

Evolución de la Fibra Óptica

1. Resumen

En la siguiente Monografía presentaremos una amplia investigación sobre los aspectos fundamentales de la Fibra Óptica y su principio de funcionamiento, explicando los tipos de Fibra existentes entre los cuales mencionamos:

1. Fibra Óptica Monomodo estándar.
2. Fibra Óptica Monomodo con dispersión desplazada.
3. Fibra Óptica Monomodo con dispersión aplanada.
4. Fibra Óptica Monomodo con dispersión desplazada no cero.
5. Fibras compensadoras de dispersión.

Ventajas y desventajas teniendo en cuenta su costo, confiabilidad, resistencia mecánica, inmunidad a interferencias, ancho de banda y a su vez haciendo comparaciones con otros medios de transmisión. También tratamos el tema de los efectos no lineales de la fibra, su fabricación y algunas de sus principales aplicaciones en las comunicaciones.

Además se ilustra mediante una secuencia de imágenes la conectorización de la fibra, el cuidado y limpieza que se debe tener en cuenta para realizarla con la mayor eficiencia y precisión posible.

2. Introducción

El principio de la luz guiada a través de un conductor transparente fue físicamente explicado y demostrado a inicios del año 1870 por el físico británico Jhon Tyndall (1820–1893), Tyndall demostró que la luz puede ser guiada a través de un camino curvo en el agua, pero no fue hasta 10 años después exactamente en el año 1880 cuando Alexander Graham Bell (4 años antes de que descubrieran el Teléfono) inventó y patentó el Foto teléfono, el cual se usó para transmitir señales de voz a distancias de algunos cientos de metros, Bell usó luz solar con intensidad de sonido modulado y la reflejó de un espejo a otro para luego detectarla con un dispositivo de Selenium y la dependencia de las condiciones del tiempo y las aún insensibles foto celdas de Selenium obstaculizaron su aplicación práctica.

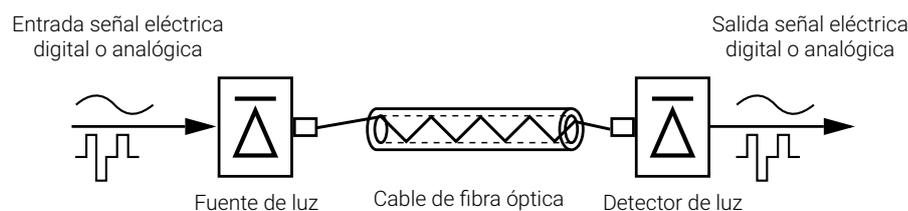


Figura 1: Transmisión de la luz.

Inicialmente las Fibras Ópticas se usaron solamente para conectar centrales telefónicas en áreas de mucho tráfico en grandes ciudades y a medida que la tecnología de las comunicaciones avanzó, las fibras empezaron a penetrar en las redes de larga distancia y ya se tienden en áreas locales entre las centrales telefónicas y el equipo de los clientes, donde muchos nuevos edificios comerciales son cableados con Fibra Óptica para respaldar las redes telefónicas y las redes de cómputo de alta velocidad, lo ideal es que lleguen a todas las casas de los clientes del servicio telefónico y proveer sobre la misma Red de Fibra Óptica servicios de voz y vídeo. La Fibra Óptica fue introducida primeramente como un reemplazo del Cable de Cobre para intercambio interno y otras conexiones a larga distancia, el primer sistema de Fibra Óptica comercial fue puesto a operar en el año 1973 con una velocidad de 2 Mbps en una conexión de 24 km entre Frankfurt y Oberursel en Alemania y en el año 1987 el primer cable comercial de larga distancia submarino entró en servicio a una capacidad de 280 Mbps entre Francia y Córcega donde la conexión por Fibra Óptica sobre tierra más larga en el mundo opero a 2,5 Gbps con sistemas SDH ejecutándose en Australia, entre Brisbane–Melbourne–Perth en 1996. Otras aplicaciones principales de la Fibra Óptica aparecieron en la red de acceso y la primera gran prueba fue usando la misma en la red de acceso en Japón para el año 1978 con un servicio de video a doble vía, una segunda prueba mayor de 4 años de duración se inició en el año 1986 en Berlín con una red de acceso de Fibra Óptica operando a una velocidad de 140 Mbps que incluyó intercambios con ATM.

3. La Tecnología de Fibra Óptica

3.1. ¿Qué es una Fibra Óptica?

La Fibra Óptica es un filamento flexible, largo y delgado (Del orden de unas micras) más fino que un cabello humano, es una guía de ondas ópticas totalmente dieléctrica y constituida por dos cilindros concéntricos vítreos de diferentes Índices de Refracción que forman una estructura Monolítica, al cilindro interior se le conoce como Núcleo y no es más que un centro de Dióxido de Silicio (SiO_2) dopado o no, por donde viajan los pulsos de luz transmitidos y al cilindro exterior se le conoce como Revestimiento, el cual conforma una capa exterior que rodea al núcleo reflejando la luz que incide en él y permitiendo que dentro del núcleo el valor del Índice de Refracción sea mayor siempre en el núcleo que en el revestimiento y la estructura Núcleo-Revestimiento durante el proceso de fabricación se protege por una capa de acrilatos epóxicos llamada generalmente Protección Primaria.

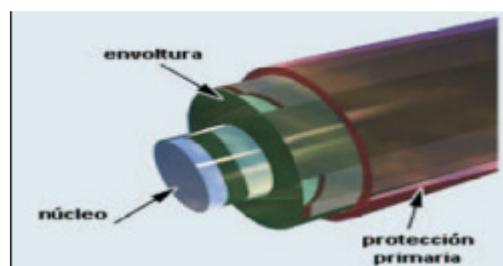


Figura 2: Estructura de una Fibra Óptica.

La velocidad de la luz en el vacío es de 3×10^8 m/s y varía sensiblemente en dependencia de la diferencia de la densidad de los materiales que atraviesa, para caracterizar la densidad de los materiales se ha definido el parámetro Índice de Refracción Absoluto (η), expresado por la relación entre la velocidad de la luz en el medio considerado (v).

$$\eta = \frac{c}{v} \quad (1)$$

Sustancias	Índice de Refracción Absoluto. (η)
Hielo	1,31
Agua	1,33
Alcohol	1,36
Glicerina	1,47
Cristal	1,50
Sal	1,54

Cuadro 1: Índice de Refracción de algunas sustancias básicas

3.2. Índice Refractivo

El principio subyacente de la transmisión por Fibra Óptica es que la luz "En una secuencia de pulsos codificados" es reflejada o refractada sobre fronteras de dos medios ópticos diferentes, constituyendo una guía de onda para la transmisión de luz y la densidad de un medio óptico está dada por el Índice de Refracción (η), dicho índice indica que ese es el medio donde la luz viaja más lentamente, en nuestro caso es el vacío (En el cual $\eta = 1$), una Fibra Óptica para transmitir (Ver figura 3) consiste en un centro cilíndrico conductor de luz compuesto por un cristal con alto grado de Silicio que posee un Índice Refractivo (η_1) rodeado por un revestimiento concéntrico de cristal de Silicio y con Índice Refractivo (η_2) ligeramente menor que el índice del centro, esta diferencia de Índice Refractivo se obtiene dopando el cristal puro de Silicio con Boro el cual lo reduce o Germanio que lo incrementa.

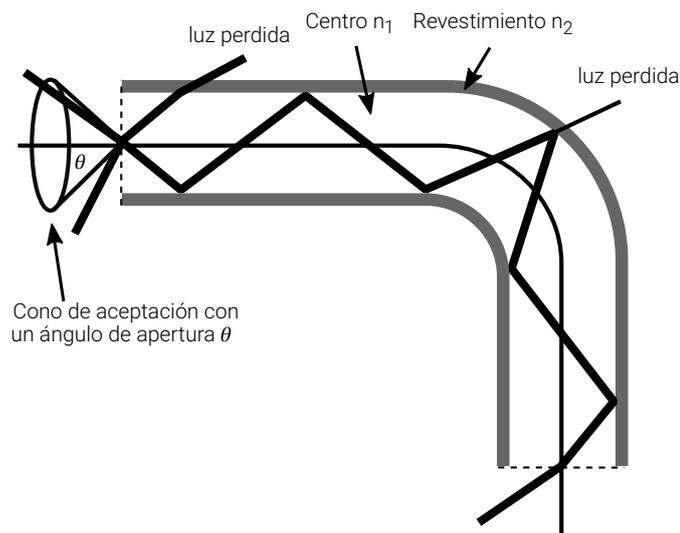


Figura 3: Fibra Óptica para transmitir

Razón entre las velocidades de una onda en el vacío y en un medio:

$$\eta = \frac{c}{v}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (2)$$

Donde:

c : Velocidad de la luz en el vacío.

v : Velocidad de la luz en el medio.

μ_0 : Permeabilidad Magnética en el vacío = $8,854 \times 10^{-12}$ Farad/m

ϵ_0 : Permeabilidad Eléctrica en el vacío = $4\pi \times 10^{-7}$ Henry/m

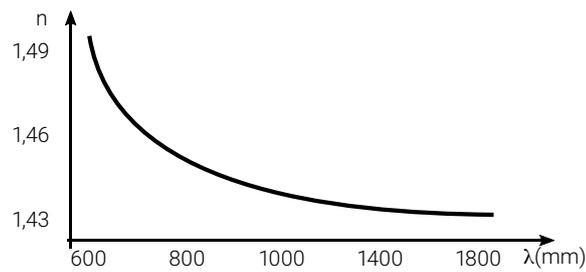


Figura 4: Variación del Índice de Refracción con la longitud de onda

3.3. Ángulo de Apertura

Para obtener una pérdida mínima, la diferencia entre η_1 y η_2 debe ser alrededor del 1 % para que los rayos de luz puedan reflectarse totalmente sobre los bordes del centro con su revestimiento si se inyecta con un ángulo dentro del límite crítico, a este ángulo crítico de aceptación de luz se le llama Ángulo de Apertura (θ) y es el ángulo máximo de entrada de la luz en la Fibra Óptica, el mismo permite el efecto de la guía de onda por reflexión total interna y se define como:

$$\theta = \arcsen \sqrt{\eta_1^2 - \eta_2^2}$$

Al seno del ángulo de apertura se le nombra Apertura Numérica y se denota:

$$NA = \text{sen } \theta \quad (3)$$

el mismo caracteriza el acople de la potencia óptica en la fibra.

$$P \cong \pi a^2 (NA)^2 \quad (4)$$

La luz entrante a la fibra fuera de este ángulo de aceptación se pierde para transmisión; también se puede perder si la fibra es doblada más allá del radio mínimo de curvatura permisible.

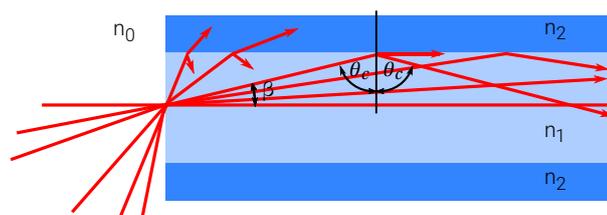


Figura 5: Ángulo de aceptación y Apertura Numérica. (NA)

Dependiente del Ángulo de Apertura para cada rayo de luz incidente, existe un camino específico llamado Modo, el cual será seguido a través de la fibra, a mayor centro más modos pueden simultáneamente existir y cada uno con diferencias ligeras en distancia recorrida, de aquí la existencia de dos tipos fundamentales de Fibras: Fibras Multimodo o Fibra Monomodo.

El número de modos está definido por:

$$N_m = 0,5 \left(d_c \times NA \times \frac{\pi}{\lambda} \right)^2 \quad (5)$$

Donde:

N_m : Representa el número de modos.

d_c : Representa el Diámetro del centro en μm .

