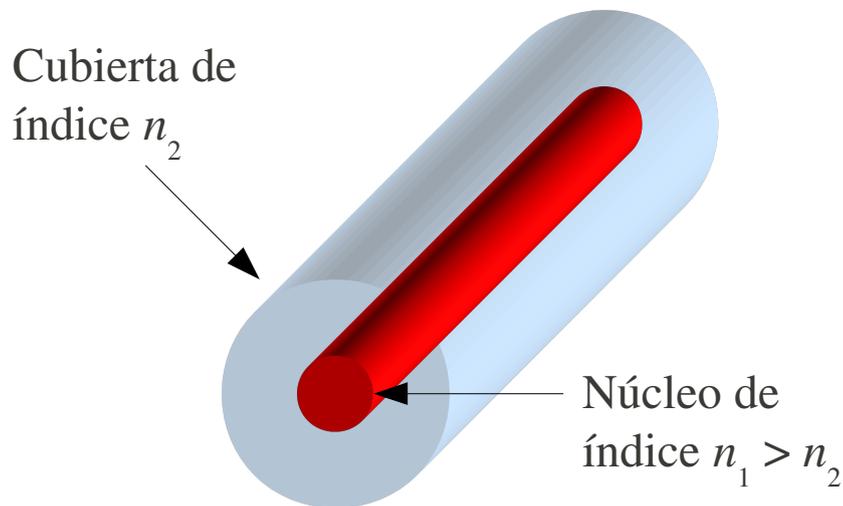
Contenidos

- Introducción: transmisión en fibras ópticas.
- Óptica geométrica: reflexión total interna.
- Cono de admisión y apertura numérica.
- Óptica ondulatoria: modos de propagación.
- Acoplamiento de modos: distancia de equilibrio.
- Dispersión en una fibra óptica.
- Dispersión modal y cromática.
- Reducción de la dispersión: los tres principales tipos de fibras ópticas.

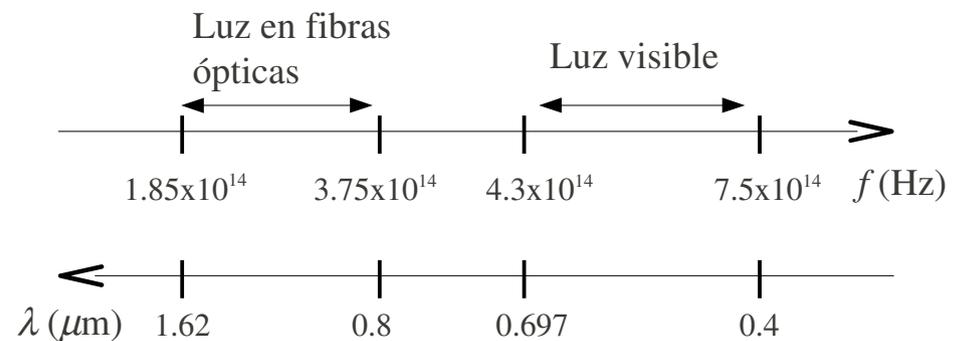
Introducción

- Conforme se incrementa la frecuencia de transmisión (y por ende la capacidad para transmitir) las guías de onda metálicas (huecas o de dos conductores) presentan pérdidas muy elevadas. Para transmitir a frecuencias ópticas se emplean las denominadas **Fibras Ópticas**.

Geometría de una fibra óptica



Frecuencias de Transmisión



- Una fibra óptica es una **Guía de Onda Dieléctrica**. La propagación de señales electromagnéticas se puede analizar empleando desarrollos matemáticos similares a los usados en la unidad 6.

