

Tipos de fibras ópticas en las redes de telecomunicaciones.

Desarrollo y Evolución

Segunda entrega de la serie de artículos que la revista dedicará a la historia, características y aplicación de la fibra óptica.

Por Ing. Jorge Bocalandro Rivero

Especialista en Planta Exterior, Centro de Formación Nacional
boca@tel.etecsa.cu

En el artículo publicado en el número anterior de esta revista se abordaron los principios de propagación de la luz por una fibra óptica, la zona del espectro donde se realizan las transmisiones por este medio y sus ventajas.

Pero ¿se puede utilizar cualquier fibra independientemente de la aplicación? La respuesta será encontrada al plantear aspectos del desarrollo y de la evolución de lo que hoy es el medio por excelencia para los servicios de banda ancha a altas velocidades: la fibra óptica.

Desde hace más de 2 siglos el hombre intentó realizar comunicaciones con el empleo de sistemas ópticos. En 1790, el ingeniero francés Claude Chappe inventó el Telégrafo Óptico. Su sistema consistía en una serie de semáforos montados en torres desde las cuales un operador transmitía mensajes de una torre a otra. En 1880, Alejandro Graham Bell, patentó un Sistema de Teléfono Óptico y lo llamó el *Photophone*.

A inicios del siglo 20, los investigadores demostraron que una varilla de cuarzo doblada, podía transportar luz, y la utilizaron como iluminadores dentales.

En 1954, Abraham Van Heel, Harold H. Hopkins y Narinder Kapany, individualmente, presentaron un estudio acerca de un conductor óptico, pero ni Van Heel, ni Hopkins, ni tampoco Kapany fabricaron conductores que pudieran transportar la luz a largas distancias; pero sus reportes hicieron que la fibra óptica revolucionara.

Por los años 60, ya se habían desarrollado las fibras con cubiertas de vidrio, con atenuación de aproximadamente un decibelio por metro, adecuadas para la medicina; pero muy altas para ser utilizadas en las comunicaciones.

Las fibras ópticas llamaron la atención porque eran parecidas, en teoría, a una guía de onda con dieléctrico de plástico. En 1961, Elias Snitzer demostró esta similitud con la fabricación de fibras

con núcleos pequeños que transportaban la luz de igual manera que una guía de onda.

En 1966 se publicó la propuesta de Charles K. Kao, la cual enunciaba que a cortas distancias, las guías de ondas ópticas experimentales, desarrolladas por los laboratorios de la Standard Telecommunications tenían una capacidad de información de 1 GHz, equivalente alrededor de 200 canales de televisión o más que 200 000 líneas telefónicas. Sin embargo, las pérdidas aún eran muy altas para transmitir a largas distancias.

En 1970, la Corning Glass Works —ahora Corning Inc.—, obtuvo fibras con pérdidas por debajo de 20 dB/km; pero estas eran muy frágiles. Durante los siguientes años, cayeron las pérdidas de las fibras, debido, sobre todo, a los métodos de fabricación mejorados y al cambio de la longitud de onda en los puntos donde las fibras tienen esencialmente baja atenuación.

Con el desarrollo tecnológico aparecen en el mercado diferentes tipos de fibras, clasificadas en dos grandes grupos: fibras ópticas multimodos y fibras ópticas monomodos. Para estudiar cada una de ellas y comprender el origen de sus nombres, primeramente debe definirse qué es un modo de propagación.

Un modo de propagación es cada una de las posibilidades de propagación de la luz en el interior de una guía de onda —la fibra—. Las diferentes velocidades y direcciones asociadas a todas las longitudes de ondas hacen que la radiación de propagación se ordene. Son las soluciones particulares de las ecuaciones de Maxwell tomando en cuenta la geometría de la fibra. El número de modos a propagarse por una fibra está dado por la siguiente expresión:

$$N = \frac{V^2}{2} \cdot \frac{g}{g+2} \quad (1) \quad g = \begin{cases} \infty & \text{para SI} \\ 2 & \text{para GI} \end{cases} \quad \begin{aligned} N &= V^2 / 2 \\ N &= V^2 / 4 \end{aligned} \quad (2)$$

$$V = 2\pi a AN / \lambda \quad (3)$$

donde:

