



Enrique LARREA BELLOD es Licenciado en Ciencias Físicas con Premio Extraordinario por la Universidad Autónoma de Madrid (1974), Doctor en Ciencias Físicas con Premio Extraordinario por la Universidad de Santiago de Compostela (1981) y Diplomado en Ingeniería Nuclear por el Instituto de Estudios Nucleares (1977). Ha sido profesor de la asignatura de Teoría y Diseño de fibras ópticas para los cursos de Doctorado en la Universidad Autónoma de Madrid; ha participado también en varios congresos y realizado más de 40 publicaciones internacionales en el campo nuclear y de comunicaciones ópticas. En 1977 se incorporó al equipo de proyecto de CN Regodola y en 1981 pasó a formar parte del Grupo de Proyecto de CN Trillo en el Departamento de Ingeniería. Actualmente desempeña su actividad en el Grupo de Apoyo Técnico a la Central de Trillo I.



José MARTIN APARICIO es Ingeniero Técnico Industrial por la Escuela de Madrid, especialidad electrónica, con Master en Informática por la Universidad Pontificia de Salamanca. Ha realizado también diversos cursos de especialización en Sistemas de Control para Centrales Térmicas. En 1977 se incorporó al Equipo de Proyecto de CN Trillo como responsable de la sección de Instrumentación y Control. En la actualidad es responsable para el desarrollo del diseño básico de proyectos y del control de las modificaciones de Instrumentación y Control en el Grupo de Apoyo Técnico a CN Trillo.

## LAS FIBRAS OPTICAS Y SU APLICACION EN EL SECTOR ELECTRICO

E. LARREA - J. MARTIN

Actualmente se está produciendo un drástico incremento de la aplicación de los sistemas ópticos para la transmisión de información.

Nuevos tipos de materiales y de fibras van sustituyendo progresivamente a los sistemas tradicionales eléctricos, debido a sus mucho mayores anchos de banda de transmisión y a su baja atenuación. El límite técnico actual de la tecnología óptica se sitúa en  $10^{15}$  bits/s por m, cien mil veces superior al límite del mejor cable coaxial. Hoy en día, sin embargo, los sistemas ópticos más evolucionados son capaces de transmitir  $10^{12}$  bits/s, muy por encima todavía de los sistemas clásicos eléctricos, esperando se alcance el límite teórico en los próximos diez años.

Esta gran capacidad de transmisión de información —una fibra óptica puede sustituir a más de mil cables de cobre—, junto con su baja atención y ausencia de interferencias eléctricas, hacen de la fibra óptica el medio ideal para la transmisión masiva de información. Actualmente se utiliza, por ejemplo, en el enlace entre ordenadores y son bien conocidas sus aplicaciones para comunicaciones, entre las que cabe destacar el primer cable submarino transatlántico, TAT-8, con capacidad de hasta 37.800 circuitos telefónicos simultáneos y el cable de fibra óptica que enlaza Tenerife y Gran Canaria, que soporta 3.840 canales físicos que se podrían multiplicar por cinco con métodos de multiplexación.

Existen todavía puntos limitativos en los sistemas ópticos de comunicación en el emisor y el receptor. La información a transmitir primero se procesa electrónicamente en modulación de impulsos, existiendo una fuente óptica de láser, que transmite los impulsos ópticos a una fibra. En el otro extremo, un receptor óptico fotodiodo o fotomultiplicador recibe los impulsos ópticos, que los entrega a un sistema electrónico para su decodificación y procesamiento.

Se están desarrollando en la actualidad nuevos materiales fotónicos para que el procesamiento de la información sea totalmente óptica. Con los nuevos avances de la óptica integrada se está desarrollando un nuevo tipo de transistor fotónico miles de veces más rápido que su equivalente electrónico, que podría en el futuro permitir construir un nuevo tipo de ordenadores totalmente ópticos, ultrarrápidos. También se están desarrollando nuevos tipos de láseres de modulación de frecuencias ópticas, que aumentarían de forma considerable las capacidades de transmisión de información por las fibras.

El sector eléctrico industrial no debe quedar al margen sin sacar provecho de las aplicaciones de esta "revolución fotónica" que se está produciendo en la tecnología actual, aunque, hasta el momento presente, es el más remiso en su utilización.

