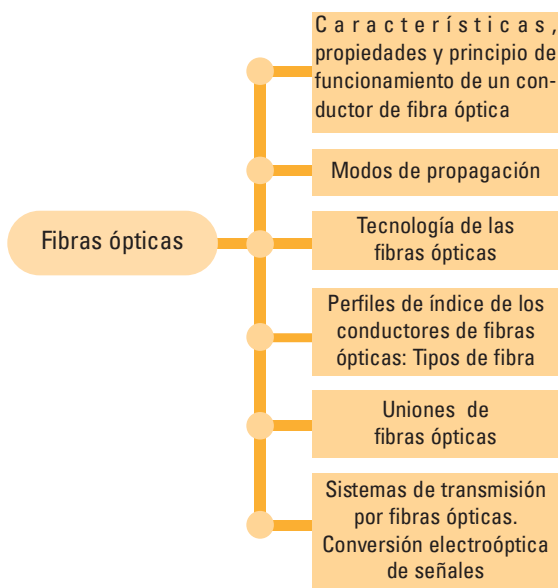


2. ENCUADRE TEÓRICO PARA LOS PROBLEMAS

Fibras ópticas



Las fibras ópticas son conductos, rígidos o flexibles, de plástico o de vidrio (sílice), capaces de conducir un haz de luz inyectado en uno de sus extremos, mediante sucesivas reflexiones que lo mantienen dentro de sí para salir por el otro.

La fibra óptica es una guía de onda y, en este caso, la onda es de luz.

Centrémonos, entonces, inicialmente, en considerar algunos rasgos clave de las ondas.

Desde hace más de un siglo, **las ondas electromagnéticas** son utilizadas para la trans-

misión de información. Su utilidad se debe a que para propagarse no requieren, necesariamente, de un medio conductor metálico sino que pueden hacerlo también tanto en el vacío como en un medio dieléctrico (no conductor), con elevada velocidad.

Dentro del espectro electromagnético, la luz visible ocupa solamente la zona que va desde 380 nm - nanómetros- (violeta) a 780 nm (rojo). La radiación ultravioleta corresponde a longitudes de onda por debajo de este rango espectral mientras que la de radiación infrarroja se encuentra por encima. En telecomunicaciones se utilizan, particularmente, las longitudes de onda del infrarrojo cercano (800 a 1600 nm).

Se entiende a una onda como la propagación de un estado o una excitación de una sustancia sin que ello implique la necesidad de transportar la propia materia o masa de dicha sustancia. La velocidad de propagación de las ondas luminosas depende del medio; en el caso de la luz, el estado es el campo electromagnético que se propaga en una sustancia transparente (medio óptico). La longitud de onda de dicha radiación está vinculada con la frecuencia de oscilación de los campos en un determinado medio, por la relación:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Donde:

- c es velocidad de propagación en el vacío, la cual vale, muy aproximadamente:

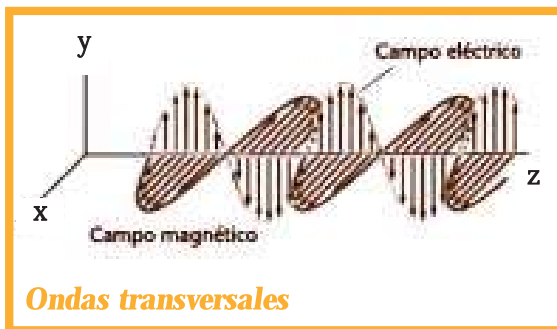
$$c \approx 300000 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

En un dieléctrico (por ejemplo, un vidrio transparente), la velocidad de propagación v es menor (en dicho medio, $f = v / \lambda_m$).