N: cantidad de modos que se propagan a través de la fibra

V: frecuencia normalizada, indica el número de veces que la longitud de onda está contenida en el diámetro de la fibra

a: radio del núcleo de la fibra

AN: apertura numérica

g: exponente relacionado con el perfil del índice; SI, perfil en escalón; y GI, perfil gradual

λ : longitud de onda de trabajo

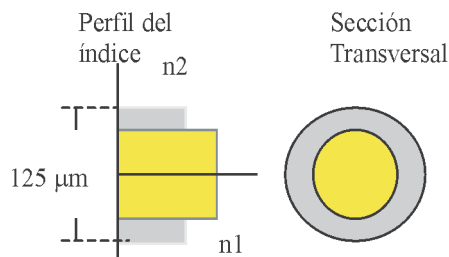
La cantidad de modos en una fibra óptica es directamente proporcional al radio del núcleo de la fibra y su apertura numérica, es inversamente proporcional a la longitud de onda que se emplee para la transmisión.

Una vez explicado qué es un modo de propagación es necesario analizar los tipos de fibras ya mencionados.

Las fibras multimodos se dividen en fibras ópticas multimodos de perfil de índice en escalón, y fibras ópticas multimodos de perfil de índice gradual.

El perfil del índice de refracción no es más que la variación del índice de refracción a lo largo del diámetro de la fibra y se conforma durante el proceso de fabricación de la misma.

La fibra óptica multimodo de índice en escalón presenta dos únicos valores, discretos y distintos, de índices de refracción: uno para todo el diámetro del núcleo (n_1), y otro, para el revestimiento (n_2) —según se muestra en la figura 1—. Es denominado perfil de índice en escalón —*step index* (SI)— porque entre los dos índices se crea un salto.



n_1 - índice de refracción del núcleo

n_2 -índice de refracción del revestimiento

Figura 1 Perfil en escalón de una fibra multimodo

Para este tipo de fibra, al tener en cuenta las expresiones 1, 2 y 3, el número de modo quedará determinado de la siguiente forma:

$$N = 0,5 (\pi d AN)^2 / \lambda^2 \quad (5)$$

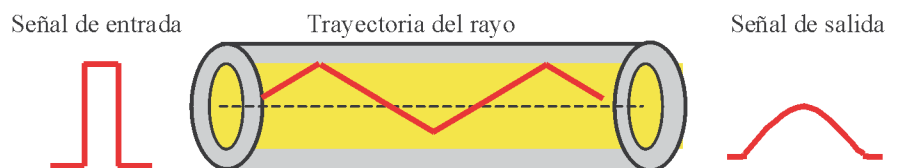


Figura 2 Fibra multimodo con índice en escalón

Entre los problemas que presentaba la fibra con índice en escalón se encontraban los valores altos de dispersión durante la transmisión de las señales, debido al gran número de modos de propagación dentro de la fibra —dispersión modal—. No satisfechos con el bajo ancho de banda de la fibra multimodo de índice en escalón y para disminuir un poco este fenómeno, los científicos desarrollaron otro tipo de fibra denominada fibra multimodo de índice gradual —*graded index*—.

En esta fibra el índice de refracción del revestimiento se mantiene constante, mientras que el índice del núcleo va decreciendo, de forma gradual, del eje del núcleo al exterior —ley de variación aproximadamente parabólica—, los rayos luminosos no son reflejados sino curvados según se aproximan al revestimiento. Así, los rayos que recorren un trayecto más largo permanecen más tiempo en la periferia de la fibra donde el índice de refracción es menor y, por lo tanto, la velocidad de propagación es mayor; mientras los rayos que recorren más distancia se desplazan con mayor rapidez que los que cubren menor distancia. Entonces, todos los rayos llegan casi al mismo tiempo al final del recorrido, y se logra menor dispersión de los pulsos.

