

46



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**

296429

COMUNICACIONES,

PLANIFICACIÓN DE UN SISTEMA DE
COMUNICACIÓN POR FIBRA ÓPTICA

TRABAJO DE SEMINARIO

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

DIEGO HERNÁNDEZ CÁRDENAS

ASESOR: ING. JORGE RAMÍREZ RODRÍGUEZ

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO DE MEX , 2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

SECRETARIA DE EDUCACION
ESTADOS UNIDOS MEXICANOS



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MEXICO

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 51 del Reglamento de Exámenes Profesionales de la FES-Cuautitlán, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de Seminario:

Comunicaciones,

"Planificación de un sistema de comunicación por fibra óptica"

que presenta el pasante: Diego Hernández Cárdenas

con número de cuenta: 9561266-7 para obtener el título de:

Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXÁMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VISTO BUENO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 12 de julio de 2001

MODULO	PROFESOR	FIRMA
<u>I</u>	<u>Ing. Jorge Ramírez Rodríguez</u>	<u>[Firma]</u>
<u>II</u>	<u>Ing. Vicente Magaña González</u>	<u>[Firma]</u>
<u>III</u>	<u>Ing. Rodolfo López González</u>	<u>[Firma]</u>

Este trabajo se lo dedico a:

Mis padres por su cariño y
Apoyo incondicional que me han
brindado durante toda mi vida

A mis Maestros de la facultad ya
que gracias a ellos he podido salir
adelante en mis metas impuestas

INDICE

PROLOGO.....	3
1.- INTRODUCCIÓN.....	4
1.1 Tecnología	4
1.2 Elementos básicos constitutivos de un sistema de fibra óptica	6
1.3 Ventajas e inconvenientes de las fibras ópticas	8
1.4 Transmisión de luz en una fibra	12
2.- FIBRAS OPTICAS	16
2.1 Tipos de Fibras ópticas	16
2.2 Fibra multimodo	18
2.2.1. Fibra de índice escalón.....	18
2.2.2. Fibra de índice gradual.	20
2.3 Fibra Monomodo.	21
2.4 Perdidas de potencia óptica.	22
2.4.1. Ancho de Banda de la Fibra.	26
3.- FUENTES LUMINOSAS	30
3.1 Diodo emisor de luz	30
3.2 Diodo Láser	32
3.3 Características del Transmisor.	33
3.4 Diodo PIN.	34
3.5 Fotodiodo de avalancha.	35
3.6 Receptores.	36
4.- EMPALMES Y CONECTORES.	38
4.1 Proceso de empalme por fusión.	39
4.1.1. Labores previas al empalme de fusión.	39
4.1.2. Proceso de fusión.	42
4.1.3. Protección de los empalmes de fusión.	43
4.2 Parámetros característicos de las Fibras Ópticas.	44
4.2.1. Corriente de limpieza.	44
4.2.2. Corriente de prefusión.	44
4.2.3. Corriente de Fusión.	45
4.2.4. Parámetros fibras ópticas Monomodo.	46
4.2.5. Parámetros fibras ópticas Multimodo.	47
4.2.6. Parámetros fibra óptica Multimodo.	47
4.3 Conectorización de la fibra óptica.	48
4.3.1. Conectores ópticos de férula única.	48
4.3.2. Conector SMA (Amphenol).	49
4.3.3. Conector ST.	50

4.3.4. Conector Bicónico.....	51
4.3.5. Conector FC.....	52
4.3.6. Conector SC.....	53
4.3.7. Conector F.D.D.I.....	54
4.3.8. Conector HMS 10/H.P.....	57
4.4 Técnica de Pegado-Pulido.....	57
5.- PLANIFICACION DE UN ENLACE DE FIBRAS OPTICAS.....	59
5.1 Metodología de la Panificación.....	59
5.2 Medio Físico del enlace.....	60
5.2.1. Viabilidad y Configuración del Tendido.....	60
5.2.2. Trazado del Tendido.....	60
5.2.3. Condicionamiento para los repetidores.....	65
5.3 Planificación de los parámetros de Transmisión en un tendido de fibra óptica.....	65
5.3.1. Cálculo del ancho de Banda de Tendido.....	70
5.3.2. Ley de la concatenación del Ancho de Banda.....	74
5.4 Cálculo del ancho de Banda requerido por los sistemas digitales.....	74
5.4.1. Cálculo del ancho de banda requerido por los sistemas digitales.....	75
5.5 Caracterización del Transmisor.....	75
5.6 Caracterización del Receptor.....	76
5.7 Analisis global de la viabilidad del enlace.....	76
5.7.1. Balance global de Potencias.....	76
5.7.2. Ancho de Banda Global del Enlace.....	77
5.8 Códigos de línea.....	77
5.8.1. Código NRZ Unipolar.....	77
5.8.2. Código NRZ Polar.....	78
5.8.3. Código RZ Unipolar.....	79
5.8.4. Código RZ Polar.....	80
5.8.5. Código Manchester Unipolar.....	81
5.8.6. Código H.D.B. (H.D.B.3).....	81
6.- INTERFACE DE DATOS DE FIBRA DISTRIBUIDA (FDDI).....	84
6.1 Funciones de FDDI.....	84
6.1.1. Nivel Físico: PMD.....	84
6.1.2. Nivel Físico: PHY.....	84
6.1.3. Nivel de enlace: MAC.....	85
6.2 Soluciones alternativas.....	86
6.2.1. C.D.D.I.....	86
6.2.2. F.D.D.I -II.....	86
6.2.3. LCM-PMD.....	87
CONCLUSIONES.....	88
BIBLIOGRAFIA.....	90

PROLOGO

La elaboración de este trabajo de investigación esta encaminado a ser una guía practica para aquellas personas que estén interesados en conocer los conceptos básicos de las fibras ópticas, así como dar las herramientas necesarias para poder llevar a cabo un enlace de comunicación por fibra óptica.

En la actualidad las comunicaciones se han convertido en una necesidad, y cada vez más personas se dan cuenta que la tecnología no es un lujo, ya que presenta muchas ventajas sobre los métodos tradicionales de comunicación como son: mayor rapidez, flexibilidad, seguridad, los costos son relativamente mayores, pero estos costos se ven compensados por las grandes prestaciones que ofrecen estos sistemas.

Las fibras ópticas son el medio que presenta mayor ancho de banda por lo cual se puede mandar información a grandes velocidades superando incluso a las microondas, debido a los materiales usados para la fabricación de las fibras, las perdidas que presentan son muy bajas y se llegan alcanzar distancias de comunicación muy elevadas tales como las comunicaciones intercontinentales.

Comenzamos con una reseña histórica de la evolución de la fibras ópticas, se da a conocer los tipos de fibras que existen, características y utilización de cada una de ellas, la importancia de los transmisores y receptores, así como la tecnología para los empalmes y conectores llegando a la planificación de un sistema de comunicación. En el último capítulo hablamos de FDDI que es una red que permite la transmisión de datos a grandes velocidades, en este tema no se pretende dar todas las características técnicas, si no solamente se hace mención de sus ventajas y sus prestaciones.

Se abarcan todos estos temas (a excepción del último) porque no sería posible hablar de una planificación de un enlace sin conocer cada uno de estos conceptos, ya que todos son elementos de vital importancia, y de este modo tenemos la facilidad de adaptar el enlace a nuestras necesidades. Distancia, costo, rapidez, es lo que se debe considerar para la planificación de nuestro enlace.

Esperando que sea de utilidad la presente obra y que cumpla los objetivos que se tienen, quiero agradecer a todas las personas que ayudaron a la realización de este trabajo, a mis padres por su confianza y cariño, a mis profesores que intervinieron en mi formación académica, a mi asesor de tesina y a todas las personas que me apoyaron con consejos y me supieron guiar.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

Frente al limitado espectro de frecuencias de las microondas y a la susceptibilidad al debilitamiento que representa el medio, la fibra óptica, o la tecnología óptica, se convierte rápidamente en el método preferido para la transmisión digital. Las fibras ópticas superan las desventajas de las microondas. No resulta caro fabricarlas, presentan un gran ancho de banda, no son susceptibles ni a las interferencias ni al debilitamiento y las comunicaciones pueden conducirse sobre un sistema de fibra óptica con la casi completa garantía de seguridad.

El cable de fibra óptica supone también un apropiado sustituto a los cables de pares debido a su mayor capacidad y su más pequeño diámetro. El diámetro es una característica importante cuando las vías de comunicación resultan congestionadas y deben ser aumentadas para contener mas cables portadores. Sustituyendo un único cable de cobre por fibra óptica se puede, generalmente obtener la suficiente capacidad para prevenir los incrementos de vías de comunicación en el futuro. Quizás la principal desventaja sea mantener la fibra libre de daños. Al igual que los cables de cobre, las fibras ópticas pueden deteriorarse por las excavaciones, corrimientos de tierras, etc.

Conceptualmente, y en determinados aspectos, un sistema por fibra óptica es similar a un sistema de microondas. Las principales excepciones son: el medio de transmisión para las ondas luminosas, es una pequeña guía-onda de vidrio, en lugar del espacio libre, y que la transmisión tiene lugar a frecuencias ópticas, que tienen una longitud de onda más corta que las microondas. Mientras que a las microondas se las designa generalmente por su banda de frecuencias, a las ondas luminosas se las referencia por su longitud de onda, que está relacionada con la frecuencia mediante la expresión:

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

Donde λ es la longitud de onda, c indica la velocidad de la luz y f representa la frecuencia.

A las frecuencias de la luz, la longitud de onda es tan corta que la unidad utilizada es el nanómetro (nm). En el estado actual de la tecnología, el espectro de comunicaciones ópticas útil se extiende, aproximadamente, desde los 800 nm hasta los 1600 nm.

1.1 TECNOLOGÍA

La comunicación óptica es una idea que ha estado rondando durante mas de un siglo, pero sólo se hizo factible en los últimos años. Alexander Graham Bell, en la primera aplicación óptica

conocida, obtuvo una patente para su *fotofono* en el año 1880. El fotófono era un equipo que modulaba un rayo de luz enfocado procedente del sol, y radiado al espacio libre hacia un receptor próximo. El sistema funcionó bien, pero la radiación de la luz en el espacio libre presenta varias dificultades que podrían no haber sido vencidas con los equipos disponibles en aquel tiempo. Como muchas otras ideas, ésta se situó por encima de su tiempo. La comunicación luminosa en el espacio libre es ahora factible si la aplicación puede tolerar perturbaciones ocasionales causadas por la niebla, el polvo, turbulencias y cualquier otro elemento perturbador.

Dos desarrollos en el campo de las comunicaciones ópticas pasaron desde la teoría a la práctica. El primero de ellos tuvo lugar en 1960 con la invención del *rayo láser*. Un láser produce un inmenso haz de luz casi coherente, es decir, sus rayos viajan por caminos paralelos. El segundo acontecimiento que impulsó las comunicaciones ópticas fue el desarrollo de fibra de vidrio, de tal pureza que solamente es atenuada una pequeña porción de la señal luminosa emitida. Con una fuente láser disparada a alta velocidad, los ceros y los unos de una comunicación digital pueden transmitirse hacia un detector, que generalmente se trata de un *fotoiodo de avalancha (APD)* o de un *diodo PIN*.

El detector convierte los impulsos de luz recibidos en pulsos eléctricos, y los acopla al equipo receptor. Dependiendo de las pérdidas en la fibra y de la ganancia del sistema, se determinará el espaciado apropiado entre repetidores o regeneradores de señal. La ganancia de un sistema por fibra óptica es un concepto similar al de la ganancia en un sistema de microondas.

Como en cualquier sistema de comunicaciones, en las de comunicaciones ópticas existen canales de reserva que asumen la carga de tráfico cuando el canal en servicio falla. Tanto el cable, como el equipo terminal y los repetidores se encuentran simultáneamente relacionados con el canal de reserva, para mantener en todo momento y en cualquier circunstancia la supervivencia de las comunicaciones.

Las ventajas de las comunicaciones ópticas tomaron incremento gracias a la protección que ofrece la fibra como medio de transmisión. Estas pequeñas guías de ondas aíslan la señal digital de características típicas del espacio libre: el debilitamiento de la señal y las interferencias. La fibra óptica atenúa la señal luminosa, aunque, y a diferencia de las microondas, las pérdidas en el medio de transmisión no son lineales a lo largo del espectro. Así una fibra óptica típica presenta tres ventanas de transmisión situadas en 800-900 nm, 1,200-1,300 nm y 1,500-1,600 nm.

Los primeros sistemas por fibra óptica se implantaron a 850 nm, ya que los láseres apropiados y disponibles comercialmente trabajaban en esa longitud de onda. A medida que se fue disponiendo de láseres de 1300 nm, las aplicaciones se desplazaron hacia esa longitud de onda, debido a las pérdidas más bajas que presentaban pérdidas ligeramente inferiores en la tercera ventana, alrededor de los 1,550 nm. El primer sistema comercial de fibra óptica instalado en 1977, operó a 45 Mbps (45,000,000 bits por segundo) con repetidores separados a intervalos de 6.4Km. Los actuales sistemas trabajan con velocidades superiores a los 560 Mbps y actualmente compañías como Lucent Technologies están desarrollando sistemas que operan a velocidades superiores a los 2Gbps (2,000 Mbps). A estas velocidades, un par de fibra, una para transmisión y otra para

recepción, pueden alojar alrededor 30,000 canales de voz. A 560 Mbps los repetidores pueden ser separados hasta 50Km y transportar mas de 8,000 canales de voz.

1.2 ELEMENTOS BÁSICOS CONSTITUTIVOS DE UN SISTEMA DE FIBRA ÓPTICA

Los sistemas de fibra óptica están diseñados con fibras separadas para la transmisión (TX) y la recepción (RX), cuyos extremos se encuentran terminados en un transmisor y un receptor de luz. El transmisor puede emplear o un diodo emisor de luz (LED=Ligth Emisor Diode) o un láser como elemento de salida. A estos elementos se les denomina convertidores electro-ópticos (E/O), encargados de convertir la señal eléctrica en óptica. Los láseres presentan una mayor ganancia del sistema que los diodos LED debido a su mayor potencia de salida y a un mejor acoplamiento de la señal luminosa dentro de la fibra. La principal ventaja del diodo LED es su bajo costo.

La primera peculiaridad de los sistemas de comunicaciones ópticas es que las señales que se transmiten por la fibra óptica son señales luminosas, mientras que la información se tiene en general en forma de señal eléctrica (tensión o corriente). Es por eso que es necesario en estos sistemas disponer de elementos que conviertan dicha señal en luz y que conviertan después la luz en señal eléctrica.

El primero de los elementos (convierte señal eléctrica en luz) se denomina emisor óptico y en comunicaciones ópticas existen dos tipos fundamentales, los diodos LED y los láseres. El segundo se denomina receptor óptico y también se utilizan dos tipos fundamentales, los fotodiodos PIN y los de avalancha (ADP). El proceso de conversiones se muestra en la siguiente figura 1.1



Fig.1.1 conversión de señal eléctrica - óptica, óptica - eléctrica

El sistema de comunicaciones ópticas (del que la fibra es sólo el medio de transmisión) es más complejo y los emisores/receptores ópticos son parte del transmisor/receptor. El esquema general de un transmisor se muestra en la figura 1.2

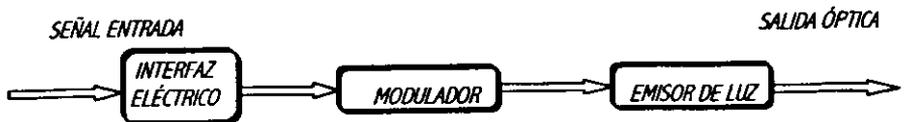


Fig. 1.2 esquema general de un transmisor

La primera parte es un interfaz eléctrico, vídeo, audio, datos u otras formas de entrada eléctrica. Dicha información se codifica después mediante un modulador, en el caso de señales analógicas AM o FM, o en el caso de señales digitales modulación digital. La salida modulada se convierte después en luz mediante un LED o un diodo láser. Las longitudes de onda van desde los 660 nm (visible) hasta 1,550 nm (infrarrojo). Las fibras de vidrio trabajan en longitudes de onda más altas, en particular 1,300 nm y 1,550 nm, ya que las pérdidas son menores. Las fibras de plástico presentan el caso contrario y se trabaja en el visible.

El receptor en cambio tiene un esquema como el de la figura 1.3, en el que los bloques realizan los procesos inversos al del transmisor.



Fig. 1.3 Diagrama a bloques de un transmisor

El cable de fibra óptica se acopla al transmisor a través de un conector de precisión. La mayor parte de los sistemas por fibra óptica utilizan modulación digital, la modulación analógica se logra variando la intensidad de la señal luminosa, o modulando el ancho del impulso. La modulación analógica es apropiada para la transmisión de una señal de vídeo y se utiliza en los sistemas de televisión por cable.

El receptor consiste en un diodo PIN o un APD, que se acopla a la fibra óptica. El diodo convierte los impulsos de luz en impulsos eléctricos, denominándoseles convertidor opto-eléctrico (O/E)

Como la señal óptica se propaga a través de la fibra óptica, se ve degradada por la atenuación y la restricción de anchura de banda de la fibra. Por esta razón, es necesario regenerar la señal transmitida. La forma más apropiada de realizar esta tarea es tratando la señal en forma eléctrica. De aquí que los convertidores O/E y E/O sean componentes indispensables en un repetidor óptico. El amplificador e igualador de la señal eléctrica son similares en los sistemas de transmisión convencionales.

Los sistemas por fibra óptica aceptan a su entrada señales digitales normalizadas, pero cada fabricante desarrolla su propia velocidad de la señal de salida. Los bits de protección contra errores y de los códigos de línea se insertan para mantener la sincronización y supervisar la probabilidad de

errores BER (*Bit Error Rate*), de tal forma que se determine el momento adecuado para utilizar el canal de reserva. Debido a las diferencias en las señales en línea, los sistemas correspondientes a distintos fabricantes no suelen ser compatibles entre sí.

1.3 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LAS FIBRAS ÓPTICAS

La fibra óptica es el medio de transmisión del futuro. Esto se debe a que las fibras ópticas presentan muchas ventajas respecto de los medios de transmisión convencionales. En esta sección vamos a analizar las principales ventajas e inconvenientes de las fibras. Entre las ventajas tenemos:

Gran ancho de banda

Al usar láseres y LED-s (fuentes de luz) abre una ventana del espectro electromagnético diez mil veces superiores en frecuencia a las mayores frecuencias utilizadas en radio. Mientras que en radio dichas frecuencias rondan los GHz (10^9 Hz), en el caso de las comunicaciones ópticas se sitúan en los 10^{14} Hz. Al ser las portadoras de mayor frecuencia la capacidad de transmitir información (el ancho de banda) aumenta. Como idea de la capacidad de transmisión de las fibras una señal a 10 Gbps es capaz de transmitir:

- 130,000 canales telefónicos
- 16 canales de HDTV sin compresión o 100 canales de HDTV con técnicas de compresión.

Hay que tener en cuenta que el ancho de banda necesario para la televisión de alta definición es mucho mayor que el necesario para la televisión convencional.

Bajas pérdidas

El ancho de banda da una idea de la cantidad de información que puede transmitirse por una fibra óptica, las pérdidas indican cómo de lejos puede enviarse la señal. En el cable de cobre a medida que crece la frecuencia crecen las pérdidas del cable así que como para transmitir grandes cantidades de información hacen falta frecuencias altas los cables de cobre no valen. En las fibras las pérdidas son "parecidas" y muy bajas en un rango de frecuencias muy altas y muy parecidas.

Las pérdidas intrínsecas (debidas a la propia constitución física de la fibra) de las fibras son muy bajas. Así se obtienen pérdidas en las fibras actuales del orden de $0,35 \text{ dB/km}$ a $1,300 \text{ nm}$ y $0,2 \text{ dB/km}$ a $1,550 \text{ nm}$. Así se pueden obtener grandes distancias entre repetidores, mucho mayores que en el caso de los cables metálicos.

Así el primer enlace telefónico trasatlántico lo instaló AT&T en 1988 y transportaba 37,800 canales de voz en cada dirección mediante un par de fibras. Los repetidores se situaban cada 35 km. En cambio el mejor sistema trasatlántico coaxial es capaz de transportar 4,200 canales con repetidores cada 9.4 km. Con el estado actual de la tecnología las fibras serán capaces de transportar hasta 200 Mbps sobre entre 80 a 100 km sin repetidores. Es así que la combinación de

gran ancho de banda y bajas pérdidas lo que permite introducir más canales en el medio de transmisión y con distancias entre repetidores mayores, es decir sistemas más baratos.

Tamaño y flexibilidad

Un cable de diez fibras ópticas puede tener un diámetro exterior de 8 a 10 mm y ofrecer una misma capacidad de información (aunque con menos repetidores) que un cable coaxial de 10 tubos y 8 cm de diámetro, o que 5 o 10 cables de 2000 pares de 0.8 mm.



Fig.1.4 Comparación de un cable coaxial con un cable óptico

Por ejemplo la figura compara un cables coaxial con un cable de fibra óptica ambos usados en telefonía digital. El cable coaxial puede transportar 40,300 comunicaciones en ambos sentidos y para cortas distancias. El cable de fibra tiene 144 fibras y un diámetro de 1.25 cm, y puede transportar 24,192 conversaciones en cada fibra, es decir 1.75 millones de llamadas en todas las fibras. A pesar de ser 10 veces menor en tamaño puede transportar mucha más información que el cable coaxial.

La diferencia de tamaño repercute en el peso y flexibilidad del cable. así es más fácil transportar y por lo tanto realizar la instalación en fibras ópticas.

Menor peso

La fibra óptica pesa mucho menos que los cables de cobre. Además de que la fibra es menor y más ligera para tener la misma capacidad de transmisión de datos hacen falta más líneas de cable de cobre que de fibra óptica. Así los cables de cobre pueden reemplazarse en general por cables de fibra que pesan del orden de 10 veces menos. En aplicaciones de larga distancia el conjunto del cable de fibra más la electrónica la ventaja del peso es considerable, cuando las distancias son muy cortas la mayor carga de electrónica de las fibras ópticas puede no ser tan ventajosa.

Factores ambientales y materia prima

La evolución de la atenuación de las fibras con la temperatura depende en gran parte de la estructuración del cableado. Sin embargo, hay diseños que permiten garantizar la total estabilidad de las pérdidas en el margen de -60°C a 80°C .

Hay que resaltar además que las materias primas utilizadas en las fibras son muy abundantes en la naturaleza, ya que la sílice y los silicatos constituyen uno de los grupos de materiales más abundantes y repartidos sobre la corteza terrestre.

Menor coste

Los factores que se han ido mencionando pueden resumirse en que los sistemas de fibra óptica son más baratos, ya que son en general los factores económicos los que determinan la utilización o no de una tecnología. Sin embargo la ventaja del coste debe matizarse. Para aplicaciones de corta distancia los sistemas de fibra óptica son más caros que los cables de cobre ya que la electrónica asociada es más cara y compleja. Así a pesar de que la fibra sea más barata que el cobre el sistema no lo es.

Los medios se comparan mediante la distancia de coste de equilibrio, es decir aquella distancia en la que los costes de los sistemas de fibra óptica y de cable de cobre son iguales. A mediados de los 80 dicha distancia rondaba los 10 km, hoy en día se acerca a los 100 m, es decir al nivel del cableado horizontal en las LAN.

Inmunidad electromagnética

La fibra está compuesta de medios dieléctricos y por lo tanto no metálicos. El cable de cobre o el cable coaxial en cambio son metálicos y como todo cable metálico puede bien recoger o radiar energía electromagnética, es decir actuar como antena. En cambio los equipos electrónicos que acompañan a los sistemas de fibra óptica (en el emisor, receptor y en los repetidores) no son inmunes a la radiación electromagnética por lo que es necesario protegerlos.

