

La fibra óptica como medio de transmisión (I)

Por Ing. Jorge Bocalandro Rivero

Especialista en Planta Exterior, Centro de Capacitación

Esta es la primera parte de una serie de artículos sobre las funciones y aplicaciones de la fibra óptica. En próximas ediciones se abordarán los distintos tipos de fibras y sus parámetros.

El empleo de la luz como medio de comunicación no nació con el surgimiento de la fibra óptica. Desde tiempos remotos, el hombre utilizó los espejos y la luz para la transmisión de señales, principalmente, durante contiendas bélicas.

En 1609, en Italia, Galileo inventaba la lente; en 1626, el científico holandés Snellius enunció las leyes de la refracción y reflexión de luz; en 1870, Tundall demostró a través de un experimento la transmisión de la luz por el agua como guía de onda y, sin embargo, todos los intentos de transmitir luz a largas distancias a través del aire fracasaron debido a que la composición del propio medio atenuaba mucho la señal. En 1959, surge en Gran Bretaña la fibra con revestimiento. Estas fibras al principio introducían gran atenuación 100 db/Km; además, las fuentes empleadas —diodos led— de poca potencia y gran ancho espectral, producían efectos apreciables de dispersión del pulso, que no permitían las transmisiones a largas distancias.

Un paso de avance en la búsqueda de una solución a estos problemas fue el surgimiento, en 1962, del láser semiconductor como fuente

transmisora de luz y la fabricación, en 1970, por la Compañía norteamericana *Corning Glass*, de una fibra con una atenuación de 20 dB/Km.

A partir de ese momento, varias compañías han desarrollado diferentes tipos de fibra y logrado valores bajos de atenuación y dispersión en las mismas.

A pesar de la incertidumbre que generó a principios de los años 80, en cuanto a su comportamiento, la posible sustitución en las redes de telecomunicaciones de los cables coaxiales y de cobre por este nuevo medio de transmisión —conocido como fibra óptica— los operadores de telecomunicaciones apostaron por el diminuto filamento, dadas las ventajas que brindaba con relación a los medios mencionados e, incluso, sobre la transmisión por sistemas de microondas.

Desde entonces ha venido desarrollándose una gran variedad de dispositivos optoelectrónicos y ópticos, que han dado con el surgimiento de sistemas de transmisión, no sólo de una longitud de onda, sino de diferentes longitudes, multiplicándose la capacidad de transmisión de estos sistemas.

¿Cuáles son las ventajas que ofrecen las fibras?

◆ Pequeña dimensión y poco peso, por lo que su instalación requiere de menos horas / hombres y el trabajo se hace más humano.

◆ Gran ancho de banda —en el orden de los THz— lo que garantiza capacidad de transmisión y posibilidad para transmitir a altas velocidades 2,5, 10 e, incluso, 40 Gbit/s.

◆ Pocas pérdidas en el orden de 0,19 a 0,4 dB/Km que dependen de la longitud de onda de trabajo del sistema y el tipo de fibra utilizada, lo cual permite la instalación de repetidores o amplificadores a mayor distancia.

◆ Muy baja tasa de bit errados (BER) lo que permite garantizar mayor calidad en la transmisión.

◆ Elimina los problemas de aislamiento eléctrico, cortocircuito, ruido eléctrico y corrosión, que simplifica el mantenimiento.

◆ Libre de interferencia electromagnética.

◆ Alta estabilidad a los cambios de temperatura, que garantiza estabilidad en los parámetros de transmisión.

◆ Ausencia de diafonía entre los sistemas que cubren la misma ruta.

◆ Abundancia de materia prima para su fabricación —el material base es sílice.

¿Qué es una fibra óptica?

La fibra óptica es un filamento flexible, largo y delgado —del orden de unas micras— más fino que un cabello humano. Es una guía de ondas ópticas, totalmente dieléctrica, constituida por dos cilindros concéntricos vítreos de diferentes índices de refracción que forman una estructura monolítica.

El cilindro interior se conoce por **núcleo**, y no es más que un centro de dióxido de silicio SiO_2 dopado o no, por donde viajan los pulsos de luz transmitidos.