Para este tipo de fibra y según las expresiones 1, 2 y 3, el número de modo quedará determinado de la siguiente forma:

$$N = 0,25 (\pi d \Delta N)^2 / \lambda^2 \quad (6)$$

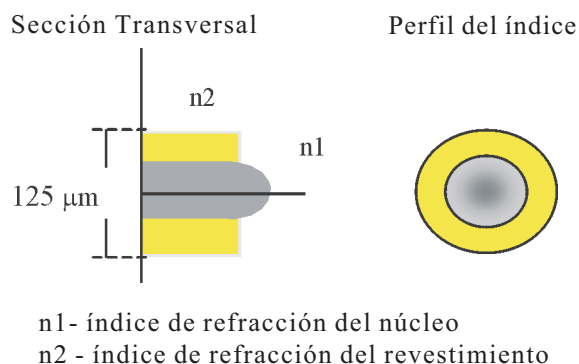


Figura 3 Perfil de índice gradual

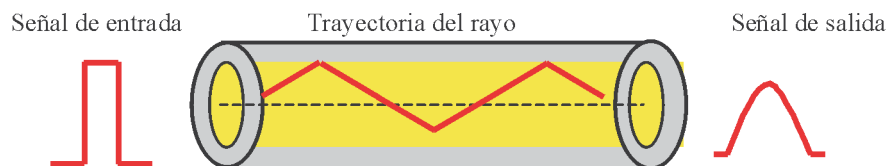


Figura 4 Fibra óptica multimodo de índice gradual

Sin embargo, los altos valores de dispersión modal se mantenían, y limitaban la longitud de los enlaces y la posibilidad de transmitir a gran velocidad.

Para cubrir los requisitos en distancias y anchos de banda se necesitaban fibras para redes de medio y largo alcance, capaces de

soportar altas velocidades de transmisión, por lo que se realizaron investigaciones que permitieron el surgimiento de nuevos tipos de fibras, y fue así como surgieron las fibras ópticas monomodos.

Como su nombre lo indica son fibras que permiten la propagación de la señal de un sólo modo, que se

logró a través de la considerable disminución del diámetro del núcleo y, por consiguiente, la apertura numérica que posibilita la expansión de la luz en un haz comprimido y evita la dispersión modal. También habían surgido los láser de InGaAsP, con los cuales se lograban emisiones a 1310 nm. Esto provocó la evolución de los sistemas hacia la transmisión en esta segunda ventana, donde los niveles de atenuación eran más bajos —menor que 0,5 dB/km— comparados con los sistemas que trabajaban en la ventana de 850 nm.

Las fibras con estos sistemas comenzaron a instalarse en las redes a inicios de los años 80.

La UIT-T tiene estandarizados varios tipos de fibras ópticas monomodos, que surgen como consecuencia de sus limitaciones para aplicarlas en las redes de telecomunicaciones.

1. Fibra óptica monomodo estándar o SMF. Rec. G-652

Primer tipo de fibra monomodo utilizada en las redes y que en la actualidad permanece como la más expandida en el mundo. Posee un núcleo dopado y su perfil del índice de refracción es en escalón.

Presenta valores moderados de atenuación: de 0,35 a 0,4 para la ventana de 1310 nm, y de 0,19 a 0,25 para la ventana de 1550 nm.

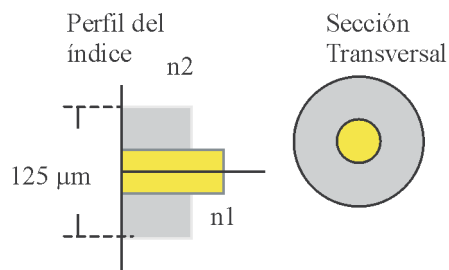


Figura 5 Perfil del índice de refracción de una fibra monomodo estándar

Desde el punto de vista de la dispersión es una fibra optimizada para la segunda ventana (1310 nm). Esto significa que el valor de dispersión nula está situado entorno a esta longitud de onda, con valores bajos del coeficiente de dispersión cromática $D \approx 3,5$ ps/nmkm. Puede utilizarse en la tercera ventana (1550 nm) con sus limitaciones en cuanto a distancia —alrededor de 100 km— por presentar en ella altos valores del coeficiente de dispersión cromática —entorno a los 17 ps/nmkm—, lo que reduce considerablemente el ancho de banda disponible en comparación con el ancho de banda disponible en la segunda ventana.