La interferencia electromagnética (EMI) es una forma de contaminación ambiental, de hecho la cantidad de energía que puede radiar la pantalla de un ordenador está limitada por ley. Como prueba se puede situar una radio AM al lado de una pantalla del ordenador y jugando con el dial la radio puede captar la radiación de la misma.

Las fibras ópticas se están utilizando en sistemas de seguridad ya que debido a su inmunidad electromagnética no les afectan los rayos. Como los sistemas de seguridad suelen estar dispersos a lo largo de grandes áreas pueden verse afectados por rayos e interferencias. Otra ventaja es que

para tirar la fibra óptica pueden utilizarse los conductos existentes para las líneas de alta tensión ya que al ser inmunes electromagnéticamente no les afecta la radiación de éstas.

Aislamiento eléctrico

Como las fibras no radian energía electromagnética la señal transmitida a través de ellas no puede ser captada por el exterior.

Además de las ventajas señaladas las fibras presentan también una serie de inconvenientes que pueden limitar su uso en algunos casos como distancias cortas y bajos flujos de información.

Tiempos de vida de los fotoemisores

Principalmente los emisores de luz que trabajan en ciertas ventanas del infrarrojo, regiones donde la fibra presenta menor atenuación, tienen un tiempo de vida todavía no muy alto (cerca de las 10,000 horas).

Precios

Los dispositivos de calidad que hemos mencionado en el apartado anterior tienen precios elevados. Así sustituir el cableado de una red local, en general cable de pares, por un cableado a base de fibra óptica resulta muy caro debido a que los circuitos de conversión luz/corriente y corriente/luz son excesivamente caros para la viabilidad del cambio.

Existen a su vez inconvenientes relacionados con el desconocimiento de la tecnología y la normativa asociada a la misma. Como se ve la mayoría de los inconvenientes son consecuencia de que la tecnología está en un estado de desarrollo, y su solución avanza día a día.

Seguridad

Es prácticamente imposible interceptar la señal que viaja por una fibra sin ser detectada.

¿Cuál es el costo de un sistema de comunicación por fibra óptica comparado con el de un sistema convencional? Aunque un estudio económico debería basarse en las necesidades del usuario, es posible dar una idea general de los costos actuales, hoy en día gracias a la disminución de precios, tanto de la fibra óptica como de los componentes optoelectrónicos el costo de montar un sistema basado en fibra se ha tornado tan accesible como montar un sistema tradicional por pares cobre. En muchos casos la diferencia de costos con un sistema tradicional es muy pequeña, la factibilidad económica del proyecto de un sistema optoelectrónico depende, en última instancia, del alcance de su aplicación. Los sistemas optoelectrónicos se están convirtiendo día a día en una

realidad cada vez más atractiva, siendo hoy la solución tecnológica más conveniente en muchos casos.

Como conclusión se puede decir que la fibra óptica ha revolucionado el mundo de las telecomunicaciones. Hoy son la selección predominante en transmisiones de larga distancia.

1.4 TRANSMISIÓN DE LUZ EN UNA FIBRA

Cuando un rayo de luz se propaga sin obstáculos por un medio como el aire o el vidrio, viaja en línea recta. Sin embargo, cuando un rayo de luz viaja de un medio a otro, se dobla en la frontera que separa ambos medios. A esta torcedura se le denomina *refracción*. El ángulo con el cual se refracta se denomina *ángulo de refracción*. El ángulo con el cual el rayo de luz choca con la frontera del medio se denomina *ángulo de incidencia*.

El ángulo de incidencia está relacionado matemáticamente con el ángulo de refracción de acuerdo con la Ley de Snell.

Ley de Snell

$$n_1 \cdot \text{Sen } a = n_2 \cdot \text{Sen } b$$

donde n_1 = índice de refracción del primer material

n_2 = índice de refracción del segundo material

a = ángulo de incidencia en el primer material

b = ángulo de refracción en el segundo material

La refracción de un rayo de luz ocurre en un extremo de la fibra cuando el rayo pasa del aire al medio que conforma el núcleo de la fibra. Los ángulos de refracción y de incidencia se miden respecto al eje perpendicular a la superficie de separación aire fibra. Para una fibra cortada apropiadamente, este eje es el mismo que el eje de la fibra (ver Fig. 1.5). *El corte de una fibra óptica* es el proceso de seccionar una fibra óptica, de tal manera que produzca una superficie final plana y suave que sea perpendicular al eje de la fibra. Esto asegura que sea máxima la cantidad de luz que pueda propagarse por una fibra.

Solo los rayos de luz que inciden en la superficie aire-fibra con ángulos menores que el *máximo ángulo de acoplamiento* son refractados al núcleo de la fibra y capturados por ella. Los rayos de luz incidentes en la frontera aire-fibra con ángulos mayores que el máximo ángulo de acoplamiento no son capturados por la fibra (ver Fig. 1.6).

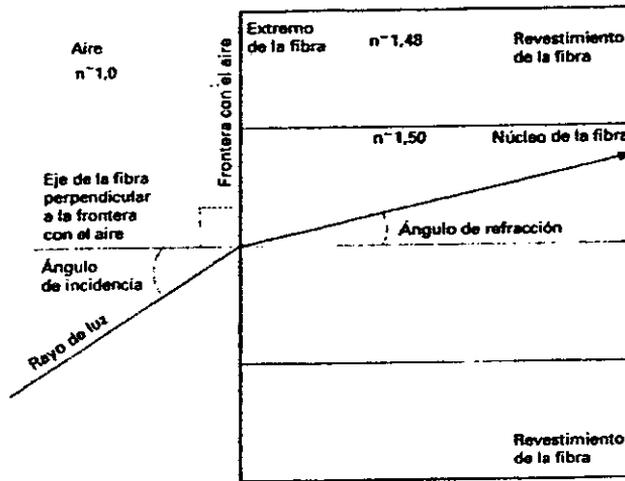


Fig. 1.5 Refracción en una fibra óptica

La *apertura numérica* de la fibra (AN) está relacionada matemáticamente con el máximo ángulo de acoplamiento.

Apertura numérica (AN)

$$AN = \text{sen} (\text{ángulo máximo de acoplamiento})$$

$$AN = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

AN = apertura numérica de la fibra

n_1 = índice de refracción del núcleo

n_2 = índice de refracción del revestimiento

Ángulos máximos de acoplamiento típicos para una fibra multimodo varían desde 10 a 30 grados. Valores típicos de AN varían desde 0.2 a 0.5. Normalmente se especifica el valor de AN para una fibra óptica

Cuando un rayo de luz pasa a través de la superficie de separación entre dos medios, desde

un medio con un índice de refracción alto a un medio con un índice de refracción más bajo, el rayo se refracta en la superficie al pasar al segundo medio. A medida que aumenta el ángulo de incidencia del rayo de luz, se alcanza un punto en el cual ya no se refracta más el rayo de luz en el segundo medio y es completamente reflejado de vuelta al primer medio. Esto se denomina *reflexión total interna*, y el ángulo para el cual esto ocurre se denomina *ángulo crítico* (ver Fig. 1.7). El ángulo crítico se puede determinar con la siguiente fórmula:

Angulo crítico

$$\text{Angulo crítico} = \arcsen(n_2 - n_1)$$

donde n_1 = índice de refracción del primer material

n_2 = índice de refracción del segundo material

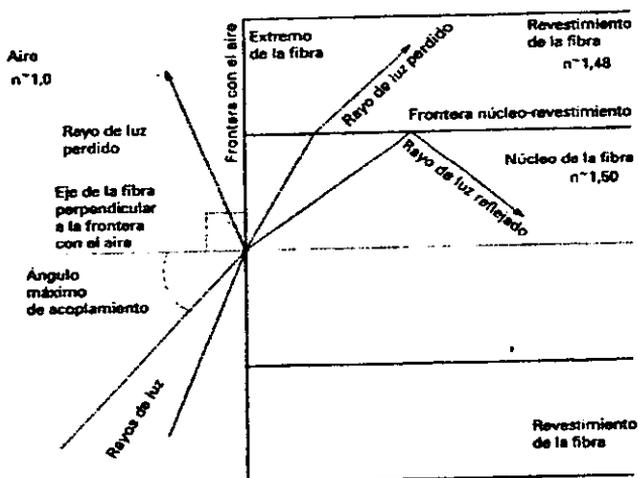


Fig. 1.6 Máximo ángulo de acoplamiento

La reflexión total interna solo ocurre cuando la luz atraviesa la frontera desde un medio con un índice de refracción alto a un medio con índice de refracción más bajo. Este fenómeno ocurre en la superficie de separación entre el revestimiento y núcleo de una fibra multimodo y es el responsable del confinamiento de la luz en el núcleo de la fibra.

Los rayos de luz que entran en el núcleo de una fibra multimodo con ángulos menores que el máximo ángulo de acoplamiento chocan con la frontera revestimiento-núcleo formando ángulos mayores que el ángulo crítico. Por tanto, son totalmente reflejados de vuelta al núcleo y viajan hasta la nueva frontera recubrimiento-núcleo para ser reflejados de nuevo.

El ángulo de reflexión de un rayo de luz es igual al ángulo de incidencia en la frontera. Siempre y cuando la fibra se mantenga recta, ocurrirá la reflexión total interna y todos los rayos de luz se propagarán por la fibra. Si la fibra se dobla, el ángulo de incidencia decrece en el doblez. Una fracción de los rayos de luz disminuirá su ángulo de incidencia pasando el ángulo crítico y serán refractados al revestimiento y perdidos.

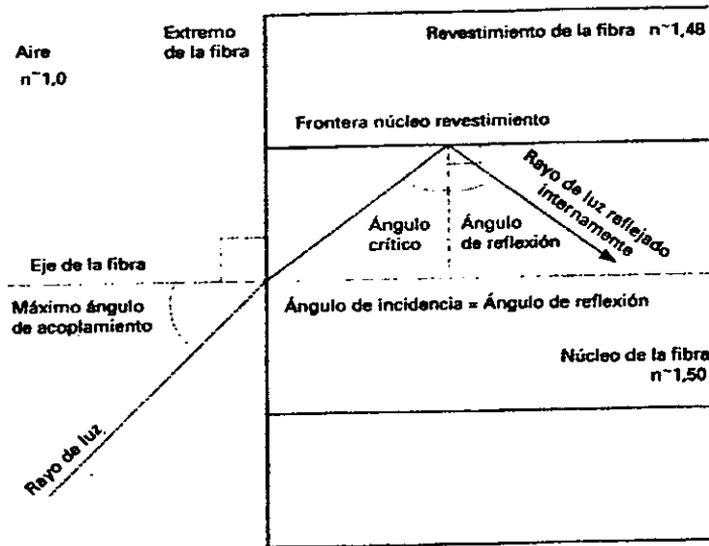


Fig. 1.7 Reflexión total interna

Los fabricantes de fibra especifican el radio de curvatura mínimo para que estemos seguros de que la fibra no pierde una fracción de potencia apreciable en el doblé. Este radio debería respetarse en todo momento para asegurar las mínimas pérdidas de luz y para prevenir el deterioro de la fibra.

CAPÍTULO 2

FIBRAS ÓPTICAS.

El uso de fibras para la comunicación óptica fue sugerido por Kao y Davies en 1968. En ese momento las pérdidas en las fibras estaban por encima de los 1000 dB/km. Kao sugirió que algunos materiales más puros podrían permitir pérdidas mucho más bajas. A finales de 1970, Kapron informó de una total atenuación observada de aproximadamente 20 dB/km en una fibra Monomodo. Hoy, las fibras operan a una longitud de onda de 1.5 μm con pérdidas menores de 1 dB/km.

Los sistemas de transmisión utilizados en las bandas de frecuencias de microondas, son en general sistemas cerrados por conductores, mono o multidieléctricos: cable coaxial, guía rectangular, entre otros.

A medida que se emplean frecuencias más elevadas, las dimensiones de estos sistemas cerrados se hacen cada vez más críticas y las pérdidas en los conductores más importantes, y es por ello necesario evitar al máximo su presencia en los sistemas de transmisión en las bandas infrarroja y la visible.

Un sistema de comunicación requiere un transmisor, un medio transmisor, y un receptor. Las fibras ópticas se convirtieron en un medio transmisor factible en 1970 con la reducción de pérdidas a 20 dB/km. En ese momento, la tecnología también existía para producir adecuados detectores realizados en semiconductores para usarse con las fibras ópticas pero no había fuentes adecuadas. La pronta invención del láser y la posibilidad de usarlo para la comunicación había estimulado la investigación de las fibras ópticas. En 1970 las fuentes de láser y los diodos emisores de luz (LEDs) tenían problemas de corta duración de vida y baja salida. Los primeros láseres de semiconductores eran ineficientes y requerían refrigeración. Hoy, con la alta calidad de las fuentes de semiconductores, la baja pérdida del medio de transmisión de la fibra y el bajo ruido de los detectores de semiconductores, los tres elementos (transmisor, medio y receptor) están disponibles para la construcción de sistemas de comunicación óptica económicos y seguros.

2.1 TIPOS DE FIBRAS ÓPTICAS

La capacidad de transporte de información (bits/seg) de una fibra óptica está determinada por su respuesta impulso. La respuesta impulso y de este modo el ancho de banda están en gran parte determinadas por las propiedades modales de la fibra. Las fibras ópticas, de uso común, pueden ser separadas en dos clases basándose en sus propiedades modales:

- fibras monomodo.
- fibras multimodo.

Las fibras monomodo son de salto de índice (Figura 2.c). Las fibras multimodo pueden ser divididas en salto de índice (Figura 2.a) y en índice graduado (Figura 2.b). El salto o graduado del índice se refiere a la variación del índice de refracción con la distancia radial del eje de la fibra.

caminos de propagación de los rayos. Una descripción modal de las fibras multimodo muestra las diferentes velocidades de propagación para diferentes modos.

Todas estas fibras consisten en un núcleo rodeado por una cubierta. En las fibras de salto de índice el mayor índice de refracción del núcleo comparado con el de la cubierta causa una reflexión total interna en la separación núcleo-cubierta. En las fibras de índice graduado, el gradual decrecimiento con la distancia en el índice de refracción con respecto al eje de la fibra hace que los rayos de luz se inclinen hacia atrás con dirección al eje en la dirección que se propagan. Las guías multimodo están caracterizadas por los múltiples

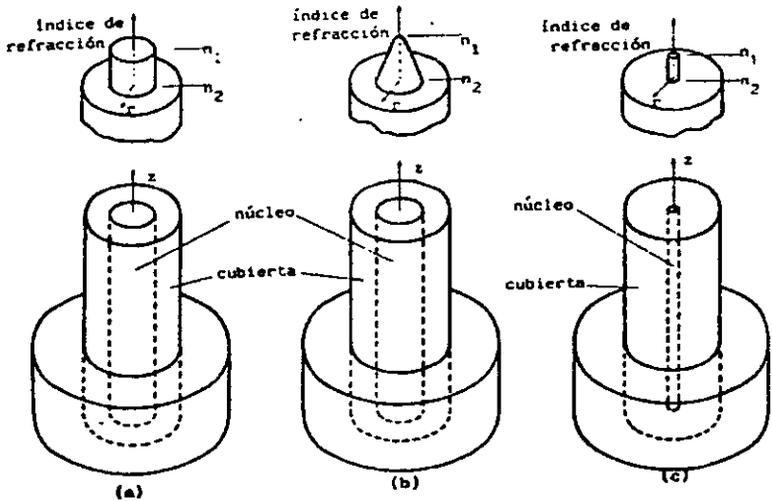


Fig. 2.a

Fig. 2.b

Fig. 2.c

Por lo tanto, la energía de entrada hacia el interior de la fibra proveniente de un pulso corto, unido a múltiples modos, llegarán al final receptor de la fibra distribuidos en un intervalo de tiempo. La extensión en el tiempo del pulso recibido es debido al diferente retardo de propagación de los diferentes modos. La extensión del pulso es referida como una dispersión modal. Reduce la capacidad de información de la fibra limitando el número de pulsos distintos que pueden ser transmitidos en un intervalo de tiempo dado. Las guías de índice gradual tienen menor dispersión modal que las de salto de índice.

Por supuesto, la dispersión modal no tiene lugar en las guías monomodo donde un sólo modo se propaga. El ensanchamiento del pulso en las fibras monomodo es debido a la dispersión del material asociado con el modo de guía de la onda. Las fibras monomodo pueden ser diseñadas de manera que estas dos fuentes de dispersión se cancelen para una particular longitud de onda. Vamos a desarrollar ahora una exposición más profunda con el contenido matemático necesario para comprender el funcionamiento de cada un de estos tres tipos fibras ópticas.

2.2 FIBRA MULTIMODO.

Una fibra multimodo es una fibra que puede propagar más de un *modo* de luz. El número máximo de modos de luz (camino para los rayos de luz) que pueden existir en el núcleo de una fibra se puede determinar matemáticamente por la siguiente expresión:

Número de modos en una fibra óptica

$$M = 1 + 2D (n_1^2 - n_2^2)^{0.5} / \lambda$$

Donde: D = diámetro del núcleo
 n_1 = índice de refracción del núcleo
 n_2 = índice de refracción del revestimiento
 λ = longitud de onda de la luz

Para una fibra multimodo el número de modos pueden ser fácilmente superior a mil. El número de modos que existen realmente depende de otras características de la fibra y se puede reducir durante la propagación.

Una fibra multimodo se usa comúnmente en aplicaciones de comunicación de corta distancia (generalmente menos de unos pocos kilómetros). La electrónica del equipo terminal es más barata y es, de ordinario, simple de diseñar. Como fuente de luz se usa normalmente un LED. Debido al gran tamaño del núcleo de una fibra multimodo, es más fácil de conectar y tiene una mayor tolerancia a componentes de menor precisión.

Existen dos tipos de fibra multimodo: la fibra de *índice escalón* y la fibra de *índice gradual*. Difieren en los perfiles del índice de refracción de su núcleo y revestimiento.

2.2.1. Fibra de índice escalón

Una fibra de índice escalón es una fibra óptica con índices de refracción del núcleo y del revestimiento diferentes, pero uniformes. En la frontera núcleo-revestimiento hay un cambio abrupto en el índice de refracción. El confinamiento de la luz en cualquier fibra de índice escalón se debe a las propiedades de reflexión en la frontera núcleo-revestimiento. Su origen está en la diferencia de los índices de refracción de los dos materiales.

Como muestra la Figura 2.1 los rayos de luz se reflejan en esta frontera y se propagan a lo largo de la fibra.

Los rayos de luz viajan por caminos muy diferentes en el núcleo de la fibra. Debido a que la distancia que viaja cada rayo debe diferir, llegarán a su destino en tiempos diferentes. Esto trae como consecuencia que un pulso transmitido se ensanche en el tiempo.

Como muestra la Figura 2.2., los rayos de luz $d1$, $d2$, y $d3$ empiezan al mismo tiempo t , pero después de viajar por la fibra llegan a sus destinos en tiempos diferentes, debido a que siguen diferentes caminos de

propagación en el núcleo de la fibra. Como se predijo, esto da como resultado un esparcimiento del pulso en el tiempo. Esta distorsión de la señal se conoce como *dispersión modal* (o *multimodo*).

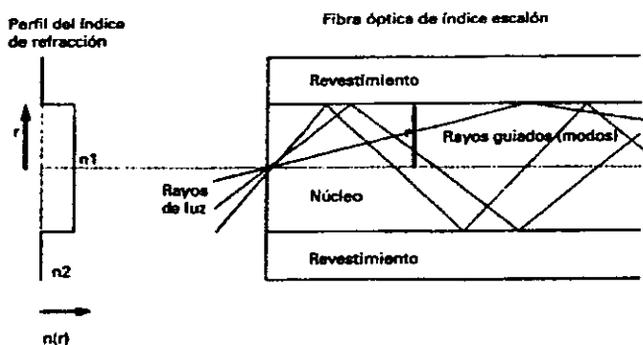


Fig. 2.1 Propagación de la luz en una fibra óptica de índice escalón

Tal ensanchamiento del pulso restringe la velocidad de transmisión de datos debido a que ésta es inversamente proporcional a la anchura del pulso. Un pulso más ancho significa que se pueden enviar menos pulsos por segundo, lo que resulta en una disminución del ancho de banda de transmisión.

Este es el factor principal que limita la velocidad de transmisión de datos en una fibra multimodo:

velocidad de transmisión de datos $\propto 1/\text{anchura del pulso}$.

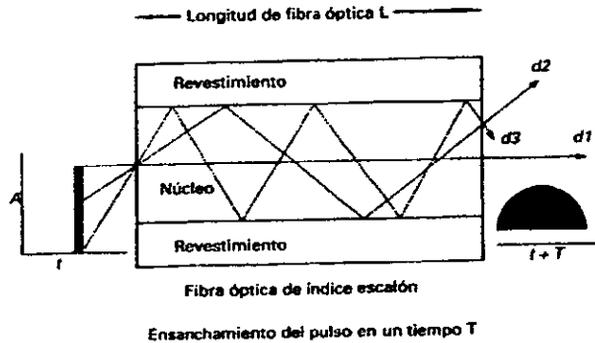


Fig. 2.2 Dispersión de una fibra multimodo índice escalón

2.2.2. Fibra de índice gradual

El índice de refracción del núcleo de una fibra de índice gradual decrece desde el centro hasta el exterior. El índice de refracción del revestimiento es uniforme. La fibra de índice gradual curva los rayos de luz en caminos sinuosos, debido a que el índice de refracción del núcleo no es uniforme (ver Fig. 2.3). La región exterior del núcleo tiene un índice de refracción más bajo que el centro. La luz viaja más rápido en un material con índice de refracción más bajo (velocidad de la luz c/n).

Los rayos de luz de la región exterior del núcleo viajan una distancia mayor y requieren más tiempo para llegar al final de la fibra. Sin embargo, debido a que la luz viaja más rápido en la región exterior que en el centro del núcleo, el mayor tiempo causado por la distancia se compensa parcialmente por una mayor velocidad del rayo.

Esto reduce la cantidad de ensanchamiento del pulso entre los rayos de luz del centro del núcleo y de la región exterior, por lo que se reduce la dispersión modal.

Es por dicho motivo que este tipo de fibra tiene un ancho de banda de transmisión de datos mayor que una fibra de índice escalón.

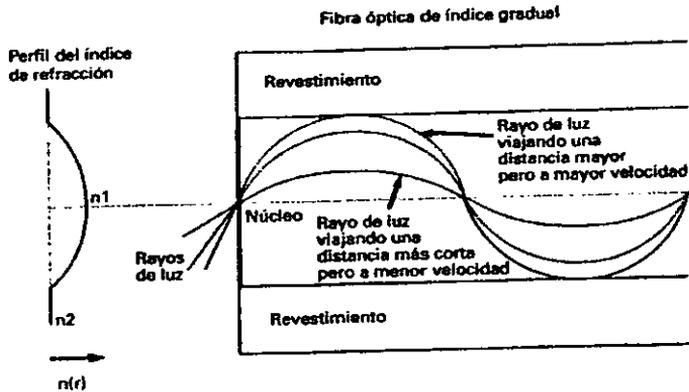


Fig. 2.3 Propagación de la luz en una fibra de índice gradual.

2.3 FIBRA MONOMODO.

Una fibra monomodo es una fibra Óptica en la que sólo se propaga un modo de luz (un camino para los rayos de luz por el centro de la fibra; ver Fig. 2.4). Esto se logra reduciendo del diámetro del núcleo de la fibra hasta un tamaño que sólo permite un modo de propagación. El tamaño del núcleo de la fibra monomodo está comprendido entre 8 y 10 μm .