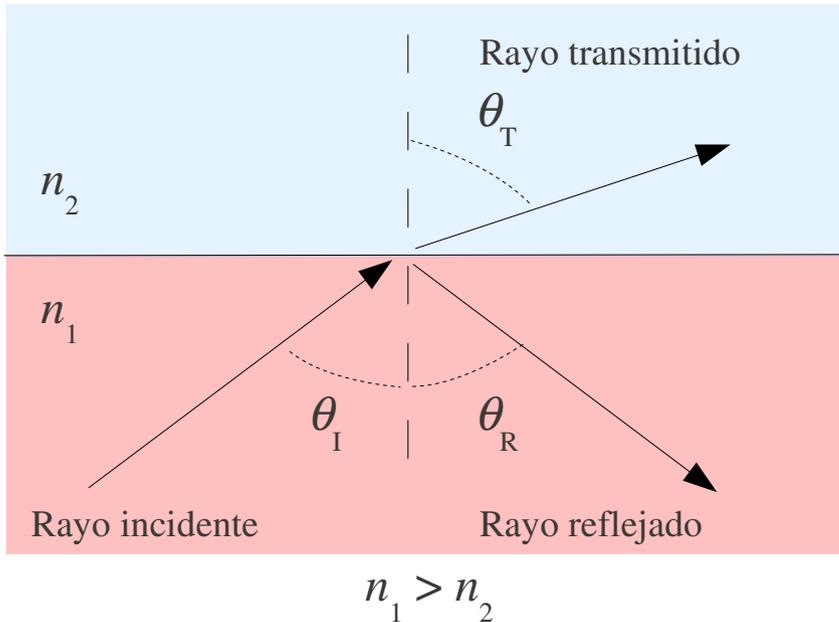
- En lugar de seguir este procedimiento formal realizaremos un estudio aproximado.

- Como el diámetro del núcleo en general está en el rango de 10 a 200 μm , el cual es mayor que la longitud de onda, entonces en un principio emplearemos **Óptica Geométrica**.

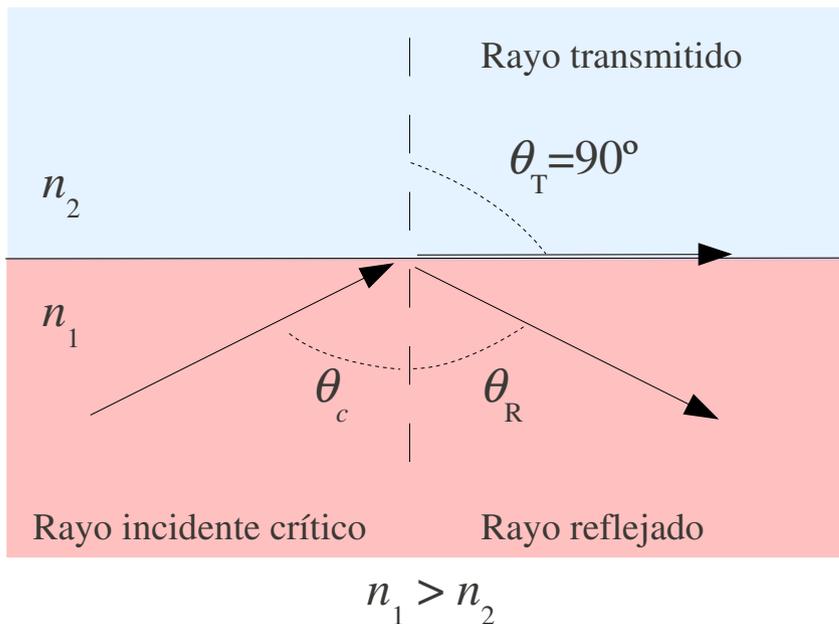
- Posteriormente analizaremos la propagación de ondas electromagnéticas desde el punto de vista de la **Óptica Ondulatoria**.