A pesar de ser el primer modelo de fibra monomodo, pueden emplearse en redes con sistemas DWDM, si se controla la dispersión en los enlaces y son compatibles con las fibras más actuales como las de tipo NZDSF.

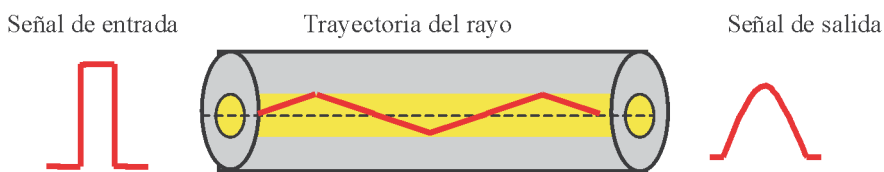
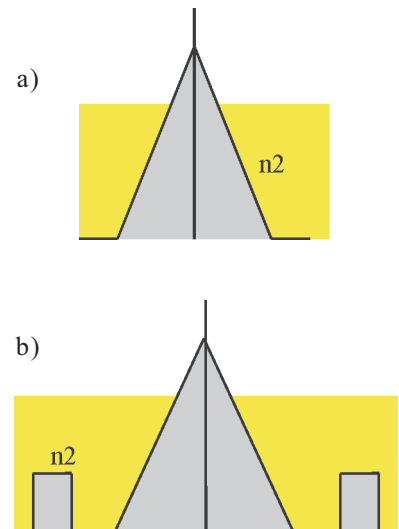


Figura 6 Fibra óptica monomodo estándar



*Figura 7 Perfil del índice de refracción en una fibra monomodo con dispersión desplazada
a) con perfil triangular
b) con perfil triangular segmentado*

Limitaciones que presenta este tipo de fibra:

- ♦ Para enlaces largos, la velocidad transmisión debe limitarse a 2,5 Gbit/s. Para mayores velocidades, es necesario emplear técnicas de compensación de dispersión como las fibras DCF que en la actualidad son caras y su pérdida requiere de esquemas específicos de ampli-ficación.
- ♦ Para velocidades de transmisión de 10 Gbit/s (STM-64) aparece una dispersión por el modo de polarización, la cual, junto con la dispersión cromática, afecta el ancho de banda.

Según los estudios realizados, la región de 1550 nm parecía tener muchas ventajas en relación con la segunda (1310 nm); ya a finales de los años 80, existía la tendencia de que los sistemas operaran a esta longitud de onda, por lo que se trabajó en la fabricación de un nuevo tipo de fibra.

2. Fibra óptica monomodo con dispersión desplazada o DSF. Rec. G-653

La fibra de dispersión desplazada (DSF) se introdujo en 1985 y anunció una nueva era en las comunicaciones ópticas. Juntó el mínimo de atenuación en la ventana de 1550 nm con dispersión cero en la misma longitud de onda, mayores velocidades de datos podrían llevarse a distancias más largas.

Durante el proceso de fabricación de esta fibra varió el perfil del índice de refracción del núcleo —que ya no sería en escalón, sino que tomaría una forma más compleja como triangular o triangular segmentada (Figura 7)—. Con esto se lograba desplazar el punto de dispersión cero que se encontraba alrededor de 1310 nm hacia la longitud de onda de 1550 nm.

Parecía un gran salto en la evolución de las fibras ya que se tenía una fibra óptima a 1550 nm por su baja atenuación y baja dispersión en esa región del espectro; y en efecto, para los enlaces simples, estas fibras resultaban atractivas. Sin embargo, en los primeros años de la década de los 90, aparecieron los amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA), que muchos consideran la segunda revolución en la comunicación de la fibra óptica.