El perfil del índice de refracción de una fibra monomodo es similar al de una fibra multimodo de índice escalón. Debido al pequeño tamaño del núcleo, es muy difícil acoplar luz a la fibra. Para lograr este objetivo se usa frecuentemente un láser de estado sólido. Para todas las conexiones y empalmes de la fibra, se deben utilizar componentes de precisión mayor.

Puesto que se propaga por la fibra un único modo, se elimina el ensanchamiento del pulso debido a la dispersión modal. Esto permite velocidades de transmisión de datos mucho mayores sobre distancias más largas. Velocidades de transmisión por encima de 2 Gbps son bastante frecuentes con fibras monomodo. Las compañías telefónicas son algunos de los principales usuarios de esta tecnología, para el tráfico de largas distancias.

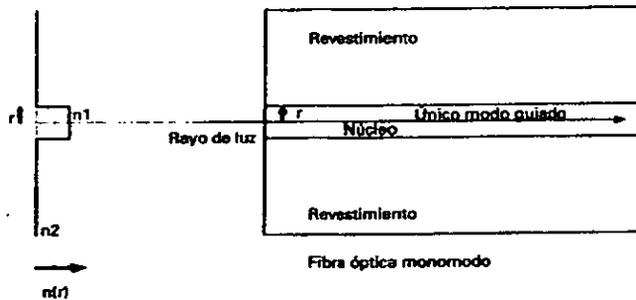


Fig. 2.4 Propagación de la luz en una Fibra óptica monomodo

2.4 PERDIDAS DE POTENCIA ÓPTICA (ATENUACIÓN).

La luz que viaja en una fibra óptica pierde potencia con la distancia. Las pérdidas de potencia dependen de la longitud de onda de la luz y del material por el que se propaga. Para el sílice, las longitudes de onda más cortas son las que más se atenúan (ver Fig. 2.6). Las pérdidas más bajas se encuentran para una longitud de onda de 1,550 nm, que se usa frecuentemente para transmisiones de larga distancia.

Las pérdidas de potencia de luz en una fibra óptica se miden en *decibelios* (dB). Las especificaciones de un cable de fibra óptica expresan las pérdidas del cable como la atenuación en dB para un km. de longitud (dB/km.). Este valor se debe multiplicar por la longitud total de la fibra óptica en kilómetros para determinar las pérdidas del cable en dB. Las pérdidas de luz de una fibra óptica están causadas por varios factores y se pueden clasificar en pérdidas *intrínsecas* y *extrínsecas*:

Extrínsecas

- Pérdidas por curvatura
- Pérdidas por conexión y empalme

Intrínsecas

- Pérdidas inherentes a la fibra

- Pérdidas que resultan de la fabricación de la fibra
- Reflexión de Fresnel

Pérdidas por curvatura

De alguna manera, las pérdidas por curvatura ocurren en todas las curvas de una fibra óptica debido al cambio del ángulo de incidencia en la frontera núcleo-revestimiento (ver Fig. 2.5). Si el radio de curvatura es mayor que el radio de curvatura mínimo de la fibra, las pérdidas son despreciables y, por tanto, ignoradas.

Las pérdidas por curvatura también pueden ocurrir a una escala más pequeña. Curvas pronunciadas del núcleo de una fibra con desplazamientos de unos pocos milímetros o menos, causadas por la protección exterior de la fibra, la fabricación, el procedimiento de instalación, etc., pueden causar también pérdidas de potencia. Estas pérdidas se denominan pérdidas por *microcurvaturas* y pueden ser significativas para grandes distancias.

Pérdidas por conexión y empalme

Las pérdidas por empalme ocurren en todos los empalmes. Los empalmes mecánicos tienen generalmente las mayores pérdidas. a menudo en el rango que va desde 0.2 dB a 1.0 dB, dependiendo del tipo de empalme. Los empalmes por fusión tienen unas pérdidas más bajas, generalmente menores que 0.2 dB.

Con un buen equipamiento se consiguen normalmente unas pérdidas de 0.07 dB. Las pérdidas se pueden atribuir a un gran número de factores, incluyendo un mal corte, el desalineamiento de los núcleos de las fibras, burbujas de aire, contaminación, desadaptación del índice de refracción, desadaptación del diámetro del núcleo, etc.

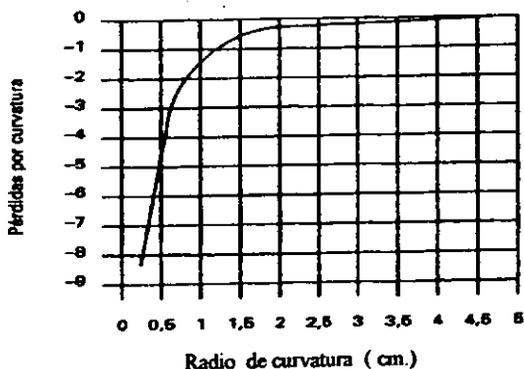


Fig.2.5 Pérdidas por curvatura de una fibra óptica multimodo (típicas)

Las pérdidas de los conectores de fibra óptica están frecuentemente en el rango que va desde 0.3 dB a 1.5 dB. y dependen en gran medida del tipo de conector usado. Otros factores que contribuyen a las pérdidas por conexión incluyen la suciedad o los contaminantes en el conector, la instalación impropia del conector, una cara dañada del conector, un corte pobre, desadaptación de los núcleos de las fibras, desalineamiento de los núcleos de las fibras, desadaptación del índice de refracción, etc.

Pérdidas inherentes a la fibra

Las pérdidas de luz en una fibra que no se pueden eliminar durante el proceso de fabricación se deben a las impurezas en el vidrio y a la absorción de la luz a nivel molecular. Las pérdidas de luz debidas a las variaciones en la densidad óptica, composición y estructura molecular se denominan *dispersión de Rayleigh*.

Los rayos de luz que Las pérdidas de los conectores de fibra óptica están frecuentemente en el rango que va desde 0.3 dB a 1.5 dB. y dependen en gran medida del tipo de conector usado. Otros factores que contribuyen a las pérdidas por conexión incluyen la suciedad o los contaminantes en el conector, la instalación impropia del conector, una cara dañada del conector, un corte pobre, desadaptación de los núcleos de las fibras, desalineamiento de los núcleos de las fibras, desadaptación del índice de refracción, etc... ,encuentran estas variaciones e impurezas se dispersan en muchas direcciones y se pierden.

La adsorción de la luz a nivel molecular en una fibra se debe principalmente a los contaminantes en el vidrio, tales como las moléculas de agua (OH⁻). La difusión de las moléculas de OH dentro de una fibra óptica es uno de los factores fundamentales que contribuye al incremento de la atenuación de la fibra cuando ésta envejece.

También contribuye a las pérdidas de luz la absorción debida a la resonancia molecular del vidrio de sílice (SiO₂).

La Figura 2.6 muestra la atenuación neta de una fibra de vidrio de sílice y las tres ventanas de operación a 850, 1,310 y 1,550 nm. Para transmisiones a larga distancia se utilizan las ventanas de 1,310 ó 1,550 nm. La ventana de 1,550 nm tiene una atenuación ligeramente menor que la de 1,310 nm. La comunicación a 850 nm es frecuente en instalaciones de distancias más cortas y de coste más bajo.

Pérdidas resultantes de la fabricación de fibra.

Las irregularidades durante el proceso de fabricación pueden dar lugar a pérdidas de rayos luminosos. Por ejemplo un cambio de 0.1 por 100 en el diámetro del núcleo puede significar unas pérdidas de 10 dB por km. Se debe mantener la tolerancia en la precisión durante todo el proceso de fabricación de la fibra para minimizar las pérdidas.

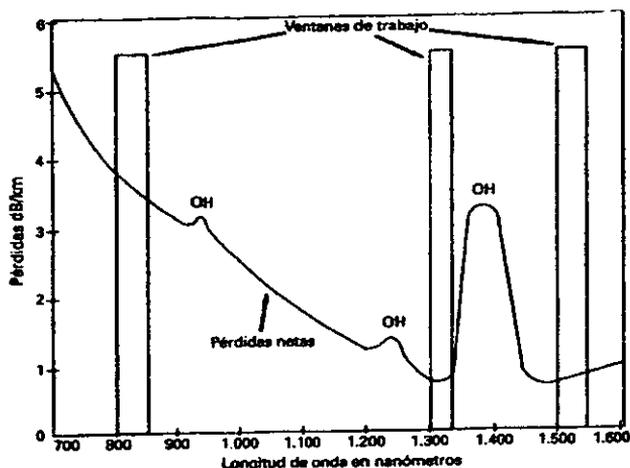


Fig. 2.6 Longitudes de onda operativas de una fibra óptica.

Reflexión de Fresnel

La *reflexión de Fresnel* ocurre en cualquier frontera de un medio donde cambie el índice de refracción, causando que una parte de los rayos incidentes sean reflejados al primer medio. El extremo de una fibra es un buen ejemplo de este hecho. La luz, que viaja del aire al núcleo de la fibra, es refractada al núcleo. Sin embargo, parte de la luz, alrededor del 4 por 100, es reflejada de vuelta al aire. La cantidad que se refleja se puede calcular usando la siguiente fórmula:

Potencia de luz reflejada en la frontera

$$\text{Luz reflejada (\%)} = 100 \times (n_1 - n_2)^2 / (n_1 + n_2)^2$$

donde n_1 = índice de refracción del núcleo
 n_2 = índice de refracción del aire

En un conector de fibra la cantidad de potencia luminosa reflejada se sitúa alrededor del 8 por 100 en la frontera de los medios de aire-vidrio. Esto se puede ver fácilmente en la traza de un *reflectómetro Óptico en el dominio del tiempo* (OTDR)

Las pérdidas de luz están generalmente en el rango que va desde 0.1 a 0.7 dB. Esta luz reflejada puede ocasionar problemas si se utiliza un láser y debería minimizarse

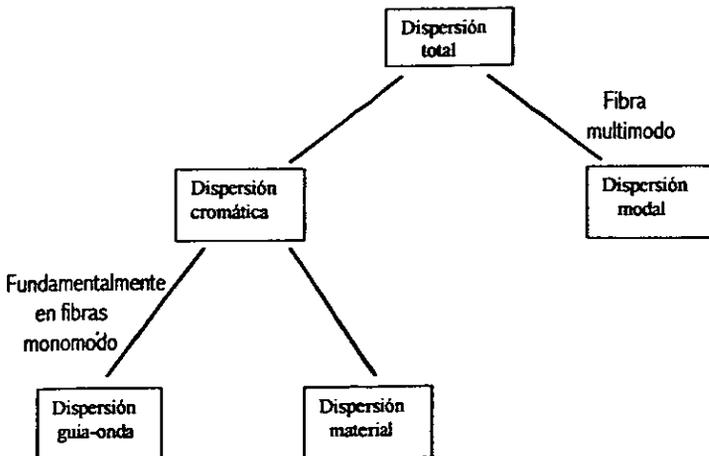
Se puede reducir la potencia de luz reflejada usando mejores conectores. Los conectores conocidos como «PC» (*physical contact*) están diseñados para minimizar esta reflexión.

2.4.1. Ancho de banda de la fibra

El *ancho de banda* de una fibra óptica es una medida de su capacidad de transmisión de información. El ancho de banda de una fibra óptica está limitado por la *dispersión total* de la fibra (ensanchamiento del pulso). La dispersión limita la capacidad de transmisión de información porque los pulsos se distorsionan y se ensanchan, solapándose unos con otros y haciéndose indistinguibles para el equipo receptor. Para evitar que esto ocurra, los pulsos se deben transmitir a una frecuencia menor (reduciendo por tanto la velocidad de la transmisión de datos).

Como se muestra en la fig. 2.7 los pulsos originales de datos Ópticos son discretos —unos y ceros que pueden ser fácilmente identificados—. Después de que la señal se ha propagado una cierta distancia a lo largo de la fibra óptica, tiene lugar la dispersión. Los pulsos se ensanchan pero pueden ser todavía decodificados por el equipo receptor. dispersión adicional puede introducir errores en la transmisión. Tras una propagación aún mayor por la fibra, la señal se distorsiona totalmente y el equipo receptor no puede derivar la forma de onda original. La transmisión de datos no es posible. Además, a medida que aumenta la dispersión, la potencia del pico de la señal óptica se reduce, lo cual afecta al presupuesto Óptico del receptor. La dispersión es una función de la longitud de la fibra óptica; cuanto mayor sea la fibra, más pronunciado será el efecto. Mientras la dispersión de la fibra Óptica esté dentro de las especificaciones del equipamiento óptico, los errores en la transmisión de datos por fibra Óptica podrán mantenerse por debajo de las especificaciones.

La dispersión total se puede dividir en dos categorías: dispersión cromática y dispersión modal (también llamada dispersión multimodo). La dispersión cromática puede ser posteriormente subdividida en dispersión guía-onda y dispersión material, como se representa aquí gráficamente:



Dispersión modal

La *dispersión modal*, también conocida como *dispersión multimodo*, afecta sólo a la fibra multimodo y está causada por los diferentes caminos o modos que sigue un rayo de luz en la fibra (ver Fig. 2.2).

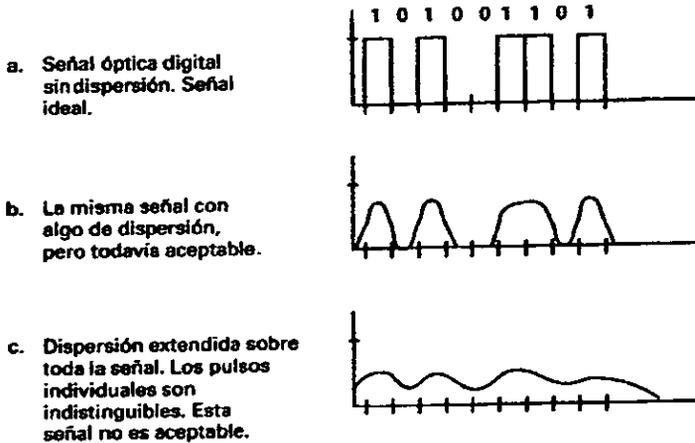


Fig. 2.7 Dispersión de la señal

Esto da como resultado que los rayos recorran distancias diferentes y lleguen al otro extremo de la fibra en tiempos ensanchará debido a este efecto y reducirá en consecuencia la máxima velocidad de transmisión efectiva de datos.

Una fibra de índice escalón tiene la dispersión modal más alta y por tanto el ancho de banda más bajo. Debido al perfil no uniforme del índice de refracción de una fibra de índice gradual, la dispersión modal decrece. Esto redunda en una transmisión de datos mayor que con una fibra de índice escalón.

Dispersión cromática material

La dispersión cromática material ocurre porque el índice de refracción de una fibra varía con la longitud de onda de la luz en la fibra. Debido a que la fuente de luz está compuesta de un espectro de más de una longitud de onda, los rayos de luz de diferente longitud de onda viajan a diferentes velocidades ($v = c/n$), dando como resultado un ensanchamiento del pulso.

Dispersión cromática guía-onda

La dispersión cromática guía-onda es debida a la anchura espectral de la fuente de luz, cuando el índice de refracción permanece constante. La razón de esto es que la geometría de la fibra causa que la constante de propagación de cada modo cambie con la longitud de onda de la luz. La dispersión guía-onda es despreciable, excepto cerca del cero de la dispersión material.

Ancho de banda total

El ancho de banda total de una fibra multimodo está especificado por el fabricante en la forma del producto de la distancia por el ancho de banda modal normalizado «Megahercio x kilómetro» (MHz x km).

Este producto del ancho de banda da cuenta sólo del ensanchamiento del pulso debido a la dispersión modal (o multimodo). Para determinar el ancho de banda total de una fibra Óptica deben ser también considerados los efectos de la dispersión cromática.

El ancho de banda total de una fibra multimodo se puede calcular como sigue:

$$B_{\text{Total}} = (B^2_{\text{Modal}} + B^2_{\text{Cromática}})^{-1/2}$$

El ancho de banda de una fibra monomodo está limitado únicamente por la dispersión cromática de la fibra, que se especifica en la forma picosegundos/(nanómetro x kilómetro) o (ps/nm x km). Hay disponibles fibras monomodo convencionales a longitudes de onda de 1,3 a 10 nm con dispersión casi nula (como consecuencia de esto soportan anchos de banda muy elevados). También hay fibras ópticas con dispersión casi nula a 1,550 nm que se conocen como fibras de *dispersión desplazada*. Hay también disponibles fibras ópticas con dispersión casi nula tanto a 1,310 como a 1,550 nm y que se conocen como *fibras de dispersión plana*. Para operar a La velocidad de transmisión de datos más alta, in fibra monomodo deberla tener dispersión nula a la longitud de onda de operación del equipo.

ESPECIFICACION DE UNA FIBRA OPTICA: UN EJEMPLO

Lo que sigue es un ejemplo de una hoja de especificaciones de una fibra óptica típica de un fabricante de fibras:

Especificación		Explicación
Diámetro del núcleo:	62,5 μm	Diámetro del núcleo de una fibra múltimodo
Diámetro del revestimiento:	125 μm	No incluye el recubrimiento
Diámetro de recubrimiento:	250 μm	Recubrimiento de plástico coloreado
Diámetro del campo modal:		Este valor sólo se usa para fibras monomodo
<i>Máxima atenuación a:</i>		
850 nm:	3,5 dB/km	Pérdidas máximas por kilómetro
1.310 nm:	1,0 dB/km	Menor atenuación a mayores longitudes de onda
<i>Ancho de banda:</i>		
850nm	160 MHz xkm	Especificación del ancho de banda modal de una fibra óptica multimodo a 850 nm
1.310nm:	500 MHz xkm	Especificación del ancho de banda modal de una fibra óptica multimodo a 1.310 nm
Dispersión cromática:	0,1 ns/nm x km	Este factor también limita el ancho de banda de una fibra multimodo
Longitud de onda de corte:		La longitud de onda más corta que se propaga en una fibra (sólo para fibras monomodo)
Fabricante de la fibra:	Compañía XYZ	Nombre del fabricante de la fibra óptica (no el mismo que el fabricante del cable de fibra)

CAPÍTULO 3

FUENTES LUMINOSAS

El láser de semiconductores (diodo láser) y el LED (diodo electroluminiscente) se usan universalmente como fuentes luminosas en los sistemas de comunicaciones ópticas, debido a ningún otro tipo de fuente óptica puede modularse directamente a las altas velocidades de transmisión requeridas, con tan baja excitación y tan baja salida. La elección entre el láser y el LED es función del sistema: para anchos de banda grandes y largos enlaces, el láser ofrece un mejor rendimiento. Para distancias cortas y medias con anchos de banda escasos, en donde la baja potencia de salida, la respuesta en frecuencia o la gran anchura espectral no sean factores limitativos, se suele escoger el LED, ya que tanto el circuito de ataque como el de control son más sencillos.

Los componentes utilizados para emitir luz en la ventana de los 850 nm son Galio, Aluminio, Arsénico (GA, AL, AS); si agregamos Indio (In) y fósforo (P) podemos emitir en las ventanas de los 1,300nm y 1,500nm.

3.1 DIODO EMISOR DE LUZ (LED)

Los dos tipos básicos de LED utilizados para extraer luz de una unión *pn* son los de *emisión de superficie* y los de *emisión de borde*. Los primeros han estado produciéndose desde principios de la década de los 70s. Su área activa productiva de luz está definida por una superficie de contacto óxido-metal aislado, la luz se emite perpendicularmente al plano de la unión *pn*, a través de la superficie, por lo que gran parte de la radiación queda absorbida en el sustrato, y la emisión del diodo es de ángulo grande (*lambertiana*). Se deben procurar, pues, procedimientos de acoplamiento eficaz con las fibras ópticas, particularmente si éstas son de apertura numérica pequeña.

En el LED de emisión de bordes (*ELED*), la luz se emite en el plano de la unión, con lo que la absorción es muy pequeña. La emisión de bordes es direccional si se usa geometría de franja. Esta estructura permite un mejor rendimiento cuántico externo y un acoplamiento a las fibras más eficaz.

a) Proceso de emisión:

El proceso de generación de la luz en un LED se basa en la recombinación de electrones y huecos en una unión *pn*, lo que provoca emisión de fotones. A este efecto se le llama *electroluminiscencia*. La longitud de onda de la luz emitida depende de la diferencia de energía *E* entre los niveles energéticos:

$$\lambda = \frac{hc}{E}$$

donde h es la constante de *Planck* y c la velocidad de la luz. En un LED la luz se emite según los 360° que se corresponden en una radiación esférica, pero en la práctica esto queda limitado por la construcción mecánica del diodo, la reflexión de la luz en el material metalizado y la absorción en el metal semiconductor.

La apertura numérica puede variar desde 0.9 para un LED de gran ángulo hasta 0.2 para uno de estrecho ángulo. Aunque la apertura numérica de 0.2 es bastante pequeña, el área de emisión es grande comparada con la de un láser. La baja densidad de potencia resultante reduce enormemente la potencia que se puede acoplar a una fibra de índice gradual y hace casi imposible el acoplo a una fibra monomodo.

Un ancho de banda típico para un buen diodo es de 200Mhz. Rendimientos de 50 W/mA son usuales, y no se requiere corriente umbral.

La luz del diodo puede filtrarse, de modo que solamente parte del espectro total pase a la fibra, pero esto se hace a costa de una disminución de la potencia disponible de la fuente de luz.

b) *Espectro de emisión:*

Los LED presentan un espectro más ancho que los láseres. Así, un LED de 850 nm tiene un ancho entre 30 y 50nm.

c) *LED de emisión de bordes (ELED):*

Como se mencionó anteriormente, en el *ELED* la luz se emite en el plano de la unión, con lo que la absorción es muy pequeña. El *ELED* utiliza la misma geometría que el láser de franja, con modificaciones sustanciales a fin de impedir la acción del láser. Combina las ventajas de los emisores convencionales de superficie, tales como facilidad de operación y bajo ruido, con potencias de salida considerables, y con eficacia de acoplamiento y velocidades de modulación que se aproximan a las del láser. Estas presentaciones hacen a los ELED muy superiores en alcance y ancho de banda con respecto a los emisores de superficie. Son adecuados, pues, para una amplia gama de enlaces de capacidad y alcance medios, tanto analógicos como digitales.

Existe una versión de ELED de Galio, Arsénico/Galio, Aluminio y Arsénico, que trabaja en la zona de los 850nm, diseñada para acoplar el máximo posible de potencia en una fibra de pequeño núcleo. A 100mA ofrece potencias de salida en la fibra de 300 mW, adecuadas para comunicaciones digitales con velocidades de 70Mbps y alcances de hasta 7Km.

Un segundo tipo de ELED está diseñado para dar rendimiento suficiente al sistema, con la mínima corriente de excitación posible. Con corrientes de 10mA puede llegar a los 45Mbps.

Un factor fundamental en el desarrollo de los ELED ha sido la alta fiabilidad del propio dispositivo y de su encapsulado, actualmente disponibles como conjunto hermético, provisto de un tallo de fibra.

3.2 DIODO LASER

Actualmente existe una gran variedad de láseres semiconductores para trabajar a longitudes de onda de 850nm. La pérdida considerablemente más baja, así como la mejor disposición de fibras ópticas de 1,300nm y 1,500nm han adelantado el rápido desarrollo de láseres que operen a esas longitudes de onda. Los de mayor éxito se basan en aleaciones de semiconductores de los grupos II-V, InP/Ga In As P.

a) *Proceso de emisión:*

El proceso de generación de luz es similar al del LED. Las diferencias radican en el volumen de generación, más pequeño en los diodos láser, y en una alta concentración de portadores inyectados. Se consigue así una ganancia óptica alta y un espectro muy estrecho que da lugar a *luz coherente*. La pastilla láser suele tener una longitud de 300 nm, con dos caras cuidadosamente cortadas en ambos extremos a modo de espejos. El origen de la emisión de fotones es la recombinación directa electrón-hueco en la capa activa.