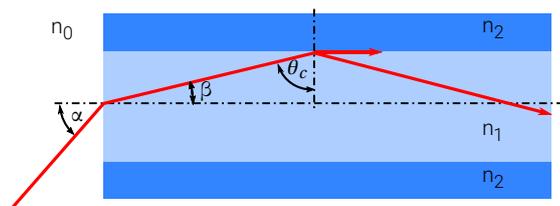


Figura 6: Ángulo de Aceptación y Apertura Numérica. (NA)

Relacionado con el diámetro del centro está también la longitud de onda de corte (λ_c), la cual está definida como la longitud de onda por debajo de la cual los modos de propagación excepto el modo básico aparecen por primera vez, el espectro de la fuente de transmisión debe yacer sobre un valor superior a (λ_c) para permitir la transmisión de Monomodo y la longitud de onda para corte puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda_c = \pi d_c \frac{1000}{2,42} \sqrt{\eta_1^2 - \eta_2^2}$$

3.4. Ventanas de Transmisión

El cristal de Silicio ofrece tres ventanas de mínima atenuación localizadas entre las fronteras de absorción ultravioleta e infrarrojo y abarca el rango de 800 nm a 1600 nm, la teórica atenuación mínima entre los dos bordes está determinada por el esparcimiento Rayleigh, el cual constituye una propiedad física del material, cambios de la densidad local del cristal causa una fluctuación del Índice de Refracción que no puede ser eliminada y limita la más baja atenuación espectral de la fibra a un valor bajo de 0,13 dB/km a 1550 nm, otras atenuaciones son causadas por impurezas del material tales como iones OH^- que entran a la fibra durante el proceso de producción y provocan picos de atenuación a 950 nm, 1240 nm y 1380 nm y la Fibra Monomodo con una atenuación ligeramente menor de 0,2 dB/km es estándar. En la figura 7 se muestra la atenuación típica de la Fibra Monomodo vs la Longitud de Onda de la luz usada para transmitir a través de ella y al rango de baja atenuación (Casi Rayleigh) entre picos de atenuación de absorción se le nombra Ventana, la Fibra Óptica tiene 3 ventanas de mínima atenuación. Las primeras fibras comerciales obtenidas eran del tipo Multimodo para Salto de índice y operaban a 850 nm, las mismas se caracterizaban por un coeficiente de atenuación relativamente alto a su vez que la frecuencia de operación estaba por debajo de 1 GHz a distancias máximas de unos 10 km sin Repetidor, actualmente operan en Redes de Área Local (LAN) hasta 1 Gbits/s y presentan la ventaja de un menor costo, además de que pueden utilizar como fuente de luz un dispositivo relativamente barato como el diodo emisor de luz. (LED)

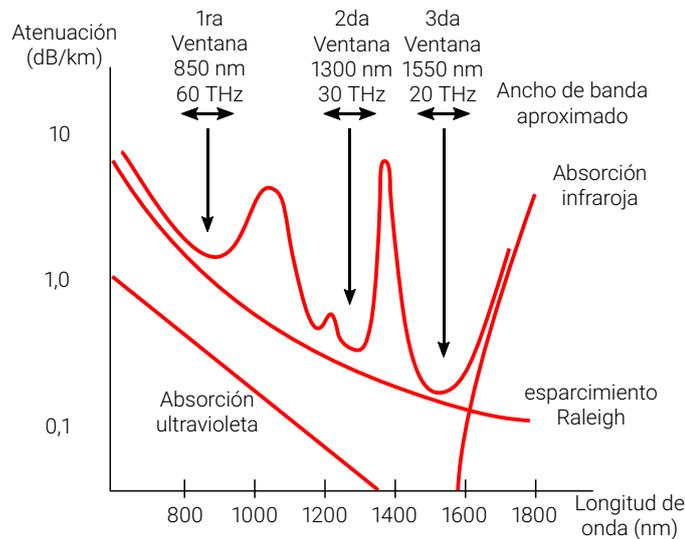


Figura 7: Ventanas de Trabajo de la Fibra Óptica

La segunda generación trabaja a 1300 nm y desde el punto de vista tecnológico se les conocen como Fibras Multimodos de Índice Gradual, las cuales logran una atenuación muy baja típicamente inferior a los 0,4 dB/km así como mayor ancho de banda, operando a un poco más de 2,5G bps, preferiblemente utilizan fuentes de luz Láser y se aplican en redes de larga distancia con tramos de repetición sobre los 50 Km.

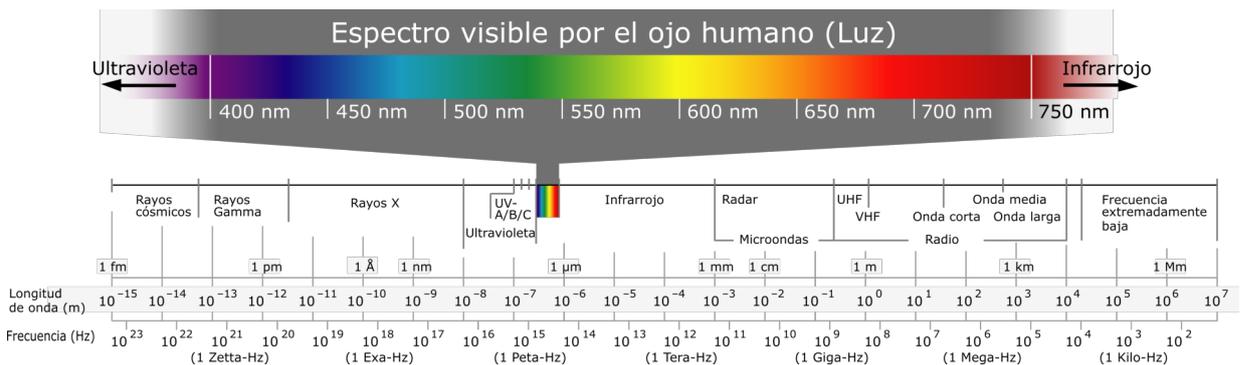


Figura 8: Espectro Electromagnético

La tercera generación es la más importante porque es un tipo de Fibra Monomodo de altas prestaciones que puede operar en 1300 nm y 1550 nm, con atenuación por debajo de 0,4 dB/km y un ancho de banda que le permite alcanzar más de 10 Gbps, con tramos de repetición de 100 km aproximadamente y en la cual la pérdida por esparcimiento de Rayleigh y la absorción infrarroja están minimizados, la misma requiere necesariamente el empleo de fuente de láser en sus diferentes alternativas comerciales se ha convertido en el Caballo de Batalla de las redes de transporte óptico actuales y sobre ellas se soportan los sistemas de transmisión de la Jerarquía Digital Síncrona (SDH), así como los servicios Frame Relay y ATM de banda ancha. En esta figura también se ilustra la enorme capacidad de transmisión que tiene la Fibra Óptica e indica los anchos de banda aproximados por ventana, estos anchos de banda pueden ser calculados como:

$$f = \frac{c}{\lambda} \tag{6}$$

Donde:

c: Velocidad de la luz.

λ: Longitud de onda de la luz.

3.5. Atenuación

Es la pérdida de potencia que sufre la señal óptica al propagarse a través de la Fibra, si P_T es la potencia transmitida a la Fibra y P_R la potencia recibida para una longitud L , entonces la atenuación se expresa en forma logarítmica (dB) como:

$$AT = 10 \log \left(\frac{P_T}{P_R} \right) = \alpha L \quad (7)$$

Donde:

α : Coeficiente de atenuación en dB/km

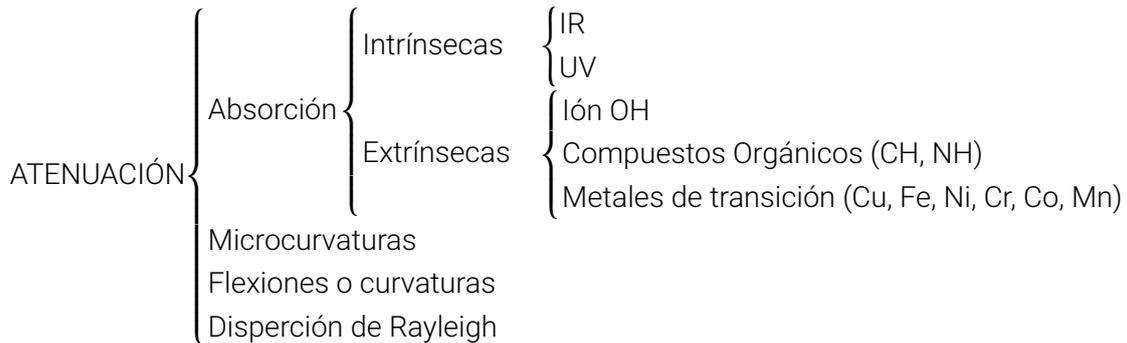


Figura 9: Atenuaciones en las Fibras Ópticas

3.6. Ancho de Banda

Para aplicaciones prácticas el ancho de banda de la Fibra Óptica se define como el producto del ancho de banda en GHz y la posible distancia en km sin repetidores para un máximo de potencia óptica de pérdida de 3 dB, de esta forma el ancho de banda representa frecuencia analógica en pulsos diseminados en un rango de tiempo, usualmente conocida como Dispersión, por ello a menos dispersión del pulso sobre la ruta de transmisión mayor será su ancho de banda, este ancho de banda expresado convencionalmente en GHz/km estará dado por la fórmula:

$$B = \frac{0,44}{\delta T} \quad (8)$$

Donde:

δT : Dispersión en ns y se calcula:

$$\delta T = \sqrt{t_2^2 - t_1^2} \quad (9)$$

Donde:

t_1 y t_2 : Son los 3 dB que valen los pulsos de Transmisión y Recepción respectivamente.

Podemos plantear que en la actualidad hay dos razones principales que motivan a una utilización cada vez mayor del recurso para el ancho de banda:

1. Aumento de los servicios de datos, en especial los relacionados con Internet que han tenido un crecimiento muy fuerte desde su proliferación a escala mundial en 1996, un impulso muy fuerte en este sentido se está produciendo a partir de la incorporación de nuevos servicios de banda ancha como son la televisión digital, el video en demanda y las opciones de multimedia en general.
2. Existencia de diversos protocolos de comunicación incompatibles entre sí, tal es el caso de IP y ATM en particular, la variante de voz empaquetada la cual puede transportarse en diferentes formatos como son VoIP, Frame Relay, ATM, entre otros además de los servicios de voz convencionales de la Red Telefónica Pública Conmutada (PSTN) sobre SDH.

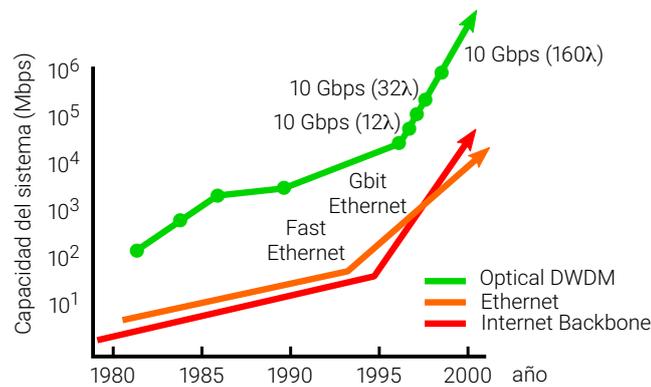


Figura 10: Evolución de la velocidad de Transmisión en la Red

En la figura 10 se muestra un crecimiento de la velocidad por año, considerando tres niveles en la Red:

1. El backbone de Internet.
2. Las Redes de área local (LAN) donde se ha producido un fuerte incremento de velocidad al hacerse realidad el nuevo estándar Ethernet de 10 Gbits/s.
3. El backbone de Transmisión propiamente que transporta la información a grandes distancias. Prácticamente en el año 2000 se logra sobrepasar el umbral de 10G bits/s en el backbone de transporte, obligando a un uso eficiente del ancho de banda potencial que puede ofrecer la Fibra Óptica, obsérvese en la propia figura que a partir de este límite las soluciones de transmisión sobre fibra dejan de ser monocromáticas para convertirse en multicanales haciéndose necesario el empleo de varias longitudes de onda a una máxima velocidad eléctrica fija, que en este caso es de 10 Gbps.