Esta tecnología superó la limitación de la velocidad para la regeneración electrónica, permitió tramos más largos y el surgimiento de WDM. Cuando se hizo necesario implementar sistemas con esta tecnología quedó claro que el atributo que hacía atractiva la fibra de dispersión desplazada causaba inconvenientes para las demandas de WDM. La potencia extra que tenía que transportar la fibra de vidrio por el uso de varios

amplificadores por cada longitud de onda dio como resultado los efectos de transmisión no lineales.

Esta incompatibilidad puede explicarse por el efecto de Kerr, es decir, la dependencia del índice de refracción de la fibra con la potencia de canal inyectada. El sílice, componente principal de la fibra, tiene uno de los más bajos coeficientes de no linealidad. En la DSF, la limitación más severa por el efecto de Kerr es la generación de intermodulación entre las portadoras de un multiplex —un fenómeno inherente a WDM— llamado mezcla de cuatro ondas (FWM). En una fibra que porte dos o tres canales WDM pueden crearse frecuencias adicionales —conocidas como productos de intermodulación—. Asumiendo que los canales están igualmente separados, las longitudes de ondas de los productos de intermodulación coinciden con las longitudes de ondas de otros canales, así se crea una diafonía indeseable dentro de la banda. Este fenómeno se hace crítico cuando la dispersión es cercana a cero.

La fibra óptica monomodo con dispersión desplazada es incompatible con sistemas WDM, lo cual constituye una limitación.

3. Fibra óptica monomodo con dispersión aplanada a 1550 nm o DF-SMF. Rec. G-654

Otro tipo de fibra fabricada fue la fibra óptica con dispersión aplanada, diseñada para tener una dispersión plana desde los 1310 nm hasta los 1550 nm.

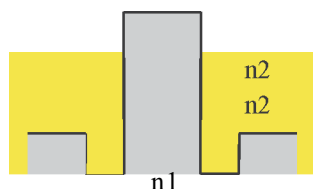


Figura 8 Índice del núcleo deprimido o segmentado para fibras con dispersión aplanada DF - SMF

Dentro de este tipo de fibra se encuentra la PSCF —fibra óptica con núcleo de sílice puro—. Tiene una pérdida baja —típicamente 0,18 dB/km—, una dispersión cromática alrededor de +20 ps/nmkm; y han sido utilizadas como fibras compensadoras de dispersión en enlaces submarinos.

Hasta este momento, con los tipos de fibras disponibles, sólo se podían trabajar los sistemas en las longitudes de ondas de 1310 nm y 1550 nm por presentarse un aumento de la atenuación entorno a otras longitudes de ondas, desaprovechándose todas las longitudes comprendidas entre dichas ventanas; así como una gama de longitudes de ondas mayores a 1550 nm.

Sin embargo, con el desarrollo se fabricó una nueva familia de fibras en las cuales se logró eliminar la influencia del ión OH en la atenuación en determinadas longitudes de ondas, permitió el empleo de las mismas en un rango del espectro desde 1335 hasta 1625 nm aproximadamente con valores aceptables de atenuación. Aparecieron así otras ventanas de trabajo posibles para los sistemas de fibra óptica: la cuarta ventana

denominada banda L (larga) que va desde 1561 nm hasta 1620 nm y una quinta ventana subdividida en dos: una banda que va desde los 1350 hasta los 1450 nm, y otra, denominada banda S (*short/corta*) que comprende el rango desde 1450 hasta 1528 nm.

Por otra parte, para contrarrestar el efecto de mezcla de cuatro ondas (FWM) que se presentaba en las fibras DSF en enlaces DWDM, era necesario incrementar la dispersión relativa entre canales vecinos, y las señales debían viajar a velocidades de grupos muy diferentes fuera de la longitud de onda donde la dispersión cromática se hacía cero. Estas fibras se conocen como fibras ópticas con dispersión desplazada no cero.

4. Fibras ópticas con dispersión desplazada no cero. Rec. G-655

El desarrollo de la industria de la fibra de dispersión no nula (NZDSF) era una respuesta directa a los efectos no lineales de la propagación. Son fibras con dispersión desplazada a la ventana de 1550 nm al igual que las DSF, con la diferencia que tienen una dispersión baja; pero no cero en esta ventana y es típicamente de 2 a 6 ps/nmkm, en otras palabras, se cambia la longitud de onda de dispersión cero fuera de la ventana de operación. Presentan un perfil del índice de refracción del núcleo complejo. Son fibras diseñadas, fundamentalmente, para el mercado DWDM donde se emplean vanos de repetición largos y altas velocidades de transmisión (10 y 40 Gbit/s).