En el plano vertical, confinamiento óptico y de los portadores se obtiene revistiendo la capa activa con capas pasivas (de tipo p y de tipo n). Estas capas poseen un intervalo entre bandas superior al de la capa activa, formando así un pozo de potencial que impide a los portadores inyectados el escapar mediante difusión. Así mismo, las capas pasivas tienen un índice de refracción inferior al de la capa activa, con lo que se forma una guía de ondas ópticas que confina la luz en el plano de la capa activa, al propagarse entre los espejos. Esta estructura da lugar a que la corriente en los laterales de la zona activa sea muy pequeña. La zona activa tiene unas dimensiones típicas de 5 nm a 10 nm de ancho y 0.1nm a 0.2 nm de espesor.

En la región de *emisión espontánea* el espectro de un láser es muy parecido al de un LED, siendo la ganancia típica de 5 mW/mA, menor que la ganancia típica de un LED.

A partir de una cierta densidad de corriente en la zona activa, la ganancia óptica excede a las pérdidas y la emisión pasa de espontánea a *estimulada*. La corriente a la que se produce el cambio se denomina *umbral*. Esta corriente es baja en láseres e heteroestructura, entre 50mA y 150mA.

La luz de este tipo de láseres puede acoplarse fácilmente a una fibra multimodo juntando simplemente a tope un extremo de la raya del láser contra el extremo del núcleo de la fibra, que tienen un diámetro mucho mayor. También puede acoplarse a una fibra monomodo. El problema principal consiste en que la unión láser tiende a ser tan fina que la luz diverge al salir del extremo. Este problema puede solucionarse mediante una diminuta lente cilíndrica que reorienta la luz a lo largo de la fibra.

b) Espectro de emisión

Por encima de la corriente umbral, el espectro de los láseres es, aproximadamente, de unos 2nm. Por debajo de la corriente umbral, las características espectrales de los láseres son similares a las del LED.

3.3 CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR

Cuando se hable de un transmisor (emisor de luz con sus circuitos polarizadores) se deben tener en cuenta algunas consideraciones importantes para evaluar su aplicabilidad. En primer lugar puntalicemos la diferencia entre transmisores digitales y analógicos, por ejemplo, en sistemas CATV, donde las señales son moduladas en FM. Para transistores analógicos, *linealidad o distorsión* (modificación de la señal transmitida respecto a la original) y el *ancho de banda* son factores muy importantes. Para un transmisor digital, este último parámetro está relacionado con la *velocidad de transmisión máxima*, que, a su vez, lo está con la máxima cantidad de información que se transmite en una unidad de tiempo. La linealidad no es crítica en una transmisión digital.

Para cualquier transmisor un factor importante es el *ruido* (señales aleatorias indeseables que se suman a la señal debido al emisor, de luz y los circuitos electrónicos) y la *relación señal-ruido (S/N)*. Las fibras ópticas son casi inmunes a todo tipo de interferencias, sin embargo, no así el transmisor y por ello debe ser diseñado con sumo cuidado para evitar este fenómeno.

Además, cuando se elige un transmisor es importante que las características eléctricas de ingreso (tales como la codificación de las señales digitales o los niveles de ingreso de entrada de las señales analógicas) coincidan con las del sistema a usar. Es conveniente también que las características del emisor de luz estén de acuerdo con las características eléctricas. Otras consideraciones a tener en cuenta son: longitud de onda (para elegir la fibra adecuada), ancho espectral (para considerar la dispersión), potencia óptica emitida y tipo de encapsulado (para considerar la eficiencia de acoplamiento).

Detectores y receptores

El fotodetector, un componente crítico en cualquier sistema de comunicaciones por fibra óptica, ha sido menospreciado, algunas veces, en la reciente tendencia de concentrarse en las mejoras de los transmisores láser y en las mismas fibras ópticas. Simplemente con cambiar de un tipo de fotodetector a otro se puede incrementar la capacidad de un sistema óptico en un orden de magnitud sin tocar ningún otro componente.

Aunque existen varios tipos de fotodetectores, usualmente sólo se consideran tres para la detección directa de señales digitales en comunicaciones ópticas: el *fotodiodo*, el *diodo PIN* y el *fotodiodo de avalancha (APD)*. La mayor parte de los sistemas instalados en el mundo utilizan fotodiodos PIN, muchos de ellos son de silicio y se usan en sistemas de longitudes de onda corta (800nm y 900 nm) para comunicaciones a corta distancia. Al fin y al cabo los diodos PIN, con su

gran ancho de banda y bajo ruido, son la promesa futura para conseguir una generación de detectores ópticos completamente integrados.

Básicamente, el detector es un dispositivo que convierte fotones en electrones, un receptor se compone de un detector y de los circuitos necesarios asociados que lo capacitan para funcionar en un sistema de comunicaciones ópticas, transformando señales de frecuencias ópticas a frecuencias inferiores, con la mínima adición de ruido indeseable y con un ancho de banda suficiente para no distorsionar la información contenida en la señal (analógica o digital).

3.4 DIODO PIN.

El fotodiodo *PIN* es el detector más importante utilizado en los sistemas de comunicación óptica. Es relativamente fácil de fabricar, altamente fiable, tiene bajo ruido y es compatible con circuitos amplificadores de baja tensión. Además, es sensible a un gran ancho de banda debido a que no tiene mecanismo de ganancia. Unas zonas *p* y *n* altamente conductoras junto a otra intrínseca poco conductiva, caracterizan al diodo PIN. Los fotones entran a la zona intrínseca generando pares electrón-hueco. El diodo se polariza inversamente con el fin de que las cargas generadas en la zona intrínseca sean aceleradas por el campo eléctrico presente.

Una típica estructura *p-i-n* planar tiene, como material absorbente de luz, a un compuesto de In Ga As. La región de absorción es fina, siendo, generalmente, un material tipo *n* sobre un sustrato tipo *n* de indio fosforoso. La superficie superior está recubierta de un fino aislante, o capa positiva, para proteger la superficie y reducir la recombinación de electrones y huecos en dicha superficie.

Cuando un fotón entra en la zona de depleción, es absorbido y genera un par electrón-hueco, los cuales son dirigidos hacia los electrodos opuestos. Allí se recogen y aparecen como corriente en el circuito exterior. Puesto el par de portadores es separado en mucho menos tiempo que el tomado para su recombinación, el proceso de detección es rápido y eficiente.

Debido a que no existe mecanismo de ganancia en un fotodiodo *p-i-n*, la máxima eficiencia del detector es la unidad y producto ganancia \times ancho de banda coincide con esta última. El ancho de banda de un diodo *p-i-n* está limitado por el tiempo tomado en colector las cargas. Este tiempo es inversamente proporcional al ancho de la zona de depleción y directamente proporcional a la velocidad de los portadores de cargas en la región de alto campo eléctrico.

La principal fuente de ruido en un fotodiodo *p-i-n* es el *ruido de granalla* (shot noise), producido en la zona de depleción de la unión *p-n* inversamente polarizada, generado por el proceso estadístico de los electrones atravesando la unión *p-n*.

3.5 FOTODIODO DE AVALANCHA (APD)

Los APD son similares a los diodos PIN en cuanto a que trabajan polarizados en inversa, en ausencia de grandes corrientes de oscuridad.

A diferencia de los diodos PIN los APD operan a tensiones inversas lo suficientemente elevadas como para que cuando los portadores sean en el campo eléctrico, colisiones con otros átomos que componen la estructura cristalina del semiconductor. Las colisiones ionizan los átomos, produciéndose nuevos pares electrón-hueco. Esta ionización por impacto nos determina la ganancia interna del dispositivo o *ganancia de avalancha*.

a) *Proceso de avalancha:*

Con polarización directa (es decir, la región p positiva y la región n negativa), el diodo está preparado para conducir corriente limitada por la resistencia del dispositivo. En polarización inversa, la unión $p-n$ forma una barrera y sólo la puede atravesar una corriente muy pequeña, normalmente causada por generación térmica (ya que los átomos de la red cristalina están en constante vibración) y por la separación debida al campo eléctrico que existe en la región de deplexión.

Esta corriente se denomina *corriente de oscuridad*, puesto que existe incluso en ausencia de luz incidente: está presente en todos los diodos en mayor o menor grado y suele ser característica del material usado en la construcción del diodo.

Si la polarización es negativa se aumenta la corriente de oscuridad también crece gradualmente por ensancharse la región de deplexión y exponer así una parte mayor del volumen del diodo a la capacitación de portadores generados térmicamente. Con polarización inversa suficientemente grande, el campo eléctrico en la zona $p-n$ puede hacerse tan intenso que acelere los pares electrón-hueco generados térmicamente, con energía suficiente como para crear más de estos pares por colisiones con los átomos de la estructura. Estos pares, ionizados por impacto, son a su vez acelerados, junto con los portadores de carga fotogenerados primariamente, para colisionar con más átomos de la red y producir nuevos portadores de carga. De esta manera se puede amplificar la corriente primaria, aumentando su ganancia con la polarización. Finalmente, se alcanza un voltaje para el cual la ganancia de multiplicación de la corriente de oscuridad se aproxima a infinito. A este valor se lo denomina *tensión de ruptura* del diodo.

Cuando se ilumina el diodo, se producen muchos más pares electrón-hueco, generándose en él una fotocorriente. A una polarización suficientemente baja (alrededor del 10% de la tensión de ruptura) se puede suponer que no hay ganancia de avalancha de la fotocorriente. Es decir, la fotocorriente es la corriente total generada en el diodo menos la corriente de oscuridad correspondiente a esa tensión. Para un voltaje mayor (90% de la tensión de ruptura), se produce una ganancia finita, tanto de la fotocorriente como de la corriente de oscuridad. La ganancia neta es entonces la fotocorriente a esa tensión dividida por la fotocorriente sin amplificar. La máxima ganancia se alcanza justo antes de la tensión de ruptura; sin embargo, el factor de ruido es también máximo en este punto. La ganancia óptima cuando se emplea un APD, en un receptor óptico corresponde a un valor inferior al máximo, en el cual el ruido después de la multiplicación coincide con el ruido del amplificador.

El factor de multiplicación depende fuertemente del voltaje inverso aplicado y de la temperatura, lo que hace dificultoso alcanzar una ganancia estable. Un compromiso típico entre

ganancia y estabilidad es un valor del factor de multiplicación entre 50 y 150. La corriente de oscuridad también es muy sensible a la temperatura. En los diodos de Silicio, la corriente se dobla cada 8° C, en los de Germanio cada 9° C a 10° C. A 25° C la corriente de oscuridad típica de un APD de silicio con 0,1nm de diámetro de área activa es de 1nA a 10nA, para un valor de factor de multiplicación de 100.

b) Ancho de banda de un APD y su respuesta en el tiempo:

Una última consideración con respecto a la ganancia de avalancha es su efecto en el ancho de banda del receptor. En un detector de avalancha, el máximo ancho de banda obtenible (para ganancia igual a 1) está, en último caso, limitado por el tiempo de tránsito de los portadores en la región de deplexión, al igual que en los fotodiodos p-n. En presencia de ganancia el ancho de banda se reduce, debido al tiempo necesario para formarse la avalancha.

El tiempo de respuesta de un APD también depende del coeficiente de ionización. Después que la avalancha comienza, la señal continúa hasta que alguna fluctuación en la densidad de los portadores en la región de deplexión hace finalizar el proceso.

El producto ganancia por ancho de banda en un APD es máximo en dispositivos y materiales, en los que el tiempo de tránsito efectivo es menor.

3.6 RECEPTORES

Al igual que con los transmisores, debemos considerar los mismos parámetros básicos para diferenciar las características de los receptores analógicos y digitales. Los parámetros de los receptores analógicos son la *linealidad* o *distorsión* y el *ancho de banda*, mientras que para receptores digitales la linealidad no es importante y el ancho de banda se reemplaza por la máxima velocidad de transmisión.

La *potencia de ruido equivalente* de un receptor es generalmente mayor que en la de un fotodetector sólo. Otras consideraciones son la *relación señal/ruido* para los receptores analógicos y la *tasa de errores* (número de bits equivocados recibidos) para receptores digitales. Se debe notar que la fuente principal de ruido en el receptor es la etapa amplificadora que sigue al fotodetector.

Debemos considerar las características eléctricas de salida (codificación para transmisores digitales y nivel e impedancia de salida para las analógicas). Muchos receptores tienen circuitos de *control automático de ganancia (CAG)* para mantener el mismo nivel de salida cualquiera sea el nivel de entrada. Dado que el rango del nivel de entrada está limitado por el fotodetector, hay una potencia máxima sobre la cual se satura y una potencia mínima que representa la mínima detectable. Esta última es importante para determinar la máxima longitud de fibra que se puede usar sin repetidores. Otras características ópticas de los fotodetectores tales como el rango de longitudes de onda de trabajo y el tipo de encapsulado deben ser considerados al elegir.

Los receptores ópticos actuales se basan en uno de los dos tipos de detectores: el fotodiodo de avalancha APD y el diodo PIN seguido por un preamplificador de entrada *FET* (*Transistor de Efecto de Campo*). Para señales digitales binarias, el caso más común basta con 22 Db de relación señal/ruido. Un APD de calidad (de bajo ruido) podría dar una sensibilidad superior. Las relaciones señal eficaz de portadora/ruido eficaz en señales analógicas han de estar entre los 30dB y los 65dB.

Si las señales están moduladas en intensidad, el ruido dominante es el granular (*shot*) asociado a la corriente media de la señal, para relaciones portadora/ruido mayores de unos 40dB. En estos casos la mejor opción son los receptores *PIN-FET*.

a) Ruido en los receptores ópticos:

La capacidad de un receptor óptico para detectar señales de luz débiles depende de su sensibilidad y en particular del ruido propio. Los agentes causantes del ruido son la señal óptica, el diodo en sí y el circuito eléctrico que le sigue. El límite en cuanto a detección se da cuando la suma de todas las corrientes de ruido (cuántico, de la corriente de oscuridad, granular, térmico) iguala a la corriente de la señal a la salida del receptor. Esta potencia equivalente al ruido suele ser sin embargo menos importante que la potencia óptica (mínima) requerida para garantizar la deseada relación señal/ruido o tasa de error.

Pueden presentarse alguna o todas las fuentes de ruido siguientes:

- Ruido granular en la corriente media de la señal.
- Exceso de ruido granular en la corriente media de la señal, debido al ruido en la multiplicación de avalancha.
- Ruido creado por la corriente de oscuridad del detector.
- Ruido procedente del amplificador.

Incluso con un APD perfecto, hay un límite fundamental en el cual el rendimiento sólo depende del ruido granular en la corriente media de la señal. Corrientemente se le denomina *límite cuántico*, ya que los electrones de la corriente de señal están relacionados directamente con los fotones ópticos. Se puede demostrar que deben recibirse al menos 21 fotones para un "1" si se quiere obtener una tasa de error de 10^{-9} en sistemas digitales.

CAPITULO 4

EMPALMES Y CONECTORES.

Empalme de la Fibra Optica.

Se define el empalme a soldadura de la fibra óptica como todo aquel proceso a dispositivo que nos permite garantizar un conexionado permanente de las fibras ópticas preservando las características de transmisión de las mismas.

El conector óptico sería aquel dispositivo desconectable a voluntad que nos permite interconectar fibras ópticas.

La interconexión es una parte crítica en los enlaces de fibras ópticas.

La misión de un empalme o de un conector de fibra óptica es la de proporcionar una interconexión que introduzca su valor más bajo posible de pérdidas.

En los enlaces de larga distancia, en los que es necesaria la utilización de fibras ópticas con muy bajo valor de atenuación, cada empalme o conector puede llegar a contribuir significativamente con su aportación en las pérdidas totales del enlace e incluso llegar a plantear la inviabilidad del mismo.

Por tanto es importante la utilización de elementos de interconexión que nos permitan minimizar al máximo las pérdidas y preservar las características de transmisión de las fibras ópticas.

En los enlaces de corta distancia en los que los niveles de atenuación son altos se llegan a utilizar fibras ópticas plásticas con muy altos valores de atenuación, en donde la contribución de empalmes o conectores a las pérdidas totales del enlace no adquiere un papel crítico.

Este factor incluso puede llegar a ser irrelevante sopesándose otros factores hasta ahora ignorados como son: Costes, fiabilidad, mantenimiento, dificultades en la instalación, etc.

Los métodos empleados para empalmar las fibras ópticas han ido evolucionando desde el principio de la utilización de esta técnica y, por orden de aparición, fueron las siguientes:

- Soldadura por microllama.
- Pegado.
- Soldadura por fusión.

De todas estas técnicas, la que se ha impuesto de una forma definitiva es la de soldadura de

las fibras ópticas por fusión con arco eléctrico.

Esta imposición viene motivada por el hecho de que todas las administraciones telefónicas, han adaptado la fibra óptica monomodo como el medio definitivo para las comunicaciones a larga distancia y, por tanto, para la formación de sus redes interurbanas e interconexión de las mismas a las redes internacionales.

La adopción de la fibra óptica monomodo como medio de transmisión se debe a las favorables características de transmisión que presenta con unas bajas pérdidas de atenuación y un gran ancho de banda.

Características que permiten espaciar los equipos de regeneración de señal distancias del orden de 50 ó 60 Km

Razón que ha impuesto a las máquinas de empalme por fusión con arco eléctrico por ser éstas las que mejores prestaciones, en cuanto a valores de atenuación, presentan frente a las otras técnicas antes mencionadas.

4.1 PROCESO DEL EMPALME POR FUSIÓN

El proceso de empalme por fusión de fibras ópticas se puede desglosar en una serie de labores previas dado que, muy raramente, las fibras ópticas que hay que empalmar se encuentran desnudas.

Lo habitual es empalmar cables de fibras ópticas entre sí, lo que se denomina "en paso". Es el caso que se produce cuando se realizan enlaces de larga distancia y en los que se concatenan tramos de fibra óptica.

El otro caso se produce cuando queremos empalmar cables de fibras ópticas a otros cables o cordones monofibra que están conectorizados en un solo extremo, que se denominan habitualmente latiguillos a pigtaills.

Este caso es habitual en la formación de repartidores ópticos mediante la conectorización de todas las fibras ópticas que conforman los cables antes citados.

4.1.1 Labores Previas al Empalme de Fusión

Las labores previas al proceso del empalme por fusión de la fibra óptica son las siguientes:

Preparación, Desnudado y Limpieza de los Cables de Fibra Óptica

La preparación consiste en fijar las distancias de cable necesarias en ambos extremos para la realización de las labores posteriores.

El desnudado consiste en eliminar las distintas cubiertas y protecciones de que consta el cable que pueden ser: P.V.C., polietileno, acero, aluminio, dorado de polietileno, compuestos aramidicos.

Para dejar al descubierto tan solo los elementos centrales del cable alma, fiador y las fibras ópticas guiadas en el interior de sus protecciones holgadas o ajustadas.

La limpieza consiste en eliminar, mediante el uso de disolventes, todas las sustancias de relleno que se encuentran en los intersticios de las distintas capas y protecciones que conforman los cables ópticos.

Estas sustancias están siempre compuestas por "geles" que son sustancias tixotrópicas o hidrófugas que presentan la propiedad de no tener avidez alguna por la absorción de agua.

Se encuentran en un estado gelatinoso permanente y rellenan todos los intersticios del cable y de la protección holgada.

Están en contacto con la fibra óptica que en un paso posterior procederemos a desnudar y limpiar.

Los disolventes que habitualmente se utilizan para la limpieza de las sustancias de relleno son alcohol isopropílico, tricloroetano y neptano.

Labores Propias del Empalme de fusión

Las labores propias del proceso de empalme por fusión de la fibra óptica son:

Limpieza de la Fibra Óptica

Esta operación es análoga a la que se realizó con anterioridad para el cable óptico y tiene por objeto adecuar las protecciones secundarias de la fibra óptica para poder proceder a su desnudado.

Los materiales que se utilizan en la limpieza de las fibras ópticas desnudas son los mismos que ya utilizamos para la limpieza de los cables ópticos.

Desnudado de la Fibra Óptica

Esta operación se realiza con unas herramientas de precisión especiales llamadas desaisladoras de fibra Óptica.

Su misión es eliminar el recubrimiento primario y las protecciones secundarias de las fibras ópticas que presentan unos diámetros externos normalizados por orden creciente de 250 micras,

500 micras y 900 micras.

Su funcionamiento consiste en "morder" mediante unas cuchillas micrométricas la protección exterior para, a continuación, mediante tracción desnudar esta protección con lo que nos encontraríamos con la protección anterior.

Este proceso se repite sucesivamente hasta llegar a la protección primaria.

El primer paso del proceso es utilizar la primera herramienta desaisladora 0,80-1,50 con la que se desaisla las protecciones con diámetros externos superiores a 800 micras e inferiores a 1.500 micras.

A continuación, y mediante la utilización de la segunda herramienta desaisladora 0,60-1,00, se desaisla la protección con diámetro externo de 900 micras. Una vez desaislada esta protección estaríamos ante la presencia de la protección de 500 micras.

El tercer paso del proceso es emplear la tercera herramienta 0,25-0,60 con la que se desaisla la protección de 500 micras.

Una vez realizado este paso se encuentra al descubierto la protección de 250 micras.

Ahora, mediante el empleo de la cuarta herramienta desaisladora 0,18-0,30, se precede a desaislar la proyección de 250 micras.

Una vez desaislada la protección de 250 micras la fibra óptica se encuentra totalmente desnuda con un diámetro externo de 125 micras.

Esta medida del diámetro corresponde al revestimiento de la fibra óptica o cladding en las fibras ópticas monomodo.

Corte de la Fibra Óptica.

Esta operación, consiste en cortar la fibra óptica desnuda a la longitud precisa para su empalme por fusión.

La importancia de esta operación es capital, hasta el extremo de que de su buena ejecución depende el proceso completo del empalme por fusión de la fibra óptica.

La distancia de corte es característica para cada fabricante y oscila desde 1 cm. hasta 3 cm. para todas las máquinas de fusión.

Las cortadoras de fibra óptica funcionan conforme a la secuencia siguiente:
"Tensor - combar - marcar - cortar".

La fibra óptica se introduce a la distancia de corte prefijada, entonces dos mordazas la tensan.

La parte central entre ambas mordazas es una superficie convexa que nos garantiza el combado de la fibra óptica y el que ésta presente una superficie perpendicular para marcar de la fibra óptica.

La operación de marcar la fibra óptica es la más crítica de todo el proceso, pues consiste en realizar una pequeña incisión con una profundidad máxima de cinco micras sobre la superficie del revestimiento de la fibra con un diámetro de 125 micras.

Mientras se realiza la incisión, la herramienta de corte mantiene la tensión constante en la fibra óptica y, una vez realizada, en esa misma tensión la que hace que la fibra óptica rompa por el punto donde se practicó la incisión.

El material con el que se fabrica la cuchilla, encargada de hacer la citada incisión, es un factor determinante en la calidad del corte final.

Se obtienen cortes con desviaciones angulares inferiores a un grado con el empleo del titanio, e incluso se llegan a alcanzar valores inferiores a 0.5° con el empleo de diamantes industriales.

4.1.2 Proceso de Fusión

Para empalmar las fibras ópticas multimodo y monomodo se utilizan máquinas que realizan la soldadura mediante el proceso de fusión de la fibra óptica, conforme los dos métodos siguientes:

- Sistema o método L.I.D.
- Sistema o método L.P.A.S.

Como consecuencia del pequeño diámetro del núcleo de las fibras ópticas, especialmente las monomodo, es fundamental que el alineamiento de las fibras ópticas, previo a la fusión de estas, sea perfecto.

Una vez alineadas perfectamente las fibras ópticas la máquina hace saltar entre sus electrodos un arco eléctrico cuantificable y temporizable en función del tipo y de las características de la fibra óptica que hay que empalmar.