El cilindro exterior se conoce por **revestimiento**, conforma una capa exterior que rodea al núcleo, refleja la luz que incide en él y permanece dentro del núcleo. El valor del índice de refracción es mayor siempre en el núcleo que en el revestimiento. La estructura núcleo-revestimiento, durante el proceso de fabricación, se protege por una capa de acrilatos epóxicos generalmente, llamada **protección primaria**.

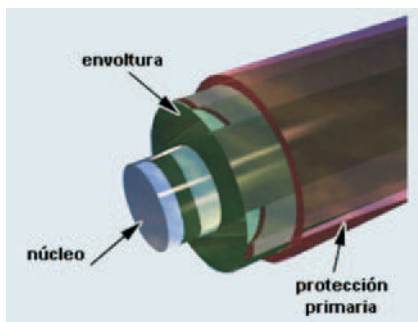


Figura 1 Estructura de una fibra óptica

La velocidad de la luz, que en el vacío es de $3 \cdot 10^8$ m/s, varía sensiblemente en dependencia de la diferencia de la densidad de los materiales que atraviesa. Para caracterizar la **densidad** de los materiales, se ha definido el

parámetro **índice de refracción absoluto** (η), expresado por la relación entre la velocidad de la luz en el medio considerado (v).

Índice de refracción absoluto:
 $\eta = C / V$

Sustancia	n
Hielo	1.31
Agua	1.33
Alcohol	1.36
Glicerina	1.47
Cristal	1.50
Sal	1.54

Figura 2 Índice de refracción de algunas sustancias

¿En qué se basa el principio de transmisión a través de una fibra óptica?

Comenzaremos con el análisis de las leyes de refracción y reflexión enunciadas por Snell:

“Un rayo de luz que incide en la superficie de separación de dos medios diferentes, por ejemplo aire-cristal, se divide en dos: un rayo reflejado que se propaga en el primer medio, un rayo refractado que se propaga en el segundo medio.” (Ver Figura 3).

El rayo **reflejado** se propaga con un ángulo β respecto a la normal (N) y es igual al del rayo incidente α :

Ley de reflexión $\alpha = \beta$

El rayo **refractado** se propaga en el segundo medio con una dirección diferente a la del rayo incidente, a causa de la diferencia del valor del índice de refracción de los dos materiales: si el rayo luminoso pasa de un medio menos denso a uno más denso (Figura 4a), el ángulo de refracción η es más pequeño que el ángulo de incidencia, o sea, el rayo refractado se acerca a la normal (N) ($\gamma > \alpha$). Si por el contrario, el rayo pasa de un medio más denso a uno menos denso, el ángulo de

refracción es mayor, o sea, se aleja de la normal (Ver Figura 4b).

Es posible calcular la desviación del rayo refractado respecto al rayo incidente a través de la ley de Snell:

Ley de Refracción de Snell:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{Donde:}$$

n_1 —índice del medio del rayo incidente

n_2 —índice del medio del rayo refractado

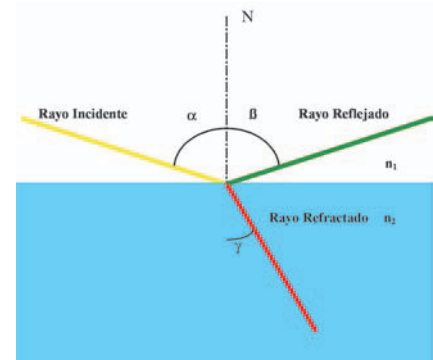


Figura 3 Reflexión de un rayo incidente en la superficie de separación de los medios