Esta tecnología aumenta la capacidad de la información en fibra proporcionalmente al número de longitudes de onda utilizado y se obtiene mediante el Multiplexado Óptico de los flujos de información monocromáticos, donde a la entrada del sistema los cuales se re sintonizan, previamente a una longitud de onda asignada, alrededor de la ventana de 1550 nm, a esta técnica se le conoce como Multiplexado en Longitud de Onda (WDM), la cual permite un mejor aprovechamiento del ancho de banda potencial de la fibra como medio de transmisión.

3.7. Dispersión.

La Dispersión se mide en ps/nm-km y esta relacionada con el ensanchamiento que sufre un pulso al propagarse a través de la fibra. La dispersión (ns) se localiza a la mitad de la amplitud del pulso o punto de 3 dB, en la figura 13 se muestra la Dispersión con un pulso de entrada y el pulso amplificado de salida luego de recorrer 1 km de fibra y el correspondiente ancho de banda (1 GHz/km) de la fibra, la dispersión está compuesta esencialmente de la Dispersión Modal y Cromática, mientras que el modo polarizado de dispersión con muy alta velocidad de transmisión de bits y la dispersión dependiente de potencia, crean limitaciones de transmisión.

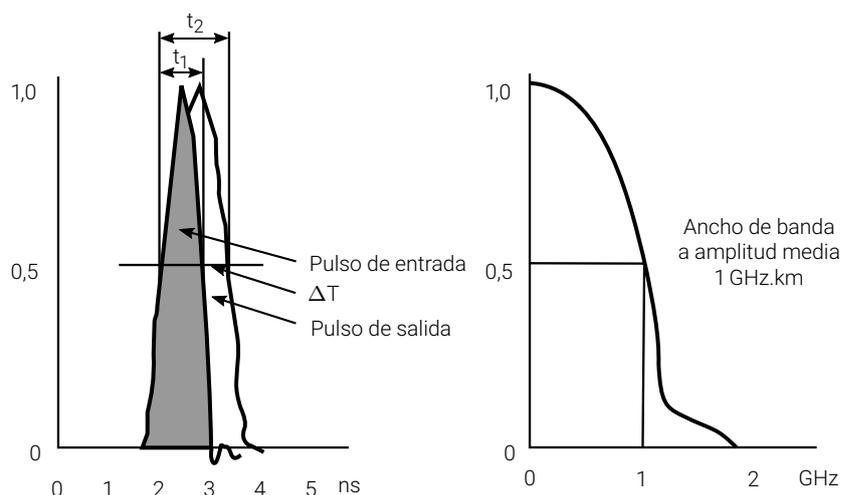


Figura 11: Muestra de Dispersión con un pulso de entrada y el pulso amplificado de salida

3.8. Diferentes tipos de Dispersiones

Dispersión Modal: Dependiendo del Ángulo de Apertura para cada rayo incidente sobre la fibra, se generará un camino específico a seguir a través de esta, donde a mayores centro más modos con mínimas diferencias en cuanto a las posibles distancias a recorrer, una fibra típica Multimodo con 50 μm de centro puede tener varios cientos de modos al alargamiento de pulsos ópticos causados por las distintas distancias recorridas de los diferentes modos y se le nombra Dispersión Modal, esta puede ser reducida si decrementamos el diámetro del centro, así reduciríamos el número de posibles modos simultáneos de ahí que la Fibra Monomodo con 8 a 10 de diámetro central tenga una Dispersión Modal Nula.

Dispersión Cromática: Debida al espectro de colores que conforman la luz; está compuesta de Dispersión Material y Dispersión para Guía de Onda, los pulsos de luz usualmente tienen un espectro pequeño de, compuestas de diferentes colores que viajan a velocidades ligeramente distintas a través de la fibra, por lo tanto crean una Dispersión Cromática de tipo material (Dependiendo del material de la fibra) que también se conoce como Grupo para Velocidades de Dispersión, donde a mayor estreches del espectro de luz fuente, menor será la Dispersión Cromática. (Ver figura 12), esta figura que ilustra este fenómeno muestra como los pulsos recibidos llegan a un punto que comienzan a solaparse consecutivamente unos con otros, de ahí la señal distorsionada.

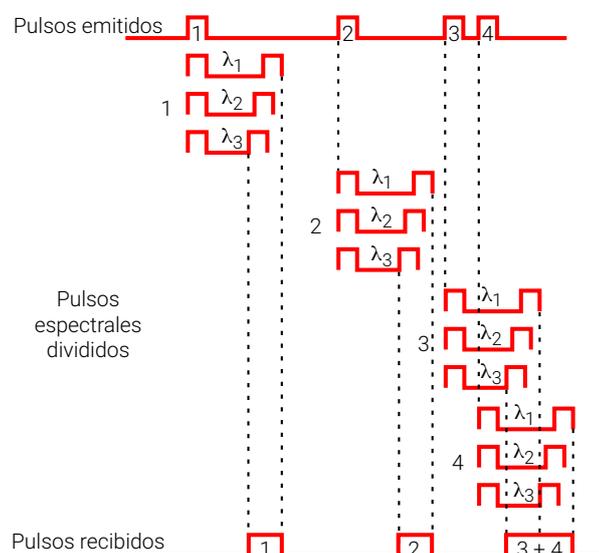


Figura 12: Dispersión Cromática

La Dispersión Material Cromática se define como:

$$\delta T_{mat} = D_{mat} \times \delta\lambda \times L \quad (10)$$

Donde:

D_{mat} : Denota el factor material de Dispersión en ps/nm.km.

$\delta\lambda$: Espectro de la fuente de luz en nm.

L : Longitud de la fibra en km.

La Dispersión Cromática por Guía de Onda se origina de diferencias de potencias en la velocidad de propagación en el centro y cubierta exterior y se representa por:

$$\delta T_{crom} = (D_{mat} + D_{wg}) \times \delta\lambda \times L \quad (11)$$

La Dispersión Cromática total se obtiene por la suma de la material y la de Guía de Onda:

$$\delta T_{wg} = D_{wg} \times \delta\lambda \times L \quad (12)$$

La figura 13 muestra la relación entre ambas y está dada por que más allá de los 1300 nm aproximadamente ambas tienen diferente signo, por lo que la Dispersión Cromática total puede ser cero, este punto de cero dispersión en cristal puro de Silicio ocurre a 1270 nm correspondiente a la segunda ventana y una señal con 10 nm de espectro (Láser típicamente) podría difícilmente experimentar alguna Dispersión Cromática si transmitiera por esta segunda ventana, sin embargo, sufriría una mayor Dispersión del orden de 160 ps luego de 1 km si lo hiciera por la tercera ventana y con el objetivo de aprovechar la baja atenuación de la tercera ventana se desarrolló a los 1550 nm la Fibra de Dispersión Movida (DSF) mediante el incremento de material dopante en la fibra.

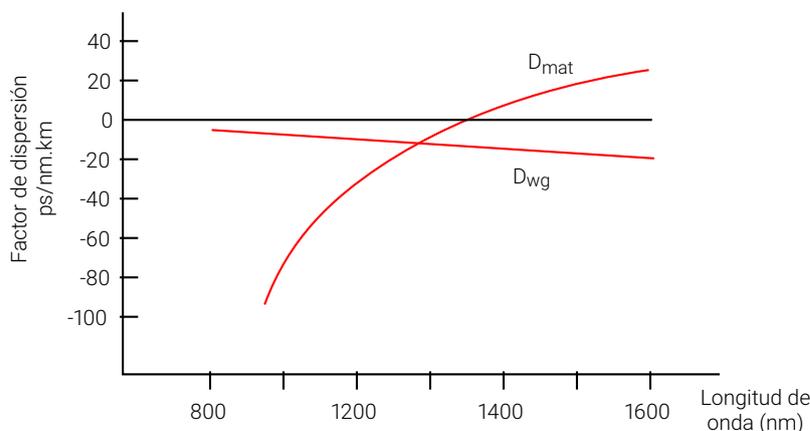


Figura 13: Relación entre Dispersiones

Las Fibras de Dispersión Aplanada fueron desarrolladas para una operación óptima en la segunda y tercera ventana.

Modo de Dispersión Polarizada: La polarización es una propiedad de la luz relacionada con la dirección de sus vibraciones donde los rayos de luz que viajan en una fibra pueden ser descritos tanto si vibran enteramente en el eje X, en el Y o incluso en ambos ejes, cada eje representa un Modo de Polarización, donde el Modo de Dispersión Polarizado (PMD) proviene de las Fibras Monomodos que son esencialmente bimodales desde el punto de vista de la polarización y debido a imperfecciones de la fibra ocurren demoras de tiempo entre los modos polarizados resultando en un ensanchamiento del pulso y por lo tanto una degradación al transmitir, el PMD se mide en $ps\sqrt{km}$, y un nivel máximo de $0,5 ps\sqrt{km}$ está considerado apropiado para Fibras Monomodos.

Modulación de Fase Propia: La dependencia del comportamiento de la potencia en la fibra trae consigo limitaciones en posteriores transmisiones. Este fenómeno conocido como Efecto Kerr crea un cambio de fase dependiente de la intensidad que conlleva a un ensanchamiento del espectro, resultando una modulación de fase propia y también una degradación de la forma del pulso, dicho efecto aumenta al aumentar la velocidad de transmisión debido a que está reducido el intervalo de bit e incrementada la densidad espectral. El Efecto Kerr se basa en un fenómeno que cuando la luz está presente en un medio, puede ocurrir un cambio dependiente de la Intensidad del Índice Refractivo, en distancias largas de fibra este efecto es acumulativo y altera la fase de luz significativamente un pulso de luz puede ser considerado como un rango de intensidades distribuidas y al ser el cambio de fase proporcional a la intensidad, cada parte del pulso experimenta un cambio de fase diferente.

3.9. Amplificación de señales ópticas.

Para la Amplificación de señales ópticas en equipos de terminal o repetidor hay dos soluciones básicas disponibles:

1. Componentes Opto–Electrónicos. (O/E)
2. Amplificadores Ópticos subdivididos en:
 - a) Amplificadores Ópticos Semiconductores. (SOA)
 - b) Amplificadores de Fibra Dopada con Erbium. (EDFA)

Los Amplificadores del tipo SOAs y EDFAs tienen gran aplicación, ambos usan el mismo principio físico, un rayo de luz incidente es amplificado por emisión estimulada en un medio que causa amplificaciones por inyección de energía (También llamado bombeo), mientras que los SOAs usan un láser de bombeo especial y aplica bombeador eléctrico, en los EDFAs el medio amplificador es una pequeña sección típicamente de 20 m o 30 m de Fibra Óptica dopada con iones raros de la tierra insertados dentro de circuitos de línea óptica con bombeo óptico aplicado, estas impurezas al excitarse con el bombeo de láser crean un nivel meta estable de energía en el material de la fibra donde se acumula una cantidad grande de electrones, al incidir el flujo de fotones de la señal de entrada, se provoca una emisión estimulada que refuerza la intensidad de la señal, haciéndose posible el proceso de amplificación, es decir, se producen al paso de la señal nuevos fotones lo cual garantiza una operación total en el dominio óptico. Para amplificar a 1550 nm la fibra es dopada con iones Erbium (Er^{3+} , No.68 en la Tabla Periódica de Mendeleev, llamados elementos raros de la tierra), la emisión estimulada es la base para la amplificación óptica de un fotón incidente y la emisión espontánea puede de regreso ser amplificada por emisión estimulada, esto causa una amplificación de ruido indeseado, en la figura 14 se describe los principios de la transición y la amplificación óptica.