Los parámetros que caracterizan el arco eléctrico, y por tanto su cuantificación y temporización, dependen de los criterios de diseño adoptados por el fabricante de la máquina de fusión. Los criterios de diseño son:

- Corriente continua o corriente alterna.
- Frecuencia de la corriente alterna.

- Número de fibras ópticas que hay que empalmar por fusión.
- Tensión de arco entre electrodos.
- Separación entre electrodos.
- Distancia entre electrodos y fibras ópticas.

En ocasiones las condiciones ambientales de descarga del arco, temperatura, grado de humedad, pueden alterar ligeramente los parámetros preestablecidos para una determinada fibra Óptica, por lo que será necesario realizar una nueva calibración de los parámetros característicos de la fibra óptica.

Los valores típicos de atenuación que se obtienen en la práctica, varían sensiblemente en función del fabricante y del método adoptado por la máquina utilizada.

Se obtienen los mejores valores para máquinas que trabajan conforme al método L.I.D., con valores de atenuación media medida por empalme del orden de 0.02 dB. Si bien, ocasionalmente se llegan a obtener valores de 0.001 dB por empalme.

La desviación admitida para este sistema entre el valor estimado y el valor medido es de 0.05 dB por empalme.

Análogamente los valores de atenuación media medida por empalme para las máquinas que trabajan conforme al método L.P.A.S. se sitúan entre los márgenes de 0.05 dB a 0.07 dB.

En este método no debiera existir desviación alguna entre el valor estimado y el valor medido; sin embargo, se producen, en ocasiones, notables diferencias entre ambos valores que se deben a la falta de resolución de los métodos de proceso de imagen que emplean los fabricantes de estos equipos.

Errores que, si bien son escasos, tan sólo se producen con la utilización del método L.P.A.S. y que no se producen con la utilización del sistema L.I.D..

4.1.3 Protección de los Empalmes de Fusión

A continuación, y tras realizar el empalme e independientemente del método utilizado, es necesario dotar de una protección mecánica al empalme. Para esto existen dos opciones:

La primera opción consiste en la utilización de un protector de tubo termocontráctil armado internamente con una varilla de acero que le confiere una gran rigidez mecánica. Desde el punto de vista mecánico es una buena solución pero desde el punto de vista de su utilización presenta dos inconvenientes.

El primero es que, por tratarse de un tubo, se ha de introducir en el interior de las fibras ópticas que se quieren soldar antes de realizar la fusión de éstas, paso que siendo obvio se olvida frecuentemente y obliga a la repetición de todo el proceso de fusión.

El segundo inconveniente consiste en que para cerrar el citado protector termoretractil, es necesaria la utilización de un horno con temperatura controlada en cuyo interior se introducirá la fibra en el punto exacto donde se produjo la fusión.

4.2 PARAMETROS CARACTERISTICOS DE LAS FIBRAS OPTICAS

Los parámetros característicos que se utilizan en el proceso de empalme por fusión de las fibras ópticas tanto monomodo como multimodo son los siguientes:

4.2.1 Corriente de Limpieza

Tiene la misión de limpiar las impurezas depositadas en las superficies seccionadas de las fibras ópticas.

El proceso consiste en calentar las fibras ópticas provocando la vaporización de las impurezas depositadas sobre las superficies de las fibras ópticas.

Los márgenes de variación de la corriente de limpieza están comprendidos entre 10 mA y 16 mA.

Tiempo de Limpieza

Es el tiempo durante el que se aplica la corriente de limpieza a las fibras ópticas que se van a empalmar.

Los márgenes de variación del tiempo de limpieza oscilan entre 50 msg y 300 msg.

4.2.2 Corriente de Prefusión

Tiene la misión de precalentar las fibras ópticas con lo que redondea los extremos de las fibras ópticas por empalmar pero sin llegar a alcanzar el punto de reblandecimiento del núcleo de la fibra óptica.

Durante la prefusión, la distancia entre los extremos de las fibras ópticas se mantiene constante a pesar de la vaporización de dichos extremos.

La temperatura de los extremos de las fibras ópticas en este paso llega a alcanzar los 1,200 °C.

Los márgenes de variación de la corriente de Prefusión están comprendidos entre 10 mA y 25 mA.

Tiempo de Prefusión

Es el tiempo durante el que aplicamos la corriente de prefusión a las fibras ópticas que se van a empalmar.

Los márgenes de variación del tiempo de prefusión oscilan entre 160 msg y 2,500 msg.

4.2.3. Corriente de Fusión

Tiene la misión de calentar las fibras ópticas con lo que funden y vaporizan los extremos de las fibras ópticas desnudas enfrentadas, núcleo y revestimiento, llegándose a alcanzar el punto de reblandecimiento del cuarzo.

Durante la fusión se produce la vaporización de un segmento de fibra, expresado en micras, equivalente al parámetro *avance según el eje Z*.

Esta vaporización será compensada por el material de aporte.

La temperatura de los extremos de las fibras en este paso llega a alcanzar los 1,700 °C.

Los márgenes de variación de la corriente de fusión están comprendidos entre 10 mA y 25 mA.

Tiempo de Fusión

Es el tiempo durante el que se aplica la corriente de fusión a las fibras ópticas que se van a empalmar.

Los márgenes de variación del tiempo de fusión oscilan entre 0 sg y 10 sg.

Z-Gap

Es la distancia existente entre los extremos seccionados de las fibras ópticas que se van a empalmar.

El microprocesador de la empalmadora de fibra óptica mantiene esta distancia constante durante los procesos de limpieza y prefusión y la anula durante el proceso de fusión.

Los márgenes de variación del Z-Gap, están comprendidos entre 2 y 10 micras.

Avance según el eje Z

Es la distancia que se avanzan los extremos de las fibras ópticas para proveer el material de aporte que se vaporiza durante la fusión.

El material de aporte que se vaporiza durante la fusión son dos segmentos de fibra óptica de longitud el parámetro avanza según el eje Z, expresado en micras.

Los márgenes de variación del avance según el eje Z, oscilan entre 0 y 10 micras.

El avance total que se produce en las fibras según el eje Z es a suma de los parámetros Avance según el eje Z y Z-Gap, al ser ambos una distancia.

Tiempo de Retardo

Es el tiempo que transcurre desde que se inicia el proceso de fusión (Tiempo y Corriente de fusión) al momento en que se produce el avance según el eje Z.

Es el tiempo en que se retarda el autoavance de la fibra óptica con respecto al proceso de fusión de la misma.

En el instante en que finaliza el tiempo de retardo se produce la aportación del material de aporte a la fusión de las fibras ópticas.

Este parámetro surge como consecuencia de que la aportación, del material de aporte, se ha de realizar con las fibras ópticas vaporizadas y en pleno proceso de fusión.

Los márgenes de variación del tiempo de retardo oscilan entre 0 msg y 100 msg.

Punto de Fusión

Este parámetro es específico y hace referencia conjunta al tiempo de fusión y a la corriente de fusión.

Se expresa porcentualmente y representa una división del tiempo de fusión en un número fijo de intervalos, habitualmente 10, en los que la corriente de fusión se fija para cada punto en un valor porcentual del valor que previamente se estipuló para la corriente de fusión.

Su utilización nos permite programar la curva de fusión y aproximarnos al máximo a las curvas ideales recomendadas por los fabricantes de fibras ópticas para la fusión de las mismas.

Los márgenes de variación del punto de fusión oscilan entre el 60 % y el 100 % de la corriente de fusión.

El eje de coordenadas representa la variación porcentual de la corriente de fusión prefijada y el eje de abscisas representa el tiempo de fusión repartido en diez intervalos y por tanto con once puntos por prefijar.

4.2.4. PARAMETROS FIBRAS OPTICAS MONOMODO

Los parámetros característicos para el empalme de las fibras ópticas monomodo con

diámetros 10/125 micras fabricadas por la firma SIECOR, son los siguientes:

- Corriente de limpieza: 13.5 mA.
- Tiempo de limpieza: 100 msg.
- Corriente de prefusión: 14.5 mA.
- Tiempo de prefusión: 250 msg.
- Corriente de fusión: 14.5 mA.
- Tiempo de fusión: 1,200 msg.
- Separación entre fibras, Z-Gap: 7 micras.
- Avance según el eje Z: 5 micras.
- Tiempo de retardo: 50 msg.
- Punto de fusión: Todos del 1 al 11 al 100%.

4.2.5. PARAMETROS FIBRAS OPTICAS MULTIMODO

Los parámetros característicos para el empalme de las fibras ópticas multimodo con perfil escalonado del índice de refracción y diámetros 62.5/125 micras fabricadas por la firma SIECOR, son los siguientes:

- Corriente de limpieza: 13.5 mA.
- Tiempo de limpieza: 100 msg.
- Corriente de prefusión: 14.5 mA.
- Tiempo de prefusión: 250 msg.
- Corriente de fusión: 14.5 mA.
- Tiempo de fusión: 1,200 msg.
- Separación entre fibras, Z-Gap: 7 micras.
- Avance según el eje Z: 5 micras.
- Tiempo de retardo: 50 msg.
- Punto de fusión: Todos del 1 al 11 al 100%.

SIECOR es una marca registrada de SIEMENS-CORNING-GLASS.

4.2.6. PARAMETROS FIBRAS OPTICAS MULTIMODO

Los parámetros característicos para el empalme de las fibras ópticas multimodo con perfil gradual del índice de refracción y diámetros 62.5/125 micras fabricadas por la firma SIECOR, son los siguientes:

- Corriente de limpieza: 13.5 mA.
- Tiempo de limpieza: 100 msg.
- Corriente de prefusión: 14.5 mA.
- Tiempo de prefusión: 250 msg.
- Corriente de fusión: 14.5 mA.

- Tiempo de fusión: 2,000 msg.
- Separación entre fibras, Z-Gap: 7 micras.
- Avance según el eje Z: 10 micras.
- Tiempo de retardo: 50 msg.
- Punto de fusión: Todos del 1 al 11 al 100%.

4.3. CONECTORIZACION DE LA FIBRA OPTICA

La conectorización de la fibra óptica se realiza en base a una diversidad de elementos accesorios y técnicas específicas para cada uno de ellos entre los que cabe destacar:

Conectores Ópticos

Los conectores ópticos constituyen uno de los elementos más importantes de los sistemas de comunicaciones ópticas.

Se define el conector óptico como aquel dispositivo desconectable a voluntad que nos permite interconectar fibras ópticas. Existen los siguientes tipos:

4.3.1 Conectores Ópticos de Férula única

Estos están formados por dos unidades "macho" que se interconectan por medio de una "hembra" común a ambos o acoplador óptico.

Constructivamente constan de una pieza central o cánula, que en lo sucesivo denominaremos férula, que aloja en su interior la fibra óptica desnuda.

Realiza una doble función pues la parte interna de la férula retiene mecánicamente la fibra óptica y la parte exterior de la férula guía a la fibra óptica cuando se inserta el conector en la hembra común de acoplamiento o acoplador óptico.

La parte exterior del conector a cuerpo del mismo es una carcasa metálica que realiza la función de inmovilizar mecánicamente al conector en el acoplador óptico.

Los materiales que habitualmente se emplean para construir las férulas de los conectores ópticos son: Aluminio, acero inoxidable, acero inoxidable niquelado, circonio y materiales cerámicos.

Los materiales que habitualmente se emplean para construir las carcasas de los conectores ópticos son: Acero inoxidable, acero inoxidable niquelado, plástico y polímeros.

La fiabilidad del acoplamiento entre las dos fibras ópticas conectorizadas depende de la precisión en el dimensionado de las férulas y de la concetricidad del núcleo de la férula con el núcleo de la fibra Óptica.

El criterio constructivo que se emplea en la fabricación de las férulas es realizarlas en una sola pieza, mecanizando en su interior un taladro que servirá para centrar la fibra óptica. Esta se fija a la férula mediante un adhesivo epoxy.

Las causas que determinan la excentricidad en el acoplamiento férula-fibra son:

- a) La propia excentricidad en el mecanizado del taladro, y que se puede estimar en el margen de 1 a 1,5 micras.
- b) La excentricidad de alineamiento entre el taladro y el núcleo de la fibra óptica, y que puede tener un valor máximo de 0.6 micras conforme lo especificado por el C.C.I.T.T.
- c) La excentricidad resultante del proceso de fijación con epoxy de la fibra óptica, y que puede alcanzar un valor de 0.4 micras.

En el peor de los casos se pueden alcanzar valores de excentricidad en el acoplamiento férula-fibra de hasta 2,5 micras, valor que en caso de darse entre conectores de fibras monomodo puede llegar a producir incrementos en las atenuaciones de hasta 1 dB.

Los conectores ópticos realizados con férulas de alta precisión presentan un error máximo en su concentricidad de 1 micra y son los idóneos para la conectorización de las fibras Ópticas monomodo. El valor de tolerancia entre el diámetro de la fibra óptica y el del orificio de centrado de la misma, que se maneja habitualmente en los procesos de fabricación, es de 0.5 micras.

4.3.2. Conector SMA (Amphenol)

Este conector es la versión óptica del conector subminiatura tipo A. Es actualmente el más utilizado en los sistemas de transmisión de datos de cortas distancias con fibras ópticas multimodo.

Este tipo de conector es el más probado pues lleva más de diez años en el mercado, está normalizado y constituyó durante años un estándar de Facto.

Sus datos de normalización son conforme a las normas: MIL Standard 186 y MOL- 83522 1A / 2A. Existen dos versiones SMA-905 y SMA-906, la diferencia entre ambas consiste en que el modelo SMA-905 tiene la férula recta, mientras que el modelo SMA-906 tiene un resalte de mayor diámetro a partir de la mitad de la férula. La versión más implantada es la del modelo SMA-905.

El acoplamiento entre conectores se realiza por medio del acoplador SMA que garantiza una separación entre las caras enfrentadas de las fibras ópticas de 3 a 18 micras.

Los valores de atenuación que introducen estos conectores oscilan entre 0.3 dB y 1.5 dB. Un valor típico de atenuación es de 0.8 dB.

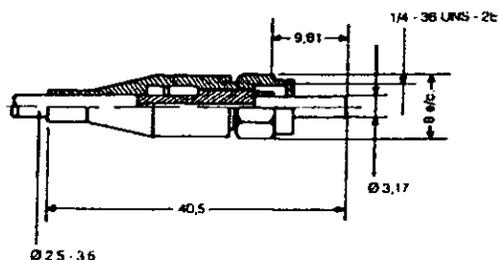


Fig. 4.1 Corte de la sección de un conector SMA-905.

4.3.3. Conector ST

Este conector es un desarrollo de la firma DORRAN y tiene un diseño de tipo bayoneta muy similar al BNC usada con el cable coaxial. Se diferencia del SMA, en que en el conector ST las caras de las fibras están en contacto físico entre sí y bajo presión. Se reducen de esta forma las pérdidas por efecto de la reflexión de Fresnel.

La férula tiene un diámetro de 2.5 mm y originalmente se construía siempre en material cerámico. La cara exterior presenta un elemento de codificación mecánico o chaveta que al encastrar obliga a la férula a adoptar una única posición de trabajo.

Para mantener ambos extremos de las fibras ópticas bajo presión las férulas están sometidas a presión con sendos muelles con la que lógicamente este conector no necesita mantener una distancia prefijada entre férulas.

Para el interconexión de los conectores ST, se utiliza un acoplador ST que presenta la peculiaridad de que la pieza central de guiado construida en material cerámico es solidaria con la parte mecánica exterior del acoplador ST construidas de metal.

El cuerpo exterior del acoplador presenta en ambos sentidos sendos chaveteros donde alojar las chavetas respectivas de las férulas y que obligan a éstas a adoptar su única posición de trabajo.

Su utilización es indistinta para fibras ópticas monomodo y multimodo, si bien está muy impuesto en todas las redes de área local multimodo al haber sido adoptado como un estándar de facto para estas redes para empresas como A.T.T., D.E.C., I.B.M., SIEMENS, SIECOR.

Los valores de atenuación que introducen estos conectores oscilan entre 0.1 dB y 0.4 dB. Un valor típico de atenuación es de 0.25 dB.

La aplicación a este conector de las técnicas y materiales actuales con la fabricación de las

férulas en circonio y de las carcasas exteriores en polímero han dado origen a las versiones ST-86.010 y ST-86.013 en las que se optimizan los valores de las pérdidas de inserción características que introducen los conectores y acopladores ópticos ST.

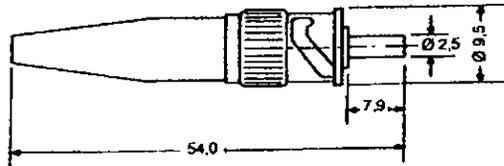


Fig. 4.2 Conector ST.

Los conectores de la versión 86.010 están diseñados para fibras ópticas multimodo e introducen unas pérdidas de inserción típicas de 0.2 dB para fibras ópticas con diámetros de 50/125 micras, y de 0.1 dB para fibras ópticas con diámetros de 62.5/125 micras con unas pérdidas de retorno típicas superiores a 18 dB.

4.3.4. Conector Bicónico

Este conector es un desarrollo de la firma A.T.T. y está formado por una férula en forma troncocónica sin codificar y trabaja como el conector ST manteniendo las caras de las fibras ópticas en contacto y bajo presión.

Presenta la ventaja de su excelente precisión en el centrado debido a la forma troncocónica tanto de la férula como del acoplador Bicónico que es el elemento de interconexión de ambas férulas.

La férula está formada por dos partes: la exterior construida en material plástico que realiza la función de guiado; y la interior construida con material cerámico que realiza las funciones de centrado, posicionado y contacto final con la férula siguiente.

La parte interior de la férula presenta un resalte con respecto a la parte exterior de la misma. No tiene ningún elemento mecánico de codificación que obligue a la férula a adoptar una única posición de trabajo.

Entre la férula y la carcasa exterior del conector hay un muelle que tiene la misión de mantener presionadas ambas férulas entre sí, manteniendo los extremos de las fibras ópticas en contacto y bajo presión.

Este acoplador permite almacenar en su interior una gota de líquido adaptador de índice para de esta forma minimizar las pérdidas introducidas por efecto de reflexión de Fresnel.

El uso del conector bicónico está limitado a unas aplicaciones muy específicas debido a su

elevado coste.

Es aplicable en fibras ópticas monomodo y multimodo.

En el caso de las fibras ópticas monomodo el valor de pérdida de inserción característico introducido por una conexión con dos conectores y un acoplador bicónico es de 0.59 dB.

La figura 4.3 representa las vistas en sección de un conector bicónico, de un acoplador bicónico, así como el detalle de la sección final de la férula del conector bicónico.

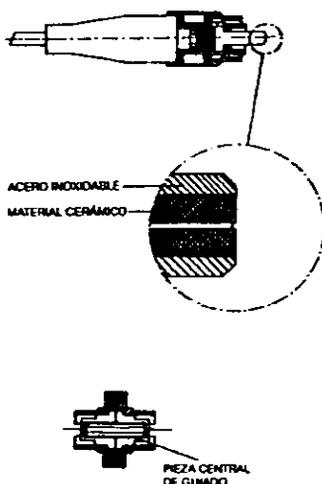


Fig. 4.3 Conector Bicónico.

4.3.5. Conector F.C.

Este conector constituye un estándar en Japón. Su diseño fue auspiciado por N.T.T., su desarrollo corrió a cargo de la firma SEIKO y posteriormente se adoptó por Compañías Telefónicas Norteamericanas y por Compañías Telefónicas Europeas. En España por Telefónica en su versión F.C./P.C. y recientemente en su versión F.C./A.P.C..

Esta formada por una férula totalmente cilíndrica y trabaja como el conector ST manteniendo las caras de las fibras ópticas en contacto y bajo presión por la acción de sendos muelles que presionan las férulas.

La férula esta formada por dos partes: la exterior construida en acero inoxidable que realiza la función de guiado y que presenta una claveta que obliga a la férula a adoptar una única posición de trabajo; y la interior construida con material cerámico que realiza las funciones de centrado,

posicionado y contacto final con la férula siguiente.

La terminación del extremo de la parte interna de la férula es totalmente plana y de aquí provienen las siglas que la denominan: F.C. Face Contact a Superficie de contacto.

En este conector el extremo seccionado de la fibra óptica en la férula presenta una superficie cóncava pulida y se conoce como pulido de la férula F.C..

Para el interconexión de los conectores F.C. se utiliza un acoplador F.C. que presenta la peculiaridad de que la pieza central de guiado construida en una aleación de cobre y berilio es solidaria con la carcasa exterior del acoplador P.C. construida de metal.

El cuerpo exterior del acoplador presenta en ambos sentidos sendos chaveteros donde alojar las clavetas respectivas de las férulas y que obligan a éstas a adoptar su única posición de trabajo.

Posteriormente se modificó este conector desarrollando la versión F.C./P.C. que difiere del P.C. en la forma de terminación del extremo seccionado de la fibra óptica en la férula y que presenta una superficie convexa mucho más apropiada para las fibras ópticas monomodo.

El conector F.C. es apropiado para conectar fibras ópticas multimodo, mientras que para conectar fibras ópticas monomodo es preferible la versión F.C./P.C..

Los conectores de la versión 86.057 diseñados para fibras ópticas multimodo introducen unas pérdidas de inserción típicas de 0.1 dB con unas pérdidas de retorno típicas superiores a 18dB.

4.3.6. Conector SC.

Este conector responde a un nuevo criterio de modularidad, es el conector más moderno y está diseñado para permitir que sea posible apilarle por simple presión..

Está llamado a ser el conector utilizado para llevar la fibra óptica al abonado P.T.I.H..

La carcasa exterior está fabricada en material plástico y su férula es idéntica a la utilizada en los conectores F.C. , por tanto su forma de trabajo es idéntica a la de aquéllos.

La aplicación a este conector de las técnicas y materiales actuales con la fabricación de las férulas en circonio y de las carcasas exteriores en polímero ha dado origen a la versión S.C.-86.061, tanto para fibras ópticas monomodo como multimodo, en la que se optimizan los valores de las pérdidas características que introducen los conectores y acopladores ópticos S.C..

Los conectores de la versión 86.061 diseñadas para fibras ópticas multimodo introducen unas pérdidas de inserción típicas de 0.15 dB para fibras ópticas con diámetros de 50/125 micras, y de 0.1 dB para fibras ópticas con diámetros de 62.5/125 micras con unas pérdidas de retorno típicas superiores a 18 dB.

Los conectores de la versión 86.061 diseñados para fibras ópticas monomodo introducen unas pérdidas de inserción típicas inferiores a 0.2 dB con unas pérdidas de retorno típicas superiores a 30 dB cuando el pulido de la férula es P.C., y superiores a 45 dB cuando el pulido de la férula es Super P.C..

La fig. 4.4 representa las vistas de la sección de un conector S.C., de un acoplador S.C. así como el detalle de la sección final de la férula del conector S.C.

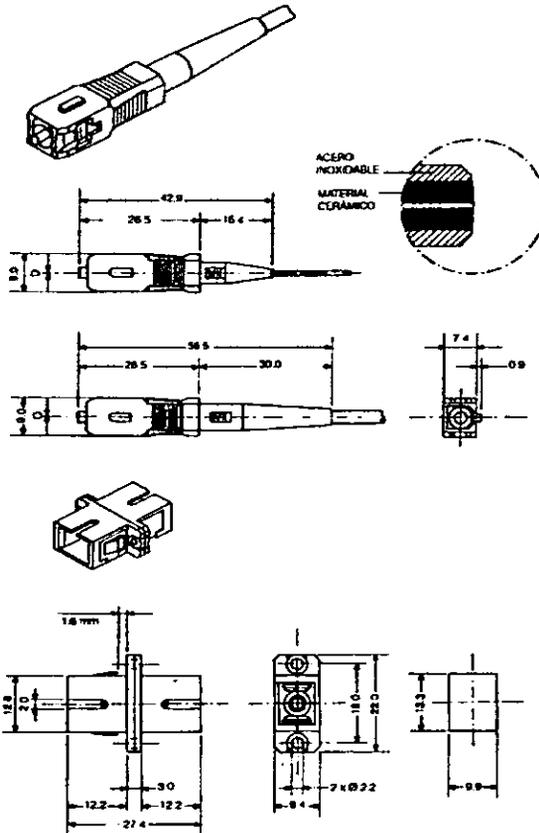


Fig. 4.4 Conector SC.