Óptica geométrica: reflexión total interna

Reflexión y refracción de la luz



Reflexión total interna



Ley de reflexión

$$\theta_I = \theta_R$$

Ley de refracción o ley de Snell

$$n_1 \sin \theta_I = n_2 \sin \theta_T$$

Reflexión total interna

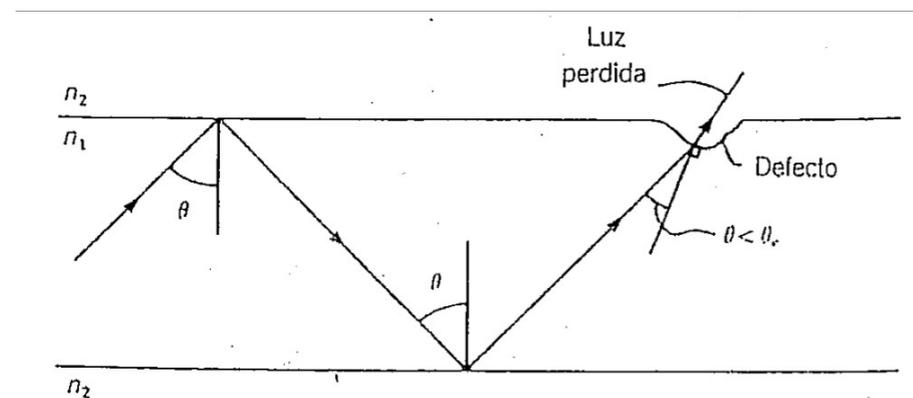
- Para un ángulo de incidencia crítico θ_c el ángulo del rayo transmitido alcanza un valor de 90° .

- De acuerdo a la ley de Snell $\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$

- Por ejemplo para la interfase entre vidrio ($n_1 = 1.5$) y aire ($n_2 = 1$) el ángulo crítico es $\theta_c = 41.8^\circ$.

- Los rayos de luz en una fibra óptica se propagan mediante sucesivas reflexiones totales internas con:

$$\theta_I > \theta_c$$



Cono de admisión y apertura numérica

Un rayo de luz R que se propaga en aire ingresa a la fibra en un punto A. Luego de refractarse experimenta una reflexión total en B, luego C y así sucesivamente.

De acuerdo a la ley de Snell en el punto A

$$n_0 \sin \alpha_0 = n_1 \sin \alpha_1$$

Para tener una reflexión total en B se debe cumplir que

$$\sin \theta_1 \geq \frac{n_2}{n_1}$$

Como $\sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1 = 1$ entonces la ecuación anterior se puede reescribir así

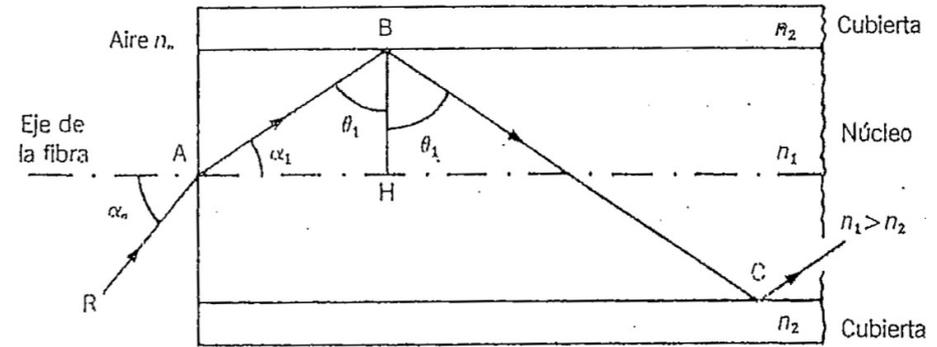
$$\cos \theta_1 \leq \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

Luego como α_1 y θ_1 son complementarios, $\cos \theta_1 = \sin \alpha_1$ y por lo tanto la ley de Snell en A se puede reescribir como

$$n_0 \sin \alpha_0 = n_1 \cos \theta_1$$

Finalmente tenemos que

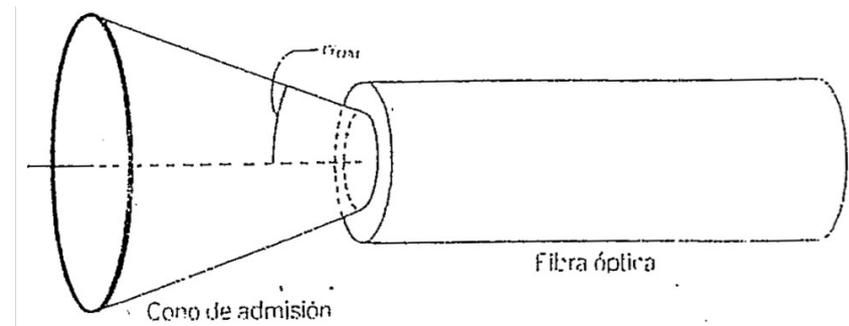
$$\sin \alpha_0 \leq \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$



Deducimos de esta forma que para propagarse, un rayo debe ingresar a la fibra con un ángulo menor a

$$\alpha_{0M} = \arcsin \left(\frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)$$

el cual define un **Cono de Admisión**.