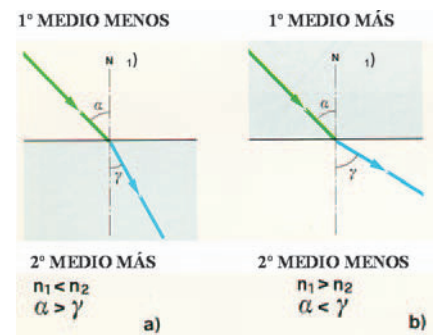


Figura 4 Ángulo crítico y reflexión total

Bajo las condiciones de la Figura 4b se logra que, con cierto ángulo de incidencia α , el ángulo refractado sea rasante a la superficie de separación entre los dos medios. Este ángulo de incidencia, para el cual se tiene un ángulo de refracción γ igual a 90° , se define como **ángulo límite**:

$$\alpha_{\text{lim}} \rightarrow \gamma = 90^\circ$$

Mediante la ley de Snell puede obtenerse el valor del **ángulo límite** (Ver Figura 5).

$$\frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \gamma} = \frac{n_2}{n_1}$$

Si:

$$\alpha = \alpha_{\text{lim}} \rightarrow \gamma = 90^\circ \rightarrow \text{sen } 90^\circ = 1$$

Entonces:

$$\text{sen } \alpha_{\text{lim}} = \frac{n_2}{n_1}$$

“(…) el seno del ángulo límite es igual a la relación entre los índices de refracción de los dos medios.” (Ver Figura 5).

Si el ángulo α del rayo incidente es superior al ángulo límite, el rayo refractado falta y se tiene solamente el rayo reflejado, que contiene toda la energía del rayo incidente; este fenómeno se llama **Reflexión total** (Ver Figura 6).

En resumen, la propagación de la luz, a través de una fibra óptica, se basa en el principio de reflexión total interna —no hay refracción de la luz— y debe cumplir dos condiciones: primera, el índice de refracción del medio por donde viaja la luz —en nuestro caso el núcleo de la fibra— tiene que ser mayor que el índice de refracción del otro medio —revestimiento— hacia donde trataría de pasar el rayo de luz; segunda, el rayo en la frontera núcleo-revestimiento tiene que incidir con un ángulo mayor a un ángulo límite.