4.3.7. Conector DUPLEX F.D.D.I.

Este conector dúplex es el conector adaptador con el que se implementan los anillos F.D.D.I. realizados mayoritariamente con fibras ópticas multimodo. También se le conoce como conector O.D.C.

Constituye de hecho una variante de encapsulado de dos conectores S.T. sobre una misma base mecánica y se diferencia del conector ST. en que, al ser un conector dúplex, la retención del mismo no se realiza mediante la bayoneta, sino mediante dos retenedores a ballestillas montadas sobre la base mecánica.

Está amparado por la norma A.N.S.I.-X3T9.5 que es la que normaliza todos los equipos y accesorios destinados a su utilización en redes F.D.D.I..

Esta misma Norma normaliza la fibra óptica multimodo con diámetros de 62.5/125 micras como la que se debe utilizar en el montaje de estos conectores, si bien se admite y tolera en la misma norma la utilización y montaje de estos conectores con fibras ópticas multimodo de diámetros 50/125 micras.

Este conector se suministra completamente montado y verificadas por el fabricante sus pérdidas características de inserción y retorno.

Presenta la particularidad de que siempre viene conectorizado en ambos extremos constituyendo un cordón de interconexión o jumper.

Las dos modalidades de conectorización de los cordones de interconexión son con conectores duplex F.D.D.I. en ambos extremos, o con un conector dúplex F.D.D.I. en un extremo y con sus respectivos dos conectores S.T. en el otro extremo.

En el caso de los anillos F.D.D.I. realizados con fibras ópticas monomodo la norma A.N.S.I.-X3T9.5, normaliza al conector F.C. como el de obligada utilización en las mismas.

Esta misma norma normaliza la fibra óptica monomodo con diámetros de núcleo comprendidos desde 8,7 micras hasta 10 micras y diámetro de revestimiento de 125 micras como la idónea para su montaje en las citados conectores F.C..

En el caso de los anillos F.D.D.I. realizados con fibras ópticas monomodo. la norma A.N.S.I.-X3T9.5 no ampara el conector duplex F.D.D.I. en su versión monomodo y sin embargo esta disponible comercialmente.

Las dos modalidades de conectorización de los condones de interconexión son con conectores duplex F.D.D.I monomodo en ambos extremos, o con un conector duplex F.D.D.I monomodo en un extremo y con sus respectivos dos conectores F.C. en el otro extremo.

Este conector es codificable mediante la inserción de una chaveta o llave que codifica mecánicamente al conector y que, una vez montada, impide cualquier equivocación en el reconexiónado del conector y, por tanto, cualquier error a variación en la topología del anillo que mediante estos conectores se conforma.

La aplicación a este conector de las técnicas y materiales actuales con la fabricación de las férulas en circonio a en material cerámico y de las carcasas exteriores en polímero han dado origen a la versión 86.030, tanto para fibras ópticas monomodo como multimodo, en la que se optimizan los valores de las pérdidas características que introducen los conectores y acopladores ópticos duplex F.D.D.I..

En los conectores de la versión 86.030 diseñados para fibras ópticas multimodo la férula se construye en material cerámico e introducen unas pérdidas de inserción típicas de 0.2 dB para fibras ópticas con diámetros de 50/125 micras, y de 0.15 dB para fibras ópticas con diámetros de 62.5/125 micras con unas pérdidas de retorno típicas superiores a 18 dB.

En los conectores de la versión 86.030 diseñados para fibras ópticas monomodo la férula se construye en circonio e introducen unas pérdidas de inserción típicas inferiores a 0.2 dB con unas pérdidas de retorno típicas superiores a 30 dB cuando el pulido de la férula es P.C., y superiores a 45 dB cuando el pulido de la férula es Super P.C..

El código de colores y las siglas respectivas que se utilizan para codificar los conectores duplex F.D.D.I. son los siguientes:

- Color ROJO - Letra A - Utilizado en estaciones DAS.
- Color AZUL - Letra B - Utilizado en estaciones SAS.
- Color VERDE - Letra M
- Color BLANCO - Letra S Carencia de codificación.

La figura 4.5 representa en perspectiva un conector duplex F.D.D.I. junto con la pieza que permite la codificación del mismo

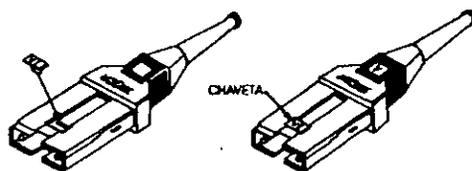


Fig. 4.5 Conector Duplex F.D.D.I.

La figura 4.6 representa la vista en sección de un conector duplex F.D.D.I., de un acoplador duplex F.D.D.I. así como el detalle de la sección final de la férula del conector duplex F.D.D.I.

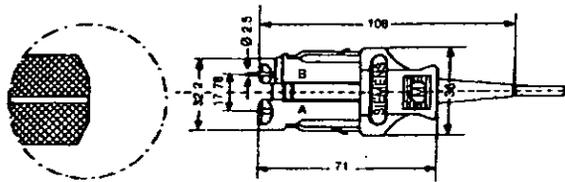


Fig. 4.6 Conector Duplex F.D.D.I.

4.3.8. Conector HMS 10/H.P

Este conector se desarrollo conforme las recomendaciones de la Comisión Electrotécnica Internacional I.E.C.

Cumple las normas D.I.N., y su desarrollo corrió a cargo de las firmas DIAMOND y HEWLETT-PACKARD. DIAMOND es una marca registrada de DIAMOND S.A., 6.6 16 Lozone, Suiza.

Está formado por una férula totalmente cilíndrica con una chaveta en su parte posterior y trabaja como el conector F.C., manteniendo las caras de las fibras en contacto y bajo presión por la acción de sendos muelles que presionan las férulas.

Se trata de un conector de altísima precisión en el que prevalece la selección de los materiales empleados en la fabricación de la férula y del acoplador H.M.S., análogos a los utilizados en la fabricación del conector L.S.A.-D.I.N..

La férula está formada por dos partes: la externa construida en carburo de tungsteno que realiza la función de guiado y presenta una chaveta que obliga a la férula a adoptar una única posición de trabajo; y la interna construida en una aleación de níquel y plata que realiza las funciones de centrado, posicionado y contacto final con la férula siguiente.

Para el interconexionado de los conectores H.M.S. 10/H.P. se utiliza un acoplador H.M.S. que tiene la peculiaridad de que la pieza central de guiado, construida en carburo de tungsteno, es solidaria con la carcasa exterior del acoplador H.M.S. construida de metal.

El valor característico de pérdidas de inserción que introduce una conexión con dos conectores y un acoplador H.M.S. 10/W es de 0.42 dB.

4.4. TÉCNICA DEL PEGADO-PULIDO

En este epígrafe se tratan los pasos necesarios para la conectorización o realización de conectores in situ a partir de ha fibra óptica desnuda y de un conector despiezado de alguno de los tipos antes mencionados. Aunque el proceso difiere levemente en función del fabricante y de los materiales empleados, los pasos fundamentales son los que describen a continuación:

Preparación del Extremo de la Fibra óptica

Consiste en desaislar la fibra óptica a las distancias apropiadas, así como los elementos de tracción, para su pegado y posterior fijación a la férula y al cuerpo del conector respectivamente.

Pegado de la Fibra Optica

Consiste en introducir la fibra Optica desnuda por el orificio de guiado de la férula para, a continuación, depositar el adhesivo y esperar su endurecimiento.

En el caso de los adhesivos Epoxy se puede acelerar su curado por medio de calor o mediante la aplicación de radiación ultravioleta.

Corte y Pulido del Extremo de la Fibra

Hasta aquí la descripción del proceso. Los valores que se obtienen de atenuación no pueden llamarse característicos pues aquí lo único característico es la disparidad entre los valores obtenidos. Son frecuentes los valores de atenuación por encima de 2 dB.

Se trata por tanto de un método, desde mi punto de vista, en absoluto fiable dada la gran disparidad entre los valores de pérdidas que se obtienen.

Las figuras 4.7 representan los pasos fundamentales en el proceso de montaje conexionado y pulido de un conjunto de montaje y conexionado de los existentes en el mercado. Se trata de una operación muy delicada en la que se ha de describir durante todo el proceso de pulido una trayectoria en forma de "ocho" sin modificar el sentido del pulido, y con la adicción repetida de sustancias para lubricar y pulimentar el extremo seccionado de la fibra óptica durante el proceso. Consiste en cortar la fibra óptica en el punto mas cercano posible a la superficie de la férula para, a continuación, preceder a pulir el extremo de la férula. Esta operación se realiza mediante un abrasivo de un grano muy fino del orden de 0.5 Micras.

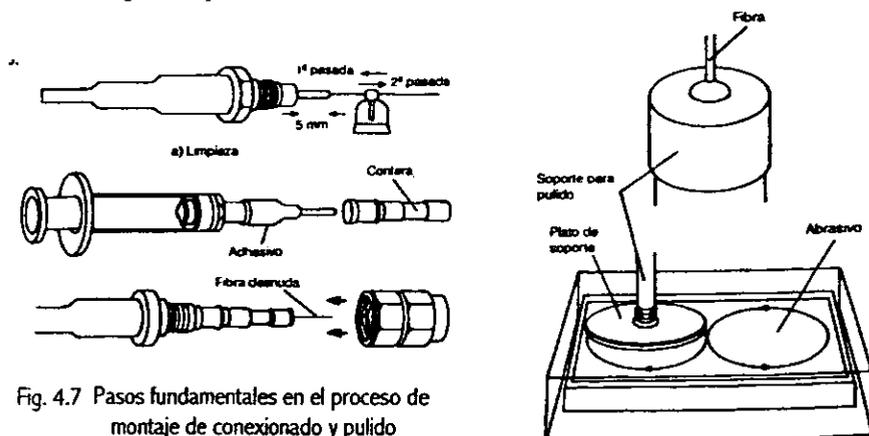


Fig. 4.7 Pasos fundamentales en el proceso de montaje de conexión y pulido

CAPITULO 5

PLANIFICACIÓN DE UN ENLACE DE FIBRA ÓPTICA

En este capítulo se aborda el método que se seguirá y los parámetros que hay que tener en cuenta para planificar un enlace de Fibra Óptica.

Los enlaces de fibra óptica están conformados por un tendido de fibra óptica y por los equipos ópticos de línea: Transmisor, receptor y regeneradores intermedias.

Los parámetros fundamentales de transmisión que hay que tener en cuenta en la planificación del enlace de fibra óptica son los siguientes:

- Atenuación global del enlace.
- Ancho de banda global del enlace.

Todos los cálculos y fórmulas que a continuación se describen y utilizan están orientadas a la obtención de los dos parámetros fundamentales de diseño del enlace antes citados y constituyen la metodología que se seguirá en la planificación de un enlace de fibra óptica.

Existen otros factores que se deben tener en cuenta en la planificación y que son las siguientes:

- Vida útil del enlace.
- Envejecimiento de los equipos.
- Deriva térmica.

Estos tres factores obligan a trabajar con un margen de reserva capaz de garantizar el mantenimiento del enlace, dentro de los márgenes planificados, absorbiendo las inevitables atenuaciones adicionales que se introducirán durante la vida útil del mismo.

Este margen de reserva recibe el nombre de margen de reserva del mismo.

5.1. METODOLOGIA DE LA PLANIFICACION

Seguidamente se describen los pasos sucesivos que se seguirán durante la planificación de un enlace de fibra óptica:

- Medio físico del enlace.
- Planificación del tendido de fibra óptica.
- Cálculo del ancho de banda requerido por el sistema.
- Caracterización del transmisor.
- Caracterización del receptor.
- Análisis global de la viabilidad del enlace.

5.2. MEDIO FÍSICO DEL ENLACE

En este epígrafe se recoge la importancia que tiene el medio físico en el que se realiza el tendido del cable óptico al imponer el medio y su entorno los condicionantes ambientales que habrá de soportar el tendido de fibra óptica.

En los casos en los que sea posible el acceso al medio físico por el que discurre el enlace, se realizará un replanteo sobre el terreno para obtener el conocimiento exacto de todas las características del medio.

Cuando el acceso al medio no es posible como ocurre en el caso de los tendidos submarinos de cables ópticos es necesario el conocimiento exacta de toda una serie de factores inherentes al medio tales como corrientes submarinas, profundidad y presión, zonas de tiburones, orografía del lecho marino etc.

5.2.1. Viabilidad y Configuración del Tendido

Inicialmente se buscará siempre la viabilidad del enlace óptico para, seguidamente y en función de las opciones disponibles, proceder a la configuración del tendido y a la elección del tipo de cable óptico conforme la opción que se considere idónea.

Los criterios en base a los que se configura el tendido se adoptan siempre en función de una serie de condicionantes puntuales técnicos y económicos, prioridades e intereses.

Desde el punto de vista técnico se busca aquella configuración que constituya la mejor solución en función del medio y que permita una mejor protección de los cables de fibra óptica, de los agentes medioambientales y de otros factores externos garantizando de esta forma la vida útil de las fibras Ópticas y por ende del enlace.

5.2.2 Trazado del Tendido

El trazado del tendido depende de la configuración adoptada para él, siendo las posibles configuraciones en función del medio físico las siguientes:

- Configuración del tendido terrestre.
- Configuración del tendido submarino.
- Configuración del tendido aéreo.

Configuración del Tendido Terrestre

En el caso de que la configuración del tendido sea terrestre ésta se adaptará a la topología y a las características geológicas y químicas del terreno.

En los tendidos terrestres el cable óptico puede tenderse canalizado, enterrado o en pared.

Siempre que sea posible se optará por el tendido canalizado en el interior de un subconducto y preferentemente, caso de ser viable, el subconducto se guiará en el interior de una galería a en una canalización con conducto.

Si el tendido es directamente enterrado se elegirá el tipo de cable óptico que se considere óptima con una construcción antiroedores.

Durante el tendido se respetará la profundidad de tendida normalizada para el cable óptico.

Se tenderá el cable óptico sobre un lecho de arena fina; seguidamente, se le cubrirá con una capa de la misma basta formar un prisma de arena sobre el que se colocará una malla señalizadora plástica de un color vivo que delatará la presencia del cable óptico en ulteriores excavaciones.

Durante el tendido se evitarán las pendientes y curvas pronunciadas, así como los cruces por caminos, calles, carreteras, gasoductos, oleoductos, colectores y ríos.

Por lo general se evitarán siempre las zonas húmedas que denotan la presencia de posibles manantiales a aguas superficiales y que constituyen una fuente inagotable de problemas. En el caso de terrenos rocosos y sedimentarios se tenderá siempre el cable óptico en el interior de un subconducto y, a ser posible, canalizando el subconducto en el interior de un prisma de hormigón.

Es necesario conocer el tipo de terreno en el que se va a realizar el tendido a efectos de decidir la época del año idónea para el acceso a la zona de tendido de los vehículos pesados propios del tendido.

Este condicionante podrá llegar a modificar de forma inapelable el trazado del tendido e incluso imposibilitar la realización del mismo al impedir la maniobrabilidad de la maquinaria pesada imprescindible para la realización del tendido del cable óptico.

Las características geológicas y químicas del terreno tales como humus, arcilloso, arenoso, petrolífero, con impurezas químicas etc., constituyen factores críticos en el momento de determinar el tipo de cubierta del cable óptico idónea en función del pH del terreno.

Configuración del Tendido Aéreo

En el caso de que la configuración del tendido sea aérea, los dos tipos de cables que se utilizan en estas redes ópticas son:

- Cable compuesta tierra-óptico u O.P.G.W.
- Cable óptico autoportante.

En el caso específico de las cables ópticos tendidos en las redes de distribución y transporte de las compañías eléctricas entre las torres de alta tensión, la configuración del tendido viene impuesta por el trazado de la propia red de distribución o transporte.

Cuando se opta por el cable compuesta tierra-óptico es necesario conocer una serie de factores externos para poder determinar el tipo idóneo de cable compuesto que mejor se adapta a la utilización prevista.

La corriente de cortocircuito de la línea y el tiempo máximo de cortocircuito de la misma son dos factores críticos a efectos de calcular el calentamiento que soportarían las fibras ópticas guiadas en su interior y así poder escoger el tipo idóneo de cable compuesta tierra-óptico.

Como ejemplo sirva citar que la temperatura de la armadura del cable compuesto tierra-óptica con un diseño de vanguardia puede llegar a alcanzar valores de 160 °C para un tiempo de desconexión del cortocircuito a tierra de 1 segundo. Temperatura que en el caso de diseños más tradicionales puede superar los 250 °C.

Los agentes medioambientales que presentan una mayor influencia en el caso de los tendidos aéreos realizados con este tipo de cables son: Incendios forestales, ambientes salinas, carga de hielo, zonas con caídas habituales de rayos y zonas ventosas.

En el caso de coincidir varios agentes medioambientales simultáneamente, como ocurre en el caso de zonas insulares con un ambiente fuertemente salino, el acero del cable óptico se degrada rápidamente hasta el extremo de que la vida útil de un cable óptico compuesto, en estas zonas, se reduce hasta tan sólo diez años, por lo que es necesario someter al cable óptico a revisiones periódicas una vez pasados los cinco primeros años.

Las cables ópticos autoportantes, habitualmente dieléctricas, se tienden también en las redes de distribución y transporte de las compañías eléctricas entre las torres de alta tensión ó en las redes de comunicación de los ferrocarriles, por lo que la configuración del tendido a viene siempre impuesta por el trazado de la red de distribución a de la red de comunicación de las ferrocarriles coincidente con el trazado viario de los mismos.

Cuando se tienden las cables ópticos autoportantes entre torres de alta tensión es necesario calcular de una forma muy cuidadosa la distancia a la que se realiza su tendido con respecto a los conductores de fase al objeto de que se encuentran en zonas de potencial mínimo para minimizar de esta forma el efecto "Tracking" o de corrientes superficiales que se inducen en la cubierta de las cables ópticas autoportantes.

Este fenómeno se acentúa en las zonas altamente polucionadas, con precipitaciones frecuentes y en líneas de transporte con tensiones superiores a las 110 kV.

En este tipo de cables influyen los mismos agentes medioambientales enumeradas anteriormente para los cables compuestos.

Otro factor externo que influye a la hora de determinar el tipo idóneo de cable autoportante que mejor se adapta a la utilización prevista es el tránsito del cable por zonas y habituales de caza

en las que es frecuente que el cable óptico sufra los impactos de los perdigones disparados por los cazadores.

En este tipo de tendidos es necesario respetar los gálibos estipuladas para el cruce de caminos, calles y carreteras.

La Configuración del Tendido Submarino

En el caso de que la configuración del tendido sea submarina, ésta se adaptará a la topología del fondo marino por lo que son necesarios estudios del perfil geológico y del perfil batimétrico del lecho marino.

El perfil geológico determina las características geológicas del lecho marino tales como bancos de arena, simas, cordilleras submarinas, zonas coralíferas, arrecifes, petrolífero etc.

Todas estas características son críticas en el momento de determinar el tipo de cubierta idónea para el cable óptico submarino o para el protector del cable óptico submarino.

El perfil batimétrico determina las características batimétricas y engloba dentro de su estudio tanto la variación de las profundidades marinas como la distribución de las diferentes especies marinas en sus diversas zonas.

El conocimiento del perfil batimétrico en el momento de determinar la ruta óptima de tendido del cable submarino y sus distancias en función de las profundidades idóneas . Permite también conocer y evitar las zonas de actividad pesquera específicamente de arrastre, así como las zonas pobladas habitualmente por tiburones, tradicionales enemigos de los cables ópticos submarinos.

Existe otra serie de factores, sin llegar a ser críticas en la configuración de un tendido submarino, si es necesario tener en cuenta y que consisten en evitar la travesía del tendido por zonas muy específicas tales como: Zonas de prospecciones petrolíferas, zonas de actividades náuticas de recreo en las que habitualmente anclan yates, zonas de mareas y fuertes corrientes, zonas de actividad militar, zonas donde se encuentran tendidos antiguos cables submarinos en desuso etc.

En el caso de que la configuración del tendido sea submarina los dos tipos de sistemas de cables submarinos que se pueden tender son los siguientes:

Sistemas U.S.S.

Los sistemas sin repetidores ópticos submarinos. Unrepeteatered Submarine Systems, se caracterizan porque no existe equipo electrónico sumergido al encontrarse todos los equipos ópticos de línea en estaciones terrenas.

Son enlaces submarinos de corta distancia, hasta un máximo de 200 km y por tanto de baja o

media profundidad no excediendo nunca los 4.000 metros y que habitualmente enlazan zonas costeras entre si o islas con el continente.

Estos sistemas presentan una serie de ventajas frente a sus homónimos intercontinentales, inherentes a sus características, entre las que cabe citar: Alta fiabilidad, relativamente bajos costes de tendido y de mantenimiento, rapidez en el tendido y facilidad de migrar a nuevas técnicas y velocidades de transmisión.

Todas estas ventajas se traducen en la gran rentabilidad que presentan estos sistemas, lo que les hace idóneos para hacer acometidos en solitario por compañías o administraciones frente a los grandes enlaces intercontinentales y tan sólo pueden ser acometidos en base a decisiones políticas interestatales o por consorcios puntuales en los que interviene un elevado número de compañías o administraciones de telecomunicaciones.

Sistemas R.S.S.

Los sistemas con repetidores ópticos submarinos, Repetereated Submarine Systems, se caracterizan porque si existen equipos ópticos de línea sumergidos.

Son enlaces submarinos de una gran distancia en las que son habituales distancias de 9,500 km y que pueden llegar en ocasiones, como es el caso del cable óptico submarino que enlaza Singapur con Marsella, a alcanzar distancias de 17,800 km.

Son enlaces también de una gran profundidad como consecuencia de las zonas que atraviesan y que pueden llegar a alcanzar profundidades del orden de 8,000 metros y que lógicamente enlazan continentes entre sí.

Las desventajas de éstos sistemas son las inherentes a sus características específicas, que se contraponen a las enumeradas anteriormente para sus homónimos U.S.S., entre las que cabe citar: Media fiabilidad, altísimos costes de tendido y de mantenimiento, lentitud en el tendido y dificultad ante la posibilidad de migrar a nuevas técnicas y velocidades de transmisión.

Todas las desventajas se traducen en que estas sistemas presentan una rentabilidad netamente inferior a la de sus homónimos U.S.S., por lo que han de ser acometidos en base a decisiones políticas interestatales a por consorcios puntuales en los que interviene un elevado número de compañías a administraciones de telecomunicaciones.

Distancia del Enlace

Es necesario determinar la distancia real exacta que existe entre el transmisor y el receptor óptico desglosada por tramos de tendido y por secciones de regeneración preveyendo la viabilidad de las posibles rutas alternativas.

La atenuación que introducen los empalmes de fusión por sección de regeneración depende obviamente del número de empalmes presentes en la misma.

Los empalmes de fusión concatenan los diferentes tramos del cable de fibra óptica hasta constituir la sección de regeneración a distancia existente en el enlace entre dos repetidores consecutivos.

El número de tramos por sección de regeneración depende a su vez de los condicionantes que determinan la longitud máxima de cable que es posible tender o de la longitud máxima de suministro del cable óptico estipulada por el fabricante.

Longitudes habituales de suministro de los cables ópticos son 2,000 O 4,000 metros, aunque en la actualidad algún fabricante suministra hasta 6,000 metros.

