

CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS

Sobre las características geométricas, ópticas y eléctricas de las fibras ópticas. Referido a la atenuación y el ancho de banda.

1- FIBRAS ÓPTICAS

J.Tyndall-1870 había realizado una demostración de propagación de luz en un cilindro transparente con agua. Los efectos de reflexión se conocen desde el siglo IV aC y de refracción desde el siglo II aC (Ptolomeo) Es **N.French**-1934 quien patenta el teléfono óptico. En 1950 las fibras ópticas con una gran atenuación eran usadas en endoscopía e instrumentación. Sólo a partir de 1970 cuando la Corning G.W. logra fibras de 20 dB/km y C.A.Burrus de la Bell Labs desarrolla el Láser de onda continua de As Ga (Arseniuro de Galio) se produce el verdadero despegue de los sistemas ópticos.

Cuando **C.K.Kao**-1966 indicó la posibilidad de reducir la atenuación para ser usadas en transmisión, se tenían los valores de 10^3 dB/km. En 1970 se obtienen valores alentadores de atenuación: 20 dB/km. Y luego: en 1972 se tienen 4 dB/km, en 1974 se tiene 2,2 dB/km; en 1976 se llega a 1,6 dB/km; en 1980 se arriba al límite teórico de 0,2 dB/km. En el año 2000, con fibras ópticas con flúor, se tendrán 10^{-3} dB/km. Esta secuencia ilustra como se ha precipitado el avance tecnológico y es coincidente con todas las ramas de la ciencia y la tecnología (**Fig 05**). El primer sistema de fibras ópticas se realizó para aplicaciones militares en 1973 y la Western Electric lo aplicó en Atlanta en 1976 para telefonía comercial. El uso comercial de las fibras ópticas se pensó en un principio con **propagación monomodo**, pero los problemas de acoplamiento entre núcleos llevaron a crear las fibras ópticas multimodo con perfil gradual como solución alternativa. A partir de 1985, en telecomunicaciones, sólo se usan fibras ópticas monomodo.

Originalmente se usó la **primer ventana** (0,85 μ m) debido a dos razones. En principio, la atenuación producida por los iones OH sobre la segunda ventana (1,3 μ m) impedían alcanzar los límites teóricos. Con el perfeccionamiento de los métodos de fabricación se llegó a los límites teóricos de atenuación (dispersión de Rayleigh) y la segunda ventana resultó ser más interesante que la primera. La segunda razón es el tipo de semiconductor que es usado para la emisión. En la primer ventana se usan derivados de AsGa (Arseniuro de galio) y en la segunda derivados de InP (Fosfuro de indio). Los primeros estaban disponibles con anterioridad debido a la aplicación en microondas desde 1960. La segunda ventana es muchas veces más atractiva que la tercera por tener valores de atenuación sólo algo mayor y tener el mínimo de dispersión cromática.

Los **nuevos desarrollos** en fibras ópticas tienen varias líneas de investigación. Las fibras policristalinas tienen muy pobres propiedades mecánicas y sufren de esparcimientos de las señales inducidas. Los vidrios de Germanio (GeO_2) son de fácil producción pero tienen una longitud de onda de corte reducida. Los vidrios calcónidos (AsS ; AsSe) tienen un mínimo ancho de banda teórico de 0,01 dB/km a 4,54 μ m. Los vidrios fluorados (ZrF_4) son los más interesantes con atenuación de 0,001dB/km a 3,44 μ m. Por ejemplo, ya se producen fibras de flúor con diámetro de 150 μ m y NA de 0,2 debajo de 1 dB/km entre 0,5 y 2 μ m. (Referencia: **Fig 04**).

Las FO se utilizan en varias aplicaciones industriales como sensores. Por ejemplo, el puente Taylor sobre el río Assiniboine en Canadá está construido con vigas de polímero reforzado de fibras de Carbono y vidrio. En su interior las FO llevan luz hasta detectores de presión. La longitud de onda reflejada por los medidores depende de la temperatura y la presión.

CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS

2- PROPAGACIÓN DEL CAMPO EH EN LA FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica **FO** (*Fiber Optic*) se encuentra compuesta de 3 capas de material:

- El centro o **núcleo** (*Core*), cuya estructura y dimensiones dependen del tipo de FO y está fabricado en $\text{SiO}_2 + \text{GeO}_2$.
- El **revestimiento** (*Cladding*) de 125 μm de diámetro y construido de dióxido de silicio SiO_2 .
- El **recubrimiento** primario (*Coating*) de acrilato y 245 μm de diámetro.

El núcleo retiene casi la totalidad del campo transportado; el revestimiento de 125 μm permite definir en torno del núcleo un índice de refracción levemente (1%) inferior; el recubrimiento de 245 μm ofrece una protección contra la oxidación del SiO_2 debido a la humedad ambiente.

El presente Trabajo se refiere al estudio de las características de la FO como medio de transmisión. Una propuesta para analizar las características de las fibras ópticas se refiere a una clasificación del siguiente tipo:

- Características dimensionales y geométricas** (radio del núcleo y el revestimiento, concentricidad, circularidad).
- Características ópticas** (apertura numérica, perfil del índice de refracción, diámetro del campo monomodal, dispersión modal y cromática, etc.).
- Características de transmisión** (ancho de banda, atenuación).

Si bien esta clasificación puede considerarse válida en sí misma, se encuentra que las divisiones no son nítidas y que un estudio correlativo no resulta didáctico. Ponderando esta razón se selecciona un camino didáctico para el estudio de las características de las fibras ópticas.

El estudio detallado de la propagación de ondas electromagnéticas, con longitudes de onda cercanas a 1 μm , en una guía de ondas dieléctrica circular (la fibra óptica), requiere del planteo de las ecuaciones de Maxwell con las condiciones de contorno apropiadas. Aquí se analizan los resultados necesarios para la descripción de las características de las fibras ópticas sin profundizar en las herramientas matemáticas.

2.1- APERTURA NUMÉRICA

Un análisis inicial y conceptualmente válido se puede encarar con el auxilio de la física clásica (Teoría Corpuscular de Newton), que considera a la luz como un corpúsculo o partícula. Si se hace incidir la luz sobre una superficie plana que separa a dos medios dieléctricos con distinto **índice de refracción**, se obtiene que: parte de la energía se refleja (rebota con un ángulo de reflexión igual de incidencia) y parte se refracta (atraviesa la superficie variando el ángulo según la ley de Snell). Este último resultado se observa en la **Fig 01**. En la teoría clásica de electromagnetismo la energía electromagnética se comporta como una partícula para la reflexión y como una onda para la refracción. Esto da lugar a la denominada "dualidad onda-partícula" de la teoría cuántica.



En la misma figura se muestra a la fibra óptica como un cilindro con dos capas concéntricas de material altamente transparente (cristal de SiO_2). El interior se denomina **núcleo** (*core*) y el exterior **revestimiento** (*cladding*). Los índices de refracción se indican como n_1 y n_2 . El índice n_1 es levemente mayor que n_2 , cerca del 1%. Mediante la ley de Snell se puede indicar que:

$$\text{sen } I \cdot n_1 = \text{sen } R_c \cdot n_2 \quad \text{y} \quad I = R_x$$

donde I es el ángulo del rayo de incidencia, R_x el ángulo de reflexión y R_c de refracción. Se tiene entonces que para un valor determinado de I el ángulo R_c vale 90° , se produce entonces la denominada reflexión total de la energía incidente. Todos los rayos de luz que inciden sobre la interfaz núcleo-revestimiento con ángulo superior a dicho valor I se reflejan y se encontrarán guiados dentro del núcleo gracias a múltiples reflexiones.

Por ejemplo, si $n_1=1,48$ y $n_2=1,47$ para que $R_c=90^\circ$ el valor de I será 83° . Este sería el ángulo límite. Si se extrae el ángulo límite fuera de la fibra óptica, se tiene un caso similar al anterior con un ángulo de incidencia Φ en el aire ($n_0=1$) y con un ángulo de refracción R_c en el núcleo ($n_1=1,48$). En tal caso se tiene $R_c=7^\circ$, resultando en un ángulo $\Phi=10^\circ$.

CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS

Debido a la simetría circular se tiene que todos los rayos de luz que inciden dentro del cono con ángulo Φ se encontrarán con un ángulo mayor al crítico y por lo tanto serán guiados dentro del núcleo sin refracción. Los que estén fuera del cono sufrirán sucesivas refracciones y se atenuarán paulatinamente en los primeros metros de fibra óptica. Incluso en pequeñas curvaturas cambiarán las condiciones de reflexión y existirá refracción parcial introduciendo una atenuación sobre la energía propagada, como se muestra en la Fig 01.

Se denomina apertura numérica **NA** (*Numerical Aperture*) al valor sin unidad;

$$NA = \sin \Phi = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

El valor de NA para el ejemplo que se desarrolla será 0,17. Los valores típicos reales se encuentran entre 0,2 y 0,25. Una elevada NA permite un mejor acoplamiento (mayor introducción de luz en el núcleo), pero incrementa la atenuación.

Si dos fibras ópticas tienen igual NA se tiene que el ángulo de emisión de luz es igual al de aceptación de la siguiente y por lo tanto se produce un acoplamiento de luz perfecto. En los cables de cobre la característica que determina una condición semejante es la **impedancia de la línea Zo**. Si dos líneas tienen igual impedancia Zo el acoplamiento de energía es completo y no existe onda reflejada (Pérdida de retorno). Por lo tanto, se suele comparar la característica de apertura numérica de las fibras ópticas con la impedancia característica de las líneas o guías de ondas.

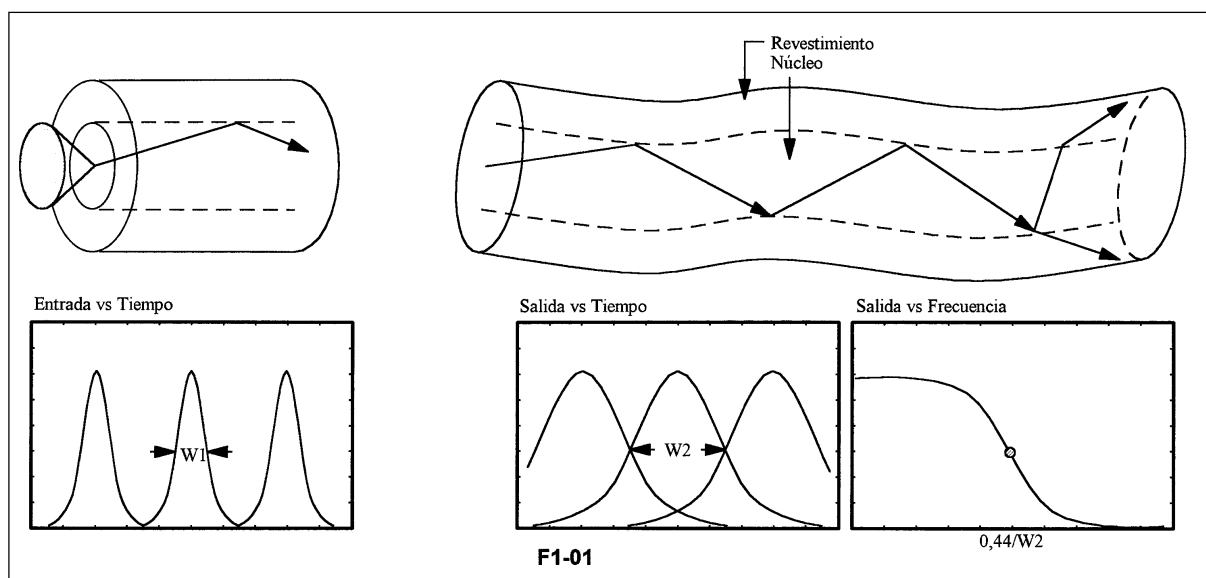


Fig 01. Apertura numérica en las fibras ópticas.

CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS

3- ANCHO DE BANDA

3.1- DISPERSIÓN MODAL

En el tipo de fibras ópticas bajo análisis en la **Fig 01**, denominadas multimodo, los distintos rayos propagados recorren distintos caminos, sufriendo, según el ángulo, distintas reflexiones. Se tiene de esta forma que al introducir en el extremo de la fibra óptica un impulso de luz, en el otro extremo se produce una dispersión en la llegada de los distintos rayos. En otras palabras, si se inyecta a un mismo tiempo un determinado número de fotones (partícula asociada a la energía electromagnética) en la salida se identificarán en el tiempo debido a los distintos recorridos. En realidad, la identificación de cada fotón requiere de un instrumento de detección de muy alta velocidad de respuesta (gran ancho de banda), como el contador de fotones. Con instrumentos de detección más simples se obtiene una medida que es la integración de la energía recibida y se asocia generalmente a un pulso de forma gaussiana.

A esta **dispersión o apertura** del impulso de ingreso se la denomina **modal o intermodal** debido a que en la teoría electromagnética se denomina **modo de propagación** al rayo de la física clásica. La definición de la dispersión modal se realiza con pulsos gaussianos de entrada y salida, escribiéndose como:

$$W_m = (W_s^2 - W_e^2)^{1/2}$$

donde W_e es la apertura del impulso de entrada a mitad de altura y W_s la apertura de la salida. La dispersión modal resulta ser el ensanchamiento adicional del pulso de entrada. Al considerar al **pulso en el tiempo con forma de onda gaussiana** se puede escribir:

$$S(t) = \exp[-2,77 \cdot (t/W_m)^2]$$

Para conocer las **características de transferencia** de la fibra óptica debemos encontrar la transformada de Fourier de $S(t)$:

$$S(f) = 0,17 \cdot W_m \cdot \exp(-3,56 \cdot f^2 \cdot W_m^2)$$

De esta forma se tiene que el ancho de banda definido a 3 dB de atenuación de potencia óptica respecto al nivel en 0 Hz será (la constante 0,44 aparece para uniformar unidades):

$$AB = 0,44/W_m$$

Obsérvese de la expresión que el **ancho de banda** es inversamente proporcional a la **dispersión modal W_m** . El valor de W_m se expresa por unidad de longitud de la FO. Siendo cómodas las unidades nseg/km. El ancho de banda AB disminuye con el incremento de la longitud del enlace y se expresa en unidad de MHz.km. En otras palabras, dada una longitud de enlace se tiene un valor límite de separación temporal entre pulsos de información sin exceder una superposición tolerable. Con mayor velocidad los pulsos adyacentes se interfieren y se incrementa la tasa de error de bit BER.

Se recuerda que, como la corriente eléctrica es proporcional a la potencia óptica, es decir que la potencia eléctrica es proporcional al cuadrado de la potencia óptica, los 3 dB ópticos corresponden a 6 dB eléctricos.

Existen dos formas de reducir la dispersión modal para incrementar el ancho de banda disponibles de la fibra óptica: produciendo una variación gradual del perfil del índice de refracción y permitiendo la propagación de un solo modo. De esta forma, se logra clasificar las fibras ópticas.

- Según el perfil del índice de refracción: abruptas (o salto de índice) y graduales
- Según el número de modos de propagación: multimodo (más de un modo) y monomodo.

3.2- PERFIL DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN

Se analiza inicialmente la solución que recurre a la variación gradual del índice de refracción. Se obtiene la siguiente cadena de acontecimientos:

- La dispersión modal se produce porque los distintos modos de propagación recorren distintos caminos en distinto tiempo.
- La velocidad de propagación del modo en el medio dieléctrico es c/n (c la velocidad de la luz en el vacío $3 \cdot 10^5$ Km/s).
- De esta forma los rayos que recorren mayor camino lo hacen por la periferia del núcleo.
- Lo hacen allí donde el índice de refracción es menor que en el centro y donde la velocidad también es mayor.
- Luego: la mayor longitud de recorrido se compensa con la mayor velocidad de propagación.

En la **Fig 02** se ha representado a la fibra de índice gradual con un recorrido de rayos que se curvan suavemente debido a que no existe una interfaz abrupta entre el núcleo y el revestimiento. Se demuestra que el mínimo de W_m se logra cuando el perfil del índice responde a la ley:

CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS

$$n(r) = n(0)^2 - AN^2 \cdot (r/ra)^\alpha \quad \text{con} \quad n(0) = n_1 \text{ y } n(ra) = n_2.$$

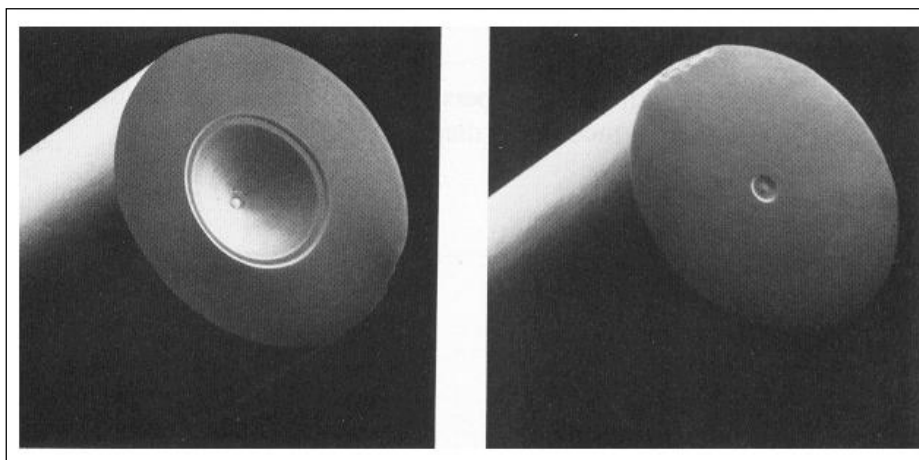
donde ra es el radio del núcleo y α un exponente que depende del material y de la longitud de onda que se transmite. El valor óptimo de α se encuentra cercano a 2 y puede describirse como:

$$\alpha_{opt} = 2 - 2 \cdot Po - \beta \cdot (2 - Po) \quad \text{con} \quad \beta = (n_1 - n_2)/n_1 \text{ y } Po = (n/ng) \cdot (\lambda/\beta) \cdot (d\beta/d\lambda)$$

donde el término $d\beta/d\lambda$ indica la dependencia del material y ng es el índice de refracción de grupo:

$$ng = n - \lambda \cdot dn/d\lambda$$

Se observa que una fibra óptica del tipo **multimodo con perfil de índice de refracción gradual parabólico** (α cercano a 2) es optimizada para trabajar en una longitud de onda. Existen fibras ópticas que se denominan de doble ventana que tienen anchos de banda similares, pero reducidos en ambas longitudes de onda. La apertura numérica en estas fibras ópticas se reduce desde el centro del núcleo hacia la periferia debido a la reducción del índice. Se define NA para la fibra óptica de índice gradual al valor que se calcula en el centro del núcleo.



El análisis de las fibras ópticas mediante la propagación de ondas lleva a la siguiente conclusión: el **número de modos de propagación N** dentro del núcleo es finito y puede aproximarse por:

$$N = \frac{(\alpha \cdot V^2)}{2 \cdot (\alpha + 2)} \quad \text{donde} \quad V = 2\pi \cdot ra \cdot AN / \lambda$$

De forma que el número de modos de propagación depende del perfil del índice, del radio del núcleo ra , de la longitud de onda λ y de la AN. El número V se denomina **frecuencia normalizada**.

De acuerdo con lo indicado, existe el perfil abrupto y gradual, que corresponde a:

-Índice abrupto ($\alpha = \infty$); $N = V^2/2$
 -Índice gradual ($\alpha = 2$); $N = V^2/4$

Esta aproximación es válida cuando N es mayor a la unidad. Suponiendo el caso de las fibras ópticas normalizadas por **G.651** (ver la Tabla al final de este Trabajo), se tiene con $ra = 25 \mu m$ y $AN = 0,2$:

	$\alpha = \infty$	$\alpha = 2$
$\lambda = 0,85 \mu m$	$N = 683$	$N = 341$
$\lambda = 1,30 \mu m$	$N = 292$	$N = 146$

El número de modos de propagación disminuye con el incremento de la longitud de onda y crece con el aumento del radio. El uso de un perfil parabólico ($\alpha = 2$) ha disminuido a la mitad el número de modos de propagación y con ello la dispersión modal.

3.3- LONGITUD DE ONDA DE CORTE

Otra solución para disminuir la dispersión modal es la reducción del número de modos a la unidad ($N=1$), obteniendo la denominada **fibra óptica monomodo**. A partir de 1985 solo las fibras monomodo se usan en telecomunicaciones; las

CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS

multimodo se reservan para redes de datos de corta longitud. Intuitivamente la dispersión modal es nula, lo cual llevaría a un ancho de banda infinito, algo imposible. Antes de aclarar este punto se analiza como se obtiene la propagación de un solo modo.

En la **Fig 02** se tiene la densidad de potencia de cada modo de propagación en función del radio del núcleo. Los picos de potencia cercanos a la periferia de los modos de orden superior justifica que el esquema de propagación de rayos se dibuje helicoidalmente. En la misma figura se tiene la densidad de potencia relativa entre los distintos modos de propagación en función del número V. Se recuerda que la nomenclatura indicada como $T_{m,n}$ representa: m el número de medias longitudes de onda a lo largo de la circunferencia y n el número a lo largo del diámetro.

El número de modos de propagación se reduce a uno ($N=1$) cuando:

$$V = 2,405 \cdot (1 + 2/\alpha)^{1/2}$$

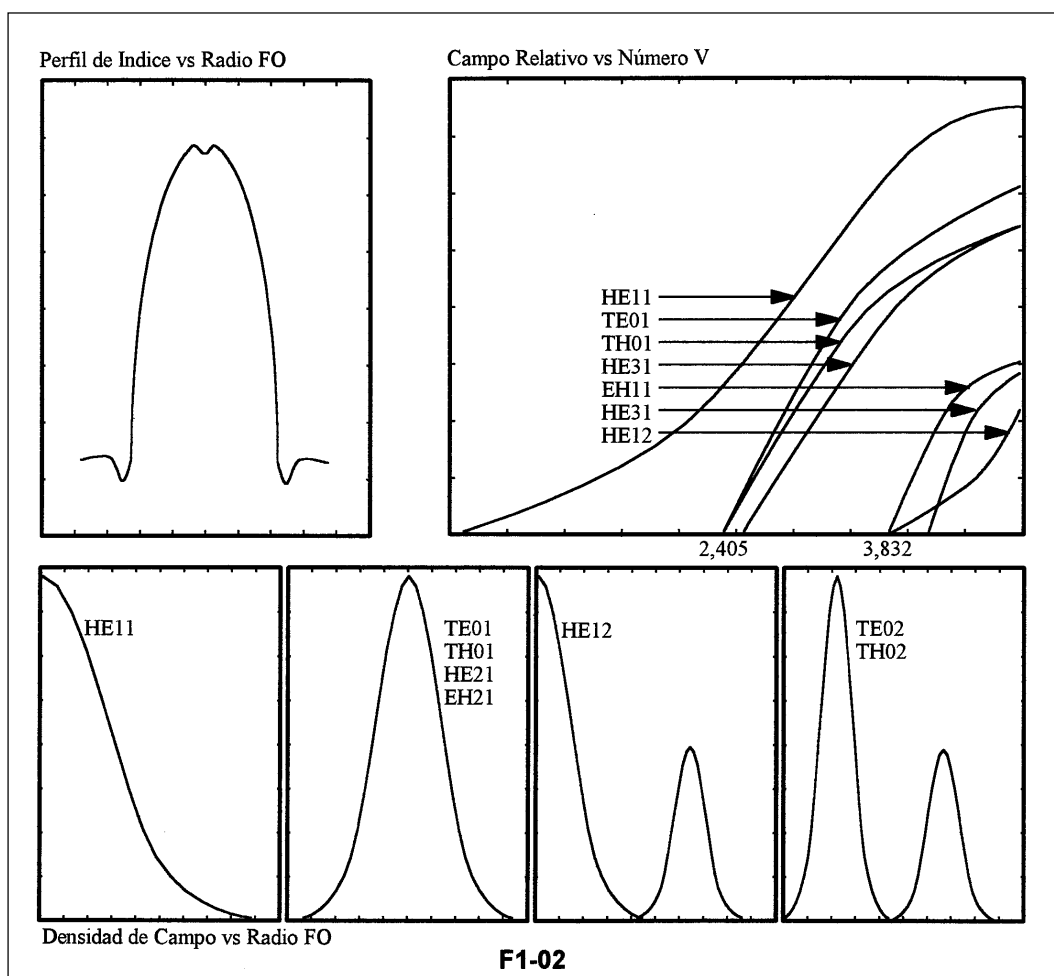


Fig 02. Distribución del campo electromagnético en el núcleo de la FO.