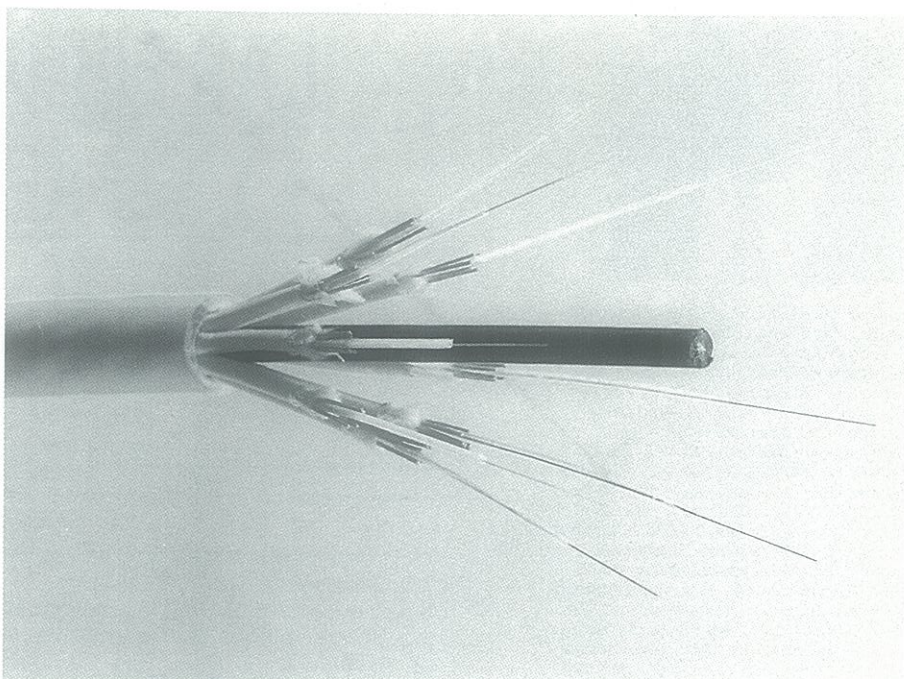
Este artículo trata de ser una introducción a las fibras ópticas en su estado actual de aplicaciones para aquellos técnicos que trabajan en el sector eléctrico. En la parte primera se resumen sus ventajas y aplicaciones actuales en el sector eléctrico, aunque todavía muy reducidas. En la parte segunda se trata, a modo de introducción, cuáles son las características y parámetros de una fibra óptica; sin embargo, se dan los criterios suficientes para valorar un proyecto de comunicaciones ópticas.

### LA FIBRA OPTICA EN EL SECTOR ELECTRICO. SUS VENTAJAS EN PLANTAS DE POTENCIA

Tradicionalmente se ha venido utilizando el cable atrezado y el cable coaxial para redes de comunicación de área local en teledirigida y teledirigida. El cable trenzado sólo puede utilizarse con velocidades de transmisión baja inferiores

a 1 MHz y, además, son afectadas por interferencias electromagnéticas. El cable coaxial permite velocidades de transmisión superiores, pero es igualmente afectado por las influencias electromagnéticas, por lo que este tipo de cables no son los más adecuados para trabajar en ambientes industriales. En las instalaciones eléctricas de potencia, la transmisión de señales de corrientes débiles a través de cables metálicos está expuesta a las interferencias producidas por los fuertes campos electromagnéticos, los ruidos eléctricos debidos a los arcos en las maniobras del aparellaje de alta tensión y a los fuertes gradientes en el potencial de tierra, en diferentes puntos de la instalación. Para eludir estos problemas se recurre a soluciones con cables especiales y tubos de cobre de protección que resultan ser muy costosas. Actualmente el medio idóneo de transmisión para aplicaciones industriales es el cable de fibra óptica, que presenta las siguientes ventajas sobre los cables metálicos tradicionales:

- Su ancho de banda es 100 veces superior al del cable coaxial, por lo que puede sustituir a miles de cables de cobre, con el consiguiente ahorro de canalizaciones y bandejas de cables.
- La fibra óptica es inmune a las interferencias eléctricas.
- Tiene una alta resistencia a los ataques químicos y a las variaciones de temperatura, al estar fabricada de materiales de vidrio.
- Abundancia natural de los elementos con que se fabrican los materiales de vidrio de las fibras, especialmente aquellos que contienen alta concentración de sílice.
- Las tasas de error son menores a  $10^{-9}$ , al ser una transmisión de señales digitales.
- La fibra óptica es más ligera ( $\sim 50$  kg/km) y pequeña, lo que facilita su transporte e instalación, y aporta reducciones importantes con los costes de infraestructura de las instalaciones, tales como galerías y bandejas de cables.
- La fibra no es conductora, lo que aumenta la seguridad de los equipos y operarios.
- Tiene aislamiento galvánico total entre los extremos del cable, que carece de elementos metálicos conductores.
- Los precios están en constante descenso. Actualmente un cable con dos fibras ópticas fabricado en España cuesta por km la mitad que un cable con 100 pares de hilos de cobre.
- Es imposible detectar las fibras ópticas desde el exterior y garantizan el secreto de las informaciones transmitidas, al ser difícil pinchar o derivar los cables de fibra.