Con estas reflexiones totales sucesivas en la superficie núcleo-

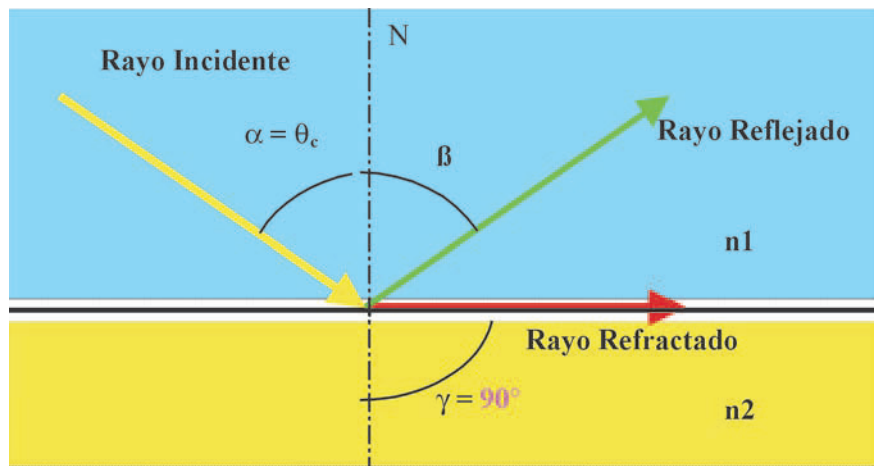


Figura 5 Ángulo límite o crítico

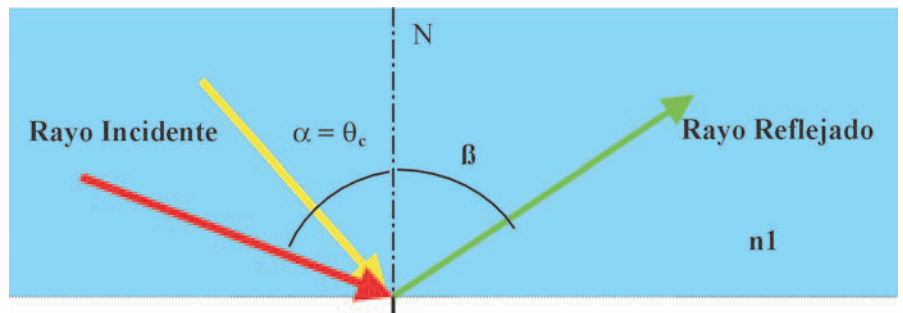


Figura 6 Reflexión total interna

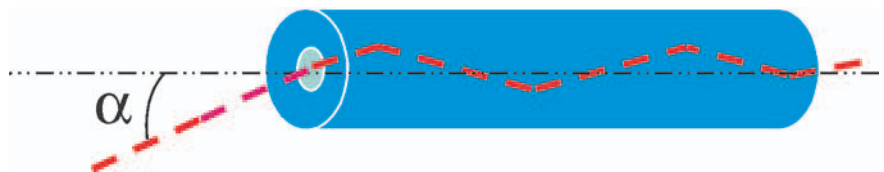


Figura 7 Apertura Numérica

revestimiento, se logra la transmisión de la señal a través de la fibra a cientos de kilómetros. Para que esto ocurra en el interior de la fibra, es necesario que los rayos penetren en la misma con ángulos menores que determinado ángulo, que define el parámetro **Apertura Numérica** (Ver Figura 7).

La **Apertura Numérica (AN)** es el valor del seno de la mitad

del ángulo, dentro del cual un haz de luz incidente, sobre la cara externa del núcleo de la fibra, logra la condición de reflexión total interna:

$$NA = n_0 \sin \alpha.$$

Además, caracteriza el acople de potencia a la fibra:

$$P \cong \pi a^2 (NA)^2$$

Es decir, la fibra sólo conducirá, por reflexión total

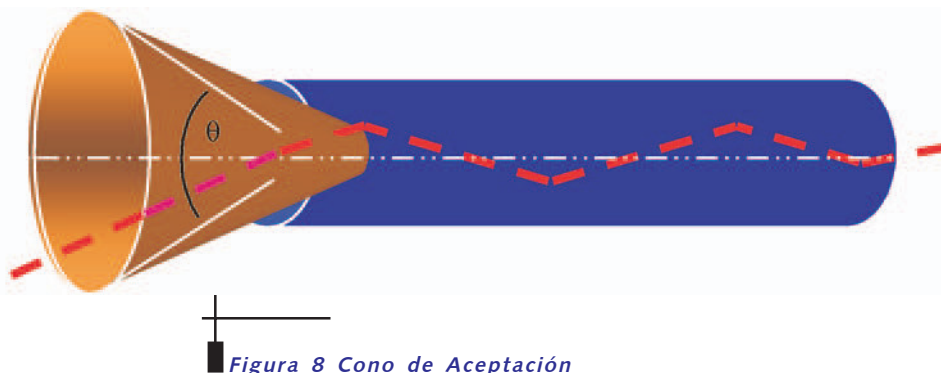


Figura 8 Cono de Aceptación

interna, los rayos que penetren dentro de un ángulo máximo, que define un cono de aceptación (2θ) (Ver Figura 8).

Una vez analizado el principio de propagación de una señal óptica a través de la fibra, es necesario conocer con qué frecuencias se realizan las transmisiones ópticas.

En los sistemas de telecomunicaciones eléctricas, la transmisión ocurre superponiendo la señal que contiene la información útil a una onda electromagnética de elevada frecuencia, llamada **portadora**; es decir, la señal útil modula la señal portadora, que es transmitida. En el destino, es suficiente reconocer la información transportada por la señal portadora y tratarla como se desee.

Si aumenta la frecuencia de las portadoras, aumenta la banda de la señal útil transmisible, y se suministra mayor capacidad de transmisión.

Por tales razones, la tendencia del desarrollo de los sistemas de comunicaciones eléctricas, ha sido emplear frecuencias más altas, correspondientes a longitudes de onda siempre más cortas.

La luz, como fenómeno electromagnético, puede ser considerada una señal sinusoidal de una determinada frecuencia f , que se propaga en el vacío con una velocidad C , a la cual corresponde una longitud de onda λ . Si la propagación ocurre en un

medio cualquiera, la longitud de onda se indica como λ .