Para el caso del perfil de índice abrupto (el perfil gradual carece de sentido en la propagación de un solo modo) con α tendiendo a ∞ , se tiene que $V=2,405$.

El valor de α a partir de la cual la fibra óptica se comporta como monomodo se denomina **longitud de onda de corte** (λ_{cutoff}) y el ITU-T la define como aquella a donde la relación entre la potencia total y potencia del modo fundamental LP11 es de 0,1 dB. La fibra óptica monomodo se calcula para una longitud de onda de corte (longitud de onda para la cual $V=2,405$; es decir el modo de segundo orden deja de propagarse) entre 1,18 a 1,27 μm . Esto resulta en un diámetro del núcleo cercano a 9 μm .

DIÁMETRO DEL CAMPO MODAL. La NA no se define para fibras monomodo, tampoco se define el radio del núcleo. En cambio, se utiliza el denominado diámetro del campo monomodal. Este diámetro se define en base al campo emitido desde el extremo de la FO y es el ancho cuando la potencia emitida se reduce a e^{-2} (aproximadamente 0,13) del valor máximo considerando la emisión gaussiana del extremo de la fibra óptica. Formalmente se define el **diámetro del campo**

CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS

monomodal como la inversa del ancho cuadrático medio de la distribución del campo de emisión lejano de la fibra óptica (ITU-T G.652). Normalmente el diámetro del campo modal está determinado por el diámetro del núcleo y es un 15% mayor a éste.

3.4- DISPERSIÓN CROMÁTICA

Si la dispersión modal en la FO monomodo se anula el ancho de banda será infinito, lo cual no ocurre debido a que existe la dispersión cromática o intramodal que es de magnitud inferior a la dispersión modal y por ello permanece enmascarada en las fibras ópticas multimodo y ahora adquiere importancia. La dispersión cromática es la suma de la dispersión del material y de la dispersión de guía de ondas.

DISPERSION DEL MATERIAL. La dispersión del material se debe a que el índice de refracción del material es función de la longitud de onda. Por comodidad se suele definir el índice de grupo n_g :

$$n_g = c/v_g = n - (\lambda \cdot dn/d\lambda)$$

donde v_g es la velocidad de propagación de grupo. Obsérvese que el tiempo de propagación de las distintas longitudes de onda es distinto. Luego, existe una dispersión a la salida del modo de propagación debido a que las longitudes de onda que lo componen tienen velocidades diferentes.

Se define como dispersión del material a la variación diferencial del índice de refracción:

$$M(\lambda) = (-1/c) \cdot dn_g/d\lambda = (\lambda/c) \cdot d^2n/d\lambda^2$$

Se observa que cuando n disminuye la velocidad aumenta y el tiempo de propagación es menor. Existe un valor de longitud de onda cercana a $1,3 \mu m$ donde la dispersión del material es nula. En otras palabras, cerca de $1,3 \mu m$ los tiempos de propagación de las distintas longitudes de onda tienden a ser iguales. El ejemplo de la **Fig 03** se realiza tomando $\lambda = 1,1 \mu m$ como referencia.

El valor de $M(\lambda)$ puede aproximarse por:

$$M(\lambda) = [C1 \cdot \lambda - C2 \cdot \lambda^{-3}] \cdot 10^{-3} \text{ ns/nm.km} \quad \text{con } C1=24 \text{ y } C2=70$$

El valor de λ para el cual $M(\lambda)=0$ se denomina **longitud de onda de dispersión cromática nula** y depende del material. El valor aumenta con el incremento de la concentración de GeO_2 y disminuye con el incremento de B_2O_3 . El ancho de banda resultante será función inversa de $M(\lambda)$ y se expresa como:

$$AB = \frac{0,44 \cdot 10^6}{\Delta\lambda \cdot M(\lambda)}$$

donde el valor 0,44 surge de la conversión de FWHM a RMS, $\Delta\lambda$ en nm es el ancho espectral de la fuente definida como la diferencia entre las longitudes de onda donde la potencia óptica emitida es la mitad (FWHM). Este valor resulta en unidades de longitud MHz.km si la $M(\lambda)$ se expresa en ps/nm.Km.

Obsérvese que el ancho de banda se reduce cuando la fuente de luz tiene un ancho espectral grande, por lo que se buscará reducir dicho valor mediante el uso de emisores Láser. En la misma figura se muestra un ejemplo de cómo varía el ancho de banda en función de λ para distintos valores de $\Delta\lambda$.

DISPERSION DE GUIA DE ONDAS. La dispersión de guía de ondas se debe a imperfecciones en la relación entre el radio del núcleo r_a y la longitud de onda de la luz que se transmite. Como consecuencia de ello la distribución del campo y el tiempo de propagación son dependientes de r_a/λ . En general, esta dispersión se presenta en común con la dispersión del material y resultan inseparables.

Para aquel lector conocedor de los sistemas radioeléctricos, el efecto de la dispersión cromática puede ser interpretado como el retardo de grupo. En ambos casos las distintas componentes espectrales tienen velocidad de propagación diferente y se produce una distorsión. Sin embargo, el efecto en ambos sistemas es diverso debido a que la modulación de la señal en el sistema radioeléctrico es coherente y en los sistemas ópticos es una modulación de potencia (simple variación de la potencia óptica en dos niveles).

CARACTERÍSTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS

Así como en los sistemas radioeléctricos se disponen de ecualizadores para compensar el retardo de grupo en los sistemas ópticos se disponen de fibras ópticas que compensan la dispersión cromática. Una fibra óptica de este tipo posee un núcleo muy estrecho ($2\ \mu\text{m}$) y un salto de índice de refracción muy alto. La atenuación se incrementa, por lo que se realiza una reducción paulatina entre el núcleo de la FO normal y la de compensación de dispersión. Se utilizan algunos metros de FO de compensación por varios km de FO normal.

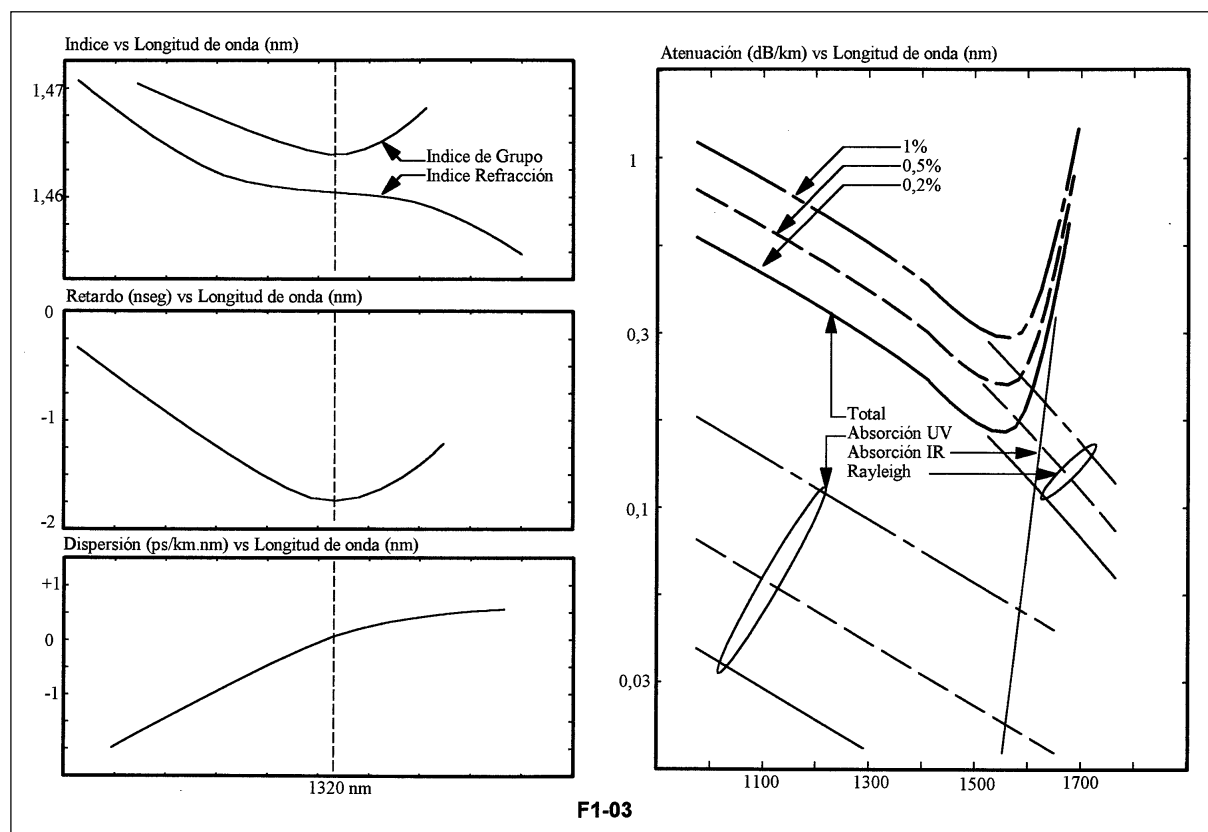


Fig 03. Dispersión cromática y atenuación óptica.

PENDIENTE DE DISPERSION CROMATICA. El efecto de la pendiente de la dispersión cromática es importante para enlaces de larga distancia. Los valores actuales son cercanos a $0,04$ a $0,10\ \text{pseg/km.nm}^2$. Una elevada pendiente introduce un efecto de intermodulación entre señales en WDM.

Existen FO que permiten compensar la pendiente de dispersión cromática. Son las FO **PDC** (*Passive Dispersion Compensator*). Poseen un núcleo muy estrecho ($2\ \mu\text{m}$) y un salto de índice de refracción muy alto. La atenuación se incrementa, por lo que se realiza una reducción paulatina entre el núcleo de la FO normal y la de compensación de dispersión. Se utilizan algunos metros de FO de compensación por varios km de FO standard G.652. La dispersión negativa es del orden de $-100\ \text{ps/km.nm}$ a $1550\ \text{nm}$. Por ejemplo, en el mercado se encuentran módulos de compensación para 40 y $80\ \text{km}$ de FO. El retardo disminuye con la longitud de onda ($1700\ \text{ps}$ a $1556\ \text{nm}$ y $1000\ \text{ps}$ a $1557\ \text{nm}$). El centro de la banda 1556 - 1557 puede correrse para otras longitud de ondas necesarias.

3.5- PMD (*Polarization Mode Dispersion*).

Las distintas polarizaciones de la luz se propagan a distinta velocidad y esto se interpreta como una dispersión. Las causas se deben a la geometría del núcleo, a esfuerzos de compresión, flexión o torsión. La PMD es un valor aleatorio que varía a lo largo del tiempo. Las FO desarrolladas en 1998 por *Lucent* permite reducir el efecto del PMD debido a que son fabricadas mediante un proceso giratorio para compensar deformaciones fijas.

El valor de PMD se mide en unidades de $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$. El requerimiento de PMD para una señal $2,5\ \text{Gb/s}$ es inferior a $2\ \text{ps}/\sqrt{\text{km}}$. En cambio para la transmisión de vídeo analógico en redes de CATV se requiere menos de $0,6\ \text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ para un ancho de banda de 60 canales.

Se disponen de FO que mantienen la polarización **PM** (*Polarization Maintaining*). Este tipo de FO-SM permite transmitir una luz polarizada con una relación de $30\ \text{dB}$ entre los ejes ortogonales. Este tipo de FO se logra mediante un núcleo no

CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS

simétrico en ambos ejes (un cladding interno oval o dos núcleos adicionales sobre un mismo eje). Se utiliza en óptica integrada, giróscopos ópticos, sensores y sistemas coherentes. Una FO puede actuar como polarizador debido a que cada eje tiene una longitud de onda de corte distinta; de forma tal que entre ambas longitudes de onda una polaridad se atenúa y la otra no. Este efecto se encuentra en un rango de 30 a 40 nm y permite formar polarizadores.

CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS

4. ATENUACIÓN ESPECTRAL

La estructura básica de la red cristalina de la fibra óptica es el dióxido de silicio SiO_2 , cuya disposición espacial responde a un tetraedro regular con el Oxígeno en los vértices y el Silicio en el centro. La elevada pureza del material contribuye a formar un retículo cristalino que se aleja un tanto de la definición del vidrio (producto inorgánico de fusión que se ha enfriado sin cristalizar).

Así como el ancho de banda se define como el valor de frecuencia de la modulación para la cual se tiene una atenuación de 3 dB respecto de la frecuencia cero, se define la atenuación de la fibra óptica como el valor de atenuación para una frecuencia modulante nula. La atenuación de la fibra óptica difiere de la producida por un par conductor. Mientras en el par la atenuación se incrementa con la función \sqrt{f} (f es la frecuencia de la señal transmitida) en la fibra óptica la atenuación permanece constante hasta una frecuencia de corte (ancho de banda).

Existen diversos mecanismos que contribuyen a la atenuación de las fibras ópticas, entre ellos tenemos: **las reflexiones, las dispersiones y las absorciones.**

REFLEXIÓN DE FRESNEL. Se produce en los extremos de las fibras ópticas debido al salto de índice de refracción entre el exterior y el núcleo. El valor se escribe como:

$$R_f \% = [(n_1 - n_0) / (n_1 + n_0)]^2 \cdot 100$$

con n_1 el índice del núcleo y n_0 el del medio exterior. Con $n_0=1$ y $n_1=1,48$ se tiene un valor de $R_f= 3,7\%$, es decir que la potencia reflejada está 14 dB por debajo de la potencia incidente. La expresión anterior es válida cuando el corte del extremo de la fibra óptica es perfectamente perpendicular. De lo contrario, la reflexión disminuye casi a 0% cuando el ángulo llega a 6° . Para disminuir esta reflexión se suele colocar un medio adaptador de índice de refracción. Muchas veces se usan materiales epoxi de idénticas características para unir sólidamente los elementos.

4.1- DISPERSIÓN DE RAYLEIGH

El **esparcimiento o dispersión de Rayleigh** se debe a fluctuaciones de concentración y densidad, burbujas en el material, inhomogeneidades y fisuras o imperfecciones de la guía de ondas por irregularidades interfaciales del núcleo y revestimiento.

En este caso se produce una dispersión de la onda electromagnética (como en el caso de las ondas de agua chocando con un obstáculo) que se traduce en una atenuación de la onda incidente. El valor de la atenuación responde a la ley:

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

El valor de K depende de la diferencia relativa del índice de refracción. El valor de A_r en dB/Km se indica en la Tabla anexa. Estos valores se pueden extraer de la **Fig 03** y son los límites teóricos de atenuación ya que las absorciones son despreciables debajo de $1,55 \mu\text{m}$.

$\Delta\%$	0,2	0,5	1
K	0,86	1,02	1,27
$\lambda=0,85\mu\text{m}$	1,65	1,95	2,43
$\lambda=1,30\mu\text{m}$	0,3	0,36	0,44
$\lambda=1,55\mu\text{m}$	0,15	0,18	0,22

Desde principios de la década de los años 80' se han logrado alcanzar estos límites teóricos con fibras ópticas de laboratorio de muy alta calidad y desde 1985 las fibras ópticas comerciales están muy cerca de dichos valores. No deben esperarse mejoras de atenuación en el futuro con FO de SiO_2 . Existen otras dispersiones cuyo valor resulta ser muy inferior a la de Rayleigh, como ser los esparcimientos de Mie, Raman y Brillouin.

4.2- ABSORCIÓN DEL MATERIAL

En lo que respecta a las absorciones el SiO_2 produce una absorción natural con un mínimo en $1,55 \mu\text{m}$. Se diferencian por ello dos zonas: una hacia el infrarrojo IR y otra ultravioleta UV. Las respectivas atenuaciones se pueden escribir como:

$$\text{-Infrarrojo} \quad A_{ir} = 7,8 \cdot 10^{11} \cdot \exp(-48,5/\lambda)$$

$$\text{-Ultravioleta} \quad A_{uv} = [(154 \cdot x) / (44,6 \cdot x + 60)] \cdot 10^{-2} \cdot \exp(4,63/\lambda)$$

La concentración de GeO_2 (componente que se coloca para variar en índice de refracción) se expresa como x.

También se detectan absorciones de los radicales oxidrilo OH (producto del proceso de fabricación), que se muestra en la **Fig 04** en unidades de concentración en ppm (partes por millón). Por razones históricas (hasta 1980, cuando el efecto del OH se reduce a valores despreciables) quedan determinadas las denominadas ventanas de baja atenuación en longitudes de onda de $0,85 \mu\text{m}$; $1,3 \mu\text{m}$; $1,55 \mu\text{m}$. El pico de absorción en $1,39 \mu\text{m}$ corresponde a la segunda armónica de $2,76 \mu\text{m}$ debido al Si-OH, mientras que el pico en $1,41 \mu\text{m}$ corresponde a la segunda armónica de $2,83 \mu\text{m}$ del Ge-OH.

CARACTERÍSTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS

Los **iones metálicos** que también quedan como residuo del proceso de fabricación, producen una atenuación casi plana dentro de las ventanas de transmisión. En la **Fig 04** se muestra la absorción espectral en unidades de concentración en ppb (partes por 1000 millones).

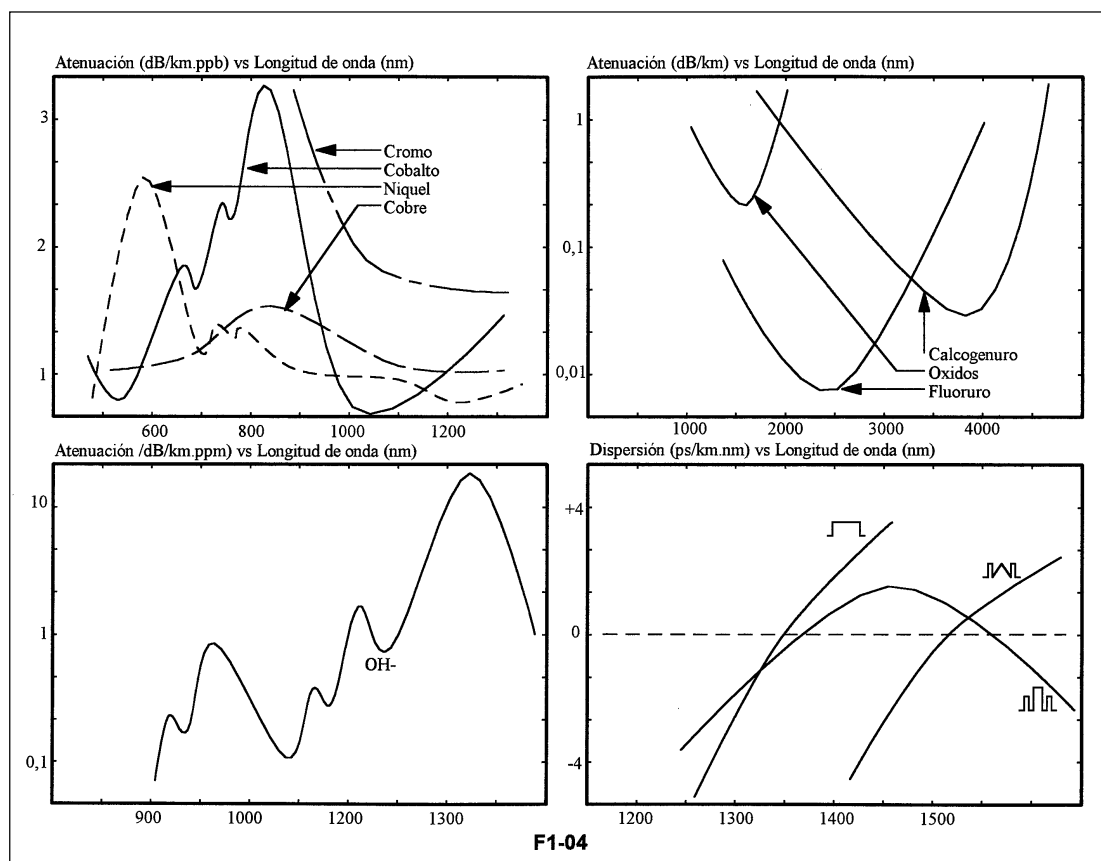


Fig 04. Componentes de atenuación en las fibras ópticas.

4.3- ATENUACIÓN EN CURVATURAS

Una atenuación adicional son los **modos fugados** cuya conocimiento resulta útil para explicar la atenuación en curvaturas. En una fibra óptica lineal el campo del modo de propagación principal EH₁₁ (transversal eléctrico-magnético) tiene el máximo de energía en el centro del núcleo y decrece hacia la periferia. Fuera del núcleo existe una pequeña parte del campo que se propaga acoplado al campo del núcleo constituyendo una onda plana. Puede pensarse que la curva de la **Fig 02** muestra la densidad de probabilidad de encontrar un fotón; de forma que lo más probable es que el fotón se encuentre en el centro del núcleo y la probabilidad que se encuentre fuera es infinitamente pequeña, pero existente.

En una fibra óptica con curvaturas se produce un desacoplamiento de la energía debido a que para mantener la propagación de la onda plana deben existir velocidades tangenciales diferenciales. Cuando la velocidad tangencial supera la velocidad de la luz en el vacío (c), se produce la ruptura de la propagación plana. La energía restante se pierde y se crea una zona por donde se drena constantemente energía. La densidad de potencia del modo fundamental se extiende fuera del área del núcleo si la longitud de onda es superior a la longitud de onda de corte lo cual origina pérdidas por propagación en el revestimiento. Por ello la longitud de onda de aplicación debe encontrarse entre la longitud de onda de corte λ_{cutoff} y 1,3 de la misma cutoff.

En una fibra óptica multimodo lineal se produce un efecto similar en los modos de propagación de orden superior. Como la propagación de un modo es a lo largo de la línea helicoidal se tiene una curvatura similar al caso anterior (ver la **Fig 02**). Por el punto de desacoplamiento se produce el drenaje de energía que se denomina modos fugados.

CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS

4.4- ESTABILIDAD A LARGO PLAZO

La estabilidad de la atenuación de las fibras ópticas se ve afectada por la **migración de H_2O y H_2** hacia el centro del núcleo. Sin embargo, la velocidad para el H_2O es muy lenta (se estima en 1.300 años desde que ingresa al revestimiento y llega al núcleo) debido a su tamaño. En cambio, la permeabilidad del H_2 es de pocos días. El H_2 se difunde en el interior de la fibra óptica hasta que la concentración está en equilibrio con la presión parcial. El proceso es reversible; en cambio en el caso de los grupos OH es irreversible. El H_2 se orienta en la estructura de SiO_2 debido al campo eléctrico local y causa un centro de absorción con varios picos. La atenuación se incrementa con la presión de hidrógeno en 0,27 dB/km.atm a 1,55 μm . Por otro lado, el P que se usa como dopante con valencia 4 tiene también valencia 5 y puede formar grupos P-OH que absorben energía. Se han desarrollado compuestos que actúan como centros de absorción del hidrógeno para evitar su migración.

El efecto del H_2 sobre las FO se descubrió en 1981 cuando empezó a usarse la segunda ventana y hacia 1983 se encontró la solución. Las fuentes de H_2 se deben a la difusión desde los componentes del cable; la reacción corrosiva de los metales y el H_2 del aire en cables presurizados. Se ha fijado un valor límite de incremento en la atenuación de la fibra óptica de 0,01 dB/km en 20 años debido al H_2 .

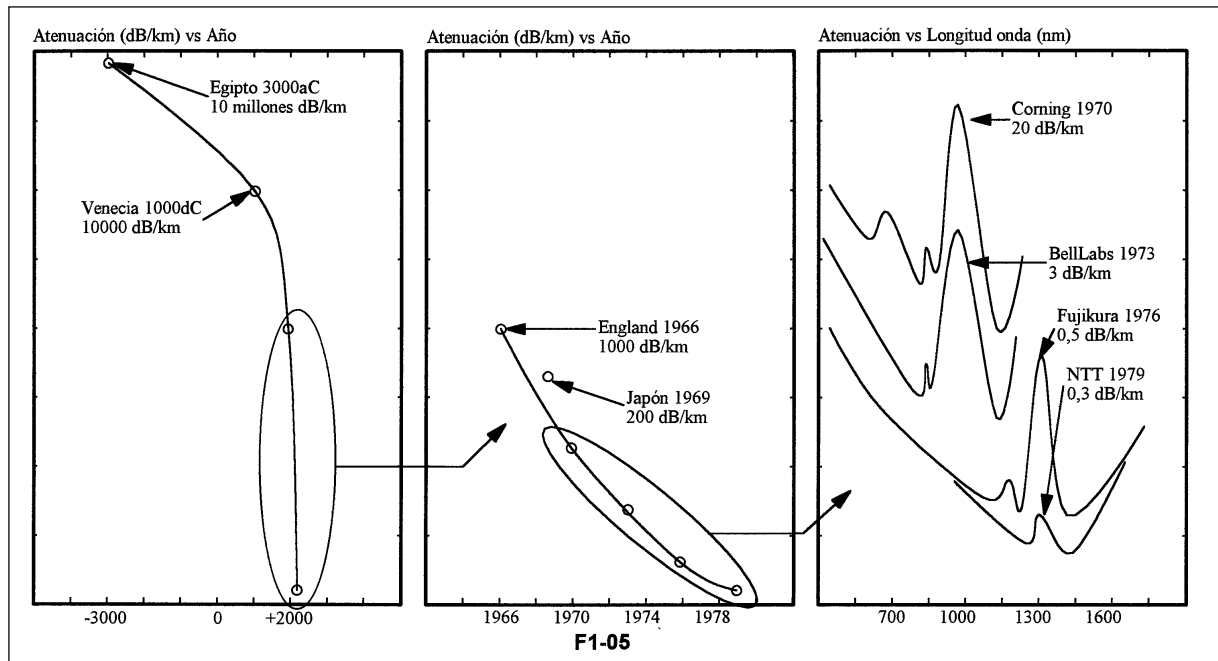


Fig 05. Evolución de la atenuación en las FO.

STANDARD de FIBRAS OPTICAS

Sobre las características de las fibras ópticas normalizadas mediante standard y disponibles en el mercado.

1- DIGRESIÓN: UN LARGO CAMINO

1.1- VIDRIO Y METALES

En la aldea **Dolni Vestonice** (actual Checo-Eslovaquia) se encontró la primer referencia de **tecnología de materiales** (mezcla de materiales distintos para obtener otro con propiedades diferentes a los componentes). En esa época (25000 aC) el artesano (hombre de Cro-Magnon) había mezclado por primera vez tierra con huesos pulverizados lo cual permitió que el calor de un horno se extendiera en forma uniforme transformando la arcilla en un material tan duro como la roca.

El uso extendido de la tecnología aplicada a la **cerámica** se lleva a 11000 aC en Japón y 8000 aC en el Oriente Medio. La mezcla añadida es diversa (arena, cabellos) dejando una impronta de fábrica que permite identificar las diversas culturas. La presencia o no de Oxígeno en la cocción modifica el color; rojo (con oxidación) y negro (reducida). Luego del 1500 aC la cerámica puede ser vidriada. En el año 700 dC los chinos pudieron hacer **porcelana**.

Las primeras civilizaciones no aparecieron hasta 4000 aC. La más antigua (**Summer**, en el valle de los ríos Tigris y Eufrates en Irak) nos legó tanto el **vidrio** como la base de conteo sexagesimal. Esta base de conteo se usa hoy día para medir tiempo y ángulos. Los matemáticos de **Babilonia** (principal ciudad entre el 2000 y 750 aC) alcanzaron gran nivel matemático: se encontraron tablas de multiplicación, potencia al cuadrado y cubo, raíces cuadradas, logaritmos, cálculo de áreas y volumen, conocían el número π como 3,125.

Los artesanos de Babilonia disponían de cuentas de vidrios aisladas (probablemente cuentas de loza vitrificada); el dominio de la tecnología de vidrio se remonta a 1600 aC. Si en Egipto se hubiesen construido fibras ópticas con el vidrio disponible habrían obtenido una atenuación de 10^7 dB/km. En las mismas condiciones en **Venecia** (en Murano-1000 dC se utilizaba el mismo proceso que el siglo XX) se habría alcanzado un valor de 10^5 dB/km. Sin embargo, solo hacia 1688 se logró fabricar el Francia superficies de vidrio planas. **H.Cortés**-1519 entregó en México a Motecuhzoma un collar de cuentas de vidrio de la mejor tecnología de su época (a cambio recibió un collar de caracoles dorados y camarones de oro).

Los primeros útiles conocidos fabricados con metal (antes solo se usaba la piedra, barro, madera o hueso) datan de 9500 aC en los Montes Zagros (Irak), obtenidos desde la malaquita. Se trata de objetos trabajados en **Cobre** (nombre derivado de Chipre, donde se obtenía antiguamente el metal). Recién hacia el año 4100 aC (Tepe Iblis en Irán) se pudo dominar la fundición a partir de minerales (1090 °C en atmósfera reductora -sin oxígeno-). Existen restos de uso de cobre por la cultura antecesora de Chavía (Perú) en 2000 aC.

Los objetos desarrollados en aleación de cobre (primero arsénico y luego estaño) dan lugar al **Bronce**. En el Cáucaso hacia 3500 aC (probable origen del bronce) y en la ciudad de Ur (Summer) hacia 3000 aC se disponía de bronce entre 10 y 15% de estaño.

1.2- CONDUCTOR DE COBRE

La **conductividad eléctrica** no se encontró hasta 1729 cuando S.Gray logró propagar la electricidad producida por una máquina de fricción hasta 1300 metros. La historia de la transmisión mediante conductores comienza cuando se usaron pares de alambre desnudo para las uniones de corta distancia. Cuando se dispuso del **tubo de vacío** fue posible aplicar la transmisión a largas distancias. Ya en 1914/18 se habían realizado demostraciones y mediciones de equipos FDM y el 1925 la Bell instala equipos de 3 canales FDM.

H.Black-1928 inventa el **amplificador realimentado** y permite que en 1930 se instale el sistema de larga distancia entre New York y Philadelphia con repetidores cada 10 millas. En 1937 se realiza el primer ensayo de transmisión de TV de 240 líneas por un cable coaxial. En 1940 se disponían de amplificadores de potencia como el tubo de onda progresiva, el klystron y el magnetrón.

En 1948 se realiza el primer cable transcontinental coaxial de 24 canales; en 1956 se llega a 24 canales; en 1963 a 140 canales; en 1968 a 845 canales. En 1955 se dispuso del primer sistema de 960 canales FDM para transmisión por cable

STANDARD de FIBRAS OPTICAS

coaxial con tecnología valvular. Hacia 1970 la tecnología transistorizada permitía obtener sistemas de 2700 canales y en 1973 el valor de 10800 canales con repetidoras cada milla y ancho de banda de 60 MHz.

La **tecnología de transistores** nace en 1948 con el primer transistor de contacto puntual. En 1950 se disponía del cristal simple de Germanio; en 1951 del transistor de juntura; en 1952 del cristal de Silicio y en 1955 el transistor de base difundida. Estos avances permitieron que hacia el año 1960 se usaran pares de cobre balanceados para transmitir señales digitales de 1,5 Mb/s. En 1972 se llega a 34 Mb/s y en 1978 a 140 Mb/s. En la década de 1980 se llega a 565 Mb/s por conductores coaxiales y en 1992 a 2,5 Gb/s por fibras ópticas. Durante la década de los '80 se resolvió, a favor de las fibras ópticas, el mercado de transmisión de alta capacidad.

En la **República Argentina** se instalaron entre 1953 y 1959 la red troncal de cable coaxial entre Santa Fe-Buenos Aires-Mar del Plata. Hasta el año 1978 se instaló un total de 1200 Km de cable con 6 tubos coaxiales de 2,6/9,5 mm de diámetro. Originalmente transitaban 960 canales de telefonía FDM más un canal de TV y un sistema de reserva. Las estaciones se ubicaban cada 9 Km en casillas y los circuitos eran a válvula. En 1978 se realizó la última expansión llevando los repetidores a 4,5 Km y con tecnología transistorizada para obtener 2700 canales FDM. A partir de 1993 la red de larga distancia se instala solo con fibras ópticas en tecnología SDH.

La transmisión por pares balanceados se limita hoy día a la red de distribución de abonado y a enlaces digitales hasta 2 Mb/s en distancias relativamente cortas. Los cables coaxiales son usados solo para interconexión de equipos.

1.3- LA LUZ

Fue el físico holandés **W.Snell**-1621 quien encontró inicialmente el efecto de Refracción de la luz entre dos medios con distinto índice de refracción. También **R.Descartes**-1637 encontró dicha relación en forma independiente. Los primeros experimentos relacionados con la naturaleza de la luz son de **I.Newton**-1666, quién determina la naturaleza corpuscular de la luz. Encontró además que la luz blanca se descomponía en un arco de colores que denominó con la palabra del latín *Spectrum* (fantasma).

Algunos años más tarde el físico holandés **C.Huyghens**-1678 ofrece una teoría alternativa a la de Newton señalando que la luz se componía de ondas (teoría ondulatoria de la luz). La teoría corpuscular fue más popular que la ondulatoria pero el inglés **T.Young**-1801 determinó en un experimento la validez de la teoría ondulatoria. Un poco más adelante el francés **A.J.Fresnel**-1818 encuentra el efecto de Difracción y **Fraunhofer** las rayas espectrales. La verdadera relación entre la electricidad y el magnetismo fueron plasmadas en hermosas ecuaciones matemáticas por **C.Maxwell**-1864. En este siglo la teoría cuántica da una nueva visión dual de la luz.

En la teoría de la Relatividad fue **Einstein** quien, basado en la geometría no-euclídea de **G.Riemann**-1854, determinó que la luz se mueve en línea recta y es el propio espacio el que se curva en presencia de masas. De esta forma los rayos de luz determinan las líneas del mapa tetradimensional de la cartografía del espacio. Cada objeto en este mapa (el espacio-tiempo) sigue una línea de *mínima acción* (la geodésica) que no requiere energía.

1.4- FIBRAS ÓPTICAS

J.Tyndall-1870 había realizado una demostración de propagación de luz en un cilindro transparente con agua. Los efectos de reflexión se conocen desde el siglo IV aC y de refracción desde el siglo II aC (Ptolomeo) Es **N.French**-1934 quien patenta el teléfono óptico. En 1950 las fibras ópticas con una gran atenuación eran usadas en endoscopia e instrumentación. Sólo a partir de 1970 cuando la Corning G.W. logra fibras de 20 dB/km y C.A.Burrus de la Bell Labs desarrolla el Láser de onda continua de As Ga (Arseniuro de Galio) se produce el verdadero despegue de los sistemas ópticos.

Cuando **C.K.Kao**-1966 indicó la posibilidad de reducir la atenuación para ser usadas en transmisión, se tenían los valores de 10^3 dB/km. En 1970 se obtienen valores alentadores de atenuación: 20 dB/km. Y luego: en 1972 se tienen 4 dB/km, en 1974 se tiene 2,2 dB/km; en 1976 se llega a 1,6 dB/km; en 1980 se arriba al límite teórico de 0,2 dB/km. En el año 2000, con fibras ópticas con flúor, se tendrán 10^{-3} dB/km. Esta secuencia ilustra como se ha precipitado el avance tecnológico y es coincidente con todas las ramas de la ciencia y la tecnología. El primer sistema de fibras ópticas se realizó para aplicaciones militares en 1973 y la Western Electric lo aplicó en Atlanta en 1976 para telefonía comercial. El uso comercial de las fibras ópticas se pensó en un principio con **propagación monomodo**, pero los problemas de acoplamiento entre núcleos llevaron a crear las fibras ópticas multimodo con perfil gradual como solución alternativa. A partir de 1985, en telecomunicaciones, sólo se usan fibras ópticas monomodo.

Originalmente se usó la **primer ventana** (0,85 μ m) debido a dos razones. En principio, la atenuación producida por los iones OH sobre la segunda ventana (1,3 μ m) impedían alcanzar los límites teóricos. Con el perfeccionamiento de los métodos de fabricación se llegó a los límites teóricos de atenuación (dispersión de Rayleigh) y la segunda ventana resultó ser más interesante que la primera. La segunda razón es el tipo de semiconductor que es usado para la emisión. En la primer ventana se usan derivados de AsGa (Arseniuro de galio) y en la segunda derivados de InP (Fosfuro de indio). Los primeros estaban

STANDARD de FIBRAS OPTICAS

disponibles con anterioridad debido a la aplicación en microondas desde 1960. La segunda ventana es muchas veces más atractiva que la tercera por tener valores de atenuación sólo algo mayor y tener el mínimo de dispersión cromática.

Los **nuevos desarrollos** en fibras ópticas tienen varias líneas de investigación. Las fibras policristalinas tienen muy pobres propiedades mecánicas y sufren de esparcimientos de las señales inducidas. Los vidrios de Germanio (GeO_2) son de fácil producción pero tienen una longitud de onda de corte reducida. Los vidrios calcónidos (AsS ; AsSe) tienen un mínimo ancho de banda teórico de 0,01 dB/km a 4,54 μm . Los vidrios fluorados (ZrF_4) son los más interesantes con atenuación de 0,001dB/km a 3,44 μm . Por ejemplo, ya se producen fibras de flúor con diámetro de 150 μm y NA de 0,2 debajo de 1 dB/km entre 0,5 y 2 μm .

Las FO se utilizan en varias aplicaciones industriales como sensores. Por ejemplo, el puente Taylor sobre el río Assiniboine en Canadá está construido con vigas de polímero reforzado de fibras de Carbono y vidrio. En su interior las FO llevan luz hasta detectores de presión. La longitud de onda reflejada por los medidores depende de la temperatura y la presión.

2- FO COMERCIALES Y NORMALIZADAS

Los esfuerzos de estandarización iniciados en la década de los años 70 dieron sus frutos en las recomendaciones **ITU-T** (antes CCITT). En un principio (período 1977-1980) la G.651 normalizó las fibras ópticas multimodo de 50/125 μ m; luego (período 1981-1984) la G.652 normalizó la fibra óptica monomodo y la G.956 los sistemas de línea. Las FO monomodo para tercera ventana se encuentran normalizadas en G.653/654/655.

Las características se miden de acuerdo con normas del **IEC 793**, entre ellas se encuentran: la dispersión cromática, la longitud de onda de corte, el diámetro del campo modal, las dimensiones geométricas, el campo lejano y las características mecánicas.

En la **Tabla 01** se identifican distintos tipos de FO con su aplicación se trata de las FO de plástico; las multimodo para redes de datos; las monomodo para redes de alta velocidad y las FO para aplicaciones especiales. En la **Tabla 02** se elencan las características de las FO definidas por el ITU-T en la serie G.65x.

En la **Fig 01** se muestra el perfil de índice de refracción en la FO NZ-DS y la dispersión cromática asociada a las FO de tipo estándar STD, de dispersión desplazada DS y NZ-DS.

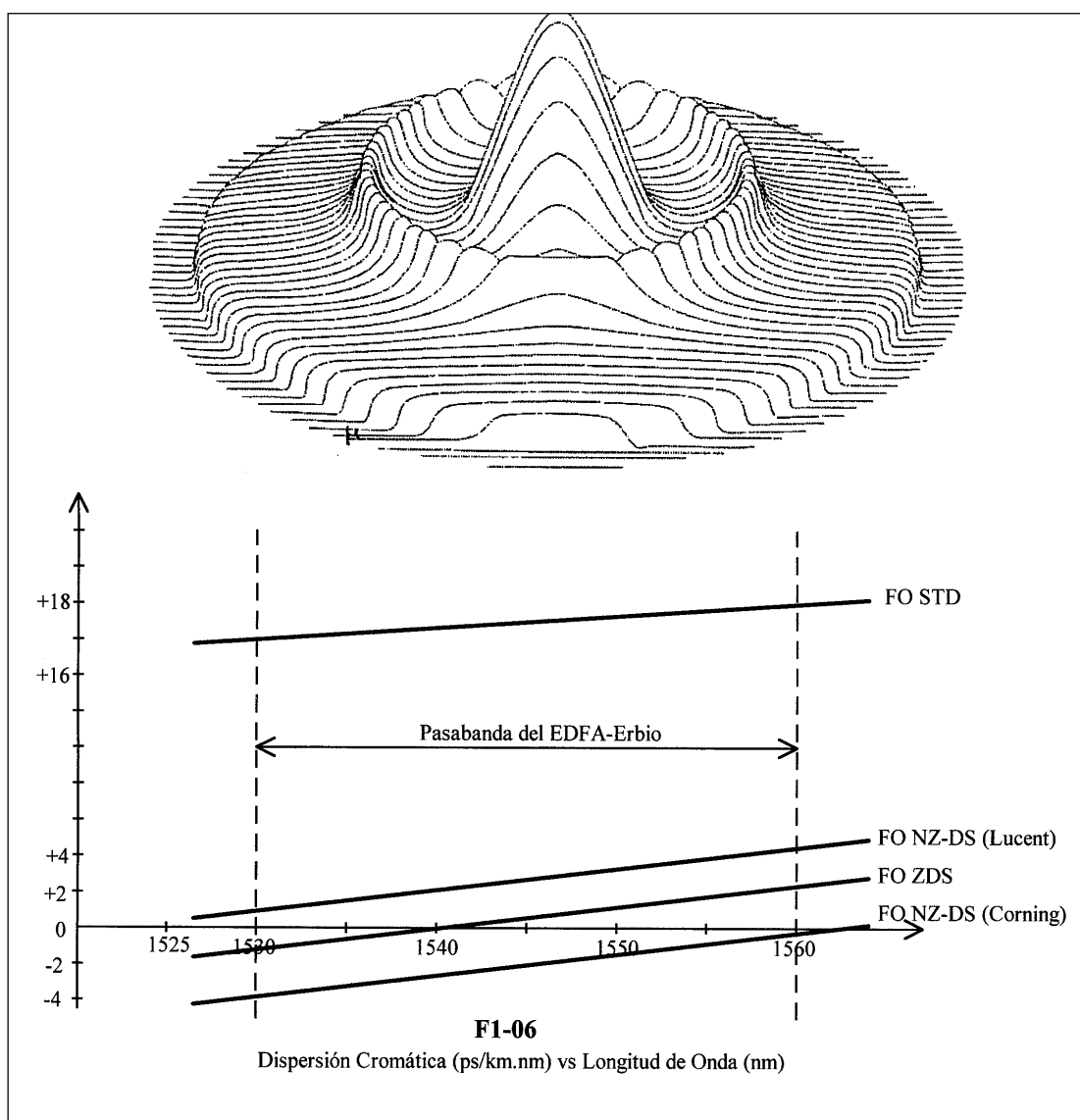


Fig 01. Dispersión cromática y perfil de índice de refracción en FO.

STANDARD de FIBRAS OPTICAS

Tabla 01. Tipos de Fibras Opticas en el mercado internacional.

FO Plástica	Trabajan a longitud de onda visible (650 nm). Se utilizan en aplicaciones de automotores, audio, MIDI, etc. Se dispone de los siguientes tipos dimensionales y atenuaciones: 485/500 μm con 240 dB/km; 735/750 μm con 230 dB/km y 980/1000 μm con 220 dB/km
PCS	(<i>Plastic Clad Silica</i>) El núcleo es de silicio y las dimensiones son 200/300 μm . La atenuación es de 10 dB/km a 850 nm.
FO 62,5/125 μm	Es una FO multimodo MM (<i>MultiMode</i>) con perfil de índice de refracción gradual (<i>Graded Index</i>). Este tipo de FO es una normalización norteamericana ANSI. Es usada en redes de datos de alta velocidad del tipo FDDI, para conexiones dúplex en anillos. Se suele conectar mediante terminales ST, SC o FDDI.
FO 50/125 μm	Esta FO multimodo MM con perfil de índice parabólico es normalizada por ITU-T G.651 . Usadas en la actualidad en redes de datos de corta longitud (hasta 2 km). Fue la única FO disponible hasta inicios de los años 80. Se usaba en 850 o 1300 nm.
FO STD	Es del tipo monomodo SM (<i>SingleMode</i>) normalizada en ITU-T G.652 . Se trata de la FO más popular en redes de telecomunicaciones actuales. Es factible de usarse en 1300 y 1550 nm. Debido a la dispersión cromática esta FO está optimizada para el cero de dispersión en 1300 nm.
FO DS	Esta FO monomodo de dispersión desplazada DS (<i>Dispersion Shift</i>) se encuentra en ITU-T G.653 . Permite gran ancho de banda en redes de larga distancia trabajando en tercera ventana. Esta FO, de acuerdo con la Fig 02 tiene el cero de dispersión cromática en 1540 nm. La dispersión tiene un valor de -2 a $+2$ ps/km.nm; la FO STD lo tiene entre $+16$ a $+18$ ps/km.nm.
FO Minimum Loss	Es del tipo monomodo con mínima atenuación. Es normalizada en ITU-T G.654 . Se aplica para enlaces de muy larga distancia en 1550 nm. Es de aplicación limitada debido a la reducida performance en cuanto a la dispersión cromática. Normalmente no es aplicable para sistemas STM-16 a 2,5 Gb/s.
FO NZ-DS	(<i>Non Zero-Dispersion Shift</i>) determinada en ITU-T G.655 . Es normalizada en 1994 para 1550 nm. Mejora a la G.653 para aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda WDM. La mejora en la intermodulación pasa de ser 25 dB para la G.653 a más de 50 dB en la G.655. La intermodulación es producida por alinealidades de la FO en altas potencias (por ejemplo en amplificadores EDFA) cuando se inyectan varias longitudes de ondas de tipo WDM. El perfil del índice de refracción de una FO NZ-DS se muestra en la Fig 02 . El cero de dispersión cromática se encuentra en 1525 nm para las FO producidas por <i>Lucent</i> y en 1560 nm para las producidas por <i>Corning</i> . La dispersión se encuentra entre 2,6 y 6 ps/km.nm entre 1530 y 1560 nm.
FO PDC	(<i>Passive Dispersion Compensator</i>) Permiten la compensación de la dispersión cromática G.652. Posee un núcleo muy estrecho (2 μm) y un salto de índice de refracción muy alto. La atenuación se incrementa, por lo que se realiza una reducción paulatina entre el núcleo de la FO normal y la de compensación de dispersión. Se utilizan algunos metros de FO de compensación por varios km de FO standard G.652. La dispersión negativa es del orden de -100 ps/km.nm a 1550 nm. Por ejemplo, en el mercado se encuentran módulos de compensación para 40 y 80 km de FO. El retardo disminuye con la longitud de onda (1700 ps a 1556 nm y 1000 ps a 1557 nm). El centro de la banda 1556-1557 puede correrse para otras longitud de ondas necesarias.
FO Erbium Doped	La FO utilizada en amplificadores ópticos EDFA consisten en un tramo de una decena de metros de FO dopada con Tierras Raras. En 1984 se adoptó el ion trivalente de Erbium Er^{3+} para realizar estas FO activas. El Erbium en la FO tiene la propiedad de absorber energía a una longitud de onda y emitir energía en forma de emisión estimulada coherente con la señal de entrada (normalmente a 1550 nm).
FO PM	(<i>Polarization Maintaining</i>) Este tipo de FO-SM permite transmitir una luz polarizada con una relación de 30 dB entre los ejes ortogonales. Se logra mediante un núcleo no simétrico en ambos ejes (un cladding interno oval o dos núcleos adicionales sobre un mismo eje). Se utiliza en óptica integrada, giróscopos ópticos, sensores y sistemas coherentes. Una FO puede actuar como polarizador debido a que cada eje tiene una longitud de onda de corte distinta; de forma tal que entre ambas longitudes de onda una polaridad se atenúa y la otra no. Este efecto se encuentra en un rango de 30 a 40 nm y permite formar polarizadores.