Cable de ocho fibras ópticas, tipo Iskamatik B, empleado en plantas de potencia.

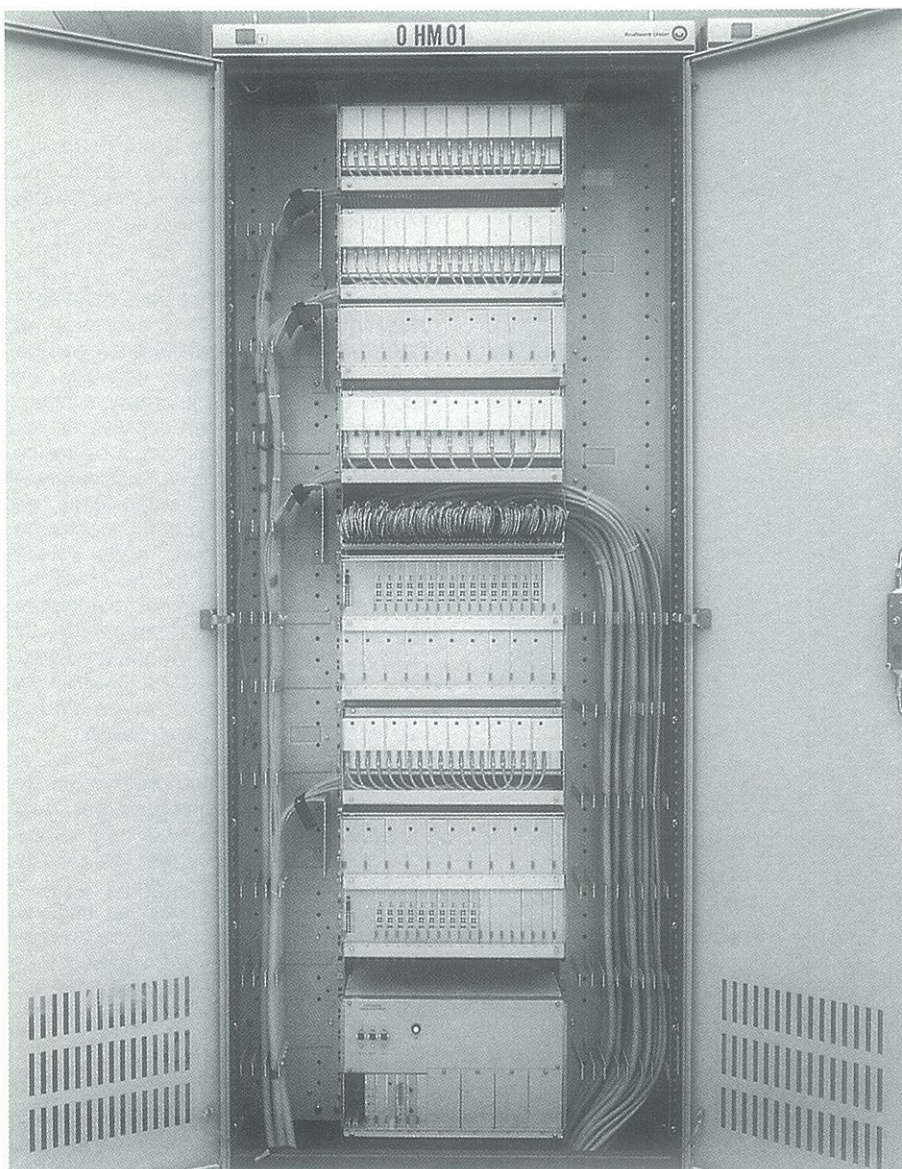
- Tienen grandes distancias de enlace sin repetidores (del orden de 40 km). En un futuro próximo, con fibras monomando trabajando en 1,5 micras, se podrán alcanzar distancias sin repetidor de 100 km.
- Con las altas velocidades de transmisión de las fibras (superiores a 1 Mbits/s) se abren nuevos campos de aplicación, tal como el de las protecciones diferenciales ultrarrápidas, registro de fenómenos de transitorios, etc.
- Con el actual desarrollo de transductores ópticos de magnitudes eléctricas en alta tensión se podría reemplazar los voluminosos y costosos equipos de medida actuales y realizar una transmisión directa al centro de control.
- Las fibras ópticas deben sustituir ventajosamente a los sistemas de radioenlace para telecontrol, ya que éstos actualmente tienen grandes dificultades en encontrar bandas de frecuencia libres en el espectro radioeléctrico, y, por otra parte, tienen una relativa baja relación señal-ruido.