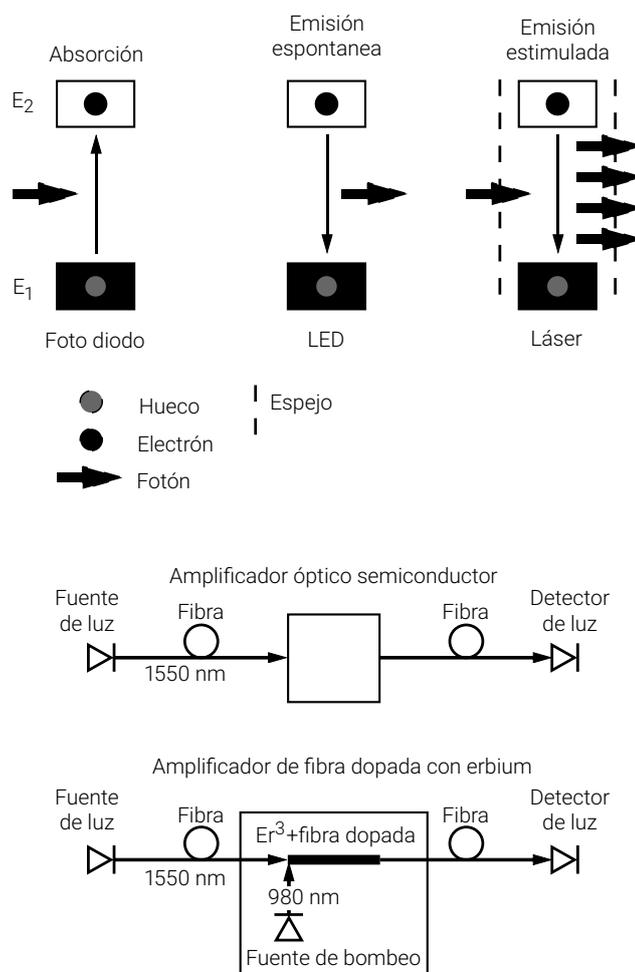


Figura 14: Principios de la transición y la amplificación óptica

Para operar en la segunda ventana los amplificadores ópticos usan fibras dopadas con flúor y con otros elementos raros de la tierra, como Praseodymium (Pr, No.59 en la Tabla Periódica de Mendeleiev) y tiene características similares a las de EDFAs, lógicamente a ellos se les nombra PDFAs, pero más convenientemente la denominación de Amplificador de Fibra pudiera considerarse el nombre común para EDFA y PDFA. Los SOAs generalmente tienen una ganancia y una potencia de saturación de salida mas baja que los amplificadores de fibra y su ventaja es que tienen bajo ruido y consumo eléctrico, además su disponibilidad para estar tanto en la segunda como en la tercera ventana.

3.10. Solitones Ópticos

Para incrementar la capacidad de transmisión de las Fibras Ópticas (Mayor cantidad de bits de información por unidad de tiempo) es necesario reducir la anchura de los pulsos ópticos generados por el transmisor pero además de la propia limitación tecnológica que puede existir, la Dispersión Cromática de la fibra conduce al inevitable ensanchamiento de los pulsos durante la propagación, tanto mayor conforme los pulsos son más estrechos y este ensanchamiento de los pulsos provoca finalmente interferencia entre símbolos y la degradación de la señal a la salida del foto detector. La solución a este problema viene posibilitada por los Solitones, un tipo de pulsos que se caracterizan por mantener su forma durante la propagación a través de la fibra, los Solitones Ópticos son pulsos de luz que viajan libres de distorsión sobre grandes longitudes de la Fibra Óptica como consecuencia de un balance entre los efectos dispersivos y no lineales, en especial y bajo ciertas condiciones de diseño, el SPM (Auto modulación de Fase) inducido por la no linealidad de la fibra produce un chirp de frecuencia que compensa el ensanchamiento producido por la Dispersión Cromática, evitando de este modo la utilización de regeneradores ópticos. La propagación de los Solitones a través de la Fibra Óptica se rige por la ecuación de Schrödinger no lineal,

de hecho la expresión matemática en el dominio del tiempo de la forma de onda del solitón es la única solución estable de la ecuación de Schrödinger, las soluciones más habituales son las que tienen un perfil en forma de secante hiperbólica y cuando el orden es igual a 1 se le llama Solitón Fundamental y es el utilizado en sistemas de transmisión dado que los demás no mantienen su forma aunque sí evolucionan de forma periódica con la distancia, en la figura 15 se representa la evolución con la distancia por la fibra del solitón de segundo orden y para su representación se han utilizado unidades normalizadas de intensidad, tiempo y distancia, en este último caso con respecto al período de repetición del pulso, obsérvese cómo el pulso inicial modifica su forma para posteriormente volver a recuperarla al final del período de repetición. (Este patrón se repite a lo largo de toda la longitud del enlace de Fibra Óptica)

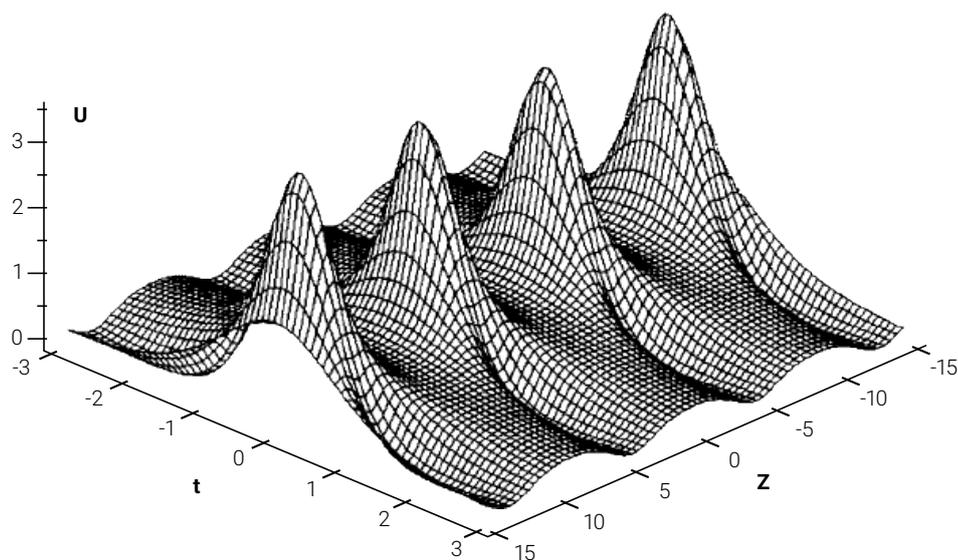


Figura 15: Evolución de un Solitón Óptico a lo largo de la fibra

Aunque se ha comentado que la forma del pulso se mantiene durante la propagación, todavía es necesaria la presencia de Amplificadores Ópticos a lo largo del trayecto para restaurar el nivel de potencia del pulso y mantener las propiedades del Solitón, los sistemas de comunicaciones ópticas típicos que emplean transmisión por solitones se caracterizan por enlaces de fibra de gran distancia ($L > 10.000$ km) divididos en trayectos de longitud del orden de 50 km entre los cuales se sitúan Amplificadores de Fibra Dopada con Erblio (EDFA) con una ganancia tal que compensa las pérdidas del tramo de fibra previo, las distancias entre amplificadores coinciden con múltiplos del período espacial de repetición de los pulsos.

No obstante, la máxima velocidad de transmisión alcanzable con esta técnica viene limitada por una serie de factores como pueden ser la interacción mutua entre los distintos pulsos o el ruido de emisión espontánea amplificada (ASE, Amplified Spontaneous Emission) introducido por los Amplificadores Ópticos, la interacción entre solitones adyacentes tiene lugar cuando los pulsos se encuentran excesivamente cercanos (Anchuras de pulso inferiores a 5 ps) y se manifiesta en una atracción que conduce finalmente a la colisión de los pulsos, por otra parte, la adición de ruido de emisión espontánea a un solitón, además de degradar la relación señal a ruido, provoca que se modifique su energía y frecuencia central de forma aleatoria, como resultado de ello se producen fluctuaciones de potencia y jitter temporal a la salida del Foto detector (Efecto Gordon-Haus) que limitan el valor máximo alcanzable del producto entre la tasa de bits y la distancia de propagación, diversas técnicas para compensar estas degradaciones han sido estudiadas algunas de ellas consisten en emplear solitones de diferente amplitud, amplificación limitada en banda, ganancia no lineal o filtrado de frecuencia deslizante, los filtros utilizados para reducir el jitter pueden ser del tipo Fabry-Perot o Butterworth, en el caso de filtros de Butterworth se obtienen mejores prestaciones debido a su comportamiento máximamente plano y a una menor inestabilidad.

La gran aplicación de la técnica de transmisión basada en Solitones se encuentra en los sistemas de comunicaciones de gran capacidad y larga distancia, como por ejemplo los enlaces de

fibra transoceánicas donde científicos del NTT (Nippon Telephone & Telegraph) de Japón han demostrado ya la transmisión libre de errores de una señal de 40 Gbit/s sobre 70.000 km de fibra lo que confirma el gran potencial de esta técnica, especialmente si se combina con esquemas DWDM.

4. Ventajas principales de la Transmisión Óptica

Las características de transmisión concernientes a la atenuación, ancho de banda y diafonía del cristal puro de Silicio (SiO_2) son altamente superiores a las de líneas de cobre.

Principales ventajas de la transmisión por Fibra Óptica:

- Alto ancho de banda: Enorme disponibilidad de ancho de banda, cerca de
- 50 000Ghz en las dos ventanas de baja atenuación.
- Alta confiabilidad: La calidad de transmisión con la tasa de error de bits (BER) del orden de 10^{-10} .
- Baja pérdida: Atenuación típica de fibra de 0,2 dB/Km, permite terminales y repetidores altamente espaciados; por ejemplo: 300 km de enlace sin repetidores operando a 622 Mbps.
- Inmunidad electromagnética: No hay interferencia electromagnética y no hay diafonía.
- Resistente al fuego: El punto de fundición de la fibra de Silicio es aproximadamente de 1900 °C (Contra 1100 °C de cobre).
- Protector de incendios: Los fotones no generan chispas y así es seguro operar incluso en ambientes explosivos.
- Tamaño pequeño: Típicamente dos pares de cable exterior tienen un diámetro de fibra de 2 mm a 5 mm, Cobre trenzado de 3 mm a 6 mm y Coaxial de 12 mm a 16 mm.
- Peso ligero: El cable de fibra pesa un 10 % a 30 % menos que el Cobre.
- Libre de oxidación: El cristal es químicamente estable y así puede prevalecer en ambientes adversos (Tales como fondos oceánicos).
- Aislamiento eléctrico: La fibra está libre completamente de alto voltaje.
- Alta flexibilidad física: El cable de Fibra Óptica puede fácilmente ser doblado, permitiendo su rápida instalación en conductores ya en uso.
- Recursos: Contrario al Cobre, el Silicio está disponible en abundancia.
- Principales desventajas de la Transmisión por Fibra Óptica:
 - Costo: El costo es alto en la conexión de Fibra Óptica, las empresas no cobran por tiempo de utilización sino por cantidad de información transferida al computador, que se mide en Mbyte y el coste de instalación es elevado y altos precios de los conectores.
 - Acoplamiento y Conectorización: El acoplamiento y la conectorización tiene que ser extremadamente exacto y la disponibilidad limitada de conectores.
 - Reparación: Dificultad de reparar un cable de fibras roto en el campo.
 - Transmisión: Imposibilidad de transmitir potencia.

5. Características del cable de Fibra Óptica

Difiere básicamente del de cobre en que no necesita de protección electromagnética y sí de un superior mecanismo de protección, los cables de Fibra Óptica pueden ser utilizados en áreas explosivas, para ambientes computacionales y médicos altamente sensibles y no atrae descargas

eléctricas. Contrariamente al cable de cobre, la torcedura de una fibra no es requerida (para reducir la diafonía), pero si requiere libertad de movimiento con el objetivo de prevenir esfuerzos de tensión, por lo cual las fibras ópticas son empacadas en un cable con un núcleo en las siguientes versiones: (Ver figura 16)

1. Fibras con más o menos soltura, amortiguadas adentro con tubos protectores.
2. Fibras con núcleo ranurado.
3. Fibras encapsuladas en largueros planos.