STANDARD de FIBRAS OPTICAS

Tabla 02: Características principales de Fibras Opticas normalizadas.

EIA-492; ISO/IEC 793. FIBRA MULTIMODO 62,5/125.	
.Apertura numérica	NA de 0,275 (tolerancia 0,015)
.Perfil de índice de refracción	Parabólico (<i>graded index</i>). Usado en redes de datos y FDDI.
.Índice de refracción	1,9 %
.Diámetro del núcleo	62,5 µm (tolerancia 3 µm)
.Diámetro del revestimiento (Cladding)	125 µm (tolerancia 1 µm)
.Recubrimiento de silicona Coating	245 µm (tolerancia 10 µm)
.Longitud de onda de aplicación	850 y 1300 nm
.Atenuación a 850 nm	Entre 3 y 3,2 dB/km
.Atenuación a 1300 nm	Entre 0,7 y 0,8 dB/km
.Ancho de banda a 850 nm	Entre 200 y 300 MHz.km
.Ancho de banda a 1300 nm	Entre 400 y 600 MHz.km
ITU-T (CCITT) G.651. FIBRA MULTIMODO 50/125.	
.Apertura numérica	NA=0,18 a 0,24 (tolerancia 10%)
.Perfil del índice de refracción	parabólico
.Diámetro del núcleo	50 µm (tolerancia 3 µm) y del revestimiento 125 µm (3 µm)
.Recubrimiento de silicona Coating	245 µm (tolerancia 10 µm)
.Error de concentricidad	6%
.Error de circularidad del núcleo	6%
.Error de circularidad del revestimiento	2%
.Atenuación a 850 nm	Entre 2,7 y 3 dB/km
.Atenuación a 1300 nm	Entre 0,7 y 0,8 2 dB/km
.Ancho de banda a 850 nm	Entre 300 y 500 MHz
.Ancho de banda a 1300 nm	Entre 500 y 1000 MHz
ITU-T G.652. FIBRA MONOMODO STANDARD.	
.Longitud onda corte	1,18 a 1,27 µm
.Diámetro del campo modal	9,3 (8 a 10) µm (tolerancia 10%)
.Diámetro del revestimiento	125 µm (tolerancia 3 µm)
.Recubrimiento de silicona Coating	245 µm (tolerancia 10 µm). Acrilato curado con UV.
.Error de circularidad del revestimiento	2%
.Error de concentricidad del campo modal	1µm
.Atenuación	de 0,4 a 1 dB/km en 1300 nm
.Atenuación	de 0,25 a 0,5 dB/km en 1550 nm
.Dispersión cromática 1285-1330 nm	3,5 ps/km.nm
.Dispersión cromática 1270-1340 nm	6 ps/km.nm
.Dispersión cromática en 1550 nm	20 ps/km.nm
ITU-T G.653. FIBRA SM DISPERSION SHIFT.	
.Diámetro del campo modal	8 (7 a 8,3) µm (tolerancia 10%)
.Diámetro del revestimiento	125 µm (tolerancia 3 µm)
.Recubrimiento de silicona Coating	245 µm (tolerancia 10 µm)
.Error de circularidad del revestimiento	2%
.Error de concentricidad del campo modal	1µm
.Atenuación	inferior a 0,25 a 0,5 dB/Km en 1550 nm
.Atenuación	inferior a 1 dB/Km en 1300 nm
.Dispersión cromática	3,5 ps/km.nm entre 1525-1575 nm
ITU-T G.654. FIBRA SM DE MINIMA ATENUACION	
.Diámetro del revestimiento	125 µm (tolerancia 3 µm)
.Error de circularidad del revestimiento	2 %
.Error de concentricidad del campo modal	1µm
.Recubrimiento de silicona Coating	245 µm (tolerancia 10 µm)
.Atenuación inferior a	0,15 a 0,25 dB/Km a 1550 nm
.Dispersión cromática	20 ps/km.nm en 1550 nm
ITU-T G.655. SM NON ZERO DISPERSION SHIFT.	
.Diámetro del campo modal	8,4 µm (tolerancia 0,6 µm). Diámetro núcleo 6 µm.
.Diámetro del revestimiento	125 µm (tolerancia 1 µm)
.Longitud de onda de corte	1260 nm
.Atenuación	Desde 0,22 a 0,30 dB/Km en 1550 nm
.Dispersión cromática	4,6 ps/km.nm en 1550 nm
.Zona de dispersión no-nula	Desde 1540 a 1560 nm

CABLES CON FIBRAS OPTICAS

Con referencia a la producción de preformas para fibras ópticas, de cables y a los diferentes tipos de cables ópticos en el mercado.

1. PRODUCCIÓN DE FIBRAS ÓPTICAS

Es trabajo se refiere a los aspectos relacionados con la tecnología de las fibras ópticas FO. Estos aspectos se relacionan con la producción de la FO y la formación del cable que las contiene. Entre los métodos de producción de FO se tienen dos tipos fundamentales: el método de doble crisol (del que se obtienen FO de calidad regular y que no se usan en telecomunicaciones) y el método de la preforma.

1.1- MÉTODO DEL DOBLE CRISOL

Las fibras ópticas FO se producen por varios métodos distintos dependiendo del tipo de material que la componen. Una clasificación inicial comprende a las FO de plástico, multicomponentes y sílice. Las FO útiles para telecomunicaciones son las de multicomponentes y de **sílice** (SiO_2), si bien estas últimas son las únicas usadas en la actualidad por su alta calidad. El método de doble crisol es más interesante por su carácter histórico que por su utilidad actual.

PRODUCCIÓN DE FO. En el caso de FO multicomponentes es una producción en dos etapas. **La primer etapa** de éstas consiste en producir el vidrio a partir de polvos de alta pureza. La materia prima [SiCl_4 ; BCl_3 ; Na_2NO_3 ; $(\text{NO}_3)_2$] se mezcla en proporciones apropiadas para obtener el índice de refracción deseado y se purifica mediante el intercambio iónico por destilación y extracción de disolventes en el horno. El horno se calienta mediante un generador de radiofrecuencia RF de 5 MHz.

A temperaturas superiores a 1300 °K los vidrios alcalinos tienen una conductividad iónica suficiente como para producir un acoplamiento entre el campo de RF y el material fundente. Se permite actuar al principio a un calefactor de grafito para el calentamiento inicial, dejando al campo RF el mantenimiento de la temperatura deseada. Sólo el material fundido recibe la energía del campo. El crisol se mantiene frío mediante una corriente gaseosa o de agua. Sobre las paredes del crisol se crea una capa de sílice sólida debido al salto de temperatura lo que ayuda a aislar el material fundido.

En la primer etapa del desarrollo de este método (mitad de la década del '60 en Inglaterra) se usaba un crisol de platino, pero la alta atenuación de las fibras llevó a pensar en una migración de iones ferrosos y cúpricos desde el crisol hacia el material fundente. Se cambió entonces por un crisol de sílice puro, cuya temperatura de fusión es mayor que la del vidrio multicomponente. Con el propósito de homogeneizar el material, para disminuir los esparcimientos de Rayleigh y Mie, se hace burbujear un gas inerte en el material fundido. Elevando la temperatura se disminuye la viscosidad permitiendo a las burbujas alcanzar la superficie.

ESTIRADO DE LA FO. El montaje consiste en dos crisoles concéntricos fabricados de platino o sílice. El orificio inferior del crisol interior se diseña en función de la FO deseada. El material se introduce en forma de varilla, de forma que la alimentación del crisol puede ser continua. La viscosidad del material se lleva a un valor adecuado para el estirado mediante un horno de RF. El perfil del índice de refracción se ajusta mediante la posición relativa de los crisoles.

Por ejemplo, una separación amplia produce mezcla en los vidrios de ambos crisoles lo cual corresponde a un perfil gradual. Tanto la velocidad de estirado como la temperatura del horno permiten también controlar la mezcla de materiales y por lo tanto el tipo de perfil de índice. El estirado de la FO se efectúa enrollando a la misma en un tambor giratorio colocado debajo del doble crisol. Los mejores valores conseguidos con este método son de 4 dB/km para 0,85 μm y una dispersión modal de 0,6 ns/km. Estas FO no se usan en telecomunicaciones, en cambio se prefieren las que se producen por el método de preforma, un método puesto a punto en la década de los años '70.

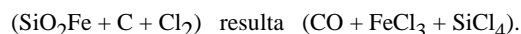
2- PRODUCCIÓN DE LA PREFORMA

La producción comercial actual de las FO de sílice para telecomunicaciones se realiza mediante el método de la preforma que consiste en dos pasos, la fabricación de la preforma (un bastón de sílice de 1 m de longitud y 2 cm de diámetro cuyo perfil de índice de refracción es idéntico a la FO deseada) y el estirado de la preforma.

Los métodos comerciales responden a procesos diseñados en distintos laboratorios pudiendo identificarse:

- OVD** (*Outside Vapor Deposition*) de la Corning Glass W (Siecor).
- MCVD** (*Modified Chemical Vapor Deposition*) de la Bell Labs.
- PCVD** (*Plasma Activated Vapor Deposition*) de la Philips.
- VAD** (*Vapor Axial Deposition*) de la NTT.

MATERIALES DE ORIGEN. Las FO están constituidas por sílice (SiO_2), el mismo en forma natural tiene una alta concentración de óxidos metálicos. Por ello, mediante **reducción, clorinación y destilación** con C y Cl se logra su purificación, de forma tal que partiendo de:



Tanto el CO como el FeCl_3 son desechos de este proceso con lo que se elimina el Fe contenido en el SiO_2 y se obtiene SiCl_4 (Tetracloruro de Silicio) como material base para la producción de la preforma. Si bien el SiCl_4 es líquido a temperatura ambiente se trabaja en la fase de vapor para lograr un mejor control en la producción, de forma que mediante oxidación o hidrólisis se obtiene nuevamente el SiO_2 .

En la **Fig 01** se muestra el proceso de producción de MCVD y OVD. A partir de una corriente de oxígeno molecular O_2 , la cual es filtrada y controlada en su densidad de flujo, se produce el "burbujeo" en saturadores. El O_2 es un gas a temperatura ambiente, mientras que el contenido de las botellas (SiCl_4 , GeCl_4 , POCl_3 , etc.) son líquidos. Se tiene entonces una corriente de O_2 con moléculas de cloruros. El control de flujo permite dosificar la densidad de cada compuesto en la reacción. La proporción de ellos da lugar al índice de refracción deseado, así por ejemplo, mientras el Ge y P incrementan el índice de refracción, el B lo reduce. Hasta aquí los métodos de producción son idénticos.

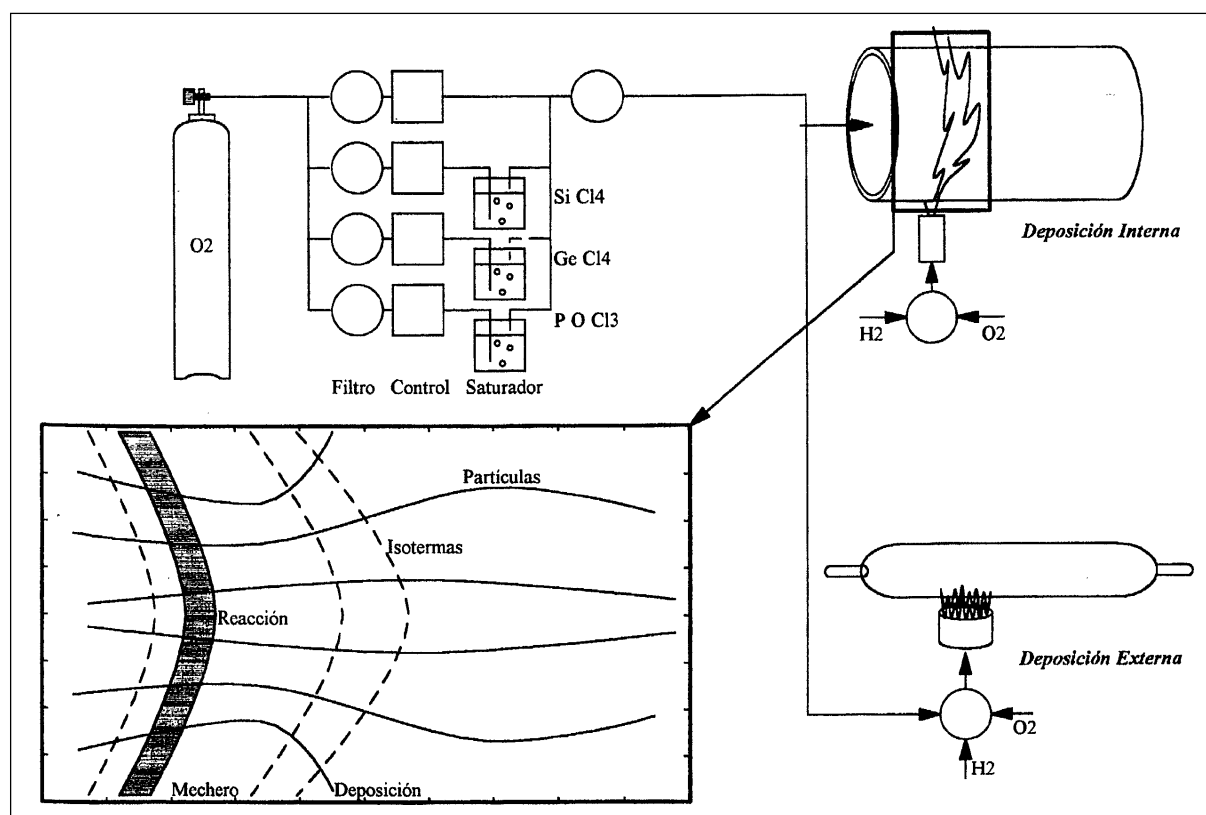


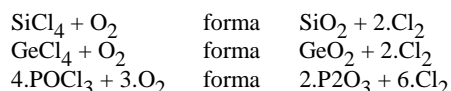
Fig 01. Métodos de producción de la preforma.

CABLES CON FIBRAS OPTICAS

2.1- DEPOSICIÓN INTERNA

MÉTODO MCVD. La deposición se realiza sobre un tubo de cuarzo puro que actúa de **sustrato**. Por ejemplo el tubo fabricado por Heraeus tiene 1 m de longitud y un diámetro exterior de 20 ó 25 mm con tolerancia de 0,8 mm. La pared tiene un espesor de 2 ó 3 mm respectivamente con tolerancia de 0,3 mm. El peso es de 25 gr. Otro fabricante es la General Electric con dimensiones similares pero no idénticas; en este caso se indican contenidos de OH en el cuarzo de 3 ppm (partes por millón).

El tubo se coloca en un torno para el proceso de producción. La **oxidación** en el método MCVD se produce debido a la elevada temperatura interior del tubo lograda mediante la **hidrólisis** de una llama de H_2+O_2 . La reacción de oxidación es:



Siempre resulta como subproducto de la reacción el Cl_2 que es un gas a temperatura ambiente y se extrae mediante una bomba de vacío, mientras que los óxidos son sólidos y se depositan en la cara interior del tubo formando una fina capa cristalina.

Para mantener una **deposición homogénea** se hace girar al tubo en el torno y se mueve la llama que cataliza la reacción en forma longitudinal a una velocidad de algunos mm/seg. La deposición resulta ser capa a capa. El perfil del índice de refracción deseado se logra variando la composición de los reaccionantes para cada capa. La zona de deposición se muestra en la misma **Fig 01**; también se tiene una ampliación, mediante isothermas y recorridos de partículas. Se observa que la deposición es posterior a la llama debido a que las partículas de la zona de reacción siguen las isothermas.

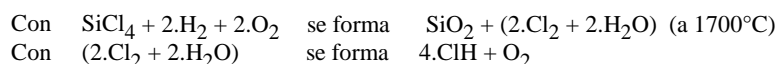
MÉTODO PCVD. Se crea una zona no-isotérmica producida por un generador de RF (2 a 3 GHz y 100 a 500 w). El método PCVD es similar al MCVD cambiando la forma de calentamiento. El horno de RF tiene una menor inercia térmica, lo cual permite capas más delgadas y en mayor número, obteniéndose un perfil de índice más suave, con menos saltos. La deposición en PCVD puede realizarse a temperatura ambiente pero el vidrio resulta agrietado por lo que se prefiere sumergir al sistema en un calefactor de grafito.

La Bell Labs ha desarrollado una variante del MCVD denominado **PMCVD** (*Plasma-enhanced MCVD*) que usa un calefactor de cobre colocado luego de la llama para crear un plasma de O_2 en el interior del tubo. La termoforesis del plasma produce fuerzas físicas (isothermas) sobre las partículas de SiO_2 que obligan a la deposición entre la llama y el plasma. Con este método se aumenta la eficiencia de deposición de SiO_2 . El PCVD permite lograr más de 1000 capas en FO multimodo y tiene una eficiencia de deposición muy elevada (del orden del 100% para el SiO_2 y del 90% para el GeO_2). La tasa de deposición es de 0,1 gr/min. Para los métodos MCVD y PCVD pueden aplicarse las técnicas "*Rod in tube*" que consiste en fabricar mediante una preforma solamente el núcleo y luego colocar un tubo exterior que da origen al revestimiento.

Como las capas centrales de la preforma no pueden construirse, se realiza un **colapsado** para compactar la preforma. El mismo se efectúa elevando la temperatura hasta cerca de 2000 °C o más. El Ge tiende a evaporarse durante el colapsado, con la consiguiente reducción del índice de refracción y produciendo un "*dip*" en la curva de índice; esto se previene colocando C_2F_6 y O_2 en la última fase. Posterior al colapsado se colocará la camisa de sílice que forma el revestimiento (rod in tube) y por sintetizando se colapsa.

2.2- DEPOSICIÓN EXTERNA

MÉTODO OVD. El método de mayor producción en el mundo es el OVD que es usado por la **Siecor** (*Corning-Siemens*). La deposición es por hidrólisis y se genera una **preforma porosa** (no es un sólido macizo). La **hidrólisis** tiene la siguiente reacción química:



Esta reacción permite reducir el contenido de agua en la preforma porosa mediante la segunda fase eliminando el gas clorhídrico HCl. Posteriormente se realiza el secado de la misma mediante la circulación por su interior de $He+Cl_2$ de forma que el Cl reacciona con los OH residuales y forma $O+He+2.HCl$. Obsérvese que la deposición es en el exterior de un sustrato sólido que se extrae luego de la formación de la preforma porosa y por este agujero se inyecta el gas para el secado. El último paso es el compactado de la preforma porosa.

MÉTODO VAD. El método OVD es más complejo que MCVD pero permite un mayor volumen de producción. También el **método VAD** es más complejo e interesante. El VAD es usado casi con exclusividad por las empresas japonesas y consiste en el crecimiento axial de una preforma porosa con reacciones idénticas al OVD. En la cámara se enfrentan los tubos que

CABLES CON FIBRAS OPTICAS

alimentan los reaccionantes y la preforma en formación. Los quemadores son tubos coaxiales cilíndricos de sílice donde el material reaccionante ($\text{SiCl}_4 + \text{O}_2$) penetra por el tubo central y los gases para la combustión ($\text{O}_2 + \text{H}_2$) por el exterior.

El perfil del índice de refracción se controla con la temperatura de la cámara, el flujo de material, la velocidad de rotación que mantiene la uniformidad geométrica y la posición relativa de los quemadores y la preforma. La cámara de calentamiento posterior produce el colapsado de la preforma porosa dando lugar a la preforma transparente. Como el crecimiento y el colapsado se producen en la misma atmósfera, es más eficiente el control de los contaminantes. Por otro lado, la longitud de la preforma puede ser del valor deseado aparentemente sin restricciones de longitud.

Las distintas patentes para los métodos de fabricación MCVD/OVD/VAD para FO del tipo multimodo y monomodo vencen en el período desde 1998 al 2002.

3- ESTIRADO DE LA PREFORMA

La preforma debe ser estirada para llevarse a las dimensiones normalizadas de las FO. Por ejemplo, de una preforma de 1 m de longitud se pueden estirar varios kilómetros de FO del tipo 9/125. El esquema del proceso de estirado se muestra en la **Fig 02** y consiste en las siguientes etapas: horno de calentamiento, control de diámetro, colocación del recubrimiento primario, horno de secado, capstan y enrollado.

La **preforma** se coloca en la parte superior de la máquina de **estirado** que tiene cerca de 4 m de altura. El centrado de la preforma en el horno es manual. En este caso se eleva la temperatura del horno para reducir la viscosidad hasta un valor donde fluya por debajo debido a la gravedad un hilo de FO.