## APLICACIONES ACTUALES DE LA FIBRA OPTICA EN EL SECTOR ELECTRICO

Durante la segunda mitad de la década de los 80 se han desarrollado varios programas de investigación y puesta en servicio de varias instalaciones experimentales de aplicaciones de la fibra

óptica en el sector eléctrico, entre los que destacan:

- Puesta en servicio de un enlace por fibras ópticas en la línea de 220 kV Orcoyen-Cordovilla, de 8,5 km, en Navarra. El cable óptico tiene seis fibras y va sujeto al hilo de tierra. Se utiliza una fibra en cada sentido de la transmisión. En cada extremo del enlace existe un equipo multiplex de 30 canales telefónicos, a través de uno de los cuales se transmite el telemando de unas de estas subestaciones. Las cuatro restantes fibras se utilizan para medición de los parámetros de transmisión con las condiciones meteorológicas.
- En la ET Morata se ha instalado un anillo de fibras ópticas que unen el cuadro de control y las casetas del parque, de 400 y 200 kV. A través de este anillo se efectúa un intercambio de información entre seis transceptores ópticos y sus correspondientes multiplexores. Las informaciones transmitidas corresponden a las medidas de potencia activa y reactiva de líneas, medidas de contadores, señalización y mando de interruptores, alarmas, etc.
- Varias empresas eléctricas tienen en proceso de desarrollo la aplicación de sistemas ópticos para el telecontrol de subestaciones.
- Entre las ET Villaverde-Melancólicos se han instalado 11 km de fibra óptica, sujeta al cable de tierra de una línea de 138 kV. A través de este cable óptico se transmiten 30 canales



Armario para transmisión de señales con fibras ópticas.

telefónicos con multiplexores PCM (Modulación por Codificación de Impulsos), así como los datos meteorológicos en la subestación de Melancóicos.

- La empresa pública también ha manifestado su interés, a través de proyectos presentados en OCIDE sobre la aplicación de las fibras ópticas a la transmisión de señales para mando, señalización, medida y protección en las redes eléctricas.
- REDESA también ha desarrollado un plan de investigación de protecciones de diferenciales de líneas de fases segregadas comunicadas por fibras ópticas.
- Dentro del campo internacional es importante mencionar los nuevos equipos Iskamatic B, de Siemens, para la transmisión de señales por fibra óptica, para control de procesos en

plantas de potencia y con una velocidad de transmisión de 100 Mbits/s. Con estos nuevos equipos se inicia una estandarización de la aplicación de la fibra óptica a procesos industriales que va tomando progresivamente en el futuro un mayor número de aplicaciones, especialmente en sistemas con requisitos de alta seguridad.

## PARAMETROS FUNDAMENTALES DE LAS FIBRAS OPTICAS

### FUENTES OPTICAS

El interés de las comunicaciones ópticas se inició con la primera demostración del láser en 1960, con la emisión de un

intenso rayo electromagnético aproximadamente monocromático, con unas frecuencias 10.000 veces más altas que las empleadas en los servicios de comunicación por radio de entonces. Puesto que la capacidad de transporte de información aumenta proporcionalmente con la frecuencia, se despertó un gran interés en el desarrollo de estos dispositivos para las comunicaciones.

Desde entonces se ha realizado un gran progreso en el desarrollo de láseres compactos, fiables y de larga duración. Aunque para muchas aplicaciones se utiliza el láser (LD), para otras se utiliza en su lugar un dispositivo más simple y barato, denominado diodo emisor de luz (LED).

Para las comunicaciones ópticas se desea no sólo que la fuente de luz sea lo más intensa posible, sino que tenga también un tamaño comparable al de la fibra óptica, del orden de centésimas de milímetro. Como, además, las fibras tienen una pérdida menor en la zona infrarroja del espectro, son preferibles las fuentes que emitan en esa región.

Las fuentes de láser tienen dos ventajas importantes. La primera es su gran direccionalidad. Por la emisión estimulada de láser se emite un rayo muy estrecho, que hace posible un acoplamiento directo con la fibra sin casi pérdidas de la radiación. La segunda ventaja es que, como todas las fuentes láser, presenta una dispersión cromática de longitudes de onda muy pequeña.

Esto es importante, pues, como veremos, en la transmisión a través de una fibra óptica, los rayos con diferente longitud de onda se propagan con velocidades ligeramente diferentes, lo que ocasiona un ensanchamiento de los impulsos proporcionalmente con el ancho de banda de las longitudes transmitidas, reduciéndose, por tanto, la capacidad de transmisión de información.