El cociente de la velocidad de propagación en el vacío y en el medio, respectivamente, definen el índice de refracción de la sustancia:

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

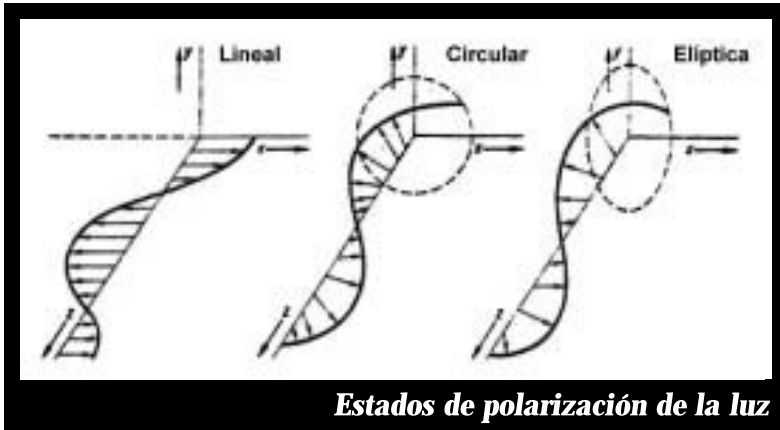
La onda electromagnética que representa a la luz es una onda transversal. En una onda transversal, el campo eléctrico y el magnético oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación. Ambos vectores son, por otro lado, proporcionales y perpendiculares entre sí. Como ambos oscilan en fase, basta representar el comportamiento de uno de ellos para analizar la evolución de dicha onda.



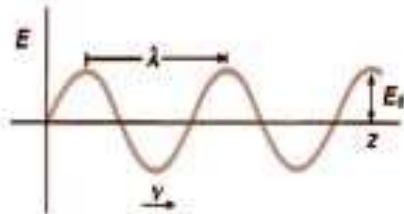
Si el campo eléctrico (o el magnético) de la onda oscila siempre en un plano, decimos

que la onda está polarizada linealmente.

Si el extremo del vector describe una circunferencia o, en general, una elipse, decimos que la luz posee polarización circular o elíptica.



Consideremos la representación más simple de una onda electromagnética propagándose en el vacío. Supongamos que la onda se encuentra linealmente polarizada y que su amplitud E varía de la forma:



$$E = E_0 \cdot \text{sen}(\omega t - kz) = E_0 \cdot \text{sen} 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{z}{\lambda} \right)$$

Donde:

- E_0 representa la amplitud máxima del campo eléctrico.
- ω la velocidad angular, en rad/s (s^{-1}).
- t el tiempo, en s.
- k el vector de onda ($k = 2\pi / \lambda$).
- λ longitud de onda en el medio, en m.
- z distancia sobre el eje z , en m.
- T periodo de la onda.

El valor entre paréntesis ($\omega t - kz$) se denomina ángulo de fase o fase de la onda, y se mide en radianes. Dada su naturaleza periódica, la onda vuelve a tener la amplitud que tenía en un tiempo t en un punto dado de su trayectoria cuando transcurre un tiempo $t+T$ (o $t+2T$, $t+3T$, etc.). De la misma manera, en un instante determinado de tiempo, la onda tiene igual amplitud en puntos espaciales separados por una distancia λ .

La velocidad angular ω está relacionada con la frecuencia f , como $\omega = 2\pi f$. A su vez, f se expresa en s^{-1} o Hz y se relaciona con el período de la onda en forma inversa $f = 1/T$.

Un detector de luz mide la potencia luminosa promedio y no el campo de la onda. Dicha potencia es proporcional al promedio del modulo del campo eléctrico al cuadrado ($P \propto \langle |E|^2 \rangle$).

Características, propiedades y principio de funcionamiento de un conductor de fibra óptica

Para entender las propiedades de la propagación luminosa en las fibras ópticas es necesario considerar con cierto detalle **el guiado o confinamiento** de la luz en dichas estructuras de cuarzo cilíndricas.

En una primera aproximación, la explicación del confinamiento luminoso puede darse con conceptos simples de propagación de rayos de la óptica geométrica. Sin embargo, para comprender ciertos

aspectos vinculados con la distribución espacial misma de la radiación luminosa dentro de la fibra -que determina la aparición de los denominados modos guiados-, se necesita una descripción más completa del fenómeno de propagación basado en una teoría electromagnética.