Longitud de onda es la distancia que recorre la luz a la velocidad de propagación de la fase, en el intervalo de tiempo correspondiente a una oscilación completa de la onda:

$$\lambda = C \cdot T = C/f$$

En realidad, la luz comprende un conjunto de señales de diferentes frecuencias y, por tanto, de diversas longitudes de onda, para cada uno de los cuales vale la relación:

$$\lambda_i = C / f_i$$

$$A(t) = A_m \sin(\omega t + \phi_0)$$

$A(t)$: Valor instantáneo de la señal.

A_m : Amplitud máxima de la señal sinusoidal.

$\omega = 2\pi f$: Velocidad angular.

$f = 1/T$: Frecuencia.

ϕ_0 : Fase inicial.

T : Período de la señal.

$\lambda = v/f$: Longitud de onda de la señal.

$$V = X/T = \lambda/T = \lambda/f$$

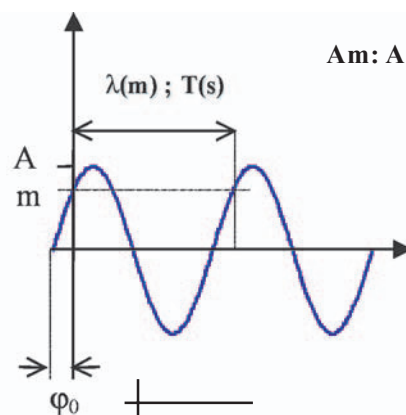


Figura 9 Figura Sinusoidal

Es posible, de este modo, determinar el espectro de las señales luminosas, tanto en función de la frecuencia, como en función de la longitud de onda (λ) (Ver Figura 9), con relación a la velocidad de la luz en el vacío $C = 3 \cdot 10^8$ m/s.

El ojo humano está en condiciones de percibir, como luces de diferentes colores, sólo una pequeña parte de las radiaciones luminosas presentes en el espectro de la luz —llamada luz visible— en una gama cromática que va desde el rojo hasta el violeta.

En la Figura 10 puede notarse que las ondas luminosas tienen frecuencias elevadísimas, a las que corresponden los valores de λ del orden del micrómetro ($1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$) (Ver Figura 11). Además de en micrómetros (μm), la longitud de onda se expresa también en nanómetros ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$) o en Angstrom ($1\text{\AA} = 10^{-9}\text{m}$).