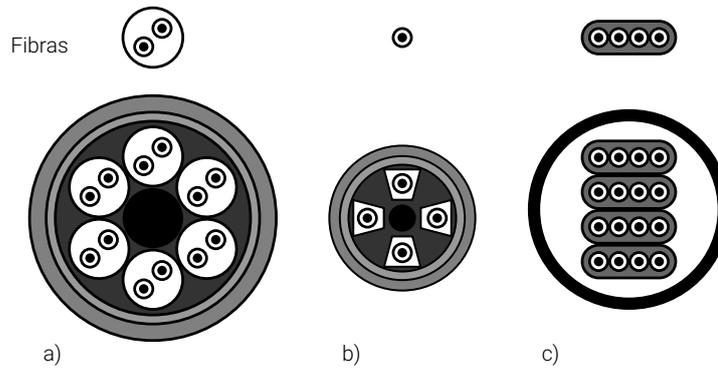


Figura 16: Característica del cable de Fibra Óptica

- Fibras con más o menos soltura, amortiguadas adentro con tubos protectores: Con esta concepción hasta 144 fibras están ubicadas dentro de un tubo plástico llenado usualmente con un gel para evitar la humedad y la combinación de un número de estos tubos forma un cable versiones especiales de cables mini tubo de acero han sido fabricadas para aplicaciones submarinas, más de 48 fibras son colocadas dentro de un mini tubo de acero con diámetro externo de 2,3 mm y una pared de grosor de 0,2 mm, este tubo de acero posee protección contra la humedad y la abrasión longitudinal, es llenado con thixotropic jelly (Gel).
- Fibras con núcleo ranurado: Una o más fibras son insertadas con un ángulo de soltura en helicoidales ranuras alrededor de ejes de un centro termoplástico, las fibras se pueden mover dentro de sus ranuras para acomodar estirajes del cable sin ninguna tensión y para cables submarinos las ranuras helicoidales se llenan con compuesto repelente al agua para prevenir propagaciones longitudinales de agua de mar dentro del cable en caso de un posible daño.
- Fibras encapsuladas en largueros planos: Los cables de largueros planos son los preferidos para cables de alta densidad con varios cientos o incluso miles de fibras, un pequeño número de fibras son encapsuladas en un larguero plano y varios largueros son colocados uno sobre otro formando el centro del cable para aliviar tensión, cuerdas de plástico y/o silicio resistentes son trenzadas alrededor del centro del cable, el cual es luego cubierto por una chaqueta de polietileno, cloruro de polivinilo o una chaqueta mixta.

6. Efectos no lineales de la Fibra Óptica

El gran atractivo que poseen los sistemas de comunicaciones ópticas se debe a la capacidad que poseen las Fibras Ópticas para transportar grandes cantidades de información sobre trayectos extensos sin utilizar repetidores, para aprovechar el ancho de banda disponible pueden multiplexarse numerosos canales a diferente longitud de onda sobre una misma fibra, técnica que se conoce como WDM (Wavelength Division Multiplexing), adicionalmente para incrementar los márgenes del sistema se requieren mayores potencias ópticas de transmisión o pérdidas de la fibra inferiores, sin embargo, todos los intentos realizados para utilizar las capacidades de las Fibras Ópticas se encontrarán limitados por las interacciones no lineales que se producen entre las portadoras ópticas que transportan la información y el medio de transmisión, en los sistemas que

operan a velocidades iguales o inferiores a 2,5 Gbits/s y con potencias que no exceden algunos milivatios para la transmisión de información, la influencia de los mismos es bastante reducida por lo que no son considerables, a medida que se incrementa la velocidad de transmisión a partir de 10 Gbits/s, la longitud de los enlaces y la potencia de los transmisores, los efectos no lineales en la fibra comienzan a ser importantes y deben ser considerados de forma ineludible porque alteran significativamente las características de las señales transmitidas, con la degradación de la calidad del sistema y la limitación de la capacidad de información de los mismos. Estos efectos no lineales, aunque inciden de diferentes formas sobre la transmisión se basan en la interacción de la radiación transmitida con el material por donde se propaga la radiación y responde a dos mecanismos básicos, el primero es la variación del índice de refracción del material (En este caso la Sílice) cuando la intensidad de la radiación óptica sobrepasa una determinada potencia $n = n_p$, esta variación provoca diferentes fenómenos como la auto modulación de fase (Self-Phase Modulation (SPM)), la modulación de fase cruzada (Cross-Phase Modulation (XPM o CPM)), la mezcla de cuatro ondas (Four Wave Mixing (FWM)), también designada por algunos autores como mezcla de cuatro fotones (Four Photon Mixing (FPM)) y el segundo mecanismo es la interacción de los fotones incidentes con algunos modos de vibración del material que se conocen como Fonones, de esta interacción resultan dos tipos de dispersiones: La Dispersión Estimulada de Raman (Stimulated Raman Scattering (SRS)) y la Dispersión Estimulada de Brillouin. (Stimulated Brillouin Scattering (SBS)) Los efectos no lineales no son independientes de las características geométricas de la fibra y el perfil de la radiación no es rectangular, sino tiene una forma derivada del modo de propagación, esto da lugar a una intensidad inconstante que afecta de manera diferente a una y otras zonas de la sección de la fibra, la intensidad de la señal disminuye a medida que se propaga, al ser los efectos no lineales dependientes de dicha intensidad, entonces la incidencia de estos sobre la transmisión varía con la distancia para esto se definen dos parámetros característicos: La longitud y el área efectiva.

- Longitud Efectiva: Para determinar la longitud efectiva, se considera que la potencia es constante a lo largo de la longitud del enlace, esta adquiere valores de 15 km a 25 km para distancias largas y valores del coeficiente de atenuación de la fibra entre 0,15 dB/km y 0,25 dB/Km.
- Área Efectiva: El área efectiva es un parámetro estrechamente relacionado con las no linealidades de la fibra óptica que afectarán la calidad de transmisión de los sistemas de fibra óptica, especialmente en los sistemas de larga distancia con amplificación óptica. Los valores típicos de área efectiva oscilan entre $90 \mu\text{m}^2$ y $50 \mu\text{m}^2$.

6.1. Efectos no lineales por la variación del Índice de Refracción de la sílice con relación a la potencia óptica

Las Fibras Ópticas tienen un comportamiento no lineal caracterizado por la dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo óptico, esta dependencia es conocida como Efecto Kerr y se expresa como:

$$n = n_0 + n_{nl} \frac{P}{A_{eff}} \quad (13)$$

Donde:

n_0 : Índice de Refracción del núcleo de la Fibra para bajos niveles de potencia óptica.

n_{nl} : Coeficiente del Índice de Refracción no lineal. ($2,35 \times 10^{-20} \frac{\text{m}^2}{\text{W}}$ para el Silicio).

P : Potencia óptica, expresada en vatios.

A_{eff} : Área efectiva del núcleo, expresada en m^2 .

La figura 17 muestra la relación entre el Índice de Refracción del Silicio y la Potencia Óptica, la dependencia del Índice de Refracción con la potencia es relativamente pequeña pero cobra importancia en los sistemas ópticos de comunicaciones de cientos de km de longitud.

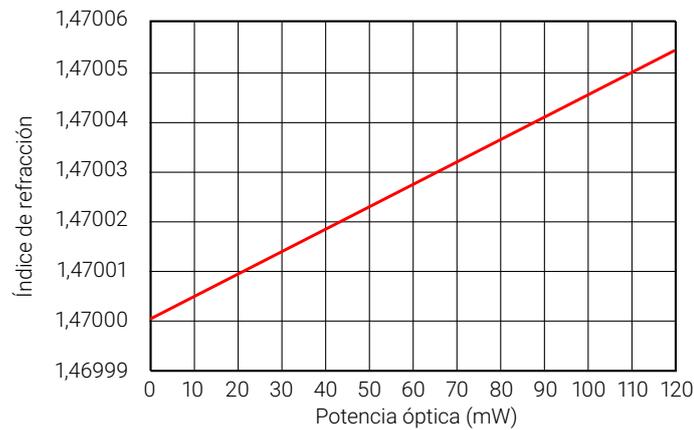


Figura 17: Dependencia del Índice de Refracción con relación a la potencia óptica transmitida por la fibra

- Auto modulación de Fase. (SPM: Self-Phase Modulation): Es el caso más simple dentro de los fenómenos no lineales, pues es la intensidad del pulso óptico la cual posee valores diferentes en las regiones de subida o bajada que en su máximo, esta variación provoca un desplazamiento inducido de fase que es diverso en cada zona del mismo y el pulso sufrirá una modulación gradual de frecuencia lo cual hará que cada parte del pulso tenga una frecuencia distinta a este fenómeno se le conoce como la terminología inglesa Chirping, tal efecto puede degradar aquellos sistemas ópticos de una sola longitud de onda que empleen esquemas de modulación de fase. La SPM convierte las fluctuaciones de la potencia óptica de la señal contenida en un canal en fluctuaciones de fase de la señal y la variación de la fase debido a la no linealidad del Índice de Refracción está dada por:

$$\sigma_{\phi} = 0,035\sigma_p \tag{14}$$

Donde:

σ_{ϕ} : Fluctuación RMS de la fase en radianes.

σ_p : Fluctuación RMS de la potencia en mW.

En sistemas Mono canales prácticos el ruido de fase resultante es menor que 0,04 radianes. La Dispersión de la fibra influye notablemente en la magnitud de la SPM (Mientras mayor sea la Dispersión Cromática de la fibra, mayor será la SPM) y por otra parte, el diseño de las fibras contribuye a evitar la SPM las fibras diseñadas con un área efectiva amplia tienen un umbral alto de SPM.

- Modulación de fase cruzada. (XPM: Croos-Phase Modulation): En sistemas WDM la modulación de fase cruzada convierte las fluctuaciones de potencia óptica de un determinado canal en fluctuaciones de fase en el resto de canales, para idénticos parámetros del sistema el fenómeno no lineal de XPM es el doble de eficiente que el SPM. La XPM es similar a la SPM, con la excepción de que esta involucra más de un pulso de luz y en este caso el efecto del cambio de Índice de refracción se ve reforzado por la existencia de otro canal. En la XPM el efecto mutuo de la interacción de todos los pulsos que viajan por el interior de la fibra sobre su Índice de Refracción provoca que los pulsos se distorsionen en relación con su interacción. En un sistema de N canales la fluctuación de fase RMS en un canal particular, debido a las fluctuaciones de la potencia en otros canales, está representada por:

$$\sigma_{\phi} = 0,07\sqrt{N\sigma_p} \tag{15}$$

A diferencia de la SPM, la dispersión de la fibra tiene un impacto pequeño en la XPM, con el aumento del área efectiva de la fibra se reduce el XPM y el resto de las no linealidades de la fibra. Este fenómeno adquiere importancia en los sistemas con elevados números de canales y que están próximos en longitud de onda, la manera más fácil de evitar la modulación de fase cruzada es espaciando los canales del sistema a 100 GHz, lo cual es posible

porque con este intervalo de frecuencias las constantes de propagación son suficientemente diferentes como para desplazarse a velocidades diferentes y el solapamiento que pueda existir entre los pulsos desaparezca a una corta distancia, desapareciendo así la XPM entre dichos pulsos esto es posible cuando la diferencia entre la dispersión cromática de los canales sea alrededor de 2 ps/nm.km, que ocurre con el espaciado de 100 GHz, siempre que dichos canales no se encuentren cerca del valor de dispersión nula para fibras monomodos estándar y el fenómeno XPM es un problema grave para las fibras de dispersión desplazada a 1550 nm cuando se trabaja a velocidades por encima de 10 Gbit/s.