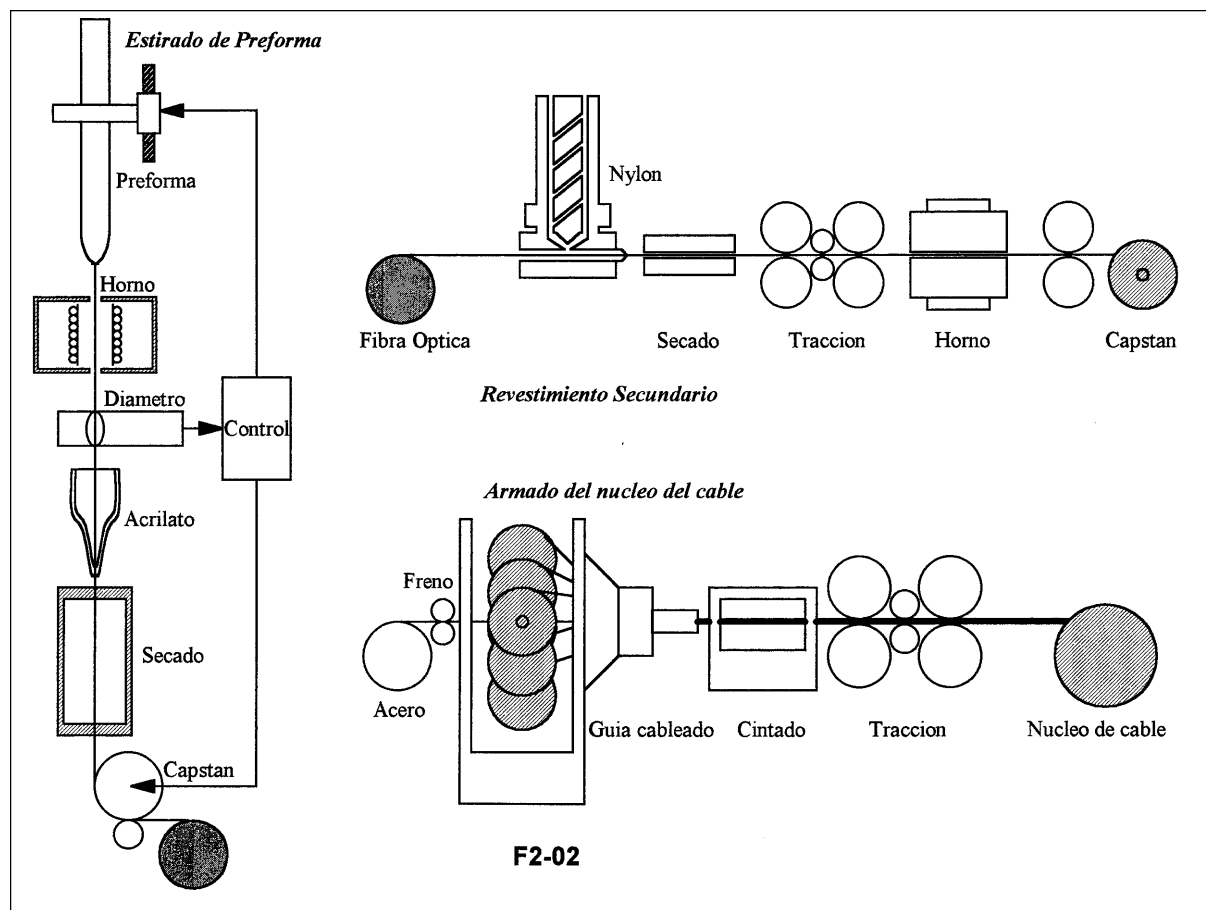


Fig 02. Forma de estirado de la preforma y ensamble de cables.

El horno puede ser de **grafito o zirconio**. El horno de grafito requiere estar inmerso en un flujo de gas inerte (N o He/Ar) para evitar la migración de contaminantes; es enfriado en un cuerpo de agua y controlada la temperatura mediante un pirómetro. El tiempo de vida medio es entre 1500 y 2000 hs y funciona a 30 KVA. Para lograr un mejor control se recurre al **horno de inducción de zirconio** (introducido en 1977 para evitar el uso de gas inerte) que trabaja entre 150 y 400 kHz. En todos los casos se realizará un flujo laminar ascendente a lo largo de la FO y la preforma en calentamiento dentro del horno para impedir turbulencias térmicas que se traducen en variaciones del diámetro de la FO. Sin embargo, no se requiere de un gas inerte pues el zirconio no reacciona con el oxígeno.

El medidor de diámetro controla el posicionador x-y de la preforma y la velocidad de estirado del **capstan** a partir de un sistema de control por ordenador. La resolución del instrumento debe ser superior a 1 μm y de rápida lectura por lo que se recurre a medidores láser. Posteriormente se coloca un **recubrimiento primario** (*Coating*) de acrilato. Esta capa de 250 μm de diámetro nominal y 10% de tolerancia, protege la superficie de la FO del ataque de los iones OH. Los radicales oxidrilos producen la oxidación de la superficie de la FO, rompiendo los enlaces Si-O-Si y formando grupos silanol Si-OH. Este proceso produce microfracturas en la superficie con lo que incrementa la posibilidad de fractura de la FO.

El material sintético (**acrilato** curado con UV o también hace algún tiempo **silicona**) se coloca por estrusión en un embudo que puede ser una punta flexible y que permite que la FO permanezca en el centro debido a la acción de las fuerzas

CABLES CON FIBRAS OPTICAS

hidrodinámicas. Una FO sin este recubrimiento de protección se convierte en frágil y quebradiza en algunas horas de exposición al ambiente natural. Posteriormente se tiene un medidor de diámetro del recubrimiento y de concentricidad de éste con la FO; el mismo se realiza con un láser y observando el diagrama de interferencia en una pantalla. El material es **secado o curado** mediante un horno (para silicona con temperatura de 100 a 450°C) o rayos UV (para acrilato con longitud λ de 240 a 400 nm).

Por último, la FO se recoge en una bobina mediante un capstan de estirado que trabaja a una velocidad entre 15 y 300 m/min. Muchas veces en este mismo lugar se realiza la prueba de "*screen test*" o "*proof test*" que consiste en ejercer una tracción sobre todo el largo de la FO de forma que se crean y propagan todas las microfracturas posibles en la superficie asegurando que se soportará una fuerza de tracción igual a la de prueba sin inconvenientes. La FO en estas condiciones tiene una carga de rotura superior a la del acero (5000 contra 3000 MN/mm²).

Un modelo de comportamiento creado por Mitsunaya permite calcular el tiempo de vida de la FO en base a los resultados de la prueba de proof test. Para fibras convencionales se encuentran que se tienen $7,5 \cdot 10^{-5}$ roturas espontáneas en 30 años de vida de un cable por cada 2 km de longitud.

4- CABLEADO DE FIBRAS ÓPTICAS

4.1- RECUBRIMIENTO SECUNDARIO

El tipo de **recubrimiento primario** no es suficiente para asegurar el continuo mantenimiento de las propiedades ópticas de las FO durante la vida útil. Para elevar la resistencia a la tracción y a los esfuerzos mecánicos transversales, mediante el principio de reparto de carga, se acude a la colocación de un **recubrimiento secundario** de material con alto módulo elástico como poliamidas¹⁾, poliéster, poliuretanos, etc.

Existen dos formas básicas de recubrimiento secundario: el **adherente** (*tight*) y el **suelto** (*loose*). En el tipo suelto se construye un tubo holgado de poli-butano con la FO en su interior. El espacio libre entre las paredes del tubo actúa como aislante mecánico y se rellena con un gel tixotrópico. En el adherente el tubo es más pequeño y el espacio se completa con un material de bajo módulo elástico, como la goma silicónica, que actúa de amortiguador (*buffer*) para el movimiento de la FO. Distintas variantes sobre estos dos tipos buscan aumentar el número de FO en un reducido espacio.

Desde el punto de vista del diámetro exterior la protección suelta es mayor (2 mm) que la adherente (0,9 mm). Pero, las solicitaciones transversales y las dilataciones o contracciones por la variación de temperatura se transmiten desde el recubrimiento a la FO en el adherente. Sin embargo, la protección en los extremos del tubo es más débil en el suelto. El cambio de longitud de una FO de sílice para 1 Km de longitud entre 20 y 40°C es:

$$\Delta L = \alpha \cdot T \cdot L = 1,1 \text{ cm}$$

donde el coeficiente de expansión térmico lineal α es $5,5 \cdot 10^{-7}$ por °C.

El **recubrimiento secundario** se realiza en una línea de extrusión, la que consiste en una cabeza estrusora alimentada desde una tolva con el material sintético. Mediante un motor unido a un huso (tornillo sin fin) se transporta el material a lo largo de varios estadios de calentamiento. La cabeza coloca el material fluido en forma de tubo holgado o adherido a la FO. Luego, con una batea con agua se enfría y se tracciona hacia el rollo. Tal procedimiento se muestra en la **Fig 02**. La línea puede estar preparada para manejar varias FO y para colocar un **gel de relleno** (*jelly filling*) **tixotrópico** para impedir la migración del agua o humedad dentro del tubo suelto. Hoy día estos materiales actúan como centros de absorción de H para FO en la segunda ventana²⁾.

En 1983 se encontró que el H reacciona con las FO y aumenta la atenuación principalmente más allá de 1 μm . Las fuentes de H son: la degradación de polímeros, la liberación desde metales (retienen H en trampas formadas por granos o dislocaciones; el Al libera H a 20°C y el acero por encima de 120°C), la corrosión galvánica (los hilos de acero revestidos de zinc con el agua de mar crean un par hierro-zinc que emite H por electrólisis) y las bacterias alógenas (fermentan sustratos orgánicos liberando H). Ahora bien, las FO aún con el recubrimiento secundario no están totalmente preparadas para la instalación y para una vida útil segura. Para lograr este objetivo se cablean las FO en un conjunto más apropiado.

4.2- NÚCLEO DEL CABLE

El cable consta de los siguientes elementos:

- refuerzo a la tracción;
- fibras ópticas FO;
- conductores metálicos;
- separadores de plásticos;
- rellenos para dar uniformidad cilíndrica;
- refuerzo de amortiguamiento radial;
- pantalla y cubierta exterior.

Las propiedades que debe cumplir el conjunto son: alta flexibilidad; bajo peso; alta resistencia a la tracción, torsión y vibración; fácil identificación de las FO y el cable; sencillez de limpieza, corte y empalme de FO; buen comportamiento climático; alta resistencia química, al fuego y al agua.

¹⁾ El Nylon fue sintetizado por vez primera en 1934 por W. Carothers en DuPont. El Nylon es un polímero sintético cuya estructura química es: $(-\text{CO}-\text{NH}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_4-)$.

²⁾ El oxígeno es un elemento muy necesario y a la vez peligro para la vida. Cuando 2000 millones de años atrás la demanda de H por parte de las bacterias terminaron con el CO₂, los antepasados de las actuales cianobacterias tomaron el oxígeno del agua H₂O y liberaron O₂. Se produjo entonces una saturación de oxígeno libre provocando un holocausto en la vida. Aparecieron entonces aquellos seres que consumían oxígeno, para ello se dispone de la Hemoglobina. Se trata de una gran molécula que en su centro dispone de un anillo de átomos de Fe para transportar solo un átomo de O hasta las células que lo necesitan.

CABLES CON FIBRAS OPTICAS

El **núcleo del cable** tiene tal variedad que una clasificación resulta difícil; sin embargo, se puede intentar un agrupamiento basado en los ejemplos de la **Fig 03**:

- cable monofibra o bifibra (A,J)
- cable multifibras recubrimiento adherente: simple o múltiple (B,C)
- cable multifibras recubrimiento suelto: simple o múltiple (D,E,F,G)

Por otro lado, la cubierta del cable responde al método de instalación:

- cubierta para cable por conducto (B,G)
- cubierta para cable aéreo (D,I)
- cubierta para cable enterrado (C,E,H)

ELEMENTO DE TRACCIÓN. Se han usado hilos de acero, monofilamentos de plástico o fibras textiles o de vidrio. La elección se fundamenta sobre la forma de instalación. Por ejemplo, los cables instalados en conductos requieren una tracción durante la instalación pero su vida útil transcurre casi sin *stress* mecánicos. El tendido en conducto lleva una fuerza de tracción que se incrementa con el coeficiente de fricción entre la cubierta y el ducto. En ductos rectos el incremento es lineal con la longitud y en las curvas es exponencial. En los cables aéreos, en cambio, el elemento de tracción debe soportar fuertes esfuerzos durante la vida útil debido a la acción del viento, nieve, etc.

La elección del elemento de tracción depende del módulo de Young deseado, la resistencia mecánica, el peso, la estabilidad a largo plazo, la facilidad de manipulación, la reacción a la corrosión, el corte y empalme del mismo, la propagación de la llama, las características dependientes de la temperatura y el costo. Cuando se usan hilos de acero se debe recordar que la rigidez a la flexión del hilo de acero es proporcional a la cuarta potencia del diámetro por lo que se recomienda como elemento de refuerzo hilos trenzados en lugar de una única varilla lo cual permite mayor flexibilidad.

En los núcleos de "**cables dieléctricos**" (libres de metales) se usan monofilamentos como el poliéster aromático (*Kevlar* de *Du Pont*), hilaza o aramida que tiene una relación entre la resistencia mecánica y el peso 3 veces superior a la de los hilos de acero pero a un costo muy superior³).

CABLES RELLENOS. El cable puede estar relleno de un gel que impida la propagación del agua o humedad. El mismo debe contemplar la estanquidad del agua, la manejabilidad, la aceptación por parte del personal, la facilidad de colocación, la inflamabilidad, la resistencia al cizallamiento, la compatibilidad de los compuestos, y el comportamiento frente al cambio de temperatura. Los **materiales de relleno** son el petrolato o el polibutano al 65% con aditivos (densidad de 0,908 gr/cm³). El aceite tixotrópico de relleno es químicamente neutro; en la gama de -30 a +70 °C no se congela, no fluye y es limpiable.

La producción del núcleo del cable se realiza en la máquina reunidora de la **Fig 02**. La **reunidora o cableadora** consiste en una jaula cilíndrica donde se colocan las bobinas de FO, los conductores de Cu, rellenos y separadores y se reúnen en forma helicoidal sobre el miembro central. Luego se encinta el conjunto para darle rigidez cilíndrica y se enrolla en un carrete. El paso posterior es colocar la vaina exterior del cable en una estrusora apropiada.

4.3- CUBIERTA EXTERIOR

La cubierta exterior del núcleo tiene diversas características en función del medio ambiente. Así, por ejemplo:

- Como barrera contra compuestos químicos agresivos y aceites.
- Se usa la cubierta tipo **PAL** (cinta de aluminio recubierta en polietileno) y **PE** exterior.
- Contra roedores o bordes afilados se usan armaduras de acero.
- Se trata de una corona de alambre helicoidales, fleje o lámina ondulada.
- Contra radiaciones ultravioleta se coloca 2,5% de carbón negro en el PE.
- Contra campo electromagnéticos se usan cubiertas no metálicas (*Kevlar* y PE).
- Contra hormigas y termitas se coloca una capa de poliamida.
- Contra el fuego se usa PVC o materiales libres de alógenos.

Los **materiales alógenos**, como el polietileno PE ($-\text{CH}_2-$), producen gases tóxicos, corrosivos y denso humo al ser calentados o sufrir incendio. Las cintas de Al o acero son excelente barrera contra el fuego pero dan rigidez al cable.

³) El Kevlar es usado en neumáticos junto con fibras de acero y goma natural (el caucho es un derivado de la planta tropical *Hevea Brasiliensis*) o artificial (sintetizada en laboratorio). En la actualidad se investigan otras fibras con mejores propiedades que el kevlar: la fibra producida por la araña (es más resistente y elástica que el kevlar, además es reciclable). La seda producida por el capullo de un gusano es de fácil recolección, pero las arañas son caníbales y no se pueden criar en grupos. Por ello deben transferirse los genes a bacterias que la produzcan. El filamento antes de abandonar a la araña sufre un proceso de acidificación que elimina el hidrógeno y arquea las fibras generando puentes entre las mismas, permitiendo la cohesión y endurecimiento.

CABLES CON FIBRAS OPTICAS

Otros materiales que podrían usarse son inorgánicos (amianto o fibra de vidrio) u orgánicos (poliamidas). La cubierta del cable es la primera defensa y debe contener aditivos que al calentarse se descompongan en productos inofensivos. Por ejemplo, la alúmina trihidrata $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ libera el 30% del peso en agua con temperaturas entre 160 y 260°C en una descomposición endotérmica. El agua desprendida extingue la ignición, absorbe calor y desaloja oxígeno. En tal sentido, se ha adoptado el **PVC** (cloruro de polivinilo $-\text{CH}_2-\text{CHCl}-$) como cubierta exterior para cables en túneles, galerías o interiores de edificios. Sin embargo, el PVC, que retarda la llama, produce un denso humo negro que crea pánico y genera gases corrosivos que encarece la reparación de equipos eléctricos.

Hoy día se prefieren los **materiales libres de alógenos** que se caracterizan por el:

-índice de oxígeno: mínima concentración de oxígeno (%) en una mezcla de nitrógeno que mantiene la combustión y el

-índice de temperatura crítica: la temperatura a la cual el índice de oxígeno es 21% en el aire a temperatura ambiente.

La resistencia a la llama aumenta con el incremento de ambos índices. Se obtiene, como residuo de la combustión, agua lo que ayuda a cancelar la llama.

Las pruebas que se efectúan sobre la cubierta se describen en las normas **IEC 331** sobre resistencia al fuego y IEC 332 sobre propagación y retardo de la llama. En lo referente a costos los materiales libres de alógenos cuestan entre 2,5 y 3,5 veces más que el PVC. Se indica que la prueba de resistencia a la llama debe realizarse en 3 hs de exposición a 750°C. Suele incluirse un máximo de 10 min a 1000°C seguidos por 5 min de un rocío de agua a 15 lt/min. Un cable con cubierta PAL retarda el efecto de la llama sobre la FO; sin embargo, se comprueba que el recubrimiento primario de acrilato resiste la llama mientras que la silicona se destruye en 30 min. Para FO que deben trabajar en alta temperatura se han desarrollado recubrimientos de aluminio que soportan de 200 a 350°C continuos.

Sobre los cables con fibras ópticas se realizan las siguientes pruebas:

-Resistencia a tracción de las fibras ópticas y del cable compuesto;

-Ciclo de temperatura sobre ambos;

-Pruebas de aplastamiento e impacto sobre el cable;

-Pruebas de penetración de agua o humedad en el cable;

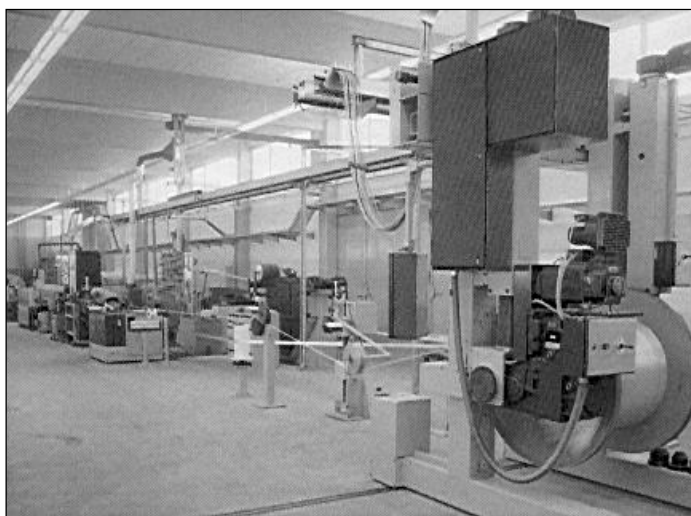
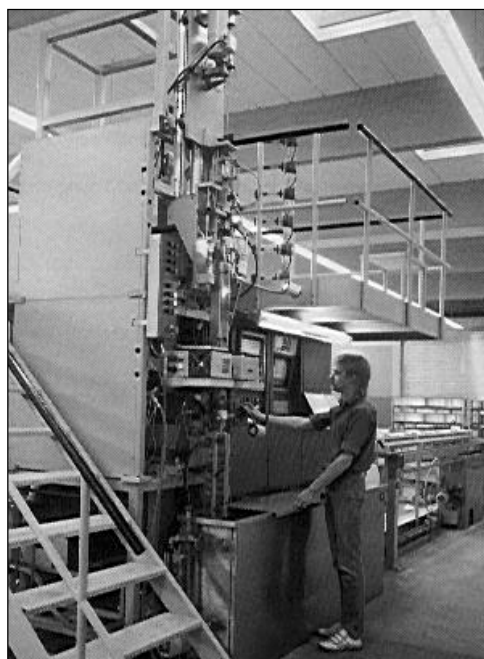
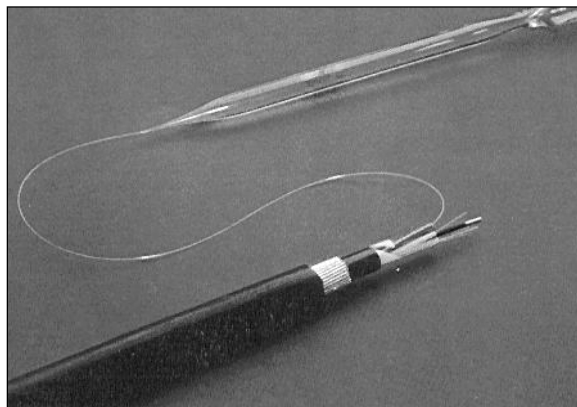
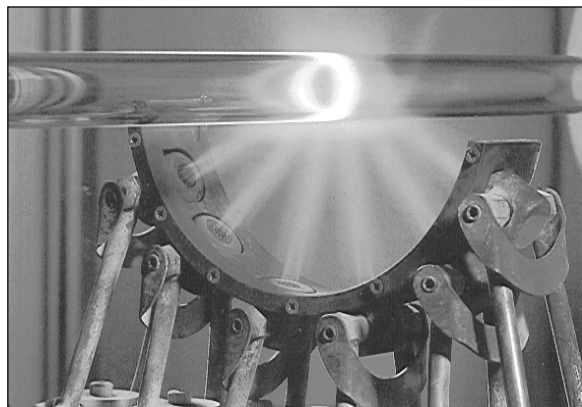
-Pruebas mecánicas de torsión, curvatura y flexión;

-Pruebas eléctricas de rigidez dieléctrica de aislamiento y

-Pruebas de adaptación ambiental y contaminación.

CABLES CON FIBRAS OPTICAS

LAMINA: PRODUCCION DE FIBRAS Y CABLES OPTICOS. Proceso de producción OVD de la preforma; máquina para el estirado de la preforma; máquina para el cableado del núcleo óptico; tipos de cables ópticos.



5- EJEMPLOS DE CABLES ÓPTICOS

Se describen diferentes modelos de cables que se muestra en la Fig 03a/b;

A- CABLE MONOFIBRA: Este tipo de cable consta de una sola FO con revestimiento de 125 μm . El recubrimiento primario es del tipo adherente de 2 capas: acrilato de 250 μm , silicona de 400 μm y PVC o Nylon de 0,9 mm de diámetro. Se completa con un miembro de tracción radial de Kevlar de 2,4 mm de diámetro y una cubierta exterior de PVC de 3 mm. Con este esquema de cable monofibra pueden construirse cables de 2 FO uniendo en forma de ocho ambas FO y hasta cables encerrando en una única vaina exterior 4 cables monofibra.

B- CABLES A GRUPOS: Este cable fue usado en el proyecto Cidiba de la Entel-Argentina en 1980. Consiste en un miembro central de tracción (7 hilos de acero de 0,9 mm galvanizado y aislados en PE), conductores de cobre (4 cuadretes de Cu de 0,9 mm de diámetro aislado en PE), 6 grupos de FO con un alambre central de acero de 0,95 mm y recubierto el grupo por cintas de plástico. En algunos casos existen rellenos cilíndricos de PE. La cubierta es de PAL y PE. Los cables contienen entre 8 y 60 FO y el diámetro exterior está entre 22 y 25 mm con un peso entre 410 y 580 kg/km. Las FO son del tipo multimodo con un perfil de índice gradual con diámetros 50/125 μm ; trabajan en la primera ventana (0,85 μm) y tienen recubrimiento adherente de 0,9 mm. La atenuación es inferior a 3 dB/km y el ancho de banda superior a 800 MHz/km. El descrito es un cable típico de la primera mitad de los años 80.