Un parámetro característico de una fibra óptica es su **Apertura Numérica AN**, la cual se define como:

$$AN = n_0 \sin \alpha_{0M} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Óptica ondulatoria: modos de propagación

La **Óptica Geométrica** nos permite entender cómo un rayo de luz puede transmitirse mediante una fibra óptica. No obstante, es necesario considerar la **Óptica Ondulatoria** para comprender por qué sólo un número limitado de **Modos** (cada uno asociado a una dirección particular) podrán propagarse en este medio confinado.

Por simplicidad consideremos un guía de ondas de placas paralelas. Los campos eléctricos en los puntos A y D estarán dados por

$$E_A = E_0 \sin(\omega t) \quad E_D = E_0 \sin(\omega t + \phi)$$

donde la diferencia de fase es $\phi = 2\phi_1 + \phi_2$.

Aquí ϕ_1 y ϕ_2 se originan por las reflexiones totales y la diferencia de caminos ópticos respectivamente.

Para calcular ϕ_2 consideremos que

$$\Delta t = \frac{ABD}{v} = \frac{(2a \cos \theta)n_1}{c}$$

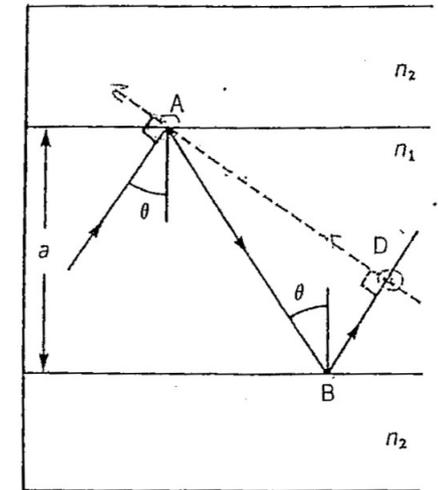
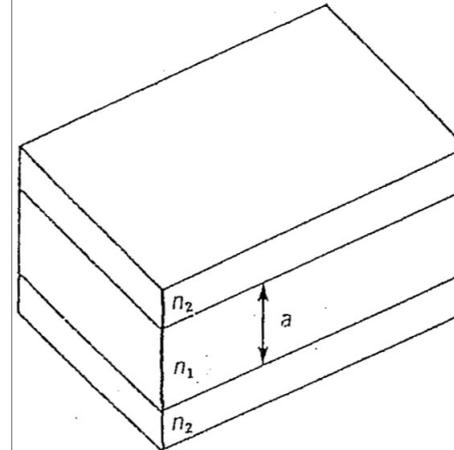
Por lo tanto

$$\phi_2 = \omega \Delta t = 2\pi \frac{c}{\lambda} \Delta t = 4\pi n_1 \frac{a}{\lambda} \cos \theta$$

Para que exista interferencia constructiva se debe cumplir que

$$\phi = 2\phi_1 + 4\pi n_1 \frac{a}{\lambda} \cos \theta = 2\pi m$$

donde $m = 1, 2, 3, \dots$. Esta ecuación define las direcciones permitidas las cuales constituyen los **Modos de Propagación**.



Finalmente hay que destacar que los ángulos permitidos deben satisfacer además la condición de reflexión total:

$$\theta \geq \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

1) Si $a/\lambda \gg 1$ entonces habrá una multitud de modos permitidos. En este caso es válida la óptica geométrica.

2) Si $a \sim \lambda$ habrá pocos modos incluso se podría tener un único modo permitido. La óptica geométrica no permite deducir este resultado.