Teniendo en cuenta lo complejo que resulta este enfoque, nosotros llevaremos a cabo un tratamiento simplificado, haciendo uso de algunos conceptos de la óptica ondulatoria:

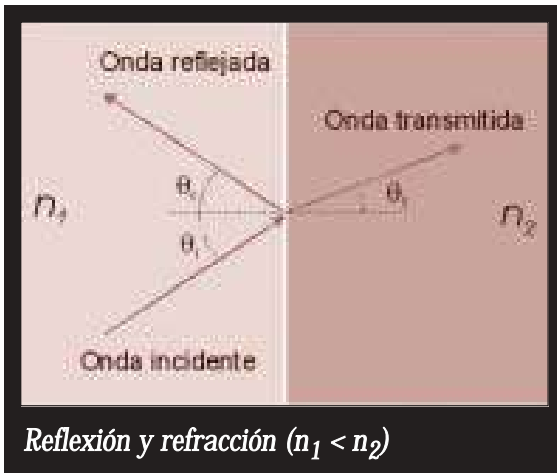
- reflexión y refracción de la luz,
- ángulo crítico,
- propagación de luz en una guía óptica y
- apertura numérica.

Reflexión y refracción de luz

Cuando un haz luminoso incide sobre una interfase generada por dos medios ópticos de índice de refracción distintos, parte de la luz se refracta (se transmite al segundo medio) y otra parte se refleja. Dichos procesos son descritos por ecuaciones que vinculan los índices de refracción de ambos medios con los ángulos de incidencia, refracción y reflexión que determinan las trayectorias de los haces luminosos:

$$\theta_i = \theta_r \quad \text{Ley de reflexión}$$

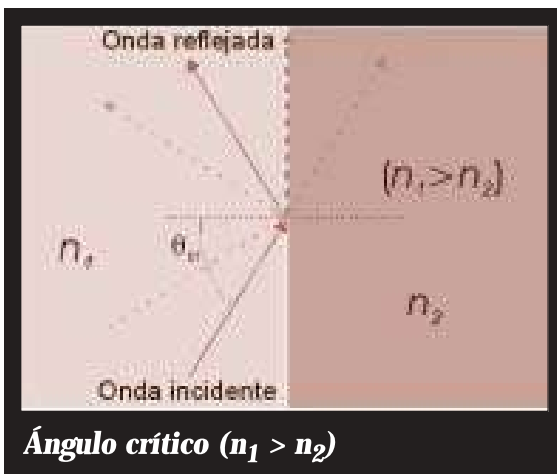
$$n_1 \cdot \text{sen} \theta_i = n_2 \cdot \text{sen} \theta_t \quad \text{Ley para la transmisión o Ley de Snell}$$



Ángulo crítico

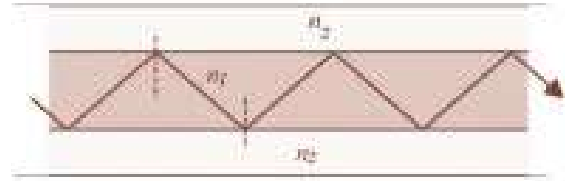
En el caso de que n_1 sea mayor que n_2 ($n_1 > n_2$) y si se cumple que $\text{sen } \theta_i$ sea mayor que n_2 / n_1 , el $\text{sen } \theta_t$ debería ser mayor a 1, lo cual es imposible. Por lo tanto, si $\text{sen } \theta_i \geq n_2 / n_1$ no hay haz transmitido y toda la energía luminosa correspondiente a dicho haz es reflejada en dicha interfase.

El ángulo $\theta_c = \text{arc sen } (n_2 / n_1)$ se denomina ángulo crítico.



Propagación de luz en una guía óptica

Consideraremos, ahora, un medio de índice de refracción n_1 delimitado por dos medios de índice n_2 con $n_1 > n_2$.



Onda guiada

Dado que $\theta_i = \theta_r$, para ángulos de incidencia sobre las interfases mayores al ángulo crítico, los haces luminosos son reflejados en forma consecutiva por ambas superficies, generando una propagación sin pérdidas energéticas por transmisión.