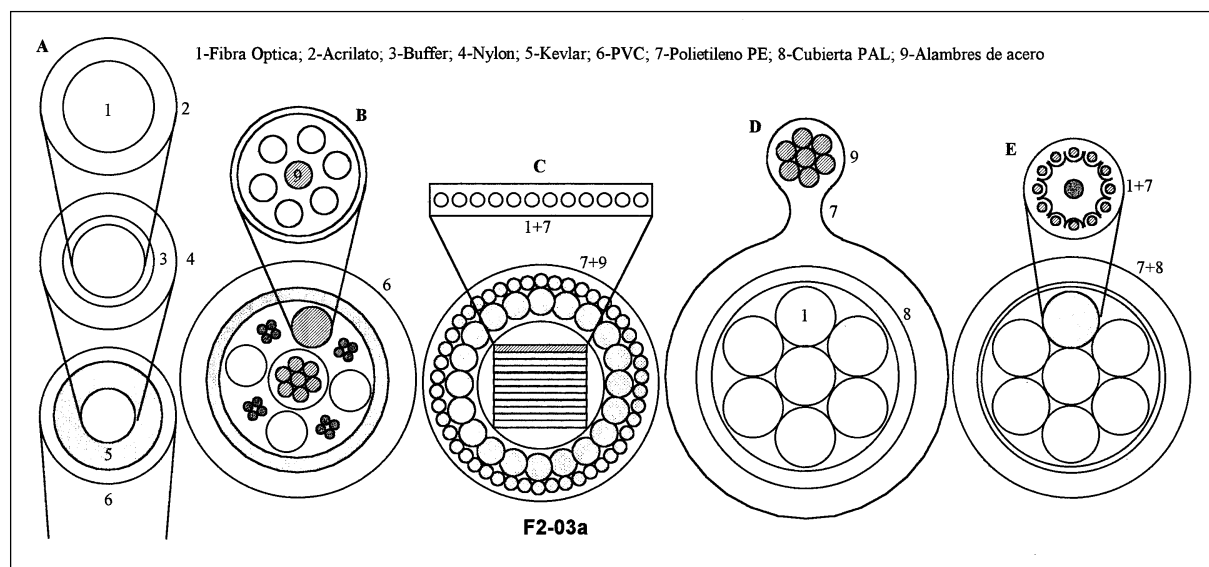
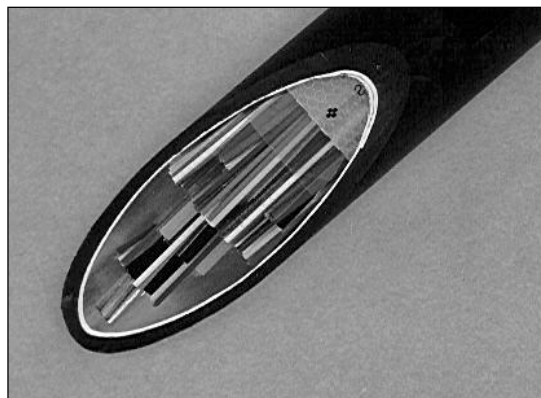


Fig 03a. Tipos de cables ópticos.

C- CABLE A CINTAS: Este cable consiste en 12 cintas de 12 FO cada una, lo cual permite formar un cuadrado de 144 FO. Este módulo tiene una estructura helicoidal. La cubierta consiste en 2 capas de hilos de acero con helicoicidad opuesta y PE exterior. Obsérvese que el elemento de tracción se encuentra en la periferia del núcleo de cable.

D- CABLE AÉREO: Para la Administración alemana los cables del tipo *slotted core* (E, F y G) con ranuras helicoidales tiene problemas en el huelgo longitudinal y bilateral entre FO; por ello adoptó el modelo de recubrimiento suelto a tubo simple o múltiple. La FO tiene dos capas de acrilato, la exterior con mayor resistencia mecánica y admite colorantes. El tubo tiene un diámetro exterior de 1,4 mm si contiene una FO y de 3 mm para 10 FO. El espesor del tubo es del 15% del diámetro. El tubo está relleno de aceite



CABLES CON FIBRAS OPTICAS

tixotropizado que entre -30 y +70°C no congela y es químicamente neutro. El relleno del cable es de poli-isobutileno que mejora al petrolato. En el caso de la figura se muestra un cable aéreo de 6 FO con el miembro de sostén adherido en la cubierta de PE en forma de ocho.

E- CABLE RANURADO: Este tipo de cable consiste en módulos de hasta 10 FO. Es un cilindro ranurado helicoidalmente con un alambre de acero en el centro. El cable de la figura consiste en 7 módulos (cable de 70 FO). Obsérvese que el miembro de tracción consiste en una cinta de acero exterior revestida en PE.

F- CABLE SUBMARINO: Este cable consta de 4 o 6 FO monomodo para 1,55 μm con atenuación inferior a 0,25 dB/km. Tiene un soporte de PE helicoidal y relleno de un gel. La FO tiene una elongación mayor en 1,1% al del soporte. El hilo central de Cu sirve para la alimentación. El núcleo del cable está cubierto por dos coronas de alambres de acero rellenas de Cu y con PE exterior. Este tubo de Cu sirve como retorno para la alimentación de los repetidores.

G- CABLE CON CANALES: El miembro central puede ser de acero (19 hilos de acero galvanizado de 3,2 mm de diámetro con PE) o de plástico (poliester con fibras de vidrio longitudinales). El perfil es estruido con canales abiertos helicoidales. Se colocan hasta 8 FO por ranura con recubrimiento primario coloreado. Las 6 ranuras están rellenas de gel (no-tóxico, no-higroscópico, antihongo, aislante y compatible con el resto de los componentes). La cubierta exterior es de tipo PAL (cinta de Al de 0,2 mm de espesor y cubierta de PE de 50 μm) con PE exterior de media densidad (0,95 gr/cm^3). El cable para conducto tiene un peso de 230 kg/km con acero y 198 kg/km con plástico; su diámetro es de 15,2 mm. El mismo núcleo con la cubierta de acero para ser enterrado pesa 345 kg/km y tiene un diámetro de 17,7 mm.

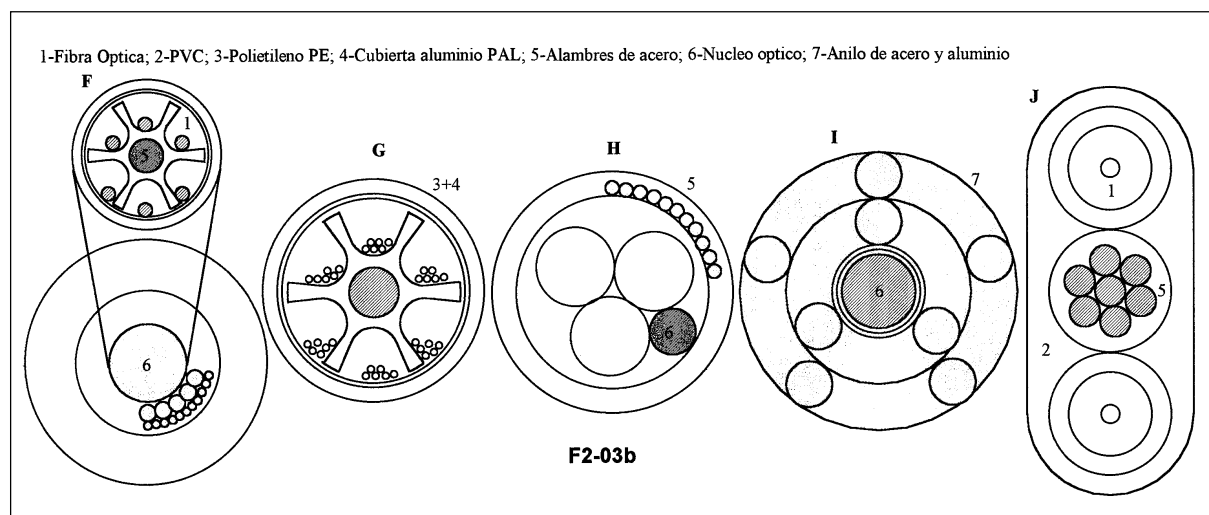


Fig 03b. Tipos de cables ópticos.

H- CABLE DE ENERGÍA: Este tipo de cable es un cable trifásico con cubierta de acero y PE y tiene en uno de los huecos que queda entre cada fase un cable óptico de las características deseadas. Este cable óptico consiste solamente en el núcleo del cable sin la cubierta.

I- HILO DE GUARDIA (OPGW): Este es uno de los varios modelos de hilo de guardia. Consiste en 8 segmentos de Al y acero, con un diámetro exterior de 17,4 mm y con un peso de 769 kg/km. Dentro del tubo de Al central se coloca un núcleo de cable óptico.

J- CABLE PARA EDIFICIOS: Consiste en un cable de 2 FO y un alambre central de acero. Las dimensiones exteriores del cable son de 10x5 mm. La cubierta exterior es de PVC, pesa 40 kg/km y soporta una carga máxima de 40 kg.



INSTALACIONES DE CABLES OPTICOS

Acerca de las instalaciones de cables con fibras ópticas en conductos urbanos, directamente enterrados, aéreos y subacuáticos.

En el presente trabajo se realizan permanentes referencias a cables instalados en los últimos 20 años. Esta es la mejor forma de ilustrar un tema en el cual la experiencia puede tener tanto valor como la teoría.

1- INSTALACIÓN EN CONDUCTOS

GENERALIDADES. Como regla general todos los métodos de instalación deben permitir hacer uso de herramientas convencionales para reducir la necesidad de máquinas y herramientas especiales. Entre los cuidados más importantes en una instalación de fibras ópticas FO se tendrá en cuenta que nunca deberá excederse la carga máxima del cable debido al peligro de rotura de las FO.

Durante la instalación es deseable grandes longitudes de tendido para reducir al mínimo el número de empalmes. La ventaja de los cables con FO es el reducido tamaño y peso, lo cual permite el tendido de entre 2000 y 4000 m de cable haciendo uso de los métodos convencionales. Esta distancia se reduce cuando la canalización está en mal estado, tienen excesivas curvaturas o existen muchos cambios de dirección en las cámaras.

1.1- SUBCONDUCTOS Y LUBRICANTES

SUBCONDUCTOS. Los conductos pueden mejorarse con la colocación de **sub-conductos**, lo cual incrementa la eficiencia en el uso de la infraestructura existente ya que permite instalar más de un cable por ducto. Además introduce una superficie de alta calidad, limpia y continua. Existen soluciones de compromiso que permiten colocar 3 tubos de 27 mm en el ducto de 100 mm de diámetro. Algunas Administraciones han usado 4 tubos. En la fotografía en la lámina anexa se muestra un rollo de tritubo y las cajas de fibrocemento para registro de empalmes en la instalación de Bariloche-Esquel para Telefónica de Argentina.

Los tubos de plástico corrugados transversalmente tienen la particularidad que los pliegues poseen un elevado grado de elasticidad longitudinal plegándose en la dirección del tendido e incrementando algunas veces la fricción. Existen también subductos con pliegues longitudinales que permiten un menor contacto con el cable y sirven como canal para los lubricantes. Los subductos, que se proveen en bobinas como los cables de grandes longitudes, tienen una cinta de Nylon para el tendido del cable. Esta línea mensajera se coloca mediante aire comprimido.

Los tubos son anclados en el extremo del ducto mayor mediante piezas estancas al agua que impide el acceso de la humedad desde el ducto al subducto. Comercialmente se encuentran conductos de un tubo (ducto) de dos tubos (biducto) y de tres tubos (tritubo). Los elementos que completan los materiales de instalación son: uniones dobles para tritubos, sujetador de ducto a la cámara de inspección y tapón de cierre de tubo.

LUBRICANTES. Para facilitar la instalación, el tendido puede realizarse con la ayuda de **lubricantes** que disminuyen el rozamiento entre el cable y el conducto. Algunos lubricantes muy viscosos pueden llegar a aumentar la carga de tracción. Cuando el tendido se efectúa a mano el lubricante puede llegar a causar problemas al personal si se lo usa en abundancia. En tal caso es conveniente no usarlo. Desde la primer instalación en Buenos Aires-1981 no se usó lubricante. En otra instalación en Montevideo-1986 se usó en un principio lubricante y se comprobó que incrementaba la resistencia a la tracción por lo que dejó de usarse.

En el proyecto COS-2 (Italia) se usó vaselina líquida al 1% de disulfuro de Molibdeno (lubricante sólido) lo cual permitió reducir en un 20% la carga de tracción. El tendido se completó con poleas intermedias en las cámaras que contenían cambios de nivel o dirección. En el proyecto de Biarritz (Francia) se usaron como lubricante microbolitas de Nylon de 0,2 a 0,6 mm mezcladas con parafina. Según *Comstock&Co* la lubricación con microesferas de polímeros produce una reducción del coeficiente de fricción del 70 %.

En Suecia se investigaron los **coeficientes de fricción** entre diferentes conductos (concreto, fibras de vidrio, fibrocemento, plástico y PVC) y lubricantes apropiados. Se obtuvieron mejoras del 50 % con grasa parafinadas y del 75 % con bentonita y glicol etileno. Los valores obtenidos se modifican con la temperatura, cantidad de lubricante, diámetro y material de la cubierta del cable así como su rigidez.

INSTALACIONES DE CABLES OPTICOS

EL TENDIDO. Fundamentalmente el tendido de cables se efectúa a mano, aunque se han diseñado **máquinas neumáticas** controladas por microprocesador para ayudar al tendido. Ver por ejemplo la fotografía anexa de una máquina Plumett.

Para la instalación se requiere de la comunicación entre cámaras, pudiendo ser realizadas mediante radiocomunicaciones o con un canal auxiliar. El par auxiliar de cobre no se lo utiliza desde mediados de la década de los '80; en los años '90 se introdujo el uso de un teléfono óptico que utiliza una FO vacante del cable para una comunicación vocal analógica. En los primeros años se han hecho pruebas y correcciones en la instalación. Por ejemplo, en 1980 en México D.F. se instaló un cable óptico de 7,6 km de longitud. El cable, que no tenía protección exterior ya que era totalmente dieléctrico, fue atacado por roedores. Se inyectó aire caliente para ahuyentarlos de los conductos y luego se los selló. Ante nuevos ataques en las cámaras en lugar del conducto se reemplazó el cable por otro con una vaina de acero.

Existen diversas opiniones con respecto a la **identificación exterior** de los cables. Algunos proponen señalarlos con pintura exterior para indicar su importancia, mientras que otros piensan que esto puede facilitar los actos vandálicos o de sabotaje. Téngase presente la costumbre del robo de cables de cobre para recuperación de la materia prima. En la mayoría de los casos se adoptó el criterio de ubicar los cables en lugares aislados de las cámaras, generalmente lo más elevado y sin pintura exterior.

Para los **cables instalados en túneles** es conveniente suministrarle un soporte plano y continuo al cable de FO para evitar compresiones localizadas o deformaciones en los puntos de soporte. En los edificios el recorrido es más tortuoso que en los conductos, por ello el cable será más flexible y robusto, debiendo estar diseñado para soportar subidas verticales prolongadas sin afectar a las FO. Se prefiere el recubrimiento adherente en este caso. También existe preferencia por la cubierta exterior de PVC o materiales no-alógenos.

TIEMPOS DE INSTALACIÓN. Como ejemplo se realiza una comparación en lo referente a los **tiempos de instalación** (en unidades de horas/hombre) de un cable de 10 km de longitud. Se toma un cable multipar de 1200 pares de conductores de cobre de 0,4 mm, un cable coaxial de 6 tubos de 2,6-9,5 mm de diámetro y un cable con 8 FO. Las hipótesis de tiempo de trabajo son (**Tabla 01**):

- Se toman longitudes de tramos de cable típicos;
- Los grupos de instalación son de 6 personas y 7 horas de trabajo (un tramo por turno);
- Los grupos de empalme se consideran de 3 personas y 7 hs de trabajo;
- Luego resulta en, 2 turnos por empalme para multipar y un turno por empalme para coaxial y FO.

Tabla 01: Comparación de instalación de cables respecto a las fibras ópticas.

Cable	Diámetro	Tramo	Peso kg/km	Capacidad	Instalación	Empalmes
multipar	70mm	200m	5900kg/km	1200 canal	2100hs/h	2100hs/h
coaxial	55mm	300m	2100kg/km	8100	1400hs/h	700hs/h
óptico	25mm	800m	510kg/km	30000	500hs/h	250hs/h

Se observa que el tiempo de instalación del cable y los empalmes es menor en los cables con FO que en los cables convencionales. Una nueva ventaja que se suma a las demás ya mencionadas antes.

1.2- DIGRESIÓN: INSTALACIÓN CIDIBA-1980

Tan sólo como ejemplo se dan los datos más importantes del **proyecto CIDIBA** en Buenos Aires-Argentina en lo que respecta al sistema de transmisión por fibras ópticas. Fue licitado en octubre de 1979 y contratado en marzo de 1980 (el primer gran proyecto con FO en Argentina). Los cables fueron instalados entre octubre de 1980 y noviembre de 1981. La red es una combinación estrella-malla que ocupa 548 sistemas de 34 Mb/s y 340 sistemas de 140 Mb/s. Las longitudes máximas entre repetidores son de 11,9 y 11,5 km respectivamente. Son 64 rutas con 340 km de cable y 7845 km de FO. Los cables tienen entre 8 y 60 FO. Existen 517 cajas de empalme de FO realizada la unión por el método de fusión por arco eléctrico (atenuación media de 0,15 dB y máxima de 0,22 dB). El promedio de longitud entre empalmes es de 770 m.

El manipuleo e instalación de cables con FO para el Cidiba sufrió pocas modificaciones con respecto al método empleado en cables convencionales. Las pocas diferencias incluyen el uso de tracción manual aprovechando el bajo peso del cable y la reserva de algunos metros de cable en las cámaras intermedias.

En los preparativos previos para la instalación del cable por los conductos urbanos se realizaron las siguientes acciones:

- Inspección de cámaras y conductos para comprobar la presencia de gases nocivos y aguas estancadas.
- Se ventilan los gases y se drenan las aguas.
- Verificación de la presión del gas dentro del cable antes del tendido con lo que se comprueban daños en la cubierta.
- Implementación de medidas de seguridad como ser las señales de precaución.
- Instalación de un alambre de acero galvanizado de 4 mm de diámetro como elemento de tracción.
- Se efectúa la limpieza del interior del conducto con un cepillo de alambre y trapos unidos al alambre.

INSTALACIONES DE CABLES OPTICOS

- Inspección del interior de los conductos mediante la introducción de un tramo de 2 m de cable como muestra testigo.
- Una capa de esmalte puede facilitar la inspección de la cubierta del cable.

Para el tendido se coloca la bobina del lado de la cámara donde se encuentra la boca del conducto para desenrollar con una curvatura amplia. El cable se guía a mano o mediante un tubo flexible hasta el conducto. En la cámara terminal se instala mediante un juego de poleas el cabrestante deslizante recolector. Debe cuidarse de hacer coincidir el sentido helicoidal interno de torsión entre cables a empalmar. El cable se provee con un extremo para unir el alambre de tracción. Cuando se usan cables de rezago se usarán métodos iguales a los de los cables de Cu, por ejemplo, doblando el extremo del cable en una U cerrada para formar un anillo de enganche.

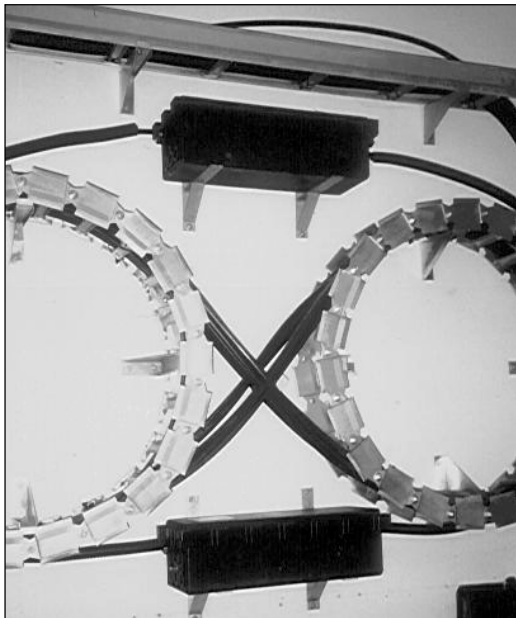
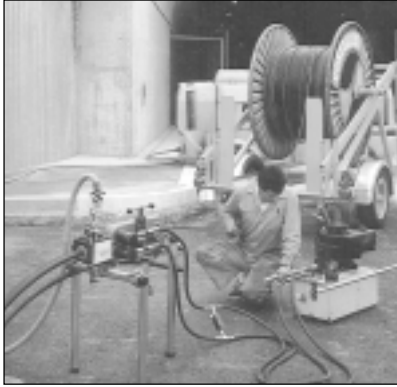
Durante el tendido se recurrió al método de tracción con ayuda en las cámaras de registro intermedias para reducir a cero la carga de tracción posterior, resultando en una alternativa económica frente al uso de capstan mecánicos. Puede usarse la tracción bidireccional comenzando el recorrido en un punto intermedio cuando el tramo es muy largo. También es útil la tracción progresiva consistente en el tendido total del tramo en dos o más partes. Siempre que el cable se extrae de la cámara se coloca en forma de ocho sobre la superficie del pavimento para no alterar la helicoicidad interna de los componentes del cable.

Las pruebas posteriores a la instalación del cable incluyen la verificación de la presión del gas seco en el interior del cable (inferior a 1 kg/cm^2) y la variación de la atenuación de las FO. Se encontró una reducción entre 0,01 y 0,26 dB/km atribuibles a la eliminación de la curvatura en los carretes de embalaje. En las cámaras donde se realizan los empalmes se dejaron varios metros adicionales con el objeto de efectuar el empalme fuera de la cámara, en una carpa.

Aquellos cables que cruzan puentes se colocan con cierta holgura para absorber los movimientos de contracción y expansión térmica. Según los datos de instalación, el promedio del cable es de 770 m y el tendido fue de un tramo por jornada por equipo de trabajo. La tracción máxima aplicada es de 200 kg y la velocidad de tendido máxima de 15 m/min. El radio de curvatura mínimo durante el tendido es de 20 diámetros del cable (500 mm).

INSTALACIONES DE CABLES OPTICOS

LAMINA INSTALACION DE CABLES OPTICOS. Arriba se muestra la instalación de un cable en conducto, mediante un arado junto a las vías del ferrocarril y en una instalación aérea. Debajo se muestra un rollo de tritubo para instalaciones interurbanas junto a las cámaras de fibrocemento (para *Telefónica de Argentina* en Bariloche). Más abajo dos tipos de empalmes para enlaces ópticos (a la izquierda el modelo de la red interurbana de *Telecom de Argentina*) y una medición mediante OTDR.



INSTALACIONES DE CABLES OPTICOS

2- INSTALACIÓN AEREA Y SUBMARINA

2.1- INSTALACIÓN DE CABLES AÉREOS

Los cables aéreos pueden ser instalados sobre empalizado propio o sobre redes de alta tensión ya disponibles. Sobre estas últimas se han diseñado dos tecnologías; el cable totalmente dieléctrico ADSS (refuerzo a la tracción de kevlar) para ser colocado debajo de las líneas de energía y el cable de guarda OPGW metálico colocado sobre las líneas.

