

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 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. 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 espacimientos 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.

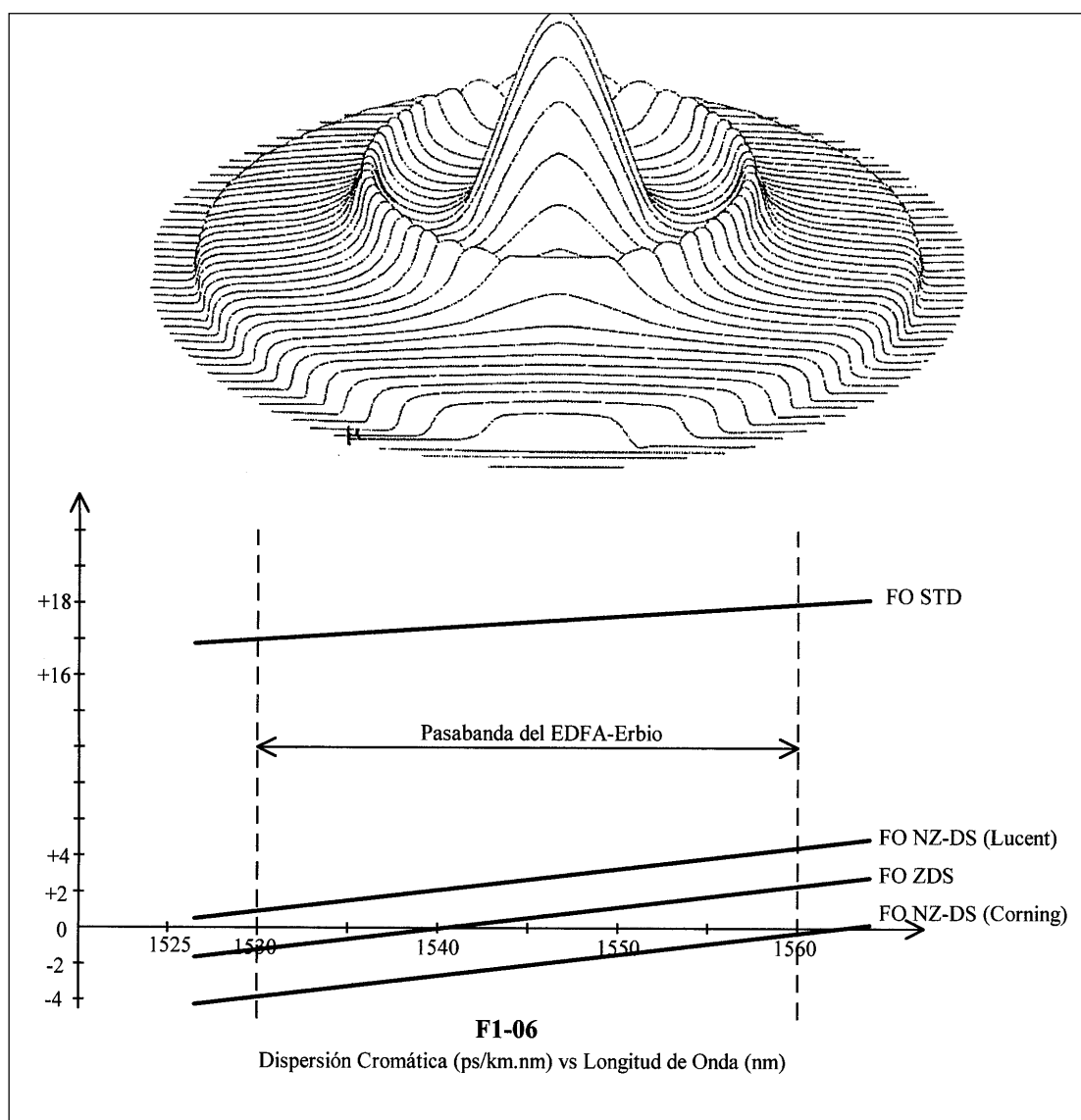


Fig 01. Dispersión cromática y perfil de índice de refracción en FO.

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