De este planteamiento se concluye que tenemos, al menos, dos clases de rayos:

- Aquéllos que inciden en la interfase de separación núcleo-cubierta con ángulos de incidencia mayores que el ángulo crítico, se reflejan y vuelven a incidir en la superficie de interfase con el mismo ángulo, quedando de esta forma, confinados dentro del núcleo. A estos rayos se los denomina **rayos guiados**.
- Aquéllos con ángulos de incidencia menores que el ángulo crítico en parte se refractan y, en parte, se reflejarán, de forma que después de un cierto número de incidencias en la interfase núcleo-cubierta, la energía asociada con estos rayos prácticamente se habrá extinguido. Por esto se los llama **rayos no guiados**.

De la ecuación se deduce que el valor del ángulo crítico sólo depende del cociente n_2/n_1 , por lo cual, si n_1 es sólo ligeramente mayor que n_2 , entonces, el cociente está próximo a 1 y $\theta_c \cong 90^\circ$. En este caso, hay muy pocos rayos guiados e inciden en la interfase núcleo-cubierta prácticamente en forma rasante, propagándose en la fibra con direcciones casi coincidentes con el eje.

Apertura numérica

Si analizamos las condiciones de propagación de haces guiados, vemos que éstos deben cumplir que:

$$\text{sen } \theta_c = n_2 / n_1$$

La condición límite para el ángulo ($\theta_{L,m}$) que establece el acople de un rayo luminoso desde el exterior ($n = 1$) al núcleo de la fibra ($n = n_1$), según la ley de Snell debe ser:

$$\text{sen } \theta_{L,m} = n_1 \cdot \text{sen}(90^\circ - \theta_c)$$

$$\text{sen } \theta_{L,m} = n_1 \cdot \text{cos } \theta_c$$

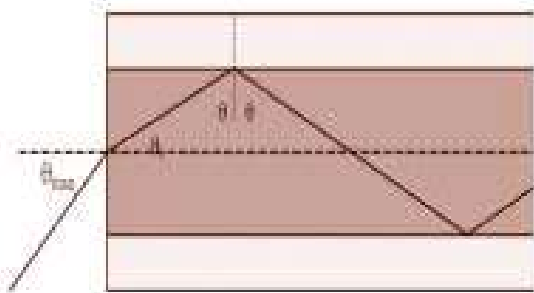
$$\text{sen } \theta_{L,m} = \sqrt{1 - \text{sen}^2 \theta_c}$$

$$\text{sen } \theta_{L,m} = n_1 \cdot \sqrt{1 - (n_2/n_1)^2}$$

$$\text{sen } \theta_{L,m} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$\text{sen } \theta_{L,m}$ se denomina NA = Apertura numérica.

Habrà reflexión total si $\theta \geq \theta_c$



Apertura numérica

Por ejemplo, para

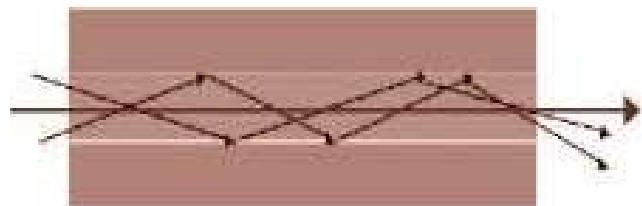
$$n_1=1.47 \text{ y } n_2=1.46 \Rightarrow \theta_{i,m} = 9.9^\circ \text{ y } NA = 0.17.$$

El valor de la apertura numérica define el mayor ángulo que puede tener el cono de entrada de luz en la fibra y, por ende, determina la energía luminosa que es posible acoplar en ella. Como se observa en la expresión, solamente depende de los índices de refracción del núcleo y de la cubierta.

En forma similar, la salida de la luz por el otro extremo de la fibra está dada por un cono cuya base se va expandiendo con la distancia, por lo que es necesario, generalmente, utilizar lentes para colimar el haz -para eliminar su divergencia-.

Modos de propagación

No todos los haces luminosos que inciden sobre las interfases con ángulos mayores a θ_c pueden propagarse. Los campos incidentes deben cumplir ciertas condiciones de contorno en las interfases, lo que determina que el número de ángulos posibles sea finito.