El número total de tramos presentes por sección de regeneración viene dado por la siguiente expresión matemática:

$$n = E \left[1 + \left(\frac{\text{Sección de Regeneración}}{\text{Longitud de Suministro}} \right) \right]$$

expresión en la que la notación utilizada ha sido la siguiente:

n - Número total de tramos por sección de regeneración.

E - Parte entera de la expresión entre corchetes.

El número total de empalmes que hay que realizar, por sección de regeneración y por fibra óptica, sin tener en cuenta margen de reparación alguno, viene dado por la siguiente expresión matemática:

$$N=(n+1)$$

Con el margen de reparación habitualmente utilizado el número total de empalmes estimados por sección de regeneración se duplica, con lo que el número total de empalmes viene dado por la siguiente expresión matemática:

$$N=2(n+1)$$

Atenuación introducida por Conectores Ópticos

Para enlaces con un pequeño número de conectores ópticos se puede obtener un valor estimativo inicial válido de esta atenuación mediante el producto del número de conectores por el valor de atenuación unitario estimado.

Para su cálculo se toma un valor medio de atenuación por conector óptico de 0.5 dB, muy

conservador, si bien se ha de tener en cuenta que al intervenir en cada interconexión dos conectores y un acoplador óptico el valor de atenuación que introduce cada interconexión óptica es de 1 dB.

Para el cálculo de la atenuación estimada que introducen los conectores ópticos, en el caso de enlaces con un gran número de repartidores ópticos intermedios y por tanto con un gran número de conectores y de interconexiones ópticos, se introduce una nueva variable en el cálculo, que es la desviación típica del valor medio de atenuación por conector.

La desviación típica del valor medio de atenuación por conector se utiliza para el cálculo de un nuevo factor que representa un margen de seguridad estadísticamente adoptado en cada conexión y que es función del valor de la citada desviación típica y del número de conectores presentes en el tendido.

Este margen, expresado en dB, se suma al valor de atenuación inicialmente obtenido para la determinación del valor estimado de atenuación introducida por los conectores ópticos mediante la siguiente expresión matemática.

$$\alpha_{\text{Total - Conectores}} = N_c \left[\alpha_{\text{Media}} + 3 \left(\frac{\sigma_c}{\sqrt{N_c}} \right) \right]$$

Expresión en la que la notación utilizada ha sido la siguiente:

- $\alpha \sim \text{Total}$ - Pérdidas totales estimadas para N_c conectores ópticos expresadas en dB.
- α_{Media} - Atenuación media que introduce cada conector, expresada en dB.
- σ_c - Desviación típica de cada conexión.
- N_c - Número total de conectores ópticos.

Esta expresión puede utilizarse para la distancia total de tendido, si bien es práctica habitual utilizarla referida a cada una de las secciones de regeneración y al número de conectores presentes en cada una de las mismas.

Margen de Reserva de Atenuación

Constituye un margen de seguridad ante posibles fluctuaciones en el balance global de atenuaciones o en el balance global de potencias del enlace.

Su cálculo se realiza inicialmente mediante la estimación de un valor comprendido entre 0.1 dB/km y 0.3 dB/km para, seguidamente, obtener su valor mediante el producto del valor estimado por la longitud del cable de fibra que hay que tender.

Un valor de margen de reserva de atenuación global adaptada habitualmente es 3 dB, si bien se considera un margen de reserva de atenuación global óptimo el de 6 dB.

Margen de Regeneración

El margen de regeneración de un equipo regenerador de línea es la diferencia acotada, entre los valores máximo y mínimo del margen dinámico del regenerador, expresada en dB.

El margen dinámico del regenerador, viene delimitado por el valor máximo del mismo margen dinámico y por la sensibilidad del regenerador.

Esta característica es la que delimita el ámbito de operatividad del regenerador para una B.E.R. prefijada.

Margen de Recepción

El margen de recepción de un receptor o equipo terminal de línea es la diferencia acotada, entre los valores máximo y mínimo del margen dinámico del receptor, expresada en dB.

El margen dinámico del receptor viene delimitada por el valor máximo que presenta el margen dinámico del receptor y por la sensibilidad del receptor.

Esta característica es la que delimita el ámbito de operatividad del receptor para una B.E.R. dada.

Margen de Reserva del Enlace

El margen de reserva del enlace es la diferencia acotada, entre el valor de la potencia óptica presente en el lado de recepción y la suma de los valores de sensibilidad del receptor y del margen de reserva de atenuación estimado para el enlace, expresada en dB.

El valor total de la atenuación planificada para el enlace la constituye la suma de los valores de sensibilidad del receptor y del margen de reserva de atenuación expresados en dB.

En el caso de enlaces con unas longitudes de tendido tales que hagan necesaria la inclusión de regeneradores intermedios o enlaces con varias secciones de regeneración, este margen de reserva del enlace es desglosable en dos nuevos márgenes de reserva en función del lado del enlace en el que nos encontremos que son los siguientes:

- *Margen de reserva del enlace en lado transmisión.*
- *Margen de reserva del enlace en lado recepción.*

Margen de Reserva del Enlace en Lado Transmisión

El margen de reserva del enlace en lado transmisión es la diferencia acotada, entre el valor de la Potencia óptica presente al final de la primera sección de regeneración y el valor del Margen de

Reserva de Atenuación estimado para este primer tramo del enlace o primera sección de regeneración del mismo, expresada en dB.

Margen de Reserva del Enlace en Lado Recepción

El margen de reserva del enlace en lado recepción es la diferencia acotada, entre el valor de la potencia óptica presente al final de la última sección de regeneración y la suma de los valores de sensibilidad del receptor y del margen de reserva de atenuación estimado para este último tramo del enlace o última sección de regeneración del mismo, expresada en dB.

La longitud total del enlace es la suma de la distancia cubierta por el primer tramo D1, más las distancias respectivas de las cuatro secciones de regeneración.

5.3.1 Cálculo del Ancho de Banda del Tendido

Contrariamente a lo que pudiera creerse el ancho de banda del cable de fibra óptica, y por tanto del tendido, no permanece constante sino que disminuye de forma proporcional con la longitud de tendido de la fibra óptica.

La disminución en el ancho de banda está originada por la dispersión intermodal en las fibras ópticas multimodo, y en el caso de las fibras ópticas monomodo por la dispersión intramodal o cromática.

Como consecuencia de la dependencia del ancho de banda de la longitud de tendido los cables de fibra óptica, tanto monomodo como multimodo, están siempre caracterizados por el producto:

Ancho de Banda x Longitud, expresado en MHz x km.

Esta dependencia obliga al fabricante del cable óptico a referir el ancho de banda característico de cada cable a una distancia patrón o longitud tipo de 1 km.

Como consecuencia, el ancho de banda real del cable óptico para distancias inferiores a 1 km. es siempre superior al ancho de banda característico del cable óptico suministrado por el fabricante.

Exactamente lo contrario ocurre para distancias superiores a 1 km. donde el ancho de banda real del cable óptico es siempre inferior al ancho de banda característico y su valor exacto depende de la serie de factores que seguidamente se enumeran:

- Dispersión modal de la fibra óptica multimodo.
- Dispersión cromática de la fibra óptica monomodo.
- Longitud de onda de trabajo del equipo.
- Fuente de luz y anchura espectral de la misma.
- Longitud de fibra óptica tendida.
- Espectro de emisión de la fuente de luz.
- Acoplamiento entre modos en los empalmes.

El proceso de cálculo del ancho de banda del tendido difiere en función de que el comportamiento de la fibra óptica sea monomodo o multimodo.

A continuación se describen ambos procesos de cálculo.

Ancho de Banda con Fibras Óptica Multimodo

En el caso de los tendidos con fibras ópticas multimodo la determinación exacta del ancho de banda para una longitud específica es de una gran complejidad para los diversos factores que intervienen en su cálculo.

Esta complejidad se evita mediante la utilización de unas gráficas suministradas por los fabricantes de los equipos de línea en las que se determina para cada equipo de línea la variación del ancho de banda en función de la longitud de tendido para un tipo de fibra óptica específico.

En la práctica el método más empleado consiste en la utilización de una fórmula exponencial que se caracteriza por realizar una aproximación en base a linealizar las curvas específicas de cada equipo.

Esta fórmula exponencial permite lograr un compromiso óptimo aunando una aproximación razonable al ancho de banda real junto con una notable simplificación en su cálculo.

$$\left[\frac{1}{B_L} \right] = \frac{1}{B_{f.o.}} \left[\frac{L}{L_o} \right]^{\gamma}$$

La expresión matemática de la fórmula exponencial es la siguiente:
Sin embargo, la expresión habitualmente utilizada para su cálculo es la siguiente:

$$B_L = B_{1.0} L^{-\gamma}$$

La notación utilizada en ambas expresiones es la siguiente:

- $B_{1.0}$ - Ancho de banda característica del cable de fibra óptica utilizado expresado en MHz x 1km.
- B_L - Nuevo ancho de banda del cable de fibra óptica utilizado, pero caracterizado para la nueva longitud L (siempre mayor de 1 km).
- L - Nueva longitud de tendido del cable óptico.
- γ - Exponente longitudinal: se trata de un factor que es variable en función de la longitud pero que se encuentra comprendida entre 0.7 y 0.9.
Su valor habitual de estimación es 0.75.
- L_0 - Longitud característica de 1 km, a la cual está definido el ancho de banda característico del cable óptico: $B_{1.0}$

La figura 5.1 representa las variaciones del ancho de banda en función de la longitud del tendido para un diodo láser trabajando en una longitud de onda de 850 nm conectado a dos fibras ópticas con anchos de banda característicos de 500 MHz x km. y 1.000 MHz x km.

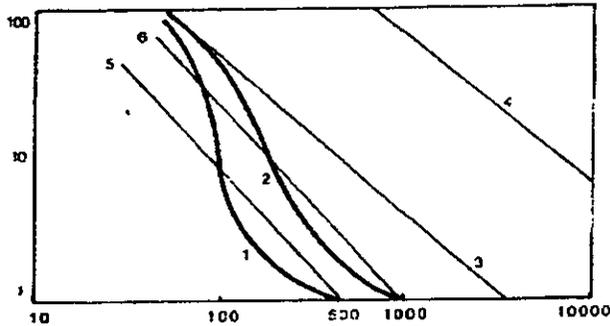


Fig. 5.1 Variaciones en el ancho de banda en función de la longitud del tendido.

La traza nº 1 representa la variación real del ancho de banda en función de la longitud de tendido del cable óptica que se produce al interconexionar un diodo láser, trabajando en una longitud de onda de 850 nm, a una fibra óptica con un ancho de banda característico de 500 MHz x km.

La traza nº 2 representa la variación real del ancho de banda en función de la longitud de tendido del cable óptico que se produce al interconexionar un diodo láser, trabajando en una longitud de onda de 850 nm, a una fibra óptica con un ancho de banda característico de 1.000 MHz x km.

La traza nº 3 representa la limitación máxima en el ancho de banda originada por la dispersión intermodal de la fibra óptica para un diodo láser trabajando en una longitud de onda de 850 nm.

La traza nº 4 representa la limitación máxima en el ancho de banda originada por la dispersión intermodal de la fibra óptica para un diodo láser trabajando en una longitud de onda de 1,300 nm.

La traza nº 5 representa la aproximación a la traza nº 1 mediante la utilización de la fórmula exponencial en la que se ha tomado un valor del exponente longitudinal de 0.8.

Representa, por tanto, una aproximación en la variación del ancho de banda en función de la longitud de tendido del cable óptico que se produce al interconexionar el citado diodo láser a una fibra óptica con un ancho de banda característico de 500 MHz x km.

La traza nº 6 representa la aproximación a la traza nº 2 mediante la utilización de la fórmula exponencial en la que se ha tomado un valor del exponente longitudinal de 0.8.

Representa, por tanto, una aproximación en la variación del ancho de banda en función de la longitud de tendido del cable óptico que se produce al interconectar nuevamente el citado diodo láser a una fibra óptica con un ancho de banda característico de 1,000 MHz x km.

El eje de abscisas representa en escala logarítmica el ancho de banda expresado en MHz x Km. mientras que el eje de ordenadas representa la longitud del tendido del cable óptico expresada en kilómetros.

El paso siguiente consiste en hacer la conversión del ancho de banda óptico, característico del cable obtenido anteriormente, a unidades eléctricas o ancho de banda eléctrico homogeneizando de esta forma los valores de anchos de banda de transmisor y receptor mediante la siguiente relación matemática:

$$B_{\text{Eléctrico}} = B_{\text{Óptico}} \sqrt{2}$$

El valor de ancho de banda que así se obtiene representa la limitación en el ancho de banda que nos introduce el tendido de fibra óptica expresado en unidades eléctricas.

Ancho de Banda con Fibras ópticas Monomodo

El ancho de banda en el caso de los tendidos con fibras ópticas monomodo está determinado por el fenómeno físico de la dispersión cromática.

La dispersión cromática, como ya vimos en el capítulo 2º provoca un retardo en la propagación del haz lumínico, retardo que es directamente proporcional a la longitud de la fibra óptica tendida y que influye de forma proporcional en la disminución del ancho de banda total del tendido.

La expresión matemática que nos permite el cálculo del retardo producido en la propagación del pulso lumínico es la siguiente:

$$\Delta T = \sigma_{\text{cromática}} \Delta \lambda L$$

Expresión en la que la notación utilizada ha sido la siguiente:

- ΔT - Retardo de propagación del pulso lumínico, expresado en picosegundos.
- σ_c - Dispersión cromática de la fibra óptica utilizada, expresada en ps/nm x km
- L - Longitud del tendido del cable de fibra óptica.
- $\Delta \lambda$ - Anchura espectral de la fuente de luz utilizada, expresada en nanómetros.

La expresión matemática que nos relaciona el ancho de banda total del tendido con el retardo producido en la propagación del pulso lumínico, supuesto un espectro de emisión gaussiano de la fuente de luz, es la siguiente:

$$B_T = \frac{0,441}{\Delta T}$$

Expresión en la que la notación utilizada ha sido la siguiente:

- ΔT - Retardo de propagación del pulso lumínico, expresado en picosegundos.
- B_T - Ancho de banda total del tendido de fibra óptica, caracterizado para la longitud total del mismo L , expresada en MHz x km.

5.3.2. Ley de Concatenación del Ancho de Banda

El fenómeno de la concatenación del ancho de banda se produce únicamente cuando se interconexiónan o concatenan diversos tramos de fibras ópticas multimodo con anchos de banda unitarios distintos.

Siempre se verifica que el ancho de banda resultante del tramo total es menor que el menor de los anchos de banda unitarios de los tramos interconexiónados.

El nuevo ancho de banda, del tramo total, se calcula mediante la siguiente expresión matemática:

$$B_T = \left[\sum_{i=1}^n B_i^{-\tau} \right]^{-\frac{1}{\tau}}$$

Expresión en la que la notación utilizada ha sido la siguiente:

- B_T - Ancho de banda total, expresado en MHz x km.
- B_i - Ancho de banda unitario de cada tramo en MHz x km.
- n - Número de tramos.
- τ - Factor de concatenación. (Adimensional).

El valor del factor de concatenación se obtiene empíricamente y es un dato que suministra habitualmente el fabricante de la fibra óptica.

En caso de desconocimiento del valor exacto del factor de concatenación para las fibras ópticas multimodo con perfil gradual del índice de refracción y con dimensiones geométricas de 50/125 micras, su valor fluctúa entre los márgenes comprendidos entre 0.5 y 0.7.

5.4 CALCULO DEL ANCHO DE BANDA REQUERIDO POR EL ENLACE

El cálculo del ancho de banda que requiere el enlace se realiza en base al tipo de señal que se prevé utilizar en el mismo.

En función del tipo de señal, los datos necesarios para el cálculo del ancho de banda del enlace son:

- Señal analógica. Será necesario conocer el ancho de banda de transmisión expresado en MHz y la relación señal/ruido.

- Señal digital. Será necesario conocer la velocidad de transmisión expresada en Mbit/s y el tipo de codificación usada en la misma.

5.4.1. Cálculo del Ancho de Banda requerido por los Sistemas Digitales

El cálculo del ancho de banda que requiere un sistema digital, expresado en MHz, se obtiene del cociente entre la velocidad de transmisión y un parámetro característico del tipo de codificación usada.

En el caso del código R.Z. el parámetro característico del tipo de codificación utilizada (f. codificación) toma el valor de la unidad, mientras que para el caso del código N.R.Z. adopta el valor de 1.4.

El ancho de banda que requiere un sistema digital se obtiene conforme la siguiente expresión matemática:

$$\text{Ancho de Banda (MHz)} = \frac{\text{V transmisión (Mbit/s)}}{\text{f. codificación.}}$$

5.5 CARACTERIZACION DEL TRANSMISOR

La caracterización del transmisor se realiza en base a las características que suministra el fabricante del mismo.

Los datos necesarios para la caracterización del transmisor son los siguientes:

Potencia de emisión en dBm

La potencia de emisión de los equipos se expresa en microwatios, que se habrán de convertir en dBm mediante la siguiente expresión matemática:

$$P(\text{dBm}) = \left[\frac{10 \log P(\mu\text{W})}{1.000 \mu\text{W}} \right]$$

El valor que se obtiene de la potencia de emisión, expresada en dBm, se utilizara en el punto final para realizar el balance global de potencias.

Ancho de Banda del Transmisor

Este dato lo suministra directamente el fabricante del equipo, siempre se facilita en unidades eléctricas y tan solo habrá que cerciorarse de que las unidades del ancho de banda se expresen en MHz.

5.6 CARACTERIZACION DEL RECEPTOR

La caracterización del receptor se realiza en base a las características que suministra el fabricante del mismo.

Los datos necesarios para la caracterización del receptor son los siguientes:

Calculo del margen dinámico

El margen de recepción de los equipos que nos garantiza unos valores de la tasa de error de Bit B.E.R. esta prefijada por el fabricante del equipo.

Los dos cotas que determinan el margen de recepción son, respectivamente, el valor de sensibilidad mínima del receptor y el valor de sensibilidad máxima del mismo.

Ambos valores se expresan en microwatios y su conversión a dBm se realiza de forma análoga a como se realiza la conversión de la potencia de emisión del transmisor.

• Ancho de banda del receptor

Este dato lo suministra directamente el fabricante del equipo, siempre se facilita en unidades eléctricas y tan solo habrá que cerciorarse de que las unidades del ancho de banda se expresen en MHz.

5.7 ANALISIS GLOBAL DE LA VIABILIDAD DEL ENLACE

El análisis global de la viabilidad del enlace se realiza sobre la base de los datos que se obtuvieron en las apartados anteriores y para su comprobación es necesario realizar los pasos siguientes:

5.7.1. Balance Global de Potencias

El balance global de potencias consiste en realizar la suma, en dBm, del plan de atenuaciones del tendido más la potencia de emisión del enlace.

Seguidamente, se comprueba que el valor de la suma, en dBm, se encuentra dentro del margen dinámico del receptor y por tanto el sistema es viable desde el punto de vista del balance de potencias.

Un dato adicional importante es el conocimiento del margen de reserva del enlace por ser un nuevo margen que es necesario prever y que aumentara el valor que ya teníamos estimado con anterioridad para el margen de reserva de atenuación.

5.7.2. Ancho de Banda Global del Enlace

El ancho de banda global del enlace se calcula mediante el uso de una expresión matemática, siendo los datos necesarios para su cálculo los siguientes:

- Ancho de banda del tendido.
- Ancho de banda del transmisor.
- Ancho de banda del receptor.

$$B_{\text{Enlace}} = \left[\frac{1}{\sqrt{\left[\frac{1}{B_{\text{Tendido}}^2} \right] \left[\frac{1}{B_{\text{Transmisor}}^2} \right] \left[\frac{1}{B_{\text{Receptor}}^2} \right]}} \right]$$

En este supuesto el enlace es viable desde el punto de vista del ancho de banda del enlace.

Solo en el caso de que los dos condicionantes que hemos expuesto en este apartado se cumplan, balance global de potencias y ancho de banda global del enlace, tras haber seguido la planificación hasta aquí expuesta podremos asegurar que la viabilidad del enlace está garantizada y, por tanto, su funcionamiento asegurado.

5.8 CÓDIGOS DE LINEA

Los códigos de línea que se utilizan durante el proceso de codificación de las señales ópticas, previamente a la propagación de las mismas a través de las fibras ópticas, son los siguientes:

5.8.1. Código N.R.Z. Unipolar

El código N.R.Z. unipolar se caracteriza porque la señal se define entre dos valores de amplitud predeterminados: Desde cero hasta + V y desde - V, hasta cero.

La codificación de la señal se realiza en base a hacer corresponder al "cero" de la señal digital el valor de amplitud cero de la señal codificada, ambas señales con idéntico tiempo de bit T.

El criterio de codificación seguido con el "uno" de la señal digital consiste en hacerle corresponder el valor de amplitud uno de la señal codificada, ambas señales con idéntico tiempo de bit T.

La figura 5.2 representa la información binaria de la señal digital: 1,0,1,0,0,1,1,0, codificada en base a un código N.R.Z. Unipolar en el que + V y cero son los valores de amplitud de la señal codificada y T se corresponde con el tiempo de bit de la señal digital y con el tiempo de 0 tiempo del nivel de modulación de la señal codificada.

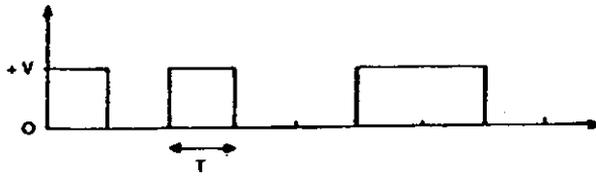


Fig. 5.2 Información binaria codificada en base a un código N.R.Z. Unipolar.

5.8.2 Código N.R.Z. Polar

El código N.R.Z. polar se caracteriza porque la señal se define entre tres valores característicos.

Dos valores de amplitud predeterminados: Desde cero hasta $+V$. y desde $-V$ hasta cero; y por el tercer valor característico que es el paso por cero de la señal.

La codificación de la señal se realiza en base a asignar al "cero" de la señal digital, el valor de amplitud cero de la señal codificada, ambas señales con idéntico tiempo de bit T .

El criterio de codificación seguido con el "uno" de la señal digital consiste en realizar inversiones alternas en el proceso de codificación mediante impulsos positivos y negativos.

Inicialmente, al primer "uno" de la señal digital con un tiempo de bit T se le asigna el nivel $+V$ con una duración T .

A continuación, se realiza la inversión en el proceso de codificación a la espera de la llegada del siguiente "uno" de la señal digital, el cual se codificará asignándole el nivel $-V$ con una duración o tiempo de bit T .

En este momento se realiza de nuevo la inversión en el proceso de codificación de la señal con lo que se adopta el criterio de codificación que se utilizó para el primer "uno".

Todo el proceso se repite sucesivamente de forma cíclica para la codificación de todos los "unos" de la señal digital.

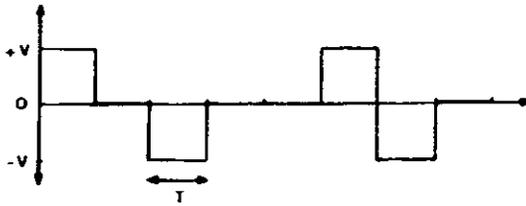


Fig. 5.3 Información binaria codificada en base a un código N.R.Z. Polar.

La figura 5.3 representa la información binaria de la señal digital: 1,0,1,0,0,1,1,0, codificada en base a un código N.R.Z. polar en el que $+v$, $-v$ y cero son los valores de amplitud de la señal codificada y T se corresponde con el tiempo de bit de la señal digital y con el tiempo de bit o tiempo del nivel de modulación de la señal codificada.