CABLES DIELECTRICOS ADSS (*Autosupported Dielectric*). La instalación de los cables aéreos ópticos difiere de los de Cu en que aquéllos están diseñados para una **elongación máxima**. Esto afecta, además del proceso de instalación, a la resistencia al viento, la nieve y a cambios de temperatura. El cable aéreo puede tener un **soporte separado** colocado previamente y al que se engrampa, del tipo **autosoportado** o mediante un conducto aéreo tipo "8". El primer cable aéreo con FO, instalado en Chester (USA) en 1978, tenía 24 FO y soportó el huracán David con vientos de 114 km/h, observándose cambios en la atenuación de 0,3 dB/km cuando en 1979 soportó -17 °C.

Es aconsejable colocar los cables con FO en la posición más alta del poste ya que soportará así mejor la posterior instalación de otros cables. Los postes pueden estar arriostrados para minimizar el movimiento del cable y evitar desplazamientos. El viento y la nieve incrementan temporal y substancialmente la carga sobre el cable. Debe soportar las variaciones ambientales y la instalación, así como las derivadas del transporte de los carretes. La expansión térmica depende de las características de los componentes, en tal sentido los cables dieléctricos son más exigentes.

Muchas veces se desean **cables dieléctricos** para eliminar cualquier problema de inducción y producir una aislación galvánica entre el transmisor y receptor. Sin embargo, los cables dieléctricos tienen un problema de diseño debido a la diferente contracción y expansión térmica de las FO y los plásticos (éstos lo hacen 400 veces más fácil), lo cual obliga al uso de recubrimiento suelto para que la FO esté en exceso dentro del cable. Los cables aéreos permiten el uso de las instalaciones de energía para colocar cables de comunicaciones. Así, por ejemplo, puede usarse cables con FO en redes de alimentación de ferrocarriles, de distribución o transporte de energía, dentro del hilo de guardia, etc. En todos los casos se usa la ventaja de la FO de no recibir interferencia de inducciones electromagnéticas.

Entre las experiencias iniciales más interesantes se encuentra la realizada en 1984 entre el PTT y los ferrocarriles de Suecia instalaron 31 km de cable aéreo a lo largo de los FFCC para transmitir datos a 2 Mb/s y telefonía a 34 Mb/s. Se probaron 3 tipos de cables: uno cilíndrico autosoportado y libre de metales del tipo 8 y otro atado a la línea de retorno de energía. El tipo 8 es más pesado y el atado a la línea de retorno resultó más difícil de instalar. La zona de instalación (Estocolmo) es muy fría; con temperatura de -30 °C, elevadas cargas de viento y nieve, con líneas de 16 KV cercanas y vibraciones por el paso de trenes. El cable se tendió durante los intervalos entre trenes. Por seguridad la línea se puso a tierra por lo que se recurrió a una vagoneta a gasoil. Trabajaron 4 personas más algunos en los pasos a nivel.

En Alemania Federal en los primeros años de los 80' se probó un cable aéreo dieléctrico entre postes de alta tensión con vanos de hasta 500 m, con temperaturas entre -40 a +70 °C y con cargas de viento y hielo. El cable tiene 8 FO, una sección transversal de 50 mm² y un peso de 130 kg/km. El recubrimiento es adherente. Entre la vaina de PE y la cinta de poliéster interior se coloca una corona de plástico reforzado con fibras de vidrio (80 % de fibras y 20 % de resina de poliéster).

DIGRESION: CABLE UTE-URUGUAY-1996. En Montevideo-Uruguay se instala durante 1996 un cable autosoportado entre torres de alta tensión. Se trata de una primera etapa de 30 km de cable (desde el Despacho Nacional de Cargas hasta la Estación Transformadora) de un proyecto más ambicioso a mediano plazo. El cable contiene un tubo de 2,5 mm de diámetro interior y 0,85 mm de espesor; un recubrimiento de Kevlar de 2,15 mm de espesor (25 mm²) y una cubierta de polietileno de 12,1 mm de diámetro exterior (espesor 1,8 mm). El tubo interior contiene 12 FO del tipo G.652.

En la instalación se usaron las torres de alta tensión para soportar al cable. Al mismo se lo ubica debajo del hilo de guardia a 20 mts de altura sobre el terreno. Su peso es de 141 kg/km y en el vano de mayor longitud (380 m) dispone de una flecha de 6,53 m sin viento. Debido a la dilatación por esfuerzo, cuando existe un viento con 130 km/h de velocidad la flecha se incrementa a 14,79 m. La corona de Kevlar permite al cable el soporte y una protección contra disparos de armas. Se han realizado pruebas de balística (*Shotgun Resistance*) con perdigones de hasta 4 mm de diámetro desde una distancia de 25 mts sin daños sobre las FO.

CABLE EN HILO DE GUARDA OPGW (*Optical Power Ground Wire*). Sobre redes de alta tensión una alternativa más costosa pero con muchas ventajas es usar el hilo de guarda (colocado en la parte superior de la torres como descarga a tierra de rayos atmosféricos) para colocar fibras ópticas. Estos cables están realizados mediante acero (para dar resistencia a la tracción) y aluminio (para reducir el peso); en los hilos de guarda de redes normales solo se utiliza acero. El OPGW dispone en el centro de un tubo con varias fibras ópticas (hasta 144).

INSTALACIONES DE CABLES OPTICOS

El OPGW tiene un costo aproximado del doble que un cable dieléctrico ADSS para la misma cantidad de FO y longitud entre vanos en la red de alta tensión. Sin embargo está mucho más protegido por la ubicación física ya que se encuentra en la parte superior de las líneas de alimentación en lugar de estar por debajo. La forma de instalación del OPGW es más compleja y normalmente se procede al corte de la energía para reemplazar el actual hilo de guarda por el nuevo OPGW (esto permite una mayor velocidad de instalación por día; cerca 4 a 6 km/día). La experiencia indica que los cortes sobre hilos de guarda está entre 0,5 a 1 caso por cada 1000 km.año.

2.2- INSTALACIÓN DE CABLES ENTERRADOS

La instalación de cables enterrados puede realizarse por varios métodos: la técnica del **arado vibratorio**, el **cavado de zanjas o trincheras** a mano o con maquinaria, la **colocación de artesas o con perforadoras**. El método más conveniente en largos tendidos es la técnica del arado, debido a que el reducido peso y tamaño del cable hace innecesario el zanjeo. La instalación se realiza con un arado que posee un alimentador en forma de tubo por el cual se desliza el cable y queda colocado en la base del arado. Debe cuidarse la curvatura y la fuerza de tracción sobre el cable, para lo cual puede colocarse un capstan sobre el tubo alimentador del arado. Los cables enterrados estarán a una profundidad cercana a un metro dependiendo del tipo de terreno, lo cual supera la profundidad de los conductos para un mayor protección contra trabajos de cultivo, drenaje e instalación de otros servicios. Resulta conveniente colocar una cinta plástica que indique la presencia del cable de telecomunicaciones a mitad de altura entre el cable y la superficie del terreno. Si el cable enterrado es dieléctrico la cinta de aviso debe ser metalizada para facilitar la detección del cable mediante **localizadores de metales**. Sin embargo, en general el cable tendrá una armadura de acero para evitar daños por movimientos de tierra, excavaciones, ataque de roedores, etc. Los cables enterrados estarán **rellenos** siendo inconvenientes el uso de los cables presurizados (técnica paulatinamente en desuso).

El recorrido del cable debe considerar el derecho de paso por rutas o de vías férreas, teniendo en cuenta posibles construcciones futuras en carreteras o movimientos de tierra como canalizaciones de arroyos. La longitud del cable debe ser lo más extensa posible para reducir el número de empalmes y permitir una distancia mayor entre repetidoras. La velocidad de instalación por el método de arado está entre 1 y 3 km por hora de trabajo, lo cual implica un promedio de instalación de 10 km diarios. Esto obliga a que, como cada tramo tendrá cerca de 5000 m (máxima longitud de fabricación del cable) se deberá poseer varios grupos de empalmadores por cada grupo de instalación. No será necesario en muchos casos la instalación de un hilo de guardia como pararrayos sobre el cable enterrado a mitad de altura como en el caso del cable coaxial ya que las FO son componentes dieléctricos. Sin embargo, debe cuidarse la puesta a tierra común a intervalos regulares de la cubierta de acero y del elemento central si es metálico para impedir que existan diferencias de potencial entre ambos y se perfore el dieléctrico ante la caída de un rayo.

El **cruce de puentes** se realizará mediante la instalación de conductos adheridos en la parte exterior al costado o debajo del mismo, según resulte conveniente, teniendo en cuenta la seguridad, acceso y protección. El cruce de vías y rutas se llevará a cabo mediante la instalación de conductos con cajas terminales en los extremos; puede resultar necesario en ciertos casos el uso de caños galvanizados para tal fin. Es también conveniente la instalación de ductos mediante zanjas en las zonas urbanizadas (estaciones de servicio, policía, almacenes, etc.). Las **estaciones repetidoras** se instalarán en lugares donde exista alimentación, en la gran mayoría de los casos se desaconseja el uso de telealimentación. El equipo electrónico se colocará en contenedores cerrados con acceso para el personal de mantenimiento y deberá tener la facilidad para conectar instrumental de medición para detectar fallas en el equipo electrónico o en el cable.

2.3- CABLES SUBMARINOS

Los **cables subacuáticos** pueden ser posados en el lecho del río, lago o mar o enterrarse mediante arados que son tirados desde el barco. El cable debe diseñarse para soportar la presión del agua y de las corrientes. Donde se realice pesca o dragado debe indicarse la posición del cable. En las fotografías de la lámina anexa se muestra el barco cablero de AT&T y un dibujo en corte del mismo.

EJEMPLO. UNISUR-1994. El cable **Unisur** es un enlace internacional desde el extremo sur de América con conexión a USA y Europa. Fue instalado en 1994 para unir las localidades de Florianópolis (Brasil), Maldonado (Uruguay) y Las Toninas (Argentina). El sistema posee 12 repetidores activos instalados cada 130 Km de distancia. El cable está compuesto de 4 FO del tipo monomodo para trabajar en 1,55 μm con una atenuación de 0,2 dB/km. La dispersión cromática es inferior a 20 ps/km.nm lo que permite la transmisión equivalente a 565 Mb/s. Se disponen de 2 FO entre Argentina-Uruguay, 2 FO entre Argentina-Brasil y 2 FO entre Uruguay y Brasil. Cada par de FO lleva 4 sistemas de 140 Mb/s (incluye 211 Kb/s de *orderwire*) en código NRZ y con paridad (25,24). La velocidad completa es de 591,2 Mb/s. El cable contiene un núcleo de 4 FO en una distribución ranurada (5 ranuras con 4 FO). Un aro con 3 niveles de hilos de acero en espiral permite la protección necesaria en los cables submarinos. Un aro de cobre reviste este conjunto. Mediante este conductor se alimenta a los repetidores activos. La **telealimentación** incluye una tensión de 3 KVolt entre Las Toninas (polo negativo al aro de cobre y positivo a masa) y Florianópolis (polarización invertida). Cada repetidor (32 V) y la línea intermedia consume cerca de 250 V. El aro de cobre se reviste con una cubierta aislante que permite soportar la mordeduras de tiburones. El conjunto se reviste con una cubierta de aluminio laminado PAL y el PE exterior para instalaciones terrestres.

INSTALACIONES DE CABLES OPTICOS

INSTALACION. El cable depositado en la bodega del barco cablero se tendió en el lecho oceánico mediante un "trineo" (arado robotizado) que facilita el enterrado a baja profundidad. En las costas, debido al calado del barco cablero, se requiere acceder mediante un barco de menor porte con la ayuda de buzos. Se colocaron boyas para arrastrar un cable guía hasta la playa, luego se tendió el cable y se lo dejó caer. El cable fue enterrado en la misma arena por los buzos. Para una mayor protección en el acceso a la playa el cable lleva una cubierta adicional de acero en el exterior del conjunto. Los principales agentes de peligro para el cable submarino son las anclas y la pesca de arrastre. En caso de corte se requiere que un barco de reparación llegue hasta el lugar (algunas semanas) y proceda a colocar un *baypass* entre los extremos del cable cortado. Los repetidores instalados en el océano llevan Láser duplicados para permitir un tiempo de vida MTBF de 25 años. El láser de InAsGaP emite -1 dBm y se han usado diodo PIN de InGaAs con una sensibilidad de -33 dBm en el umbral de BER de 10^{-9} . Cada repetidor permite la telesupervisión de los siguientes parámetros: corriente de polarización del láser, temperatura del láser, corriente del detector, errores y BER sobre la base de la paridad, ganancia del AGC del PIN.

MIU (*Minimum Investment Units*). Los cables submarinos internacionales normalmente son generados mediante un consorcio de empresas. Cada una de ellas posee una unidad de inversión denominada MIU. Normalmente este valor es un tributario de 2 Mb/s que, convenientemente multiplicado mediante la técnica **DCME** permite llevar hasta 120 canales de fonía. Utiliza 32 kb/s con codificación ADPCM e interpolación digital; ver para más detalles el trabajo referido a sistemas satelitales que utilizan este proceso de multiplicación desde la década de los años 80.

RED DE COMUNICACIONES GLOBAL SUBMARINA. El cable Unisur descrito más arriba es solo una fracción infinitesimal de la red mundial de comunicaciones mediante cables submarinos. Estas redes se iniciaron con cables coaxiales hasta la introducción de la FO al final de la década de los años 80. En la década de los años 90 se han diseñado e instalado una cantidad innumerable de sistemas submarinos que forman una red global. Entre muchos otros, los sistemas de la **Tabla 02** se han ingresado sobre la **LAMINA** anexa, como referencia de los cables más importantes a fines de siglo.

Tabla 02. Cables submarinos para la red global de comunicaciones.

Cables Regionales para América del Sud.

El cable Unisur (Argentina-Uruguay-Brasil) se extiende hacia el norte mediante el Feston de Brasil. En el extremo de éste se conecta con el cable Atlantis hacia Europa y Columbus hacia USA. El cable **Pan-Americano** parte del norte de Chile para unir Perú, Ecuador, Colombia, Panamá y cruza el Mar Caribe hacia USA. Este cable tiene 7100 km de longitud, con repetidores EDFA cada 120 km y trabajando a STM-16. La velocidad de transmisión es 2,66 Gb/s debido a que utiliza un FEC para corrección de errores. Posee restauración de acuerdo con ITU-T G.841. Posee temporización de estrato 1 PRC en St. Thomas, Panamá City y Arica. Otros cables proyectan formar un anillo con un nuevo cable Atlantis II entre Argentina y Europa y otro con el sud de Africa. Los cables submarinos del Atlántico y el Pacífico se interconectan mediante cables terrestres continentales.

TAT-12/13 (*Transatlantic Telephone*).

Los sistemas TAT se iniciaron en 1953 y describe los cables (inicialmente coaxiales) entre USA y Europa. El sistema TAT-12/13 involucra dos cables para protección en anillo entre USA e Inglaterra y Francia (ver mapa anexo). Se trata de segmentos con un total de 12.766 km. Los repetidores están espaciados cada 45 km y consisten en amplificadores de Erblio EDFA. El TAT-8 de 1988 en cambio posee regeneradores, lo cual impide un upgrade futuro a velocidades superiores o con técnica WDM la multiplexación de sistemas en paralelo por la misma FO. El cable es de 4 fibras trabajando a STM-16.

FLAG (*Fiber optic Link Around the Globe*).

Este cable parte de Inglaterra y termina en Japón (trayecto por el Mediterráneo, Mar Rojo, Océano Indico, India, China). Cubre una ruta de 27.000 km. Con amplificadores EDFA y transportando STM-32 a 5 Gb/s. Como en todos los otros cables está diseñado para trabajar 25 años de vida útil de acuerdo con la calidad G.826. El sistema está sincronizado mediante relojes de estrato 2 y estabilizados mediante receptores GPS.

TPC-5 (*Transpacific Cable*).

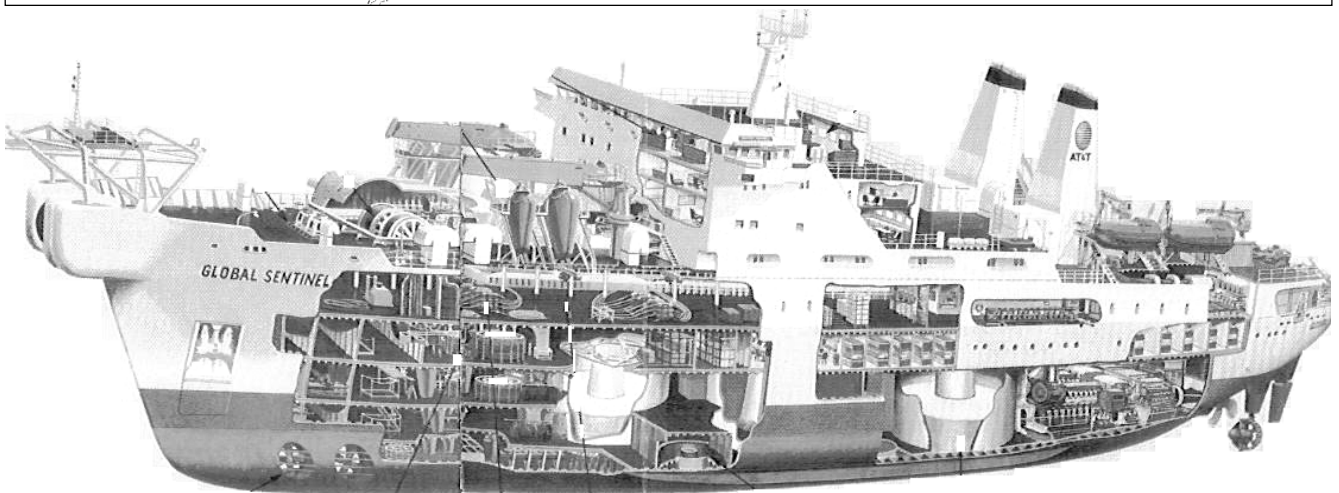
Se trata de un anillo en el Océano Pacífico. Une Japón con USA mediante un enlace directo y otro que pasa por las islas de Guam y Hawaii. Son 24.000 km de cable trabajando a STM-16 siempre por dos pares de FO. Los cables submarinos no tienen más de 4 FO debido al elevado costo de los repetidores, ya que los mismos son de altísima fiabilidad por estar sumergidos y diseñados para 25 años de vida útil. La protección en anillo, como en TAT-12/13 está de acuerdo con la norma ITU-T G.841 para protección *Shared Protection Ring* en el ámbito de sección multiplexora MS en aplicaciones transoceánicas.

Africa ONE.

Este cable posee 40.000 km de longitud y gira alrededor de todo el continente Africano. Mediante sucesivos branching ingresa en todos los países costeros. Trabaja a STM-16.

INSTALACIONES DE CABLES OPTICOS

LAMINA CABLES SUBMARINOS. Un esquema de los cables submarinos señalados en la **Tabla F3-02** junto con un diseño de un típico barco cablero para enlaces submarinos.



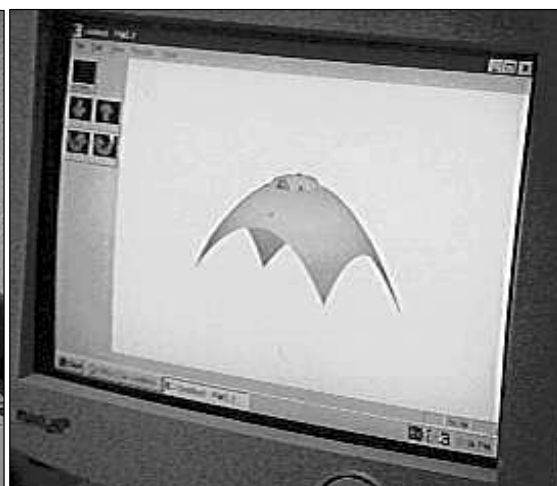
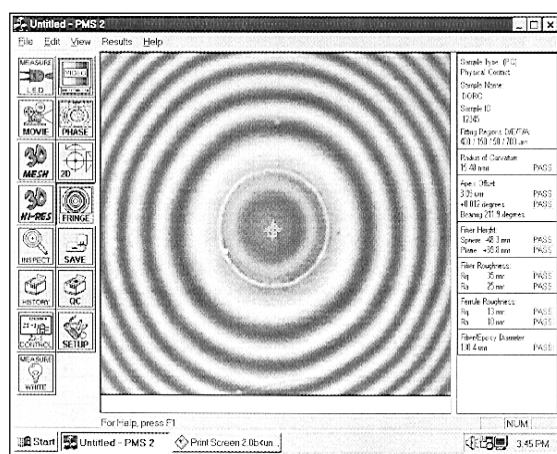
Sobre las mediciones realizadas en los cables de fibras ópticas y en los equipos terminales para sistemas ópticos.

1.1- LISTA DE MEDICIONES.

-Características de **comunicaciones**. Se disponen de las características de: apertura numérica (equivalente a la impedancia característica de una línea), la dispersión cromática (relacionada con el ancho de banda del sistema) y la atenuación espectral (en función de la longitud de onda).

-Propiedades **mecánicas del cable**. Sobre los cables con FO se realizan las siguientes pruebas: resistencia a la tracción de las FO y del cable; ciclo de temperatura; pruebas de aplastamiento e impacto sobre el cable; pruebas de penetración de agua o humedad; pruebas mecánicas de torsión, curvatura y flexión; pruebas eléctricas de rigidez dieléctrica de aislamiento y pruebas de adaptación ambiental y contaminación. Las características se miden de acuerdo con normas del **IEC-793-1**: dispersión cromática, longitud de onda de corte, diámetro del campo modal, dimensiones geométricas, campo lejano y características mecánicas.

-Equipos de línea. Solo se estudian las características ópticas. Se trata de la emisión espectral del Láser (Potencia óptica en función de la longitud de onda y de la corriente eléctrica) y la sensibilidad del detector de luz (mínima potencia óptica de recepción que asegura una BER determinada).



Fotografías. Se muestran a la izquierda el banco de medición denominado interferómetro. A la derecha el reporte escrito de la medida y debajo una imagen 3D del extremo de un conector. Una interesante caracterización geométrica es la de los conectores de fibras ópticas. El instrumento de medida y la hoja de resultados mostrados en esta página permiten identificar problemas sobre la férula y la FO en los conectores.

MEDICIONES EN SISTEMAS OPTICOS

1.2- CARACTERIZACION GEOMETRICA

La medición se fundamenta en la interferencia que se produce entre dos rayos de luz. Uno de ellos se refleja contra un espejo plano tomado como referencia; mientras que el otro lo hace sobre el extremo de la férula. De la interferencia de ambos rayos surge un diagrama de interferencia (denominado anillos de Newton) que permite interpretar los siguientes parámetros:

- Radio de curvatura del extremo de la férula medido en milímetros (simulada una esfera).
- Apex Offset* definido como la distancia entre el centro de la FO y la esfera del extremo medido en micrómetro y grados.
- Fiber Height* es la distancia que sobresale o está unidad la FO respecto de la esfera o de un plano.
- Rugosidad de la FO es la indicación en nm del valor RMS (*Root Mean Squares*) de rugosidad respecto de la esfera.
- Rugosidad de la férula es una indicación similar para la férula en lugar de la FO.
- Diámetro de la FO/epoxi en micrómetros.
- Key error* se refiere al corrimiento vertical en unidades de grados del Apex offset.