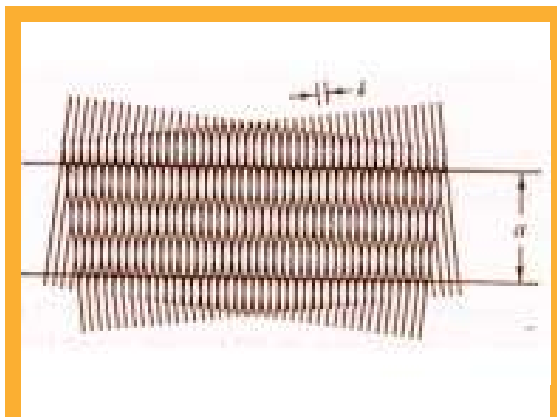
Trayectoria para distintos modos

Por otra parte -como hemos expresado anteriormente-, una descripción más exacta requiere de una matemática más compleja,

particularmente debido a que algunas de las dimensiones de las guías ópticas (por ejemplo, el diámetro del núcleo de una fibra) son cercanas al valor de la longitud de onda de la luz utilizada. Debido a esta relación de dimensiones, ocurren fenómenos de **interferencia** que sólo se pueden describir con ayuda de la óptica ondulatoria.

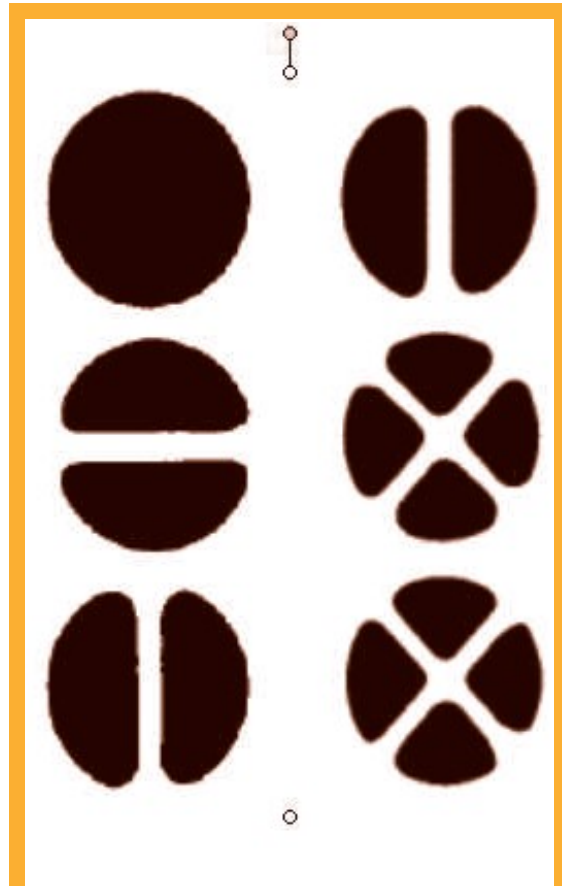
Se denomina **interferencia** a la superposición de dos o más ondas, y su combinación para formar una onda única. Se obtiene solamente cuando las ondas que interfieren tienen la misma longitud de onda y existe una diferencia de fase constante en el tiempo entre ellas. Este tipo de ondas se denomina ondas coherentes. Supongamos que dos ondas de igual amplitud interfieren: Si la diferencia de fase entre ellas es múltiplo entero de 2π , la interferencia es constructiva (habrá un máximo en intensidad); si es igual a un múltiplo entero de 2π más π (por ejemplo 5π), tendremos interferencia destructiva y, por consecuencia, una anulación local de la intensidad.

Un ejemplo de la interferencia de dos haces coherentes que se propagan en el núcleo de la fibra:



Interferencia entre dos haces correspondientes al mismo modo

La interferencia genera zonas estacionarias de máximos y mínimos de intensidad en el núcleo de la fibra, los que determinan la distribución de intensidad de los modos de propagación observados a la salida de la fibra, colocando una pantalla a cierta distancia.



Distribución de intensidad para distintos modos

La distribución de intensidad en la salida es la suma de las distribuciones correspondientes a cada modo, por lo que se observa una mancha similar a la del modo fundamental (HE_{11}) pero con un mayor diámetro al ser observada a igual distancia.