Un láser típico tiene un ancho de dispersión de longitudes de onda de 3 nanómetros, mientras un diodo emisor (LED) tiene un dispositivo de 35 nanómetros. Por ello, las fuentes láser permiten transmitir para una distancia dada, a velocidades unas diez veces más altas que los LED.

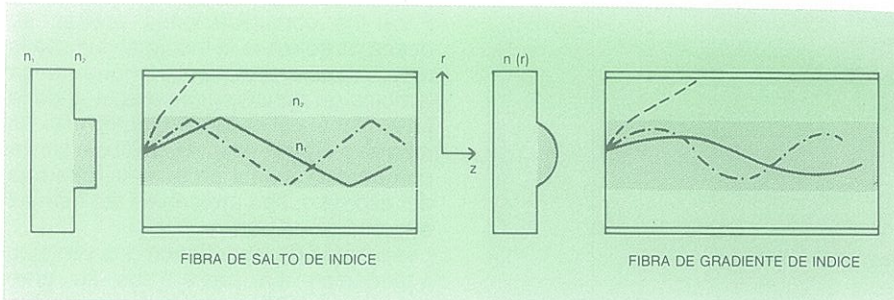
En la Tabla I se resumen las características de algunas de las fuentes ópticas principalmente utilizadas.

### LAS FIBRAS OPTICAS

En los sistemas de comunicación óptica, el alcance depende de la potencia de la fuente, de la atenuación por unidad de longitud de la fibra y del tipo de codificación que se utilice. Incluso en las mejores fibras se pierde algo de luz por absorción y esparcimiento, de forma que la energía de la señal luminosa decrece geométricamente a medida que ésta se propaga a través de la fibra hasta el detector.

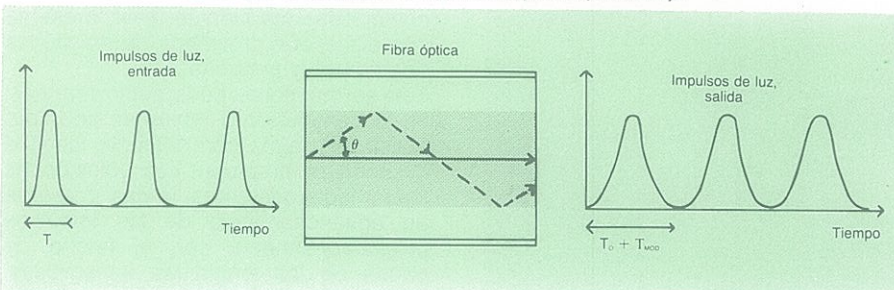
## T I FUENTES OPTICAS

| Fuente óptica                  | LD<br>AlGaAs | LD<br>GaInAsP | LED<br>AlGaAs | LED<br>GaInAsP | LD<br>Nd <sup>3+</sup> :YAG |
|--------------------------------|--------------|---------------|---------------|----------------|-----------------------------|
| Longitud de onda<br>(λ micras) | 0,7-0,9      | 0,9-1,7       | 0,7-0,9       | 0,9-1,7        | 1,06                        |
| Anchura espectral<br>(Δλ nm)   | 3            | 3             | 35            | 120            | 0,1                         |
| Potencia (mW)                  | 5            | 5             | 1             | 1              | 5                           |
| Pérdidas acoplamiento          | 50 %         | 50 %          | 5 %           | 5 %            | 0 %                         |
| Modulación (Gbits/s)           | 1            | 0,5           | 0,2           | 0,1            | 2                           |



**F I** Tipos de fibra óptica con diferente perfil radial del índice de refracción del núcleo discontinuo y continuo, mostrando las distintas trayectorias seguidas por los rayos de luz.

**F II** Ensanchamiento de los impulsos a través de una fibra óptica debido a la dispersión modal, al tener los rayos distintos tiempos de propagación según su ángulo respecto al eje.



El método más eficaz de transmitir la información ópticamente a través de una fibra es mediante impulsos ópticos, codificándola digitalmente (PCM). Es por ello importante conocer los parámetros físicos que afectan a la transmisión de un impulso óptico a través de una fibra.

### Dispersión modal

La fibra óptica consta normalmente de dos cilindros concéntricos: el núcleo de fibra y el revestimiento para su protección. La luz emitida por la fuente ilumina el núcleo. Una parte de la luz atravesará la fibra a lo largo del eje del núcleo, mientras la restante entrará formando cierto ángulo. La dispersión angular de la radiación de la fuente siempre será proporcional a su dispersión cromática de longitudes de onda.