5.8.3. Código R.Z. Unipolar

El código R.Z. unipolar se caracteriza porque la señal se define entre dos valores de amplitud predeterminados: Desde cero hasta $+V$, y desde $-V$ hasta cero.

La codificación de la señal se realiza en base a asignar al "cero" de la señal digital con un tiempo de bit T dos niveles consecutivos de amplitud cero de la señal codificada con una duración unitaria respectiva de $T/2$.

El criterio de codificación seguido con el "uno" de la señal digital con un tiempo de bit T consiste en asignar dos niveles consecutivos de amplitudes uno y cero de la señal codificada con duración unitaria respectiva de $T/2$.

La figura 5.4 representa la información binaria de la señal digital: 1,0,1,0,0,1,1,0, codificada en base a un código R.Z. unipolar en el que $+V$ y cero son los valores de amplitud de la señal codificada y T se corresponde con el tiempo de bit de la señal digital mientras que $T/2$ se corresponde con el tiempo del nivel de modulación de la señal codificada.

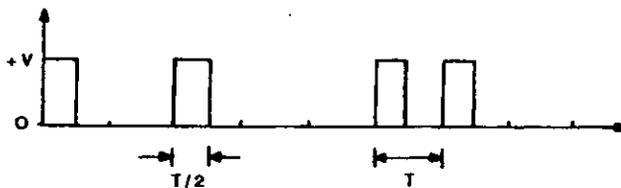


Fig. 5.4 Información binaria codificada en base a un código R.Z. Unipolar.

5.8.4 Código R.Z. Polar

El código R.Z. polar se caracteriza porque la señal se define entre tres valores de amplitud característicos:

Dos valores de amplitud predeterminados: Desde cero hasta $+V$, y desde $-V$ hasta cero; y por el tercer valor característico que es el paso por cero de la señal.

La codificación de la señal se realiza en base a asignar al "cero" de la señal digital con un tiempo de bit T , dos niveles consecutivos de amplitud cero de la señal codificada con una duración unitaria respectiva de $T/2$.

El criterio de codificación seguida con el "uno" de la señal digital consiste en realizar inversiones alternas en el proceso de codificación mediante impulsos positivos y negativos.

Inicialmente, al primer "uno" de la señal digital con un tiempo de bit T se le asignan dos niveles consecutivos de amplitudes: $+V$ y cero de la señal codificada con duración unitaria respectiva de $T/2$.

A continuación, se realiza la inversión en el proceso de codificación a la espera de la llegada del siguiente "uno" de la señal digital, el cual se codificará asignándole dos niveles consecutivos de amplitudes: $-V$ y cero de la señal codificada con una duración unitaria respectiva de $T/2$.

En este momento se realiza de nuevo la inversión en el proceso de codificación de la señal, con lo que se adopta el criterio de codificación que se utilizó para el primer "uno".

Todo el proceso se repite sucesivamente de forma cíclica, para la codificación de todos los "unos" de la señal digital.

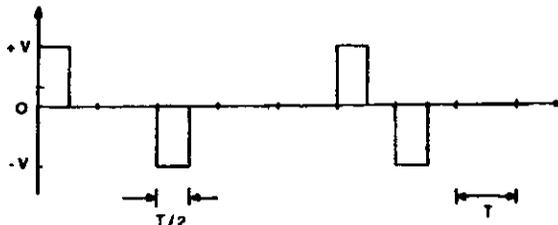


Fig. 5.5 Información binaria codificada en base a un código R. Z. Polar.

La figura 5.5 representa la información binaria de la señal digital: 1,0,1,0,0,1,1,0, codificada en base a un código R.Z. polar en el que $+V$, $-V$ y cero son los valores de amplitud de la señal

codificada y T se corresponde con el tiempo de bit de la señal digital, mientras que $T/2$ se corresponde con el tiempo del nivel de modulación de la señal codificada.

5.8.5 Código MANCHESTER Unipolar

El código MANCHESTER unipolar se caracteriza porque la señal se define entre dos valores de amplitud predeterminados: desde cero hasta $+V$, y desde $-V$ hasta cero.

El criterio de codificación seguido con el "cero" y con el "uno" de la señal digital consiste en realizar inversiones alternas en el proceso de codificación mediante impulsos positivos y negativos.

La codificación de la señal se realiza en base a asignar al "cero" de la señal digital con un tiempo de bit T dos niveles consecutivos de amplitudes: cero y $+V$ de la señal codificada con duración unitaria respectiva de $T/2$.

El criterio de codificación seguida con el "uno" de la señal digital con un tiempo de bit T consiste en asignarle dos niveles consecutivos de amplitudes: $+V$ y cero de la señal codificada con duración unitaria respectiva de $T/2$.

La figura 5.6 representa la información binaria de la señal digital: 1,0,1,0,0,1,1,0. codificada en base a un código Manchester unipolar en el que $+V$ y cero son los valores de amplitud de la señal codificada y T se corresponde con el tiempo de bit de la señal digital, mientras que $T/2$ se corresponde con el tiempo del nivel de modulación de la señal codificada.

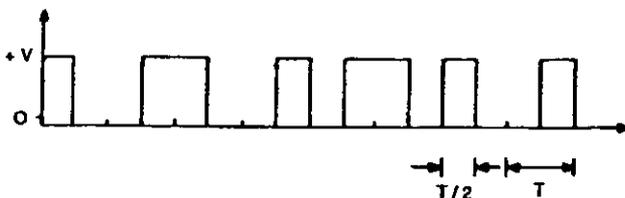


Fig. 5.6 Información binaria codificada en base a un código Manchester Unipolar.

5.8.6. Códigos H.D.B. (H.D.B.3)

Las siglas de los códigos H.D.B.n, significan HIGH DENSITY BIPOLAR Code Order n o código bipolar de alta densidad de orden n.

La codificación de la señal se realiza en base a asignar al "cero" de la señal digital, el valor de amplitud cero de la señal codificada, ambas señales con idéntico tiempo de bit T .

El criterio de codificación seguido con el "uno" de la señal digital consiste en realizar inversiones alternas modificadas en el proceso de codificación mediante impulsos positivos y negativos.

Los códigos H.D.B. son códigos de inversión alterna a polares modificados en los que se introducen intencionalmente, violaciones de la regla estricta de la inversión alterna en la codificación de los niveles "uno" de la señal digital.

Estas violaciones se realizan con arreglo a una serie de reglas predeterminadas para lograr una mínima longitud de secuencias sin impulsos que facilitan la recuperación del sincronismo y, por tanto, la regeneración de la señal.

En un código H.D.B.n, se transmiten señales binarias con secuencias de hasta "n bits cero" como en los códigos polares, pero sustituyéndose cada secuencia de (n+1) bits consecutivos cero por una secuencia de impulsos con un impulso de violación. con lo que se obtiene una secuencia con un número máximo de n bits consecutivos cero.

El impulso de violación presenta siempre la misma polaridad que el impulso anterior.

En la práctica se utiliza el código denominado H.D.B.3: se trata de un código ternario y que admite por tanto tres niveles de cuantificación en la codificación, por lo que la señal se define entre tres valores de amplitud característicos.

Dos valores de amplitud predeterminados: Desde cero baste + V, y desde - V hasta cero; y por el tercer valor característico que es el paso por cero de la señal.

Su característica fundamental es la de ser capaz de tolerar hasta un máximo de tres bits consecutivos sin que se produzca un cambio de nivel, impulso de violación o impulso bipolar.

Las secuencias de cuatro bits consecutivos se sustituyen por cualquiera de las dos configuraciones siguientes: 0, 0, 0, V, ó B, 0, 0, V,.

En estas secuencias B es un impulso bipolar, es decir, un impulse con polaridad opuesta a la del impulso precedente, y V es un impulso de violación.

La elección de una de las dos configuraciones de impulsos se realiza de forme tal que sea impar el número de impulsos bipolares entre dos impulsos V consecutivos, lo que asegura que los impulsos V sean de polaridad alterna.

La figura 5.7 representa la información binaria de la señal digital: 1, 1, 0, 1, 0,0, 0, 0, 0, 0, 1,0, 1,0, codificada en base a un código H.D.B.3 en el que + V, -V y cero son los valores de amplitud de la señal codificada y T se corresponde con el tiempo de bit de la señal digital y con al tiempo del nivel de modulación de la señal codificada.

CAPITULO 6

INTERFACE DE DATOS DE FIBRA DISTRIBUIDA (FDDI)

FDDI (Fiber Distributed Data Interface) es una evolución de Ethernet, token bus, ... a protocolos de mayores prestaciones. Propuesto por ANSI (standard X3T9.5).

Hacia 1980, comienzan a necesitarse redes que transmiten de datos a alta velocidad. También se necesitaba transmitir datos en tiempos cortos y acotados. En respuesta a estas necesidades, se desarrolla FDDI. FDDI ofrece 100 Mbps, con hasta 500 estaciones conectadas y un máximo de 100 km entre ellas. Las estaciones se conectan en un doble anillo de fibra óptica por seguridad. Por su alta velocidad de transmisión, también puede usarse como una red de conexión entre redes más pequeñas. Esta es la función que cumplir la red FDDI de la Universidad.

6.1 FUNCIONES DE FDDI

Las funciones de FDDI se define en el SMT (Satino Management). Abarcan la capa física (PMD y PHY) y parte de la capa de enlace (MAC). Por ello, FDDI se instala en los niveles más bajos de la torre OSI. No habría problemas en usar otros protocolos para las capas superiores, en principio. Por contra, las implementaciones sólo han conseguido encapsular correctamente ARP e IP sobre FDDI.

6.1.1. Nivel Físico: PMD

En el nivel dependiente del medio (PMD), FDDI no impone restricciones al tipo de fibra que debe usarse. Puede utilizarse fibra multimodo (MMF), o fibra monomodo (SMF). Las fibras serán de dimensiones 62.5/125 o 85/125 (diámetro del núcleo/diámetro de la fibra). MMF necesitan mejores emisores y receptores que SMF para mantener las mismas longitudes de enlace. En cualquier caso, la potencia de transmisión mínima es de -16 dBm y la potencia recibida mínima es de -26 dBm, lo que deja un margen de 11 dBs para pérdidas. Los transmisores pueden ser LED o láseres. Los receptores pueden ser diodos PIN o de avalancha. Se trabaja en la ventana de 1,300 nanómetros. En una misma red puede haber enlaces con fibras MMF y SMF, aunque deben examinarse con cuidado. Se recomienda emplear conectores SC preferentemente. También pueden emplearse conectores ST.

6.1.2. Nivel Físico: PHY

El otro subnivel físico, PHY, define el protocolo de introducción de datos en la fibra. FDDI introduce redundancia en los datos en transmisión. Usa un código 4B/5B, transmite 5 bits por cada 4 bits que le envía el nivel superior. La elección de los códigos se hizo para equilibrar la potencia en continuo del código, y evitar secuencias de 0's o 1's demasiado largas. El régimen binario efectivo que soporta la fibra son 125 Mbps.

MAC define la longitud máxima de trama en 4500 bytes para evitar problemas de desincronización. No hay longitud de trama mínima

Una estación que está transmitiendo trama debe retirarla del anillo. Mientras lo hace, puede introducir nuevas tramas, o transmitir caracteres IDLE, hasta retirarla completamente. Dado que protocolos superiores (UDP, por ejemplo) definen longitudes de trama diferentes, las estaciones deben estar preparadas para fragmentar/ensamblar paquetes cuando sea necesario.

6.1.3. Nivel de enlace: MAC

MAC aporta las mayores novedades de FDDI. FDDI soporta dos tipos de tráfico:

- * Tráfico síncrono: voz, imágenes, ..., información que debe ser transmitida antes de un determinado tiempo. Podría decirse que es tráfico de datos en tiempo real.

- * Tráfico asíncrono: e-mail, ftp, ..., información para la cual el tiempo que tarde en llegar al destino no es el factor decisivo.

La filosofía que persigue FDDI es atender primero el tráfico síncrono y después el tráfico asíncrono. Para ello, cada estación tiene varios temporizadores:

- * Token Rotation Time (TRT): tiempo transcurrido desde que llegó el último testigo.

- * Token Hold Time (THT): tiempo máximo que una estación puede poseer el testigo.

Todas las estaciones tienen un parámetro fijo, el Target Token Rotation Time (TTRT), que fija el tiempo que tarda el testigo en dar una vuelta al anillo, y cada una tiene un parámetro propio, Synchronous Time (ST o Ci, dependiendo de autores). Este parámetro fija el tiempo máximo que una estación está transmitiendo tráfico síncrono.

- 1) Cuando llega el testigo, comprobamos que ha llegado a tiempo. Para ello, vemos si $TRT > 0$. Si es cierto, la estación captura el testigo. Si es falso, la estación la estación lo deja pasar a la siguiente estación. En cualquier caso, TRT se reinicializa a TTRT.
- 2) Una vez la estación posee el testigo, el valor de TRT se carga en THT. Se comienzan a transmitir tramas síncronas.
- 3) THT llega a cero. En ese caso, se termina el turno de la estación, y se pasa el testigo a la siguiente.
- 4) Antes de que THT llegue a 0 se acaban las tramas síncronas que tenía la estación preparada para transmitir. Se transmiten ahora todas aquellas tramas asíncronas de que se dispongan, hasta que THT llegue a cero.
- 5) Si acabamos también las tramas asíncronas, pasamos el testigo.

Se plantea un problema cuando se acaba el THT mientras se está transmitiendo una trama. Este fenómeno se llama *overrun*.

El intervalo máximo entre dos testigos en una estación ronda $2 * TTRT$.

Las estaciones se conectan mediante un doble anillo de fibra óptica. En cada anillo, la información circula en una dirección. En caso de que caiga un enlace entre dos estaciones, las fibras se puentean internamente en las estaciones, de modo que el anillo no se para. Esta configuración clasifica las estaciones en dos clases:

- * DAS : Dual Attachment Station. Estación conectada al doble anillo. Capaces de reconfigurarse. Mas caras.
- * SAS : Single Attachment Station. Estación conectada a uno de los dos anillos solamente. Mas baratas.

6.2 OTRAS SOLUCIONES ALTERNATIVAS.

Se han planteado otras soluciones al standard original expuesto anteriormente. Todas las soluciones se basan en el estándar FDDI, aunque varían algunos niveles, para adaptarlo a determinadas situaciones. Las soluciones mas atractivas son CDDI, FDDI-II, y LCF-FDDI

6.2.1. CDDI

CDDI (Copper Distributed Data Interface) no es otra cosa que FDDI utilizando cables de cobre en lugar de fibra óptica como medio de transmisión. Sólo afecta al PMD. Para seguir cumpliendo los requerimientos de ruido y velocidad de transmisión se reduce la distancia máxima de enlace a 100 m. Para evitar también la radiación que produce el par trenzado sin blindaje (Unshielded Twisted Pair, UTP) cuando se utilice este medio de transmisión se utiliza un código diferente, NRZ- III. Básicamente, es NRZ con tres niveles, subiendo y bajando niveles hasta llegar a los extremos. De este modo, baja la frecuencia máxima que soporta el par trenzado, reduciéndose las radiaciones.

La principal ventaja que aporta CDDI es la reducción en los costes de implantación de FDDI, sobre todo cuando se quiere hacer llegar FDDI hasta los terminales de usuario (FDDI- on-desk). Los terminales suelen estar ya cableados, por lo que sustituir el cobre por la fibra óptica aparece como un coste innecesario en muchos casos. Además, los receptores y transmisores ópticos que emplea FDDI resultan demasiado caros frente a los dispositivos electrónicos que utiliza CDDI. Por lo demás, los cambios en el código no son relevantes y la reducción en la distancia máxima no es importante, puesto que CDDI se utilizaría dentro de los edificios, en los que las distancias suelen ser inferiores a esos 100 metros críticos.

6.2.2. FDDI-II

FDDI-II cambia el servicio que ofrece. Amplía SMT hasta completar el nivel de enlace. Ahora el nivel de red no ve un único canal de 100 Mbps sino que este canal se divide en 16 canales

asíncronos de 6.144 Mbps (WBC), y un canal de transmisión de paquetes, de 768 Kbps (PDG). Las tramas son de 0.125 ms y contienen intercalados los distintos canales. Inicialmente, se envían 2.5 bytes de preámbulo que sincronizan el reloj de 8 KHz que inicia las tramas y 12 bytes de cabecera de la trama. Se envía el byte correspondiente al PDG. Luego se envía un byte de cada canal. Cuando se llega a un byte múltiplo de 8 en los WBC se vuelve a enviar 1 byte de PDG.

Usualmente, los testigos se pasan a través del PDG.

Los WBC pueden subdividirse en canales menores, en funciones de las necesidades de las estaciones.

Aparece ahora un nuevo tipo de tráfico, de prioridad mayor que el síncrono de FDDI, que es el tráfico conmutado. Hay dos testigos, testigo restringido y testigo sin restricciones. Dependiendo de las restricciones en tiempo de llegada de las tramas se utiliza una combinación de tráfico y testigos.

6.2.3. LCF-PMD

LCF-PMD (Low-Cost Fiber Physical Medium Dependent) surge también como ante necesidad económica. Se busca reducir el coste de implantación de una red FDDI. Para ello, se cambia de nuevo el PMD. Se introduce un nuevos tipos de fibra (200/230), más baratos y de peores prestaciones. Igual que en CDDI, se amplían los márgenes de ruido, y se reducen las longitudes de los enlaces, ahora hasta los 500 metros. Se reduce la potencia mínima de transmisión en 2 dBm. Se relaja en 2 dBm la potencia mínima de recepción, quedando sólo 7 dBs para pérdidas.

El resto del protocolo no se altera.

Rendimiento

El rendimiento de FDDI se mide en dos aspectos: Retardo de las tramas en llegar a la estación destino y cantidad de datos que llegan a destino por segundo. Un primer parámetro de importancia es el TTRT. Si es pequeño, el testigo circula muy rápidamente, de modo que el retardo es pequeño. Si es grande, el throughput es mayor, pero estaciones con mucha carga retrasan a las demás. Los valores típicos de TTRT rondan los 4 ms, según [2] o los 165 ms, según [6]. Otro factor a tener en cuenta es el tamaño de los paquetes. Si es grande, aumenta el throughput. Si es pequeño, disminuye el retardo.

En conclusión, FDDI ofrece transmisión de datos a alta velocidad, en tiempo real o no, entre un número de estaciones alto y separadas una distancia elevada. También puede servir como red de conexión entre LANs que están funcionando previamente. Se ha sabido adaptar a las características de entornos en los que resulta muy deseable disponer de ella, pero su elevado coste inicial parece prohibir. Esto hace de FDDI y LCF alternativas muy interesantes para LANs. Sin embargo, la irrupción de ATM ha hecho que FDDI se considere "la hermana pequeña" de las redes de comunicación óptica. ATM ha hecho que FDDI ya no sea un campo de investigación tan activo como fue a finales de los 80, ni siquiera en FDDI-II, que aprovecha parte de las ideas que utiliza las ideas de ATM. Por ejemplo, la inclusión de canales virtuales conmutados.

CONCLUSIONES.

La tecnología de fibras ópticas ha cambiado rápidamente a través de las dos generaciones de sistemas (índice gradual a 850nm y monomodo a 1300nm), junto con algunas generaciones parciales intermedias. Se han establecido firmemente en la producción y están desempeñando grandes mercados de producción. Por otro lado, la investigación y el desarrollo han demostrado que existen capacidades adicionales sustanciales, ya sea para ampliar la distancia entre repetidores o la velocidad de transmisión o ambas cosas. Las necesidades de los diversos mercados de gran cobertura (redes de comunicaciones) están conduciendo al desarrollo de sistemas de altas prestaciones que satisfagan sus requisitos especiales. El interés de la investigación se ha centrado en gran medida en las telecomunicaciones y la transmisión de datos, los éxitos de la tecnología pueden aplicarse para proporcionar una buena relación efectividad/costo, ancho de banda y comunicaciones versátiles directamente ligadas a las premisas del usuario.

Un sistema de comunicaciones ópticas es una forma de transmitir información cuyo soporte básico es la luz. La información viaja en forma de luz a lo largo de dicho sistema. Las ondas de luz, al igual que las de radio, son una forma de radiación electromagnética. Es por ello que pueden usarse, al igual que se usan las ondas de radio para la transmisión de información.

Ha sido generalmente aceptado que durante las dos últimas décadas del siglo 20, las técnicas de comunicación por fibra óptica se han visto firmemente establecidas en la mayoría de los países desarrollados del mundo. Desde la primera descripción del láser en 1958 y los primeros sistemas de comunicaciones de onda de luz, el progreso ha sido el resultado de un esfuerzo interdisciplinario incluyendo a ingenieros eléctricos, físicos, e ingenieros y científicos de materiales. Cada grupo ha estimulado y fortalecido el trabajo de los otros; sin esta estrecha colaboración, la conclusión de sistemas explotables simplemente no habría ocurrido.

Una fibra multimodo se usa comúnmente en aplicaciones de comunicación de corta distancia (generalmente menos de unos pocos kilómetros). La electrónica del equipo terminal es más barata y es, de ordinario, simple de diseñar. Como fuente de luz se usa normalmente un LED. Debido al gran tamaño del núcleo de una fibra multimodo, es más fácil de conectar y tiene una mayor tolerancia a componentes de menor precisión.

Una fibra de índice escalón es una fibra óptica con índices de refracción del núcleo y del revestimiento diferentes, pero uniformes. En la frontera núcleo-revestimiento hay un cambio abrupto en el índice de refracción. El confinamiento de la luz en cualquier fibra de índice escalón se debe a las propiedades de reflexión en la frontera núcleo-revestimiento. Su origen está en la diferencia de los índices de refracción de los dos materiales.

Una fibra monomodo es una fibra Óptica en la que sólo se propaga un modo de luz (un camino para los rayos de luz por el centro de la fibra. Esto se logra reduciendo del diámetro del núcleo de la fibra hasta un tamaño que sólo permite un modo de propagación. El tamaño del núcleo de la fibra monomodo está comprendido entre 8 y 10 nm.

En mercados donde ya existe solución para los principales problemas en curso, la viabilidad económica junto con el potencial crecimiento tienden a determinar la utilización de la tecnología. La industria de las telecomunicaciones, el usuario potencial más importante de las fibras ópticas, representa un mercado establecido y asentado. Se han realizado enormes inversiones en tecnología de cable convencional, haciendo poco aconsejable el que una nueva tecnología altere lo ya implantado.

Adicionalmente los problemas que resultan de la necesidad de incrementar la capacidad pueden ser resueltos utilizando otras tecnologías, distintas a las que implican fibra óptica, como por ejemplo satélites y microondas. La entrada de las fibras ópticas en el mercado de las telecomunicaciones puede ser más lenta de lo que la tecnología puede permitir, y su impacto en el mercado esta determinado por el costo y las prestaciones de los sistemas por fibra óptica.

BIBLIOGRAFIA.

COMUNICACIONES ÓPTICAS

JOSE MARTÍN SANZ

ED. PARANINFO

INSTALACIONES DE FIBRA ÓPTICA

BOB CHOMYCZ

ED. Mc. GRAW HILL.

INTRODUCCIÓN A LAS TELECOMUNICACIONES

POR FIBRA ÓPTICA

JEAN PIERRE NÉROU

FIBER OPTICS COMUNICATIONS

LYNNE D. GREEN

CRC PRESS

REDES DE ALTA VELOCIDAD

JESUS GARCÍA TOMÁS

RA-MA

TODO SOBRE LAS FIBRAS OPTICAS

JUAN TUR

MARCOMBO

INTRODUCCION A LAS FIBRAS OPTICAS Y EL LASER

EDWARD L. SANFFORD

PARANINFO

SISTEMAS DE COMUNICACIONES POR FIBRAS OPTICAS

HILDEBERTO JARDÓN AGUILAR

ALFAOMEGA