Ejemplo

Consideremos una guía de onda plana que tiene un espesor de $50 \mu\text{m}$ e índices de refracción $n_1 = 1.5$ y $n_2 = 1.4$. Si se inyecta luz de $1 \mu\text{m}$ de longitud de onda, ¿cuál será el número aproximado de modos de propagación?. Despreciar los cambios de fase debidos a las reflexiones totales.

Solución

Las condiciones de propagación son las siguientes:

$$4\pi n_1 \frac{a}{\lambda} \cos \theta = 2\pi m$$

$$\theta \geq \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right) = 69^\circ$$

El valor máximo de m lo deberíamos calcular mediante la siguiente expresión:

$$m = 2n_1 \frac{a}{\lambda} \cos 69 = 53.8$$

Como m debe ser entero deducimos que $m = 53$. Considerando luego que el modo con $m = 0$ también está permitido, entonces el número de modos de propagación es en total 54.

Adicionalmente vemos que entre modos sucesivos la diferencia de ángulos es aproximadamente

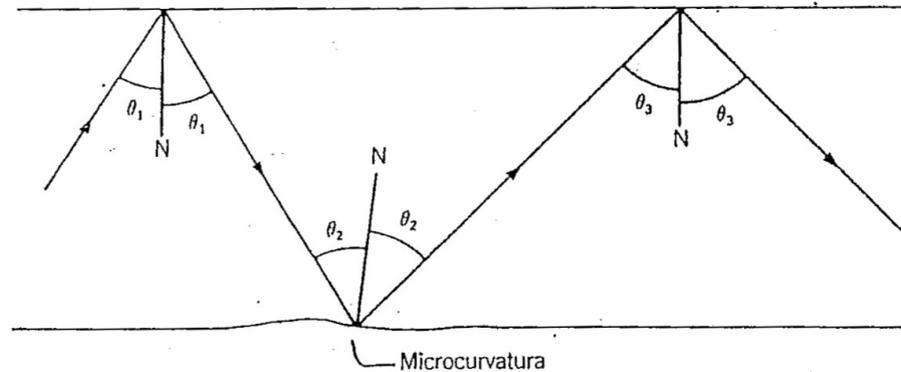
$$\frac{90^\circ - 69^\circ}{54} = 0.4^\circ$$

Finalmente destacamos que al coeficiente m se lo denomina **Orden del Modo**. El modo de menor orden $m = 0$ tiene un ángulo de propagación de 90° y no sufre ninguna reflexión total interna. Por otro lado los modos de mayor orden experimentan múltiples reflexiones.

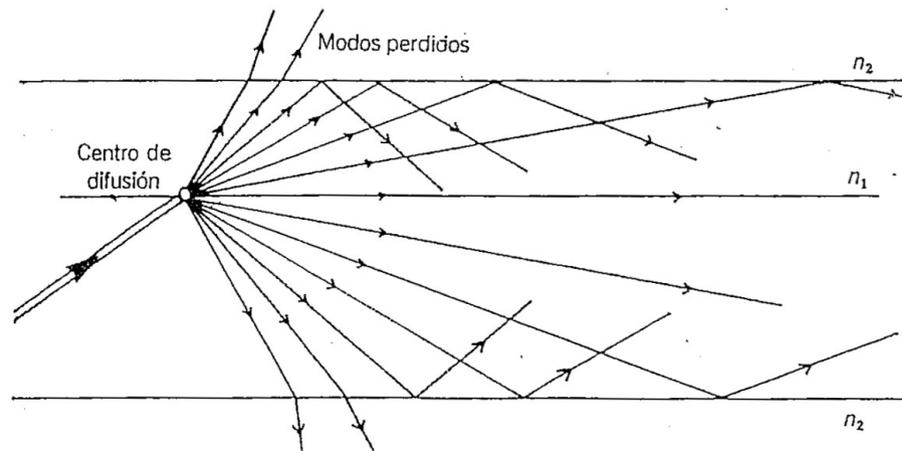
Acoplamiento de modos: distancia de equilibrio

Si en una fibra real se inyecta un modo bien definido, a la salida obtendremos una señal compuesta por una multitud de modos. Esto se debe a que los defectos presentes en el medio provocan un **Acoplamiento de modos**.