Los primeros cables NZDSF disponibles comercialmente con gran área eficaz aparecieron en 1998. Con el aumento del área eficaz del modo de campo dentro de la fibra, los efectos no lineales se reducen.

Los beneficios técnicos son inmediatos: la capacidad del manejo de la potencia es más alta, el ratio señal/ruido es mayor, y el espacio entre amplificadores también aumenta.

En el mercado puede encontrarse este tipo de fibra en dos variantes: con dispersión positiva (NZDSF+) y con dispersión negativa (NZDSF-).

La NZ-DSF+ es una fibra similar al tipo de dispersión desplazada (DSF); pero la longitud de onda de cero dispersión se pone intencionalmente fuera de los 1550 nm. La fibra tiene una pendiente de dispersión positiva contra la longitud de onda con valores de dispersión cromática suficiente (de 4 a 8 ps/nmkm) para evitar las interacciones entre los canales.

La NZ-DSF- es casi idéntica a la NZ-DSF+, sólo que la pendiente de dispersión es negativa contra la longitud de onda.

La existencia de estos tipos de fibras con valores de dispersión contrarios permite que sean empleados los enlaces largos, tramos alternos de NZ-DSF+ y NZ-DSF- para disminuir la dispersión cromática acumulativa que sufre la señal durante la transmisión.

Un ejemplo de combinación de distintos tipos de fibras es el utilizado en enlaces largos submarinos por Alcatel donde por cada 9 secciones de fibras del tipo NZDSF con dispersión cromática de -2ps/nmkm se instala una sección de fibra de núcleo de

silicio puro (PSCF) con una dispersión de $+18\text{ps/nmkm}$, lo que permite reducir cada 10 secciones la dispersión cromática acumulativa a cero.

Como la dispersión cromática de las fibras varía linealmente con la longitud de onda, la dispersión cromática acumulativa no puede reducirse simultáneamente a cero en intervalos regulares para todas las longitudes de ondas. A la variación lineal se le llama pendiente de dispersión cromática, si la misma se compensa con exactitud periódicamente para el canal en el centro del espectro, no así para los canales de los extremos.

Desde el año 2000 —y según el artículo “Redes submarinas ópticas en el umbral de los Tbit/s por capacidad de fibra”, de O. Gautheron, publicado en la *Revista de Telecomunicaciones Alcatel*, del tercer trimestre de 2003—, para solucionar este problema se investigaba sobre una fibra de dispersión inversa (RDF) que tiene una pendiente de dispersión con signo contrario a la fibra normal.

La idea es combinar la RDF con la PSCF en cada sección. Esta combinación es adecuada para la transmisión en las bandas C+L pues la dispersión cromática de la PSCF y la RDF nunca se cancelan en la ventana de 1550 nm y se elimina así la FWM —a diferencia de la NZDSF, para la cual la

dispersión cromática se cancela alrededor de 1580 nm—.

La combinación PSCF/RDF ofrece la ventaja de aumentar el área del núcleo de la fibra, lo que significa que la intensidad de la luz se reduce —a potencia óptica constante— y, por lo tanto, se reducen los efectos no lineales.

La desventaja de la fibra RDF es su elevada sensibilidad a las microcurvaturas y a las curvaturas, cuyo efecto es aumentar la atenuación.

5. Fibras compensadoras de dispersión DCF

La función de este tipo de fibra es compensar la curva de dispersión cromática acumulativa en la fibra para que todas las longitudes de ondas en la ventana WDM experimenten la misma dispersión cromática total.

Se emplean en sistemas de alta velocidad de 10 y 40 Gbit/s, por lo que su dispersión por el modo de polarización (PMD) debe ser pequeño. Poseen valores de dispersión cromática muy negativos —valor típico (80ps/nmKm)— y pérdidas típicas menores de $0,5\text{dB/km}$. Normalmente la pérdida es de 8dB para un módulo que puede compensar 80 km de dispersión cromática acumulativa de la fibra estándar —aproximadamente 1360ps/nm —.