- Mezclado de cuatro ondas (FWM: Four-wave Mixing) o Mezclado de cuatro fotones (FPM: Four-Photon Mixing): La mezcla de cuatro fotones (FPM) ocurre sólo en los sistemas de transmisión que portan simultáneamente muchas longitudes de ondas, como es el caso de los sistemas DWDM la origina la dependencia del Índice de Refracción de la fibra con la intensidad de la luz. Por ejemplo, dos ondas que se propagan a frecuencias f_1 y f_2 se mezclan y producen dos nuevas frecuencias $2f_1 - f_2$ y $2f_2 - f_1$, similarmente tres ondas que se propagan generan nueve nuevas ondas a las frecuencias $f_{ijk} = f_i + f_j + f_k$ donde i, j, k pueden ser 1, 2 o 3 y cumplen que: $i \neq k, j \neq k$. En general, para un sistema de N canales el número de productos de mezcla generados está dado por:

$$M = \frac{1}{2} (N_3 - N_2) \quad (16)$$

Si se asume que las longitudes de ondas de entrada de un sistema de tres canales son:

$$\lambda_1 = 1551,72 \text{ nm} \quad \lambda_2 = 1552,52 \text{ nm} \quad \lambda_3 = 1552,32 \text{ nm}$$

Entonces, las nueve nuevas frecuencias generadas por el sistema son:

$$\begin{array}{lll} \lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3 = 1550,92 \text{ nm} & \lambda_1 - \lambda_2 + \lambda_3 = 1552,52 \text{ nm} & \lambda_3 + \lambda_2 - \lambda_1 = 1554,12 \text{ nm} \\ 2\lambda_2 - \lambda_3 = 1551,72 \text{ nm} & 2\lambda_3 - \lambda_2 = 1554,12 \text{ nm} & 2\lambda_2 - \lambda_1 = 1553,32 \text{ nm} \\ 2\lambda_1 - \lambda_3 = 1550,12 \text{ nm} & 2\lambda_1 - \lambda_2 = 1550,92 \text{ nm} & 2\lambda_3 - \lambda_1 = 1554,92 \text{ nm} \end{array}$$

- Seis de los productos de la intermodulación no coinciden con las longitudes de ondas de entrada y pueden ser eliminados mediante filtros ópticos; los tres restantes coinciden exactamente con las frecuencias originales entonces no hay forma alguna de eliminarlos una vez que se forman por lo tanto, hay que prevenir su formación. La magnitud de la FPM depende del espaciado entre canales, la dispersión de la fibra y el esquema de detección, se incrementa dramáticamente a medida que el espaciado entre canales se estrecha, por otra parte, la FPM es inversamente proporcional a la dispersión de la fibra es más fuerte su influencia en el punto de cero dispersión y las velocidades de grupo de las ondas iniciales y generadas son distintas como consecuencia de la Dispersión Cromática y esto provoca la destrucción de la condición de adaptación de fases del proceso de FWM y reduce la eficiencia de potencia en la generación de nuevas ondas, la eficiencia del FWM decrece cuando aumenta la diferencia entre las velocidades de grupo por lo que valores de dispersión o separaciones entre canales mayores conducen a menores eficiencias. Un método para reducir las degradaciones introducidas por el FPM en sistemas multicanal WDM consiste en emplear fibras dispersivas para conseguir aumentar la desadaptación de fases del proceso no lineal, sin embargo, dado que valores elevados de Dispersión Cromática conducen a otro tipo de degradaciones, suelen emplearse las llamadas NZDSFs (Nearly Zero Dispersion-Shifted Fibers), este tipo de fibras se caracterizan por valores de dispersión suficientemente reducidos pero no nulos para evitar simultáneamente los efectos dispersivos y no lineales, finalmente, se ha demostrado que la técnica de inversión espectral (Conjugación Óptica) también resulta válida para compensar las degradaciones producidas por FPM, este hecho es buena muestra de un principio general, la compensación de efectos no lineales por medio de la generación de otros efectos no lineales.

6.2. Efectos no lineales causados por la interacción de los fotones incidentes con algunos de los modos de vibración del material.

Dispersión estimulada de Raman. (SRS: Stimulated Raman Scattering): Este efecto consiste en la interacción entre los fotones que inciden sobre el material y las vibraciones que tienen las moléculas o los átomos de este y, reciben el nombre de fonones ópticos. La onda luminosa incidente dispersada por las moléculas sufre un desplazamiento en frecuencia, y da lugar al surgimiento de dos frecuencias: una de menor valor que la frecuencia de la radiación óptica, denominada frecuencia de Stokes y, otra de mayor frecuencia denominada anti-Stokes. Si dos ondas ópticas separadas por la frecuencia de Stokes se inyectan en la fibra, la de menor frecuencia (Mayor longitud de onda) se amplifica a expensas de la de mayor frecuencia (Menor longitud de onda), es decir, los canales de longitud de onda inferior bombearán energía a los de longitud de onda superior. Este proceso de amplificación se conoce como SRS (Dispersión estimulada de Raman) y ocasiona la diafonía, degradando el sistema, sobre todo si se tiene en cuenta la dirección de estas señales en dirección a la de recepción. En un sistema de transmisión óptico simple (Monocanal) el umbral de potencia para la ocurrencia del efecto SRS es aproximadamente de 1 W (+30 dBm), por lo tanto, en los sistemas de canal simple el SRS no es un problema y el intervalo de frecuencia más significativo en el que puede generarse la frecuencia de Stokes es de 13 THz, que corresponde a 125 nm. En sistemas WDM existen multitud de canales y las señales situadas a longitudes de onda superiores serán amplificadas por los canales situados a longitudes de onda inferiores, en la región de 1550 nm el perfil de ganancia Raman del sílice acoplará canales separados hasta 100 nm, por lo que la degradación se producirá para potencias ópticas bastante inferiores y para unos cuantos canales, el límite de potencia decrece como $1/N$ debido a que el espectro Raman es bastante ancho y las potencias de todos los canales contribuyen al proceso de SRS conforme se añaden más canales, el ancho de banda óptico ocupado aumenta y las interacciones entre canales resultan más significativas decreciendo el límite de potencia óptica como $1/N^2$, estos resultados se representan en el gráfico de la figura 18.

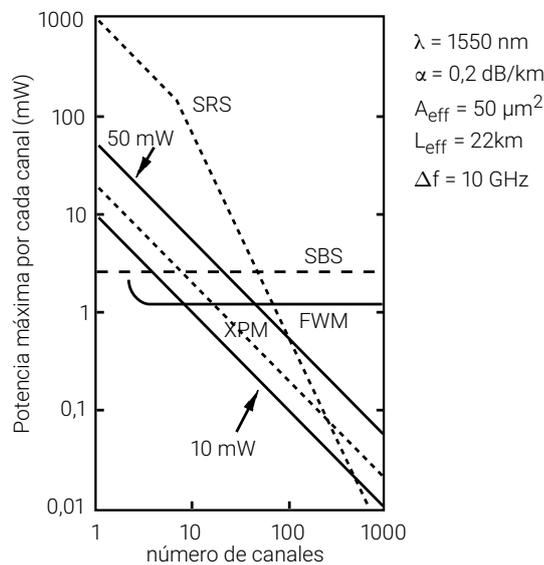


Figura 18: Potencia máxima por canal para evitar la influencia de distintos efectos no lineales

Para minimizar las degradaciones debidas al SRS en los sistemas WDM debe cumplirse que el producto ancho de banda total por potencia óptica total debe ser menor que 500 GHz.W:

$$NP(N - 1) \Delta f < 500 \text{ GHz} \cdot W \tag{17}$$

Donde:

N: Número de canales.

P: Potencia óptica de cada canal.

Δf : Espaciamiento en frecuencia entre cada canal.

Los inconvenientes expuestos se reducen cuando la dispersión cromática acumulativa es apreciable, debido a que las señales de los canales viajan a diferentes velocidades y disminuyen la posibilidad de solapamiento entre dichas señales. En los sistemas ópticos que emplean amplificadores, el efecto del SRS puede ser un problema, incluso en sistemas de canal simple. Los sistemas de amplificación prácticos actuales emplean EDFA cuya señal de salida es alrededor de 200 mW (23 dBm) e incluso superiores, por lo tanto, el empleo en cascada de los mismos puede sobrepasar el umbral del SRS. En tales sistemas, el umbral real para el SRS disminuye en un factor igual al número de amplificadores del enlace. La figura 19 muestra lo que podría suceder en un sistema WDM de 6 longitudes de ondas que emplea varios Amplificadores Ópticos en cascada.

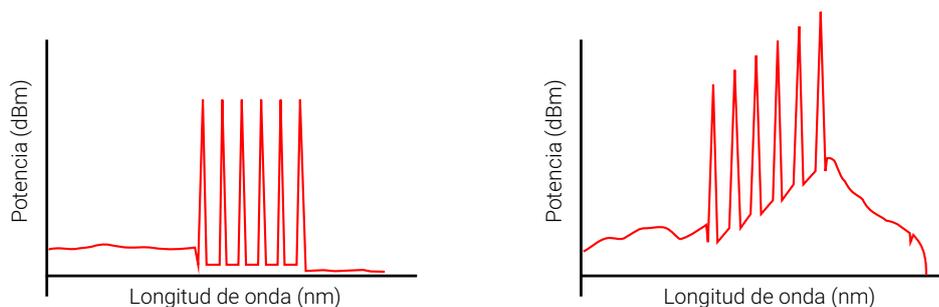


Figura 19: Influencia del efecto SRS en sistemas con Amplificadores Ópticos

Como puede observarse, todas las portadoras inicialmente tienen el mismo nivel de potencia; pero a la entrada del Receptor la amplitud de las portadoras no es igual. Los niveles de potencia óptica recibidos crecen desde la portadora de menor longitud de onda hasta la portadora de longitud de onda más larga. Las fibras diseñadas con un área efectiva amplia tienen un umbral alto de SRS.

- Dispersión estimulada de Brillouin. (SBS: Stimulated Brillouin Scattering): La interacción del campo eléctrico de la luz que se propaga a lo largo del material le induce pequeñas vibraciones en su estructura, denominadas vibraciones acústicas y constituyen los fotones acústicos. Este fenómeno ocurre con potencias tan reducidas como algunos milivatios y propician alteraciones en la densidad del material, es decir, provoca variaciones en el Índice de Refracción del material, y la luz incidente se esparce en sentido contrario a la de propagación. Por lo tanto, la intensidad de la radiación incidente disminuirá en la misma proporción en que vaya aumentando la que se dispersa, este efecto impone un límite a la inyección de potencia óptica en la fibra, donde el nivel de potencia óptica crítico para el cual el SBS degrada la calidad del sistema, se encuentra en torno a los 3 mW considerando los parámetros típicos de la figura 21. Al mismo tiempo, el valor de la frecuencia de la luz esparcida, respecto a la de la luz incidente, se encuentra desplazado hacia una frecuencia menor —mayor longitud de onda— en una cantidad que depende del valor de la propagación de la onda acústica en el material, este desplazamiento de frecuencia se conoce como desplazamiento Doppler y se expresa:

$$f_B = 2n \frac{V_s}{\lambda} \quad (18)$$

Donde:

n : Índice de Refracción del núcleo.

V_s : Velocidad del sonido para el Sílice=5,700 m/s.