El núcleo de la fibra se construye de forma que tiene en su parte central un

índice de refracción más alto que en su zona externa periférica.

La luz que llega con un ángulo de incidencia elevado con respecto al eje llegará a la interfase y será absorbida. Debido a que el índice de refracción es mayor en la zona central que en la zona externa, los rayos que entran con un ángulo de incidencia pequeño respecto al eje serán totalmente reflejados y volverán al núcleo (figura I). Este proceso de reflexión se repite una y otra vez guiando los rayos luminosos a lo largo de la fibra, con tal de que no existan curvas agudas. Tales curvas pueden ser evitadas encerrando cuidadosamente las fibras en un revestimiento rígido. Aunque existe reflexión total en los rayos confinados en fibras de salto de índice, siempre se produce una pérdida de energía en la reflexión por efecto túnel al revestimiento. Esto se evita en las fibras de gradiente de índice, disminuyendo el índice de refracción de forma gradual

desde el centro hasta la periferia (figura I). De esta forma, los rayos confinados siguen una curva continua casi senoidal sin sufrir reflexiones totales y, por tanto, una menor atenuación.

Las fibras de gradiente tienen otra importante ventaja y es que tienen una menor dispersión modal. Un rayo que entre paralelo al eje en una fibra de salto de índice recorrerá una distancia menor que otro rayo que entre con un cierto ángulo y se propague a través de la fibra reflejándose, y cuanto mayor sea el ángulo, mayor será la distancia recorrida y, por tanto, el tiempo invertido en recorrer una determinada distancia (figura II). En consecuencia, un impulso de luz formado por una combinación de rayos emitidos con diferentes ángulos aumentará su duración en el tiempo según se propaga a través de la fibra, fenómeno conocido como dispersión modal. En las fibras de gradiente de índice, la luz en las regiones de índice de refracción más bajo se propaga más rápidamente. Al hacer que el índice de refracción disminuya radialmente de forma gradual se puede hacer que todos los rayos lleguen a su destino casi al mismo tiempo.

Por tanto, en la dispersión modal, si introducimos en la fibra un impulso de luz cuya energía se distribuye por igual entre los modos guiados, se origina una separación temporal entre los modos más lentos y más rápidos al ir propagándose. La diferencia de tiempos entre la trayectoria axial y la de máxima inclinación posible para un modo guiado:  $\theta = [2(n_2 - n_1)]^{1/2}$ , en una fibra de salto de índice es:

$$T_{MOD} = n_1 L/C (1/\cos \theta - 1)$$

El tiempo de propagación por el eje axial es  $T = n_1 L/C$  y  $L$  es la longitud de la fibra, y  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción del núcleo y periferia de ésta. Para una fibra típica de  $n_1 = 1,45$  y  $n_2 = 1,46$ , el ensanchamiento de origen modal es de 50 nanos/km.

En la fibra de índice cuyo índice de refracción siga la ley:

$$n(r) = n_1 [1 - 2(n_2 - n_1)(r/a)^2]^{1/2}$$

donde  $a$  es el radio del núcleo, la distorsión modal se reduce a:

$$T_{MOD} = T(n_2 - n_1)^2/8$$

cuando toma el valor óptimo:

$$\alpha = 2 [1 - \lambda/(n_2 - n_1) d(n_2 - n_1)/d\lambda]$$

Para el anterior ejemplo, la dispersión modal es ahora de 0,061 nanos/km. Sin embargo, cuando difiere de su valor óptimo, la dispersión modal crece mucho. Actualmente se han desarrollado fibras cuyo perfil está optimizado para trabajar en las dos ventanas de longitud de onda

de 0,85 micras y 1,3 micras, teniendo una dispersión a estas longitudes de onda de 0,5 ns/km.

El ensanchamiento de los impulsos ópticos al propagarse por una fibra óptica limita la capacidad de transmisión, de forma que para tener una buena resolución la separación mínima entre impulsos no debe ser menor que la mitad de su anchura. Por tanto, para un impulso arbitrariamente estrecho (para fuente sin dispersión espectral) y con dispersiones modales de 0,5 y 50 ns/km, correspondiente a fibras típicas de gradiente de índice y salto de índice, la velocidad máxima de transmisión será de 1 Gbits/s y 10 Mbits/s, respectivamente.