Las DCFs presentan varios problemas, en primer lugar, 1 km

de DCF compensa tan sólo unos 10-12 km de fibra estándar —recientes avances han conseguido producir fibras cuya dispersión excede los -200 ps/km·nm—; en segundo lugar, sus pérdidas son relativamente elevadas a 1550 nm —alrededor de 0,5 dB/km—y, en tercer lugar, debido a su reducido diámetro modal, la intensidad óptica en el interior de la fibra es superior para una misma potencia óptica, que provoca la acentuación de los efectos no lineales. En la actualidad se trabaja sobre estas líneas para mejorar las prestaciones de las DCFs. Algunos resultados ya obtenidos se basan en una estructura de fibra bimodal, con parámetros de dispersión tan elevados como -770 ps/km·nm e idénticas pérdidas que la fibra estándar.

Como puede apreciarse el desarrollo e instalación de diferentes tipos de fibras ópticas estuvo caracterizado por la necesidad de cubrir determinados requisitos en las redes: mayor alcance sin repetidores —fibras con baja atenuación—, mayor disponibilidad de ancho de banda —fibras con menor dispersión—, así como la posibilidad de aumentar la velocidad de transmisión, impulsados por la creciente demanda de los servicios.

De esta forma, en la actualidad se tiene en cuenta el tipo de red —local, de acceso, metropolitana,

terrestre de larga distancia o submarina— para instalar en las redes de telecomunicaciones diferentes tipos de fibras.

Las monomodos estándar son aplicables en las redes de acceso, en redes de áreas metropolitanas (MAN), en enlaces de larga distancia —a velocidades hasta 2,5 Gbit/s sin técnicas de compensación y a 10 Gbit/s con técnicas de compensación de la dispersión—, pero con limitación en distancia por el efecto de dispersión cromática. Pueden emplearse en enlaces simples si se trabaja a 1310 nm y 1550 nm, y enlaces con sistemas DWDM en la banda C (alrededor) de 1550 nm con o sin amplificadores ópticos.

Las fibras de dispersión desplazada no cero NZDSF, fundamentalmente se emplean en aplicaciones de alta velocidad (10 y 40 Gbit/s) en redes DWDM submarinas y terrestres de larga distancia.

Las fibras compensadoras de dispersión DCF se combinan con las fibras SMF y NZDSF como alternativa para eliminar la dispersión cromática acumulativa de la señal sin el uso de repetidores y con la consecuente conversión óptica-eléctrica-óptica en los mismos; mientras que de las multimodos, sólo se emplean las de índice gradual con diámetros de núcleos de 50 y 62,5 micras en redes de corta distancia como las LAN, al trabajar en la primera (850 nm) y segunda ventana (1310 nm).

Bibliografía

- Gautheron, O. "Redes submarinas ópticas en el umbral de los Tbit/s por capacidad de fibra". En: *Revista de Telecomunicaciones Alcatel*, no. 3 (3er trimestre, 2003): 43-59.
- Izquierdo Bedmar, Juan. *Telecomunicaciones a través de fibras ópticas*. Madrid, España: Ediciones AHCIET, 1996, pp. 8-11.
- Papannareddy, R. *Introduction to Lightwave Communication Systems*. Boston-London: Artech House Publishers, 1997.
- Recomendación UIT-T G.651 (2000) Características de un cable de fibra óptica multimodo de índice gradual de 50 / 125 mm.
- Recomendación UIT-T G.652 (2000) Características de un cable de fibra óptica monomodo.
- Recomendación UIT-T G.653 (2000) Características de los cables de fibra óptica monomodo con dispersión desplazada.
- Recomendación UIT-T G.654 (2000) Características de los cables de fibra óptica monomodo con pérdida minimizada a una longitud de onda de 1550 nm.
- Recomendación UIT-T G.655 Características de un cable de fibra óptica monomodo con dispersión desplazada diferente de cero.