1.3- APERTURA NUMERICA Y DISPERSIÓN CROMÁTICA

APERTURA NUMÉRICA AN. Es el valor sin unidad ($\sin \Phi$). Donde Φ es el ángulo máximo de entrada de luz. Si dos fibras ópticas FO tienen igual AN se tiene que el ángulo de emisión de luz es igual al de aceptación de la siguiente y por lo tanto se produce un acoplamiento de luz perfecto. En los cables de cobre la característica que determina una condición semejante es la **impedancia de la línea**; si dos líneas tienen igual impedancia el acoplamiento de energía es completo y no existe onda reflejada. Por lo tanto, se suele comparar la característica de apertura numérica AN de las FO con la impedancia característica de las líneas o guías de ondas.

DISPERSIÓN CROMÁTICA. Es la suma de la dispersión del material y de la dispersión de guía de ondas. La **dispersión del material** se debe a que el índice de refracción del material es función de la longitud de onda. El tiempo de propagación de las distintas longitudes de onda es distinto. Luego, existe una dispersión a la salida del modo de propagación debido a que las longitudes de onda que lo componen tienen velocidades diferentes.

Se define como **dispersión del material** a la variación diferencial del índice de refracción:

$$M(\lambda) = (-1/c) \cdot d n / d \lambda = (\lambda / c) \cdot d^2 n / d \lambda^2$$

Cuando n disminuye la velocidad aumenta y el tiempo de propagación es menor. Existe un valor de longitud de onda cercana a $1,3 \mu\text{m}$ donde la dispersión del material es nula. En otras palabras, cerca de $1,3 \mu\text{m}$ los tiempos de propagación de las distintas longitudes de onda tienden a ser iguales. El valor de λ para el cual $M(\lambda)=0$ se denomina **longitud de onda de dispersión cromática nula** y depende del material.

La **dispersión de guía de ondas** se debe a imperfecciones en la relación entre el radio del núcleo r y la longitud de onda λ de la luz que se transmite. Como consecuencia de ello la distribución del campo y el tiempo de propagación son dependientes de r/λ . En general, esta dispersión se presenta en común con la dispersión del material y resultan inseparables.

Los instrumentos que miden la dispersión cromática son de laboratorio. Difícilmente en la práctica se requiere verificar este valor. Se trata de generar un pulso de luz de características definidas (amplitud gaussiana $W1$ nseg) y medir la dispersión del mismo pulso a la salida ($W2$ nseg) de una longitud unitaria de FO (1 km). La fuente de luz posee un ancho espectral unitario (1 nm). La dispersión $M(\lambda)$ se obtiene como $(W2^2 - W1^2)^{1/2}$ y la unidad de medida es nseg/km.nm.

1.4- ATENUACIÓN Y ESPECTRAL

Así como el ancho de banda se define como el valor de frecuencia de la modulación para la cual se tiene una atenuación de 3 dB respecto de la frecuencia cero, podemos definir la atenuación de la FO como el valor de atenuación para una frecuencia modulante nula. La atenuación difiere de la producida por un par conductor. Mientras en el par la atenuación se incrementa con la función \sqrt{f} (f es la frecuencia de la señal transmitida) en la FO la atenuación permanece constante hasta una frecuencia de corte (ancho de banda).

Existen diversos mecanismos que contribuyen a la atenuación de las FO, entre ellos se tiene:

REFLEXIÓN DE FRESNEL. Se produce en los extremos de las FO debido al salto de índice de refracción entre el exterior y el núcleo. Se tiene un valor de reflexión del 3,7%, es decir que la potencia reflejada está 14 dB por debajo de la potencia incidente. Es válido cuando el corte del extremo de la FO es perfectamente perpendicular. De lo contrario, la reflexión disminuye casi a 0% cuando el ángulo llega a 6° . Para disminuir esta reflexión se suele colocar un medio adaptador de índice de refracción. Muchas veces se usan materiales epoxi de idénticas características para unir sólidamente los elementos.

MEDICIONES EN SISTEMAS OPTICOS

DISPERSIÓN DE RAYLEIGH. El **esparcimiento o dispersión de Rayleigh** se debe a fluctuaciones de concentración y densidad, burbujas en el material, inhomogeneidades y fisuras o imperfecciones de la guía de ondas por irregularidades interfaciales del núcleo y revestimiento. En este caso se produce una dispersión de la onda electromagnética (como en el caso de las ondas de agua chocando con un obstáculo) que se traduce en una atenuación de la onda incidente. El valor de la atenuación responde a la ley:

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

Existen otras dispersiones cuyo valor resulta ser muy inferior a la de Rayleigh, como ser los esparcimientos de Mie, Raman y Brillouin.

ABSORCIÓN DEL MATERIAL. Las absorciones en el SiO_2 producen un mínimo natural en 1,55 μm . Se diferencian por ello dos zonas: una hacia el infrarrojo IR y otra ultravioleta UV. También se detectan absorciones de los **radicales oxidrilo OH** (residuo del proceso de fabricación). Los **iones metálicos** que también quedan como residuo, producen una atenuación casi plana dentro de las ventanas de transmisión.

En muchas oportunidades es necesario medir la atenuación de la FO. En tal caso puede usar un generador de luz y un medidor de potencia ópticas. Instrumentos que trabajan como un *Tester* para FO. Cuando se requiere una medición de atenuación espectral la fuente de luz debe emitir en un ancho espectral amplio y el detector debe poseer la facultad de variar la longitud de onda de detección.

1.5- REFLECTÓMETRO ÓPTICO

Se trata del método de medición más difundido. El **método Reflectométrico OTDR** fue sugerido por **Barnosky**-1976. Se basa en los anteriores conceptos de **Sonar** y **Radar**. En la **Fig 01** se muestra el esquema de medida del método **OTDR**. Cuando una onda plana incide sobre una inhomogeneidad, la parte de la energía interferente con el objeto se transforma en una onda esférica. De esta energía una parte se encuentra dentro del cono de aceptación de luz de la FO (apertura numérica) en el sentido progresivo y otra parte en el sentido regresivo (retroreflexión) y el resto se pierde por difracción. A esto se lo denomina **esparcimiento o dispersión de Rayleigh**.

El método OTDR consiste en introducir un impulso de luz en la FO y observar las condiciones de retorno de energía. En los conductores metálicos se usa el método reflectométrico que es similar al descripto pero se inyecta un impulso de corriente y se mide el eco. Sin embargo, como el conductor tiene gran distorsión de amplitud y fase se traduce en una deformación del impulso y una menor precisión.

La fuente de luz usada es un Láser alimentado con un **generador de impulsos** de por ejemplo 40 ns (FWHM al 50% de altura) y repetidos cada 333 μs . Se coloca un acoplador direccional (o un switch óptico) que permite inyectar luz del láser a la FO y dirigir la recepción del extremo de la FO al diodo detector APD. Esta señal es promediada y visualizada en el osciloscopio.

Un análisis matemático del problema indica que la potencia retrodifusa P_s que se tiene en la entrada ($L=0$ mts) se calcula mediante la relación $P_s = 2,2 \cdot 10^{-6} \cdot P_o$. La potencia P_s está cerca de 57 dB por debajo de la potencia P_o incidente. Por ello para mejorar la relación señal o ruido se requiere un proceso de **promediación** que consiste en medir varias veces y promediar una curva para presentarse en la pantalla del osciloscopio.

DIAGRAMA OPTICO. El diagrama obtenido con el método OTDR consiste en varios puntos de interés. En el extremo de la FO la reflexión (Fresnel) es parcial pudiendo llegar a ser nula si existe un adaptador de índice de refracción. En el conductor metálico, en cambio, la corriente se refleja completamente desde el punto de vista teórico con una inversión de fase si existe un cortocircuito.

La retroreflexión produce información a lo largo de toda la FO lo cual permite hacer un **diagnóstico general del cable** a lo largo de toda su longitud. Sus características son:

- La imagen en el OTDR tendrá una caída exponencial, con picos en los extremos.
- La curva resultante tiene un pulso de reflexión a la entrada de la FO (punto A en la figura).
- Este valor se puede reducir colocando un adaptador de índice de refracción.
- A lo largo del cable se tiene una dispersión de Rayleigh (curva B).
- En el punto C se tiene un empalme en la FO por lo que existe una pequeña reflexión debido a la discontinuidad.
- Posteriormente existe otro tramo de FO indicado como D y el extremo E con la reflexión final.
- La diferencia entre los niveles de recepción N1 a N4 nos indica las atenuaciones respectivas del tramo y del empalme.
- Los tiempos L1 a L3 permiten encontrar la longitud hasta el empalme o el corte.

Algunas inconvenientes del método OTDR son: la imposibilidad de producir mediciones espectrales y la energía retrodispersada no posee una distribución estacionaria de modos por lo que la medida de atenuación de FO multimodo será

MEDICIONES EN SISTEMAS OPTICOS

de menor precisión, en cambio en las monomodo será casi de igual precisión, que con el método de corte. La distribución estacionaria de modos es una condición que se exige en todo tipo de medición en FO.

Dos son las principales características del instrumento OTDR:

-Rango Dinámico. Se trata del valor en dB que puede ser medido desde el pico hasta la base. Puede definirse mediante 3 formas. Cuando la relación señal a ruido $SNR=1$. Hasta 0,3 dB por encima del valor máximo de ruido. Hasta que una unión de 0,5 dB se puede medir con una resolución de 0,1 dB (definición de Bellcore).

-Resolución Espacial. Se trata de la distancia mínima entre dos puntos que pueden ser reconocidos. En la reflexión de Fresnel es el ancho a 1,5 dB del máximo. En una unión es la distancia entre las tangentes a la pendiente.

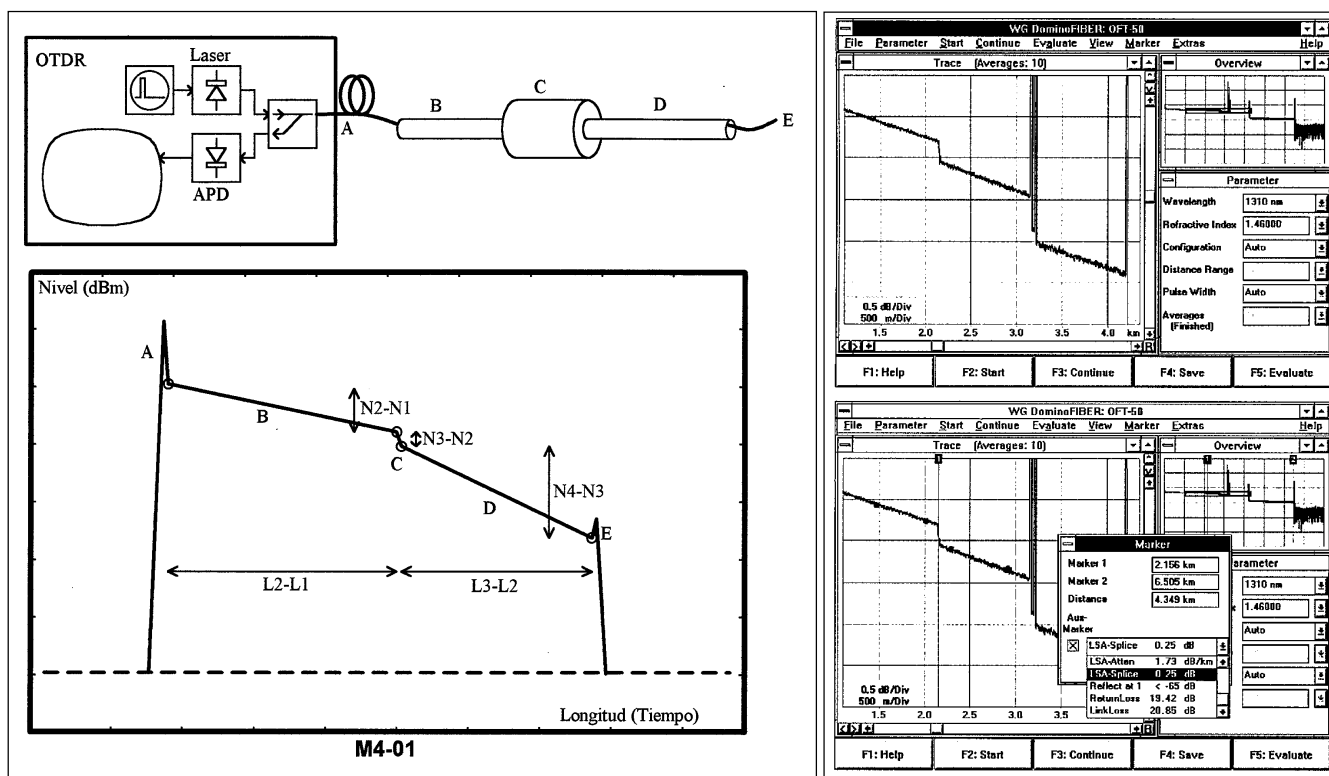


Fig 01. Medición con el reflectómetro óptico OTDR.

2- MEDICIONES EN LOS TERMINALES DE LÍNEA ÓPTICOS

2.1- CARACTERÍSTICAS DE LOS EMISORES

Las características más interesantes de los emisores son:

- transferencia entre la Potencia óptica y Corriente eléctrica de alimentación y
- transferencia entre la Potencia óptica y la longitud de onda de emisión.

PROPIEDADES DEL LASER. La potencia óptica P_{opt} es reducida en tanto la corriente I no es suficiente para lograr la densidad de portadores necesarios para la emisión estimulada. Más allá de un valor de I denominado corriente umbral I_{th} se logra la emisión estimulada y la P_{opt} aumenta rápidamente. La I_{th} se define como la I obtenida por la prolongación de una recta imaginaria proveniente de la linealización de la curva hasta el eje. Cuando la I es inferior a la I_{th} no existe emisión estimulada sólo hay la emisión espontánea como en el Led; cuando I es superior a I_{th} existe emisión estimulada. Para valores muy elevados de corriente I se produce una oscilación regenerativa que aplana la curva. El Láser se usará con I mayores a I_{th} y antes de la zona de oscilación, es decir en la zona recta.

En la **Fig 02** se observa un ejemplo de esta característica. En los Láser se produce un corrimiento de la curva con el incremento de la temperatura y con el envejecimiento del componente. El incremento es exponencial y corresponde a un incremento de la corriente umbral del $1\%/^{\circ}\text{C}$. La elevada sensibilidad a la temperatura se debe al incremento de las recombinaciones no radiactivas entre bandas del semiconductor. Este corrimiento de las curvas implica que con variaciones de temperatura se produce, a corriente constante, una variación de la potencia de salida, lo cual debe evitarse.

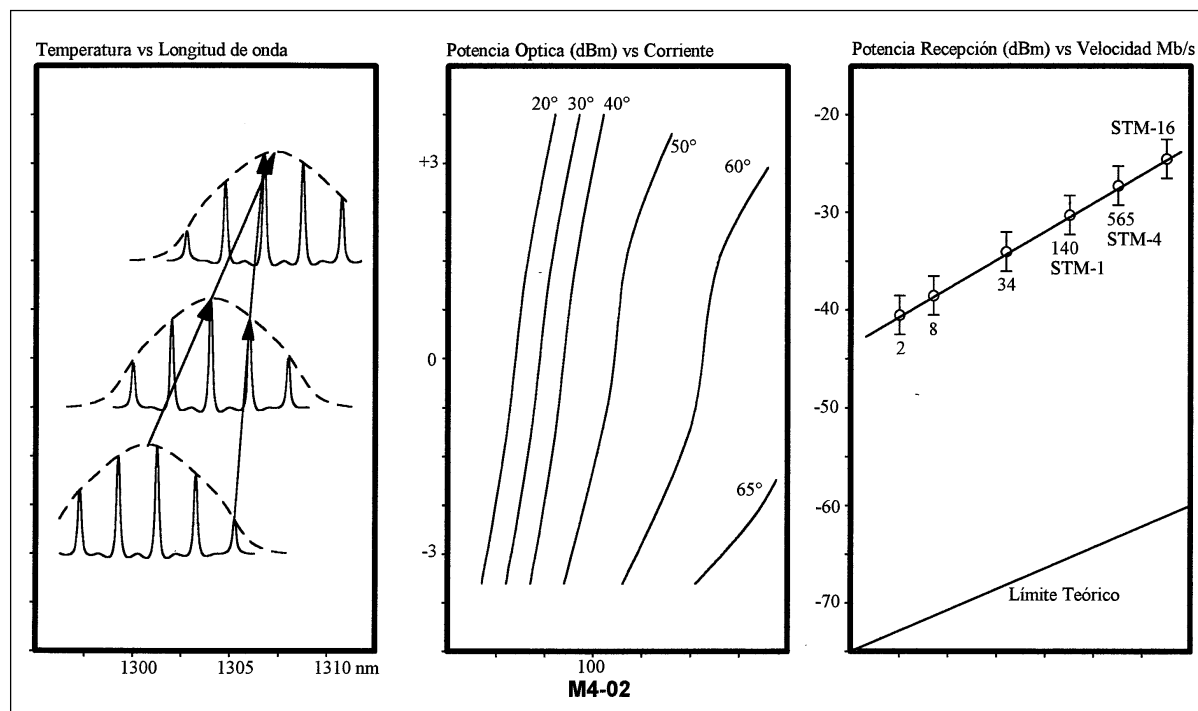
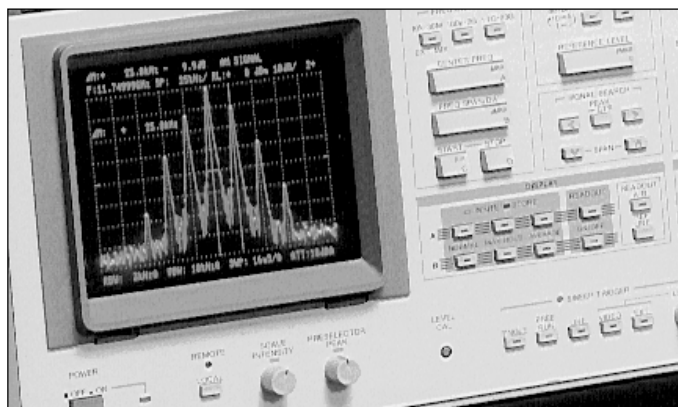


Fig 02. Propiedades de emisión y detección de los terminales ópticos.

PROPIEDAD MODAL DE EMISIÓN. La cavidad emisora tiene modos de resonancia que actúan sobre la salida de la radiación. Hay modos longitudinales (modo de resonancia a lo largo de la cavidad) y transversales (modo de resonancia vertical u horizontal de una cara de la cavidad). Los primeros dan lugar al **espectro de emisión**, es decir a la densidad de potencia P_{opt} en función de la longitud de onda. Los segundos dan lugar al **patrón del campo emitido**. El campo de emisión

MEDICIONES EN SISTEMAS OPTICOS

se descompone en un campo cercano y uno lejano, éste se forma por la difracción de aquél. El campo cercano y lejano sufren astigmatismo, por lo que son elípticos y perpendiculares entre sí.

El espectro de emisión está relacionado con los modos longitudinales. Como se ve en **Fig 02** los modos longitudinales están separados por un valor $\delta\lambda$. El **ancho espectral de emisión** de $\Delta\lambda$ se mide a la mitad de potencia óptica máxima (RMS) para emisores multimodo y a -20 dB para monomodo. Este valor entiende en el problema de la dispersión cromática de las FO monomodo. En general, los emisores Led tienen ancho espectral elevado frente al Láser. Por otro lado, la segunda ventaja tiene ancho espectral mayor que la primera. Los valores están cercanos a 50 y 100 nm para Led de 0,85 y 1,3 μm y entre 0,1 y 5 nm para el Láser. El espectro de emisión se corre con la temperatura, además de modificarse con la corriente de trabajo.

En la fotografía anexa se muestra un instrumento **OSA** (*Optical Spectrum Analyzer*). Un analizador de espectro óptico se basa en un elemento de difracción por ranuras (*Grating*) o interferómetro de Michelson

2.2- SENSIBILIDAD DEL DETECTOR

Esta medición está vinculada con el medidor de potencia óptica (bolómetro óptico en la fotografía anexa).

RUIDO TÉRMICO Y CUÁNTICO. Es conocido que la **densidad de ruido térmico** es proporcional a $(k.T)$, donde k es la constante de Boltzman y T la temperatura en grados Kelvin. El mismo se desarrolla sobre la resistencia de entrada R del amplificador. El ruido térmico es producido por la agitación molecular de carácter aleatorio. Por otro lado, la detección de fotones por el APD o PIN-FET también es un proceso aleatorio, ya sea por la distribución aleatoria de la densidad de fotones que llega como por la fluctuación del rendimiento cuántico. De este proceso casual surge un valor medio considerado como la señal de información y una desviación cuadrática media considerada como el **ruido cuántico**.

El ruido térmico es preponderante frente al ruido cuántico hasta frecuencias del orden de 10^{13} Hz. Para una $T=290$ °K el valor de $k.T$ es -174 dBm/Hz y para 10^{13} Hz el valor de $h.f$ es -172 dBm/Hz. Por encima de esta frecuencia el ruido cuántico es superior al térmico ya que crece en forma lineal con la frecuencia. El ruido térmico (con distribución de Gauss) se estudia en sistemas por cable o microondas mientras que el ruido cuántico (con distribución de Poisson) se estudia en sistemas por FO. La llegada de fotones al detector es un proceso que puede describirse mediante la distribución de Poisson.

RECEPTOR IDEAL. Si se supone que ante la detección de solo un fotón se considera un "uno" lógico. La ausencia de fotones se considera como un "cero"; se requieren 21 fotones por cada "uno" lógico para tener una tasa de error $BER=10^{-9}$. Si consideramos los "ceros" y los "unos" equiprobables se tiene que se requieren 10,5 fotones por cada bit de información.

Este valor se denomina **límite cuántico de sensibilidad** (potencia umbral) para las comunicaciones ópticas digitales. Para las longitudes de onda usadas se tiene:

$\lambda=0,85$ μm sensibilidad	$S=-146$ dBm/bit/seg
$\lambda=1,3$ μm	$S=-148$ dBm/bit/seg
$\lambda=1,55$ μm	$S=-148,7$ dBm/bit/seg



En la **Fig 02** se muestran estos límites expresados en unidades de dBm/Mb/s. La sensibilidad o potencia umbral del receptor es la mínima potencia óptica que asegura una determinada BER. La misma disminuye con la velocidad de transmisión. En otras palabras, debemos aumentar la potencia de recepción para mantener la misma BER. Es obvio que los valores prácticos están por encima de los teóricos. En la misma figura se indican los valores prácticos comerciales de equipos disponibles en el mercado.

OBSERVACIONES:

-La sensibilidad se mide en presencia de ruido cuántico y térmico con un ancho de banda infinito lo cual obliga a considerar los efectos de la limitación de banda del sistema.

-El gap tecnológico entre el valor teórico y el práctico para los detectores APD-Si es menor que en los APD-Ge o PIN-InP.

-Los valores prácticos se curvan hacia arriba para los valores de velocidad mayores a 100 Mb/s, abandonando una aproximación recta como la ley teórica. Por ejemplo para 622 Mb/s el valor teórico es de -60 dBm y el valor práctico es menor a -33 dBm.