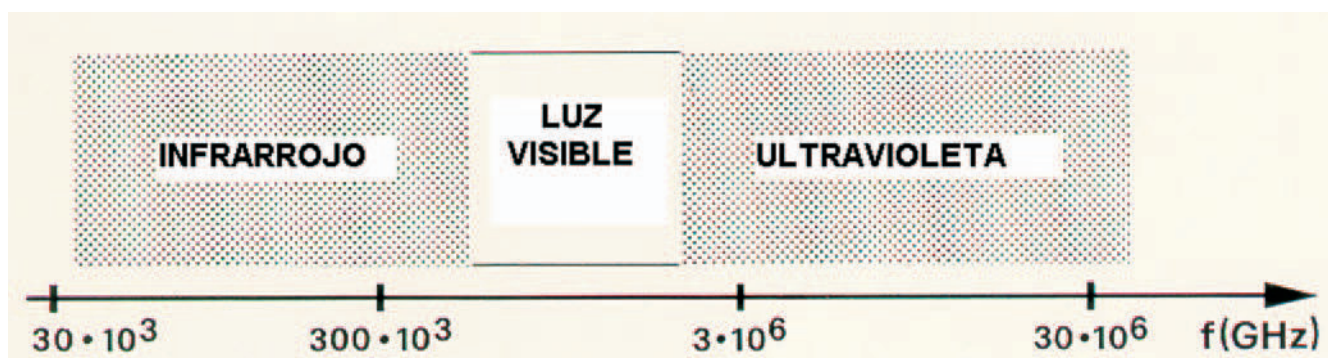


Figura 10 Espectro de la luz en función de la frecuencia

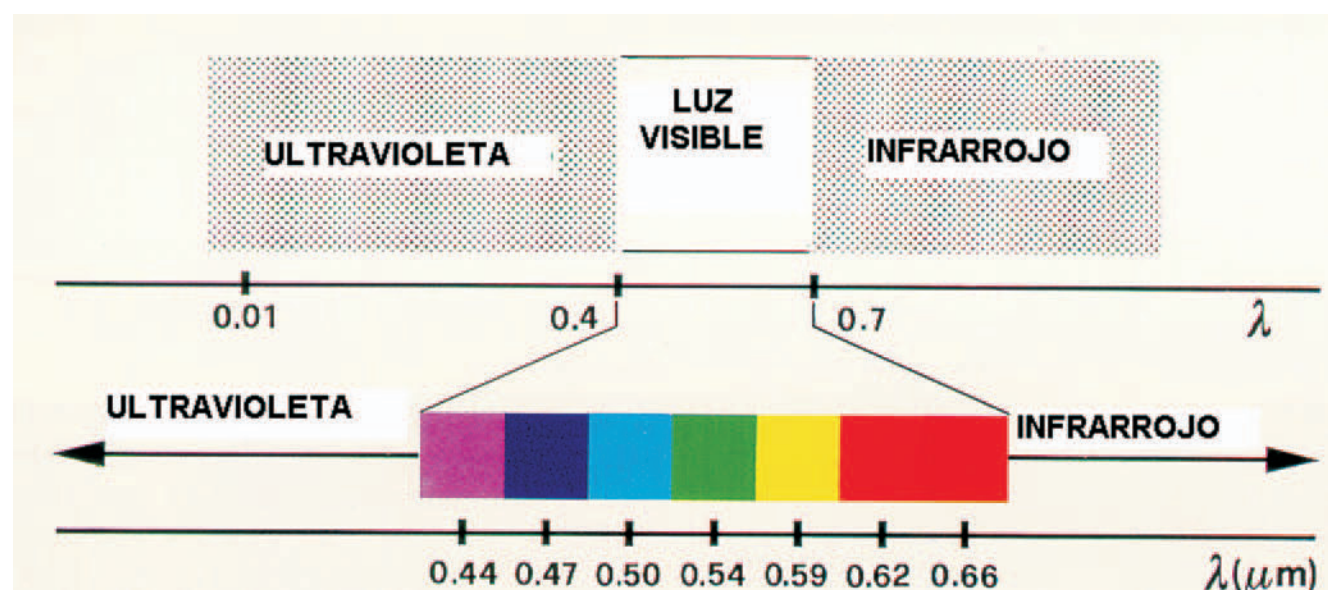


Figura 11 Correspondencia colores-longitud de onda en el campo de la luz visible

Las comunicaciones ópticas se realizan en la zona del infrarrojo, es decir, a longitudes de onda mayores de 0.8 nanómetros. A las diferentes zonas de trabajo de las fibras ópticas, según la aplicación y el tipo de fibra, se les denomina ventanas de trabajo y se simboliza con @.

La primera ventana comprende las longitudes de onda de 820 a 900 nm, con una λ central de 850 nm y se emplea con fibras multimodos para redes LAN; la segunda, abarca desde 1280 a

1350, con una λ central de 1310 con aplicaciones en redes de cortas distancias, LAN y MAN, enlaces simples sin EDFAS y SMF fibra óptica monomodo estándar; la tercera, va desde 1528 hasta 1561, con una λ central de 1550 nm, y se le denomina banda C —convencional— y se utiliza para enlaces simples y DWDM con SMF con velocidades de 2 a 10 Gbit/s sin compensación y 40 Gb/s con compensación de dispersión; la cuarta, comprende las longitudes de onda desde

1561 hasta 1620, se le denomina banda L —larga— y encuentra aplicación en sistemas DWDM a altas velocidades; y la quinta ventana dispone de dos bandas de longitudes de onda: una, que va de 1350 a 1450 y se utiliza en sistemas DWDM con nuevos tipos de fibras como la AllWave, y otra, de 1450 hasta 1528 que se le denomina banda S —corta— para sistemas DWDM y MAN, de cortas distancias con fibras monomodos. ▀