Acoplamiento causado por microcurvaturas



Acoplamiento causado por centros de difusión

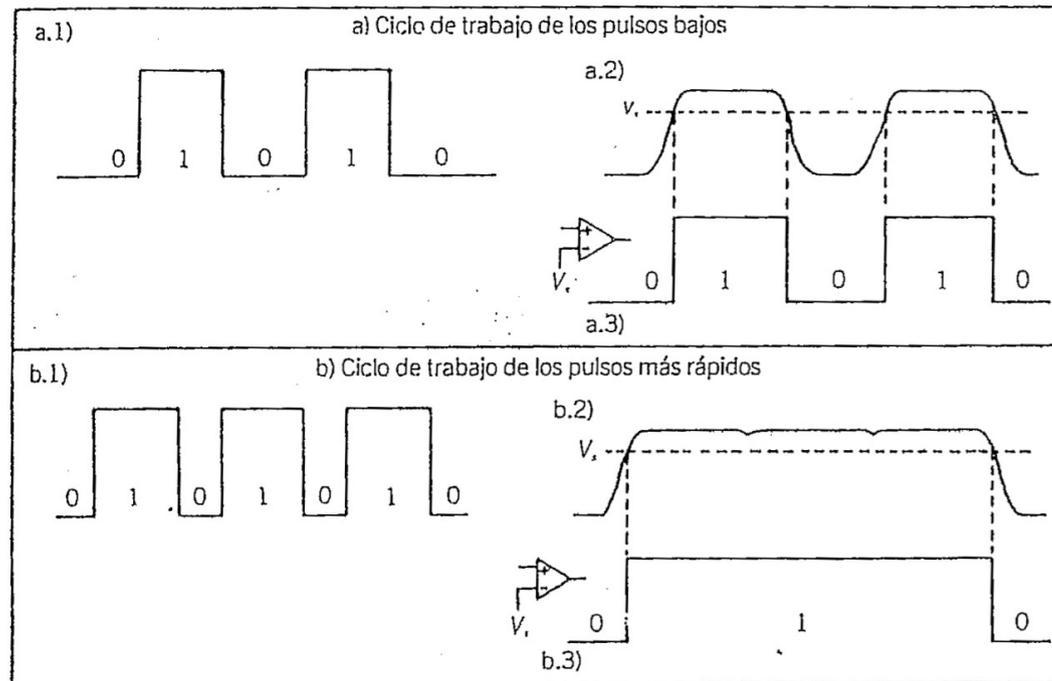


Debido a las microcurvaturas y a los centros de difusión si se tiene una distribución de modos en la entrada, esta se modificará a medida que la señal se propague por la fibra. A partir de una cierta distancia denominada **Distancia de Equilibrio**, la distribución de modos no dependerá de las condiciones de inyección sino de la estructura propia de la fibra óptica. Una buena fibra tiene una distancia de equilibrio de varios kilómetros mientras que para una de baja calidad esta cantidad es de tan sólo unos pocos metros.

Dispersión en una fibra óptica

Supongamos que la fibra óptica es utilizada para enviar señales digitales. La información se transmite entonces por secuencias de pulsos luminosos. Entre más pulsos por unidad de tiempo sea posible inyectar, mayor será la capacidad de transmisión de dicha fibra.

No obstante, la banda pasante está limitada pues dichos pulsos tienden a alargarse y a solaparse entre si, de modo que a altas frecuencias la información a la salida de la fibra no puede ser recuperada. A este fenómeno se lo denomina **Dispersión Temporal**.