## Dispersión material

El material de vidrio con el que se fabrican las fibras ópticas es dispersivo, de forma que el índice de refracción varía no linealmente con la longitud de onda. Esto significa que dos rayos de luz con distinta longitud de onda tendrán tiempos de propagación diferentes a través de una misma fibra. El ensanchamiento medio temporal de un impulso viene dado por:

$$T_{MAT} = - (L/C) \lambda \Delta\lambda (d^2 n/d\lambda^2)$$

siendo L la longitud de la fibra; C, la velocidad de la luz, y  $\lambda$ ,  $\Delta\lambda$ , la longitud de onda y la anchura espectral de la fuente de luz.

Para una fuente de láser típica con  $\lambda = 850$  nm e  $\Delta\lambda = 3$  nm se tiene por efecto de la dispersión material un ensanchamiento de los impulsos del orden de  $T_{MAT} = 0,6$  ns/km. Para un diodo LED, con  $\lambda = 850$  nm e  $\Delta\lambda = 35$  nm se tiene un ensanchamiento  $T_{MAT} = 7$  ns/km.

Aunque el material no fuese dispersivo, si la fase de la constante de propagación de cada modo no variase linealmente con la longitud de onda, se produciría también un ensanchamiento de los impulsos de luz al propagarse por la fibra. Sin embargo, en la mayoría de los casos este efecto es depreciable frente a la dispersión material.

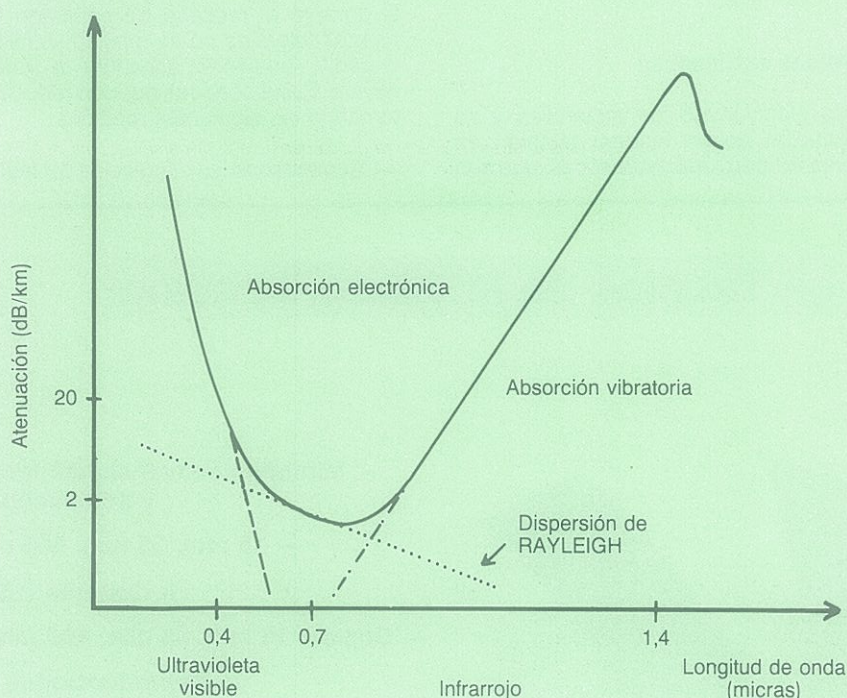
En primera aproximación, se admite que existe una independencia estadística entre los diferentes mecanismos que provocan un ensanchamiento de los impulsos de luz al propagarse por una fibra. El valor cuadrático medio del ensanchamiento de los impulsos será:

$$T_{TOTAL}^2 = T_{MOD}^2 + T_{MAT}^2$$

De la Tabla II se deduce que una fibra de gradiente de índice está muy infrutilizada si se conecta a una fuente LED. Tampoco obtenemos ninguna ventaja adicional si utilizamos una fuente láser en vez de un LED acoplada con una fibra de salto de índice.

**T II ENSANCHAMIENTOS TEMPORALES (T) DE LOS IMPULSOS DE LUZ EN FUNCION DEL TIPO DE FIBRA Y FUENTES OPTICAS**

|                                                    | $T_{MODAL}$<br>(ns/km) |                                                               | $T_{MAT}$<br>(ns/km) |            |
|----------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------|------------|
| Fibra salto índice (sin)                           | 50                     | Láser (LD)<br>$\lambda = 850, \Delta\lambda = 3 \text{ nm}$   | 0,6                  |            |
| Fibra gradiente (grin)                             | 0,5                    | Diodo (LED)<br>$\lambda = 850, \Delta\lambda = 35 \text{ nm}$ | 7                    |            |
|                                                    |                        |                                                               |                      |            |
|                                                    | Sin y LD               | Sin y LED                                                     | Grin y LD            | Grin y LED |
| $T_{TOTAL}$ (ms/km)                                | 50                     | 50,5                                                          | 0,8                  | 7          |
| Capacidad de transmisión, impulsos/s $\times 10^6$ | 20                     | 19,8                                                          | 1.250                | 143        |



**F III** Proceso de atenuación intrínseca de la luz en una fibra óptica de vidrio.

## Atenuación

Aun cuando la luz entre en la fibra óptica, en su propagación a lo largo de ésta puede sufrir procesos de difusión interna y absorción que impidan su propagación y atenúen la señal. La atenuación es debida a tres procesos independientes: la absorción electrónica, la difusión luminosa y la absorción vibratoria, como fenómenos intrínsecos, así como una serie de factores extrínsecos.