Para la Fibra Óptica, una Fibra de Silicio que trabaje a 1550 nm el desplazamiento de frecuencia es $f_B = 10 \text{ a } 12 \text{ GHz}$, equivalente a 0,09 nm y la ganancia de Brillouin aparece en un margen de 20 MHz; entonces si no hay canales tan próximos no habrá interferencia entre ellos. El umbral del SBS es independiente del número de canales del sistema, es decir, este efecto queda restringido a cada canal individual, no se traduce en efectos de diafonía y

apenas tiene influencia en los sistemas WDM, también introduce un ruido significativo en el sistema, que degrada la BER (Tasa de error de bits) del mismo. El control del SBS es importante en los sistemas de transmisión de elevada velocidad que emplean moduladores externos y fuentes láser de onda continua (CW), así como en la transmisión de señales de CATV a 1550 nm. El umbral del SBS depende de parámetros del sistema como la longitud de onda de trabajo es más bajo a 1550 nm que a 1310 nm y el ancho espectral de la fuente emisora mientras más monocromática sea la fuente óptica, más bajo será el umbral para el SBS; el tipo de fibra depende del área efectiva del núcleo de las fibras, mientras mayor sea el área efectiva, mayor será el umbral. Las Fibras de Dispersión Desplazada tienen la menor área efectiva, por lo tanto, tienen el umbral más bajo. Esta característica las hace muy sensibles al SBS cuando se trabaja a 1550 nm; el esquema de modulación empleado en la práctica, el umbral de potencia depende del formato de modulación y en el caso de los sistemas de modulación ASK y FSK, la ganancia del SBS decrece en un factor de 4 con el incremento de la velocidad de transmisión. Similarmente para los sistemas PSK de alta velocidad, la ganancia del SBS decrece linealmente con la velocidad de transmisión; y del número de etapas amplificadoras el otro factor a considerar es la disminución del umbral de SBS a medida que aumenta el número de EDFAs en el enlace. El umbral de SBS para un sistema que contiene N amplificadores es el umbral sin los amplificadores en mW dividido por N, por lo tanto, en los sistemas con amplificadores el umbral de SBS podría ser muy bajo, y afectaría seriamente al sistema.

- Multiplexado de Canales. Los diferentes métodos de multiplexado existentes (Pasivos frente a selectivos en frecuencia) afectan significativamente sobre los efectos de las no linealidades ópticas, el multiplexado pasivo de N canales empleando por ejemplo una red en estrella reduce la potencia de cada canal inyectado en la fibra por un factor N, mayores grados de multiplexación conducen a potencias por canal inferiores, por lo tanto, la potencia por canal inyectada en la fibra decrece con el número de canales tal y como se muestra en la figura 33 para dos potencias ópticas de transmisor distintas: 10 y 50 mW suponiendo que no existen pérdidas adicionales en el proceso de multiplexado. Para saber si un determinado efecto no lineal provocará degradación en el sistema debemos comprobar si la curva asociada con dicha no linealidad se encuentra por encima o por debajo de la curva que representa la potencia del transmisor óptico. En el caso particular de la figura 33, se deduce que utilizando un transmisor de 50 mW nos encontramos limitados por SRS (Dispersión estimulada de Raman) por encima de los 100 canales, por SBS (Dispersión estimulada de Brillouin) por debajo de 20 canales, por FPM por debajo de los 50 canales, y por XPM en cualquier caso. Si se reduce ahora la potencia de transmisión a 10 mW, sólo el SBS y el FPM constituyen limitación en el caso de transmisiones con menos de 10 canales. Por el contrario, en el caso de multiplexado selectivo en frecuencia la potencia por canal inyectada en la fibra es independiente del número de canales. Consecuentemente, estos sistemas serán más susceptibles de degradaciones producidas por efectos no lineales. Especialmente cuidadoso debe ser el diseño del sistema en el caso del SBS y del FPM, ya que su influencia es también independiente del número de canales.

7. Aplicaciones de la Fibra Óptica

También conocido como sistemas de Fibra Óptica, son usados para transmitir señales analógicas y digitales a través de sus cables específicos y tales sistemas consisten de equipamiento de línea terminal, conectando las señales eléctricas u ópticas con las fibras; repetidores compensadores de pérdidas en las líneas y regeneradores de señales digitales; partidores de señal óptica que distribuye en varias direcciones; alimentadores de potencia para repetidores subterráneos o submarinos y localizador de fallas, supervisores y equipos de administración de red.

7.1. Internet

El servicio de conexión a Internet por Fibra Óptica derriba la mayor limitación del ciberespacio: Su exasperante lentitud, para navegar por la Red Mundial de Redes "Internet" no sólo se necesitan un computador, un módem y algunos programas sino también una gran dosis de paciencia, ya que el ciberespacio es un mundo lento hasta el desespero, donde un usuario puede pasar varios minutos esperando a que se cargue una página o varias horas tratando de bajar un programa de la Red a su PC. Esto se debe a que las líneas telefónicas, el medio que utiliza la mayoría de los 50 millones de usuarios para conectarse a Internet no fueron creadas para transportar videos, gráficas, textos y todos los demás elementos que viajan de un lado a otro en la Red. Pero las líneas telefónicas no son la única vía hacia el ciberespacio, recientemente un servicio permite conectarse a Internet a través de la Fibra Óptica. La Fibra Óptica hace posible navegar por Internet a una velocidad de dos millones de bps, impensable en el sistema convencional, en el que la mayoría de usuarios se conecta a 28.000 bps ó 33.600 bps.

7.2. Redes

La Fibra Óptica se emplea cada vez más en la comunicación, debido a que las ondas de luz tienen una frecuencia alta y la capacidad de una señal para transportar información aumenta con la frecuencia, en las redes de comunicaciones se emplean sistemas de láser con Fibra Óptica. Hoy funcionan muchas Redes de fibra para comunicación a larga distancia, que proporcionan conexiones transcontinentales y transoceánicas, donde una ventaja de los sistemas de Fibra Óptica es la gran distancia que puede recorrer una señal antes de necesitar un Repetidor para recuperar su intensidad, en la actualidad los Repetidores de Fibra Óptica están separados entre sí unos 100 km, frente a aproximadamente 1,5 km en los sistemas eléctricos, los Amplificadores de Fibra Óptica recientemente desarrollados pueden aumentar todavía más esta distancia. Otra aplicación cada vez más extendida de la Fibra Óptica son las Redes de Área Local, al contrario que las comunicaciones de larga distancia, estos sistemas conectan a una serie de abonados locales con equipos centralizados como ordenadores (Computadoras) o impresoras, este sistema aumenta el rendimiento de los equipos y permite fácilmente la incorporación a la red de nuevos usuarios y el desarrollo de nuevos componentes electroópticos y de óptica integrada aumentará aún más la capacidad de los sistemas de fibra. Red de Área Local o LAN conjunto de ordenadores que pueden compartir datos, aplicaciones y recursos (por ejemplo impresoras), las computadoras de una Red de Área Local (LAN: Local Area Network) están separadas por distancias de hasta unos pocos km y suelen usarse en oficinas o campus universitarios, una LAN permite la transferencia rápida y eficaz de información en el seno de un grupo de usuarios y reduce los costes de explotación. Otros recursos informáticos conectados son las redes de área amplia (WAN, Wide Area Network) o las centralitas particulares (PBX), las WAN son similares a las LAN pero conectan entre sí ordenadores separados por distancias mayores, situados en distintos lugares de un país o en diferentes países; emplean equipo físico especializado y costos arriendan los servicios de comunicaciones. Las PBX proporcionan conexiones informáticas continuas para la transferencia de datos especializados como transmisiones telefónicas, pero no resultan adecuadas para emitir y recibir los picos de datos de corta duración empleados por la mayoría de las aplicaciones informáticas. Las redes de comunicación públicas están divididas en diferentes niveles; conforme al funcionamiento, a la capacidad de transmisión así como al alcance que definen, por ejemplo, si está aproximándose desde el exterior hacia el interior de una gran ciudad, se tiene primeramente la red interurbana y red provincial, a continuación las líneas prolongadas aportadoras de tráfico de más baja capacidad procedente de áreas alejadas (Red Rural), hacia el centro la red urbana y finalmente las líneas de abonado, los parámetros dictados por la práctica son el tramo de transmisión que es posible cubrir y la velocidad binaria específica así como el tipo de Fibra Óptica apropiado, es decir, cables con Fibras Monomodos o Fibras Multimodos.

7.3. Telefonía.

Con motivo de la normalización de interfaces existentes, se dispone de los sistemas de transmisión por Fibra Óptica para los niveles de la red de telecomunicaciones públicas en una amplia aplicación, contrariamente para sistemas de la red de abonado (Línea de abonado) hay ante todo una serie de consideraciones.

Para la conexión de un teléfono es completamente suficiente con los conductores de cobre existentes, precisamente con la implantación de los servicios en banda ancha como la videoconferencia, la videotelefonía, etc, la Fibra Óptica se hará imprescindible para el abonado, con el BIGFON (Red Urbana Integrada de Telecomunicaciones en Banda Ancha por Fibra Óptica) se han recopilado amplias experiencias en este aspecto, según la estrategia elaborada los servicios de banda ancha posteriormente se ampliarán con los servicios de distribución de radio y de televisión en una Red de Telecomunicaciones Integrada en Banda Ancha (IBFN).

7.4. Otras aplicaciones.

Las Fibras Ópticas también se emplean en una amplia variedad de sensores que van desde termómetros hasta giroscopios, su potencial de aplicación en este campo casi no tiene límites porque la luz transmitida a través de las fibras es sensible a numerosos cambios ambientales, entre ellos la presión, las ondas de sonido y la deformación, además del calor y el movimiento, las fibras pueden resultar especialmente útiles cuando los efectos eléctricos podrían hacer que un cable convencional resultara inútil, impreciso o incluso peligroso y también se han desarrollado fibras que transmiten rayos láser de alta potencia para cortar y taladrar materiales.

Portadores comunes telefónicos y no telefónicos, Televisión por cable, Enlaces y bucles locales de estaciones terrestres, Automatización industrial, Controles de procesos, Aplicaciones de computadora y Aplicaciones militares.

La aplicación más sencilla de las Fibras Ópticas es la transmisión de luz a lugares que serían difíciles de iluminar de otro modo, como la cavidad perforada por la turbina de un dentista, también pueden emplearse para transmitir imágenes en este caso se utilizan haces de varios miles de fibras muy finas, situadas exactamente una al lado de la otra y ópticamente pulidas en sus extremos. Cada punto de la imagen proyectada sobre un extremo del haz se reproduce en el otro extremo, con lo que se reconstruye la imagen, que puede ser observada a través de una lupa, la transmisión de imágenes se utiliza mucho en instrumentos médicos para examinar el interior del cuerpo humano y para efectuar cirugía con láser, en sistemas de reproducción mediante facsímil y fotocomposición, en gráficos de ordenador o computadora y en muchas otras aplicaciones.

8. Comparación con otros Medios de Comunicación

8.1. Comparación con los Cables Coaxiales.

Características	Fibra Óptica	Coaxial
Longitud de la Bobina (m)	2000	230
Peso (kg/km)	190	7900
Diámetro (mm)	14	58
Radio de Curvatura (cm)	14	55
Distancia entre repetidores (km)	40	1,5
Atenuación (dB/km) para un Sistema de 56 Mbps	0,4	40

Cuadro 2: Comparación con los Cables Coaxiales

8.2. Comunicaciones por Satélite vs. Fibra Óptica.

Es más económica la Fibra Óptica para distancias cortas y altos volúmenes de tráfico, por ejemplo, para una ruta de 20 m, el satélite no es rentable frente a la solución del cable de fibras

hasta una longitud de la misma igual a unos 2500 km.

La calidad de la señal por cable es mucho más alta que por Satélite porque los geoestacionarios, situados en órbitas de unos 36.000 km de altura y el retardo próximo a 500 ms introduce eco en la transmisión mientras que en los cables este se sitúa por debajo de los 100 ms admitidos por el UIT-T, la inclusión de supresores de eco encarece la instalación, disminuye la fiabilidad y resta la calidad al cortar los comienzos de frase. El satélite se adapta a la tecnología digital si bien las ventajas en este campo no son tan evidentes en el analógico, al requerirse un mayor ancho de banda en aquel y ser éste un factor crítico en el diseño del satélite.