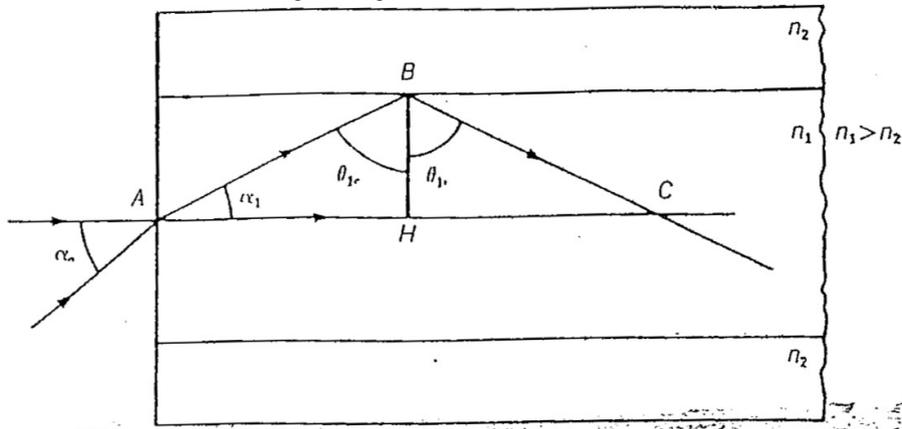
El alargamiento de los pulsos obliga a reducir el ciclo de trabajo y en consecuencia disminuye la capacidad de transmisión de información.

Dispersión modal y cromática

La dispersión temporal en un fibra óptica tiene dos orígenes.

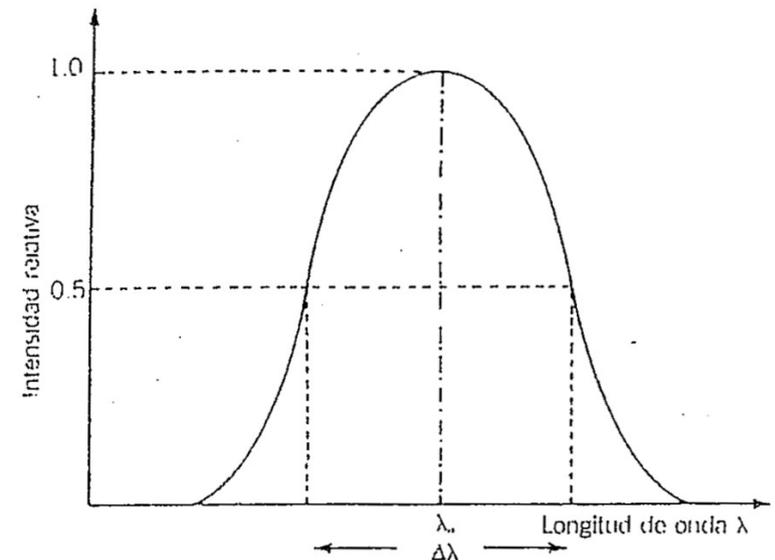
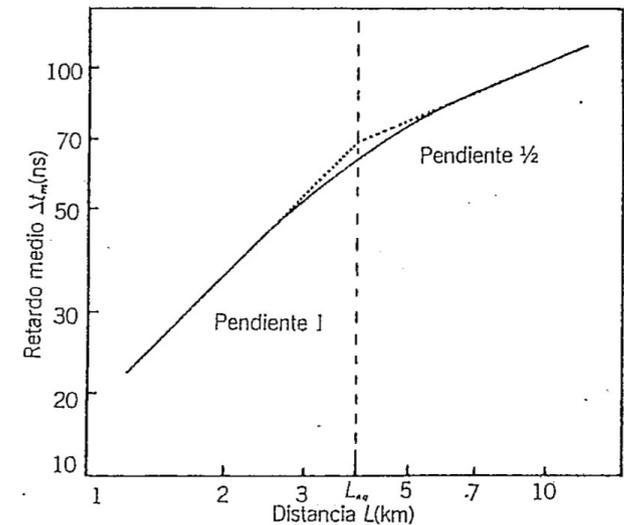
Por un lado, la **Dispersión Modal** se origina porque los modos que conforman una señal siguen trayectorias de diferente longitud. Los modos de menor orden van prácticamente en línea recta, mientras que los de mayor orden lo hacen en zig-zag.

Caminos seguidos por los modos de mayor y menor orden



Por otro lado, la **Dispersión Cromática** tiene su origen en que las fuentes de luz nunca son monocromáticas. Como el índice de refracción depende de la frecuencia y por ende también la velocidad de propagación, aunque se inyecte un único modo las diferentes componentes de Fourier que forman la señal se dispersarán y no llegarán simultáneamente a la salida de la fibra.