La absorción electrónica es la responsable de la atenuación para longitudes de onda pequeña en el ultravioleta, debido a la absorción de la luz por los electrones de enlace de los átomos de la fibra y su disipación en forma de calor.

Para longitudes de ondas mayores (región del visible) domina la difusión de tipo Rayleigh, cuyas pérdidas en dB son inversamente proporcionales a  $\lambda^4$ . Son debidas a procesos de difusión originados por variaciones locales del índice de

refracción debidos a cambios en densidad y composición. La difusión de Rayleigh es poco importante para aquellos materiales, en que la temperatura de transición del vidrio es baja y los índices de refracción son pequeños.

Como ejemplo típico, este mecanismo contribuye con pérdidas de 1,5 y 0,3 dB/km a las longitudes de onda de 850 y 1.300 nm, respectivamente.

La absorción vibratoria se produce para longitudes de onda muy largas, en el infrarrojo. Para ciertas longitudes de onda de resonancia, la energía luminosa se absorbe por los enlaces atómicos y se convierte en energía vibratoria de los átomos. La longitud de onda de resonancia tiende a disminuir cuanto menor es la masa del par iónico y mayor es el enlace interatómico. La absorción vibratoria tiende a aparecer gradualmente a medida que nos acercamos a la longitud de onda resonante.

Las tres formas de pérdida de energía anteriores son de tipo intrínseco por ser inherentes al material y se han representado en la figura III.

### Pérdidas extrínsecas

En la elección de los materiales y su fabricación deben tenerse también en cuenta las pérdidas extrínsecas, que son

el resultado de la presencia de elementos contaminantes con resonancias de absorción.

Por ejemplo, una concentración de una parte por millón de iones de metales pesados produce una atenuación del orden de 1 dB/km. Otro contaminante de difícil erradicación es el grupo  $\text{OH}^-$  del agua. Esta estructura presenta resonancia en 2,72 micras y sus armónicos en 1,38, 0,95 y 0,72. Una contaminación de una parte por millón produce una atenuación de 1 dB/km a 0,95 micras. La tecnología actual ha reducido estas pérdidas a 0,04 dB/km.

Otros factores que contribuyen a pérdidas de tipo extrínseco son las irregularidades de tipo geométrico, por variaciones del diámetro de la fibra y tortuosidades del eje axial por microcurvaturas. Estas pérdidas son aproximadamente independientes de la longitud de onda y se producen por un acoplamiento de los modos guiados con estas irregularidades que generan en una fuga de potencia por radiación. Sin embargo, este tipo de pérdidas puede ser de gran importancia, si durante el proceso de cableado las fuerzas laterales no se mitigan suficientemente, pudiendo ascender a varios dB/km. Estas pérdidas pueden reducirse tomando las siguientes medidas:

— Aumentando las diferencias del índice

de reparación entre el núcleo y periferia.

- Aumentando el diámetro de la fibra.
- Embutiendo la fibra en un material plástico blando y recubriéndolo posteriormente con un material más duro.

Adicionalmente, y siempre que la fibra se vea sometida a una curvatura o pandeo (producido por el tendido del cable), se produce una atenuación por fuga de radiación. No obstante, como esta atenuación adicional varía exponencialmente con el radio de la curvatura, estas pérdidas pueden ser despreciables, siempre que no se sobrepase un radio de curvatura mínimo, que para una fibra típica está entre 1 y 10 cm.

La atenuación más baja que se ha alcanzado en la actualidad es del orden de 0,2 dB/km, a una longitud de onda de 1,5 micras. Este valor coincide bastante bien con el límite de transparencia intrínseco predicho para los vidrios de sílice. En los empalmes de fibras ópticas se produce una atenuación adicional. Con los conectores actuales estas pérdidas son inferiores a 0,2 dB por empalme.

En las instalaciones actuales efectuadas para comunicaciones por medio de fibra óptica, las pérdidas registradas han sido inferiores a 0,3 dB/km, a 1,3 micras, por lo que los repetidores pueden estar separados por una distancia de 40 km.