9. Conclusiones

Después de efectuada la presente investigación se obtienen las siguientes conclusiones:

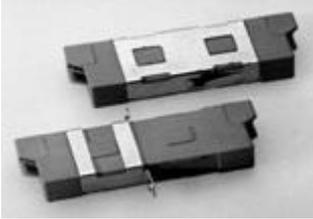
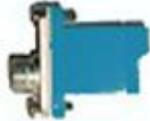
1. La historia de la comunicación a través de la Fibra Óptica revolucionó el mundo de la información, con aplicaciones, en todos los órdenes de la vida moderna, lo que constituyó un adelanto tecnológico altamente efectivo.
2. El funcionamiento de la Fibra Óptica es un complejo proceso con diversas operaciones interconectadas que logran que la Fibra Óptica funcione como medio de transportación de la señal luminosa, generado todo ello por el transmisor LED's y Láser.
3. Los dispositivos implícitos en este complejo proceso son: Transmisor, Receptor y guía de fibra, los cuales realizan una importante función técnica, integrados como un todo a la eficaz realización del proceso.
4. La Fibra Óptica ofrece la transmisión de datos a alta velocidad, en tiempo real o no, entre un número de ruteadores y estaciones separadas en distancias considerables, la Fibra Óptica sirve también como red de conexión entre las estaciones que estén funcionando previamente.
5. La Fibra Óptica tiene como ventajas indiscutibles, la alta velocidad al navegar por Internet así como sus inmunidades al ruido e interferencia, reducidas dimensiones y peso, y sobre todo su compatibilidad con la tecnología digital, sin embargo, tiene como desventajas: El ser accesible solamente para las ciudades cuyas zonas posean tal instalación, así como su elevado costo, la fragilidad de sus fibras y la dificultad para reparar cables de fibras rotos en el campo.
6. Actualmente se han modernizado mucho las características de la Fibra Óptica, en cuanto a coberturas más resistentes, mayor protección contra la humedad y un empaquetado de alta densidad, lo que constituye un adelanto significativo en el uso de la Fibra Óptica, al servicio del progreso tecnológico en el mundo.

10. Anexos

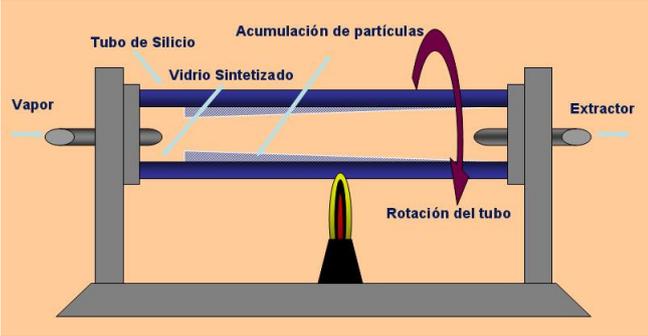
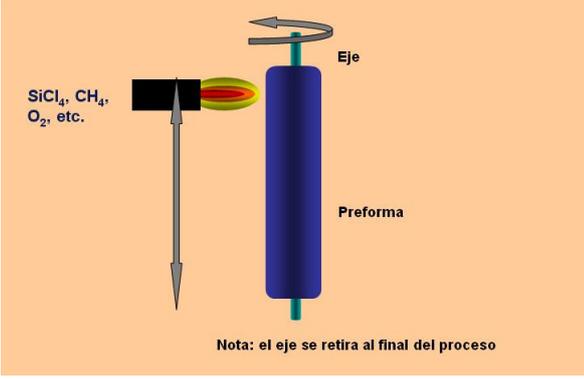
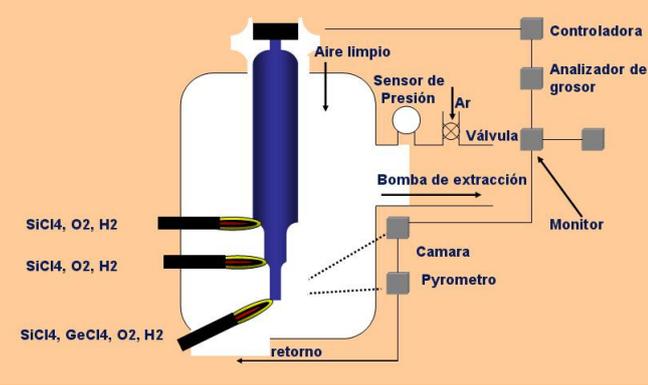
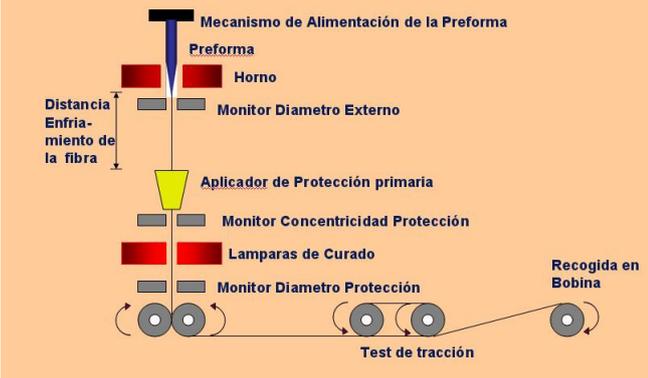
10.1. Imágenes

Norma	Imagen
DIO	
Euro 2000	
FC	
LC	
SC	
ST	

Cuadro 3: Tipo de conectores

Norma	Imagen
DIN	
Euro 2000	
FC	
SMA	
SC	
ST	
DIN a E2000 PC	
E2000 a FC/PC	
E2000 a SC/PC	
E2000 a ST/PC	

Cuadro 4: Adaptadores o Acopladores

Método	Imagen
<p>MCVD (Deposición de Vapor Químico Modificado)</p>	
<p>OVD (Deposición de Vapor Exterior)</p>	
<p>VAD (Deposición de Vapor Axial)</p>	
<p>Estiramiento de la Fibra.</p>	

Cuadro 5: Métodos de Fabricación

10.2. Curiosidades

En estos últimos años la Fibra Óptica esta evolucionando bastante y ha dado origen a fibras con nuevas características:

- Coberturas más resistentes: La cubierta especial es extraída a alta presión directamente sobre el mismo núcleo del cable, resultando en que la superficie interna de la cubierta del cable tenga aristas helicoidales que se aseguran con los sub cables, la cubierta contiene 25 % más material que las cubiertas convencionales.



Figura 20: cubierta helicoidales

- Uso Dual (interior y exterior): La resistencia al agua, hongos y emisiones ultra violeta; la cubierta resistente; buffer de 900 μm ; Fibras Ópticas probadas bajo 100 kpsi y funcionamiento ambiental extendida contribuyen a una mayor confiabilidad durante el tiempo de vida.

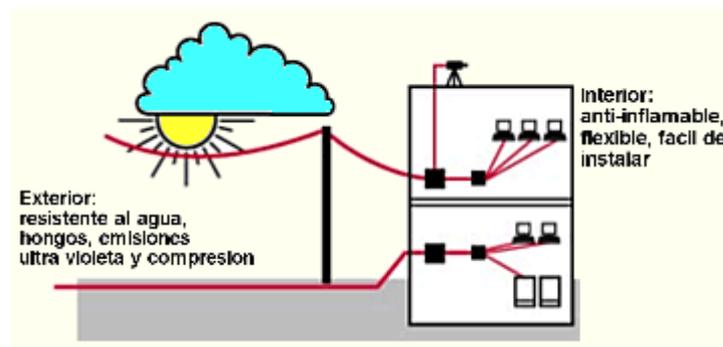


Figura 21: Uso dual

- Mayor protección en lugares húmedos: En cables de tubo holgado rellenos de gel, el gel dentro de la cubierta se asienta dejando canales que permitan que el agua migre hacia los puntos de terminación, el agua puede acumularse en pequeñas piscinas en los vacíos y cuando la delicada Fibra Óptica es expuesta, la vida útil es recortada por los efectos dañinos del agua en contacto combaten la intrusión de humedad con múltiples capas de protección alrededor de la Fibra Óptica y el resultado es una mayor vida útil, mayor confiabilidad especialmente ambientes húmedos.

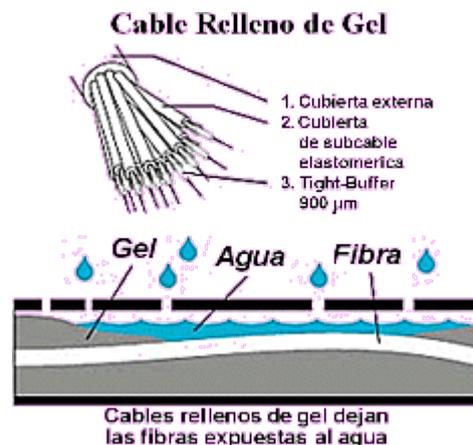


Figura 22: Tubos rellenos de gel

- Protección anti-inflamable: Los nuevos avances en protección anti-inflamable hace que disminuya el riesgo que suponen las instalaciones antiguas de Fibra Óptica que contenían cubiertas de material inflamable y relleno de gel que también es inflamable, estos materiales no pueden cumplir con los requerimientos de las normas de instalación, presentan un riesgo

adicional y pueden además crear un reto costoso y difícil en la restauración después de un incendio con los nuevos avances en este campo y en el diseño de estos cables se eliminan estos riesgos y se cumple con las normas de instalación.

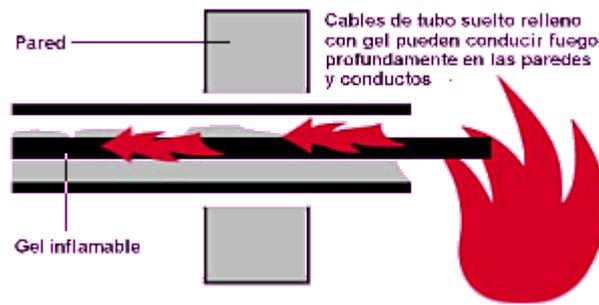


Figura 23: protección anti-inflamable

- Empaquetado de alta densidad: Con el máximo número de fibras en el menor diámetro posible se consigue una más rápida y más fácil instalación, donde el cable debe enfrentar dobleces agudos y espacios estrechos, se ha llegado a conseguir un cable con 72 fibras de construcción súper densa cuyo diámetro es un 50 % menor al de los cables convencionales.

Referencias

- [1] Virgilio Zuaznabar Mazorra; Evolución de la Fibra Óptica en el Futuro; 2009.
- [2] Huurdeman, Anton A "Guide to Telecommunications Transmission Systems" Ediciones Artech House, 1997.
- [3] Gautheron, O. "Redes Submarinas Ópticas en el umbral de los Tbits/s por capacidad de fibra". En: Revista de Telecomunicaciones Alcatel, No.3 (3er trimestre, 2003): 43-59, 171-179.
- [4] Kartalopoulos, Stamatios V. Introduction to DWDM Technology. USA: IEEE Wiley Interscience, 2000.
- [5] Martín Pereda, José Antonio. Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones. Madrid: Pearson/Prentice Hall, 2004.
- [6] Izquierdo Bedmar, Juan. Telecomunicaciones a través de Fibras Ópticas. Madrid, España: Ediciones AHCIET, 1996, pp.8-11.
- [7] Papannareddy, R. Introduction to Lightware Communication Systems. Boston-London: Artech House Publishers, 1997.
- [9] Recomendación UIT-T G.650.2 (Junio, 2000). "Definiciones y métodos de prueba de los atributos conexos de las características estadísticas y no lineales de fibras y cables Monomodos".
- [10] Recomendación UIT-T G.651 (2000). "Características de un cable de Fibra Óptica Multimodo de Índice Gradual de 50 nm/125 mm".
- [11] Recomendación UIT-T G.652 (2000). "Características de un cable de Fibra Óptica Monomodo longitudes de onda de 1310 nm a 1550 nm".
- [12] Recomendación UIT-T G.653 (2000). "Características de los cables de Fibra Óptica Monomodo con Dispersión Desplazada"
- [13] 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".

- [14] Recomendación UIT-T G.655. "Características de un cable de Fibra Óptica Monomodo con Dispersión Desplazada diferente de cero".