El acoplamiento entre modos reduce la dispersión modal

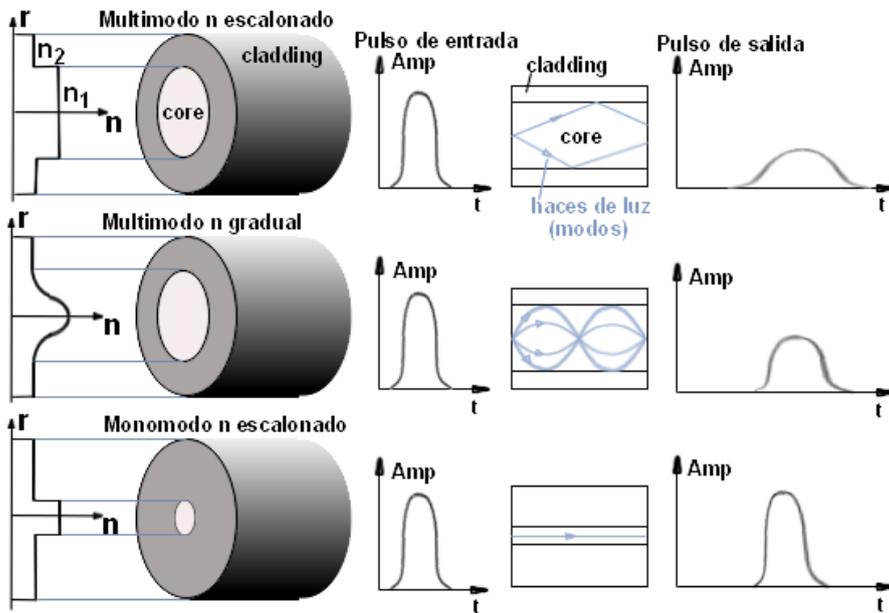


Reducción de la dispersión

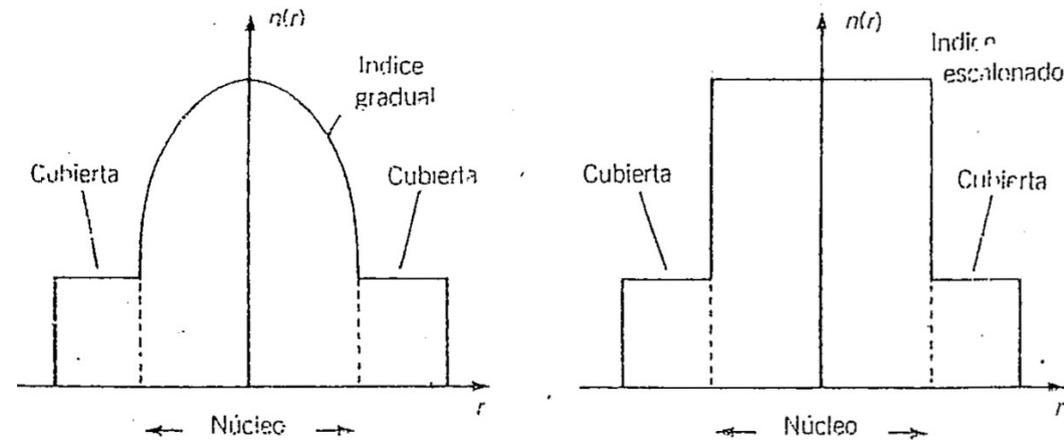
La dispersión cromática puede minimizarse usando fuentes de luz con un ancho de banda espectral pequeño (en lugar de emplear un diodo LED es mejor emplear un diodo láser).

Por otro lado la dispersión modal puede reducirse usando o una **Fibra Monomodo** o una **Fibra de Índice Gradual**.

Los tres tipos de fibras ópticas



El núcleo de una **Fibra de Índice Gradual** varía en forma continua desde el centro hasta la cubierta siguiendo una curva casi parabólica.



Esto permite que los modos de mayor orden se curven y, aunque sigan trayectorias mas largas, cerca de la cubierta se propaguen a velocidades mayores que en el centro del núcleo. La figura muestra las trayectorias para una fibra cuyo índice varía en escalones.

